



**บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด  
สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน**

โดย  
**ดร. สง่า ตั้งชาวล**


โครงการวิจัยเลขที่ 62G - MN - 2545  
ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2545

สถาบันวิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ

มีนาคม 2546



สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่รับผิดชอบ  
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร  
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น  
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบัน ฯ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายงานฉบับสมบูรณ์  
โครงการเรื่อง “บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด  
สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน”

FINAL REPORT  
“OPEN PIT OPTIMIZATION FOR EXCAVATION  
WORKS IN MINES AND QUARRIES”

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ติดต่อขอใช้แผ่นซีดี  
ได้ที่ห้องบริการหนังสืออง

รายงานฉบับสมบูรณ์  
บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด  
สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน

FINAL REPORT  
OPEN PIT OPTIMIZATION FOR EXCAVATION  
WORKS IN MINES AND QUARRIES

โดย  
สง่า ตั้งชวาล  
Ph. D. (Missouri-Rolla)

โครงการวิจัยเลขที่ 62 G - MN - 2545  
ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2545

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพมหานคร

มีนาคม 2546



ชื่อโครงการ บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด  
 สำหรับงานขุดเจาะในเมืองแร่และเหมืองหิน  
 ชื่อผู้วิจัยหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาล  
 เดือนและปี มีนาคม 2546

## บทคัดย่อ

ในขบวนการวางแผนเพื่อพัฒนาบ่อเหมืองเปิด ต้องมีขั้นตอนการประเมินผลลัพธ์ของการเปิดบ่อเหมืองที่กำหนดขีดจำกัดโครงร่างของขอบบ่อสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด การเลือกวิธีการวิเคราะห์มีการนำเสนอแบบจำลองหลายรูปแบบ ตั้งแต่การใช้แบบจำลองเชิงสองมิติ จนถึงการใช้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับลักษณะของมวลหินแร่ (มวลหิน) ที่มีรูปแบบเชิงสามมิติ กรณีศึกษาของเหมืองในต่างประเทศ ถูกนำมาใช้เป็นต้นแบบของการออกแบบโครงร่างขอบบ่อเหมืองในประเทศ เป้าหมายที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การวางแผนพัฒนาที่มีประสิทธิภาพสูงตามสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยาของแต่ละแหล่งสะสม ทำให้มีผลในทางปฏิบัติงานภาคสนามที่ได้ผลตอบแทนเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด อย่างไรก็ตามการออกแบบขุดเจาะบ่อเหมืองเปิดยังคงต้องอิงเกณฑ์ในเรื่องเสถียรภาพหน้างานขุดเจาะ กับเกณฑ์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพื่อช่วยในการออกแบบเชิงเสถียรภาพของบ่อเหมือง ทีมงานวิจัยยังได้เขียนโปรแกรมการวิเคราะห์ค่าผลลัพธ์การพังทลายแนวระนาบของการตัดความลาดหน้าเหมือง ทั้งในรูปแบบวิธีเชิงกำหนดกับรูปแบบวิธีเชิงความน่าจะเป็น

Project Title: Open pit optimization for excavation  
works in mines and quarries

Head of Investigator: Assoc. Prof. Dr. Sanga Tangchawal

Month and Year: March 2003



## ABSTRACT

In the planning process for the development of open pit, there must be steps to evaluate the result of limit boundary for the optimum ultimate pit. Choices of analysis were suggested by various models. Starting from the 2-D model until the simulation that is close to the characteristics of ore body (rock mass) in 3-D. Case studies that belong to the foreign mines were used to be the prototype for designing the optimum pit boundary in this country. An important objective is to have the efficient development plans which are based on the topography and geology of each deposit. These plans result in field operations that are given the highest benefit of net present value. The designs of excavation of open pit are still dependent on the criteria on face stability and impacts to environment. The research team was developed the package program for determine the value results of plane failure due to cutting the slope face. Methods of analysis are of both deterministic and probability techniques.

## คำนำ




รายงานฉบับนี้เป็นรายงานผลการวิจัยฉบับสุดท้าย ที่ได้ปรับปรุงแก้ไขแล้วสำหรับงานวิจัยโครงการ เรื่อง "บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน" เนื้อหาของรายงานฉบับนี้เริ่มต้นด้วยการอธิบายแหล่งแร่และแหล่งหินในประเทศ จากนั้นจึงอธิบายขั้นตอนการวางแผนเพื่อพัฒนาบ่อเหมืองเปิด การประเมินความน่าจะเป็นของแหล่งสะสมหิน การออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมือง และการนำเสนอกรณีศึกษาของเหมืองเปิด

เป้าหมายหลักของโครงการวิจัยนี้คือ ต้องการสร้างต้นแบบของการหาผลลัพธ์โครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับเหมืองหินและเหมืองแร่ในประเทศ ที่ทีมงานวิจัยได้นำเสนอทางเลือกของการออกแบบ เพื่อพัฒนาหน้างานขุดเจาะไว้หลายรูปแบบ สำหรับรูปแบบอย่างง่ายและวิศวกรสามารถออกแบบได้ด้วยตัวเองได้ ควรจะเป็นวิธีการออกแบบจำลองเชิง 2 มิติ ส่วนรูปแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนซึ่งเป็นการจำลองแบบเชิง 3 มิติซึ่งต้องใช้เวลาในการคำนวณจำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ ถึงแม้ว่าวิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่อนข้างยากมีหลายขั้นตอน และต้องปรับค่าตัวเลขหรือจัดกลุ่มข้อมูลตามข้อกำหนดของแบบจำลองชนิดนั้นๆ แต่ผลลัพธ์สุดท้ายที่แสดงโครงสร้างขอบบ่อเหมืองที่ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติ

โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Slope Cut Design ที่ทางทีมงานวิจัยได้พัฒนาขึ้นมาสามารถ ใช้วิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์เชิงกำหนดกับเชิงความน่าจะเป็น นอกจากนี้รูปแบบเชิงเรขาคณิตของชั้นตะกักด้านบนก็กำหนดให้มีความใกล้เคียงกับสภาพหน้างานขุดเจาะจริง ที่ไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวราบสามารถออกแบบให้มีมุมเอียงเล็กน้อยเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายมวลสาร

ทีมงานวิจัยคาดว่าผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อองค์กร และผู้ประกอบการโดยรวม ทั้งนี้แนวทางที่นำเสนอควรมีการทดลอง นำไปใช้ในการวางแผนงานพัฒนาภาคสนามหรือปรับแก้วิธีการให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ของหน้างานขุดเจาะ


 รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวา  
 มีนาคม 2546

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะกรรมการเงินทุนอุดหนุนการวิจัย ของสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความสนับสนุนทางด้านเงินทุนวิจัย

รายงานผลการวิจัยฉบับสุดท้ายของโครงการ ขึ้นตอนส่วนใหญ่เป็นการนำเสนอเนื้อหาที่เรียบเรียงมาจากหลายบทความในวารสาร วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกหลายฉบับและจากเอกสารผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมทางวิชาการนานาชาติ ร่วมกับเอกสารที่จัดพิมพ์โดยสมาคมหรือสถาบันเฉพาะทางเพื่อเผยแพร่ผลงาน

เนื่องจากเป้าหมายต้องการให้ผลงานวิจัยมีการประยุกต์ กับการวางแผนการขุดเจาะในภาคสนามของเหมืองแร่กับเหมืองแร่กับเหมืองหินในประเทศ เพื่อเป็นการทดสอบแบบจำลองที่ระบุไว้ของกรณีศึกษาของต่างประเทศ ข้อมูลดิบภาคสนามในประเทศจึงต้องมีการตรวจสอบและขอคำปรึกษากับวิศวกรหรือบุคลากรหน้างานขุดเจาะก่อนทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างจริงใจ สำหรับบุคลากรฝ่ายบริหารกับฝ่ายเหมือง ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยภาคสนาม และอนุญาตให้มีการสัมภาษณ์ ถ่ายรูป กับเอื้อเฟื้อข้อมูลสารสนเทศที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ได้แก่

- ในเขตจังหวัดสระบุรี: เหมืองปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ที่อำเภอแก่งคอย เหมืองปูนซิเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
- ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี: เหมืองศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ จำกัด
- ในเขตจังหวัดตาก: เหมืองแร่เฟลด์สปาร์ บริษัท พิพัฒน์กร จำกัด
- ในเขตจังหวัดพิจิตร: เหมืองแร่ยิปซัม บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

สุดท้ายนี้ หัวหน้าโครงการวิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทุกท่าน ทั้งที่ทำงานในสนามภาคสนามกับในส่วนสำนักงาน ในการร่วมเก็บข้อมูลดิบภาคสนาม วิเคราะห์ผลลัพธ์ จัดทำตารางกับรูป พิมพ์รายงาน ตลอดจนการเขียนโปรแกรมสำเร็จรูปของการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของการตัดความลาดหน้าเหมือง และผู้ช่วยวิจัยที่ร่วมงานอื่นที่เกี่ยวข้อง จนทำให้งานวิจัยโครงการนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
ปกใน	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
คำนำ	iv
กิตติกรรมประกาศ	v
สารบัญ	vi
รายการตาราง	xii
รายการรูป	xiv
บทที่ 1 บทนำของโครงการวิจัย	1
1.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานวิจัย	1
1.2 ระเบียบวิธีวิจัย	1
1.3 รูปแบบการนำเสนอผลงานวิจัย	2
บทที่ 2 เหมือนหินกับเมืองแร่ภายในประเทศ	5
2.1 แหล่งหินในประเทศ	5
2.1.1 กลุ่มหินปูน	5
2.1.2 กลุ่มหินแกรนิต	6
2.1.3 กลุ่มหินบะซอลต์	6
2.1.4 กลุ่มหินทรายและหินภูเขาไฟ	6
2.2 แหล่งแร่ในประเทศ	8
2.2.1 กลุ่มแหล่งแร่ที่เกิดเป็นลานแร่	8
2.2.2 กลุ่มแหล่งแร่ทุติยภูมิที่เป็นสายแร่ คล้ายแบบลานแร่	8
2.2.3 กลุ่มแหล่งแร่โลหะอื่น	8
2.2.4 กลุ่มแหล่งแร่โลหะอื่น	9
บทที่ 3 หลักการเบื้องต้นในการออกแบบบ่อเหมืองเปิด	10
3.1 การวางแผนก่อนการพัฒนาหน้าเหมืองเปิด	10

	หน้า	
3.1.1	กรณีศึกษาในพื้นที่	10
3.1.2	การแปลความหมายกับการประเมิน ศักยภาพของแหล่งหิน (แร่)	11
3.2	องค์ประกอบที่จำเป็นในการพัฒนาบ่อเหมืองเปิด	12
3.2.1	ปัจจัยพื้นฐานในการเปิดเหมือง	12
3.2.2	การกำหนดหรือแยกประเภทของมวลสาร	13
3.2.3	ปรากฏการณ์ของการพังทลายในมวลสาร	14
3.2.4	ระยะเวลาที่มีผลต่อการออกแบบเหมืองเปิด	15
3.3	เงื่อนไขเฉพาะที่สำคัญต่อการออกแบบเหมืองเปิด	15
3.3.1	ความสูงหน้างานขุดเจาะ	15
3.3.2	ความลาดชันของบ่อเหมืองเปิด	16
3.3.3	ระดับชั้นความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (แหล่งหิน)	18
บทที่ 4	การประเมินความเหมาะสมของเหมืองเปิด	21
4.1	เกณฑ์เบื้องต้นในการประเมินความเหมาะสมของแหล่ง	21
4.2	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (หิน)	22
4.2.1	วิธีการเชิงเรขาคณิต	22
4.2.2	วิธีหาค่าเฉลี่ยเชิงเคลื่อนที่	23
4.2.3	วิธีประเมินค่าถ่วงน้ำหนักจาก ส่วนกลับระยะทาง	27
4.2.4	วิธี Kriging	29
4.3	การจัดระบบและลำดับการผลิตหน้างานเหมืองเปิด	33
4.3.1	ขั้นตอนของการจัดลำดับการผลิตที่เหมาะสม	33
4.3.2	กรณีตัวอย่างของการจัดลำดับในการผลิต	34
4.4	การจัดการเพื่อใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่ ให้สมรรถนะสูงสุด	39
4.4.1	การวางแผนที่ดีในการใช้ เก็บรักษา และซ่อมบำรุงเครื่องจักร	40
4.4.2	การวางแผนป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการใช้ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์	47

4.4.3	แนวทางในการเก็บรักษาและซ่อมบำรุง เครื่องจักรกลและอุปกรณ์	53
4.5	การวิเคราะห์ความเหมาะสมในเชิงการลงทุน	57
4.5.1	รูปแบบที่ดีของการจัดการในองค์กร	57
4.5.2	เป้าหมายของการจัดการหน้างานเหมืองเปิด	59
4.6	การวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลงทุนขุดเจาะ เชิงเศรษฐศาสตร์	60
4.6.1	การวิเคราะห์เชิงความเป็นไปได้ของโครงการ	60
4.6.2	ตัวแปรหลักที่ใช้ในแบบจำลองเชิงเศรษฐศาสตร์	60
4.6.3	การประเมินผลกำไรของการดำเนินงาน	61
4.7	แนวคิดในเรื่องการลงทุนทำเหมืองเปิด	63
4.7.1	แนวคิดในเรื่องจำนวนเงินรับสูงสุด	63
4.7.2	แนวคิดในเรื่องผลกระทบของการลำดับ ขั้นตอนในการผลิต	64
4.7.3	การวิเคราะห์ผลผลิตเชิงความอ่อนไหว ต่อการเปลี่ยนสมมติฐาน	65
บทที่ 5	การกำหนดขีดจำกัดที่เหมาะสมในการเปิดเหมือง บนพื้นผิวดิน	68
5.1	เทคนิคของการออกแบบหาความเหมาะสมที่สุด	68
5.2	แนวทางของการกำหนดโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิด	68
5.3	เงื่อนไขทั่วไปในการกำหนดโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิด	70
5.3.1	เงื่อนไขกับขีดจำกัดของการออกแบบหาความ เหมาะสมที่สุดของเหมืองเปิด	70
5.3.2	เกณฑ์สำหรับวิธีการออกแบบโครงร่างขอบบ่อเหมือง	71
5.4	การออกแบบด้วยมือหรือการออกแบบเชิงหัตถกิจ	72
5.5	การออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	77
บทที่ 6	ขั้นตอนวิธีการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์	78
6.1	ขั้นตอนวิธีทั่วไปสำหรับการออกแบบเหมืองเปิด ด้วยคอมพิวเตอร์	78



	หน้า	
6.2	วิธี Lerchs-Grossmann	79
6.2.1	หลักการทั่วไปของวิธี Lerchs-Grossmann	79
6.2.2	กระบวนการในการหาผลรวมที่เหมาะสมที่สุดของบล็อก	80
6.2.3	ตัวอย่างการประเมินโครงร่างขอบบ่อเหมือง ที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มเติม	81
6.3	วิธีการเคลื่อนที่หรือกรวยลอย	83
6.3.1	แนวคิดของเรื่องกรวยเคลื่อนที่	83
6.3.2	หลักการพื้นฐานเทคนิคกรวยเคลื่อนที่	86
6.3.3	ตัวอย่างการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับ เทคนิคกรวยเคลื่อนที่	87
6.3.4	ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธีการเคลื่อนที่เพิ่มเติม	88
6.4	วิธีข่างานการไหลสูงสุด	91
6.4.1	หลักการเบื้องต้นของขั้นตอนวิธีการไหลสูงสุด	91
6.4.2	การออกแบบในงานเหมืองเปิดที่ใช้วิธีข่างานสูงสุด	91
6.5	หลักการสร้างบล็อก 3 มิติ ตามแนวคิด ของ Johnson and Sharp	97
6.5.1	หลักการทั่วไปของวิธี Johnson and Sharp	97
6.5.2	ขั้นตอนวิธีกับตัวอย่างของการวิเคราะห์ผลลัพธ์	99
6.6	หลักการสร้างบล็อก 3 มิติ ตามแนวคิด ของ Wilke and Wright	103
6.6.1	หลักการทั่วไปในการใช้โปรแกรมพลวัต 3 มิติ	103
6.6.2	ขั้นตอนวิธีกับตัวอย่างของการหาผลลัพธ์	103
6.7	หลักการสร้างบล็อก 3 มิติ ตามแนวคิด ของ Yamatomi et al.	110
6.7.1	สมมุติฐานใหม่สำหรับแบบจำลองกรวย 3 มิติ	111
6.7.2	แบบจำลองกรวย 3 มิติที่ใช้โปรแกรมพลวัต	111
6.7.3	ขั้นตอนกรวยเชิงพลศาสตร์ตามแนวคิด ของ Yamatomi et al.	114
6.7.4	ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลตามแนวคิด ของ Yamatomi et al.	115



	หน้า
บทที่ 7 การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพิ่มเติม	120
7.1 วิธีการปรับเปลี่ยนค่ามุมความลาดชัน ของบ่อเหมืองเปิด	120
7.2 วิธีปรับแก้มุมความลาดชันของ Onur และ Khalokakaie	121
7.2.1 การคำนวณค่ามุมความชันของการตัดความลาด	121
7.2.2 การปรับแก้มุมความชันจากผิวดินถึงก้นบ่อ	123
7.3 ขั้นตอนวิธี Lerchs-Grossmann ที่ใช้กับ ค่ามุมความชันที่แปรผันได้	126
7.3.1 ขั้นตอนวิธี Variable Slope Angles	127
7.3.2 วิธี Variable Slope Angles ที่ใช้ในการ ขุดเจาะกรวย	129
7.3.3 วิธี Multiple Variable Slope Angles ที่ใช้ ในการขุดเจาะกรวย	133
7.3.4 ตัวอย่างการคำนวณการขุดเจาะบล็อก ที่มี Variable Angles	137
7.4 ขั้นตอนวิธีอื่นสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองบล็อก 3 มิติ	140
7.4.1 แนวคิดของวิธี Transportation	140
7.4.2 แนวคิดของวิธี Mining Sequences	142
บทที่ 8 กรณีศึกษาของเหมืองเปิด	147
8.1 หลักการเบื้องต้นในการจำแนกประเภทของแหล่ง เหมืองเปิด	147
8.2 กรณีศึกษาของเหมืองหิน	148
8.2.1 การหาค่าความเหมาะสมที่สุดของการ ระเบิดหินให้แตกหัก	148
8.2.2 เกณฑ์ในการพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมด ของเหมืองเปิด	157
8.2.3 กรณีศึกษาเรื่องค่าใช้จ่ายสำหรับเหมืองหิน ในการผลิตหินย่อย	164
8.2.4 กรณีศึกษาเรื่องค่าใช้จ่ายในการผลิตหินเพิ่มเติม	169

	หน้า	
8.3	กรณีศึกษาของเหมืองแร่	171
8.3.1	กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่ใช้ค่า Stripping Ratio	171
8.3.2	กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่ใช้แบบจำลองของบล็อก	180
8.3.3	กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่คำนวณความชันเปลี่ยนได้ ในการขุดเจาะ	189
8.3.4	กรณีศึกษาเหมืองแร่ในประเทศ	196
8.3.4.1	เหมืองแร่เฟลด์สปาร์ บริษัท พิพัฒนกร จำกัด	197
8.3.4.2	เหมืองแร่ลิปซัม บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)	202
บทที่ 9	บทสรุปของโครงการวิจัย	209
9.1	แนวทางเบื้องต้นของการออกแบบบ่อเหมืองเปิด	209
9.2	ขั้นตอนวิธีเพิ่มเติมของการออกแบบบ่อเหมืองเปิด	209
9.3	แนวทางมาตรฐานของการออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิด	210
9.3.1	การออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิดโดยภาพรวม	211
9.3.2	การออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิดเฉพาะกรณี	217
9.3.2.1	การออกแบบตามลักษณะการวางตัวมวลสินแร่	217
9.3.2.2	การออกแบบตัดความลาดชันภายในขอบบ่อ เหมืองที่เหมาะสมที่สุด	222
9.3.2.3	การออกแบบเฉพาะเป็นกรณีพิเศษของโครงสร้าง ขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด	231
บรรณานุกรม		233
ภาคผนวก	โปรแกรมการตัดความลาดในบ่อเหมือง	243
10.1	คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรมสำเร็จรูป	243
10.1.1	การจัดเตรียมกับการติดตั้งโปรแกรม Slope Cut Design	243
10.1.2	ขั้นตอนการจัดเตรียมกับการติดตั้งโปรแกรม	244
10.2	การใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป Slope Cut Design	248
10.2.1	เงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการณ์ของมวลสารที่ขุดเจาะ	248
10.2.2	ตัวอย่างการแสดงผลสำหรับข้อมูลออกที่ได้จากการทำปฏิบัติการ	254

## รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	ด้านซ้ายระบุค่าเกรดแต่ละหลุมเจาะ และค่าพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมที่มีหลุมเจาะตรงกลาง (รูปที่ 4.1) ด้านขวาเป็นการคำนวณ 3 ขั้นตอน	24
ตารางที่ 4.2	ด้านซ้ายระบุค่าเกรดแต่ละหลุมเจาะ และค่าพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมที่มีหลุมเจาะตรงกลาง (รูปที่ 4.2) ด้านขวาเป็นการคำนวณ 3 ขั้นตอน	25
ตารางที่ 4.3	ด้านบนของตารางแสดงผลการคำนวณของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนักที่ผูกพันกับระยะทางโดยใช้สมการ 4.2 ด้านล่างของตารางเป็นการหาค่าเฉลี่ยเกรดของโลหะทองแดงในบริเวณ โดยใช้สมการ 4.1	28
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจถ่านหิน แสดงข้อมูลที่เป็นค่าความหนาชั้นถ่านหินกับระยะห่างหลุมเจาะ เพื่อหาผลเฉลี่ยของค่า $\mathcal{N}(h)$ , semivariogram	30
ตารางที่ 4.5	ผังการคำนวณตัวเลขที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ค่า NPV) สำหรับบ่อเหมืองด้านแบบของรูปที่ 4.9 ที่มีการจัดลำดับการทำเหมือง 5 รูปแบบ	38
ตารางที่ 6.1	ผลการวิเคราะห์ที่ได้โครงร่างผ่านฐานบล็อกของแต่ละระดับชั้นความสูงที่มีค่า level ที่ $k = 1, 2, 3, 4$ ตามลำดับ	100
ตารางที่ 7.1	สมการที่เกี่ยวข้องกับ variable slope angles โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าตัวแปรทั้งที่เป็นระยะทางและค่ามุม	131
ตารางที่ 7.2	สมการที่เกี่ยวข้องกับ multiple variable slope angles โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าตัวแปรทั้งที่เป็นค่าระยะทางและค่ามุม	135
ตารางที่ 7.3	มุมความชันของแต่ละพื้นที่สำหรับรูปกรวย 2 มิติที่มีแนวขวาง northing section	137
ตารางที่ 7.4	ข้อมูลเข้าที่จำเป็นที่ต้องนำไปคำนวณในโปรแกรมซอฟต์แวร์กำหนดการเชิงเส้นใน 3 ระบบ โดยอิงกับแบบจำลองของรูปที่ 7.12	143
ตารางที่ 8.1	มิติของกันหินเสริมที่แปรเปลี่ยนตามระยะและขนาดความสูงของชั้นตะพัก (หน่วยเป็นเมตร)	149

ตารางที่ 8.2	เกณฑ์การยอมรับเมื่อวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างความเสี่ยงกับตัวเลขเชิงเสถียรภาพสำหรับเหมืองเปิดที่ใช้ได้ทั้งเหมืองหินและเหมืองแร่	153
ตารางที่ 8.3	ค่าใช้จ่ายจริงในการผลิตหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่	158
ตารางที่ 8.4	ค่าใช้จ่ายจริงในการเจาะหลุมระเบิดในเหมืองหินเปิดขนาดเล็กถึงปานกลาง	161
ตารางที่ 8.5	การประเมินรูปแบบแพดเทิร์นของผังหน้าระเบิด กับค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตหินต่อตัน ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการเจาะ การระเบิด การขนตัก การลำเลียง ไปปากโม้ คำนวณร่วมกับสมรรถนะของการทำงาน	170
ตารางที่ 8.6	การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนที่ใช้ค่าอัตราส่วนการขุดเจาะเป็นเกณฑ์	176
ตารางที่ 8.7	แบบจำลองแร่ที่ใช้การบรรจุข้อมูลในบล็อกเมทริกซ์	184
ตารางที่ 8.8	การวางแผนระยะยาวในการประเมินค่าใช้จ่ายทั้งระบบ	184
ตารางที่ 8.9	การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของการผลิตและถลุงแร่ เพื่อกำหนดขอบบ่อเหมือง	185
ตารางที่ 8.10	ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะสินแร่และกากที่แปรผันตามความลึกแต่ละระดับชั้น	190
ตารางที่ 8.11	ค่ามุมความลาดชันหลักที่แตกต่างกันทั้ง 4 พื้นที่กับ 4 บริเวณผังหน้าเหมือง (ดูรูปที่ 8.24 ประกอบ)	194
ตารางที่ 8.12	ผลลัพธ์การวิเคราะห์หาขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด ที่ใช้ขั้นตอนวิธีของ multiple variable slope angles (ใช้ข้อมูลเข้าจากผังภาพที่ 8.24 ตารางที่ 8.10 และ 8.11)	195
ตารางที่ 8.13	ข้อมูลสภาพทั่วไปกับข้อมูลด้านการผลิตของเหมืองยิปซัม	207
ตารางที่ 9.1	การวางแผนเบื้องต้นสำหรับเหมืองหินปูนที่ต้องการควบคุมคุณภาพหินปูนที่ผลิตก่อนนำส่งโรงถลุงโลหะ (Shuzhang Huang, 1993)	212
ตารางที่ 9.2	ผลลัพธ์จากการวางแผนเพื่อทำเหมืองหินเป็น 5 คาบเวลาใช้โปรแกรมเชิงเส้นที่เขียนโดย Shuzhang Huang (1993)	213
ตารางที่ 9.3	สมการต้นแบบในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ที่กำหนดให้มวลความลาดมีค่ามุมเอียงเทของชั้นตะพักด้านบน แต่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง	227
ตารางที่ 9.4	สมการต้นแบบในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ที่กำหนดให้มวลความลาดมีค่ามุมเอียงเทของชั้นตะพักด้านบน และมีรอยแตกจากแรงดึง	228

## รายการรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	แหล่งหินในเขตภาคกลาง ในภาพเป็นเหมืองหินปูนขนาดปานกลาง ของโรงโม่หินศิลาสากลพัฒนา อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา	7
รูปที่ 2.2	เหมืองแร่ขนาดใหญ่ ในภาพเป็นเหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลิตถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ในโรงไฟฟ้าของ กฟผ.	7
รูปที่ 3.1	ภาพสเก็ทซ์ของชั้นตะกัก แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของชั้นตะกัก	17
รูปที่ 3.2	ผังภาพของบ่อเหมืองเปิด ตัวเลขในแต่ละส่วนวงเป็นค่าเฉลี่ย มุมลาดชัน	17
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมิติของบ่อเหมืองเปิด กับระดับลึกของ การผลิตแร่ (หิน)	19
รูปที่ 4.1	วิธีการใช้รูปหลายเหลี่ยมเพื่อคำนวณค่าเกรดเฉลี่ยของ พื้นที่แหล่งสะสม	24
รูปที่ 4.2	วิธีการใช้บล็อกเล็ก ๆ ในกรอบรูปหลายเหลี่ยมที่มีผลต่อ การคำนวณในแต่ละหลุมเจาะ	25
รูปที่ 4.3	การใช้บล็อกเล็ก ๆ แทนมวลสินแร่ 3 มิติที่ใช้การหาค่า เฉลี่ยเคลื่อนที่	26
รูปที่ 4.4	การคำนวณเชิงสถิติเพื่อเลือกข้อมูลเข้าและคัดข้อมูลออก โดยใช้วงรี (หรือรูปอื่นที่เหมาะสม) ที่แบ่งออกเป็นจุดภาค	26
รูปที่ 4.5	วิธีการประมาณค่าจากการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนผกผัน กับระยะทาง จุดประเมินกำหนดกรอบของการคำนวณเป็น ตารางกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัส	28
รูปที่ 4.6	กราฟที่สร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาค่า $\gamma(h)$ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ พึ่งพิงกับระยะทางและทิศทาง ในรูปสมมุติให้การประมาณค่า อยู่ในทิศทางเดียวกัน	30
รูปที่ 4.7 ก.	ผังของแผนที่ผลการวิเคราะห์ แสดงเกรดที่เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ของโลหะ Zn แต่ละหลุมเจาะ	32



รูปที่ 4.7 ข.	การสร้าง semivariogram ของเปอร์เซ็นต์โลหะ Zn ในรูปแสดงผลการเทียบระยะทาง จำนวน 2 แนวทาง	32
รูปที่ 4.7 ค.	ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละหลุมเจาะที่ประมาณค่าจากวิธี Kriging	32
รูปที่ 4.8	บ่อเหมืองดินแบบที่แบ่งเป็นบล็อกสินแร่ (เครื่องหมาย O) บล็อกที่เป็นวัสดุที่ไม่ต้องการและไม่สามารถซื้อขายได้ (เครื่องหมาย W)	36
รูปที่ 4.9	การจัดลำดับขั้นตอนแบบง่ายที่เป็นรูปแบบที่ 1	36
รูปที่ 4.10	การจัดลำดับขั้นตอนแบบจุดเจาะสลัปที่เป็นรูปแบบที่ 2	36
รูปที่ 4.11	การจัดลำดับขั้นตอนแบบจุดเจาะสลัปที่เป็นรูปแบบที่ 3	37
รูปที่ 4.12	การจัดลำดับขั้นตอนแบบจุดเจาะสลัปที่เป็นรูปแบบที่ 4	37
รูปที่ 4.13	การจัดลำดับขั้นตอนแบบจุดเจาะสลัปที่เป็นรูปแบบที่ 5	38
รูปที่ 4.14	ลักษณะการกองหินหน้างานระเบิดที่เหมาะสมกับรถขุดชนิดหนึ่ง	46
รูปที่ 4.15	ลักษณะงานการตัดร่องแนวยาว (trench) กองวัสดุหน้างานค่อนข้างแคบ และพื้นที่ระดับฐานค่อนข้างแน่น เหมาะสำหรับเลือกใช้รถตักเศษแบบมีล้อดินตะขาบ นิยมใช้ในเหมืองถ่านหิน	46
รูปที่ 4.16	ผังภูมิของการบริหารงานในแต่ละหน่วยหลักทั้ง 4 หน่วย ในกรอบสี่เหลี่ยมเล็กเป็นกิจกรรมของการทำงาน	58
รูปที่ 4.17	เส้นโค้งที่ใช้หาค่ากำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเหมืองเปิดตัวอย่าง	64
รูปที่ 4.18	การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ ที่อิงกับค่าของมูลค่าปัจจุบันสุทธิเทียบกับค่ากำลังการผลิต เพื่อระบุทางเลือกไว้ประกอบการตัดสินใจหลายแนวทาง	66
รูปที่ 5.1	มวลสินแร่ที่มีผังภาพเป็นรูปวงรี และแสดงแนวภาพตัดขวางทั้ง 3 ประเภท	73
รูปที่ 5.2	ตัวอย่างเส้นขอบบ่อเหมือง 2 เส้นที่ปรากฏในภาพตัดขวางที่เลือก	73
รูปที่ 5.3	กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราส่วน waste/ore กับราคาซื้อขายหน้าเหมืองตามเปอร์เซ็นต์เกรดสินแร่ทองแดง (copper or grade)	75
รูปที่ 5.4	ภาพสเก็ทซ์แสดงส่วนต่างๆ ของภาพตัดขวางแนวตั้งที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบบ่อเหมืองเปิด (จาก D. Armstrong (1990), Surface Mining: 2 <sup>nd</sup> Edition, Vol. 1, p. 466)	75

รูปที่ 5.5	ผังภาพบ่อเหมืองที่เกิดจากการปรับเรียบเส้นโค้งแล้ว ในผังแสดงค่าอัตราส่วนการขุดเจาะระหว่าง waste/ore ที่มีค่าแตกต่างกัน	76
รูปที่ 6.1	ตัวอย่างการระบุค่าพจน์ตัวแปรของสมการที่ 6.1 ลงในบล็อก	80
รูปที่ 6.2	การหามูลค่าบล็อกของ $P_{i,j}$ ที่ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติทิศทางไปด้านหน้า	81
รูปที่ 6.3	ภาพตัดขวางแนวตั้งของกลุ่มบล็อกที่ใช้เป็นตัวอย่างวิเคราะห์ผลลัพธ์	82
รูปที่ 6.4	กระบวนการค้นหามูลค่าสุทธิตามขั้นตอนวิธีของ Lerchs-Grossmann	84
รูปที่ 6.5	โครงสร้างขบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด และให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด	84
รูปที่ 6.6	รูปแบบทรงกรวยที่เกิดจากการฉายเส้นจากตำแหน่งฐานของบล็อก	85
รูปที่ 6.7	กระบวนการทำซ้ำ โดยการฉายเส้นจากฐานบล็อกที่สองที่กรวยถูกแรเงาและครอบคลุมบางส่วนของกรวยอันแรก	86
รูปที่ 6.8	ภาพตัดขวางกลุ่มบล็อกรูปกรวยกลับหัว ที่มีค่ามุมลาดชัน 45 องศา (ทางด้านซ้าย) กับมีมุมความลาดชัน 26.6 องศา (ทางด้านขวา)	86
รูปที่ 6.9	เทคนิคกรวยเคลื่อนที่แบบ positive moving cone โครงสร้างขบบ่อเหมืองที่เหมาะสม คือรูปที่ 6.9 c เนื่องจากให้ค่า NPV สูงสุด	88
รูปที่ 6.10	ภาพหน้าตัดขวางแนวตั้งผ่านกลุ่มบล็อก ที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐกิจทั้งบวกและลบ	89
รูปที่ 6.11	แบบจำลองกรวยหัวกลับที่ตัดชั้นตะกักเป็นแบบขั้นบันได	89
รูปที่ 6.12	โครงสร้างขบบ่อเหมืองสุดท้ายที่ให้ค่าอัตราส่วนการขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุด	90
รูปที่ 6.13	ข่ายงานแบบง่ายในรูปข่ายงานมี 4 จุดต่อ ค่า $N = (s, 1, 2, t)$ และมีเส้นเชื่อม 5 เส้น ค่า $A = [(s, 1), (s, 2), (1, 2), (1, t), (2, t)]$	91
รูปที่ 6.14	กลุ่มบล็อกที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐกิจและใช้วิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1	92
รูปที่ 6.15	โครงข่ายงานที่ยกเป็นตัวอย่างของบ่อเหมืองเปิด	93
รูปที่ 6.16	ข่ายงานที่เป็นผลเฉลยของการหาขบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด	93
รูปที่ 6.17	ภาพตัดขวางแนวตั้งกลุ่มบล็อกเป็นกรณีตัวอย่าง 2 ที่ใช้ข่ายงานการไหลวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด	94
รูปที่ 6.18	โครงข่ายงานแสดงผลเฉลยจากการทำซ้ำตามวิธีแรก จากตัวอย่างที่ 2	96
รูปที่ 6.19	โครงข่ายงานแสดงผลเฉลยจากการทำซ้ำตามวิธีที่สอง จากตัวอย่างที่ 2	96

	หน้า	
รูปที่ 6.20	ผลเฉลยของตัวอย่างที่ 2 เป็นโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด	97
รูปที่ 6.21	แบบจำลอง 3 มิติ ที่ใช้อธิบายแนวคิดวิธี Johnson and Sharp	98
รูปที่ 6.22	ภาพตัดขวางของบล็อก ตัวเลขมูลค่าเชิงเศรษฐกิจระบุไว้ในแต่ละบล็อก	98
รูปที่ 6.23	ผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในรูปเป็นการแสดงค่าแต่ละระดับชั้นของภาพตัดขวางจาก section 1 ( $j=1$ )	100
รูปที่ 6.24	กลุ่มบล็อกที่เป็น longitudinal cross section	101
รูปที่ 6.25	โครงร่างที่เหมาะสมที่สุดของรูปที่ 6.24	101
รูปที่ 6.26	โครงร่างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุด แสดงผลลัพธ์ขอบ longitudinal cross section ทั้ง 5 แนวตัด	102
รูปที่ 6.27	กลุ่มบล็อก 3 มิติ ที่มีการกำหนดจำนวนบล็อกที่ใกล้เคียงกับบล็อกพื้นฐาน $[b_{i,j,k}]$ เป็นจำนวน 12 บล็อก	104
รูปที่ 6.28	บล็อกต้นแบบ 3 มิติที่ระบุมูลค่าเชิงเศรษฐกิจลงบนแต่ละบล็อก $[m_{i,j,k}]$ ในรูปมี 5 ภาพตัดขวาง หรือ $k$ มี 5 ค่า ( $k=1,2,3,4,5$ )	108
รูปที่ 6.29	ผลการวิเคราะห์จากบล็อกต้นแบบ (รูปที่ 6.28) ที่ได้โครงร่างของขอบบ่อเหมืองเชิง 3 มิติที่เหมาะสมที่สุด ใช้ขั้นตอนวิธี Wilke and Wright	109
รูปที่ 6.30	แบบจำลองบล็อก 3 มิติ ตัวเลขที่อยู่ตรงปลายหัวลูกศรแสดงโอกาสความน่าจะเป็นถึง 8 ทิศทาง ที่ใช้การวิเคราะห์แบบ forward path	112
รูปที่ 6.31	ลักษณะที่กรวยกลมถูกนำมาใช้อธิบาย รูปบนเป็นภาพฝั่งของกรวย เป็นภาพและรูปร่างตัดขวางในแนว AA'	112
รูปที่ 6.32	โอกาสของการจัดหมู่ที่มีความน่าจะเป็นไปได้ สำหรับ บล็อก 3 บล็อกที่เป็นบล็อกข้างเคียง ตามวิธี DC/W	113
รูปที่ 6.33	โอกาสของการจัดหมู่ที่มีความน่าจะเป็นไปได้ สำหรับ บล็อก 12 บล็อกที่เป็นบล็อกข้างเคียง ตามวิธี DC/SS	116
รูปที่ 6.34 a	ภาพตัดขวางกลุ่มบล็อกที่สมมุติเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์	117
รูปที่ 6.34 b	ผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์แยกส่วนเป็นกรวย 2 กรวย สำหรับ บล็อก $b_{4,4}$ กับบล็อก $b_{4,6}$	117



รูปที่ 6.34 c	ผลลัพธ์ที่เกิดจากการเลือกวิเคราะห์แบบใหม่ที่ใช้การขุดเจาะร่วมกันระหว่างบล็อก 2 บล็อกที่อยู่ระดับชั้นเดียวกัน	117
รูปที่ 6.35	แผนภาพเค้าร่างเพื่อแสดงเป็นตัวอย่างของขั้นตอนวิธี Selectively Extraction Dynamic Cone	118
รูปที่ 7.1	กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดของค่ามุมความชันที่อิงกับค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย	122
รูปที่ 7.2	กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นของค่ามุมความชันที่อิงกับค่าเปอร์เซ็นต์โอกาสของการพังทลาย	122
รูปที่ 7.3	การเปิดหน้างานเหมืองที่มีการขุดเจาะแบบตัดชั้นตะพักเป็นขั้นบันได	124
รูปที่ 7.4	มุมความชัน โดยรวมจะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความชันแต่ละระดับชั้น ตัวอย่างภาพแสดงค่ามุมความชัน โดยรอบบ่อเหมืองรูปร่างกลม ในรูปกำหนดให้มีการตัดชั้นตะพัก (bench) เพียงชั้นเดียว	124
รูปที่ 7.5	การปรับแก้ค่ามุมความชันของผังบ่อเหมืองในแต่ละจุดภาค ผังภาพ 7.5 a เป็นการปรับแก้แบบรูปร่างกลม ผังภาพ 7.5 b เป็นการปรับแก้รูปวงรี	125
รูปที่ 7.6	การปรับแก้ค่ามุมความชันของผังบ่อเหมืองในแต่ละจุดภาค ผังภาพ 7.6 a เป็นค่ามุมความชันที่แสดงบนจุดปลายแต่ละจุดภาค ก่อนมีการปรับแก้ ผังภาพ 7.6 b เป็นการปรับแก้ค่ามุมความชันของทั้ง 4 จุดภาคแล้ว	125
รูปที่ 7.7	แบบจำลองบล็อกของแหล่งสะสมและระบบพิคัดของบล็อก	128
รูปที่ 7.8	ต้นแบบกรวยที่ใช้ในการคำนวณค่ามุมความชันของแบบจำลองบล็อก	128
รูปที่ 7.9	การขุดเจาะมวลสินแร่ที่ตั้งสมมุติฐานให้เป็นการขุดเจาะในกรวย	130
รูปที่ 7.9 a	เป็นผังกริดของมวลสินแร่ที่ประกอบด้วย 2 แนวตัดขวาง	
รูปที่ 7.9 b	เป็นภาพตัดขวางแนว AB หรือเรียก northing section	
รูปที่ 7.9 c	เป็นภาพตัดขวางแนว CD หรือเรียก easting section	
รูปที่ 7.10	พื้นที่ส่วนหนึ่งของจุดภาครูปวงรี ตำแหน่งจุด O เป็นจุดกึ่งกลางของบล็อกพื้นฐาน ค่าระยะ a กับ b วัดจากจุดกึ่งกลางบล็อกเล็กที่ก้ำกึ่งตรวจสอบหาค่าตัวแปรทั้งสอง	132
รูปที่ 7.11	กราฟพระนุกิตทางที่ใช้เป็นตัวแทนภาพตัดขวาง แนว north-south ของบล็อก 3 มิติ กำหนดให้ความลาดชัน east face = $60^\circ$ และความชัน west face = $45^\circ$	132

รูปที่ 7.12	กรวยทรง 2 มิติ ที่แสดงการหาปริมาตรของมวลสารที่ถูกขุดเจาะในภาพตัดขวางนี้ คำนวณความชันแปรผันของกรวยมีความแปรผันได้หลายค่า พื้นที่ของกรวยที่แตกต่างถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน	134
รูปที่ 7.13	แบบจำลองบล็อก 3 มิติในระบบคาร์ทีเซียน ใช้เป็นตัวแทนของการคำนวณเพื่อจัดลำดับขุดเจาะบล็อกเล็กๆ ในแบบจำลองรูปลูกบาศก์	142
รูปที่ 7.14	แผนภาพเค้าร่างระบบ LP ที่อิงผลงานของ Schuzhang Huang ใช้เป็นโครงสร้างในการเขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ของแบบจำลองบล็อก 3 มิติ พจน์ตัวแปรเสริมระบุความหมายภาษาอังกฤษไว้ในกรอบเล็กได้แผนภาพ	145
รูปที่ 8.1	การตัดชั้นตะกอกจากระดับบนสุดที่เปิดหน้าเหมืองจนถึงระดับต่ำสุดที่มีการผลิตหิน การออกแบบวิธีนี้เป็นการคำนวณมุมความชันของชั้นตะกอกแต่ละชั้นให้คงที่ ตัวเลขแสดงระยะมีหน่วยเป็นเมตร	150
รูปที่ 8.2	การเสริมชั้นคั่นหินบนตะกอก เพื่อป้องกันผลกระทบจากหินปลิวและหินที่หล่นใส่จากการทำงานของเครื่องจักรกลด้านบนตะกอก	150
รูปที่ 8.3	ไดอะแกรมทางลาดที่ตัดเชื่อมระหว่างชั้นตะกอกในบ่อเหมืองเปิด	151
รูปที่ 8.4	การตัดทางลาด 5 ระดับที่มีเส้นทางเวียนเป็นก้นหอยแบบทวนเข็มนาฬิกา	152
รูปที่ 8.5	การตัดทางลาด 5 ระดับที่มีเส้นทางเวียนเป็นก้นหอยแบบตามเข็มนาฬิกา	152
รูปที่ 8.6	กราฟการประเมินค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาเหมืองหิน	156
รูปที่ 8.7	การสร้างกราฟค่าใช้จ่ายรวมที่เป็นผลมาจากการพังทลาย	156
รูปที่ 8.8 ก	หน้าเหมืองหินปูนของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี	165
รูปที่ 8.8 ข	หน้าเหมืองหินปูนของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี	166
รูปที่ 8.9 ก	หน้าเหมืองหินปูนของบริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ จำกัด อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี	167
รูปที่ 8.9 ข	โรงบดย่อยหิน ที่ทำการผลิตหินย่อยระหว่างหินปูนสลับหินแกรนิต บริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ จำกัด อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี	168
รูปที่ 8.10	การวางแผนหาแพดเทิร์นการระเบิดที่เหมาะสม สำหรับเหมืองหิน	170

	หน้า	
รูปที่ 8.11	ภาพตัดขวางแสดงมวลสินแร่เหล็กของแหล่ง TAZADIT (ไม่ได้กำหนดมาตราส่วนไว้) ในหินชุด Itabirite	172
รูปที่ 8.12	ภาพตัดขวางของปัญหาที่ต้องการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดเมื่อทำการเปิดเหมืองลึกลงไปอีกหนึ่งระดับ หรือถึงระดับที่พอดีกับจุดคุ้มทุน	172
รูปที่ 8.13	ไดอะแกรมขอบเขตของการขุดเจาะจาก $n_1$ ถึง $n_2$ level สำหรับส่วนที่ไม่เป็นสินแร่ (W) กับส่วนที่เป็นสินแร่เหล็ก (W)	175
รูปที่ 8.14	กราฟการพยากรณ์ระดับลึกที่คุ้มทุน กำหนดราคาของสินแร่ที่ค่า $P_0$	175
รูปที่ 8.15	การวางแผนการขุดเจาะเพื่อนำสินแร่เหล็กที่ระดับความลึก $n$ การสลับปีการทำงานที่ขุดเจาะและขนย้ายลำเลียงออกจากบ่อเหมือง	176
รูปที่ 8.16	ผลของการแปลความหมายธรณีวิทยาแหล่งแร่ผิดพลาด ทำให้ต้องสูญเสียสินแร่ไป พร้อมกับสูญเสียค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะส่วนที่ไม่จำเป็น	178
รูปที่ 8.17	ภาพผังการออกแบบขอบบ่อที่ระดับความลึก 364 เมตร มีทางเลือกในการวิเคราะห์ 3 แนวทาง ได้แก่ แนวทางแผนผัง $A_1$ , $A_2$ และ $A_3$	179
รูปที่ 8.18	ผังภาพและภาพตัดขวางแนวตั้งแสดงธรณีวิทยาแหล่งแร่ทองแดงในบริเวณ	180
รูปที่ 8.19	การกำหนดมุมความลาดชันจากผังขอบบ่อเหมืองในปี ค.ศ. 1979	182
รูปที่ 8.20 ก	ผังแสดงขอบบ่อปัจจุบัน กับบริเวณอื่นที่วางแผนขุดเจาะในอนาคต	183
รูปที่ 8.20 ข	ภาพตัดขวางแนว AB ของขอบบ่อเหมืองที่แสดงตัวเลขลำดับชั้นการขุดเจาะ พื้นที่บางแห่งการขุดเจาะไม่คุ้มทุนในช่วงระยะเวลาที่ประเมินผล	183
รูปที่ 8.21	บล็อกมวลสินแร่ 3 มิติ ที่ใช้เป็นตัวแทนการประเมินผลของบริษัทเหมืองแร่ทองแดง บริษัท Kennecott Copper Corp. (KCC)	185
รูปที่ 8.22	การประเมินการลงทุนเพื่อหาค่าขุดเจาะสุทธิของบล็อกดินแบบหน่วยสกุลเงินเป็นดอลลาร์สหรัฐอเมริกา	187
รูปที่ 8.23	ภาพกราฟิกแสดงกรวยหน้าตัดของบล็อกตัวแทนที่ใช้ในการกำหนดขอบบ่อเหมือง	188

	หน้า
รูปที่ 8.24	190
ผังภาพบริเวณโซนสายแร่ของเหมือง Björkdal ในประเทศสวีเดน พื้นที่ของการคำนวณแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ และมี 4 หน่วยงาน [ดูรูปบล็อก 3 มิติที่ใช้เป็นต้นแบบ แสดงไว้ในรูปที่ 7.7 บทที่ 7]	
รูปที่ 8.25	192
ภาพตัดขวางแสดงโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดแสดงเป็นเส้นทึบดำรูปที่เป็นภาพตัดขวาง มีการตัดในแนว northing 120.0 เมตร (ของผังรูปที่ 8.24) และมีการปรับขอบบ่อเหมืองให้เรียบ มาตรฐานเท่ากับ 1/4681	
รูปที่ 8.26	193
ภาพตัดขวางแสดงโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดแสดงเป็นเส้นทึบดำรูปที่เป็นภาพตัดขวาง มีการตัดในแนว easting 150.0 เมตร (ของผังรูปที่ 8.24) และมีการปรับขอบบ่อเหมืองให้เรียบ มาตรฐานเท่ากับ 1/6122	
รูปที่ 8.27	198
ภาพถ่ายมุมกว้างของแหล่งน้ำแสงของเหมืองแร่เฟลด์สปาร์ของบริษัท พิพัฒนา จำกัด	
รูปที่ 8.28	199
ขอบเขตประทานบัตรเหมืองแร่เฟลด์สปาร์ในแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:50,000 ระวัง 4842 I แผ่นบ้านน้ำดิบ	
รูปที่ 8.29	199
สมมุติฐานการเกิดของแร่เฟลด์สปาร์ในแหล่งน้ำแสง จากแผนที่เหมืองที่ปรับเป็นมาตรฐาน 1:10,000 (อิงพิัดจากแผนที่ 1: 50,000)	
รูปที่ 8.30	203
ภาพถ่ายมุมกว้างของแหล่งแร่ยิปซัม บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)	
รูปที่ 8.31	205
ขอบเขตประทานบัตรของเหมืองแร่ยิปซัม ที่ตำบลวังจี้ จังหวัดพิจิตร	
รูปที่ 8.32	205
ขั้นตอนของผังการทำเหมืองแร่ยิปซัม ที่ตำบลวังจี้ จังหวัดพิจิตร	
รูปที่ 9.1	214
ผังหน้าเหมืองที่เป็นผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้น แสดงตำแหน่งของบล็อก (เป็นตัวเลขอารบิก) ระหว่างการทำเหมืองในคาบเวลาที่ 2 ของการตัดชั้นตะพักที่ 3 เพื่อการพัฒนาเหมืองหินปูน (Zhuzhang Huang, 1993)	

รูปที่ 9.2	ผังหน้าเหมืองที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ลากเส้นต่อแนวโครงร่าง ขอบบ่อเหมืองเปิด แสดงบล็อกที่มีลำดับการพัฒนาต่างกัน	215
รูปที่ 9.3	ผังหน้าเหมืองที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ลากเส้นต่อแนวโครงร่าง ขอบบ่อเหมืองเปิด และใช้สีเขียวพื้นที่ฝั่งบล็อกหน้าเหมือง สีผังพื้นที่บล็อกที่มีลำดับการพัฒนาต่างกัน ถูกระบายสีต่างกัน	216
รูปที่ 9.4	แบบจำลองการวางตัวของมวลสินแร่ ที่วางตัวในแนวคิงแบบ circular pipe	218
รูปที่ 9.5	แบบจำลองการวางตัวของมวลสินแร่ ที่วางตัวในแนวเอียงเท แบบ tabular (Plewman, 1970)	218
รูปที่ 9.6 ก	ผังหน้าตัดของแบบจำลองการวางมวลสินแร่ที่ปรับปรุงจาก รูปที่ 9.5 (Stuck, 1970)	220
รูปที่ 9.6 ข	ภาพตัดขวางของแบบจำลองการวางมวลสินแร่ที่ปรับปรุงจาก รูปที่ 9.5 (Stuck, 1970)	220
รูปที่ 9.7	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลายตามแนวระนาบ ของมวลสารที่แห้ง ไม่มีรอยแตกของแรงคิง	224
รูปที่ 9.8	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลายตามแนวระนาบ ของมวลสารที่เปียก ไม่มีรอยแตกจากแรงคิง	224
รูปที่ 9.9	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลายตามแนวระนาบ ของมวลสารที่เปียก ไม่มีรอยแตกจากแรงคิงอยู่ในพื้นผิวด้านบน ของชั้นตะกัก	225
รูปที่ 9.10	รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลายตามแนวระนาบ ของมวลสารปกติ มีรอยแตกจากแรงคิงอยู่ในด้านหน้าความลาด	225
รูปที่ 10.1	หน้าจอของคอมพิวเตอร์ เมื่อเริ่มเรียกโปรแกรมย่อย Setup.exe	245
รูปที่ 10.2	หน้าจอที่ต้องการให้ผู้ทำปฏิบัติการยืนยันเรื่องการจัดเตรียม	245
รูปที่ 10.3	คำแนะนำก่อนเริ่มกระบวนการจัดเตรียม โปรแกรม Slope Cut Design	246
รูปที่ 10.4	ตำแหน่งสมมุติที่ผู้ทำปฏิบัติการเลือก drive และ directory	246
รูปที่ 10.5	ผลสรุปเมื่อจัดเตรียมเสร็จแล้ว และกำลังจะเริ่มการติดตั้ง โปรแกรมสำเร็จรูป	247
รูปที่ 10.6	หน้าจอเมื่อการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ แต่ผู้ทำปฏิบัติการต้องเลือก กดปุ่มเมาส์ ตรงตำแหน่ง Finish ด้วย	247



	หน้า	
รูปที่ 10.7	หน้าจอที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องเลือกประเภทของมวลสาร ก่อนเริ่มกระบวนการป้อนข้อมูลเข้าและคำนวณค่าผลลัพธ์	249
รูปที่ 10.8	เงื่อนไขและรูปแบบที่โปรแกรม Slope Cut Design หาค่าผลลัพธ์ เชิงเสถียรภาพจากการพังทลายตามแนวระนาบได้	249
รูปที่ 10.9	ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องป้อน ข้อมูลเข้า สำหรับ dry case	250
รูปที่ 10.10	ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องป้อน ข้อมูลเข้า สำหรับ wet case	250
รูปที่ 10.11	ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องป้อน ข้อมูลเข้า สำหรับ natural slope with tension crack in the upper slope surface	251
รูปที่ 10.12	ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องป้อน ข้อมูลเข้า สำหรับ natural slope with tension crack in the slope face	252
รูปที่ 10.13	เมนูการป้อนข้อมูลเข้า สำหรับตัวอย่างการตัดความลาดที่เป็น natural slope with tension crack in the slope face	252
รูปที่ 10.14	แสดงการทำการสุ่ม กับค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ของตัวอย่าง ความลาดที่เป็น natural slope with tension crack in the slope face	253



# บทที่ 1

## บทนำของโครงการวิจัย

ในการวางแผนพัฒนาหน้าเหมืองเปิด ทั้งในส่วนที่เป็นเหมืองหินหรือเหมืองแร่ การปฏิบัติงานหน้าเหมืองเป็นสิ่งสำคัญ ที่จัดเป็นผลต่อเนื่องถึงประสิทธิภาพของการผลิตหิน (สินแร่) ในบ่อเหมือง ดังนั้นการกำหนดขนาดของขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสม ทำให้การวางแผนการจัดลำดับขั้นตอนการผลิตง่ายขึ้น ทั้งนี้การวางแผนที่มีประสิทธิภาพทำให้สามารถวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความคุ้มทุนและผลกำไรจากจำนวนเงินรับตลอดอายุโครงการ ให้มีความแม่นยำใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

### 1.1 จุดประสงค์ในการดำเนินงานวิจัย

งานออกแบบบ่อเหมืองเปิด ทั้งในส่วนของเหมืองหิน (quarries) และในส่วนของเหมืองแร่ (mines) ถือเป็นงานหลักที่วิศวกรประจำหน้าเหมืองต้องทำการวางแผนอยู่ตลอดเวลา การแก้ปัญหาจึงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่แผนการดำเนินงานดังกล่าวอาจใช้ได้ดีเฉพาะในส่วนที่หน้างานมีความคล้ายคลึงกันทั้งด้านสภาพภูมิประเทศกับสภาพธรณีวิทยา ยังไม่สามารถครอบคลุมทุกกรณีได้ เช่น หากมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของสภาพภูมิประเทศหรือธรณีวิทยาของหน้าเหมืองก็จำเป็นต้องวางแผนกันใหม่

การดำเนินงานวิจัยนี้ จึงมีจุดประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบในหลายลักษณะที่สามารถครอบคลุมงานได้หลายกรณี เพื่อสนับสนุนให้มีแนวคิดที่กว้างขวางกว่าเดิม และประยุกต์ได้จริงในการปฏิบัติงานภาคสนาม

### 1.2 ระเบียบวิธีวิจัย

แผนการวิจัยสำหรับโครงการวิจัยด้วยเงินอุดหนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2545 หัวข้อโครงการเรื่อง “บ่อเปิดเหมืองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน” มีการลำดับระเบียบวิธีวิจัยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งเป้าหมายไว้ ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อย่อย ดังนี้

- ก) ศึกษาการออกแบบหน้างานของเหมืองหิน (และเหมืองแร่) ให้สอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศและธรณีวิทยา โดยวางกรอบการดำเนินงานเพื่อศึกษาข้อมูลดิบไว้ค่อนข้างเป็นระบบ รวมทั้งการประยุกต์ทฤษฎีของกลศาสตร์หิน (ดิน) เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้านความปลอดภัยเชิงกำหนด กับความน่าจะเป็นในการป้องกันและควบคุมผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม
- ข) ศึกษารูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน้างานขุดเจาะทั้งในเหมืองหินและเหมืองแร่ ซึ่งจัดว่ามีส่วนสำคัญอย่างยิ่งเพราะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของบ่อเหมือง จึงต้องวางแผนการดำเนินงานให้สอดคล้องกับลักษณะของหน้างาน เช่น ขอบเขตของบ่อเหมืองหินในประทานบัตร ธรณีวิทยาของการวางตัวสำหรับสายแร่ในเหมือง เป็นต้น
- ค) ศึกษาการขุดเจาะเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด ในการดำเนินงานขุดเจาะ กับการลำเลียงขนย้ายมวลที่ผลิตกับมวลในส่วนที่ไม่ต้องการ โดยมีเป้าหมายให้เกิดความคุ้มทุน มีความเสี่ยงด้านความปลอดภัยกับสิ่งแวดล้อมต่ำที่สุด

### 1.3 รูปแบบการนำเสนอผลงานวิจัย

การนำเสนอผลงานของโครงการนี้ จะจัดทำเป็นรายงานจำนวน 2 ฉบับ ให้แล้วเสร็จตามกำหนดเวลาปกติของโครงการ 1 ปี ตั้งแต่ เดือนตุลาคม 2544 ถึงเดือนกันยายน 2545 ลักษณะของการนำเสนอผลงานวิจัยมีดังนี้

ก) รายงานฉบับแรก เป็นรายงานที่นำเสนอฉบับนี้ เนื้อหาบททวนทฤษฎีของแนวทางการพัฒนาเมืองเปิด วิเคราะห์กรณีศึกษาในการออกแบบ กับแสดงผลการตรวจสอบภาคสนามของเหมืองเปิดในประเทศ

แนวทางวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ของคำขิดจำกัดที่เหมาะสมที่สุด ทางทีมงานวิจัย ได้เลือกกลุ่มของการพัฒนาเมืองไว้ 2 รูปแบบ คือ เหมืองหินและเหมืองแร่ ข้อมูลภาคสนามเดิมบางส่วนที่เคยทำการตรวจสอบไว้ในโครงการอื่น และสามารถนำมาได้กับโครงการนี้ ถูกนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลภาคสนามที่ทำการตรวจสอบในปัจจุบัน

การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิจัยดำเนินการ (operations research) แบ่งลักษณะของรูปแบบการวิเคราะห์ไว้ 2 ส่วน คือเหมืองหิน กับเหมืองแร่ ทั้งนี้โดยมีเหตุผลหลักจุดประสงค์ของการพัฒนาเมืองแตกต่างกัน วิธีการคำนวณปริมาณสำรองของแหล่งไม่เหมือนกัน และ



การปฏิบัติการภาคสนามของงานเหมืองหินต้องใช้วิธีการระเบิดเปิดหน้างานตลอดเวลา แต่การปฏิบัติการภาคสนามของงานเหมืองแร่จะมีการขุดเจาะมวลดินมากกว่ามวลหิน จึงมีการใช้วัตถุระเบิดน้อยกว่า ดังนั้นแผนงานการขุดเจาะจะแตกต่างกันพอสมควร

#### กรณีของเหมืองหิน

การนำเสนองานวิจัยในส่วนนี้ เน้นข้อมูลคิภาคสนามที่มีผลเชิงเสถียรภาพหน้างานขุดเจาะ เช่น ระนาบความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity planes) ในมวลหินทั้งในแนวทิศทางกับมิติเชิงเรขาคณิตของระนาบ

สารสนเทศประกอบอื่น เช่น ระดับชั้นความสูงของการทำงานเพื่อผลิตหินย่อยระดับพื้นบ่อเหมือง การตัดความลาดแบบขั้นบันได ความลาดชันของระนาบความลาดหน้าเหมืองตลอดจนแนวขอบเขตของประทานบัตร เป็นต้น สารสนเทศเหล่านี้ใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณเพื่อหาจุดคุ้มทุนในเชิงค่าใช้จ่าย

เหมืองหินทั่วไปต้องมีการจัดการที่ดีเพื่อควบคุมค่าใช้จ่ายในการผลิตหินย่อย ซึ่งค่าใช้จ่ายต่อหน้าหนักเป็นเมตริกต้นของหินย่อย จัดเป็นตัวแปรหลักในการบริหารจัดการเพื่อให้ได้ผลกำไรหรือขาดทุนในการปฏิบัติงานผลิตหิน

นอกจากนี้ ยังมีสารสนเทศทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ สำหรับกรณีที่เกิดความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนสมมุติฐานในขณะที่ทำการวางแผนการเช่น เส้นทางขนส่งลำเลียงเพื่อนำมวลวัสดุที่แตกหักภายหลังการระเบิดออกจากบ่อเหมือง สภาพที่อาจเกิดหินหรือดินถล่มในบ่อเหมือง การป้องกันผลกระทบของการพัฒนาเหมืองหิน และผลกระทบจากการบดย่อยหินภายในโรงโม่

#### กรณีของเหมืองแร่

การนำเสนอวิจัยในส่วนของเหมืองแร่ มีรูปแบบหลักคล้ายคลึงกับกรณีของเหมืองหิน แต่สมมุติฐานที่ใช้ในการแก้ปัญหาต้องมีการแยกแยะให้ชัดเจนขึ้น เพราะมีความแตกต่างด้านธรณีวิทยาสำหรับสถานะของแหล่งหินกับแหล่งสะสมสินแร่ค่อนข้างชัดเจน รูปแบบเชิงเรขาคณิตและขนาดของมวลสินแร่ มีความสำคัญมาก ในการดำเนินงานการขุดเจาะการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการแผ่กระจาย เฟอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์กับมุมความชันของสายแร่ จัดเป็นจุดวิกฤตในการวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าจุดคุ้มทุน นอกจากนี้ยังมีตัวแปรในด้านการขุดเจาะที่มีผลต่อการเปิดหน้างานมาก เช่นค่าอัตราส่วนในการขุดเจาะระหว่างส่วนที่เป็นกากและต้องนำออกไปทิ้งนอกบ่อเหมืองกับมวลสินแร่ที่ต้องการนำออกมาลดขนาดหรือแยกสารเจือปนออกก่อนนำไปยังลานสตั๊กเพื่อซื้อขาย หรือทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นก่อนส่งต่อไปยัง โรงถลุงโลหะ

การบริหารจัดการของเมืองแร่ที่มีต่อความแปรปรวนของราคาซื้อขายในท้องตลาด เป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่ต้องวิเคราะห์ความอ่อนไหวเชิงการลงทุนอยู่ตลอดเวลา ในสถานะเช่นนี้ เมืองหินจะมีความแปรปรวนของราคาซื้อขายน้อยกว่าเมืองแร่

ข) รายงานฉบับสมบูรณ์ ซึ่งเป็นรายงานฉบับนี้จัดเป็นรายงานฉบับสุดท้ายของโครงการ เคยมีการนำเสนอครั้งแรกในเดือน พฤศจิกายน 2545 และได้ปรับปรุงแก้ไขใหม่ตามคำแนะนำจากคณะกรรมการประเมินผลงานวิจัย โดยได้นำเสนอผลงานวิจัยที่สมบูรณ์พร้อมที่จะทำการเผยแพร่อีกครั้งในเดือน มีนาคม 2546 การนำเสนอในรายงานฉบับนี้มีรายละเอียดของผลงานภาคสนามตามแนวทางของรายงานฉบับแรกเป็นพื้นฐาน ข้อมูลดิบในส่วนของเมืองหินและในส่วนของเมืองแร่ค่อนข้างเป็นระบบ การแสดงแนวทางวิธีวิเคราะห์จะมีการจัดกลุ่มค่าตัวแปรหลักของการออกแบบขอบบ่อเมืองเปิด และเสนอแนะการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้เป็นฐานของการปรับค่าของการลำดับขั้นตอนในการขุดเจาะ

กรณีศึกษาของเมืองเปิดในประเทศ ยังคงลักษณะรูปแบบของการวิเคราะห์ไว้เป็นเมืองหินและเมืองแร่ ทีมงานวิจัยจะนำเสนอต้นแบบของการวิเคราะห์หาผลเฉลยในการพัฒนาเมืองที่เหมาะสมทั้งในรูปแบบเชิง 2 มิติ และรูปแบบเชิง 3 มิติ โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้เมื่อทำการปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม ทั้งนี้เพื่อให้บุคลากรผู้รับขอบหน้างานสนามของแต่ละเมือง สามารถนำต้นแบบดังกล่าวไปปรับแก้และป้อนข้อมูลเข้าเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมเฉพาะสำหรับเมืองนั้น

ในส่วนของภาคผนวก ทางทีมงานวิจัยได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปและบันทึกลงแผ่น CD ที่บรรจุใส่กล่องและติดไว้หลังปรายงาน โปรแกรมมีชื่อว่า Slope Cut Design เหมาะสำหรับการออกแบบตัดมุมความชันของหน้าเมืองเปิด ค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพที่ค่ามุมความชันค่าหนึ่ง มีการแสดงผลเป็น 2 รูปแบบ ทั้งค่าเชิงกำหนด กับค่าเชิงความน่าจะเป็น

ทีมงานวิจัยคาดว่าความสำเร็จของโครงการวิจัย หัวข้อโครงการ "บ่อเมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานขุดเจาะในเมืองแร่และเมืองหิน" นอกจากเป็นประโยชน์ในการสร้างต้นแบบเพื่อนำไปใช้ในงานพัฒนาเมืองเปิด ช่วยทำให้กระบวนการผลิตหินหรือสินแร่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามสภาพของภูมิประเทศและธรณีวิทยา ตลอดจนลดความเสี่ยงในการลงทุนก่อนทำการขุดเจาะ หรือใช้ปรับแก้วิธีการระหว่างทำการขุดเจาะเพื่อลดความเสี่ยงของการปฏิบัติงาน

สิ่งที่เป็นผลประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ แนวทางการวิเคราะห์กับข้อมูลดิบภาคสนามของโครงการ สามารถนำไปใช้หรือปรับแก้ให้เหมาะกับโครงการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมสาขาอื่นที่ใกล้เคียงกันได้ด้วย เช่น การเปิดบ่อดินในงานวิศวกรรมโยธา หรือการวางแผนขุดเจาะในกรณีที่ต้องใช้วัตถุระเบิดสำหรับการตัดถนนทำทางหลวง เป็นต้น

## บทที่ 2

### เหมืองหินกับเหมืองแร่ภายในประเทศ

ข้อมูลพื้นฐานที่ระบุในบทนี้ เป็นลักษณะสภาพทั่วไปของทรัพยากรแหล่งสะสมหินกับแหล่งสะสมสินแร่ในประเทศ ที่มีการพัฒนาทำเหมืองเปิด การบรรยายเป็นการสรุปกลุ่มของแหล่งสะสมตามสภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งที่แตกต่างกัน

#### 2.1 แหล่งหินในประเทศ

สภาพธรณีวิทยาของแหล่งหินอุตสาหกรรมในประเทศใช้หินหลายชนิดในการก่อสร้าง ทั้งในส่วนที่เป็นหินตะกอน และที่เป็นหินอัคนีเกิดเป็นแหล่งกระจายอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ การใช้ประโยชน์หลักของหิน ได้แก่ การนำไปใช้เป็นวัสดุหินในการทำซีเมนต์ กังงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ใช้เป็นมวลรวมหินทำถนน เป็นมวลรวมคอนกรีต หรือใช้เป็นหินโรยทางรถไฟ เป็นต้น

ถ้าศึกษาสภาพแหล่งหินตามชนิดของการกำเนิดและตามช่วงอายุแล้ว สามารถแบ่งกลุ่มของหินที่มีการกำเนิดคล้ายคลึงกันออกเป็น 4 กลุ่มแหล่งหิน สรุปได้ดังนี้

##### 2.1.1 กลุ่มหินปูน

หินปูนหรือในบางแหล่งที่ควรเรียกว่าหินโดโลไมต์ จัดเป็นหินตะกอนที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมซีเมนต์กับอุตสาหกรรมก่อสร้างมากที่สุด เพราะเป็นแหล่งที่หาได้ง่าย หินปูนในแหล่งหินมักอยู่ใกล้กับสถานที่ก่อสร้าง ค่าบดย่อยหินปูนก็ไม่แพงจนเกินไป คุณสมบัติของหินปูนเชิงกายภาพ เคมี และกลศาสตร์ ใช้ได้กับงานก่อสร้างทุกชนิด

หินปูนยุคออร์โดวิเซียน (Ordovician limestone) เป็นแหล่งหินปูนที่มีปริมาณหินสำรองเป็นอันดับสอง จัดเป็นหินปูนยุคเก่า ในแผนที่ธรณีวิทยาของประเทศไทยเรียกชื่อแหล่งหินนี้ว่า *กลุ่มหินปูนทุ่งสง* พบมากในแนวทิวเขาภาคตะวันตกกับภาคใต้ของประเทศ มวลหินมีสารมลทินอื่นปนสูง เช่น แร่โดโลไมต์กับหินเชิร์ต เนื่องจากถูกกระบวนการกักคร่อนทางธรณีวิทยากระทำเป็นเวลายาวนานจึงทำให้ค่ากำลังวัสดุในมวลหินกับค่าความคงทนของหินลดต่ำลงเมื่อเทียบกับหินปูนยุคใหม่

หินปูนยุคเพอร์เมียน (Permian limestone) เป็นแหล่งหินปูนที่พบว่ามีปริมาณสำรองของแหล่งหินมากที่สุด เกิดแผ่กระจายทั่วประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคกลาง เป็นหินปูนที่มีคุณสมบัติที่สุด หินยุคเพอร์เมียนสามารถแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มหินราชบุรี กลุ่มหินสระบุรี กลุ่มหินงาว เป็นต้น

กลุ่มหินปูนยุคอื่นนอกเหนือจาก 2 กลุ่มดังกล่าว เป็นหินปูนที่มีแหล่งกระจายในหลายบริเวณ แต่ส่วนใหญ่เป็นแหล่งหินปูนขนาดเล็ก อายุของหินปูนมีการกำเนิดทั้งในช่วงยุคเก่าและยุคใหม่ มักมีแร่หรือหินอื่นปะปนอยู่ในมวลหินปูน จึงมีคุณสมบัติหินพอใช้ได้กับงานก่อสร้างเท่านั้น ไม่เหมาะเป็นวัตถุดิบทำซีเมนต์

### 2.1.2 กลุ่มหินแกรนิต

สภาพของแหล่งหินแกรนิต มักเกิดเป็นหินโผล่กระจายพบได้ในทุกภาคของประเทศยกเว้นบริเวณที่ราบสูงโคราช อายุของหินแกรนิต มีตั้งแต่ยุคไทรแอสซิก (Triassic) จนถึงยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) หินแกรนิตในประเทศไทยเกิดเป็นหย่อมๆ เป็นเนินเขาเดี่ยวขนาดเล็ก ไม่พบเป็นแหล่งหินแกรนิตขนาดใหญ่

หินแกรนิตเป็นหินที่มีค่ากำลังวัสดุและความคงทนสูงกว่าหินปูน แต่เนื่องจากเนื้อหินแกรนิตมีการจับประสานกันแน่นและแร่ประกอบหินเป็นแร่ที่มีความแข็งสูง จึงมีผลต่อการบดขยี้หินคือต้องใช้พลังงานมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง

### 2.1.3 กลุ่มหินบะซอลต์

แหล่งหินประเภทนี้จัดเป็นหินภูเขาไฟที่มักมีช่องว่างหรือความพรุนสูง แต่ในบางแหล่งหินมีเม็ดผลึกเล็กละเอียดติดกันแน่น ค่ากำลังวัสดุในหินบะซอลต์ที่มีเนื้อแน่นจะมีค่าสูงกว่า รวมทั้งมีความคงทนต่อการกัดกร่อนสูงกว่าหินบะซอลต์เนื้อพรุน อายุของหินบะซอลต์เริ่มตั้งแต่ช่วงยุคเทอร์เชียรีไปจนถึงยุคควาเทอร์นารี (Quaternary) การเลือกหินบะซอลต์มาใช้งานต้องเลือกหินที่ตกผลึกเนื้อแน่นและเป็นหินสด (fresh rock) แต่เนื่องจากแร่ประกอบหินเป็นแร่ที่มีความแข็งสูงจึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบดขยี้สูงเช่นกัน

### 2.1.4 กลุ่มหินทรายและหินภูเขาไฟ

หินทรายกับหินภูเขาไฟ มีแร่หลักคือแร่ควอร์ตซ์ แต่ในหินภูเขาไฟอาจมีแร่เฟลด์สปาร์เพิ่มอีกชนิด ไม่นิยมนำหินทั้งสองชนิดนี้มาใช้ เพราะมีข้อด้อยเชิงคุณสมบัติหลายประการในการใช้เป็นหินก่อสร้าง แต่ในกรณีที่ขาดแคลนแหล่งที่หินปูนหรือแหล่งหินตั้งอยู่ไกลสถานที่ก่อสร้างอาจนำมาใช้เป็นแหล่งหินทดแทนได้





รูปที่ 2.1 เหมืองหินปูนขนาดปานกลาง ผลิตหินย่อยใช้ในงานก่อสร้าง  
โรงโมหินศิลาสากลพัฒนา อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ 2.2 เหมืองแร่ขนาดใหญ่ ในภาพเป็นเหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ  
จังหวัดลำปาง ผลิตถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าของ กฟผ.

## 2.2 แหล่งแร่ในประเทศ

แหล่งแร่ในประเทศไทยมีหลายชนิด มีรูปแบบแตกต่างกัน การแยกประเภทของแหล่งแร่ค่อนข้างยุ่งยากและสลับซับซ้อน แต่เพื่อให้สามารถประยุกต์และสอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์เชิงความเหมาะสมของบ่อเหมืองเปิด คณะผู้วิจัยจึงจำแนกแหล่งแร่ของประเทศให้ใกล้เคียงกับการจำแนกประเภทตามสภาพธรณีวิทยาโดยอิงหลักสากล ดังนี้

### 2.2.1 กลุ่มแหล่งแร่ที่เกิดเป็นลานแร่

กลุ่มของแหล่งแร่ประเภทนี้มีกำเนิดแบบทุติยภูมิ ในสภาพเดิมอาจมีการกำเนิดเป็นสายแร่มาก่อน แต่ดูกระบวนการเชิงธรณีวิทยาทำให้มีการชะล้างจนเหลือเพียงเม็ดผลึกแร่ปะปนอยู่กับตะกอนดิน-ทราย สะสมอยู่ในพื้นผิวดินหรือบริเวณเชิงเขา กลายเป็นแหล่งสะสมแบบลานแร่ (placer deposit) ทั้งนี้จากการกำเนิดอาจเป็นแร่โลหะ หรือเป็นสารประกอบของโลหะก็ได้ จึงต้องมีกรรมวิธีเฉพาะในการแยกสารประกอบและถลุงแร่ให้เป็นโลหะบริสุทธิ์ต่อไป

ในประเทศไทยมีแร่หลายชนิด ที่ได้จากการทำเหมืองแร่จากแหล่งลานแร่ ได้แก่ แร่ดีบุก แร่ที่มีกำเนิดคล้ายคลึงและปะปนกับแหล่งแร่ดีบุก (เช่น แร่เซอร์คอน แร่โมนาไซต์) และยังมีแร่อื่นอีกที่ใช้เป็นอัญมณี หลังจากที่มีผลึกแร่หลุดออกหรือสลายตัวของหินต้นกำเนิดจะเหลือเป็นแร่รัตนชาติ ธรรมชาติ ได้แก่ เพชร พลอย ทองคำ เป็นต้น

### 2.2.2 กลุ่มแหล่งแร่ทุติยภูมิที่เป็นสายแร่คล้ายแบบลานแร่

กลุ่มของแหล่งแร่ประเภทนี้มีกำเนิดเป็นสายแร่ (vein) แต่เกิดการสะสมในแอ่ง (basin) แทรกชั้นหิน (ชั้นดิน) เดิมในแนวราบ ตัวอย่าง เช่น ถ่านหิน ที่มีกำเนิดมาจากการสลายตัวและสะสมตัวของพืชบางชนิด

แร่ทุติยภูมิบางชนิดที่มีกำเนิดจากการตกตะกอน เป็นชั้นเป็นห่อหุ้ม หรือเกิดการสลายตัวเปลี่ยนแปลงมาจากแร่เดิมสะสมจนเป็นแอ่ง มีแหล่งแร่หลายแห่งในประเทศไทยที่มีลักษณะคล้ายแบบลานแร่เกิดการสะสมเป็นตะกอนชั้นแร่ ได้แก่ แร่ยิปซัม แร่ดินขาว เป็นต้น

### 2.2.3 กลุ่มแหล่งแร่โลหะอื่น

แร่โลหะอื่น เช่น สังกะสี พลวง เหล็ก แมงกานีส มักเกิดเป็นแหล่งกระจุกกระจายในหลายภาคของประเทศ ลักษณะเชิงธรณีวิทยาของการกำเนิดค่อนข้างสลับซับซ้อน อาจเกิดจากการแปรสภาพ หรือการผุพังสลายตัว หรือมีการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีเป็นสารประกอบโลหะ

แร่โลหะเหล่านี้ จัดรูปแบบเป็นสายแร่ที่ตัดผ่านชั้นหิน แนวทิศทางกับปริมาณของสินแร่โลหะเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ไม่ค่อยคงที่เหมือนกลุ่มแหล่งแร่ 2 กลุ่มแรก

#### 2.2.4 กลุ่มแหล่งแร่โลหะอื่น

แร่โลหะอื่น เช่น ฟลูออไรต์ แร่หินอ่อน เฟลด์สปาร์ แบไรต์ มีกำเนิดเป็นแหล่งเล็กๆ กระจัดกระจายมักพบในแถบภาคกลางและภาคเหนือ ลักษณะเชิงธรณีวิทยามีโอกาสกำเนิดได้หลายรูปแบบ อาจจัดเป็นชั้นแร่หรือสายแร่แล้วแต่เฉพาะกรณีในบริเวณหน้าเหมือง ถ้าหากเกิดเป็นสายแร่ก็มีโอกาสเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในเชิงปริมาณกับทิศทางของสายแร่โลหะในบริเวณ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### หลักการเบื้องต้นในการออกแบบบ่อเหมืองเปิด

หลักการเบื้องต้นในการพัฒนากับการวางแผนออกแบบเพื่อผลิตหินและสินแร่ในเมืองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง องค์ประกอบที่สำคัญนี้ ได้แก่ ธรณีวิทยากับโครงสร้างของแหล่งสะสม ลักษณะการกำเนิดของแหล่งหินหรือสายแร่ ความสมบูรณ์ของแหล่งสะสมขนาดและรูปร่างของบ่อเหมืองเปิด ตลอดจนแหล่งเงินทุนที่สามารถสนับสนุนให้โครงการเปิดบ่อเหมืองดำเนินการจนกระทั่งถึงขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต

#### 3.1 การวางแผนก่อนการพัฒนาหน้าเหมืองเปิด

การวางแผนขั้นต้นก่อนมีการดำเนินงานเปิดเหมืองจริง สำหรับเหมืองหินกับเหมืองแร่ นั้นมีความแตกต่างกันในเชิงรูปแบบของแนวทางการเข้าสู่การออกแบบ (design approach) เพื่อจะทำการพัฒนาหน้าเหมืองนั้น วิศวกรและผู้ปฏิบัติงานภาคสนามจำเป็นต้องหาแนวทางที่เหมาะสมเฉพาะแต่ละกรณี อย่างไรก็ตาม การศึกษาเตรียมงานในภาคสนามเพื่อรวบรวมข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเหมืองหินกับเหมืองแร่ก็ยังคงคล้ายคลึงกันเป็นส่วนใหญ่ แต่จะมีความแตกต่างกันมากขึ้นในขั้นรายละเอียดของการดำเนินการผลิต สำหรับเนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยได้สรุปแนวทางเบื้องต้นก่อนการพัฒนาหน้างานเหมืองเปิดไว้ ดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 ธรณีวิทยาในพื้นที่

ข้อมูลธรณีวิทยาในพื้นที่ (local geology) เป็นข้อมูลหลักภาคสนามชุดแรกที่จำเป็นต้องทราบก่อนมีการพัฒนาและออกแบบ ได้แก่ ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปของแหล่งหิน (แหล่งแร่) ลักษณะโครงสร้างเชิงธรณีวิทยาของแหล่งที่ระบุได้ถึงกลุ่มหินและอายุการกำเนิด ตลอดจนลักษณะการวางตัวของสายแร่ (เช่นค่า strike กับค่า dip angle) รวมทั้งการวางตัวของแนวระนาบรอยแตกแยกของมวลหินในบริเวณ

การทำแผนที่บริเวณหน้าตะพักของเหมืองเปิด หรือมีชื่อเรียกว่า bench face mapping (Peters, 1978) จัดเป็นงานเทคนิคพื้นฐานในการทำแผนที่เหมืองเปิด ข้อมูลที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะความลาดชันของภูมิประเทศ ชนิดของหินในบริเวณ กลุ่มของโครงสร้างหลักที่เป็นตัวแปรที่สำคัญในเรื่องเสถียรภาพ ได้แก่ ระนาบความไม่ต่อเนื่อง (เช่น joint, fault)



การทำแผนที่บริเวณตะพักหน้าเหมืองเปิด ควรกำหนดหาความเหมาะสม ระหว่างขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของบ่อเหมืองเปิด (pit diameter) กับมาตราส่วนของแผนที่ที่จัดทำ ตามข้อเสนอแนะของ Call and Savely (1990) ดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางบ่อเหมืองเปิด	มาตราส่วนของแผนที่หน้าเหมือง
น้อยกว่า 500 เมตร	1 : 400
500 – 1,000 เมตร	1 : 1,000
มากกว่า 1,500 เมตร	1 : 2,000

ก่อนดำเนินการใดๆ ควรมีการทำกรังวัดและจัดทำแผนที่หน้าเหมืองเปิด ให้ได้ขนาดของมาตราส่วนตามความเหมาะสมกับระยะมิติของเส้นผ่านศูนย์กลางบ่อเหมืองเปิด กรณีของแผนที่ภูมิประเทศที่จัดทำได้ในขนาดมาตราส่วน 1:50,000 สามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบหรือแผนที่พื้นฐาน (base map) ของการบันทึกข้อมูลเป็นแผนที่ธรณีวิทยาหน้าเหมืองตามขนาดของบ่อเหมืองเปิดดังกล่าว

### 3.1.2 การแปลความหมายกับการประเมินศักยภาพของแหล่งหิน (แร่)

เมื่อได้ข้อมูลภาคสนามพอสมควรแล้ว ก็มีการแปลความหมาย (interpretation) เพื่อหาศักยภาพของแหล่ง ทั้งที่เป็นแหล่งหินหรือแหล่งแร่ จุดมุ่งหมายหลักเป็นการประเมินผลลัพธ์เบื้องต้น ที่ใช้เป็นแนวทางการเข้าสู่การเปิดหน้างานชุดเจาะ ทั้งนี้ต้องคำนึงทั้งทางด้านความมีเสถียรภาพควบคู่กับความคุ้มทุน

การศึกษาในรายละเอียดของข้อมูลเชิงธรณีวิทยา นิยมใช้วิธีการตัดภาพตัดขวาง (cross section) ของบริเวณ กับการพล็อตข้อมูลที่สำคัญของโครงสร้างมวลหิน กับมวลสินแร่ (ore body) ลงในแผ่น stereo net เพื่อทำการจัดกลุ่มเล็กๆ (cluster) ให้ได้ข้อมูลที่เป็นค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้นๆ เช่น ค่าเฉลี่ยแนวสันหิน (strike) ค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเท (dip angle) ของสายแร่ รูปร่างกับขนาดของมวลสินแร่ เป็นต้น

อนึ่งถ้าหากในบริเวณแหล่งหิน (แร่) มีการเจาะหลุมสำรวจ จะทำให้ทราบข้อมูลที่อยู่ในระดับลึกต่ำกว่าพื้นได้มาก การแปลความหมายโดยตรงจากแท่งตัวอย่าง (core) กับการศึกษาเชิงสถิติของลักษณะการวางตัว ทำให้ช่วยขจัดความเสี่ยงในการดำเนินการพัฒนาหน้างานชุดเจาะไปได้มาก

การประเมินความเหมาะสมของแหล่ง เป็นวิธีการเบื้องต้นที่ต้องทำควบคู่กับการแปลความหมายเชิงธรณีวิทยาของแหล่ง ตัวอย่างเช่น การศึกษาดำเนินงาน ขนาด กับระดับความสูงของหน้าเหมืองเปิด ตำแหน่งที่ตั้งของสำนักงาน ตำแหน่งที่ตั้งโรงโม่บดย่อยหิน (หรือโรงแต่ง

แยกแยะ) การเลือกวิธีการขุดเจาะ (ใช้การระเบิดเป็นหลักหรือใช้เครื่องจักรกลที่เหมาะสมเป็นหลัก) ราคาและจำนวนของเครื่องจักรกลกับอุปกรณ์ ค่าจ้างวิศวกรกับพนักงานหน้างานขุดเจาะกับพนักงานกับผู้บริหารในสำนักงาน ค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นต่อการผลิตหิน (สินแร่) การป้องกันเสถียรภาพกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหน้างานขุดเจาะ การระบายน้ำหน้างานขุดเจาะ เส้นทางรถลำเลียงขนส่งหลักของหินที่ระเบิดแล้วหรือสินแร่ที่ได้ขุดเจาะออกมา การวางแผนทิ้งส่วนที่ไม่ต้องการ (waste)

เมื่อได้จัดการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น ทำให้สามารถประเมินศักยภาพของแหล่งก่อนการดำเนินการพัฒนาได้ว่า แหล่งหิน (แร่) ควรจะมีมูลค่า (value) ของแหล่งที่สามารถทำการพัฒนาเหมืองเปิดได้เป็นระยะเวลาเท่าไร จึงจะถึงจุดคุ้มทุน (break even) และในระยะเวลาใดที่การพัฒนาหน้างานมีผลกำไร ในระยะเวลาใดมีความเสี่ยงในการลงทุนในระดับสูง

การอธิบายแนวทางในหัวข้อย่อนี้ เป็นเพียงแนวทางโดยสังเขปที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก ทั้งนี้เพราะการปฏิบัติงานในภาคสนามยังมีตัวแปรหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งด้านธรณีวิทยากับวิธีการเปิดเหมือง ด้านเสถียรภาพหน้างานกับทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน รวมทั้งความเหมาะสมเรื่องอื่นอีกหลายเรื่องเช่น การทำความเข้าใจกับการให้การยอมรับของชุมชนที่ได้รับผลกระทบ หรือชุมชนที่มีภูมิปัญญาใกล้เคียงกับสถานที่ตั้งของเหมืองเปิด เป็นต้น

### 3.2 องค์ประกอบที่จำเป็นในการพัฒนาบ่อเหมืองเปิด

ประเด็นหลักที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพัฒนาบ่อเหมืองเปิด ได้แก่ เงื่อนไขเชิงเสถียรภาพ ประเภทของมวลสารที่ต้องทำการขุดเจาะ กับลักษณะของการพังทลายเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการเปิดหน้าเหมือง

#### 3.2.1 ปัจจัยพื้นฐานในการเปิดเหมือง

จุดสำคัญในการดำเนินงานเปิดเหมือง คือ ต้องมีการออกแบบที่ทำให้มั่นใจได้ว่าเหมืองเปิดมีเสถียรภาพตลอดเวลา ในช่วงที่ทำการผลิตหิน (ผลิตแร่) สภาพภูมิประเทศกับสภาพธรณีวิทยาในบริเวณ รวมทั้งรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการเปิดเหมืองเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพหน้างานขุดเจาะ

สภาพภูมิประเทศของบริเวณ ถ้าการคมนาคมไม่สะดวกก็จำเป็นต้องตัดถนนผ่านเอง ค่าใช้จ่ายที่จะเพิ่มขึ้นต้องนำไปคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายตั้งต้นโดยรวมด้วย หากหน้าเหมืองมีสภาพ

เป็นเนินเขาสูงชันอยู่ห่างไกลจากที่ตั้งชุมชน การขนส่งลำเลียงเครื่องจักรกลและการขนย้ายสินแร่รวมทั้งปัจจัยในเรื่องอาหารเครื่องนุ่งห่มจะไม่สะดวก ทำให้ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาหน้างานที่มีความลาดชันสูง กลายเป็นอุปสรรคสำคัญในการดำเนินงานได้

ปัจจัยในเรื่องสภาพธรณีวิทยาของมวลสารหน้างานผลิต มีส่วนที่เป็นมวลดินปกคลุมชั้นหินหรือสายแร่ก่อนเริ่มการผลิต ส่วนมวลดินที่เป็นดินหน้าหินหรือแร่ (overburden) จำเป็นต้องเคลื่อนย้ายออก อนึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพในเชิงอนุรักษ์ ต้องคำนึงถึงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่อยู่ในเขตร้อนชื้น ควรกำหนดให้มวลสารเป็นดินเปียก (wet soil mass) เพื่อหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพในสภาวะที่เร็วที่สุดก่อนทำการพัฒนาหน้างานเหมือง

ปัจจัยสภาพธรณีวิทยาของมวลสารส่วนที่เป็นหิน ควรตั้งสมมุติฐานให้มวลหินเป็นหินที่มีส่วนประกอบเป็นเนื้อหินหลายรูปแบบ (heterogeneous) มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (anisotropic) และไม่เป็นหินเนื้อแน่น แต่มีระนาบของความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ปรากฏอยู่ในมวลหินนั้น การวิเคราะห์เชิงตรรกยะ (rational analysis) ของการตัดความลาดในพื้นที่บ่อเหมืองเปิดจึงเป็นการวิเคราะห์ตัวเลขเชิงเสถียรภาพในภาวะที่เร็วที่สุด คล้ายคลึงกับการประเมินผลในมวลดิน

การประเมินเสถียรภาพและความเสี่ยงของงานขุดเจาะ สามารถอ้างอิงจากเอกสารการวิจัยและข้อเสนอแนะมากมาย ในส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยไว้ในหัวข้อนี้ (สง่า ตั้งชวาล, 2544) มีรายละเอียดผลการวิเคราะห์เชิงความเสี่ยงที่เน้นในงานพัฒนาเหมืองเปิดโดยอาศัยวัตถุประสงค์

### 3.2.2 การกำหนดหรือแยกประเภทของมวลสาร

ประเภทมวลสาร ที่วิศวกรหรือนักธรณีวิทยาพบในพื้นที่หน้าเหมือง ควรมีการกำหนดหรือแยกประเภทให้ชัดเจน และศึกษาในเชิงคุณสมบัติมวลสารที่มีผลต่อการพัฒนาเหมืองและการออกแบบขุดเจาะหน้างานเหมืองด้วย

#### 1. มวลดิน

มวลสารที่เป็นมวลดิน สามารถแยกประเภทได้หลายรูปแบบ จากประสบการณ์ของผู้วิจัยมีความเห็นว่า ควรแยกมวลดินเป็น 2 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ ดินที่มีค่าโคฮีชัน (cohesive soil) กับดินที่ไม่มีค่าโคฮีชัน (cohesionless soil) ดินที่มีค่าโคฮีชัน เป็นมวลดินที่มีการยึดเกาะระหว่างอนุภาคด้วยแรงภายในระหว่างเม็ดอนุภาคของแร่ชนิดหนึ่งกับแร่อีกชนิดหนึ่งในมวลดิน หรือระหว่างชิ้นส่วนหินกับแร่ที่เป็นส่วนประกอบหลักของมวลดิน ส่วนดินที่ไม่มีค่าโคฮีชันการยึดเกาะติดระหว่างอนุภาคไม่มี แต่มีเสถียรภาพได้ด้วยค่าความเสียดทานภายในของอนุภาค ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพควรมีการจำแนกประเภทย่อยของมวลดินเสียก่อน จะช่วยให้การวิเคราะห์ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

## 2. มวลหิน

การจำแนกประเภทมวลหินมี 2 แนวทาง แนวทางแรกเป็นการจำแนกในเชิงธรณีวิทยา จะเน้นลักษณะการกำเนิดของหิน โดยแบ่งมวลหิน เป็นหินอัคนี หินตะกอน และหินแปร แนวทางที่สองจำแนกในเชิงวิศวกรรมจะเน้นเรื่องมวลหินเนื้อแน่น (massive) กับมวลหินที่มีรอยแตกแยกในเนื้อหิน ที่เป็นผลเนื่องจากการเกิดระนาบความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน

หินอัคนีเป็นหินที่มีค่าลึงวัสดุสูง ถ้าหินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายใต้อุณหภูมิพื้นผิวดินจะมีการบิดเกาะระหว่างอนุภาคสูงมีความพรุนน้อย ผลกระทบจากน้ำใต้ดินกับความชื้นมีน้อย ส่วนหินอัคนีที่เย็นตัวเร็วบนพื้นผิวดิน เนื้อหินมักมีความพรุนสูงทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลง และน้ำใต้ดินที่แทรกซึมมีผลกระทบสูงต่อคุณสมบัติของหินที่พรุน

หินตะกอนเป็นหินที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (sensitivity) สูง หินตะกอนที่เกิดจากเม็ดตะกอนถูกพัดพาและแข็งตัวกลายเป็นหินในลักษณะเชิงกลศาสตร์ มีค่าลึงวัสดุต่ำถึงปานกลางขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดตะกอน หินตะกอนที่มีเม็ดละเอียดเล็กมาก (clay size) จะมีค่าลึงวัสดุต่ำ แต่พวกที่มีเม็ดตะกอนขนาดปานกลางถึงหยาบ (silt or sand size) จะมีค่าลึงวัสดุปานกลางถึงสูง หินตะกอนที่กำเนิดเชิงกลศาสตร์มีความไวต่อปฏิกิริยาของกรดกับด่างน้อยกว่าหินตะกอนที่มีกำเนิดทางเคมีหรือชีวภาพ อย่างไรก็ตามตัวแปรที่เป็นน้ำใต้ดินมีผลกระทบสูงต่อคุณสมบัติของหินตะกอนทุกประเภท

หินแปรมีความแตกต่างด้านค่าลึงวัสดุ ระหว่างชนิดหินที่มีการแปรสภาพแบบสัมผัสกับชนิดหินที่มีการแปรสภาพแบบทั้งบริเวณ ค่าลึงวัสดุของหินแปรสัมผัสจะสูงกว่าเนื่องจากผลึกใหญ่และมีการบิดเกาะติดกันแน่นความพรุนในมวลหินต่ำ ผลกระทบจากน้ำใต้ดินต่อหินแปรสัมผัสมีน้อยกว่า

เนื่องจากระนาบความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในมวลหินทุกประเภท ค่าลึงวัสดุกับความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีตัวแปรเชิงธรณีวิทยาเข้ามาเกี่ยวข้องก็จะเปลี่ยนไป เช่น น้ำใต้ดิน อัตราการผุพังตามธรรมชาติ เป็นต้น

### 3.2.3 ปฏิกิริยาของการพังทลายในมวลสาร

ในธรรมชาติมวลสารที่เป็นมวลดินและมวลหินมีรูปแบบปฏิกิริยาของการพังทลายเหมือนกันในบางลักษณะแต่ในบางลักษณะก็แตกต่างกันมาก ข้อสังเกตเบื้องต้นเกี่ยวกับการพังทลายของมวลสารที่เป็นมวลดิน และในส่วนที่เป็นมวลหินเป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติมวลสารทั้งสองแบบที่มีปฏิกิริยาต่อแรงและตัวแปรเชิงธรณีวิทยาอื่นที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) เมื่อมีการพังทลายเกิดขึ้น มวลดินจะมีการพังทลายเกิดขึ้นในมวลเนื้อดินเอง ปฏิกิริยาเช่นนี้ค่อนข้างชัดเจนในดินที่อ่อนนุ่ม (soft soil) มากกว่าดินเนื้อแข็ง (stiff soil)

การพังทลายในมวลดินมีรูปแบบที่แตกต่างจากการพังทลายในมวลหิน เมื่อเกิดการพังทลาย มักมีแนวโน้มที่จะเกิดตามแนวของระนาบเปราะบาง

- 2) ค่ากำลังวัสดุเฉือนในมวลหินเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์สถานะความมีเสถียรภาพ อนึ่งตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์เป็นค่ากำลังวัสดุเฉือนของระนาบเปราะบางที่ก่อให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในมวลหิน ซึ่งไม่ใช่เป็นค่ากำลังวัสดุเฉือนของมวลหินที่วางตัวบนระนาบ
- 3) เมื่อมีน้ำใต้ดินไหลผ่าน การไหลของน้ำในมวลดินมีการเคลื่อนที่ของของเหลวในโพรงช่องว่างระหว่างเม็ดอนุภาคของแร่ในดิน แต่การไหลของน้ำใต้ดินที่เกิดในมวลหินจะเป็นการไหลตามแนวระนาบเปราะบางมากกว่าเกิดขึ้นภายในมวลเนื้อหินเอง

### 3.2.4 ระยะเวลาที่มีผลกระทบต่อ การออกแบบเหมืองเปิด

เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ คือมวลสารแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติต้องพึงพิงเวลา (time) การระบุถึงเสถียรภาพในช่วงเวลาที่ดำเนินการพัฒนาเหมืองขึ้นอยู่กับชนิดของมวลสาร เช่นเมื่อเปิดหน้าดิน ช่วงเวลาที่มวลดินมีเสถียรภาพก่อนเกิดการเลื่อนไถล หรือเกิดการพังทลาย เมื่อมีการระเบิดเพื่อเปิดหน้างาน มีช่วงเวลาเพียงไม่กี่วินาที ในมวลหินช่วงเวลาก่อนเกิดการพังทลาย มักใช้เวลานานเป็นนาทิต เป็นวัน เป็นเดือน หรือเป็นปี เป็นต้น

มวลดินบางชนิดเช่นดินเหนียวปนทรายแป้ง หรือดินเหนียวอ่อน มีการเปลี่ยนแปลงเชิงเสถียรภาพในลักษณะของการคืบ (creep) ใช้เวลานานต่อการไถลเลื่อน หรือเกิดการพังทลายเชิงก้าวหน้า (progressive failure) หากวิเคราะห์ภาพรวมไม่ค่อยจะมีผลด้านออกแบบเปิดหน้าเหมือง เพราะช่วงเวลาของการดำเนินงานของการผลิตแร่ (หิน) เป็นระยะเวลาที่สั้นและโครงสร้างหน้าเหมืองไม่ได้ใช้งานนานเหมือนการตัดถนนทำทางหลวง

## 3.3 เงื่อนไขเฉพาะที่สำคัญต่อการออกแบบเหมืองเปิด

เงื่อนไขดังกล่าวนี้ เป็นตัวประกอบหลักในการพิจารณาเพื่อออกแบบเปิดหน้างานขุดเจาะ ซึ่งต้องวิเคราะห์หาผลลัพธ์ให้ได้อย่างเหมาะสมในการออกแบบเหมืองเปิด ทั้งในส่วนที่เป็นเหมืองหินหรือส่วนที่เป็นเหมืองแร่ก็ตาม

### 3.3.1 ความสูงหน้างานขุดเจาะ

ความสูงในแนวตั้งของหน้างานขุดเจาะ ปกติใช้กับการออกแบบตัดความลาดของภูมิประเทศ การเปิดหน้างานขุดเจาะนั้นหลังจากทำการปรับระดับภูมิประเทศแล้ว ก็จะทำให้การตัดหน้างานจากจุดสูงของที่ตั้งแหล่งแร่ (หิน) ไปยังจุดที่ต่ำสุด วิธีการที่นิยมกันมากและให้



ความปลอดภัยสูงได้แก่ การตัดความลาดชันหน้างานขุดเจาะให้เป็นชั้นเล็ก ๆ แบบขั้นบันได เรียกชั้นเล็ก ๆ เหล่านี้ว่าชั้นตะพัก (bench) ความสูงในแนวตั้งของชั้นตะพักเหล่านี้ (ดูรูปที่ 3.1) มักไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง เพราะมีข้อจำกัดด้านสมรรถนะของเครื่องจักรกลกับอุปกรณ์เจาะระเบิด ในเหมืองนั้น และข้อจำกัดทางการปฏิบัติงาน เว้นแต่มีเงื่อนไขเพิ่มขึ้นเป็นพิเศษ เมื่อขุดเจาะเหมืองเปิดในระดับที่ลึกลง

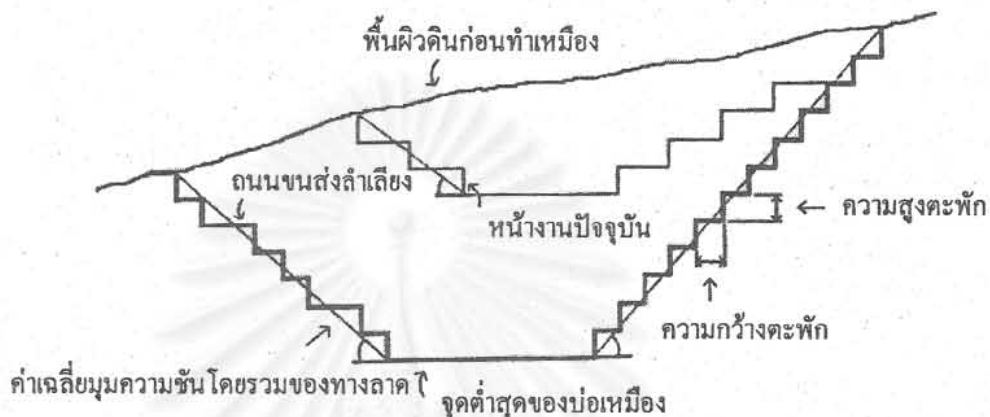
ในเหมืองหินขนาดมิตีความสูงแนวตั้งของชั้นตะพักมีค่าระหว่าง 12-20 เมตร แต่ในเหมืองแร่ปกติมีค่าน้อยกว่านี้อาจสูงเพียง 1-2 เมตร หากเป็นไปได้ความสูงหน้าเหมืองควรรออกแบบให้สูงที่สุดภายในรัศมีที่เครื่องจักรกลกับอุปกรณ์ภาคสนามสามารถทำงานได้โดยไม่ติดขัด ข้อเสียของชั้นตะพักที่สูงเกินไป คือ อาจมีการไถลเลื่อนของชั้นส่วนหิน (ดิน) หรือชั้นหินแผ่นแบนบางที่มีมุมเอียงเทออกจากหน้าอิสระเกิดการไถลเลื่อนตามแรงโน้มถ่วงได้ ระยะทางของชั้นส่วนหรือชั้นหินที่ไถลเลื่อนค่อนข้างไกลมีความเร่งเกิดขึ้นสูงจะก่อให้เกิดอุบัติเหตุรุนแรงได้

### 3.3.2 ความลาดชันของบ่อเหมืองเปิด

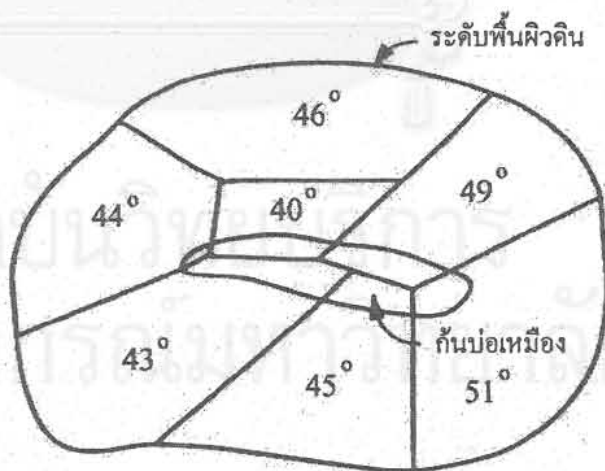
ความลาดชันของผนังบ่อเหมืองเปิด (slope of pit wall) เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดขนาด (size) กับรูปร่าง (shape) ของบ่อเหมืองเปิด ในกรณีของเหมืองแร่ค่าความลาดชันที่เป็นค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเทแต่ละชั้นตะพัก กับค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเทรวมทั้งหมดของความลาดชัน เป็นตัวแปรหลักที่ใช้คำนวณปริมาณของมวลสารส่วนที่ไม่ต้องการที่เป็นกาก (waste) ออกจากระบบ อาจมีทั้งส่วนที่เป็นดิน ส่วนที่เป็นหินและส่วนที่เป็นแร่ที่มีความสมบูรณ์ต่ำไม่คุ้มค่าต่อการนำไปผ่านกระบวนการแยกหรือถลุงแร่

ผนังบ่อเหมืองเปิดต้องออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงสุด มีอายุการใช้งานได้จนกว่ากิจกรรมการผลิตหินหรือผลิตแร่ในพื้นที่นั้นยุติลง การวิเคราะห์หาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพควรนำค่าตัวแปรหลายรูปแบบที่วิเคราะห์ผลได้ในพื้นที่มาใช้ร่วมในการประเมินผลด้วย เช่น กำลังวัสดุของมวลสารที่เป็นหินกับสายแร่ การวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่องทั้งค่าทิศทางกับมิติของขนาด (เช่น รอยเลื่อน รอยแตกแยก) ตลอดจนสถานะในธรรมชาติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพหน้างานขุดเจาะ เช่น การผุพัง การถูกกัดกร่อน หรือ ระดับหรือปริมาณน้ำใต้ดิน เป็นต้น

รูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างแสดงถึงอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดชัน เนื่องจากรูปแบบเชิงเรขาคณิตของมวลสินแร่ที่วางตัวในระดับต่ำสุดของบ่อเหมืองเปิดกับการแปรเปลี่ยนของสภาพเชิงธรณีวิทยาของพื้นที่ในภาพตัด (section) เล็ก ๆ ในแต่ละส่วนของบ่อเหมืองเปิดตามเหตุผลเชิงเศรษฐศาสตร์ มุมความลาดชันที่สูงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปิดบ่อเหมืองได้มาก ในกรณีที่หน้าความลาดมีมุมความชันสูงมีผลทำให้วัสดุที่ถูกขุดเจาะมีปริมาตรน้อยกว่าทำการ



รูปที่ 3.1 ภาพสเก็ทซ์ของชั้นตะพัก แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของชั้นตะพัก



รูปที่ 3.2 ผังภาพของบ่อเหมืองเปิด ตัวเลขในแต่ละส่วนวงเป็นค่าเฉลี่ยมุมลาดชัน

ขุดเจาะที่คำนวณความชันต่ำ นอกจากนี้ปริมาณของการขนดักลำเลียงวัสดุออกจากบ่อเหมืองก็ เป็นไปในทำนองเดียวกันด้วย

ในการออกแบบคำนวณเชิงเทคนิควิเคราะห์ความลาดชันยังต้องคำนึงถึงถนนที่ใช้ในการขนส่ง ลำเลียงมวลสาร (haulage road) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคำนวณเชิงเท โดยรวม เพราะต้อง ปรับระดับให้ลดความลาดชันลง ค่ามุมเชิงเท โดยรวมควรจะลดต่ำลงเมื่อมีถนนขนส่งลำเลียง ตัดผ่านชั้นตะพักไปยังตำแหน่งท้ายสุดของบ่อเหมืองเปิด (ultimate pit) ซึ่งมักเป็นระดับลึกสุด ที่เป็นกันบ่อเหมืองเปิด

### 3.3.3 ระดับขั้นความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (แหล่งหิน)

ความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ ปกติตรวจสอบได้จากเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของสินแร่ เช่น เหมืองแร่ทองแดงแห่งหนึ่ง อาจกำหนดค่าขีดจำกัดที่คุ้มทุนไว้ที่เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของ ทองแดงเป็น 0.75% Cu หรือเรียกเป็น cutoff grade ของเหมืองแร่ที่ใช้วิเคราะห์ความคุ้มทุน นั้น ถ้าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของสินแร่ทองแดงในระดับที่ขุดเจาะมีน้อยกว่านี้การดำเนินงาน ของเหมืองแร่นั้นอาจประสบปัญหาขาดทุนได้ เพราะค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการผลิตโลหะ ทองแดง (ต่อหน่วยน้ำหนัก) ในแหล่งแร่ที่มีเปอร์เซ็นต์โลหะต่ำ ไม่คุ้มค่ากับราคาที่ได้จากการ ขายโลหะทองแดง

ปกติเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของมวลหินย่อยที่ผลิต เพื่อใช้เป็นหินก่อสร้างหรือหินที่ใช้ ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ มักไม่แตกต่างกันมากเมื่อระดับความลึกเปลี่ยนแปลงไป แต่เนื่องจากราคา ซื้อขายหินย่อยต่ำกว่าราคาซื้อขายสินแร่มาก เมื่อระดับความลึกของการขุดเจาะสูงขึ้น ค่าใช้จ่าย ในการเจาะระเบิดกับการขนส่งลำเลียงเริ่มสูงขึ้นจนกระทั่งไม่คุ้มทุน เมื่อนำค่าใช้จ่ายในการ บดข่อยหินมารวมเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมดด้วย แล้วเปรียบเทียบกับราคาซื้อขายหินย่อย (ต่อหน่วยน้ำหนัก) ที่หน้าโรงโม่หิน

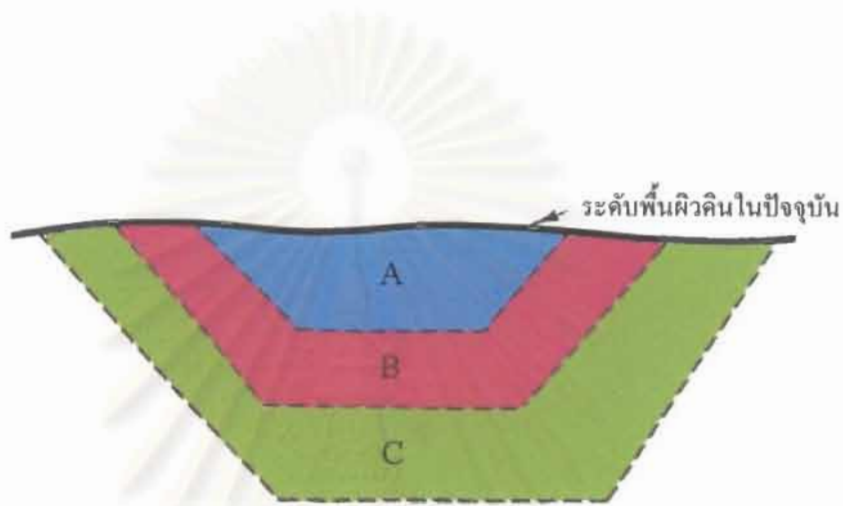
การวิเคราะห์จำนวนมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value) ประเมินจากราคาซื้อขายสิน แร่หน้าเหมือง (ตามเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์) หรือราคาซื้อขายหินย่อย (หน้าโรงโม่) ซึ่งถ้าตั้ง สมมุติฐานว่า สินแร่หรือหินย่อยสามารถตราเป็นจำนวนเงินรับได้ทันที (เพราะมีใบสั่งซื้อแล้ว ก่อนผลิต) แต่ถ้าต้องสต็อกสินแร่หรือหินย่อยไว้ก่อน มูลค่าของผลิตภัณฑ์ก็ต้องลดค่าลงตาม เวลาที่ต้องสต็อกไว้

รูปที่ 3.3 เป็นภาพสเก็ทเชิงอุดมคติของการเปิดบ่อเหมืองในแต่ละระดับความลึกของพื้น บ่อเหมือง ขนาดบ่อเหมืองมีการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้ได้ปริมาณบ่อเหมืองใหญ่ขึ้น เมื่อขุดเจาะ ในระดับที่ลึกลงจากพื้นผิวดิน (หรือระดับตั้งต้นการเปิดบ่อเหมือง) มากขึ้น ตัวเลขค่าใช้จ่ายตั้ง ต้นของการดำเนินงานเป็นค่าจัดซื้อเครื่องจักรกล (ต่อระยะเวลาที่ใช้งาน) และค่าใช้จ่ายสำนัก งาน (เฉพาะพนักงานกับคนงานในส่วนการผลิต) ตัวเลขดังกล่าวใช้เป็นค่าตัวเลขพื้นฐานหลัก



ในการประเมินความคุ้มค่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าเสื่อมราคา ซึ่งเป็นผลจากสมรรถนะของเครื่องจักรกล และอุปกรณ์มีการทำงานให้ประสิทธิภาพน้อยลง

การวิเคราะห์ในรูปที่ 3.3 สมมุติให้ค่าเสื่อมราคาเป็นเงื่อนไขหลักในการกำหนดมิติขนาดของบ่อเหมืองเปิด โอกาสความคุ้มค่ายังมีน้อยลงเมื่อขนาดบ่อเหมืองใหญ่ขึ้น หรือค่าระดับความลึกการขุดเจาะสูงขึ้นถ้าไรจากการลงทุนมีน้อยลง



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมิติของบ่อเหมืองเปิดกับระดับลึกของการผลิตแร่ (หิน)

#### 3.2.4 ค่าอัตราส่วน stripping ratio

ค่าอัตราส่วนเป็นค่าตัวแปรหลักในงานเหมืองแร่ และจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ล่วงหน้าเพื่อประกอบในการวางแผนงาน พจน์ของค่านี้เป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง จำนวนน้ำหนักเป็นเมตริกตันของส่วนที่ไม่ต้องการ (waste) กับ จำนวนน้ำหนักเป็นเมตริกตันของสินแร่ (ore) ที่ต้องการเมื่อทำการขุดเจาะเพื่อผลิต (mined) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้มีชื่อเรียกเป็น stripping ratio หรือ strip ratio

ค่าอัตราส่วนระหว่าง waste/ ore ดังกล่าวนี้ มีความแปรผันโดยตรงกับค่าใช้จ่ายของการปฏิบัติงานขุดเจาะ ที่เป็นผลจากการเปิดหน้าดินด้วยเครื่องจักรกล หรือจากการระเบิดหินแข็งที่ปิดกั้นมวลสินแร่ รวมทั้งเป็นค่าใช้จ่ายจากการลำเลียงวัสดุมวลสารทั้งสินแร่ กับส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งออกจากบ่อเหมืองเปิด

ในการวางแผนทั้งระบบ การหาจุดคุ้มทุน (breakeven point) ควรหาจากตำแหน่งหรือค่าระดับความสูงสุดท้าย ที่ทำการผลิตสินแร่ในบ่อเหมืองนั้น สมการพื้นฐานง่าย ๆ เพื่อคำนวณค่าที่จุดคุ้มทุนของ stripping ratio คือ

$$BESR = \frac{[P - E]}{F} \quad (3.1)$$

พจน์ตัวแปร  $BESR$  เป็นค่าอัตราส่วนการขุดเจาะที่จุดคุ้มทุน เมื่อคำนวณจากค่าอัตราส่วนการขุดเจาะ (stripping ratio) ที่ทราบค่าหลายค่า พจน์  $P$  เป็นค่าตัวเลขรายได้จากการขายสินแร่ (หน้าเหมือง) ต่อเมตริกตัน ส่วนพจน์  $E$  เป็นค่าใช้จ่ายในการพัฒนาหน้าเหมืองทั้งหมด (ยกเว้นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเจาะระเบิดและขนย้ายสินแร่) พจน์  $F$  เป็นค่าใช้จ่ายในการพัฒนาหน้าเหมืองเพื่อเจาะระเบิดและขนย้าย ที่จัดเป็น waste ที่ไม่ได้นำมาใช้เป็นประโยชน์และต้องนำไปทิ้งนอกบริเวณพื้นที่ของบ่อเหมือง

ในกรณีที่ทางเหมืองต้องการให้การพัฒนางานขุดเจาะมีผลตอบแทนเป็นกำไรต่ำสุดทำการแปลงสมการ 3.1 เป็น

$$BESR = \frac{[P - (E + G)]}{F} \quad (3.2)$$

พจน์  $G$  เป็นผลกำไรที่มีค่าต่ำสุดต่อเมตริกตันของสินแร่ ในการหาผลลัพธ์ ถ้าหากทำการพล็อตกราฟ ระหว่างตัวแปรที่เป็นค่าเกรดสินแร่กับตัวแปรที่เป็นค่าอัตราส่วนการขุดเจาะ จะทำให้มองเห็นภาพรวมของการพัฒนาเหมืองเพื่อการผลิตได้ชัดเจนขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การประเมินความเหมาะสมของเหมืองเปิด

การประเมินความเหมาะสมของเหมืองเปิดที่ระบุในบทนี้ เป็นการกำหนดเกณฑ์กับการวิเคราะห์แหล่งสะสมว่าสามารถดำเนินการขุดเจาะโดยให้ผลตอบแทนที่คุ้มกับการลงทุน ซึ่งการประเมินผลนี้เป็นการใช้ข้อมูลพื้นฐานทางธรณีวิทยาของแหล่งสะสม (หินหรือแร่) มาช่วยในการวางแผนเพื่อหาผลตอบแทนเชิงความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

#### 4.1 เกณฑ์เบื้องต้นในการประเมินความเหมาะสมของแหล่ง

การศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ ในการพัฒนาโรงงานเหมืองเปิดให้ดำเนินการได้จนตลอดอายุของโครงการ ในเชิงการวางแผนมีตัวแปรที่เป็นส่วนประกอบหลักที่สมควรใช้ในการประเมินความเหมาะสมของแหล่ง ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (หิน)
2. การจัดระบบและลำดับการผลิตโรงงานเหมืองเปิด
3. การจัดการเพื่อใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่ให้สมรรถนะสูงสุด
4. การวิเคราะห์หาความเหมาะสมเชิงการลงทุน

ส่วนประกอบทั้งสี่ดังกล่าวต้องมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบวงจร ลักษณะการประเมินนี้ การทำซ้ำเป็นแบบ iterative process แนวทางปกติของการประเมินเริ่มจากการสำรวจกับสร้างข่ายงาน (network) ข้อมูลพื้นฐานเชิงธรณีวิทยา ต่อมาเป็นการวางแผนเพื่อจัดซื้อ (หรือเช่า) เครื่องจักรกลและอุปกรณ์หลักที่จำเป็นในการผลิตสินแร่ (หิน) จากนั้นจึงเป็นการวางแผนเปิดโรงงานขุดเจาะ ที่อาจเลือกใช้เพียงเครื่องจักรกลหนัก เช่น รถตัก รถขุด หรืออาจต้องเลือกใช้การระเบิดเพื่อเปิดหน้างานด้วย

กระบวนการเปิดหน้างานดังกล่าว จำเป็นต้องมีการประเมินเชิงการลงทุน ซึ่งอาจมีการใช้ตัวแปรของการเสื่อมราคา กับความเสี่ยงเชิงค่าใช้จ่าย มาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อหาผลลัพธ์ที่เป็นการผลิตเพื่อให้ค่าของสินแร่ปัจจุบันสุทธิมีค่าสูงสุด ศัพท์เฉพาะที่ใช้แทนค่าของผลลัพธ์เชิงการลงทุนนี้คือ **มูลค่าปัจจุบันสุทธิ** [Net Present Value: NPV] ทั้งนี้การปฏิบัติงานควรมีความเป็นไปได้ตามเงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดของหลายสภาวะ เช่น สภาวะของภูมิประเทศและ

ธรณีวิทยา สภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์ที่จำกัด สมรรถนะของบุคลากรในเมือง สภาพคล่องของเงินลงทุน

การบรรยาย ส่วนประกอบทั้งสี่ส่วนที่ระบุในบทนี้ เป็นการเสนอแนะวิธีสำหรับการประเมินทั่วไป โดยแนวทางที่นำเสนออาจมีความเหมาะสมสำหรับแหล่งแร่ (หิน) บริเวณหนึ่ง แต่อาจมีความไม่เหมาะสมสำหรับแหล่งแร่ (หิน) อีกบริเวณหนึ่ง

## 4.2 การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (หิน)

การประเมินปริมาณสำรองเพื่อหาความสมบูรณ์ของแหล่ง จะมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาเป็นเหมืองเปิดหรือไม่ เป็นการวิเคราะห์ลักษณะเชิงกายภาพของแหล่งสะสมสินแร่ (ore deposit) หรือแหล่งหิน (quarry) ในบริเวณที่จะพัฒนา จุดมุ่งหมายของการประเมินนั้น ต้องการให้ทราบรูปร่างกับขนาดของแหล่ง ความต่อเนื่องของโซนสายแร่ (ระหว่างที่พัฒนาหน้างานเหมืองแร่) หรือความต่อเนื่องของมวลหิน (เมื่อพัฒนาหน้างานเหมืองหิน) ตลอดจนการแผ่กระจายของสินแร่ในแหล่ง คุณสมบัติของเกรดแร่ (mineral grade) กับคุณสมบัติมวลหิน ที่มีการแปรเปลี่ยนตามธรณีวิทยาของแหล่ง

วิธีการที่ผู้วิจัยได้สรุปเป็นแนวทางการประเมิน หรือแนวทางการออกแบบจำลองของแหล่งแร่ (หิน) มีทั้งหมด 4 รูปแบบ (หัวข้อย่อย 4.2.1 ถึง 4.2.4) แต่ในเชิงปฏิบัติจริงภาคสนาม อาจมีการสร้างรูปแบบของการประเมินหาความสมบูรณ์ที่แตกต่างไปจากนี้ได้ ขึ้นอยู่กับสภาพรูปแบบเชิงเรขาคณิตของแหล่งสะสม (deposit geometry) ที่มีรูปแบบค่อนข้างง่ายหรือรูปแบบยุ่งยากซับซ้อนกว่าปกติ

### 4.2.1 วิธีการเชิงเรขาคณิต (geometric methods)

วิธีการนี้ใช้ประเมินด้วยเครื่องมืออย่างง่าย นักธรณีวิทยาหรือวิศวกรหน้าเหมืองเป็นผู้ที่คำนวณด้วยตนเอง ปกติใช้ผังของแผนที่กับภาพตัดขวางที่ตัดผ่านแหล่งสะสมในบริเวณเขตประทานบัตร ข้อมูลเข้าที่ใช้ประกอบได้มาจากการเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์และการแปลความหมายจากแผนที่แหล่งแร่ สำหรับหินที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดสายแร่ตัดผ่านหรือมีร่องรอยจากกิจกรรมเชิงธรณีวิทยาที่ช่วยยืนยันการประเมินแหล่งสะสม

วิธีการเชิงเรขาคณิตมี 3 รูปแบบ (Noble, 1992) ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ยพื้นที่การหาค่าจากรูปหลายเหลี่ยม และการหาค่าจากรูปสามเหลี่ยม

— วิธีการหาค่าเฉลี่ยพื้นที่ (average area) เป็นวิธีการที่ง่ายสุดในการประเมินแหล่งสำรองของสินแร่ ทำได้โดยการแปลความหมายของรูปร่างมวลสินแร่ และประเมินผลรวมของ

ค่าเฉลี่ยเกรดแต่ละบล็อก (น้ำหนักเป็นต้น) ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอเป็นเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ของสินแร่ในแหล่งสะสม

— วิธีการหาค่าจากรูปหลายเหลี่ยม (polygonal) วิธีนี้ใช้ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างรูปหลายเหลี่ยมและภาพตัดขวาง การคำนวณหาค่าน้ำหนักกับเกรดมีความคล้ายคลึงกับวิธีหาค่าเฉลี่ยพื้นที่ โดยรูปหลายเหลี่ยมจะถูกวาดลงบนผังแผนที่ที่ตั้งฉากหลุมเจาะที่มีเส้นเชื่อมโยงระหว่างหลุมเจาะ (รูปที่ 4.1 กับตารางที่ 4.1 หน้าถัดไป) เมื่อคำนวณร่วมกับภาพตัดขวางที่เชื่อมระหว่างหลุมเจาะที่ใกล้เคียงทำให้ทราบค่าเกรดของแต่ละพื้นที่ (ที่อยู่ในกรอบอิทธิพลของรูปหลายเหลี่ยม) มีค่าเกรดเพียงค่าเดียว ผลรวมของผลคูณระหว่างพื้นที่ทั้งหมดกับค่าเกรดของแต่ละพื้นที่จะเป็นค่าเศษ ที่ถูกหารด้วยพื้นที่ทั้งหมดของทุกหลุมเจาะที่เป็นค่าส่วน ผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าเกรดเฉลี่ยของแหล่งสะสมสินแร่ในบริเวณ

ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ วิธีหนึ่งที่นิยมปฏิบัติกันคือสร้างบล็อกเล็ก ๆ ทับลงไปบนผังภาพของรูปหลายเหลี่ยม (ดูรูปที่ 4.2 กับตารางที่ 4.2 ประกอบ) กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์โลหะในสินแร่ของแต่ละหลุมเจาะลงในแต่ละกลุ่มบล็อกที่อยู่ในบริเวณรอบหลุมเจาะ และในพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมรูปหนึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าเดียว ผลรวมของผลคูณระหว่างพื้นที่ทั้งหมดกับค่าเกรดของแต่ละกลุ่มบล็อกจะเป็นค่าเศษที่ถูกหารด้วยจำนวนกลุ่มบล็อกทั้งหมดของทุกหลุม ส่วนผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าเกรดเฉลี่ยของแหล่งสะสมสินแร่ในบริเวณ

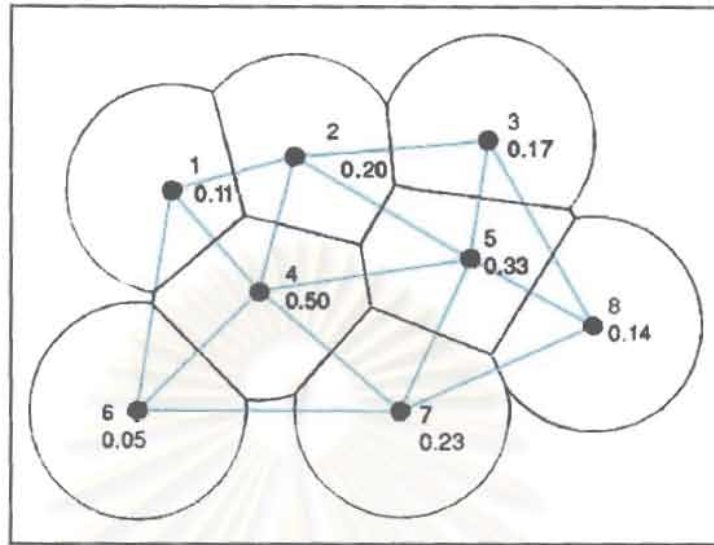
— วิธีการหาค่าจากรูปสามเหลี่ยม (triangle) ทำได้โดยกำหนดให้หลุมเจาะแต่ละหลุมมีค่าเกรดตรงจุดปลายหลุมที่ทำมุมฉากกับพื้นที่หน้าตัดรูปสามเหลี่ยม เมื่อโยงเส้นระหว่างหลุมเจาะทำให้สามารถหาพื้นที่ของแต่ละรูปเหลี่ยมได้ ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยเกรดของ 3 หลุมเจาะที่อยู่ตรงมุมสามเหลี่ยมรูปหนึ่ง จะเป็นค่าตัวแทนเปอร์เซ็นต์เกรดของแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยม จากนั้นก็หาค่าเกรดเฉลี่ยในพื้นที่แหล่งสะสมได้ด้วยวิธีเดียวกันกับรูปหลายเหลี่ยม

#### 4.2.2 วิธีหาค่าเฉลี่ยเชิงเคลื่อนที่ (moving average method)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่ง แต่ต้องมีเครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลกระบวนการที่สำคัญของการหาค่าเฉลี่ยเชิงเคลื่อนที่มี 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. แบ่งมวลสินแร่ที่มีรูปร่าง 3 มิติ ออกเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ดูรูปที่ 4.3)
2. ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดค่าเกรด จะมีรหัสเฉพาะของแต่ละบล็อก
3. การประเมินหาค่าเกรดแต่ละบล็อก ใช้ฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วในคอมพิวเตอร์ วิธีนี้เป็นการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (weighted average) ซึ่งมีการสุ่มเชิงสถิติ เช่น ใช้วงรีที่ครอบคลุม



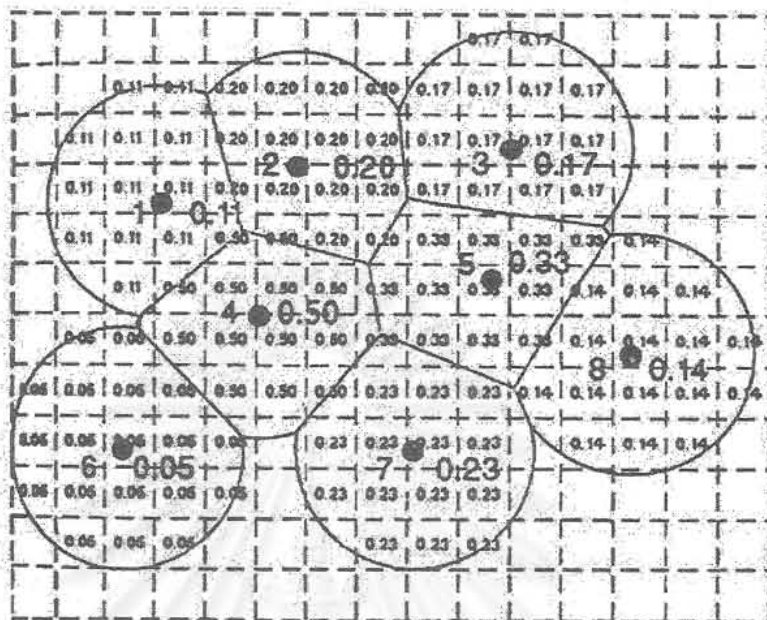


รูปที่ 4.1 วิธีการใช้รูปหลายเหลี่ยมเพื่อคำนวณค่าเกรดเฉลี่ยของพื้นที่แหล่งสะสม

ตารางที่ 4.1 ด้านซ้ายระบุค่าเกรดแต่ละหลุมเจาะ และค่าพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมที่มีหลุมเจาะตรงกลาง (รูปที่ 4.1) ด้านขวาเป็นการคำนวณ 3 ขั้นตอน

หมายเลขหลุมเจาะ สำรวจแหล่งสะสมแร่	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ สินแร่ในหลุมเจาะ	พื้นที่อิทธิพลจากวิธี รูปหลายเหลี่ยม	ผลเฉลย
1	0.11	39.4	พื้นที่อิทธิพลทั้งหมดของ 8 หลุมเจาะ = 333.7 ตร.ม  (เปอร์เซ็นต์เกรด) x (พื้นที่หลุมเจาะ) = [(0.11 x 39.4) + (0.20 x 37.6) + 0.17 x 42.0) + (0.50 x 37.7) + (0.33 x 33.8) + (0.05 x 50.1) + (0.23 x 46.8) + (0.14 x 46.3)] = 68.75 เปอร์เซ็นต์ต่อ ตร.ม.  ค่าเปอร์เซ็นต์เกรดเฉลี่ยทั้งบริเวณ (average grade) = 0.2060
2	0.20	37.6	
3	0.17	42.0	
4	0.50	37.7	
5	0.33	33.8	
6	0.05	50.1	
7	0.23	46.8	
8	0.14	46.3	

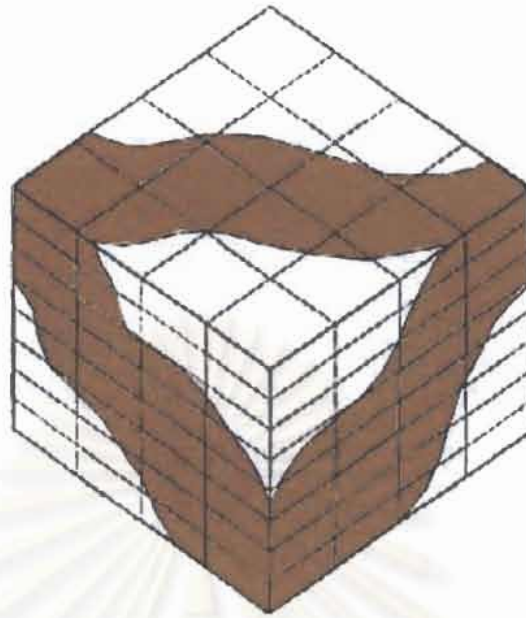




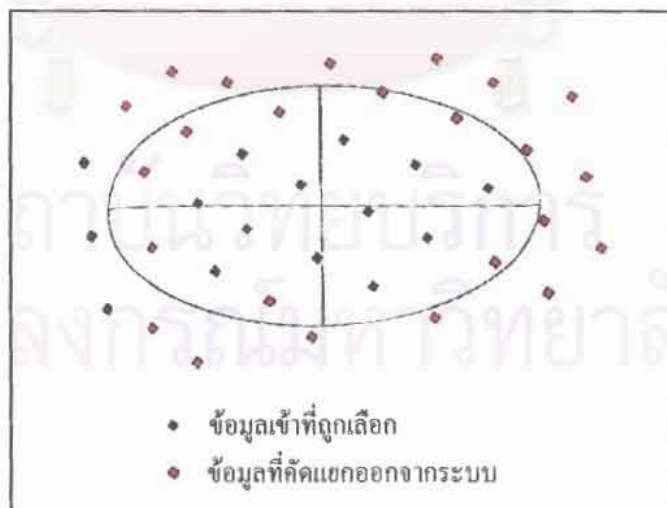
รูปที่ 4.2 วิธีการใช้บล็อกเล็กๆ ในกรอบรูปหลายเหลี่ยม  
ที่มีผลต่อการคำนวณในแต่ละหลุมเจาะ

ตารางที่ 4.2 ด้านซ้ายระบุค่าเกรดแต่ละหลุมเจาะ และค่าพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมที่มี  
หลุมเจาะตรงกลาง (รูปที่ 4.2) ด้านขวาเป็นการคำนวณ 3 ขั้นตอน

หมายเลขหลุมเจาะ สำรวจแหล่งสะสมแร่	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ สินแร่ในหลุมเจาะ	พื้นที่อิทธิพลจากวิธี รูปหลายเหลี่ยม	ผลเฉลย
1	0.11	12	พื้นที่อิทธิพลทั้งหมดของ 8 หลุมเจาะ = 114 บล็อก  (เปอร์เซ็นต์เกรด) x (จำนวนบล็อกแต่ละหลุมเจาะ) = (0.11 x 12) + (0.20 x 14) + (0.17 x 14) + (0.50 x 13) + (0.33 x 12) + (0.05 x 19) + (0.23 x 14) + (0.14 x 16) = 23.95 เปอร์เซ็นต์ต่อบล็อก  ค่าเปอร์เซ็นต์เกรดเฉลี่ยทั้งบริเวณ (average grade) = 0.2101
2	0.20	14	
3	0.17	14	
4	0.50	13	
5	0.33	12	
6	0.05	19	
7	0.26	14	
8	0.15	16	



รูปที่ 4.3 การใช้บล็อกเล็ก ๆ แทนมวลสินแร่ 3 มิติที่ใช้วิธี  
การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average)



รูปที่ 4.4 การคำนวณเชิงสถิติเพื่อเลือกข้อมูลเข้าและคัดข้อมูลออก  
โดยใช้รูปวงรี (หรือรูปอื่นที่เหมาะสม) ที่แบ่งออกเป็นจุดภาค

ระหว่างหลุมเจาะที่ใกล้เคียงกัน 2 หลุมเจาะ (รูปที่ 4.4) เพื่อคัดเลือกเป็นข้อมูลเข้า (selected data) สำหรับใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป และการคัดเลือกข้อมูลออกจากระบบ (excluded data) ที่ไม่ใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป

สูตรการหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักจากข้อมูลเข้าที่คัดเลือกไว้แล้ว คือ

$$g^* = \sum w_i g_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.1)$$

นิยามของค่าตัวแปรในสมการ 4.1 ได้แก่  $g^*$  เป็นค่าเกรดที่ประมาณได้ (เกรดเฉลี่ยของแหล่งสะสมในบริเวณ) ส่วน  $g_i$  เป็นค่าเกรดของตัวอย่างข้อมูลเข้า (sample data) ตามหมายเลข  $i$  ค่า  $w_i$  เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดของตัวอย่างและ  $n$  เป็นจำนวนตัวอย่างข้อมูลเข้าที่ถูกคัดเลือกทั้งหมด

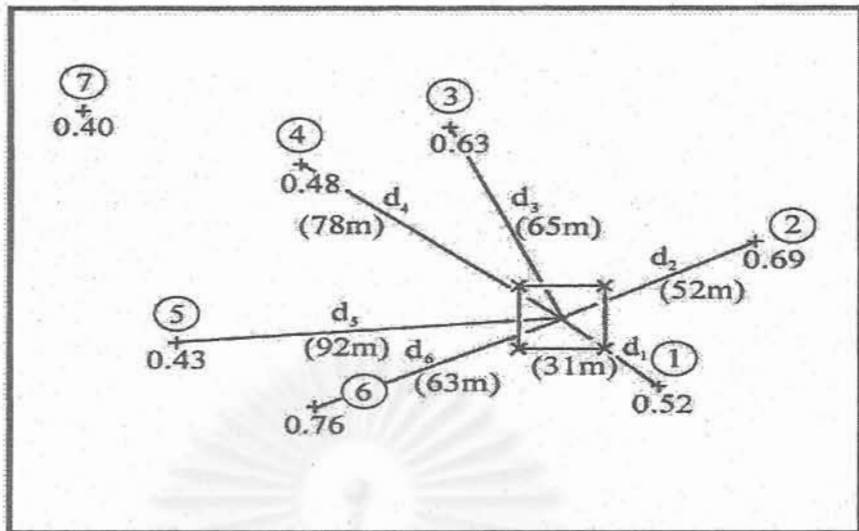
#### 4.2.3 วิธีประเมินค่าถ่วงน้ำหนักจากส่วนกลับระยะทาง (inverse distance)

วิธีนี้เป็นการประมาณค่าในช่วง (interpolation) จากการสังเกตการณ์ภาคสนามพบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างของข้อมูลเข้าที่คัดเลือกมา มีสัดส่วนผกผันกับค่ากำลังของระยะทาง (inverse power of the distance) จากสมการที่ 4.1 สามารถดัดแปลงเป็นการประมาณค่าของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนักเฉพาะได้ดังนี้

$$w_i = \frac{d_i^{-\text{power}}}{\sum d_i^{-\text{power}}} \quad (i) = 1 \dots \text{number of samples} \quad (4.2)$$

ค่า  $w_i$  เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่ต้องการทราบของแต่ละตัวอย่าง  $i$  และ  $d_i$  เป็นระยะทางระหว่างจุดที่ประมาณค่ากับตำแหน่งของตัวอย่าง  $i$  คำว่า power เป็นเลขกำลัง (ถ่วงน้ำหนัก) ที่ผกผันกับระยะทาง (inverse distance)

ในการใช้สมการที่ 4.2 มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ในกรณีที่  $d_i$  มีค่าต่ำมากหรือเกือบเป็นศูนย์ (zero) เพราะจะมีผลต่อการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ควรกำหนดขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ในบางครั้งจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์ของผู้ประเมิน เพื่อลองสุ่มแบบผิด-ถูก (trial and error) รูปที่ 4.5 เป็นภาพสเก็ทซ์ของการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีนี้ เมื่อค่าเฉพาะของแต่ละค่าแล้ว (ใช้สมการที่ 4.2) จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของเกรดในพื้นที่แหล่งสะสม (หาจากสมการที่ 4.1)



รูปที่ 4.5 วิธีการประมาณค่าจากการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทาง (inverse distance) จุดประเมินกำหนดกรอบของการคำนวณเป็นตารางกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 4.3 ด้านบนของตารางแสดงผลการคำนวณของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนักที่ผกผันกับระยะทางโดยใช้สมการ 4.2 ด้านล่างของตารางเป็นการหาค่าเฉลี่ยเกรดของโลหะทองแดงในบริเวณ โดยใช้สมการ 4.1

$$w_i = \frac{\frac{1}{31^2}}{\sum_{i=1}^6 \frac{1}{d_i^2}} = \frac{\frac{1}{31^2}}{\frac{1}{31^2} + \frac{1}{52^2} + \frac{1}{65^2} + \frac{1}{78^2} + \frac{1}{92^2} + \frac{1}{63^2}} = 0.477$$

ทำนองเดียวกัน  $w_2 = 0.170$ ,  $w_3 = 0.108$ ,  $w_4 = 0.075$ ,  $w_5 = 0.054$ ,  $w_6 = 0.116$

$$g^* = \sum_{i=1}^6 w_i g_i$$

$$= \left[ (0.477 \times 0.52) + (0.170 \times 0.69) + (0.108 \times 0.63) + (0.075 \times 0.48) + (0.054 \times 0.43) + (0.116 \times 0.75) \right] \% \text{ Cu} = 0.58 \% \text{ Cu}$$

#### 4.2.4 วิธี Kriging

Kriging เป็นวิธีการประเมินค่าเกรดแหล่งสะสมของสินแร่โดยอาศัยความรู้ทางธรณีสถิติ (geostatistics) วิธีนี้เป็นแนวทางการปรับแก้จากการประเมินค่าด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ดั้งเดิม เช่น การหากราฟเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (best fit) หรือการประมาณค่าแบบไม่เอนเอียง (unbiased estimate) ตามปกติธรรมชาติของแหล่งแร่ในบริเวณที่สำรวจตรวจสอบมักมีความแปรผันตามค่าของระยะทางและทิศทาง นักธรณีวิทยาจึงคิดค้นสร้างกราฟสำหรับเปรียบเทียบค่าตัวแปรสองค่า ในลักษณะพิเศษไม่พึ่งพิงกับจำนวนตัวอย่าง ที่เรียกว่า variogram ตัวแปรที่ต้องการหาค่าเมื่อเทียบกับระยะทางที่ห่างจากหลุมเจาะคือ  $\gamma(h)$  มีชื่อเฉพาะว่า semivariogram หาได้จากสูตรเชิงประสพการณ์ดังต่อไปนี้

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \left( \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 \right) \quad (4.3)$$

กำหนดคู่ตัวอย่างที่วิเคราะห์เป็น  $n$  คู่ ซึ่งทราบค่าระยะทางห่างจากตำแหน่งหรือจุดที่วิเคราะห์ ( $h$ ) พจน์  $x_i$  เป็นตัวอย่างค่าแรกของคู่ ส่วนพจน์  $x'_i$  เป็นตัวอย่างค่าที่สองของคู่ที่  $i$  (จำนวนตัวเลขคู่)

ธรรมชาติของการประเมินค่ามวลสินแร่ที่เป็นกลุ่มบล็อก ตัวแทนที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่ประเมินควรมีค่าถ่วงน้ำหนัก (weighted value) มากกว่าตัวแทนที่อยู่ไกลออกไป ถึงแม้การใช้บล็อกสินแร่และประเมินค่า semivariogram ให้ความแม่นยำระดับหนึ่ง แต่ความคลาดเคลื่อน (error) อาจเกิดขึ้นได้ตามระบบของ Krige (1961, 1962) ในกระบวนการมีการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อจะลดความคลาดเคลื่อนมีค่าให้ต่ำสุด

หลักการคำนวณตามวิธี Kriging ถ้าบล็อกหนึ่งของสินแร่สังกะสี มีสัญลักษณ์เป็น  $M$  ถูกประเมินจากตัวอย่างที่มีจำนวนเป็น  $i$  ตัวอย่าง ( $x_i$ ) สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนด้วยสมการข้างล่างนี้

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4.4)$$

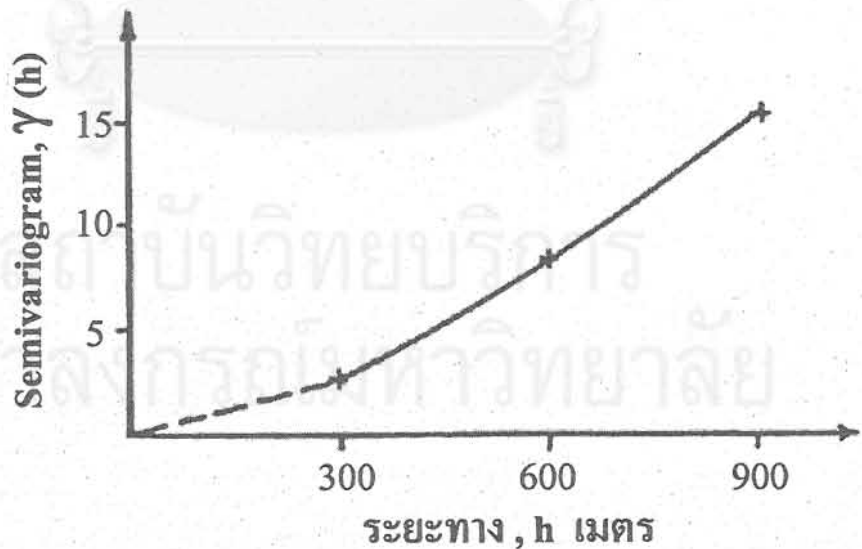
พจน์  $Z^*$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประเมินผลจากค่า  $Z$  ซึ่งเป็นค่าที่แท้จริงสำหรับฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic) ของค่าถ่วงน้ำหนักตัวอย่าง  $w_i$  ของตัวอย่างที่  $i$

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจด้านหิน แสดงข้อมูลที่เป็นค่าความหนาชั้นด้านหิน  
กับระยะห่างหลุมเจาะ เพื่อหาผลเฉลยของค่า  $\gamma(h)$ , semivariogram

ข้อมูล ภาคสนาม	5 5 7 12 11 8 7 2 3 3	ความหนาชั้นด้านหิน (เมตร)
	x x x x x x x x	ตำแหน่งหลุมเจาะ
	0 500 1,000	ระยะห่างตามมาตราส่วน (เมตร)

ผลเฉลย	$h$ (เมตร)	300	600	900
	$\gamma(h)$	2.86	8.17	15.67



รูปที่ 4.6 กราฟที่สร้างขึ้นเพื่อกำหนดค่า  $\gamma(h)$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่พึ่งพิงกับระยะทาง  
และทิศทางในรูปสมมุติให้การประมาณค่าอยู่ในทิศทางเดียวกัน



ดังนั้นค่าผลลัพธ์จากการประเมินจึงไม่ควรสูงหรือต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ถ้าเป็นไปตามสมมติฐานสามารถกำหนดให้ผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0 (ศูนย์) หรือผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัวอย่าง  $i$  เป็น 1 (หนึ่ง)

$$\sum w_i = 1 \quad (4.5)$$

กำหนดให้สัญลักษณ์  $\sigma_k^2$  เป็นตัวแทนของการประมาณค่าทางสถิติเชิงความแปรปรวนจากจำนวนตัวอย่าง  $i$

ในกรณีที่ความแปรปรวน (variance) ในระบบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ค่าถ่วงน้ำหนักในระบบ (สัญลักษณ์  $M$  ที่แทนมวลสินแร่สังกะสี) จึงหาค่าตอบได้จากสมการเชิงเส้นที่ประยุกต์วิธี Lagrange มาใช้ดังนี้

$$\sigma_{11}w_1 + \sigma_{12}w_2 + \dots + \sigma_{1n}w_n + \lambda = \sigma_{1w} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{12}w_1 + \sigma_{22}w_2 + \dots + \sigma_{2n}w_n + \lambda = \sigma_{2w}$$

$$\vdots$$

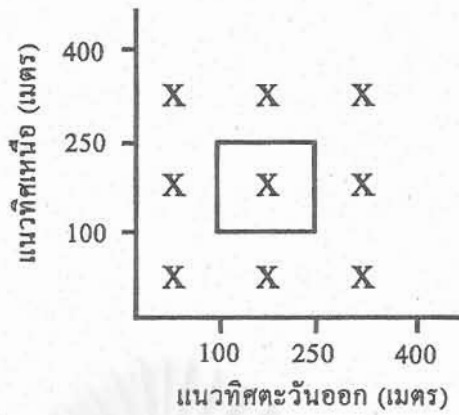
$$\vdots$$

$$\vdots$$

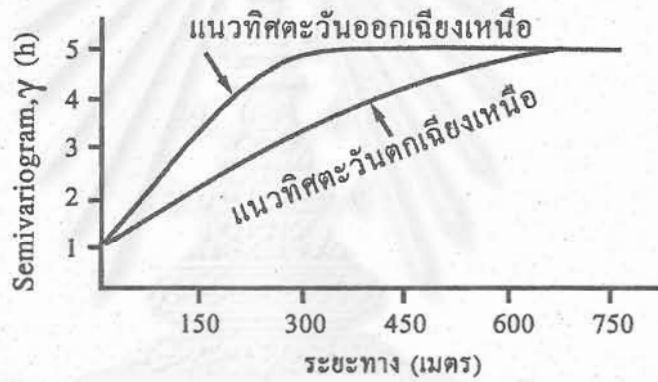
$$\sigma_{1n}w_1 + \sigma_{2n}w_2 + \dots + \sigma_{nn}w_n + \lambda = \sigma_{nw}$$

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$$

สมการที่ 4.6 มีจำนวนของสมการเป็น  $(n+1)$  สมการ หรือมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอยู่เท่ากับ  $(n+1)$  ตัวแปร ค่าน้ำหนักถ่วงตัวอย่างเป็น  $w_i$  และตัวคูณลากรองจ์  $\lambda$  (Lagrange multiplier) ที่บวกเข้าไปเพื่อให้ผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 (หนึ่ง) สมการในระบบถูกเรียกว่า Kriging system ค่าเชิงสถิติทั้งที่เป็นค่าความแปรปรวน (variance) กับค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) ในระบบนี้ได้จากการสร้างกราฟเพื่อหาค่า semivariogram ที่เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของสมการ หรือเป็นผลเฉลยของสมการในระบบ ซึ่งบางที่เรียกชื่อเฉพาะว่า Kriging weight,  $\sigma_w^2$  และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ได้จากกระบวนการประเมินดังกล่าว เรียกว่า Kriging error,  $\sigma_k^2$  สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในระบบเป็น



รูปที่ 4.7 ก. ผังของแผนที่จากผลการวิเคราะห์แสดงเกรดที่เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของโลหะ Zn แต่ละหลุมเจาะ



รูปที่ 4.7 ข. การสร้าง semivariogram ของเปอร์เซ็นต์โลหะ Zn ในรูปแสดงผลการเทียบระยะทาง จำนวน 2 แนวทาง

0.15 X	0.10 X	0 X
0.10 X	0.30 X	0.10 X
0 X	0.10 X	0.15 X

รูปที่ 4.7 ค. ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละหลุมเจาะที่ประมาณค่าจากวิธี Kriging

$$\sigma_k^2 = \left[ \sigma_w^2 - \sum_{i=1}^n w_i \sigma_{iw} - \lambda \right] \quad (4.7)$$

ตัวอย่างแสดงวิธี Kriging นี้ได้จากข้อมูลหลุมเจาะของเหมืองเปิดเพื่อผลิตสินแร่สังกะสี แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ก. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติเพื่อหาค่าของ semivariogram ที่มีความแปรปรวนกับค่าระยะทางที่อยู่ห่างจากหลุมเจาะ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ข. ส่วนค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละหลุมเจาะที่ได้จากการใช้วิธี Kriging แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ค.

ผลเฉลยจากการใช้วิธี Kriging มีค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า เพียง 0.52 % Zn เท่านั้น ซึ่งต่ำกว่าวิธีการคำนวณจากรูปหลายเหลี่ยม ที่ใช้วิเคราะห์หาผลเฉลยได้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 1.20 % Zn ส่วนอีกวิธีถ้าใช้หาค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างทุกหลุมเจาะ จะมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.72% Zn ซึ่งยังสูงกว่าวิธีของ Kriging (Rendu and Mathieson, 1990)

ในเชิงทฤษฎีการประมาณค่าเชิงเส้นด้วยวิธี Kriging นี้เหมาะสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์โดยการแจกแจงค่าแบบปกติ (normal distribution) จึงต้องมีการพัฒนาวิธีนี้ให้ใช้กับข้อมูลเข้าที่มีการแจกแจงค่าแบบอื่นได้ เช่น lognormal (Journel and Huijbregts, 1978; Journel, 1980) ทั้งนี้มีแนวโน้มว่าการตั้งสมมุติฐานของการแจกแจงค่าแบบนี้จะได้ผลลัพธ์ที่มีความเบี่ยงเบนจากความเป็นจริงน้อยกว่าให้ค่าแจกแจงเป็นแบบปกติ และแปลความหมายเพื่อหาตัวแปรที่ไม่รู้ค่าได้ง่ายกว่าประโยชน์

ประโยชน์ของการใช้ความรู้เชิงธรณีสถิติช่วยให้การประเมินค่าเกรดสามารถควบคุมได้ และยังประยุกต์กับการผสม (blending) ในระหว่างการบดย่อยมวลสินแร่ ช่วยในการศึกษาและวางแผนป้องกันปัญหาการผลิตหน้างานเหมืองเปิดที่อาจจะเกิดขึ้นได้

### 4.3 การจัดระบบและลำดับการผลิตหน้างานเหมืองเปิด

การวางแผนเพื่อจัดการระบบการผลิต เป็นปัจจัยหลักในการดำเนินงานปฏิบัติการหน้างานขุดเจาะ สิ่งที่ต้องควรต้องเน้นย้ำก็คือ การจัดลำดับการผลิต (production scheduling) ที่ดีจะทำให้เป้าหมายของผลตอบแทนในการปฏิบัติการผลิตภายในเหมืองมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด

#### 4.3.1 ขั้นตอนของการจัดลำดับการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนของการวางแผนเพื่อหาช่วงการจัดลำดับที่เหมาะสมที่สุด (Bohnet, 1990) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ในส่วนของขั้นตอนแรก เป็นการแยกสารหรือทำการขุดเจาะทำเหมืองเพื่อนำ

สินแร่หรือวัสดุที่ต้องการออกจากบริเวณหน้างานเหมืองเปิด ขั้นตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์ถึงกลยุทธ์ที่จะใช้ค่า cutoff grade ในการวางแผนลำดับการใช้อุปกรณ์เพื่อทำการผลิตที่ต้องคำนึงถึงเวลาในขณะที่ทำเหมืองด้วย ขั้นตอนที่สามที่เป็นขั้นตอนสุดท้ายเป็นการจัดหมู่ของอัตราการผลิตในเหมืองเปิด โรงโม่บดย่อย และโรงถลุง ให้มีความสอดคล้องกันกับเงื่อนไขบังคับทางด้านการตลาด เงินลงทุน และอื่นๆ

โครงการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน” ที่ระบุนรายละเอียดไว้ในรายงานวิจัยฉบับนี้ เป็นส่วนที่จัดอยู่ในขั้นตอนแรก เพราะการจัดการให้เกิดการดำเนินการผลิตที่เหมาะสมที่สุดเกิดจากความสามารถนิยามโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้ายได้อย่างเหมาะสมนั่นเอง

ตัวแปรหลักในการที่จะทำวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เป็น โครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้ายแบ่งออกเป็น 2 เซตย่อย (subset) เซตย่อยแรก ได้แก่ อัตราส่วนการขุดเจาะที่มีผลต่อความสามารถในการนำสินแร่ออกมาอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เกรดที่วิเคราะห์เป็นเปอร์เซ็นต์ของสินแร่ตำแหน่งที่สินแร่เกิด และความสามารถที่ทางเหมืองจะใช้เครื่องจักรกลเข้าไปขุดเจาะอย่างสะดวกหรือไม่

เซตย่อยที่สองเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับตัวแปรในเชิงค่าใช้จ่าย ทั้งที่เป็นค่าใช้จ่ายตั้งต้นกับค่าใช้จ่ายในการทำให้โครงการสามารถดำเนินได้ตลอดไป ค่าใช้จ่ายโดยตรง (direct cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่จุกค้ำทุนในการขุดเจาะที่มีความสัมพันธ์กับเกรดของสินแร่ ซึ่งมักจะเป็นจุดสุดท้ายที่เปิดทำเหมือง (ทำการขุดเจาะเป็นครั้งสุดท้ายก่อนปิดทำการ)

ความแม่นยำของการประเมินผลสำหรับตัวเลขต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่ายที่อาจเกิดขึ้น ปริมาณสินแร่ที่ขุดเจาะได้ในระยะเวลาหนึ่ง และราคาซื้อขายสินแร่ในท้องตลาดในขณะนั้น เป็นสิ่งจำเป็นมากในการคำนวณผลตอบแทนที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ สำหรับกระบวนการขุดเจาะในงานเหมืองเปิด การคำนวณตัวเลขค่าใช้จ่ายอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ ค่าใช้จ่ายต่อต้านของวัสดุที่ต้องขุดเจาะออกในกระบวนการทำเหมือง ค่าใช้จ่ายต่อต้านของสินแร่ที่ต้องแยกออกจากสารมลทินหรืออยู่ในสภาพเหมาะสมต่อการถลุง และสุดท้ายเป็นค่าใช้จ่ายในกระบวนการถลุงให้เป็นโลหะบริสุทธิ์ หรือทำให้วัสดุมีขนาดที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเชิงวิศวกรรม

#### 4.3.2 กรณีตัวอย่างของการจัดลำดับในการผลิต

จากรูปที่ 4.8 เป็นตัวอย่างเพื่อแสดงผลของการจัดลำดับที่ดี ที่คัดลอกกับดัดแปลงมาจาก Open Pit Mine Planning and Design หน้า 565-569 (Hustrulid and Kuchta, 1995) ทั้งนี้แบ่งบริเวณของแหล่งสะสมในเหมืองเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส กำหนดให้ส่วนที่เป็นสินแร่ให้มี

เครื่องหมายเป็น O ส่วนที่ไม่ใช่สินแร่และเป็นวัสดุที่ไม่ต้องการมีเครื่องหมายเป็น W ดังนั้นตามรูปที่ 4.8 จะมีสินแร่ 10 บล็อก และส่วนที่เป็น waste อีก 10 บล็อก

เป้าหมายต้องการผลิตสินแร่หรือส่วนที่ไม่ต้องการในอัตรา 5 บล็อกต่อปี (ไม่แยกชนิดของการผลิตว่าต้องเป็นสินแร่เท่านั้น) ตั้งสมมุติฐานให้มูลค่าสุทธิของบล็อกสินแร่เป็น 2,000 บาทต่อบล็อก และค่าใช้จ่ายในการนำส่วนที่ไม่ต้องการออก (หรือ waste) เท่ากับ 1,000 บาทต่อบล็อก ถ้าคำนวณแบบตรงๆ จะได้กำไรที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) ทั้งหมด 10,000 บาท ถ้าหากสามารถทำเหมืองและขุดเจาะบล็อกต่างๆ ออกมาทันที แต่ในสภาพความเป็นจริงยังมีเงื่อนไขบังคับหลายอย่างที่ทำการคำนวณตรงๆ ใช้ไม่ได้ การอธิบายแนวคิดในหัวข้อย่อยต่อไปนี้จะแบ่งวิธีการตั้งสมมุติฐานของการลำดับขั้นตอนในการผลิต ให้มีความแตกต่างกัน 5 รูปแบบ ผลการคำนวณค่าของ NPV จะแยกแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

#### 1. รูปแบบที่ 1 ทำการขุดเจาะ waste ออกก่อนแล้วจึงขุดเจาะสินแร่

รูปแบบนี้เป็นการปฏิบัติการแบบง่ายสุด (ดูรูปที่ 4.9) บล็อกในส่วนที่เป็น waste ที่อยู่ด้านบน จะถูกขุดเจาะออกหมดภายใน 2 ปี เมื่อเริ่มต้นปีที่ 3 และ 4 ก็ทำการขุดเจาะบล็อกที่เป็นสินแร่ออกปีละ 5 บล็อก ดังนั้นเมื่อครบ 4 ปี การขุดเจาะทำเหมืองจะเสร็จสมบูรณ์ ถ้าหากสมมุติให้อัตรารอกเบี้ย 10% จะได้ค่า NPV = 5,665.60 บาท

#### 2. รูปแบบที่ 2 ทำการขุดเจาะสลักระหว่าง waste กับสินแร่ ชุดแรก

ชุดแรกของการขุดเจาะสลับบล็อกกันนี้ จะเริ่มต้นเมื่อเริ่มต้นปีที่ 2 (ดูรูปที่ 4.10) โดยจะขุดเจาะบล็อกในส่วนที่เป็น waste จำนวน 2 บล็อกต่อปี และขุดเจาะบล็อกในส่วนที่เป็นสินแร่ 3 บล็อกต่อปี ซึ่งในปีที่ 4 การขุดเจาะจะเสร็จสมบูรณ์ แต่ได้ค่า NPV = 6,546.68 บาท

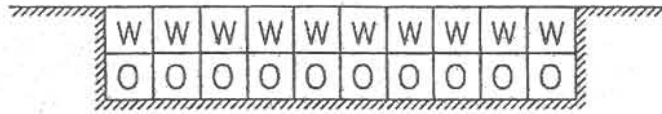
#### 3. รูปแบบที่ 3 ทำการขุดเจาะสลักระหว่าง waste กับสินแร่ ชุดที่สอง

ชุดที่สองของการขุดเจาะสลับบล็อกกันเริ่มต้นตั้งแต่ปีที่ 1 (ดูรูปที่ 4.11) ที่มีการขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste มากกว่าบล็อกที่เป็นสินแร่ เป็นจำนวน 1 บล็อกต่อปี [นั่นคือปีแรกขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste ออก 3 บล็อก และขุดเจาะบล็อกที่เป็นสินแร่ ออก 2 บล็อก] ทั้งนี้เมื่อทำการขุดเจาะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในปีที่ 4 จะได้ค่า NPV = 7,585.48 บาท

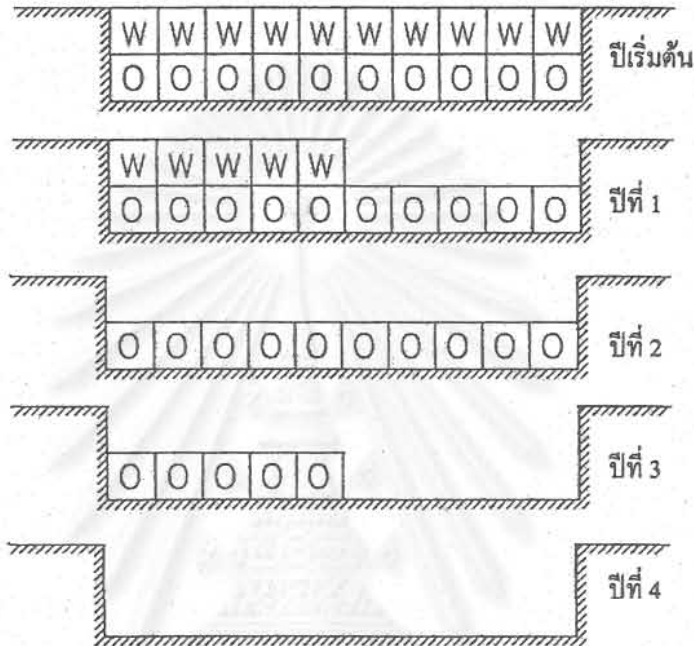
#### 4. รูปแบบที่ 4 ทำการขุดเจาะสลักระหว่าง waste กับสินแร่ ชุดที่สาม

ชุดที่สามของการขุดเจาะสลับบล็อกกันเริ่มตั้งแต่ปีที่ 1 (ดูรูปที่ 4.12) ที่มีการขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste มากกว่าบล็อกที่เป็นสินแร่ เป็นจำนวน 1.5 บล็อกต่อปี [นั่นคือปีแรกขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste ออก 2 3/4 บล็อก และขุดเจาะบล็อกที่เป็นสินแร่ ออก 2 1/4 บล็อก] ทั้งนี้เมื่อทำการขุดเจาะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ในปีที่ 4 จะได้ค่า NPV = 7,755.11 บาท

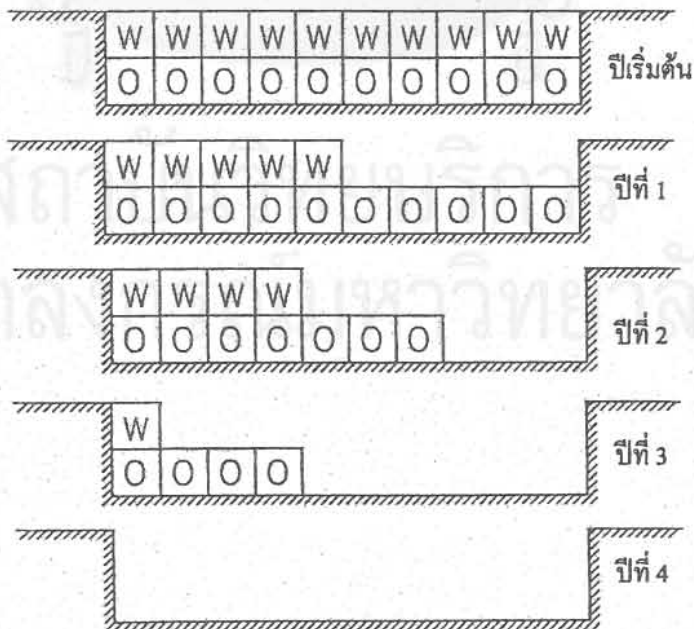




รูปที่ 4.8 บ่อเหมืองดินแบบที่แบ่งเป็นบล็อกสินแร่ (เครื่องหมาย O) กับบล็อกที่เป็นวัสดุที่ไม่ต้องการและไม่สามารถซื้อขายได้ (เครื่องหมาย W)

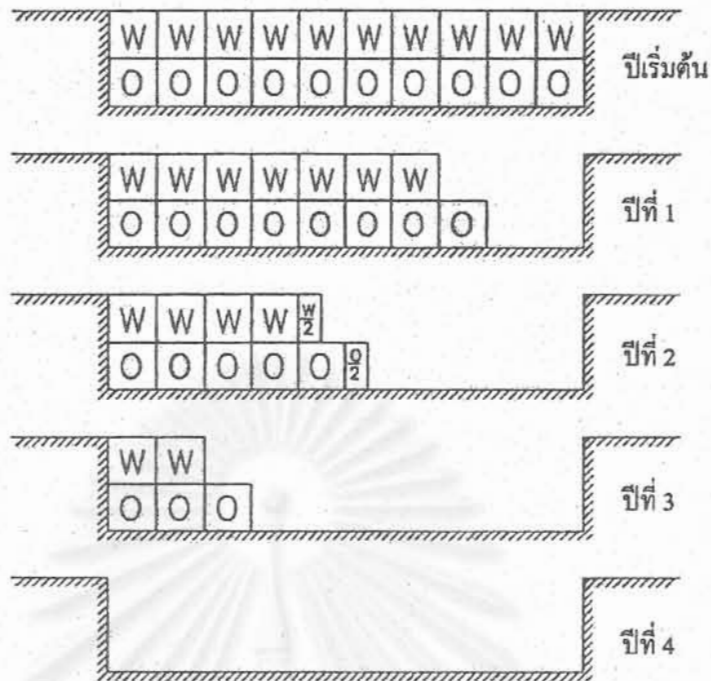


รูปที่ 4.9 การจัดลำดับขั้นตอนแบบง่ายที่เป็นรูปแบบที่ 1

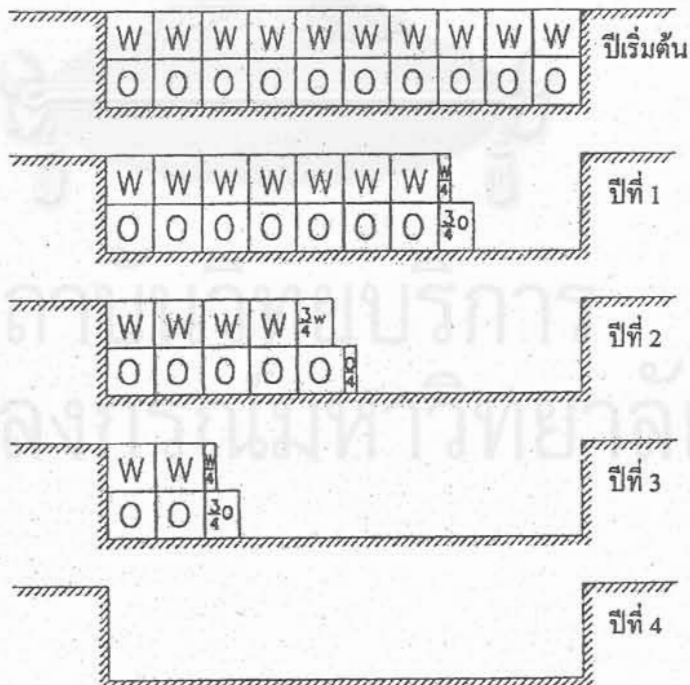


รูปที่ 4.10 การจัดลำดับขั้นตอนแบบซุกเจาะสลับที่เป็นรูปแบบที่ 2

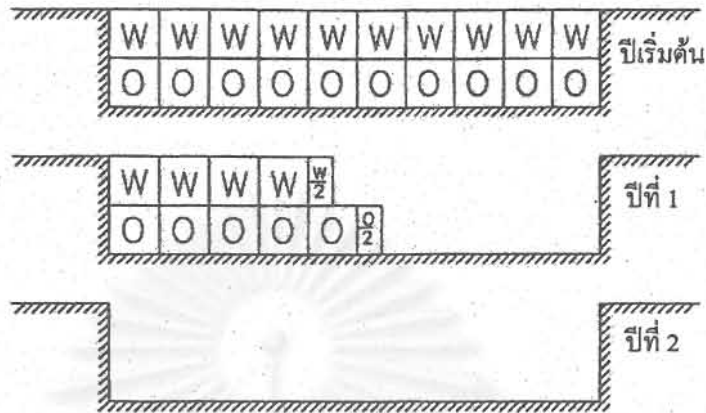




รูปที่ 4.11 การจัดลำดับขั้นตอนแบบขุดเจาะสลักที่เป็นรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.12 การจัดลำดับขั้นตอนแบบขุดเจาะสลักที่เป็นรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.13 การจัดลำดับขั้นตอนแบบจุดเจาะสลักที่เป็นรูปแบบที่ 5

ตารางที่ 4.5 ผังการคำนวณตัวเลขที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ค่า NPV) สำหรับบ่อเหมือง  
ต้นแบบของรูปที่ 4.9 ที่มีการจัดลำดับการทำเหมือง 5 รูปแบบ

<p>ลำดับขั้นตอนทำเหมืองแบบที่ 1</p> $\begin{aligned} \text{ค่า NPV} &= -5,000/(1.10)^1 - 5,000/(1.10)^2 \\ &\quad + 10,000/(1.10)^3 + 10,000/(1.10)^4 \\ &= 5,665.60 \text{ บาท} \end{aligned}$	<p>ลำดับขั้นตอนทำเหมืองแบบที่ 2</p> $\begin{aligned} \text{ค่า NPV} &= -5,000/(1.10)^1 + 4,000/(1.10)^2 \\ &\quad + 4,000/(1.10)^3 + 7,000/(1.10)^4 \\ &= 6,546.68 \text{ บาท} \end{aligned}$
<p>ลำดับขั้นตอนทำเหมืองแบบที่ 3</p> $\begin{aligned} \text{ค่า NPV} &= 1,000/(1.10)^1 + 2,500/(1.10)^2 \\ &\quad + 2,500/(1.10)^3 + 4,000/(1.10)^4 \\ &= 7,585.48 \text{ บาท} \end{aligned}$	<p>ลำดับขั้นตอนทำเหมืองแบบที่ 4</p> $\begin{aligned} \text{ค่า NPV} &= 1,750/(1.10)^1 + 2,500/(1.10)^2 \\ &\quad + 2,500/(1.10)^3 + 3,250/(1.10)^4 \\ &= 7,755.11 \text{ บาท} \end{aligned}$
<p>ลำดับขั้นตอนทำเหมืองแบบที่ 5</p> $\begin{aligned} \text{ค่า NPV} &= 2,500/(1.10)^1 + 5,500/(1.10)^2 \\ &= 6,818.18 \text{ บาท} \end{aligned}$	

#### 5. รูปแบบที่ 5 ทำการขุดเจาะสลักระหว่าง waste กับสินแร่ ชุดที่สี่

ชุดที่สี่ของการขุดเจาะสลับล็อกกันเริ่มต้นตั้งแต่ปีที่ 1 (ดูรูปที่ 4.13) แต่อัตราของการขุดเจาะบล็อกเพิ่มขึ้น 2 เท่าจากปกติ นั่นคือมีการขุดเจาะบล็อกออกทั้งหมด 10 บล็อกต่อปี และการทำเหมืองสิ้นสุดภายในปีที่ 2 ในปีแรกมีบล็อกที่เป็น waster ถูกขุดเจาะออกเท่ากับ 5.5 บล็อก และบล็อกที่เป็นสินแร่ถูกขุดเจาะออก 4.5 บล็อก ทั้งนี้ผลลัพธ์ของค่า  $NPV = 6,818.18$  บาท

ถ้าหากวิเคราะห์เฉพาะค่า  $NPV$  อย่างเดียว การจัดลำดับขั้นตอนของการทำเหมืองในรูปแบบที่ 4 ได้ค่าสูงสุด อย่างไรก็ตามอาจไม่ใช่เป็นผลลัพธ์ที่จะระบุถึงการจัดลำดับขั้นตอนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

ก) ถ้าหากสมมุติว่า ในการขุดเจาะเปิดเหมืองมีอุปสรรคตอนเริ่มทำการปฏิบัติจริงพื้นที่ใช้สอยเกิดปัญหาคับแคบไป การเจาะหลุมระเบิดไม่แม่นยำเท่าที่ควร ซึ่งมีผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการจริงสูงขึ้นกว่าที่ประมาณการไว้ในเบื้องต้น เท่ากับ 50 บาทต่อบล็อก นั่นคือ ค่าขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste = 1,050 บาทต่อบล็อก มูลค่าบล็อกที่เป็นสินแร่ = 1,950 บาทต่อบล็อก นำค่านี้ไปแทนใหม่ จะได้ผลลัพธ์เป็นค่า  $NPV = 6,962.17$  บาท ซึ่งในกรณีที่ค่าใช้จ่ายจริงของการปฏิบัติการสูงขึ้นแบบนี้ การลำดับขั้นตอนในรูปแบบที่ 3 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และควรเลือกนำไปปฏิบัติจริง

ข) ปกติการเพิ่มกำลังผลิตเป็นการใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์เต็มสมรรถนะ มีผลทำให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรอุปกรณ์ลดลงย่อมมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะจึงกำหนดให้ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะบล็อกที่เป็น waste = 1,100 บาทต่อบล็อกและมูลค่าบล็อกที่เป็นสินแร่ลดลงเหลือ 1,900 บาทต่อบล็อก ดังแสดงการคำนวณไว้ในตารางที่ 4.5 ของรูปแบบที่ 5 นี้

ถ้าหากว่าการเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าในรูปแบบที่ 5 ไม่มีผลต่อค่าใช้จ่ายในการทำปฏิบัติการของ waste ที่ต้องขุดเจาะ หรือไม่มีผลต่อการทำให้มูลค่าบล็อกสินแร่ลดลงแล้วการจัดลำดับขั้นในรูปแบบที่ 5 ที่อิงตามสมมุติฐานนี้จะให้ค่า  $NPV = 8,553.72$  บาท ซึ่งทำให้การขุดเจาะในรูปแบบที่เร่งการผลิตเหลือเพียง 2 ปี เป็นรูปแบบที่เป็นทางเลือกที่ดีที่สุด

#### 4.4 การจัดการเพื่อใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่ให้สมรรถนะสูงสุด

การจัดการเพื่อเลือกใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ภาคสนามในเหมือง เป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของแหล่ง การที่สามารถจะใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในเหมือง

และทำให้เกิดสมรรถนะสูงสุด ย่อมเป็นหลักประกันต่ออัตราการผลิตที่ได้มีการวางแผนไว้ นอกจากนี้ยังลดความเสี่ยงในการลงทุนลงด้วย

การจัดการของเครื่องจักรและอุปกรณ์นี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเลือกเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับหน้างานผลิต และการวางแผนที่ดีในการใช้เครื่องจักรกล การเก็บรักษาและการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล ผลลัพธ์ของการจัดการที่ดีจะช่วยให้การประเมินผลโครงการที่จะเปิดเหมืองมีความเป็นไปได้สูง และให้ผลตอบแทนเป็นมูลค่าปัจจุบันสูงสุดตามแผนงานที่วางไว้

#### 4.4.1 การวางแผนที่ดีในการใช้ เก็บรักษาและซ่อมบำรุงเครื่องจักร

กระบวนการผลิตในเหมืองเปิด มีเครื่องจักรกลที่ใช้งานภาคสนามและทำหน้าที่แตกต่างกันอยู่ 2-3 กลุ่ม แนวทางในการเลือกใช้จึงอิงกับชนิดของกลุ่มเครื่องจักรกลและอุปกรณ์นั้น ๆ จึงแบ่งการอธิบายเกณฑ์ที่ใช้เลือกเป็นหัวข้อย่อต่อไปนี้

##### 1. เครื่องเจาะหลุมสำรวจและหลุมระเบิด

ในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน เครื่องเจาะมี 3 แบบหลัก วิธีทำงานโดยย่อมีดังนี้

ก) Percussion drilling machine หรือเรียกเป็น air track drill มีการทำงานโดยใช้การกระแทก กด และหมุน ให้วัสดุที่เป็นหินในหลุมเจาะแตกเป็นรูและเป่าเศษฝุ่นออกจากรูเจาะ พลังงานที่ใช้มีทั้งแบบที่ใช้แรงขับเคลื่อนระบบไฮดรอลิก (hydraulic) ที่ให้แรงดันสูง หรือใช้ลม (pneumatic) ที่ให้อากาศขับเคลื่อนมีแรงดันปานกลาง

ข) Down the hole drilling machine หรือเรียกว่า downhole drilling เป็นการเจาะที่ใช้การกระแทก กด หมุน และเป่าฝุ่น แบบเดียวกับ percussion drill machine แต่แทนที่ใช้การกระแทกผ่านก้านเจาะ ซึ่งมีผลให้สูญเสียพลังงานและเกิดการสึกหรอของดอกเจาะสูง การเจาะแบบ down the hole จะใช้อุปกรณ์กระแทกติดกับหัวเจาะและเคลื่อนลงรูเจาะโดยตรง พลังงานที่ใช้มีทั้งระบบไฮดรอลิกกับแบบใช้ลมที่มีแรงขับเคลื่อน เครื่องเจาะแบบนี้ควรใช้กับมวลหินเนื้อแน่น

ค) Rotary drilling machine เป็นการเจาะที่ใช้หลักการทำงานโดยการหมุน กด และเป่าฝุ่น การเจาะแบบหมุนเป็น rotary นี้เป็นวิธีการเจาะที่เร็วที่สุด และยังใช้ได้กับมวลหินที่อนุภาคยังไม่จับตัวแน่นเป็นหินแข็งเกร็งคงรูป (rigid)

การตัดสินใจเลือกเครื่องเจาะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อายุการใช้งานขนาดและความสูงของหน้าเหมืองหิน ความถี่ในการใช้เครื่องเจาะ และวิธีการทำงานของเครื่องเจาะที่เหมาะสมกับเครื่องอัดบรรจุระเบิด เป็นต้น

หลักการพิจารณาเครื่องเจาะแบบ percussion หรือ air track drill ใช้ในการทำงาน โครงการขนาดเล็กที่มีเงินลงทุนน้อย ขนาดหัวเจาะใหญ่สุดไม่เกิน 127 มม. (5 นิ้ว) ความลึกของหลุมเจาะไม่เกิน 12 เมตร (40 ฟุต) ความเที่ยงตรงแม่นยำกับประสิทธิภาพของการเจาะยังจัดอยู่ในระดับต่ำ โดยเฉพาะเมื่อมีการเจาะในมวลหินที่มีรอยแตกร้าวหรือมีโพรง แต่ข้อดีเมื่อทำการเจาะรูเอียงจะทำได้ง่ายและสะดวกกว่าเครื่องเจาะชนิดอื่น

เครื่องเจาะแบบ down the hole เป็นการประดิษฐ์ค้นคิดเครื่องเจาะโดยใช้เทคโนโลยีร่วมกันระหว่าง percussion กับ rotary drilling ความสามารถในการเจาะทำได้ในระดับลึกกว่าเครื่องเจาะแบบ percussion ความเที่ยงตรงแม่นยำก็ดีกว่าในระหว่างการเจาะ มีการสึกหรอน้อยกว่า หัวเจาะใช้ได้ขนาดใหญ่ขึ้นแต่ก็มีข้อเสียตรงที่ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องเจาะสูงกว่าการใช้หัวเจาะขนาดเล็ก

เครื่องเจาะแบบ rotary drilling ใช้ในงานโครงการขนาดใหญ่ หัวเจาะที่ใช้ปกติมีขนาดใหญ่กว่า 152 มม. (6 นิ้ว) และหัวเจาะทนทานมากกว่า แบบ percussion และความคังเสียงน้อยกว่า ความเที่ยงตรงกับประสิทธิภาพของการเจาะดี และสามารถเจาะได้หลุมลึกเกิน 20 เมตร แต่ถ้าหากเปรียบเทียบการใช้เจาะหลุมในสภาพปกติของหน้าเหมืองหินจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าเครื่องเจาะแบบ down the hole เพราะใช้พลังงานในการขับเคลื่อนสูงกว่า ก้านเจาะหมุนตลอดเวลา อายุการใช้งานจะน้อยลง เครื่องเจาะแบบ rotary ก็มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก เคลื่อนย้ายลำบาก

ในการเจาะหลุมในระหว่างปฏิบัติการภาคสนาม มีข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการประเมินเกี่ยวกับหน้างานเจาะระเบิด ดังนี้

- ความเร็วในการเจาะที่แปรผันกับความแข็งของหิน ความสามารถในการเจาะมีค่าเป็นความลึกเมตรต่อชั่วโมง
- จำนวนรถเจาะระเบิด และอุปกรณ์เสริมในการเจาะ
- ผังหรือแบบแปลนการเจาะ จำนวนหลุม และความยาวของหลุมเจาะ
- ตารางการทำงานที่หน้างานเจาะระเบิด ที่มีการปฏิบัติงานทั้งการเจาะ บรรจุอัดวัตถุระเบิด และการจุดระเบิด

## 2. การวางแผนระเบิดและชนิดของวัตถุระเบิด

ในกรณีที่ต้องมีการระเบิดหิน การเตรียมหน้างานระเบิดมีสิ่งที่จะต้องคำนึงหลายอย่างเริ่มต้นตั้งแต่ผังระเบิด ชนิดของวัตถุระเบิด ผลลัพธ์ของการระเบิดหินต้องการให้มวลหินเกิดการแตกหักในขนาดที่พอดี ไม่ต้องการใช้เครื่องเจาะทุบหินก้อนใหญ่ให้แตกหรือระเบิดย่อยบ่อ และขนาดหินที่แตกหักไม่ใหญ่เกินกว่าที่จะเข้าปากโมที่บดย่อยได้



### ก. รูปแบบผังหน้าระเบิด

รูปแบบของการเตรียมการวางแผนระเบิดอยู่ที่เป้าหมายของผู้บริหารและลูกค้า ที่ผู้ปฏิบัติงานการระเบิดหินควรตอบสนอง เช่นมีการตั้งเป้าหมายเป็นตัวเลขว่าจะต้องการผลิตหินก่อสร้าง 10,000 ตันต่อเดือน หรือการระเบิดเพื่อสร้างเส้นทางตัดโค้งตัดไหล่เขาออก เป็นปริมาตรหินเท่าไร หรือเป็นการระเบิดเพื่อปรับแต่งให้หน้าเหมืองเป็นขั้นบันได หรือเป็นการระเบิดเพื่อตัดหน้าเรียบ

ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมการเรื่องออกแบบผังระเบิด การวางแผนใช้เครื่องจักรกลตามสมรรถนะในปัจจุบัน การวางแผนการใช้วัสดุสิ้นเปลือง (เชื้อเพลิง วัตถุระเบิด ปุ๋ย อุปกรณ์เจาะ) การวางแผนด้านเส้นทางขนส่งบริเวณหน้างานเพื่อลดต้นทุนในการผลิต กับมีความยืดหยุ่นในรูปแบบของการระเบิด ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำงานตามแผนที่วางไว้ เช่น ลูกค้าชะลอการซื้อ เกิดการจัดหาวัสดุที่ใช้ในการระเบิดไม่ทัน หรือเกิดปัญหาเครื่องจักรกลชำรุดจำเป็นต้องซ่อม เป็นต้น

### ข. ชนิดของวัตถุระเบิด

วัตถุระเบิดในงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิด ที่ถูกผลิตมาเพื่อตอบสนองผู้ประกอบการได้ เลือกใช้วัตถุระเบิดให้เหมาะกับงานเหมืองหิน งานก่อสร้าง งานเหมืองแร่ เป็นต้น หรือตามสถานะของรูเจาะ (แห้งหรือเปียก) การศึกษาอย่างละเอียดของชนิดและส่วนผสมของวัตถุระเบิด รวมทั้งพลังงานจากปฏิกิริยาที่แปรผันตามจำนวนและน้ำหนักวัตถุระเบิดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในปัจจุบันวัตถุระเบิดมักบรรจุในรูปแบบแท่งคาร์ทริดจ์ (cartridge) หรือในรูปแบบเป็นเม็ดผลึกในถุง (bulk) ในกรณีที่รูเจาะระเบิดเล็กกว่า 60 มม. (ขนาด 2 3/8 นิ้ว) อาจใช้สารผสมระเบิด (แอมโมเนียมไนเตรดกับน้ำมันดีเซล) เพียงอย่างเดียว แต่ถ้ารูเจาะใหญ่กว่า 60 มม. ควรใช้แท่งไดนาไมต์เป็นไพรเมอร์ (primer) ช่วยเสริมพลังการระเบิดด้วย

แนวทางโดยสังเขปของการเลือกชนิดวัตถุระเบิดพลังสูง (high explosives) ใช้ระเบิดเพื่อการขุดเจาะ ที่มีการจำหน่ายทั่วไปและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ได้แก่

1) วัตถุระเบิดประเภทอิงสารไนโตรกลีเซอริน วัตถุประเภทนี้มีทั้งแบบเป็นเจล (gelatin) กึ่งเจล (semi-gelatin) หรือเป็นผง (powder)

วัตถุระเบิดที่ใช้ไนโตรกลีเซอรินใช้ในการระเบิดหินมาเป็นระยะยาวนาน มีข้อดีคือเคลื่อนย้ายได้ง่าย ราคาปานกลาง ให้พลังงานที่ดี ความเร็วของคลื่นระเบิด 4,000 ถึง 6,000 เมตรต่อวินาที แต่ต้องระวังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิปกติ เพราะไนโตรกลีเซอรินเป็นประเภทไวไฟแบบ sensitizer

2) วัตถุระเบิดแบบผสม วัตถุระเบิดประเภทนี้นิยมใช้มากที่สุดเพราะประหยัด หาซื้อได้ง่าย ราคาถูก ให้พลังงานดี เมื่อมีการผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรด



กับน้ำมันดีเซลให้ความเร็วของคลื่นระเบิด 3,200-3,850 เมตรต่อวินาที ข้อเสียก็คือต้องเป็นหลุมที่แห้งและอาจเกิดก๊าซพิษเนื่องจากส่วนผสมไม่ถูกต้อง และการอัดบรรจุต้องใช้เครื่องอัดจนได้กำลังอัดพอดีในรูเจาะจึงจะให้ประสิทธิภาพดี

3) วัตถุระเบิดแบบสเลอรี เป็นวัตถุสเลอรี (slurry) มีส่วนผสมของสารป้องกันน้ำ สารไวไฟต่อการระเบิด กับแอมโมเนียมไนเตรด อาจอยู่ในสภาพเป็นแท่งเจล (gel) หรือเป็นยางเหนียว (gum) ข้อดีเป็นสารที่ก่อนผสมไม่มีอันตรายต่อมนุษย์ เมื่อใช้สเลอรีนานไม่เกิดอาการปวดศีรษะแบบใช้ในโตรกลีเซอริน และสเลอรีมีความไวไฟน้อยกว่าไนโตรกลีเซอริน ความเร็วของคลื่นระเบิดของวัตถุระเบิดแบบสเลอรี 4,500-5,000 เมตรต่อวินาที

4) วัตถุระเบิดแบบอิมัลชัน เป็นวัตถุระเบิดที่ปกติอยู่ในสภาพเป็นของเหลวหรือในฟอร์มของ น้ำในน้ำมันอิมัลชัน (water in oil emulsion) เดิมใช้สารละลายแบบ supersaturated แต่ปัจจุบันใช้ก๊าซผสมก่อนนำไปใช้ในหลุมเจาะ แต่บางครั้งก็ทำเป็นแบบเชื้อเพลิงแข็ง (solid fuel) โดยการผสมกับอะลูมิเนียม

ข้อดีการจุดระเบิดด้วยวัตถุระเบิดแบบอิมัลชัน คือ เป็นปฏิกิริยาในระดับชั้นโมเลกุล (molecular level) คลื่นระเบิดจึงมีพลังสูงอยู่ที่ค่า 5,500-6,500 เมตรต่อวินาที เมื่ออิมัลชันถูกนำมาผสมกับสาร AN-FO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil) ส่วนของอิมัลชันจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างผลึกแอมโมเนียมไนเตรด โดยที่ไม่ทำให้ปริมาตรของวัตถุระเบิดในรูเจาะสูงขึ้น ทำให้ได้วัตถุระเบิดรูปแบบที่มีความหนาแน่นสูงกับให้พลังงานสูง หรือถ้ามีอิมัลชันเกิน 50 % จะทำให้กันน้ำซึมผ่านได้ ข้อเสียของวัตถุระเบิดแบบอิมัลชันคือการเก็บรักษาทำได้ค่อนข้างลำบาก และยังเป็นสิ่งใหม่ ราคาแพง หายาก

#### ค. ตัวแปรของการออกแบบระเบิด

ในเชิงทฤษฎีตัวแปรที่เกิดจากการระเบิดหิน แยกประเภทได้แก่ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวแปรแรกตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (non-controllable variables) และตัวแปรกลุ่มสองตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (controllable variables)

1) ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ มนุษย์ไม่สามารถจะไปแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ก่อนทำการระเบิด หรือถ้าทำได้ก็ไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ ได้แก่

— สภาพพื้นผิวของภูมิประเทศและ โครงสร้างหิน ภูมิประเทศของบริเวณและ โครงสร้างของหินที่จะทำการระเบิด ถ้ามวลหินมีรอยแตกรอยแยกอยู่ก่อนแล้ว จึงเป็นการยากที่จะไปปรับปรุงหรือทำให้ดีขึ้นกว่าเดิม อาจทำได้เพียงปรับระดับพื้นผิว

— ความลึก ความหนา และชนิดของพื้นผิวที่ปกคลุม (overburden) ด้วยชั้นดินหรือชั้นอื่น เป็นสิ่งที่เกิดตามกระบวนการทางธรรมชาติ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ การออกแบบระเบิดหินก็ต้องให้เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

— ลมและแนวทิศทางการพัดของลม อาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และจัดเป็นสิ่งที่ควบคุมไม่ได้

2) ตัวแปรที่ควบคุมได้เป็นสิ่งที่มนุษย์ออกแบบ คัดแปลง และปรับปรุงแก้ไขหรือพัฒนาให้ดีขึ้นกว่าเดิม หรือให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมมากขึ้น ได้แก่ตัวแปรดังต่อไปนี้

— ชนิดของวัตถุระเบิดปัจจุบันมีการใช้วัตถุระเบิดมากมายหลายชนิดที่ผลิตขึ้นมาใช้ในงานวิศวกรรม แต่ละชนิดมีเงื่อนไขเฉพาะหรือข้อกำหนด (specification) ให้ใช้ได้เหมาะสมกับงานชนิดหนึ่ง เช่น สำหรับรูเจาะระเบิดแห้ง รูเจาะระเบิดมีน้ำแข็ง

— วัตถุระเบิดหลักในการระเบิดหินที่ใช้ในประเทศไทยคงเป็น สารผสมระเบิดประเภท AN-FO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil) เพราะราคาถูกหาง่าย วิธีการใช้งานระเบิดไม่ยุ่งยาก

— รูปแบบเรขาคณิตของการระเบิด วิศวกรสามารถคำนวณปริมาตรของหน้าเหมืองหินที่ต้องการระเบิดให้หินเกิดการแตกหักตามต้องการ กรณีที่ต้องการระเบิดหินโดยการตัดชั้นตะพักเป็นชั้นบันได (bench blasting) วิศวกรสามารถเลือกขนาดของรูเจาะหลุมระเบิด ระยะความหนาหน้าระเบิด เป็นค่าระยะระหว่างแถวของรูเจาะหลุมระเบิด ระยะความหนาหน้าระเบิดหรือเรียกกระยะเบอร์เดน (burden) ระยะห่างระหว่างหลุมเจาะในแถวหรือเรียกกระยะสเปซซิง (spacing) ระยะปิดอัดด้วยวัสดุปากหลุมหรือเรียกว่าระยะสเตมมิง (stemming) ระยะเจาะหลุมต่ำกว่าระดับพื้นหรือเรียกว่าระยะซับดริล (sub-drilling) เป็นต้น เมื่อทำการคำนวณได้พื้นที่หน้าตัดของงานระเบิด และทราบขนาดความสูงของหน้าเหมือง ก็ สามารถคำนวณปริมาตรหินทั้งในแบบปริมาตรแน่น (dense or bank volume) ต่อมาใช้ค่าคงที่คูณกับปริมาตรแน่นจะได้ค่าปริมาตรในแบบปริมาตรหลวม (loose volume) แต่วิธีการที่น่าจะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงแม่นยำในด้านการผลิตหินของเหมือง ได้แก่ การชั่งน้ำหนักรถที่บรรทุกหินที่แตกหักภายหลังการระเบิดก่อนเทหินแตกหักผ่านปากโม้ และการชั่งน้ำหนักรถที่บรรทุกหินย่อยที่ผ่านกระบวนการบดย่อยในโรงโม้แล้วขนส่งไปยังแหล่งที่ใช้หิน

— จำนวนวัตถุระเบิดสูงสุดต่อจังหวะถ่วง และแก๊ปถ่วงเวลา วิศวกรสามารถควบคุมน้ำหนักของการใช้วัตถุระเบิดต่อปริมาตรของหินได้ หรือในบางกรณีอาจเลือกใช้แก๊ปไฟฟ้าจังหวะถ่วง เพื่อเป็นการลดผลกระทบด้านอื่น

— ทิศทางของหน้าระเบิด การวางแผนหน้าเหมืองหินให้ได้ทิศทางระเบิดที่ดี จะช่วยลดความเสี่ยงไม่ให้เกิดอันตรายหรือเกิดผลกระทบโดยตรงต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมได้ แต่ทั้งนี้ต้องมีการวางแผนล่วงหน้าก่อนเริ่มการพัฒนาหน้าเหมือง อนึ่งการเลือกเปิดหน้าเหมือง ให้เหมาะสมกับสภาพทางธรณีวิทยา ช่วยให้กองหินที่ระเบิดแล้วสะดวกและง่ายต่อการขนเคลื่อนย้าย เพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน และประหยัดค่าใช้จ่ายได้อีกด้วย

— การระเบิดหินที่เน้นถึงความสัมพันธ์กับรอยแตกแยกในหิน จะช่วยป้องกันปัญหาการแตกร้าวหลังแนวระเบิด และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแตกหักเนื่องจากการระเบิด

### 3. การเลือกรถดักกับรถบรรทุกในเมือง

การปฏิบัติการในงานเหมืองหิน เหมืองแร่ หรือโรงงานก่อสร้างที่มีการใช้เครื่องจักรกล หรือการระเบิดหน้างานขุดเจาะ มีตัวแปรเรื่องค่าใช้จ่ายของการขนย้ายมวลสาร ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกใช้เครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับรูปแบบของหินหรือดิน (pile) รวมทั้งคำนึงปัจจัยเรื่องการโป่งพอง (swelling) ของมวลภายหลัง เกิดการแตกหัก

#### ก. การเลือกเครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับลักษณะของมวลสาร

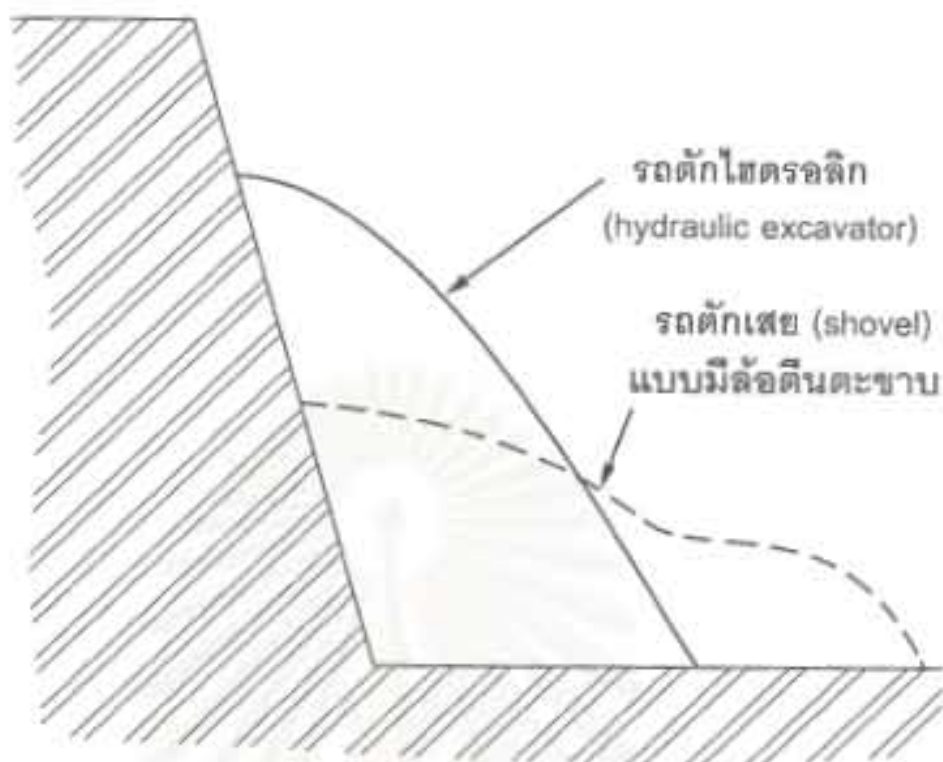
ปกติหน้าระเบิดในเมืองหินมีความสม่ำเสมอมากกว่าหน้างานเหมืองแร่ หรือการตัดทางในงานวิศวกรรมโยธา เพราะส่วนใหญ่ลักษณะของการวางตัวชั้นหินแปรเปลี่ยนน้อย และการเดินหน้างานระเบิดในเมืองหินจะคงที่มากกว่างานวิศวกรรมเหมืองแร่หรืองานวิศวกรรมโยธา

องค์ประกอบหลักที่มีผลโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายของการเปิดหน้างาน ได้แก่ ความหนาของชั้นหินเพราะต้องให้ความสูงของชั้นตะพักเหมาะกับความหนาของมวลหิน (หรือวัสดุอื่น) ด้วยถ้ามวลหินมีความหนาไม่สม่ำเสมอ (คล้ายกับการกำเนิดสายแร่) การทำงานเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ชนิดของหินกับความแข็งเชิงทนต่อการสีกกร่อน ย่อมมีผลโดยตรงต่อการเจาะหลุมกับการระเบิดและการขนย้าย

นอกจากองค์ประกอบหลักในเรื่องความหนากับความแข็งของหินแล้ว การที่หินมีรอยแตกแยกมากน้อยก็มีผลต่อประสิทธิภาพการปฏิบัติงานภาคสนาม ขนาดของหน้างานถ้ามีขนาดใหญ่ความจำเป็นในเรื่องใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ก็ตามมา

ในเรื่องการเลือกชนิดของรถดักนั้นรถดักเทด้านหน้า (front end loader) นิยมใช้การดักขนย้ายเกือบทุกงานก่อสร้าง กรณีจะเลือกรถดักให้เหมาะสมกับกองหิน ถ้าภายหลังทำการระเบิดแล้วกองหินแตกหักถูกผลักดันด้วยคลื่นระเบิดเป็นกองสูง (ดูเป็นเส้นโค้งมุมความชันสูง) และพื้นที่ระดับฐานค่อนข้างแน่น เหมาะสำหรับการเลือกใช้รถดักเสบบนมล้อดินตะขาบ นิยมใช้ในเหมืองถ่านหินควรเลือกใช้การขนย้ายด้วยรถดักไฮดรอลิก (hydraulic excavator) แต่ถ้ามีกองหินภายหลังการระเบิดกระเด็นมารวมกันเป็นกองเตี้ย (ดูเป็นเส้นโค้งมุมความชันต่ำ) ก็ควรเลือกใช้รถดักแบบปิ้งก็ล้อดินตะขาบ (wheel loading shovel) ดังภาพสเก็ทซ์หน้างานระเบิดในรูปที่ 4.14

ขนาดของรถบรรทุกที่ใช้ในเมืองเปิด ควรคำนึงกำลังการผลิตต่อปี และขนาดหน้างานขุดเจาะ กรณีที่มีการขุดเจาะ โดยการระเบิดหน้างานและปริมาตรหินและวัสดุที่ต้องขนย้ายมีมากเกินกว่ารถบรรทุกขนาดเล็กที่เป็นรถขนาดหกล้อบรรทุกเทท้าย (dump truck) ก็ควรใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนเชิงไฮดรอลิก แต่ก็ยังต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อกับความสะดวกและความคล่องตัวในการนำรถขนาดใหญ่ไปขนย้ายวัสดุในบ่อเหมือง นอกจากนี้ควรตรวจสอบว่าถนนที่เป็นทางลำเลียงขนย้ายวัสดุ ได้มีการออกแบบให้สอดคล้องกับขนาดของรถบรรทุกขนาดใหญ่หรือไม่



รูปที่ 4.14 ลักษณะการกองหินหน้างานระเบิดที่เหมาะสมกับรถขุดชนิดหนึ่ง



รูปที่ 4.15 ลักษณะงานการตัดร่องแนวยาว (trench) ของวัสดุหน้างาน  
ก่อนข้างค้ำ และพื้นที่ระดับฐานก่อนข้างแน่น เหมาะสำหรับ  
เลือกใช้รถตักเสยแบบมีล้อตีนตะขาก นิยมใช้ในเหมืองถ่านหิน



### ข. ค่าการขยายตัวของมวลสารเนื่องจากการโป่งพอง

มวลสารที่เป็นวัสดุเกิดตามธรรมชาติเช่น หิน ดิน ทราย เมื่ออยู่ในสภาพที่ยังไม่มีการแตกหักหรือถูกขูดเจาะจะมีค่าปริมาตรค่าหนึ่งมีชื่อเรียกว่าปริมาตรแน่น (dense or bank volume) แต่เมื่อมีการแตกหักหรือมวลสารถูกเคลื่อนย้ายจะมีค่าปริมาตรอีกค่าหนึ่งมีชื่อเรียกว่า ปริมาตรหลวม (loose volume) ซึ่งมีผลต่อการตัก ขนย้าย และการเลือกขนาดของปู้งที่รถตัก กับการคำนวณขนาดน้ำหนักของกองวัสดุหน้างานขนย้าย และความสามารถในการขนย้าย กองวัสดุหน้างาน

ในการคำนวณความสามารถการขนย้ายวัสดุธรรมชาติที่แตกหัก โดยการใช้เครื่องจักรกลหรือจากการระเบิด ค่าตัวประกอบของการโป่งพอง (swell factor) ที่เป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักปริมาตรแน่น ต่อ น้ำหนักปริมาตรหลวม (หน่วย ตัน / ม.<sup>3</sup>) เป็นค่าตัวเลขพื้นฐานในการหาน้ำหนักหรือปริมาตรที่สามารถตักขนย้ายมวลสารสภาพหลวม

แนวทางในการหาค่าเฉลี่ยของตัวประกอบการ โป่งพองของมวลสารด้านบน ดังนี้

— สมมุติว่ามวลสารโดยรวมหน้างานขูดเจาะค่าเฉลี่ยมีค่าน้ำหนักของเปอร์เซ็นต์การโป่งพอง = 25.4 เปอร์เซ็นต์

$$\text{— Swell factor} = \frac{1}{(1+0.254)} = 0.8$$

— ถ้าหากต้องการหาค่าตัวประกอบน้ำหนักเป็นตัน (tonnage factor) ของการตักกองดินหน้างาน เมื่อมวลแน่นมีค่า เท่ากับ 0.5 ม.<sup>3</sup>/ตัน (17.6 ฟุต<sup>3</sup>/ตัน)

$$\text{— Tonnage Factor (T.F.)} = \frac{\text{มวลอัดแน่นอยู่กับที่}}{\text{ตัวประกอบการ โป่งพอง}}$$

$$= \frac{0.5}{0.8} = 0.62 \text{ ม.}^3/\text{ตัน}$$

$$\text{หรือเป็นน้ำหนักมวลหลวม} = 1.6 \text{ ตัน/ม.}^3$$

#### 4.4.2 การวางแผนป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์

การป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุหรืออันตราย เป็นการเพิ่มระดับขั้นของความปลอดภัยในการปฏิบัติงานให้สูงขึ้น จำเป็นต้องมีการปฏิบัติตามขั้นตอนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างมีหลักเกณฑ์ และเพิ่มความระมัดระวังอย่างเป็นระบบ โดยมีการแยกแผนการป้องกันความปลอดภัยตามชนิดของงานปฏิบัติการหน้าเหมือง

## 1. ขั้นตอนหลักเชิงความปลอดภัยในงานเจาะ

เครื่องจักรกลที่เกี่ยวข้องกับงานเจาะ ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ เครื่องเจาะแต่ละชนิด มีวิธีการจัดการในการป้องกันอุบัติเหตุแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน อธิบายขั้นตอนหลักดังนี้

### ก) เครื่องอัดอากาศ

พื้นที่ตั้งเครื่องต้องมั่นคง มีการตรวจสอบข้อต่อท่ออย่างให้มีการยึดติด ไม่สะบัดหลุดง่ายมีการป้องกันส่วนที่เคลื่อนไหวของเครื่องชนิดที่ให้กำลังดูดเครื่องอัดอากาศในสภาพปลอดภัยมีการตรวจสอบการทำงานของลินินรัยอย่างสม่ำเสมอ

### ข) เครื่องเจาะขนาดเล็ก

เครื่องเจาะแบบมือถือหรือเรียกเป็นเครื่องเจาะแจ๊คแฮมเมอร์ ผู้ปฏิบัติงานต้องสวมถุงมือหนังอยู่ตลอดเวลา สวมเสื้อผ้าให้รัดกุมใส่ที่ครอบหู เลือกตำแหน่งเจาะที่ยืนได้มั่นคง กรณีที่ต้องเจาะแบบแห้งควรสวมอุปกรณ์ป้องกันฝุ่น อย่าเจาะใกล้รูที่ยังไม่ระเบิดและมีวัตถุระเบิดอัดอยู่ในรู เมื่อก้านเจาะติดให้พยายามเอาออกเลื่อยอย่าปล่อยคาทิ้งไว้เพราะมีผลเสียมากกว่าผลดี

### ค) เครื่องเจาะขนาดใหญ่

เครื่องเจาะขนาดใหญ่ ทั้งแบบที่ใช้อัดอากาศหรือแบบไฮดรอลิก สิ่งที่ต้องตรวจสอบเป็นลำดับแรก ได้แก่ สภาพพื้นที่ที่มีความมั่นคงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักรถเจาะกับแท่นเจาะหรือไม่ และตรวจสอบระบบการทำงานของเครื่องเจาะ เช่น เบรก เกียร์ ขาดัง กล่องเก็บหัวเจาะ รางเก็บก้านเจาะ ให้อยู่ในสภาพที่มีความพร้อมที่จะใช้งาน ห้ามจับก้านเจาะขณะหมุน มีการระมัดระวังในการใช้ประแจจับก้านเจาะเมื่อเวลาต่อหรือลดจำนวนก้านเจาะและผู้ปฏิบัติงานต้องสวมอุปกรณ์ป้องกันฝุ่นและเสียง

## 2. ขั้นตอนเพิ่มเติมเชิงความปลอดภัยในงานเจาะ

กรณีที่มีโอกาสเลือกได้ว่าจะเจาะหลุมระเบิด เป็นรูเอียงหรือรูตั้งนั้นควรเลือกเจาะเป็นรูเอียง ทั้งนี้เพราะว่าวัตถุระเบิดที่เป็นไพร์เมอร์ (primer) และวางไว้ที่ส่วนล่างของรูเจาะแนวตั้งจะถูกล้อมรอบด้วยหินที่อัดแน่นมีความต้านทานสูง ผลการเจาะในแนวตั้งทำให้มุมที่ก้นรูเจาะทำมุมเอียงกับหน้าเหมืองเป็นมุมเล็กมาก จึงอาจต้องเจาะให้ลึกมากกว่าในแนวระดับเดิม แต่เมื่อเปลี่ยนมาเจาะเป็นรูที่อยู่ในแนวเอียงขนานกับหน้าเหมืองสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ และยังเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในการทำการเจาะอีกด้วยเพราะการเจาะรูเอียงและหน้าเหมืองก็ลาดเอิน ไม่เหมือนกับกับการเจาะรูในแนวตั้งที่มีหน้าเหมืองลาดเอิน นอกจากนี้การใช้หลุมระเบิดเป็นรูเอียง ผลลัพธ์จากการแตกร้าวหลังแนวระเบิดจะมีน้อยกว่า มวลหินที่แตกหักถูกผลักดันให้ไปกองรวมกันหน้าเหมืองในระดับที่สูงพอเหมาะต่อการใช้เครื่องจักรกลขนย้าย ถ้ำเสี่ยงวัสดุที่ติดกว่าการใช้รูเจาะในแนวตั้ง



### 3. การป้องกันเชิงความปลอดภัยสำหรับวัตถุระเบิดและอุปกรณ์

ขั้นตอนสำคัญที่อาจเป็นมูลเหตุของการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้วัตถุระเบิดได้นั้น เริ่มขั้นตอนตั้งแต่ การเก็บรักษาเก็บกักวัตถุระเบิด การขนย้ายหรือเคลื่อนที่วัตถุระเบิดก่อนการระเบิด การใช้และบรรจุวัตถุระเบิดหน้างานขุดเจาะ และการตรวจสอบผลลัพธ์ภายหลังจากรเบิดแล้ว

#### ก. การเก็บรักษาและเก็บกักวัตถุระเบิด

สิ่งแรกที่ต้องทำได้แก่ การมีการบันทึกข้อมูลความต้องการใช้วัตถุระเบิด กับมีบัญชีจำนวนวัตถุระเบิดที่เก็บรักษากับมีการเก็บกัก และต้องเป็นไปตามใบขออนุญาตจากทางราชการเพื่อมีวัตถุระเบิดไว้ครอบครองและการขออนุญาตขนย้ายวัตถุระเบิด

สาเหตุหลักของการเกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติภัย ที่เกิดในระหว่างการเก็บรักษา คือ

- คลังเก็บรักษาต้องแยกวัตถุระเบิดแต่ละประเภทออกห่างกันและห่างพื้นที่ระเบิด
- ความร้อนเนื่องจากแสงแดดหรือจากการเผาไหม้ในบริเวณข้างเคียง อาจทำให้วัตถุระเบิด เช่น เชื้อปะทุ ไคโนไมต์ เกิดจากรเบิดเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกิดความประมาทจากการนำเชื้อปะทุมาวางไว้ใกล้กับไคโนไมต์

- การเกิดประกายไฟจากบริเวณใกล้เคียง หรือการเกิดฟ้าผ่าจากพายุฝน

- การเกิดความดันคลื่นที่อัดมาจากผลของการระเบิดที่ข้างเคียงกับแหล่งเก็บรักษา

#### ข. การเคลื่อนย้ายวัตถุระเบิด

สาเหตุหลักการเกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติภัย ที่เกิดในระหว่างการเก็บขนเคลื่อนย้ายคือ

- ความร้อนเนื่องจากแสงแดดหรือความร้อนจากยานพาหนะที่ใช้ขนส่ง อาจทำให้วัตถุระเบิด เช่น เชื้อปะทุ ไคโนไมต์ เกิดการจู่ระเบิดเอง

- การเกิดประกายไฟจากบริเวณใกล้เคียง หรือเกิดพายุฝน ในช่วงทำการขนส่ง

- ความประมาทในการยก การจัดวาง หรือทำวัตถุระเบิดตกหล่น

#### ค. การใช้วัตถุระเบิดหน้างานขุดเจาะ

สาเหตุและการป้องกันอันตรายระหว่างที่มีการใช้วัตถุระเบิดหน้างานขุดเจาะ คือ

- การใช้วัตถุระเบิดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิต วัตถุระเบิดกับอุปกรณ์ที่หมดอายุหรือเสียหาย อาจมีผลต่อการจู่ระเบิดที่ด้านหรือได้ผลลัพธ์การแตกหักหินที่ไม่ดี

- ระวังไม่ให้เกิดการสันตะเทียนหรือเกิดประกายไฟ ในระหว่างการเปิดหีบบรรจุหรือล้างบรรจุวัตถุระเบิด

- มีน้ำขังในรูเจาะหลุมระเบิด โดยเฉพาะด้านล่างของหลุม อาจเกิดการจู่ระเบิดไม่ติด (misfire) ได้

— การต่อวงจรไฟฟ้าฝั่งหน้าระเบิดผิด หรือการต่อวงจรฝั่งหน้าระเบิดในขณะที่เมฆลอยต่ำครึ้มฟ้าครึ้มฝน หรือการต่อวงจรในช่วงที่มีพายุฝน อาจเกิดฟ้าผ่าหลุมระเบิดได้

— การต่อวงจรทิ้งไว้นาน ค้างคืน หรือการที่มีการใช้เชื้อปะทุในฝั่งหน้าระเบิดเดียวกันจากผู้ผลิตหลายแหล่ง อาจมีผลเรื่องความต้านทานที่ไม่สมดุลในวงจรเดียวกันได้

— มีการสูบบุหรี่ระหว่างการต่อวงจร หรือมีกลิ่นวิฤตกำลังส่งสูงรบกวน อาจเกิดการเหนียวหน้าและจุดระเบิดระหว่างการปฏิบัติงานยังไม่เสร็จสิ้น

— ก่อนการระเบิดจะต้องมั่นใจว่าไม่มีคนและเครื่องจักรกล หรือสิ่งมีชีวิตอื่นอยู่ข้างเคียง ต้องมีสัญญาณเตือนเป็นระยะประมาณ 3 ครั้ง ก่อนระเบิด และควรกำหนดเวลาทำการระเบิดที่แน่นอนและแจ้งให้ชุมชนทราบอย่างชัดเจน

#### ง. การตรวจสอบผลลัพธ์ภายหลังจากจุดระเบิดแล้ว

สาเหตุและการป้องกันอันตรายภายหลังการจุดระเบิดแล้ว คือ

— วัตถุระเบิดที่ใช้แล้วไม่ระเบิดหรือด้าน ถ้าถูกกระทบกระเทือนอาจเกิดระเบิดได้

— วัตถุระเบิดที่เสื่อมสภาพแล้วทิ้งไว้หน้างาน เมื่อมีการทำลายที่ไม่ถูกวิธีอาจเป็นอันตรายได้เช่นเดียวกัน

— การจุดระเบิดบางครั้ง ความดันของคลื่นระเบิดไม่มากพอที่ทำให้โซดหินหน้างานหลุดออกมาทันที แต่เมื่อมีคนนำเครื่องจักรไปปฏิบัติงาน เกิดการสั่นสะเทือนพื้นผิวดินเพียงเล็กน้อยอาจมีผลให้โซดหินที่ค้างหน้างานหลุดออกมาหล่นใส่ เป็นอันตรายต่อคนและทรัพย์สินได้ หรือทำให้เป็นที่กีดขวางการปฏิบัติงานภาคสนาม ก่อให้เกิดการสูญเสียเวลาในการทำงาน

#### 4. ขั้นตอนเพิ่มเติมเชิงความปลอดภัยในการใช้วัตถุระเบิด

การปฏิบัติงานเกี่ยวกับวัตถุระเบิด ถ้าหากผู้ปฏิบัติงานปฏิบัติงานผิดขั้นตอนมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตกับทำให้สูญเสียทรัพย์สินได้

##### ก. อาคารที่เก็บรักษา

ตัวอาคารที่เก็บรักษาควรทำด้วยวัสดุทนไฟ พื้นอาคารทำด้วยไม้หรือคอนกรีต ห้ามใช้พื้นที่เป็นโลหะอาจเกิดประกายไฟได้ง่าย จัดให้มีสายล่อฟ้า มีการระบายลมที่ดี และต้องไม่ตั้งอยู่ในทิศทางการระเบิดของหน้าเหมือง

ข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยให้แยกอาคารเก็บแท่งดินระเบิดออกจากเชื้อปะทุ ไม่ต่ำกว่า 50 เมตร ประตูอาคารมี 2 ชั้น มีการใส่กัญแจไว้อย่างแข็งแรงกับติดป้ายข้อความ “อันตรายวัตถุระเบิด” อย่างชัดเจน

สถานที่เก็บวัตถุระเบิดต้องอยู่ห่างจากที่ตั้งชุมชน โรงเรียน ไม่น้อยกว่า 100 เมตร และโดยรอบอาคารที่เก็บต้องไม่มีหญ้าแห้งหรือวัตถุเชื้อเพลิงแต่อย่างใด ในรัศมี 10 เมตร มี

การทำบัญชีแสดงยอดคงเหลือ การรับ การจ่าย วัตถุประสงค์แต่ละรายการชัดเจน กับจัดเวรยาม ป้องกันตลอดเวลา

#### ข. การขนย้ายวัตถุประสงค์

ในการขนวัตถุประสงค์แต่ละครั้ง ห้ามขนเชื้อปะทุร่วมไปกับแท่งดินระเบิด และภายในยานพาหนะที่บรรทุกวัตถุประสงค์ห้ามบรรทุกโลหะ เครื่องมือโลหะ น้ำมัน ไม้ขีดไฟ น้ำกรด หรือวัตถุติดไฟง่ายอื่น

ห้ามผู้โดยสารที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องโดยสารไปกับรถขนวัตถุประสงค์ และห้ามสูบบุหรี่ ขณะทำการขนย้ายวัตถุประสงค์ในทุกกรณี

#### ค. การป้องกันอุบัติเหตุระหว่างปฏิบัติงาน

สิ่งต้องห้ามเกี่ยวกับความปลอดภัยก็เหมือนกับการขนย้ายวัตถุประสงค์ ส่วนในการปฏิบัติงานในสนามนั้น ควรตรวจสอบอายุการใช้งานของวัตถุประสงค์ก่อนว่าหมดอายุแล้วหรือยัง ให้ใช้ไม้เท่านั้นในการประจุดุระเบิดหรือในการใช้เครื่องประจุดุระเบิด หลีกเลี่ยงการใช้วัตถุประสงค์ได้สายไฟฟ้าแรงสูง สายขนวนธรรมดาต้องมีความยาว ไม่ต่ำกว่า 1 เมตรจากปากกระบอก การขบหลอดเชื้อปะทุติดกับสายขนวนให้ใช้คีมที่ออกแบบมาเฉพาะ

ในการจุดระเบิดด้วยไฟฟ้าให้ต่อลวดวงจรสายทิ้งสอบของสายไฟ ที่จะนำกระแสไฟฟ้าเข้าเชื้อปะทุจนกว่าพร้อมที่จะทำการระเบิด กับหลีกเลี่ยงการประจุดุระเบิดทิ้งไว้นานโดยไม่ทำการจุดระเบิด มีสถานที่กำบังระหว่างการจุดระเบิด เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ รถ เครื่องจักร เครื่องมือ ออกไปก่อนทำการระเบิด

ก่อนทำการจุดระเบิดให้มีการตรวจสอบระบบวงจรไฟฟ้า และให้สัญญาณเสียงเป็นอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยเว้นระยะห่างพอสมควร ในขณะที่ปฏิบัติการใดๆ เกี่ยวกับวัตถุประสงค์ ห้ามนำสิ่งที่มีกระแสไฟฟ้า เช่น ถ่านไฟฉาย เครื่องคิดเลข คอมพิวเตอร์ เครื่องรับส่งวิทยุ โทรศัพท์มือถือ เข้าใกล้ในบริเวณสถานที่ปฏิบัติงาน

### 5. ขั้นตอนหลักเชิงความปลอดภัยในงานชุดตกขนย้ายหิน

การวางแผนเชิงความปลอดภัยของการขนย้าย แบ่งออกเป็นการปฏิบัติงานของรถตักการปฏิบัติงานของรถบรรทุก และรางทิ้งหิน

#### ก. ข้อกำหนดเชิงความปลอดภัยในการใช้รถตัก

ก่อนการทำงานผู้ขับรถตักควรมีการเตรียมตัวที่ดี เช่น สวมอุปกรณ์นิรภัย (หมวกเหล็ก รองเท้านิรภัย) และทำความเข้าใจเรื่องสัญญาณกับข้อจำกัดในการทำงาน ตลอดจนตรวจสภาพของพื้นที่ในขณะที่ปฏิบัติงานรวมทั้งทดสอบระบบการทำงานของเครื่องจักรกล

ในขณะที่ทำงานควรมีผู้ช่วยทำหน้าที่ให้คำแนะนำคนขับ เมื่อเวลาดัก รถควรอยู่ในแนวระดับ อย่าดักหินให้เต็มปั้งก็จนเกินไป ในขณะที่มีลมแรงให้บังคับการเทหินในมุมลาดต่ำและอยู่ในทิศทางที่ลมพาฝุ่นไป ไม่บังการมองเห็นของคนขับ และเวลาเทหินในรถบรรทุกให้ระมัดระวังอย่าให้ตัวปั้งก็ถูกตัวรถบรรทุก และจัดหินหรือหินในรถบรรทุกให้สมดุล

ในขณะที่บรรทุกหินหรือหินในปั้งก็ ให้ยกปั้งก็ในระดับต่ำใกล้พื้นดินมากที่สุด และวิ่งด้วยความเร็วเหมาะสม อย่าออกรถหรือหยุดรถกระทันหัน ระวังไม่ให้ล้อยางหรือสายพานดินตะขาบหมุนฟรีอยู่กับที่โดยไม่จำเป็น เพราะทำให้พื้นเดิมที่เรียบกลายเป็นขรุขระ ทำให้รถติดหล่มง่าย การจอดรถดักให้จอดในที่ราบและตั้งฉากกับความลาดชันของทาง ควรใช้หินหุนลือไว้ เมื่อจอดชั่วคราวควรใส่เบรกมือไว้ และลงจากรถดักเมื่อรถจอดสนิท

#### ข. ข้อกำหนดเชิงความปลอดภัยในการใช้รถบรรทุก

พนักงานขับรถต้องสวมใส่หมวก รองเท้า และคาดเข็มขัดนิรภัย ในการปฏิบัติงานก่อนใช้รถบรรทุก ผู้ขับต้องทำการตรวจสอบสภาพรถให้อยู่ในสภาพปลอดภัย เช่น ระบบเบรก ระบบคลัช แตรสัญญาณ ระบบแสงสว่าง ในการขับรถต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างการใช้เกียร์กับความเร็ว และจัดระยะให้พอเหมาะเมื่อตามหลังคันอื่น

ในการจัดพนักงานขับรถ ควรให้พนักงานประจำคันใดคันหนึ่ง เพื่อความคุ้นเคย และทราบปัญหาของรถบรรทุกคันนั้น ผู้ควบคุมต้องคอยติดตามว่าพนักงานขับรถได้ปฏิบัติตามระเบียบหรือไม่ และมีการทดสอบความรู้ความเข้าใจใหม่เสมอ

หน้างานของบริเวณดักและขน ต้องมีขนาดกว้างพอสำหรับให้รถบรรทุกเลี้ยวกลับได้ และมีที่ว่างพอที่หลีกเลี่ยงการเดินหน้าถอยหลังของรถดัก และในขณะรอการดักให้พนักงานขับใส่เบรกมือ ถนนที่ขนส่งหินหากมีความลาดชันเกิน 8 เปอร์เซ็นต์มีผลกระทบต่อกำลังของเครื่องยนต์กับความสามารถในการบรรทุกหินมาก ให้ขับโดยใช้เกียร์ต่ำ

#### ค. ขั้นตอนเชิงความปลอดภัยในการใช้รางทิ้งหิน

ก่อนทิ้งหินตามราง ควรกำหนดให้คนงานตรวจสอบสภาพเสาและสิ่งค้ำยันรางที่ต้องมั่นคงแข็งแรง และให้สัญญาณเป็นเสียงก่อนทิ้งหิน ให้หลีกเลี่ยงการไต่ขึ้นหรือลงทางรางทิ้งหิน ถ้าจำเป็นต้องจัดการกับหินที่กำลังค้างติดอยู่ให้หลุดออกจากรางทิ้งหิน ให้คนงานผูกเชือกที่เอวและโยงลงมาจากข้างบน และมีผู้ช่วยเหลือคอยทำการสาวเชือกได้ในเวลาที่กองหินมีแนวโน้มที่จะเกิดการไถลเลื่อน

### 6. การลดผลกระทบหน้างานระเบิด

การลดผลกระทบสำหรับหน้างานขุดเจาะที่วิธีหนึ่ง ก็คือ การออกแบบตัดหน้าเหมืองให้มีระดับลดต่ำลงจากพื้นผิวเป็นขั้นบันไดเวียนแบบก้นหอย ซึ่งยังช่วยทำให้ทัศนียภาพของการมองจากด้านนอกดีขึ้นด้วย ผลกระทบในเรื่องการสั่นสะเทือนกับความดังเสียงกับหินปลิว

จะถูกจำกัดให้อยู่ภายในบ่อเหมืองเปิด (open pit) และฝุ่นละอองจากการระเบิด ก็จะไม่ถูกพัดพาไปไกลจากหน้าเหมือง

ถ้าหากต้องการระบุค่าของการสั่นสะเทือนกับค่าความดังเสียง เป็นตัวเลขที่สามารถบันทึกผลเป็นหลักฐานเพื่อการตรวจสอบได้ ก็ต้องใช้เครื่องตรวจวัดการสั่นสะเทือนจากค่าความเร็วของอนุภาคกับความถี่ รวมทั้งวัดระดับความดังเสียงผ่านไมโครโฟน ถ้าหากไม่มีเครื่องมือในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนและความดังเสียง ก็ใช้สูตรเชิงประสบการณ์ในการคำนวณค่าตัวแปรผลกระทบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกินขีดจำกัดที่เป็นอันตรายได้ วิธีการป้องกันที่ดีที่สุดของผลกระทบในการระเบิด คือ การจำกัดปริมาณวัตถุระเบิดตามสัดส่วนของระยะทางที่ห่างจากจุดระเบิด ซึ่งใช้ได้ดีกับกรณีหินปลิวกระเด็นด้วย

## 7. การลดผลกระทบในการขนส่ง

เมื่อมีการขนย้ายหินอาจเกิดหินหล่นใส่ถนนเมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่าน การป้องกันผลกระทบต้องให้คนขับปิดท้ายรถเวลาบรรทุกเสมอ และระวังในการขับทางโค้งหรือทางใกล้หน้าผาให้ชะลอความเร็วรถเพื่อป้องกันหินไถลเลื่อนและหินตกใส่ ย่อบรรทุกหินจนเกินระดับขอบข้างหลังรถบรรทุก และควรทำเหล็กกันเพิ่ม หนึ่งการทำคันทางโค้งบนถนนที่ช่วยจำกัดความเร็วรถได้ในระดับหนึ่ง

การวางแผนเชิงผลกระทบฝุ่น เมื่อมีการขนย้ายหินหน้าเหมืองไปยังบริเวณภายในขอบเขตของเหมือง หรือบริเวณนอกเหมืองที่ต้องบรรทุกหินส่งไปยังโรงบดย่อย ถ้าเลี่ยงการใช้รถบรรทุกขนหินมาใช้ระบบสายพานลำเลียงช่วยลดผลกระทบของฝุ่นไปได้มาก วิธีการพรมน้ำบนถนนเป็นวิธีการที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยหากมีบ่อหรือแอ่งน้ำอยู่ใกล้บริเวณ การทำถนนให้มีการบดอัดได้มาตรฐานหรือลาดผิวหน้าถนนด้วยยางแอสฟัลต์หรือทำเป็นถนนคอนกรีตช่วยลดมลพิษฝุ่นได้ในระยะยาว การปลูกต้นไม้ริมทางช่วยลดฝุ่น กับทัศนียภาพสวยงามขึ้น

การจัดการวัสดุที่ไม่ต้องการไปทิ้ง อาจก่อให้เกิดการปิดกั้นทางเดินน้ำเดิม หรือไปทำให้แหล่งน้ำเดิมที่ดีกลายเป็นเสียไป การออกแบบฟื้นฟูสภาพของหน้างานให้ควบคู่ไปกับการผลิตหินหน้างานตั้งแต่ก่อนลงมือปฏิบัติงาน จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการแก้ไขภายหลัง วิธีการที่นิยมคือการปรับพื้นในเรียบเป็นลานสำหรับทิ้งสิ่งของ หรือขุดเป็นบ่อขนาดใหญ่ จากนั้นปูพื้นด้วยวัสดุอย่างสังเคราะห์เมื่อนำวัสดุที่ไม่ต้องการมาทิ้ง แล้วไถปาดกลับด้วยดิน

### 4.4.3 แนวทางในการเก็บรักษาและซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลและอุปกรณ์

ในเขตพื้นที่ทำเหมืองนั้น ส่วนหนึ่งจะต้องถูกกันไว้เป็นที่เก็บรักษาและซ่อมบำรุงเครื่องจักรขนาดหนัก เครื่องจักรอุปกรณ์ขนาดปานกลาง โรงเก็บรถ โรงเก็บวัตถุระเบิด ดังนั้นจึง



ต้องวางแผนเพื่อแยกพื้นที่ของอาคาร โครงสร้างของที่เก็บรักษาและซ่อมบำรุงไว้ให้ชัดเจน และเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเครื่องจักรกลและอุปกรณ์เหล่านั้น พร้อมทั้งจะใช้งานได้ตลอดเวลา

การวางแผนออกแบบพื้นที่ใช้สอยเพื่อเก็บรักษาเครื่องจักรกล ในงานเหมืองแร่กับงานเหมืองหินมีความแตกต่างกันพอสมควรเช่น เครื่องจักรกลและอุปกรณ์สำหรับงานเหมืองหินส่วนหนึ่งจะเน้น ไปถึงโรงโม่บดย่อยหินระเบิดให้ได้ขนาดตามความต้องการของตลาด แต่ในงานเหมืองแร่จะเน้น ไปถึง กระบวนการแยกสารให้บริสุทธิ์เพียงพอที่จะส่งไปยังโรงถลุงหรือเตาเผาเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้า (กรณีเป็นเหมืองถ่านหิน)

การบรรยายในหัวข้อนี้ จะทำการพิจารณาโครงสร้างโดยรวม ในส่วนที่เก็บรักษาของเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ทั้งที่ใช้ในเหมืองหินและเหมืองแร่ แบ่งออกเป็นสำนักงานติดต่อส่วนกลางและสำนักงานภาคสนาม โรงเก็บและซ่อมบำรุงพัสดุส่วนกลาง โรงเก็บรถและอุปกรณ์ขนาดหนัก โรงเก็บรถและอุปกรณ์ขนาดเล็กถึงปานกลาง อาคารเก็บวัตถุระเบิดและวัตถุอันตราย ส่วนบริการงานภาคสนามโดยเฉพาะ พื้นที่โรงไฟฟ้าและเครื่องอำนวยความสะดวก โรงอาหารและโรงครัว พื้นที่ใช้สอยอื่นๆ ที่ต้องใช้ในระยะยาว พื้นที่ชั่วคราวสำหรับการใช้สอยอื่นๆ

### 1. สำนักงานติดต่อส่วนกลางและสำนักงานภาคสนาม

ถ้าหากเหมืองเปิดที่มีการลงทุนสูง มีพนักงาน คนงาน และอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนข้างมาก สำนักงานติดต่อส่วนกลางต้องแยกออกจากสำนักงานภาคสนาม แต่ในกรณีที่เหมืองเปิดมีขนาดเล็กพื้นที่ใช้สอยมีไม่มาก ก็อาจต้องรวม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน

ปกติสำนักงานติดต่อส่วนกลาง ควรเป็นออฟฟิศที่ทำงานของผู้จัดการกับพนักงานด้านธุรการเป็นส่วนใหญ่ ส่วนสำนักงานภาคสนามจะเป็นออฟฟิศของวิศวกร นักธรณีวิทยา พนักงานเจาะระเบิด พนักงานขับรถ เป็นต้น

### 2. โรงเก็บและซ่อมบำรุงพัสดุส่วนกลาง

จุดมุ่งหมายหลักของการใช้พื้นที่นี้ ต้องการให้มีการเก็บรักษาและซ่อมบำรุงที่เป็นศูนย์รวมของเครื่องมือ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงานภาคสนาม

การเก็บรักษาและขนย้ายพัสดุต้องสัมพันธ์กับความปลอดภัยด้วย ควรมีการแยกประเภทของวัสดุที่ติดไฟหรือวัสดุอันตรายออกจากวัสดุปกติ ห้องที่เก็บรักษาควรสะอาดเรียบร้อยและมิดชิด แสงสว่างมีเพียงพอ หลีกเลี่ยงความแออัด การกองวัสดุต้องมีช่องว่างหรือเว้นระยะห่างระหว่างแต่ละกองวัสดุไว้ด้วย มีการเก็บรักษาเครื่องมือ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพที่จะใช้งานได้ทันที มีการทำเครื่องหมายและคำเตือนให้รู้ว่าพื้นที่ไหนเป็นส่วนที่เป็นอันตราย มีการจัดระเบียบกับการเก็บกวาดทำความสะอาดพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ



พื้นที่ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง ควรกันเขตภายในไว้โดยเฉพาะ ไม่ควรเก็บเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้ในการซ่อมบำรุงไว้ในพื้นที่นี้ ห้ามผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องเข้าพื้นที่ กรณีที่ต้องตัดสินใจอย่างเร่งด่วนให้มีการประสานงานกับทางสำนักงานทันที ดังนั้นควรมีบุคลากรที่เป็นหัวหน้าพนักงานประจำอยู่ตลอดเวลาทำงานปกติ หรือมีการเปลี่ยนกะการทำงาน บัญชีแสดงการเบิกจ่ายวัสดุและอุปกรณ์ต้องมีการปรับปรุงให้ทันสมัยทุกวัน พร้อมทั้งระบุเหตุผลในการซ่อมบำรุงกับบุคลากรผู้รับผิดชอบให้ชัดเจน

ในการออกแบบพื้นที่ของโรงเก็บและซ่อมบำรุงพัสดุส่วนกลาง ควรให้ตั้งในตำแหน่งเปิดทั้ง 4 ด้าน เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์และเครื่องจักรกล และควรแยกพื้นที่ซ่อมบำรุงให้ชัดเจนตามประเภทของเครื่องจักรกล ทั้งนี้ไม่ควรให้สถานที่ทั้งโรงซ่อมบำรุงและเก็บรักษาส่วนกลางนี้ขวางทางเดินน้ำที่ไหลจากทางลาดของเชิงเขา การเลือกวัสดุที่เป็นโครงสร้างอาคาร โรงซ่อมบำรุงและเก็บรักษา ควรมีความสัมพันธ์กับอายุการผลิตในเมืองนี้ด้วย การลงทุนเกินผลตอบแทนที่จะได้อาจทำให้ไม่สามารถทำกำไรจากการทำเหมือง แต่ถ้าหากใช้วัสดุที่เป็นโครงสร้างอาคารไม่เหมาะสมก็อาจก่อให้เกิดอันตรายได้

### 3. โรงเก็บรถและเครื่องจักรกลภาคสนาม

ถ้าหากเป็นเหมืองเปิดขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการแยกชนิดกับขนาดของเครื่องจักรกลและอุปกรณ์เพื่อทำการเก็บรักษาไว้ในหลายอาคาร แต่ถ้ามีการปฏิบัติงานภาคสนามที่ไม่ได้ใช้เครื่องจักรกลหลายชนิดอาจแยกอาคารเก็บไว้เพียง 2 ส่วน ได้แก่ โรงเก็บรถเจาะกับรถตัก กับโรงเก็บรถบรรทุก

พื้นที่โรงเก็บอาจไม่จำเป็นต้องอยู่ในบริเวณที่ราบทั้งหมด ทั้งนี้ควรมีหลังคาและมีทางเข้าออกที่สะดวกพอสมควร กับไม่ควรอยู่ติดกับเชิงเขาจนเกินไป เพราะอาจมีดินหรือหินหล่นตกมาได้

### 4. อาคารเก็บวัสดุระเบิดและวัสดุอันตราย

พื้นที่ที่ตั้งอาคารเก็บวัสดุระเบิดและวัสดุอันตราย ควรแยกจากพื้นที่ใช้สอยอื่นและควบคุมให้เป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัยทั่วไป ดังได้กล่าวมาแล้ว ถ้าหากเป็นเหมืองขนาดเล็ก การเก็บรักษาไว้ในโรงเก็บที่เคลื่อนที่ได้ (mobile storage unit) ก็เป็นวิธีการแก้ปัญหาเชิงความปลอดภัยที่ดีวิธีหนึ่ง

### 5. ส่วนบริการภาคสนามโดยเฉพาะ

การจัดตั้งสำนักงานในส่วนนี้ขึ้นมา เพื่อเป็นการประสานงานที่รวดเร็วระหว่างงานเจาะระเบิด งานขนย้ายหน้างานเหมือง กับงานบดขยี้หรืองานดลูกลโหะ นอกจากนี้สำนักงานส่วนนี้ยังควรดัดแปลงให้เป็นหน่วยเคลื่อนที่เร็ว ที่สามารถบริหารจัดการในเรื่องที่จำเป็นเร่งด่วน

เช่น การต้องการเบิกจ่ายวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องการเร่งด่วน การทำสัญญาเดือนกับให้ผู้ที่อยู่อาศัยใกล้เคียงรับทราบ การประสานงานกับทางสำนักงานส่วนกลางในกรณีเร่งด่วน ดังนั้นพื้นที่ที่ตั้งของส่วนบริหารภาคสนามนี้อาจเป็นอาคารชั่วคราวที่คัดแปลงให้ใช้งานได้ในระยะสั้นๆ และมีทำเลที่ตั้งอยู่ระหว่างสำนักงานกลาง กับส่วนที่ปฏิบัติการหน้างานเหมือง

## 6. พื้นที่โรงไฟฟ้าและเครื่องอำนวยความสะดวกอย่างอื่น

พื้นที่ที่ตั้ง โรงกำเนิดไฟฟ้าหรือสถานีรับ และถ่ายทอดกำลังส่งไฟฟ้า จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังในเรื่องความมีระเบียบของสายไฟกับอุปกรณ์ตลอดจนมีป้ายเตือนที่เห็นได้ชัดเจน กรณีของอาคารที่ใช้ในการเก็บรักษาก๊าซหุงต้มควรมีผนังที่แข็งแรงและแยกที่วางถังก๊าซเป็นอิสระออกจากบริเวณที่อาจมีเชื้อปะทุเกิดขึ้นได้

สถานที่ตั้งปั๊มน้ำมัน กับที่บริหารน้ำมันหล่ออื่นไม่ควรนำไปปะปนหรือใกล้กับบริเวณที่เป็นที่อยู่อาศัยของพนักงานคนงานในเมือง หรือใกล้กับสำนักงานหรือบริเวณที่มีความแออัดมาก การระวังรักษาความสะอาดเป็นสิ่งจำเป็นมาก

## 7. โรงอาหารและโรงครัว

ถ้าหากที่ตั้งเหมืองไม่ได้อยู่ใกล้ชุมชนมากขนาดของโรงอาหารและโรงครัวยังสามารถจำกัดให้มีพื้นที่ใช้สอยเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าหากอยู่ห่างไกลชุมชนและการคมนาคมระหว่างเหมืองและหมู่บ้านอยู่ห่างไกล พื้นที่ของโรงอาหารและโรงครัวอาจต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการให้บริการอาหารแก่พนักงานและคนงานตลอดทั้งวัน สถานที่ตั้งโรงอาหารและโรงครัวควรอยู่ในที่ราบใกล้สำนักงาน มีหลังคาคลุม และมีการรักษาความสะอาดที่ดี

## 8. พื้นที่ใช้สอยอื่น ที่ต้องใช้ในระยะยาว

ในบางกรณีการปฏิบัติการในงานเหมืองแร่ อาจมีการจัดตั้งห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นห้องทำแผนที่ วิเคราะห์สินแร่ หรือห้องคอมพิวเตอร์ของการออกแบบภาคสนาม สถานที่สำหรับสต็อกสินแร่ที่ขุดเจาะขึ้นมาแต่ยังไม่สามารถจำหน่ายในท้องตลาด สถานที่ตั้งโรงถลุงเป็นต้น ทั้งนี้ความจำเป็นของแต่ละเหมืองที่ต้องการพื้นที่ใช้สอยเพื่อกิจกรรมเหล่านี้จะแตกต่างกัน ถ้าไม่ได้ใช้ตลอดอายุเหมืองก็ควรสร้างอาคารเพื่อการใช้สอยอย่างจำกัด

กรณีของเหมืองหิน อาคารที่ใช้เป็นที่ตั้งโรงโม่บดย่อยภายหลังการระเบิดหิน มักเป็นสิ่งจำเป็นและต้องออกแบบอาคารใช้สอยอย่างถาวร เพื่อคงสต็อกหินที่บดย่อยแล้ว

## 9. พื้นที่ใช้สอยอื่นที่มีความจำเป็น

พื้นที่บางส่วนจำเป็นต้องกันไว้สำหรับกิจกรรมในเมืองหรือสำหรับการติดต่อระหว่างเหมืองกับหน่วยราชการหรือเหมืองอื่น เช่น ที่จอดรถสำหรับผู้มาติดต่อ และสถานที่ที่เป็นห้อง

ประชุมขนาดที่เหมาะสม (ไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป) พื้นที่เหล่านี้ควรสร้างไว้ให้ใช้งานได้ตลอดอายุการทำงานในเมือง สถานที่ตั้งอาจอยู่ในบริเวณเดียวกับหรือใกล้กันสำนักงานด้านธุรกิจ พื้นที่ใช้สอยในหัวข้อที่ 8-9 ถ้ามีความจำเป็น อาจแยกตั้งนอกเขตประทานบัตรของการทำเหมือง ทั้งนี้ต้องดูความเหมาะสมเรื่องระยะทางของการคมนาคมเพื่อการติดต่อและค่าใช้จ่ายในการขนย้ายวัสดุ ตลอดจนผลกระทบเรื่องอื่นด้วย

## 4.5 การวิเคราะห์ความเหมาะสมในเชิงการลงทุน

การประเมินผลและวิเคราะห์หาความเหมาะสมในเชิงการลงทุน มีความเกี่ยวข้องกับ การบริหารงานในองค์กรทั้งด้านบุคลากรกับเครื่องจักรกล การจัดเตรียมการสำหรับการวางแผนงานควรคำนึงถึงสวัสดิภาพของผู้ปฏิบัติงาน ที่ต้องให้มีบรรยากาศของความปลอดภัยในระดับสูง รวมทั้งมีความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ ควบคู่กับการบริหารจัดการภายในองค์กรให้เกิดประสิทธิภาพของการปฏิบัติงานภาคสนามสูงสุดด้วย

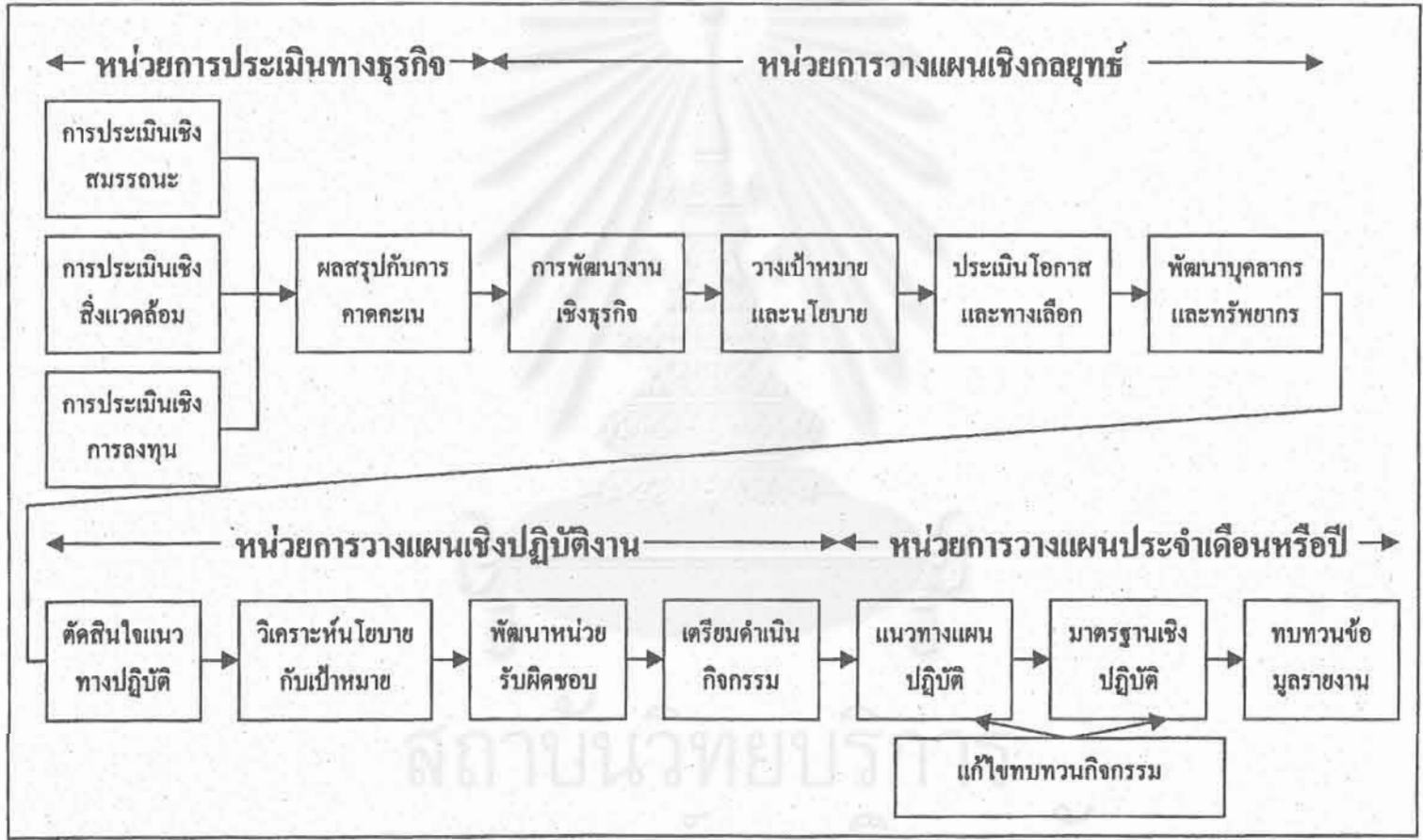
### 4.5.1 รูปแบบที่ดีของการจัดการในองค์กร

บุคลากรขององค์กรหรือบริษัทเป็นองค์ประกอบหลักของการจัดการ งานการขุดเจาะโดยการใช้เครื่องจักรกลหนัก หรือใช้วัตถุระเบิด ต้องการผู้มีความชำนาญกับมีประสบการณ์สูง การปฏิบัติงานภาคสนามไม่สามารถยินยอมให้มีความเสี่ยงของเหตุการณ์บางอย่างเกิดขึ้นได้ เช่น การใช้เครื่องจักรกลหรือใช้วัตถุระเบิดผิดวิธี ความประมาทในการเก็บรักษาเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ การดำเนินงานภาคสนามโดยขาดข้อมูลเชิงเสถียรภาพหน้างานเหมือง เป็นต้น อันตรายจากความผิดพลาดดังกล่าว อาจมีผลต่อชีวิตหรือทรัพย์สินขององค์กรและเกิดผลกระทบต่อเนื่องถึงความคุ้มทุนจากการเปิดเหมืองอีกด้วย

รูปแบบการวางแผนโดยภาพรวมในองค์กร เป็นองค์ประกอบสำคัญในการบริหารงานขององค์กรธุรกิจ การวางแผนนี้จะให้ผลลัพธ์ที่ดีต้องมีการดำเนินการให้เสร็จสิ้นก่อนเปิดเหมือง หรือมีการดำเนินงานอยู่ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง จากรูปที่ 4.16 ได้แสดงผังภูมิของการวางแผนโดยภาพรวมขององค์กรธุรกิจหนึ่ง (ในที่นี้สมมติว่าเป็นบริษัทผลิตหินเพื่อการก่อสร้าง) ในการวางแผนโดยภาพรวม แบ่งหน่วยงานวางแผนเป็น 4 หน่วยหลัก ดังนี้

#### 1. หน่วยการประเมินเชิงธุรกิจ

หน่วยงานนี้เป็นหน่วยงานกลางของการวางแผนมีหน้าที่ในการรวบรวมผลกับข้อมูลดิบ พยากรณ์เหตุการณ์หรือความต้องการของตลาด ติดตามกลยุทธ์ของคู่แข่งทางการค้า ติดต่อกับ



รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันของการบริหารงานในแต่ละหน่วยหลักทั้ง 4 หน่วย ในกรอบสี่เหลี่ยมเล็กเป็นกิจกรรมของการทำงาน

ประสานงานในหน่วยราชการและหาผู้ลงทุนในโครงการ ระบุตำแหน่งความรับผิดชอบของบุคลากร ประเมินผลการทำงานบุคลากร ปรับลดหรือเพิ่มเงินเดือนกับค่าจ้าง

## 2. หน่วยการวางแผนเชิงกลยุทธ์

หน่วยงานนี้เป็นหน่วยงานที่ใช้ในการตัดสินใจวางแผนงานขนาดใหญ่ตามแต่ละสถานะที่องค์กรได้รับโอกาส หรือมีการเพิ่มทรัพยากรทางบุคคลหรือทรัพย์สิน หน่วยการวางแผนเชิงกลยุทธ์ควรมีหน้าที่รับผิดชอบ หรือประสานงานกับหน่วยปฏิบัติงานภาคสนาม เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ถึงสถานะความเสี่ยงต่อการลงทุน ในการเริ่มดำเนินงานปฏิบัติงาน เปิดหน้าเหมือง หรือในระหว่างการปฏิบัติงานและภายหลังการดำเนินงานเปิดหน้าเหมือง

## 3. หน่วยการวางแผนเชิงปฏิบัติงาน

แนวทางการวางแผนเชิงปฏิบัติงานเป็นหัวข้อวิจัยหลักสำหรับโครงการนี้ การวางแผนส่วนใหญ่เป็นการเจาะลึกลงไปในระดับรายละเอียดของแต่ละหน่วยงานย่อย เช่น การวางแผนในหน่วยเจาะ หน่วยระเบิด หน่วยขนย้ายลำเลียง ซึ่งเป็นการวางแผนทั้งในระยะยาวและระยะสั้น และการกำหนดระยะเวลาในการปฏิบัติการที่แน่นอน ตลอดจนประสานงานกับหน่วยงานอื่นในองค์กร เพื่อประกอบการตัดสินใจ เช่นสถานะความเสี่ยงหน้างานขุดเจาะในเชิงความปลอดภัยและในเชิงการลงทุน เป็นต้น

## 4. หน่วยการวางแผนประจำเดือนหรือปี

การวางแผนของหน่วยงานนี้ เป็นความรับผิดชอบของระดับผู้จัดการหรือหัวหน้าส่วนงานเชิงปฏิบัติการเพื่อมอบหมายกิจกรรมเฉพาะเรื่องให้อยู่ในความรับผิดชอบของบุคลากรผู้ชำนาญเฉพาะกลุ่ม

### 4.5.2 เป้าหมายของการจัดการหน้างานเหมืองเปิด

ข้อมูลทางเทคนิคที่ช่วยให้บรรลุเป้าหมายของความคุ้มค่าในการเปิดเหมือง ข้อมูลในส่วนของเหมืองหินและในส่วนของเหมืองแร่ที่ใช้วิเคราะห์ผลอาจมีความแตกต่างกันบ้าง แต่จุดมุ่งหมายสุดท้ายจะเหมือนกัน ได้แก่ การเปิดเหมืองที่ให้ผลตอบแทนในการลงทุนสูงสุด

### 1. การคำนวณเกรดความสมบูรณ์ต่ำสุดที่จะลงทุน

ในงานเหมืองแร่ สินแร่ที่มีการขุดเจาะออกมาจากบ่อเหมือง จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของสินแร่นั้น ๆ ว่าควรมีค่าต่ำสุดที่คุ้มทุนในการขุดเจาะซึ่งใช้ศัพท์เทคนิคเป็น cutoff grade ที่ระดับใด ในขณะที่งานเหมืองหิน ค่าการซื้อขายหินย่อยในท้องตลาดจะเป็นสิ่งที่กำหนดความคุ้มทุน ระบบการคำนวณหาค่าเกรดต่ำสุดมีหลายแนวทาง



#### ก) การคำนวณหาค่าเกรดเฉลี่ย

แนวทางการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยนี้ เป็นการหาค่าเฉลี่ยของการเปิดหน้างานที่เป็นค่าการขุดเจาะที่เรียกว่า stripping cost การหาค่าเฉลี่ยของการแยกสินแร่หรือถลุงสินแร่ให้เป็นโลหะบริสุทธิ์ ทั้งนี้ในกระบวนการคำนวณต้องมีการหาค่าการเสื่อมราคาพร้อมทั้งดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาของการทำงานด้วย ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นมูลค่าสุทธิ (net value) ในช่วงที่มีการทำปฏิบัติการปัจจุบัน ที่ควรเป็นผลตอบแทนที่มีค่ากำไรสูงสุดของการลงทุน

#### ข) การคำนวณเชิงการเปรียบเทียบ

การคำนวณในลักษณะนี้ ใช้วิธีเลือกวางแผนหลายรูปแบบ จากนั้นก็นำแบบจำลองของแต่ละแนวทางเลือกมาเปรียบเทียบหาค่าความเหมาะสมที่สุด เช่น การเปลี่ยนรูปแบบการขนย้ายลำเลียง (haulage system) การเปลี่ยนขนาดของรถบรรทุกวัสดุ การเปลี่ยนผังหน้าแร่เปิด เป็นต้น จากนั้นก็วิเคราะห์ผลตอบแทนแต่ละแนวทางเพื่อเลือกปฏิบัติในแนวทางที่วางแผนจัดการแล้วให้ได้ผลตอบแทนที่เป็นมูลค่าสุทธิสูงสุดในการลงทุนในขณะนั้น

### 4.6 การวิเคราะห์ผลตอบแทนจากการลงทุนขุดเจาะเชิงเศรษฐศาสตร์

คำศัพท์ที่นิยมใช้เรียกการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ว่า economic analysis จะไม่มีความหมายอะไร ถ้าหากเหมืองเปิดเป็นส่วนหนึ่งในระบบที่ต้องรวมกันกับ โรงแต่งแร่และโรงถลุง แต่ถ้าหากเหมืองเปิดทำการขายสินแร่ (หรือหินย่อย) เป็นวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตโดยตรง จึงสามารถจัดเหมืองเปิดให้เป็นหน่วยหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และให้มูลค่าตอบแทนที่เป็นผลประโยชน์ได้

#### 4.6.1 การวิเคราะห์เชิงความเป็นไปได้ของโครงการ

การศึกษาเบื้องต้นว่าโครงการมีความเหมาะสมหรือคุ้มค่าการลงทุน อาศัยหลักการของการตรวจสอบจากกระแสเงินสด (cash flow) ซึ่งเป็นการคำนวณหาจำนวนเงินสดที่ทางองค์กร (เหมือง) ได้รับและจ่ายในช่วงเวลาหนึ่ง ผลลัพธ์จากการคำนวณที่เป็นกำไรนี้ต้องหักภาษีออกไปแล้ว รวมทั้งมีการหักค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ออกไปแล้วด้วย จำนวนเงินที่เป็นกระแสเงินสดเป็นเครื่องชี้วัดความแข็งแกร่งของการทำธุรกิจภายในองค์กร

#### 4.6.2 ตัวแปรหลักที่ใช้ในแบบจำลองเชิงเศรษฐศาสตร์

ตัวแปรหลักที่ใช้วิเคราะห์ควรมีการจัดหมูก่อนทำการวิเคราะห์ (Borquez and Thompson, 1990) ออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้



### 1. Industry stimulant group

ตัวแปรกลุ่มนี้ เกี่ยวข้องกับการขุดเจาะของงานหน้าเหมืองโดยเฉพาะ เป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบและประเมินผล ได้แก่ ปริมาณแหล่งสำรองสินแร่ (หิน) ในพื้นที่ประทานบัตร ค่าเฉลี่ยของเกรดสินแร่กับปริมาณสินแร่ต่อตันของการขุดเจาะบล็อก อัตราการผลิตต่อเดือน/ปี วิธีการผลิต วิธีการบดขยี้และวิธีการถลุง ค่าใช้จ่ายจากการสูญเสีย (recovery) ที่เป็นผลจากการทำเหมืองหรือการแต่งแร่ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ทั้งที่เป็นการใช้เป็นตัวเงินในการทำเหมือง ต้นทุนในการทำสินแร่ให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

### 2. Economic stimulant group

ตัวแปรกลุ่มนี้ เกี่ยวข้องกับการจัดการกับผลกระทบในทางการตลาดและผลตอบแทนจากการลงทุน ได้แก่ ราคาซื้อขายหินหรือสินแร่ในท้องตลาด มูลค่าหุ้น อัตราดอกเบี้ย เวลาของการกินทุน ตัวแปรในหัวข้อนี้ในบางครั้งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากความอ่อนไหวในระบบเป็นกลไกของตลาด

#### 4.6.3 การประเมินผลกำไรของการดำเนินงาน

เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลลัพธ์ที่เป็นส่วนกำไรขององค์กร ที่นิยมใช้ในงานเหมืองเปิด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก สรุปได้ดังนี้

##### 1. ระบบคำนวณการกินทุนที่ไม่ใช่ discounted cash flow

วิธีนี้มีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมในปัจจุบันเป็นการหามูลค่าปัจจุบันสุทธิที่เรียกว่า net present value (NPV) ทั้งนี้อาจมีการประเมินช่วงเวลาของการลดมูลค่าเข้าไปด้วยในกระบวนการคำนวณ สมการทั่วไปของ NPV คือ

$$\text{Net Present Value (NPV)} = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Cash Flow (CF)}}{(1+k)^t} \quad (4.8)$$

พจน์  $k$  คือ อัตราส่วนลด (discount rate) ปกติเท่ากับค่าอัตราเงินกู้ในตลาดทั่วไป ส่วนพจน์  $t$  เป็นตัวเลขจำนวนปี

ถ้าหากต้องการจะหาว่ากระแสเงินสดที่เข้าไปในระบบ เท่ากับกระแสเงินสดที่ออกจากระบบจะหมายถึง ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return: IRR) เป็น 0 (ศูนย์)

การประเมินผลกำไรมักนิยมใช้เป็นค่าดัชนีที่เรียกว่า ดัชนีวัดผลกำไรต่อการลงทุน (profitability index: PI) หาผลลัพธ์โดยการเปรียบเทียบกับค่าการลงทุนที่ตั้งต้น (original investment) ดังนี้

$$\text{Profitability Index (PI)} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Cash Flow (CF)}}{(1+k)^t}}{\text{Original Investment}} \quad (4.9)$$

ตัวอย่างของการประเมินผลหาค่า NPV ของการออกแบบเปิดหน้างานจุดเจาะอย่างง่าย ในรูปแบบบล็อกได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 4.3.2 และมีรูปสเก็ชกับตารางการคำนวณประกอบ

## 2. ระบบคำนวณการคืนทุนที่เป็น discounted cash flow

วิธีนี้มีหลายรูปแบบเช่นเดียวกัน แต่ที่นิยมในปัจจุบันในงานเหมืองเปิด เป็นการหาผลตอบแทนที่คำนวณค่าอัตราส่วนลดกระแสเงินสด เข้าไปในระบบด้วย เรียกวิธีนี้ว่า discounted cash flow rate of return (DCFROR) หรือนักวิจัยบางท่านเรียกว่า discounted cash flow rate of investment (DCFROI)

ข้อเปรียบเทียบพื้นฐานของวิธีการแบบแรกที่ใช้ NPV กับการใช้แบบที่สอง DCFROR เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาในการลงทุน ได้แก่ ถ้าหากการลงทุนมีค่าของ NPV เป็นบวกหมายถึงถึงว่าจำนวนเงินรับมีมากกว่าจำนวนเงินที่ต้องจ่ายออกจากระบบ ในโครงการเปิดเหมือง และค่าของ DCFROR มีมากกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุด แสดงว่าโครงการที่ประเมินผ่านเกณฑ์ที่กำหนดเชิงเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน

การนิยามพจน์ที่ใช้หาค่า DCFROR ในอุตสาหกรรมผลิตหินและสินแร่ ใช้ค่าอัตราดอกเบี้ยที่เริ่มคำนวณตั้งแต่ปีแรก (ปีที่ 1) ของการลงทุน ทั้งนี้เพื่อหามูลค่าปัจจุบันที่จุดเริ่มต้น หรือที่เวลาเป็นศูนย์ (กำหนดให้เป็นพจน์  $I$  ในสมการที่ 4.10)

$$I = \frac{CF}{(1+i)} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \frac{CF_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{CF_{n-1}}{(1+i)^{n-1}} + \frac{CF_n}{(1+i)^n} \quad (4.10)$$

$$\text{or } I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

พจน์  $I$  เป็นมูลค่าของการลงทุนเปิดเหมืองที่จุดตั้งต้น ส่วนพจน์  $CF$  คือกระแสเงินสด ตัวห้อยที่เป็นเลขอารบิกอยู่ใต้พจน์  $CF$  เป็นพจน์ที่ระบุปีที่ดำเนินการในขณะนั้น (เป็นค่าเดียวกับพจน์  $t$  ในสมการที่ 4.9) จำนวนปีที่สิ้นสุดทำการหรือเป็นจำนวนปีที่หมดอายุเหมืองแสดงไว้เป็นพจน์  $n$  สำหรับพจน์  $i$  เป็นค่าอัตราดอกเบี้ยของเงินกู้ที่ขี้มมาลงทุน และจัดเป็นพจน์ที่ไม่ทราบค่า (unknown) ในสมการ

ถ้าหากผลลัพธ์ที่คำนวณได้มีค่ากระแสเงินสด (CF) เท่ากับค่าเงินลงทุน (I) สามารถหาค่าที่ไม่ทราบในสมการคือ  $i$  (อัตราดอกเบี้ย) ได้ แต่ในสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นบ่อยนั้น กระแสเงินสดที่ทำการคำนวณในขณะนั้น จะมีค่าไม่เท่ากับ จำนวนมูลค่าที่ลงทุนไป เมื่อต้องการหาผลเฉลยของ  $i$  ต้องใช้การลองสุ่มผิด-ถูก (trial and error)

จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี การตรวจสอบด้วย DCFROR เป็นการหาอัตราส่วนผลตอบแทนที่แท้จริงจากการลงทุน แต่อาจยังไม่ได้รับความนิยมมากเท่าวิธีคำนวณหา NPV ทั้งนี้มี 2 สาเหตุหลัก คือ

ก) เมื่อเปรียบเทียบโครงการ ค่า DCFROR มีการตั้งสมมุติฐานที่ให้การไหลของกระแสเงินสด มีการลงทุนอีกครั้ง (reinvested) ในสภาวะที่อัตราดอกเบี้ยที่คำนวณมีการเปลี่ยนแปลงทุกโครงการ ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดคือต้องมีการประเมินอัตราที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการลงทุนอีกครั้ง

ข) การแก้ปัญหาสำหรับ DCFROR มีวิธีที่หาผลเฉลยคล้ายคลึงกัน นั่นคือ เป็นการหารากของสมการพหุนาม (polynomial equation) ที่อยู่ในรูปแบบ

$$0 = A_n X^n + A_{n-1} X^{n-1} + \dots + A_2 X^2 + A_1 X + A_0$$

ในกรณีทั่วไป จำนวนรากที่สูงที่สุดคือ "n" ซึ่งหมายความว่ามีความยาวค่ามากกว่าหนึ่ง และในสภาพความเป็นจริง โครงการที่คำนวณแบบ DCFROR มักมีสภาพแบบนี้

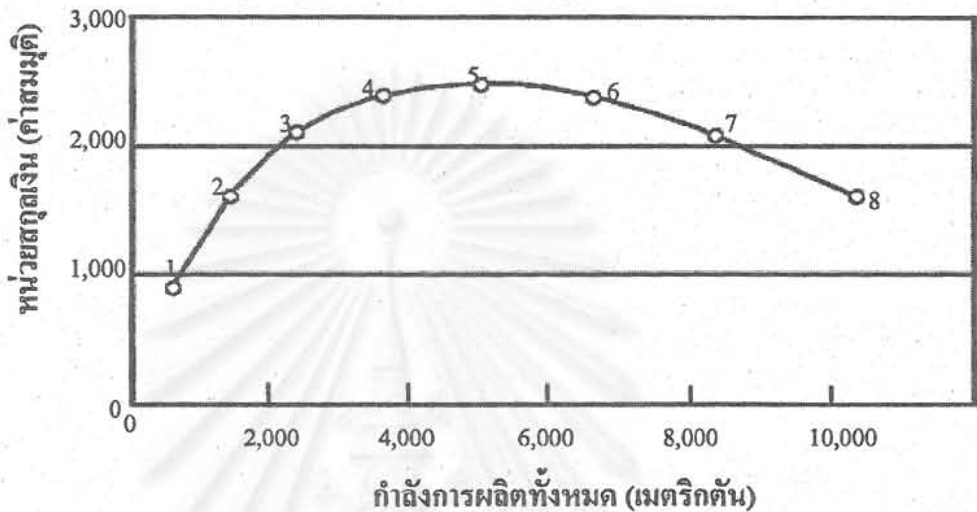
## 4.7 แนวคิดในเรื่องการลงทุนทำเหมืองเปิด

การประเมินหาความเหมาะสมเพื่อหาขีดจำกัดของการลงทุน มีการอธิบายไว้เป็นหลายประเด็นตามหัวข้อก่อนหน้าในบทนี้ เพื่อให้เนื้อหาการประเมินมีความสมบูรณ์ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงขอสรุปแนวคิดในเรื่องการลงทุนทำเหมืองเปิดไว้ ดังนี้

### 4.7.1 แนวคิดในเรื่องจำนวนเงินรับสูงสุด

หลักการอย่างง่ายของผู้ประกอบการสำหรับการลงทุนใด ๆ ก็คือ การปฏิบัติงานให้มีผลกำไรในปีปัจจุบัน ย่อมสะท้อนให้เห็นถึงสมรรถนะของการบริหารจัดการที่ดีกว่า ที่จะรอให้การปฏิบัติการให้เกิดผลกำไรในปีถัดไป เพราะค่าของเงินจะถูกลดลงไปตามเวลา ถ้าวิศวกร

สามารถจะกำหนดค่าของบล็อกรูปร่างที่ขุดเจาะทำเหมืองได้แล้ว การออกแบบหาค่ามูลค่าความชันของการตัดทางลาดก็สามารถทำได้ ถัดมาวิศวกรสามารถหาแนวขอบเขตของบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดทั้งทางด้านเสถียรภาพหน้างานผลิต กับทางด้านผลตอบแทนที่เป็นค่าจำนวนเงินรับสูงสุด นั่นคือ การวางแผนผลิตแต่ละเหมืองควรวิเคราะห์จนได้ผลลัพธ์ที่มีทางเลือกได้หลายแนวทาง



รูปที่ 4.17 เส้นโค้งที่ใช้หาค่ากำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเหมืองเปิดตัวอย่าง

ตัวอย่างของรูปที่ 4.17 เป็นกราฟที่พล็อตระหว่างค่าปริมาณหินข้อยหรือสินแร่ที่ผลิตในเหมืองน้ำหนักเป็นตัน (pit tonnage) กับการตีราคา (valuation) เป็นจำนวนเงินรับจากผลการประเมินที่อิงตามราคาซื้อขายในปัจจุบัน ตำแหน่งที่เป็นจุดสูงสุดของเส้นโค้งในรูปคือ หมายเลข 5 ดังนั้นเป้าหมายของการผลิตสำหรับเหมืองแห่งนี้ ต้องออกแบบให้การขุดเจาะของการผลิตในระบบ มีค่าผลรวมตัวเลขของ waste กับ ore ที่ระดับ 5,000 ตันต่อเดือน จึงจะเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจมากที่สุด การวางแผนเปิดขอบบ่อเหมืองให้มีกำลังการผลิตที่สูงหรือต่ำกว่านี้ จะไม่สามารถทำให้มีผลกำไรมากกว่าทำการผลิตที่ระดับ 5,000 ตันต่อเดือน

#### 4.7.2 แนวคิดในเรื่องผลกระทบของการลำดับขั้นตอนในการผลิต

หลังจากมีการกำหนดกำลังการผลิตของบ่อเหมืองหนึ่ง ในขั้นตอนถัดมาผู้ปฏิบัติงาน (วิศวกรกับทีมงาน) ควรทำการลำดับขั้นตอนของการขุดเจาะเพื่อนำสินแร่กับส่วนที่เป็นกากออกจากบ่อเหมือง ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงกำหนดการเกิดขึ้น ผลกระทบต่อค่าของสินแร่กับจำนวนเงินที่ทางเหมืองควรจะได้รับ ตลอดจนมีการเปลี่ยนแปลงเชิงค่าใช้จ่ายในการผลิตจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอน ด้วยเหตุผลพื้นฐานดังนี้

1) การได้รับผลกำไรที่เป็นจำนวนเงินรับในระบบช้ากว่ากำหนด หมายถึงว่า การบริหารด้านการเงินของเหมืองอาจมีความจำเป็นต้องยืมเงินจากแหล่งอื่น ผลกระทบตามมาก็คือต้องเสียดอกเบี้ยเพิ่ม เป็นการลดมูลค่าของจำนวนเงินรับทั้งหมด

2) การได้รับผลกำไรที่เป็นจำนวนเงินรับในระบบช้ากว่ากำหนดที่ประเมินไว้ หมายถึงประสิทธิภาพของการทำงานลดต่ำลง อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุดคุ้มทุนที่คำนวณไว้ในช่วงเริ่มต้น นั่นคือ ค่าของ breakeven point มีการเปลี่ยนแปลง

#### 4.7.3 การวิเคราะห์ผลผลิตเชิงความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนสมมติฐาน

ภายหลังมีการเปิดทำเหมืองอาจมีการเปลี่ยนสมมติฐานหรือเงื่อนไขเดิม สิ่งหนึ่งที่วิศวกรควรตระหนักไว้ ได้แก่ การกำหนดขอบเขตของบล็อกที่จะขุดเจาะอย่างเหมาะสมไม่ใช่เป็นการออกแบบอย่างละเอียดเพื่อการทำเหมือง แต่มีความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกันมาก การเพิ่มงานการวิเคราะห์เพื่อหาความอ่อนไหวเชิงตัวเลข (หน่วยเป็นสกุลเงิน) ที่เรียกว่า sensitivity analysis จะช่วยระบุความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของโครงการ จากการใช้ข้อสมมติฐานที่ตั้งขึ้น โดยมีจุดประสงค์หลักในการลดความเสี่ยงและหาแนวโน้มผลกระทบต่อความมั่นคงของโครงการช่วงที่มีการเปิดบ่อเหมือง ผลลัพธ์ที่เป็นการวิเคราะห์เชิงสมรรถนะของการผลิตทั้งระบบในเหมือง อาจแสดงเป็นตัวเลขค่าเดียว แต่วิศวกรควรทดลองทำการเปลี่ยนสมมติฐานให้แตกต่างไปจากเดิมบ้างเล็กน้อย เช่น เปลี่ยนค่ามุมความชันของการตัดความลาดจากที่กำหนดไว้เดิม 2-3 องศา ซึ่งการทำปฏิบัติการเช่นนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยโดยเฉพาะเช่นการคำนวณหาค่าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้มีความแม่นยำสูงขึ้น และรวดเร็วประหยัดเวลา การวิเคราะห์แบบ sensitivity นี้

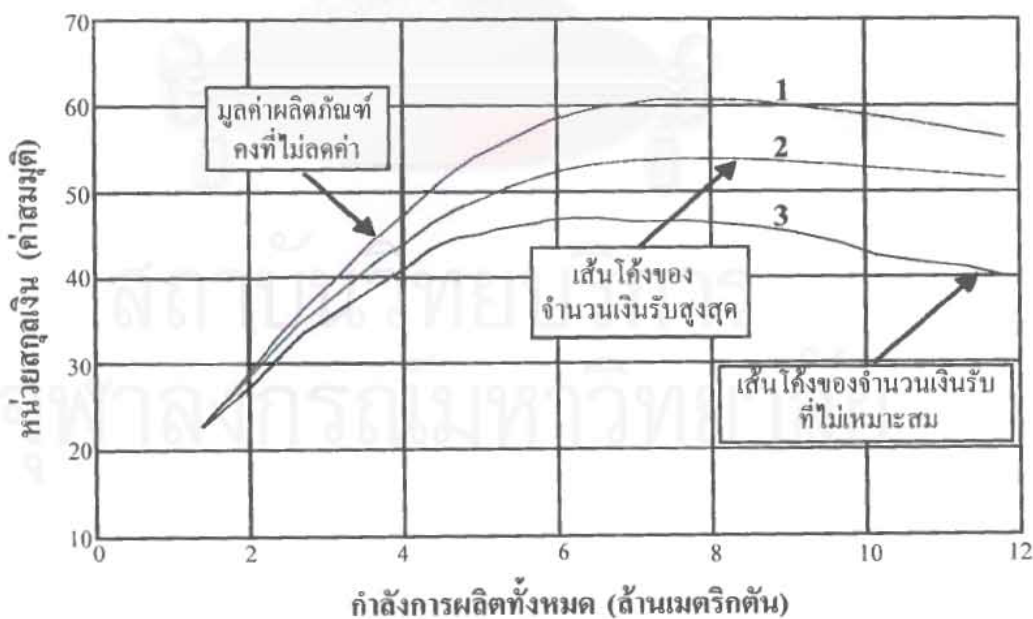
นอกจากหาค่ามุมความชันที่เหมาะสมแล้ว ควรหาค่าใช้จ่ายเชิงการทำปฏิบัติการในเหมืองเพิ่มเติม เช่น การตัดถนนเพื่อการขนส่งลำเลียงในบ่อเหมือง การวิเคราะห์เชิงการลงทุนยังมีรูปแบบการวิเคราะห์หลากหลาย ซึ่งทำให้เกิดความเสี่ยงในการดำเนินงานลดลง

ระหว่างที่มีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเชิงตัวเลขค่าของจำนวนเงินรับ อิงตามสมมติฐานที่เปลี่ยนไป ต้องใช้ตัวแปรหลายค่าทั้งในด้านค่าใช้จ่ายภาคสนาม กับการปรับค่าที่ใช้ในการออกแบบ (มุมความลาดชันหน้าเหมือง แนวถนนขนส่งลำเลียง) ทำให้มีกราฟเส้นโค้งหลายรูปแบบที่พล็อตแสดงความสัมพันธ์ของมวลสินแร่ที่ผลิต กับผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อทำปฏิบัติการขุดเจาะ

ตัวอย่างกราฟผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value: NPV) หน่วยเป็นสกุลเงินตามราคามูลค่าหินข่อยหรือสินแร่ที่ซื้อขายในปัจจุบัน กับตัวเลขค่ากำลังการผลิตทั้งหมดของเหมือง (total pit tonnage: TPT)



หน่วยเป็นล้านเมตริกตันต่อปีตามสมรรถนะของบุคลากร กับเครื่องจักรกลของเหมืองที่ผลิตหินข้อยหรือสินแร่ได้ เส้นโค้งเส้นแรก (หมายเลข 1) เป็นกราฟการกำหนดมูลค่าให้คงที่ สำหรับหินข้อยหรือสินแร่ที่ผลิตได้ ไม่มีการลดค่าของผลิตภัณฑ์ตามเวลาหรือตามกระแสเงินสดที่ได้รับแต่ละช่วงระยะเวลา กราฟหมายเลข 1 จึงเป็นแนวขีดจำกัดของขอบเขตบน (upper bound) ในการเปิดบ่อเหมืองใช้เป็นตัวแบบเพื่อกำหนดแผนการขึ้นต้นของการใช้เครื่องจักรกล ส่วนเส้นโค้งหมายเลข 2 เป็นกราฟที่มีการปรับแก้วิธีการ กับทำการจัดลำดับขั้นตอนของการขุดเจาะในเหมืองใหม่ จนได้ประสิทธิภาพสูงสุด นั่นคือ ถ้าหากทำปฏิบัติการตามแนวกราฟเส้นนี้ จะได้ผลตอบแทนเป็นจำนวนเงินรับสูงสุด (ค่า NPV สูงสุด) สำหรับเส้นโค้งหมายเลข 3 เป็นกราฟที่ได้จากการกำหนดแผนการไม่เหมาะสม เช่น บางช่วงมีการใช้เครื่องจักรกลไปทำถนนแต่ไม่ได้ผลิตสินแร่ หรือกำหนดแผนการของการผลิตสินแร่ในช่วงที่ภูมิอากาศเป็นอุปสรรค (ฝนตกหนัก หรือมีน้ำใต้ดินไหลออกมาท่วมพื้นบ่อเหมือง) นั่นคือถ้าหากทำปฏิบัติการตามแนวกราฟเส้นนี้ จะได้ผลตอบแทนของค่า NPV ต่ำสุด ในความเป็นจริง การทำเหมืองควรให้สมรรถนะในการผลิตสินแร่ (หรือหินข้อย) มีค่าอยู่ระหว่างกราฟหมายเลข 1 กับหมายเลข 3 ถ้าหากบุคลากรมีไม่เพียงพอกับงานรวมทั้งการลงทุนจัดซื้ออุปกรณ์กับเครื่องจักรกลอยู่ในระดับต่ำ กราฟแสดงสมรรถนะการผลิตจะเบี่ยงหรือเอียงมาในแนวใกล้กับเส้นโค้งหมายเลข 3 ถ้าหากบุคลากรมีเพียงพอ มีการจัดการที่ดีในเรื่องลำดับขั้นตอนการขุดเจาะ และเครื่องจักรกลค่อนข้างใหม่อายุการใช้งานไม่มากมีผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น กราฟแสดงสมรรถนะจะอยู่



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ ที่อิงกับค่าของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เทียบกับค่ากำลังการผลิต เพื่อระบุทางเลือกไว้ประกอบการตัดสินใจหลายแนวทาง

ค่อนข้างกึ่งกลางระหว่างหมายเลข 2 กับ หมายเลข 3 ดังนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเงินรับกับกำลังการผลิต เป็นสารสนเทศที่สำคัญ ที่ควรมีการปรึกษาและตัดสินใจร่วมกันระหว่าง ผู้จัดการเมือง วิศวกร สมุห์บัญชี เพื่อให้เกิดความมั่นใจด้านผลกำไรและความเสี่ยงต่อการขาดทุน ทั้งก่อนมีการเปิดบ่อเหมือง (ใช้ในกรณีเลือกขนาดของขบบ่อเหมือง) ระหว่างที่ทำการพัฒนาบ่อเหมือง (ใช้ในกรณีที่มีการปรับแก้ลำดับขั้นตอนของการปฏิบัติงาน)

สรุปการพัฒนางานเหมืองเปิดที่เหมาะสม เป็นการใช้ความรู้ในการวิจัยดำเนินการ (operations research) เพื่อออกแบบหาขีดจำกัดของขบบ่อเหมืองร่วมกับการวิเคราะห์เชิงความอ่อนไหวเมื่อมีข้อสมมุติฐานเปลี่ยนไปจากเดิม ทั้งนี้เพื่อช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของการปฏิบัติงานภาคสนาม ทำให้แหล่งสะสม (หินหรือแร่) มีมูลค่าเพิ่มขึ้นและลดความเสี่ยงในการตัดสินใจ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การกำหนดขีดจำกัดที่เหมาะสมในการเปิดเหมืองบนพื้นผิวดิน

กระบวนการวางแผนเพื่อผลิตหินและแร่ ได้มีความพยายามเป็นระยะเวลายาวนาน กว่า 30 ปี ที่ต้องการให้มีการวางแผนเพื่อออกแบบที่เหมาะสมที่สุด (optimal design) ในการหาขีดจำกัดที่แสดงโครงร่างขอบเขตในการเปิดเหมืองหิน เหมืองแร่โลหะ และเหมืองแร่โอโลหะ เป้าหมายหลักที่สำคัญ ได้แก่การผลิตหินหรือสินแร่ที่ให้ผลตอบแทนเป็นผลกำไรทั้งหมดสูงสุด

#### 5.1 เทคนิคของการออกแบบหาความเหมาะสมที่สุด

เทคนิคของการออกแบบหาความเหมาะสมที่สุด (optimal design) เป็นการศึกษาหารูปแบบหน้างานที่แสดงขีดจำกัดของขอบเขต ที่เป็น โครงร่างของบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับขอบเขตของพื้นที่ประทานบัตรที่ทางเหมืองได้รับสัมปทาน เพื่อให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพสูงสุด และได้รูปแบบหน้างานที่เหมาะสมที่สุดกับกระบวนการพัฒนาหน้างานเหมืองเปิด เช่น ความสัมพันธ์ของผังงานการผลิตกับช่วงระยะเวลาในการขุดเจาะ การระเบิด การขนย้ายวัสดุที่สอดคล้องกับกำลังความสามารถในการบดขยี้หรือแยกสินแร่

ดังนั้นการออกแบบหาความเหมาะสมที่สุดของเหมืองหินหรือเหมืองแร่ จึงไม่เหมือนกับเทคนิคของการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ออกแบบ เพื่อวาดโครงร่างขอบเขตบ่อเหมือง เช่นการใช้โปรแกรม CAD (computer aided design) เพราะโปรแกรมดังกล่าวยังขาดเทคนิคบางประการที่จำเป็นต่อการจำลองแบบ (simulation) ให้สอดคล้องกับสภาวะภูมิประเทศและสภาวะธรณีวิทยาของแหล่งนั้น

#### 5.2 แนวทางของการกำหนดโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิด

ในการวางแผนเพื่อเริ่มพัฒนางานหน้าเหมืองเปิด ทั้งในส่วนที่เป็นเหมืองหินหรือเหมืองแร่ โครงร่างที่แสดงขอบเขตของการขุดเจาะบ่อเหมืองเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องกำหนดไว้ในแผนการพัฒนา อนึ่งสภาวะภูมิประเทศของบางพื้นที่ทำให้การขุดเจาะลึกลงเป็นบ่อเหมืองอาจมีความ

ไม่เหมาะสม เช่น บริเวณเนินหรือเชิงเขา การพัฒนาเปิดหน้างานจึงเป็นการตัดชั้นตะพักแบบขั้นบันได ซึ่งจัดเป็นส่วนเพียงครึ่งหนึ่งของบ่อเหมืองเปิด ถ้าหากรวมอีกส่วนก็จะได้รูปแบบของบ่อเหมืองปกติ

สถานการณ์ของเหมืองเปิดส่วนใหญ่คือ สายแร่หรือแหล่งหินมักมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอหรือ บางทีมวลสินแร่ที่ต้องการนำมาใช้เป็นประโยชน์วางตัวได้มวลสารที่เป็นวัสดุที่ไม่ต้องการ (หรือเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้) จึงต้องหาวิธีเคลื่อนย้ายดินหน้าแร่ที่คลุมทับ (overburden) ออก ในกรณีที่ระดับความลึกของมวลสินแร่ที่อยู่ด้านล่างลึกไม่มากการพัฒนาที่ใช้วิธีการเปิดเหมืองบนพื้นผิวดิน แต่ถ้าอยู่ในระดับลึกมากการพัฒนาที่ใช้วิธีการเปิดเหมืองได้ดินเพราะยังมีมวลสินแร่อยู่ที่ระดับลึกมาก อัตราส่วนในการขุดเจาะดินหน้าแร่ต่อสินแร่ก็ยังมีอัตราสูงชัน มีผลเชิงเศรษฐกิจต่อความคุ้มค่าในการเปิดเหมือง ตัวแปรที่ขึ้นตรงและเป็นค่าที่พึ่งพิงกับอัตราส่วนดินหน้าแร่ส่วนที่ไม่ต้องการหรือเป็นกาก (บางที่เรียกว่า waste) กับสินแร่ ได้แก่ โครงร่างขอบของบ่อเหมืองเปิด และการกำหนดโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดอาจมีได้หลายแนวทาง แต่แนวทางที่ได้ตัดสินใจเลือกเป็นขีดจำกัดขอบบ่อสุดท้าย (ultimate pit limit) ที่ได้รูปแบบเชิงเรขาคณิตของผนังบ่อและพื้นบ่อตามที่ระบุไว้ กำหนดไว้ว่าถ้าหากดำเนินการขุดเจาะต่อไปจะเกิดความไม่คุ้มค่า

ธรรมชาติมวลสินแร่ นอกจากมีรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอแล้ว ยังมีการแจกแจงความสมบูรณ์ของปริมาณโลหะในมวลสินแร่ไม่คงที่ด้วย การประเมินผลจากการสำรวจ เช่น การเจาะหลุมเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ผลเชิงเคมี และการใช้ความรู้เชิงสถิติทางธรณีวิทยาเหมืองแร่จะช่วยให้การออกแบบบ่อเหมืองเปิดสุดท้ายมีเสถียรภาพสูงและคุ้มค่าต่อการลงทุน

ดังนั้น การกำหนดรูปแบบเชิงเรขาคณิตของขีดจำกัดขอบบ่อเหมืองสุดท้ายที่ทำให้การขุดเจาะในระดับลึกลงไปจะไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจ จึงมีความหมายอย่างยิ่งต่อองค์กรในการแก้ปัญหาความเสี่ยงต่อการลงทุนพัฒนาเหมืองเปิด ที่ต้องมีทางเลือกของโครงร่างขอบบ่อเหมืองหลายแนวทางเพื่อหาโครงร่างขอบบ่อที่ให้ผลตอบแทนในเชิงเศรษฐกิจสูงสุด แต่การขุดเจาะจำเป็นต้องมีเสถียรภาพที่ดีและมั่นคงปลอดภัยด้วย

การวิเคราะห์ผลที่อธิบายในหัวข้อต่อไป มีตัวแปรในเชิงความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่ทำให้เกิดข้อจำกัดหลายอย่างในการหาค่าผลเฉลยของปัญหาโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย การหาผลเฉลยมักใช้วิธีการวิจัยดำเนินการ (operations research) มาช่วยในการออกแบบจำลองหลัก 4 แบบ คือ

### 1. แบบจำลองตามทฤษฎีกราฟ (graph theory)

2. แบบจำลองด้วยกำหนดการเชิงเส้น (linear programming)
3. แบบจำลองด้วยกำหนดการพลวัต (dynamic programming)
4. แบบจำลองข่ายงาน (network)

## 5.3 เงื่อนไขทั่วไปในการกำหนดโครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิด

เงื่อนไขที่ใช้วิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างขอบเขตสุดท้าย (ultimate boundary) สำหรับเหมืองเปิด (ขอบบ่อหรือแนวการตัดชั้นตะกัก) มีเอกสารงานวิจัยที่นำเสนอไว้เป็นหลายแนวทาง ผู้วิจัยโครงการนี้ได้เลือกวิธีการที่ใช้กำหนดเป็นเงื่อนไขกับการนำเสนอต้นแบบการวิเคราะห์หาผลลัพธ์โครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิด ไว้ในหัวข้อของบทนี้

### 5.3.1 เงื่อนไขกับขีดจำกัดของการออกแบบหาความเหมาะสมที่สุดของเหมืองเปิด

การจำลองแบบในการเปิดหน้างานของแหล่งหินหรือสินแร่ นั้น มีเงื่อนไขกับขีดจำกัดที่ต้องใช้ในการเข้าไปสู่ (approach) วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดในงานหน้าเหมือง ดังต่อไปนี้

1. ขีดจำกัด (limit) ของเหมืองเปิด (open pit) ใช้กับเหมืองที่มีการวางแผนเปิดหน้างานบ่อเหมืองช่วงสั้น หรือใช้ได้เป็นช่วงยาวตลอดอายุของการพัฒนางานหน้าเหมือง

2. ขีดจำกัดนี้ใช้ได้กับการประเมินปริมาณสินแร่ ที่สามารถขุดนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้ (minable) หรือใช้ได้กับการประเมินส่วนวัสดุที่ต้องทิ้ง (waste) เป็นกากหรือต้องเคลื่อนย้ายไปไว้กองในบริเวณอื่น นอกจากนี้ยังใช้กับการกำหนดปริมาณ โลหะ (metal content) ที่คุ้มทุนพอดีกับค่าใช้จ่ายการพัฒนาเปิดหน้างานขุดเจาะ

3. การหาโครงสร้างขอบสุดท้ายของเหมืองเปิด (ultimate pit) จะเท่ากับการกำหนดตัวแทนที่เป็นขนาด (size) รูปแบบเชิงเรขาคณิต (geometry) และตำแหน่ง (location) ของวัสดุที่ใช้เป็นต้นแบบของการคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดที่เป็นเส้น โครงสร้างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย (เมื่อแสดงเป็นภาพตัดขวาง 2 มิติ) ของบ่อเหมืองเปิด หรือเป็นเส้นโครงสร้างขอบบ่อที่แสดงในแผนที่คล้ายกับเส้นชั้นความสูงแผนที่ภูมิประเทศ (เมื่อแสดงเป็นรูปผังภาพ 3 มิติ)



4. วัสดุตัวแทนที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดขีดจำกัดบ่อเหมืองเปิด ต้องอยู่ในบริเวณบ่อเหมืองที่ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์และต้องเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของการจำลองแบบ 2 ประการ

#### ก. ประการแรก

วัสดุตัวแทนแสดงเป็นรูปบล็อก 3 มิติที่มีรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นเมื่อต้องการขุดเจาะเหมือง นั่นคือ การขุดเจาะบล็อกเหล่านี้ที่ประกอบรวมกันเป็นแต่ละส่วนของวัสดุตัวแทน ในการพัฒนาเหมืองเปิดจะไม่มี การขุดเจาะบล็อกหากไม่คุ้มทุนในการนำบล็อกวัสดุขึ้นมาจากบ่อเหมืองเปิด

ตัวแปรค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์หามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) มีหลายตัวแปร ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการเปิดเหมืองปกติ การเปิดหน้าดิน การระเบิดหินที่ปิดกั้นแหล่งสินแร่ การขนย้ายวัสดุที่ขุดคักหน้างานไปยังโรงแต่งแยกแร่ หรือโรงบดย่อยหิน ค่าใช้จ่ายในการบดย่อยหินให้ได้ขนาดมาตรฐาน และค่าใช้จ่ายในการแยกสารเจือปนออกจากสินแร่เพื่อส่งไปยังโรงถลุงโลหะ ราคาซื้อขายแร่ในตลาดที่ยังไม่ได้ถลุง (หรือราคาตลาดของหินบดย่อย) ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการเคลื่อนย้ายวัสดุที่ไม่ต้องการออกเพื่อนำไปทิ้ง หรือเคลื่อนย้ายไปบริเวณอื่นที่ไม่ใช่หน้างานปัจจุบัน

#### ข. ประการที่สอง

ขีดจำกัดที่กำหนดไว้ในหัวข้อนี้ มีจุดประสงค์เพื่ออนุรักษ์ทรัพยากรที่เป็นแหล่งแร่หรือแหล่งหิน นั่นคือ ถ้าหากผลการวิเคราะห์เชิงมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีความคุ้มทุน ก็ควรดำเนินการเปิดหน้าเหมืองไปจนถึงบล็อกสุดท้าย จนกว่าการขุดเจาะบ่อในระดับลึกกว่านี้จะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนอีกต่อไป

ประเด็นสำคัญเรื่องเงื่อนไขกับขีดจำกัดของการขุดเจาะบล็อกสุดท้ายคือ การวิเคราะห์หาตัวเลขมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่มีค่าสูงสุด ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ทราบค่าในขณะนั้น แต่ตัวแปรหลายตัวแปรที่พึ่งพิงกับเวลา ดังนั้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปผลลัพธ์ก็แตกต่างกันไปด้วย ลักษณะการวิเคราะห์จึงเป็นไปในรูปแบบเชิงพลศาสตร์ (dynamics) มากกว่าในรูปแบบเชิงสถิตยศาสตร์ (statics) การออกแบบบ่อเหมืองเปิดจึงไม่สามารถออกแบบเพียงครั้งเดียวและใช้ได้ตลอดไป

### 5.3.2 เกณฑ์สำหรับวิธีการออกแบบโครงสร้างขบบ่อเหมือง

การออกแบบหาโครงสร้างบ่อเหมืองเปิดเป็นเกณฑ์บังคับสำหรับวิศวกรและผู้เกี่ยวข้องและเป็นส่วนหลักของการวางแผนเพื่อพัฒนาหน้างานขุดเจาะ ข้อมูลสารสนเทศในส่วนของคุณลักษณะทางธรณีวิทยาและภูมิประเทศเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบ แต่ข้อมูลเหล่านี้ยังสามารถปรับแก้ให้ทันสมัยได้ตลอดเวลาที่มีการดำเนินงาน

การออกแบบบ่อเหมืองเปิด มีความเกี่ยวข้องในหลายกระบวนการของการพัฒนา เริ่มตั้งแต่มีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจ การสร้างต้นแบบสำหรับแบบจำลองมวลหินหรือมวลสินแร่ การประเมินค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานกับผลตอบแทนเชิงเศรษฐศาสตร์ของความคุ้มทุน การประเมินค่าเชิงเสถียรภาพและการควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการวางแผนจัดลำดับการผลิตและขนย้ายกองวัสดุ เป็นต้น

วิธีการที่ใช้หาผลลัพธ์ที่เป็น โครงร่างขอบบ่อเหมืองมีหลายแนวทาง แต่ถ้าหากจัดเป็นกลุ่มใหญ่ จะแบ่งวิธีการออกแบบ โครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกเป็นการออกแบบที่ใช้เครื่องมืออย่างง่ายโดยผู้ออกแบบเป็นวิศวกรหรือพนักงานผู้ที่เกี่ยวข้อง กลุ่มที่สองเป็นการออกแบบที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยผู้ออกแบบอิงหลักการคำนวณและสมมุติฐานที่ใช้การวิเคราะห์ผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบของทั้งสองกลุ่ม ใช้เงื่อนไขกับกำหนดขีดจำกัดทำนองเดียวกัน ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายสุดท้ายต้องการพัฒนาเปิดหน้าเหมืองที่ให้มูลค่าปัจจุบันของบ่อเหมืองเปิด มีค่าสูงสุด การอธิบายวิธีการ ได้ระบุไว้ในหัวข้อถัดไป

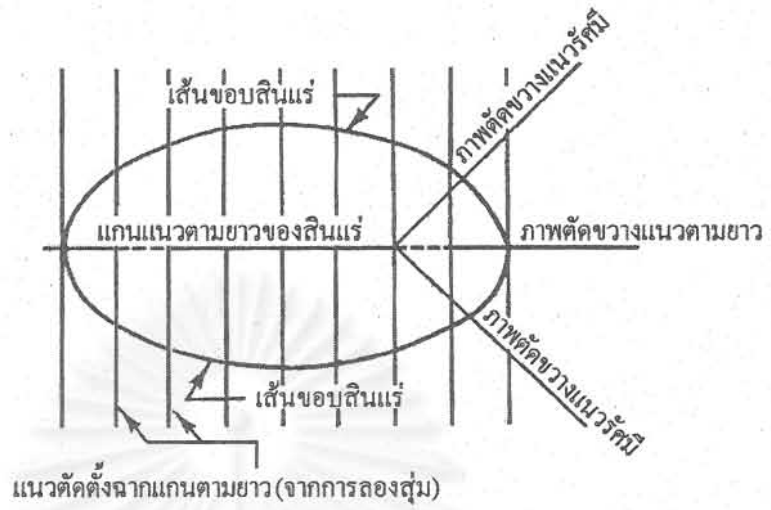
#### 5.4 การออกแบบด้วยมือหรือการออกแบบเชิงหัตถกิจ (manual design)

การออกแบบวิธีนี้ ใช้การวิเคราะห์ด้วยตัวของวิศวกรเองโดยใช้เครื่องมือที่หาได้ง่าย จัดเป็นการออกแบบด้วยมือหรือการออกแบบเชิงหัตถกิจ (manual design) ในการหาของผังบ่อเหมืองจะอาศัยแผนที่ แผนที่ และภาพตัดขวางของบ่อเหมืองเปิดหลายแนว เพื่อประกอบการตัดสินใจในการกำหนดโครงร่างขอบบ่อสุดท้าย

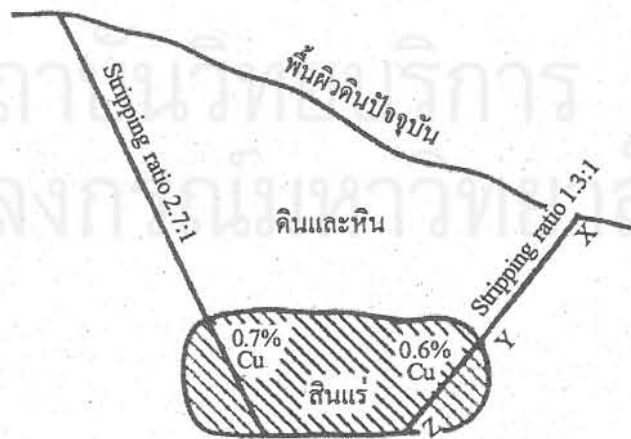
แนวทางวิเคราะห์ที่เป็นแบบอย่างที่ดี เสนอแนะไว้โดย Soderberg and Rausch ดังปรากฏในบทที่ 4.1 ของหัวข้อ Pit Planning and Layout (Pfleider, E. P., Editor (1968), Surface Mining, AIME) ผู้วิจัยได้คัดลอกและสรุปประเด็นหลักของวิธีการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

1. แนวทางการออกแบบเริ่มจากการทำภาพตัดขวางในแนวมุมฉาก (vertical section) ผ่านเส้นขอบสินแร่ (ore line) ของผังภาพมวลสินแร่ที่ทำการวิเคราะห์ จำนวน 3 แนวที่มีทิศทางแตกต่างกันในบริเวณเขตประทานบัตร (ดูรูปที่ 5.1 หน้าถัดไป) ได้แก่

ก. ภาพตัดขวางที่ตัดในแนวทำมุมฉากกับแกนตามยาวของสินแร่บางที่เรียกภาพตัดขวางประเภทนี้ว่า ภาพตัดขวางของการลองสุ่ม (trial cross section) ซึ่งจัดช่วงระยะห่างของแนวเส้นตัดมวลสินแร่ที่ลองสุ่มให้มีระยะห่างเท่ากัน จำนวนของแนวตัดมวลสินแร่ที่ทำการ



รูปที่ 5.1 มวลสินแร่ที่มีผังภาพเป็นรูปวงรีและแสดงแนวภาพตัดขวางทั้ง 3 ประเภท



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างเส้นขอบบ่อเหมือง 2 เส้นที่ปรากฏในภาพตัดขวางที่เลือก

ลองสุ่มให้มีระยะห่างเท่ากัน จำนวนภาพตัดขวางอาจเริ่มตั้งแต่ 10 แนวจนถึง 30 แนว ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างเชิงเรขาคณิตของมวลสินแร่ที่ผู้วิเคราะห์ต้องการทราบข้อมูล

ข. ภาพตัดขวางที่ตัดในแนวรัศมี (radial cross section) เป็นภาพตัดขวางที่ทำมุมกับแนวแกนยาวไม่เป็นมุมฉากและไม่ขนานกับแกนยาวของมวลสินแร่ด้วย ประโยชน์ของภาพตัดขวางประเภทนี้คือ ช่วยในการกำหนดตำแหน่งจุดปลายของเส้นขีดจำกัดขอบบ่อที่ต้องการเปิดเหมือง

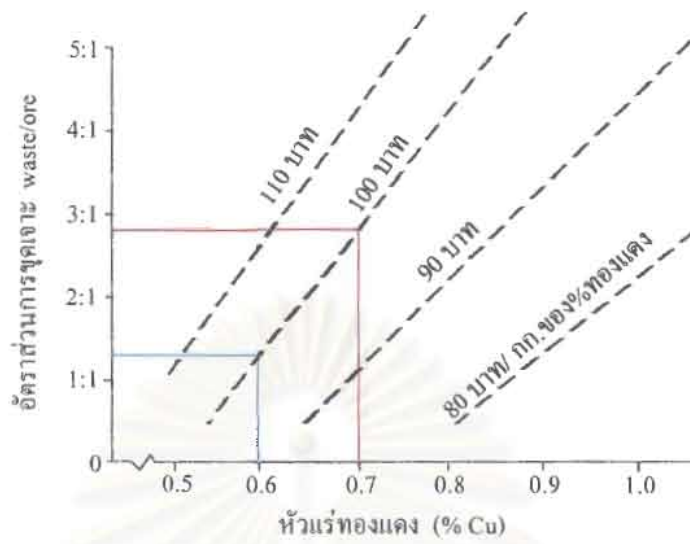
ค. ภาพตัดขวางที่ตัดแนวตามยาว (longitudinal cross section) เป็นภาพตัดขวางที่ตัดขนานกับแกนยาวสุดของผังมวลสินแร่ (มักแสดงเป็นรูปวงรี) ภาพตัดขวางประเภทนี้จึงกำหนดตำแหน่งจุดปลายของเส้นขอบบ่อ 2 เส้น ให้มีระยะห่างกันมากที่สุด ภาพตัดขวางชนิดนี้มิได้เพียงแนวเดียว

วิธีการออกแบบด้วยมือนี้ ปกติใช้ตัวแปรหลักเพียงค่าเดียวในการกำหนดขีดจำกัดขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ได้แก่ ค่าอัตราส่วนของ waste/ore ดังนั้นในแต่ละแนวที่ผู้วิเคราะห์เลือกตัดแนวเส้นแสดงภาพตัดขวางจะเป็นอิสระต่อกัน ภาพตัดขวางที่ปรากฏยังช่วยในการกำหนดมุมความลาดชันทั้งหมด (overall slope angle) ของโครงร่างขอบบ่อเหมืองแนวนั้นด้วย ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบในการวิเคราะห์ผล คือ คุณภาพของสินแร่ที่เป็นค่าเกรด (grade) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของโลหะที่ต้องการถลุง แนวภาพตัดขวางที่มีค่าเกรดสินแร่ดีเพื่อแสดงว่าในแนวนั้นมีความสมบูรณ์สินแร่เพียงพอที่คุ้มทุนต่อการเปิดหน้างาน เพื่อเอาวัสดุที่ไม่ต้องการที่วางทับบนมวลสินแร่ ออก

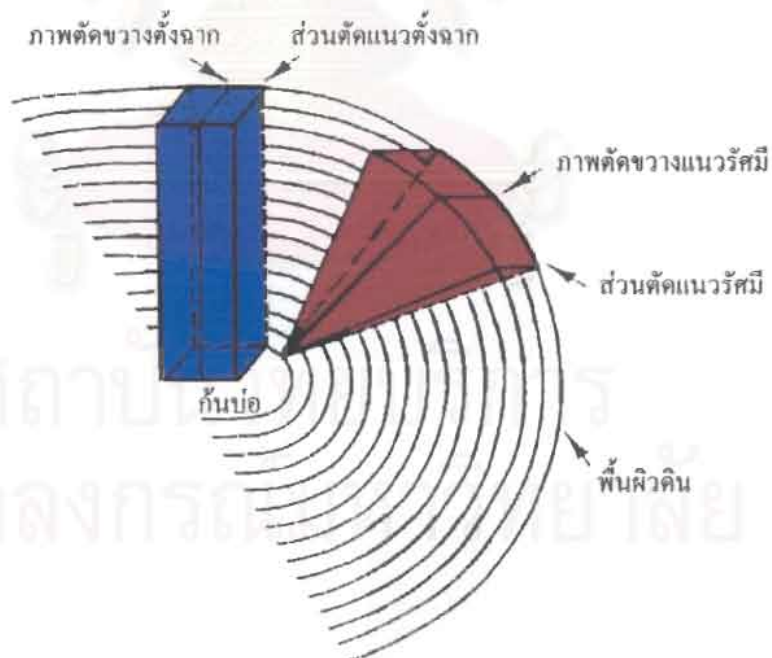
ถ้ากำหนดมาตราส่วนของภาพตัดขวางให้เหมาะสม ก็สามารถทำการวัดและคำนวณค่าอัตราส่วนของ waste/ore จากเส้นขีดจำกัดขอบบ่อ นั่นคือผู้วิเคราะห์ทราบค่าอัตราส่วนที่ต้องการทำการขุดเจาะ (stripping ratio) ในแนวนั้นได้ ดังรูปที่ 5.2

เมื่อวิเคราะห์ภาพตัดขวางหลายแนว ผลลัพธ์อาจเพียงพอที่จะทราบจุดคุ้มทุน (break even) สำหรับการขุดเจาะ ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการลองสุ่มให้ได้ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนที่ต้องการขุดเจาะกับเส้นขอบบ่อเหมืองที่กำหนด ถ้าค่าอัตราส่วน waste/ore น้อยกว่าค่าอัตราส่วนของการขุดเจาะที่คุ้มทุน โครงร่างขอบบ่อเหมืองในเขตประทานบัตรก็เปิดขยายออกไปได้ ถ้าค่าอัตราส่วน waste/ore มากกว่าค่าอัตราส่วนของการขุดเจาะที่คุ้มทุน โครงร่างขอบบ่อเหมืองในเขตประทานบัตรก็ควรย่อขนาดให้เล็กลงมา กระบวนการนี้ควรทำซ้ำเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าอัตราส่วนของจุดคุ้มทุนที่เหมาะสมที่สุด

จากสารสนเทศของเหมืองค่าเปอร์เซ็นต์เกรดที่เส้นขอบด้านขวาภาพตัดขวางในรูปที่ 5.2 ระบุผลการวิเคราะห์ไว้ที่ค่า 0.6% Cu สมมติว่า ราคาซื้อขายที่หน้าเหมืองขณะนั้น



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราส่วน waste/ore กับราคาซื้อขาย หน้าเหมืองตามเปอร์เซ็นต์เกรดสินแร่ทองแดง (copper ore grade)

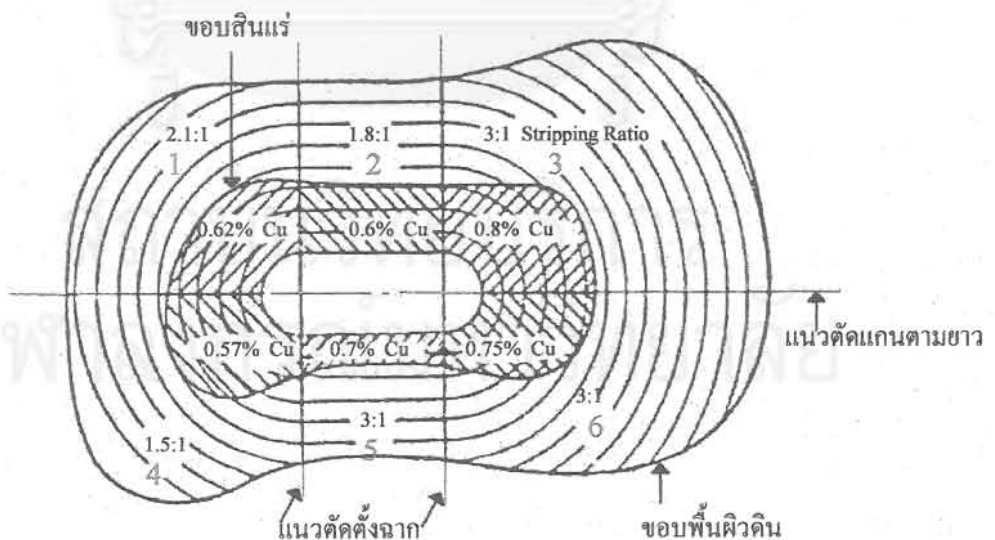


รูปที่ 5.4 ภาพสเก็ทซ์แสดงส่วนต่างๆ ของภาพตัดขวางแนวตั้งที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบบ่อเหมืองเปิด ( จาก D. Armstrong (1990), Surface Mining: 2nd Edition, Vol. 1, p. 466)



โลหะทองแดง 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 100 บาท ค่าอัตราส่วน break even ของการขุดเจาะทางเส้นขอบด้านซ้ายของภาพตัดขวางรูปที่ 5.3 ระบุผลการวิเคราะห์ไว้เป็น 0.7% Cu เมื่ออ่านจากกราฟมีค่าอัตราส่วนการขุดเจาะที่ 2.7:1 วิธีการวิเคราะห์ด้วยมือแบบนี้ มีความแปรปรวนเกิดขึ้นตลอดเวลาตามเปอร์เซ็นต์ความสมบูรณ์ของสินแร่ โครงร่างของขอบบ่อที่ได้จากแนวภาพตัดขวางตามยาวจะมีเส้นกราฟเพียงเส้นเดียว แต่ในแนวภาพตัดขวางที่ตัดฉากกับมวลสินแร่ เส้นกราฟจะมีได้หลายเส้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแนวเส้นที่ตัด ในขณะที่แนวเส้นภาพตัดขวางตามรัศมี จะก่อให้เกิดการแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้างตรงพื้นผิวดินของขอบบ่อ แต่เกิดการตีบเล็กลงตรงฐานของขอบบ่อ ดังแสดงไว้เป็นภาพสเก็ชไว้ในรูปที่ 5.4 ค่าอัตราส่วนการขุดเจาะระหว่าง waste/ore ที่อิงตามภาพตัดขวางในแนวรัศมีจึงต้องมีการปรับค่าให้เหมาะสมก่อนจะกำหนดเส้น โครงร่างขอบบ่อในบริเวณนี้

ขั้นตอนต่อไปที่จะต้องวิเคราะห์ก่อนนำมาใช้งาน คือ การย้าย (transfer) เส้น โครงร่างขอบบ่อของแต่ละแนวตัดขวาง ลงไปยังแต่ละส่วนของแผนที่ที่แสดงเป็นผังภาพของแหล่งสินแร่ (ดูรูปที่ 5.5) ผลเฉลยของผังภาพแหล่งสินแร่มีรูปแบบที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ (irregular) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปรับค่าอัตราส่วนของแต่ละบริเวณส่วนวง (sector) ของผังภาพแหล่งสินแร่ทั้งหมด ให้เหมาะสมกับค่าอัตราส่วนการขุดเจาะของ waste/ore ผังภาพบ่อเหมืองที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ถูกใช้เป็นตัวแบบที่ใช้ในการออกแบบแนวถนนสำหรับการขนส่งลำเลียง กับการออกแบบมุมการตัดทางลาด (ramp) ที่เชื่อมระหว่างชั้นตะพักแต่ละชั้นที่มีความลึกจากพื้นผิวดินของโครงร่างขอบบ่อเหมืองแตกต่างกัน



รูปที่ 5.5 ผังภาพขอบบ่อเหมืองที่เกิดจากการปรับเรียบเส้นโค้งแล้ว ในผังแสดงค่าอัตราส่วนการขุดเจาะระหว่าง waste/ore ที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละบริเวณส่วนวงของผังภาพ

## 5.5 การออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์เริ่มมีบทบาทในการออกแบบโครงร่างสุดท้ายของขอบบ่อเหมืองเปิดเมื่อประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา (Kim, 1978) เทคนิคที่ใช้เป็นพื้นฐานในการเขียนขั้นตอนวิธี (algorithm) ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาโครงร่างหรือค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นเทคนิคของ Lerchs-Grossmann ที่มีการเผยแพร่ไว้ใน Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin (1965)

ข้อเด่นที่เป็นประโยชน์หลักในการใช้คอมพิวเตอร์ ได้แก่ ความสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์ผลเพื่อหาตัวเลขมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value) ที่เป็นค่าสูงสุด คอมพิวเตอร์ยังช่วยคำนวณค่าจากสมการหรือค่าจากเมทริกซ์ (matrix) ที่ยุ่งยากสลับซับซ้อนได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าการคำนวณด้วยมือ การปรับแต่งเส้นโค้งของผังโครงร่างขอบบ่อเหมืองสามารถใช้คอมพิวเตอร์ทำปฏิบัติการได้อย่างรวดเร็ว

รายละเอียดของการออกแบบโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วย มีหลายรูปแบบและหลายขั้นตอนวิธี ซึ่งผู้วิจัยได้คัดเลือกและนำเสนอไว้ในบทความนี้เพราะมีเนื้อหาค่อนข้างยาว วิธีการที่ถูกคัดเลือกมานี้มีตั้งแต่การออกแบบในขั้นตอนวิธีที่ไม่ยุ่งยาก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนสมมติฐานและแก้ไขมาให้ใช้ได้กับเหมืองเปิดในประเทศได้อย่างค่อนข้างง่าย ไปจนถึงการออกแบบในปัจจุบันที่เน้นถึงมิติที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากขึ้นและมีเงื่อนไขบังคับ (constraint) หลายรูปแบบ การปรับแก้จะค่อนข้างยาก แต่มีประโยชน์ที่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำใกล้เคียงกับการปฏิบัติจริงในภาคสนาม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ขั้นตอนวิธีการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์

การบรรยายในหัวข้อนี้เป็นการระบุในเชิงรายละเอียดของวิธีการแก้ปัญหา เพื่อช่วยกำหนดขีดจำกัดบ่อเหมืองเปิด เนื่องจากการออกแบบด้วยมืออาจไม่สะดวกในหลายประการ การประยุกต์คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบในหน้าเหมือง 2 มิติ หรือ 3 มิติ เริ่มมีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน

#### 6.1 ขั้นตอนวิธีทั่วไปสำหรับการออกแบบบ่อเหมืองเปิดด้วยคอมพิวเตอร์

การบรรยายกลยุทธ์การออกแบบ (design approach) ในหัวข้อถัดไปของบทนี้ มีการแสดงความจำเป็นมาของปัญหา แนวคิดของการเริ่มต้นทำการวิเคราะห์หาผลเฉลยการบรรยาย ขั้นตอนวิธี (algorithm) เริ่มใช้กับรูปแบบหน้าเหมือง 2 มิติก่อน จากนั้นจึงเพิ่มลำดับความยากขึ้นเป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบใกล้เคียงกับ 3 มิติ (ผู้วิจัยบางท่านจัดเป็น 2 1/2 มิติ) และจนถึงแนวทางการวิเคราะห์ที่นำเสนอในปัจจุบันที่ใช้ความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง 2 มิติกับ 3 มิติ

ทีมงานผู้วิจัยในโครงการนี้ ได้ค้นคว้าแนวคิดที่เผยแพร่ในวารสารต่างประเทศ เอกสารรายงานหรือผลการวิจัยขององค์กรเช่น U.S. Bureau of Mines; Institution of Mining and Metallurgy, London; Institute of Mining Engineering, Berlin รวมทั้งวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก เอกสารในการสัมมนาที่เป็น Proceedings ของการประชุมเสนอผลงานวิจัยนานาชาติ และเอกสารที่จัดทำเป็นรูปเล่มเฉพาะเนื้อเรื่องสำคัญที่ใช้ในการออกแบบบ่อเหมืองเปิด เช่น Open Pit Mine Planning and Design (The Society of Mining Engineers, AIME); Mineral Resource Evaluation (The Geological Society, London); Open Pit Mine Planning and Design (W. Hustrulid and M. Kuchta); Open Pit Mine Design Models (E.A. Wright) เป็นต้น

ขั้นตอนวิธีที่บรรยายในหัวข้อถัดไป พยายามแสดงถึงแนววิธีการแก้ปัญหาที่จะบรรลุถึงวิธีการประเมินผลตอบแทนที่เป็นจำนวนเงินรับสูงสุด ซึ่งต้องการให้เกิดความสัมพันธ์ทั้งระบบที่ต่อเนื่อง ตั้งแต่ขนาดของหน้าเหมือง ลำดับขั้นตอนการผลิตกับการเลือกใช้เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์การตัดขุดเจาะหรือการระเบิด เส้นทางขนส่งถ้ำเลียงและสถานที่เก็บหรือลานกองสิน

แร่และกาก การขนวัสดุเทใส่ปากโม้ หรือขนส่งวัสดุไปยังสต็อกของโรงแต่งแร่ ตลอดจน การออกแบบเชิงเสถียรภาพ แผนการควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการป้องกันอุบัติเหตุ และการวิเคราะห์ผลตอบแทนล่วงหน้าเพื่อป้องกันความเสี่ยงจากการลงทุน

## 6.2 วิธี Lerchs-Grossmann

ในระยะเวลาปัจจุบันแบบจำลองของ Lerchs and Grossmann (1965) ได้ถูกปรับปรุง และดัดแปลงให้สามารถใช้โปรแกรมพลวัต (dynamic programming) วิเคราะห์ผลได้ ขั้นตอนวิธีที่ปรับปรุงจากแบบจำลองดั้งเดิม เรียกชื่อสั้นๆ ว่า แบบจำลอง DP (DP model)

### 6.2.1 หลักการทั่วไปของวิธี Lerchs-Grossmann

แนวทางที่ใช้แบบจำลอง DP ในการออกแบบบ่อเหมืองเปิดนี้ เริ่มต้นจากการใช้บล็อก ดินแบบที่กำหนดค่าเชิงเศรษฐกิจ (economic block value) การระบุค่าความลาดชันของหน้า เหมืองจะมีความสัมพันธ์กับค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ (stripping cost) ปกติกำหนดอัตราส่วน ของความลาดชันให้คงที่ที่อัตราส่วน 1 : 1 นั่นคือ

$$NV_{st} = \text{Block tonnage} \times \text{Stripping cost}_{st} \quad (\text{Monetary units/st}) \quad (6.1)$$

นิยามของพจน์  $NV_{st}$  เป็นมูลค่าสุทธิ (net value) ในการขุดเจาะนำสินแร่ (ore) กับส่วนที่ ไม่ต้องการและไม่เป็นสินแร่ (waste) ออกจากบ่อเหมืองเปิด พจน์นี้มีหน่วยเป็นสกุลเงินของ ประเทศนั้น

ส่วน block tonnage เป็นค่าน้ำหนักเป็นตันของสินแร่หรือส่วนที่ไม่ต้องการ

ค่า stripping cost เป็นค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ ซึ่งเป็นผลรวมของค่าใช้จ่ายในการเจาะ การระเบิด กกับการขนย้ายวัสดุ และค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมอื่นๆ ที่มีผลจากนำวัสดุออกจากบ่อเหมือง ไปยังลานห่อมทิ้งวัสดุ หรือนำวัสดุไปยังโรงโม่บดข่อย พจน์ของ stripping cost หน่วยเป็น สกุลเงินต่อน้ำหนักมวลวัสดุ เป็นต้น

ขั้นตอนวิธีของ Lerchs-Grossmann ในการวิเคราะห์แบบจำลองภาพตัดแนวตั้งของ บล็อก เริ่มต้นจากกำหนดให้มีมูลค่าของบล็อก (block column) แสดงสัญลักษณ์เป็น  $M_{i,j}$  (รูปที่ 6.1) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{i,j} = \sum_{n=0}^i m_{n,j}, \quad \text{for } j = 1, 2, \dots \quad (6.2)$$

		j →							
		0	1	2	3	4	5	6	7
i ↓	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	1	-1 (-1)	-1 (-1)	-1 (-1)	-1 (-1)	-1 (-1)	-1 (-1)	-1 (-1)	
	2			1 (0)	-1 (-2)	1 (0)	-1 (-2)		
	3				3 (1)	4 (4)			

รูปที่ 6.1 ตัวอย่างการระบุค่าพจน์ตัวแปรของสมการที่ 6.1 ลงในบล็อกที่วิเคราะห์ผล

กำหนดให้พจน์  $P_{ij}$  เป็นมูลค่าเหมาะสมที่สุด (optimal value) ที่เป็นผลจากการทำเหมืองโดยขุดเจาะบ่อเหมืองในระดับชั้นของบล็อก  $b_{ij}$  กับขุดเจาะในระดับชั้นที่ต่ำกว่าแสดงเป็นนิพจน์ในเชิงตรรกศาสตร์ (logic expression) คือ

$$P_{i,j} = M_{i,j} + \max \begin{cases} P_{i-1,j-1} \\ P_{i,j-1} \\ P_{i+1,j-1} \end{cases} \quad (6.3)$$

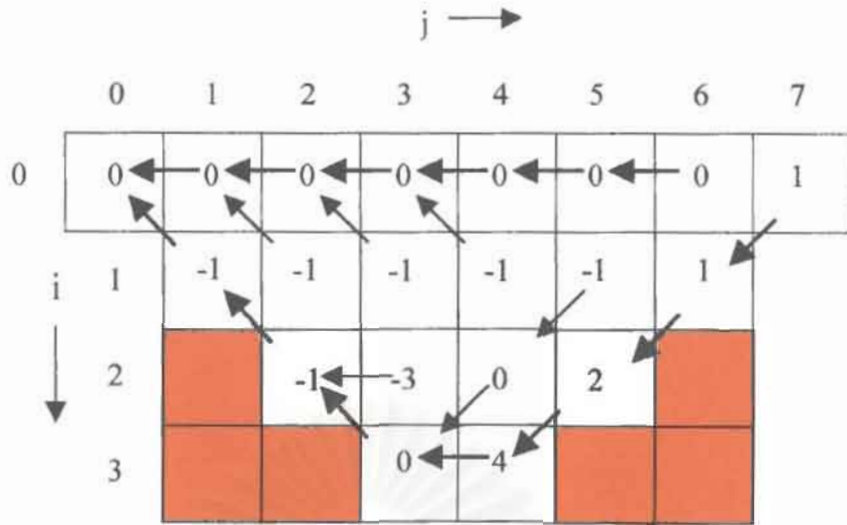
จากการตรวจสอบสมการที่ 6.2 กับ 6.3 พบว่า เป็นสมการแบบเวียนเกิดซ้ำ (recursion) ที่ให้ความสัมพันธ์กับบล็อกใดก็ได้ในภาพตัดขวางแนวตั้ง ดังนั้นจึงมีโอกาสของความเป็นไปได้ที่จะใช้สมการที่ 6.3 กำหนดค่าขอบบ่อเหมืองเปิดในภาวะที่ยินยอมได้ (permissible pit boundaries) เพื่อให้ได้รูปแบบของบ่อเหมืองในช่วงการวางแผน

### 6.2.2 กระบวนการในการหาผลรวมที่เหมาะสมที่สุดของบล็อก

การวิเคราะห์เริ่มตั้งต้นจากการหาผลรวมสะสม (cumulative sum) จากตำแหน่งสุบลายยอดของภาพตัดขวาง เช่น เริ่มต้นที่บล็อก  $b_{0,0}$  และหามูลค่าตัวแปร  $P_{ij}$  (จากสมการที่ 6.3) ตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

- ระดับชั้นต่อระดับชั้น (level-by-level) ของแต่ละคอลัมน์
- คอลัมน์ต่อคอลัมน์ (column-by-column) ของแต่ละแนวตัดขวาง





รูปที่ 6.2 การหามูลค่าบล็อกของ  $P_{ij}$  ที่ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติสทงไปด้านหน้า

แนวทศทางที่หาผลรวมสะสม (จากรูปที่ 6.2) ใช้แนวหัวลูกศรแสดงการหาค่าผลรวม เริ่มจากขวาไปซ้าย ในลักษณะที่แนวทศทางวิเคราะห์เดินไปข้างหน้า (forward pass) ยกตัวอย่าง บล็อก  $b_{2,4}$  (มีค่าเริ่มต้นที่ศูนย์) จะมีโอกาสความเป็นไปได้มูลค่าตัวเลขผลรวมสะสม 3 ค่า ตามแนวทางที่หัวลูกศรชี้ไปยังบล็อก  $b_{1,3}$ ,  $b_{2,3}$  และ  $b_{3,3}$  ทำให้ได้ค่าตัวแปร  $P_{ij}$  ที่เขียนเป็นสมการใหม่ ดังนี้

$$P_{2,4} = 0 + \max \begin{cases} -1 \\ -3 \\ 0 \leftarrow \end{cases} \quad (6.4)$$

นั่นคือ  $P_{2,4} = 0 + 0 = 0$  (ศูนย์) เมื่อพิจารณาตัวเลขมูลค่าผลรวมสะสมดังกล่าว ทำให้เลือกบล็อก  $b_{3,3}$  ที่เป็นมูลค่าสูงสุดของสมการที่ 6.4 หรือแสดงไว้เป็นหัวลูกศรในรูปที่ 6.2 จากบล็อก  $b_{2,4}$  ถึงบล็อก  $b_{3,3}$  สิ่งหนึ่งที่ขังไม่สามารถตัดสินใจได้ในขั้นตอนนี้ว่าบล็อก  $b_{2,4}$  ควรระบุให้เป็นแนวขอบบ่อเหมืองสุดท้ายได้หรือยัง เพราะในสภาพความเป็นจริงก็คือ ถ้าหากบล็อก  $b_{2,4}$  เป็นโครงร่างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบ่อเหมืองเปิด การขุดเจาะเพื่อการพัฒนาในบ่อเหมืองร่วมกับบล็อก  $b_{3,3}$  สมควรต้องให้ผลลัพธ์เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิในเชิงเศรษฐศาสตร์สูงสุด

### 6.2.3 ตัวอย่างการประเมินโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มเติม

วิธี Lerchs-Grossmann ที่นำเสนอครั้งแรก เป็นการวิเคราะห์เชิง 2 มิติ ใช้ภาพตัดขวางแนวคิงผ่านแหล่งมวลสินแร่ในบริเวณที่จะเปิดทำเหมือง ข้อสมมุติเบื้องต้นของตัวอย่างในหัวข้อข้อยนี้ ให้กลุ่มบล็อกจัดรัสที่แทนมวลสินแร่อยู่ในระนาบ x-y มี 7 แถว และ 11 คอลัมน์

ผลรวมจำนวนบล็อกรวมในกลุ่มคือ 77 บล็อก ตัวเลขด้านขอบนอกของบล็อกมี 2 แนวแกน ตัวเลขในแนวแกนตั้งเป็นการระบุค่าของแถว (row) ของกลุ่มบล็อก ตัวเลขในแนวแกนนอนเป็นการระบุค่าของคอลัมน์ (column) สำหรับกลุ่มบล็อก

กรณีของตัวเลขที่ระบุในกรอบบล็อกเป็นการแสดงมูลค่าสุทธิ (net value) หน่วยเป็นร้อยบาท ( $10^2$  บาท) เมื่อเริ่มดำเนินการขุดเจาะในบ่อเหมือง ตัวเลขที่เป็นมูลค่าสุทธิของแต่ละบล็อกจะไม่พึ่งพิงกัน ในรูปที่ 6.3 กำหนดให้บล็อกใดที่มีมูลค่าสุทธิเป็นบวกจะถูกระบายสีไว้เพื่อให้สังเกตเห็นได้ง่าย จำนวนบล็อกที่มีมูลค่าสุทธิเป็นบวกมี 10 บล็อก การจัดรูปแบบการวิเคราะห์ค่าผลลัพธ์ต้องการให้มีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงในแนวด้านข้าง (sideway) ได้เพียง 1 บล็อก ขั้นตอนสำคัญคล้ายคลึงกับที่ระบุในหัวข้อ 6.2.2 ดังมีรายละเอียดดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ทำการบวกมูลค่าของบล็อกลงไปในระดับล่างสำหรับแต่ละกลุ่มบล็อกในแนวตั้ง (ของแต่ละคอลัมน์) ดังนั้นเมื่อทำอย่างมีระบบจะได้ตัวเลขในบล็อกด้านบนของคอลัมน์เดียวกัน ที่อยู่ในรูปที่ 6.4 เป็นตัวเลขมูลค่าสะสม (cumulative value) ของการนำบล็อกวัสดุขึ้นมาบนพื้นผิวดิน

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	- 2	- 2	- 4	- 2	- 2	- 1	- 2	- 3	- 4	- 4	- 3
2	- 5	- 4	- 6	- 3	- 2	- 2	- 3	- 2	- 4	- 5	- 5
3	- 6	- 5	- 7	6	13	- 2	- 5	- 4	- 7	- 4	- 6
4	- 6	- 6	- 8	- 8	17	8	5	- 6	- 8	- 9	- 7
5	- 7	- 7	- 8	- 8	6	21	5	- 8	- 8	- 9	- 7
6	- 7	- 9	- 9	- 8	- 5	22	- 8	- 8	- 8	- 9	- 8
7	- 8	- 9	- 9	- 9	- 8	10	- 9	- 9	- 9	- 9	- 9

รูปที่ 6.3 ภาพตัดขวางแนวตั้งของกลุ่มบล็อกที่ใช้เป็นตัวอย่างวิเคราะห์ผลลัพธ์

**ขั้นตอนที่ 2** เริ่มต้นตรวจสอบจากบล็อกด้านบนสุดที่อยู่ทางขวา และขยับไปเรื่อย ๆ ตามแนวของแต่ละคอลัมน์ที่อยู่ถัดไป ทำการใส่หัวลูกศรตามแนวที่เลือก จุดปลายหัวลูกศรจากตัวเลขในบล็อกหนึ่งชี้ไปยังตัวเลขมูลค่าสูงสุดที่มีโอกาสเป็นไปได้ 3 แนว แนวใดแนวหนึ่ง ดังนี้

- แนวที่ 1 หัวลูกศรชี้ไปยังบล็อก 1 บล็อก ที่อยู่ถัดไปทางซ้ายและอยู่แถวด้านบน
- แนวที่ 2 หัวลูกศรชี้ไปยังบล็อกที่อยู่ถัดไปทางซ้าย 1 บล็อก และอยู่แถวเดียวกัน

— แนวที่ 3 หัวลูกศรชี้ไปยังบล็อก 1 บล็อก ที่อยู่ถัดไปทางซ้ายและอยู่แถวด้านล่าง ต่อมาหาผลรวมที่เป็นมูลค่าสุทธิทั้งหมด (total net value) จากบล็อกที่อยู่ในแนวทิศทาง หัวลูกศรชี้มา ในภาพตัดขวางของรูปที่ 6.4 มีบล็อกหลายบล็อกที่มีเครื่องหมาย X แสดงว่ามูลค่าสุทธิทั้งหมด มีค่าไม่เพียงพอหรือไม่คุ้มทุนที่จะขุดเจาะเพื่อนำสินแร่ออกในสภาวะปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 3 ทำการกราดตรวจ (scan) แถวบนสุด (top row) เพื่อหามูลค่าสูงสุดที่เป็นค่าตัวแทนในแถว หรือเป็นตัวเลขมูลค่าที่มีโอกาสเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างในรูปที่ 6.5 กำหนดให้โครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดมีมูลค่าเป็น  $13 \times 10^2$  บาท ถึงแม้ว่าบล็อก  $b_{6,6}$  ที่อยู่ในแถวที่ 6 คอลัมน์ที่ 6 มีมูลค่าสุทธิสูงสุดที่  $22 \times 10^2$  บาท แต่ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งบล็อกที่จะทำเหมือง เพราะอยู่ในแถวที่ลึกกว่าโครงร่างขอบบ่อเหมืองปัจจุบัน หากต้องการขุดเจาะให้ได้ถึงบล็อก  $b_{6,6}$  จะให้ผลลัพธ์ที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำกว่าโครงร่างเดิมของขอบบ่อที่ได้ประมาณการไว้ในครั้งแรก

## 6.3 วิธีการยกเคลื่อนที่หรือกรวยลอย (Floating Cone)

วิธีการหาความเหมาะสมที่สุดอีกแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เป็นวิธีการใช้รูปกรวย (cone) แสดงแนวขอบบ่อเปิดเหมือง เนื่องจากรูปกรวยนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ จึงเรียกวิธีการลอยนี้ว่า floating cone

### 6.3.1 แนวคิดของเรื่องกรวยเคลื่อนที่

แนวคิดของวิธีการยกเคลื่อนที่หรือเรียกว่ากรวยลอยนี้จะกำหนดบล็อก 1 บล็อก (หรือกลุ่มของบล็อก) ที่อยู่ระดับต่ำสุดเป็นฐานของกรวยก่อน (ดูรูปที่ 6.6) จากนั้นก็ทำการฉายเส้น (projected line) ไปยังด้านบนจนถึงบล็อกที่จะทำเหมืองแถวแรก เนื่องจากการฉายเส้นนี้ เป็นการขยายแนวเอียงของเส้นออกจากฐาน (ที่เป็นบล็อกเดี่ยว หรือกลุ่มของบล็อก) จึงทำให้มีรูปทรงเป็นกรวย และมุมลาดชันโดยรวม (overall inclined angle) ของขอบกรวยถูกใช้เป็นตัวแบบในการตัดมุมความชันหน้างานเหมือง (slope angle) ของแต่ละระดับขั้นตะพัก (bench)

วิธีการประเมินตัวเลขมูลค่าสุทธิทั้งหมด (total net value) ของการขุดเจาะเหมืองรูปกรวยหาได้จากทุกบล็อกที่อยู่ในกรวย (และบล็อกเหล่านี้ยังไม่ได้เริ่มทำการขุดเจาะ) บล็อกทุกอันจะมีการแสดงผลลัพธ์ที่เป็นจำนวนเงินรับทั้งหมด (revenue) ที่ได้จากการขุดเจาะสินแร่ เมื่อหักค่าใช้จ่ายในการพัฒนาหน้างาน (เช่นการเปิดหน้าดิน การระเบิดหินและการขนย้ายวัสดุ) ออกไปแล้ว

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-2	-2	-4	-2	-2	-1	-2	-3	-4	-4	-3
2	-7	-6	-10	-5	-4	-3	-5	-5	-8	-9	-8
3	-13	-11	-17	1	9	-5	-10	-9	-15	-13	-14
4	-19	-17	-25	-7	26	3	-5	-15	-23	-22	-21
5	-26	-24	-33	-15	32	24	0	-23	-31	-31	-28
6	-33	-33	-42	-23	27	46	-8	-31	-39	-40	-36
7	-41	-42	-51	-32	19	56	-17	-40	-48	-49	-45

รูปที่ 6.4 กระบวนการค้นหามูลค่าสุทธิตามขั้นตอนวิธีของ Lerchs-Grossmann

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-2	-2	-4	-2	-2	-1	-2	-3	-4	-4	-3
2	-5	-4	-6	-3	-2	-2	-3	-2	-4	-5	-5
3	-6	-5	-7	6	13	-2	-5	-4	-7	-4	-6
4	-6	-6	-8	-8	17	8	5	-6	-8	-9	-7
5	-7	-7	-8	-8	6	21	5	-8	-8	-9	-7
6	-7	-9	-9	-8	-5	22	-8	-8	-8	-9	-8
7	-8	-9	-9	-9	-8	10	-9	-9	-9	-9	-9

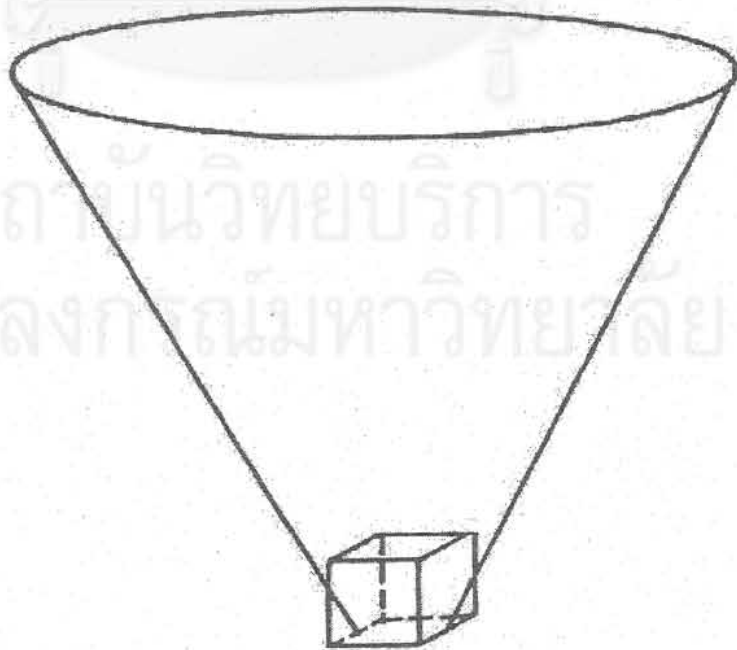
รูปที่ 6.5 โครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด และให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด



ถ้าจำนวนเงินรับทั้งหมด สูงกว่า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการขุดเจาะทำเหมือง ที่เป็น บล็อกตัวแทนวัสดุในกรวย กรวยลอยที่สมมุตินี้มีค่าตัวเลขสุทธิทั้งหมดเป็นบวก แสดงว่ามีความคุ้มทุนที่จะทำเหมือง แนวทางต่อมาจึงทำการเปลี่ยนรูปแบบของพื้นผิวภูมิประเทศ (surface topography) เพื่อให้สอดคล้องและมีความเป็นไปได้กับการจำลองแบบเพื่อทำเหมืองรูปกรวย แต่ถ้าไม่มีความคุ้มทุนก็ไม่ต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของพื้นผิวภูมิประเทศ

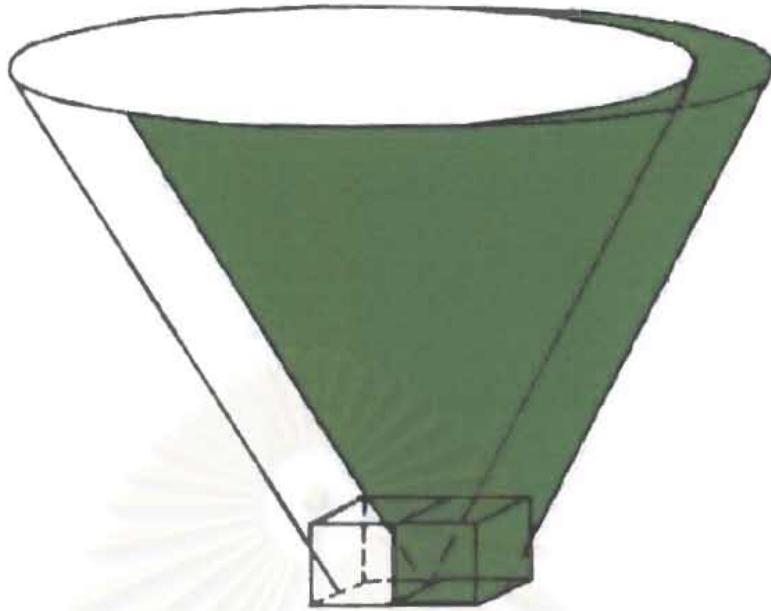
กระบวนการประเมินผลควรมีการทำปฏิบัติการซ้ำ โดยสมมุติบล็อก (หรือกลุ่มบล็อก) ที่เป็นฐานกรวยใหม่ จากนั้นทำการฉายเส้นจากฐานบล็อกอันที่สอง (ดูรูปที่ 6.7 ที่แสดงเป็นกรวยที่ถูกแรเงา) แต่ให้ครอบคลุมกับบางส่วนของกรวยรูปแรกด้วย อย่างไรก็ตามบล็อกที่ถูกแรเงากับเป็นบล็อกอยู่ในโครงร่างกรวยที่สองเท่านั้นที่จะถูกนำมารวมค่าเพื่อประเมินผล การจำลองแบบเป็นกรวยนี้มีขนาดใหญ่ ใช้การคำนวณค่าที่เปลืองเวลานานมาก

วิธี floating cone นี้ ผลลัพธ์ของการออกแบบที่ได้ยังพึ่งพิงกับรูปแบบของบล็อกที่เป็นฐานอีกด้วย บางทีเมื่อทำการวิเคราะห์ครั้งแรกบล็อกที่อยู่ระดับบน (ความลึกน้อย) ของกรวยไม่คุ้มทุนในการทำเหมือง แต่เมื่อมีการมีปรับวิธีขุดเจาะที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะเดิม เช่น นำ waste ที่คลุมทับบล็อกแร่ออก อาจมีผลให้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิคุ้มทุนได้ ในทำนองเดียวกันผู้ออกแบบอาจมีการลดขนาดปริมาตรของกรวยให้เล็กลงเพื่อช่วยลดลำดับขั้นตอนของการขุดเจาะกรวยขนาดใหญ่



รูปที่ 6.6 รูปแบบทรงกรวยที่เกิดจากการฉายเส้นจากตำแหน่งฐานของบล็อก





รูปที่ 6.7 กระบวนการทำซ้ำ โดยการฉายเส้นจากฐานบล็อกที่สองที่กรวย ถูกแรงาและครอบคลุมบางส่วนของกรวยอันแรก

### 6.3.2 หลักการพื้นฐานเทคนิคกรวยเคลื่อนที่

เทคนิคพื้นฐานที่ใช้อธิบายวิธีกรวยเคลื่อนที่ เมื่อระบุข้อมูลลงในบล็อกจัตุรัส 2 มิติ แสดงเป็นภาพหน้าตัดแนวดิ่งของแบบจำลอง ของรูปที่ 6.8 ในรูป 6.8 นี้มุมความลาดชัน แสดงเป็นรูปบล็อกค่อบล็อก มุมความลาดชันทางด้านซ้ายไม่เท่ากับมุมความลาดชันทางด้านขวา เครื่องหมายที่แสดงบล็อกสินแร่ที่เป็นฐาน และอยู่ที่ระดับต่ำสุด ใช้เครื่องหมายเป็นอักษร O (โอใหญ่) ส่วนเป็นบล็อกสินแร่ที่อยู่ในระดับบนใช้เป็นอักษร o (โอเล็ก) จำนวนของกรอบของกรวยที่แสดง โครงร่างขอบเขตไว้ในรูปนี้เป็น กรวยกลับหัว (inverted cone)

		o	o	o	o	o	o	o	o	o	
			o	o	o	o	o	o			
				o	o	o	o				
					O						

รูปที่ 6.8 ภาพตัดขวางกลุ่มบล็อกรูปกรวยกลับหัว ที่มีค่ามุมลาดชัน 45 องศา (ทางด้านซ้าย) กับมีมุมความลาดชัน 26.6 องศา (ทางด้านขวา)

เมื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดมา จำนวนกรวยที่น้อยที่สุดที่สามารถจะนำออกมาได้มีความพึงพิงหรือไม่อิสระ(dependent) กับค่ามุมความลาดชันของแต่ละชนิดของวัสดุ (มวลสินแร่หรือมวลหิน) ค่าความน่าจะเป็นของตัวเลขอัตราส่วนเป็นไปได้ ตั้งแต่ 1 : 1 (มุมความชัน 45 องศา) จนถึง 1 : 2 (มุมความชัน 26.6 องศา)

ขั้นตอนของการวิเคราะห์กรวยเคลื่อนที่อย่างง่าย มีชื่อเฉพาะเรียกว่า positive moving cone technique เป็นการจำลองแบบเพื่อหาจำนวนกรวยเคลื่อนที่น้อยที่สุดมีขั้นตอนพื้นฐานดังนี้

1. เริ่มต้นจากบริเวณพื้นผิวดินและระบุบล็อกที่เป็นสินแร่ (หรือบล็อกที่มีคุณค่าเชิงเศรษฐกิจ) จากนั้นกำหนดมูลค่าเป็นตัวเลขเครื่องหมายบวก
2. กำหนดกรวยที่จะถูกขุดเจาะออกจากบ่อเหมือง ค่าที่กำหนดนี้เป็นค่าน้อยที่สุดที่จะนำบล็อกสินแร่ออก
3. ถ้าหากตัวเลขค่าผลรวมของบล็อกเชิงเศรษฐกิจ หรือใช้เป็นอักษรว่า BEV (block economic values) ที่อยู่ในขอบกรวย มีค่าเป็นบวก (positive) แสดงว่าในขั้นตอนการทำเหมืองกรวยนี้สามารถขุดออกได้ผลตอบแทนคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ
4. ในกระบวนการคำนวณมีการตรวจสอบต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะครบทุกบล็อกที่เป็นบล็อกสินแร่
5. โครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย เกิดจากกรวยที่ถูกขุดออกไปจากภาพตัดขวางเดิม

### 6.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์อย่างง่ายสำหรับเทคนิคกรวยเคลื่อนที่

ในรูปที่ 6.9 หน้าถัดไป เป็นการแสดงการหาผลลัพธ์ที่เป็นโครงร่างของขอบบ่อเหมืองสุดท้าย กลุ่มบล็อกที่ตั้งต้นแสดงไว้ในรูป 6.9 a ที่ระบุค่าบล็อกทั้งที่เป็นเครื่องหมายบวกกับเครื่องหมายลบ ระบายในแนวตัดขวางของกลุ่มบล็อกคือระยะนาบ  $i-j$  การหาค่าผลรวมสะสมเกิดจากการสุ่มใช้กรวยขนาดเล็ก (รูปที่ 6.9 b) มีจำนวนบล็อกในกรวยเพียง 4 บล็อก ไปจนถึงกรวยขนาดใหญ่สุด (รูปที่ 6.9 d) มีจำนวนบล็อกในกรวยถึง 16 บล็อก และค่าอัตราส่วนของความลาดชันกำหนดให้คงที่เท่ากับ 1 : 1

จากการกำหนดบล็อกพื้นฐานเป็นบล็อก  $b_{2,5}$  ได้ค่าผลรวมสะสมของมูลค่าบล็อกเป็น -1 (รูปที่ 6.9 b) จึงทำการย้ายกรวยใหม่ใช้บล็อก  $b_{3,4}$  เป็นบล็อกพื้นฐานได้ค่าผลรวมสะสมของมูลค่าบล็อกเป็น +2 (รูปที่ 6.9 c) ทำการลองสุ่มต่อที่ระดับลึกลงไปอีกให้กรวย ใช้บล็อก  $b_{4,4}$  เป็นบล็อกพื้นฐานได้ค่าผลรวมสะสมเป็น -2 ดังนั้นค่าผลรวมสะสมของ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงสุดคือกรวยที่ใช้บล็อก  $b_{3,4}$  เป็นบล็อกพื้นฐาน

(a)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-2	-1	-1	-1	2	-1	-1	-2
3	-3	-3	-1	7	-1	-1	-3	-3
4	-4	-4	-4	4	-1	-4	-4	-4

(b)

1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-2	-1	-1	-1	2	-1	-1	-2
3	-3	-3	-1	7	-1	-1	-3	-3
4	-4	-4	-4	4	-1	-4	-4	-4

(c)

1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-2	-1	-1	-1	2	-1	-1	-2
3	-3	-3	-1	7	-1	-1	-3	-3
4	-4	-4	-4	4	-1	-4	-4	-4

(d)

1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-2	-1	-1	-1	2	-1	-1	-2
3	-3	-3	-1	7	-1	-1	-3	-3
4	-4	-4	-4	4	-1	-4	-4	-4

รูปที่ 6.9 เทคนิคกรวยเคลื่อนที่แบบ positive moving cone โครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด คือ รูปที่ 6.9 c เนื่องจากให้ค่า NPV สูงสุด

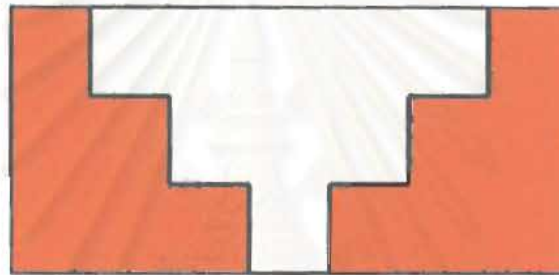
### 6.3.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์วิธีกรวยเคลื่อนที่เพิ่มเติม

ใช้รูปที่ 6.10 เป็นตัวอย่างที่จะหามูลค่าสุทธิ (net value) ในการขุดเจาะสำหรับกำหนดขอบบ่อเหมืองเปิดที่ประยุกต์ด้วยแบบจำลองกรวย ในลักษณะที่ตัดระดับขั้นตะพัก เป็นแบบขั้นบันได (stepped cone model) มาใช้ในการคำนวณมูลค่าผลรวมสะสมจากบล็อกเชิงเศรษฐกิจที่กำหนด ทั้งนี้มีเงื่อนไขบังคับให้ค่าอัตราส่วนความลาดชันการขุดเจาะที่ 1 : 1

	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
2		-2	-2	+4	-2	-2	
3			+7	+1	-3		

Block  
Value

รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางแนวคิ่งผ่านกลุ่มบล็อก ที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐกิจทั้งบวกและลบ



รูปที่ 6.11 แบบจำลองกรวยหัวกลับที่ตัดชั้นตะพักเป็นแบบขั้นบันได

ขั้นตอนของการวิเคราะห์ที่ใช้รูปแบบกรวยแบบขั้นบันได ดังแสดงไว้ในรูป 6.11 คล้ายคลึงกับวิธี Lerchs-Grossmann ที่ใช้ผลรวมของมูลค่าสุทธิสะสมเช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่าง ในรายละเอียดบ้างเล็กน้อย ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** กรวยจะถูกถอดจากแนวด้านซ้ายไปด้านขวา ตามแนวแถบบนของภาพตัดขวางแนวคิ่ง ถ้าหากมีบล็อกมีมูลค่าบวก บล็อกนั้นจะถูกยกออก (ขุดเจาะ)

**ขั้นตอนที่ 2** หลังจากทำการตรวจสอบ (scan) ในแถวแรกแล้ว ส่วนปลายกรวยจะถูกเคลื่อนย้ายลงไปยังแถวที่สอง

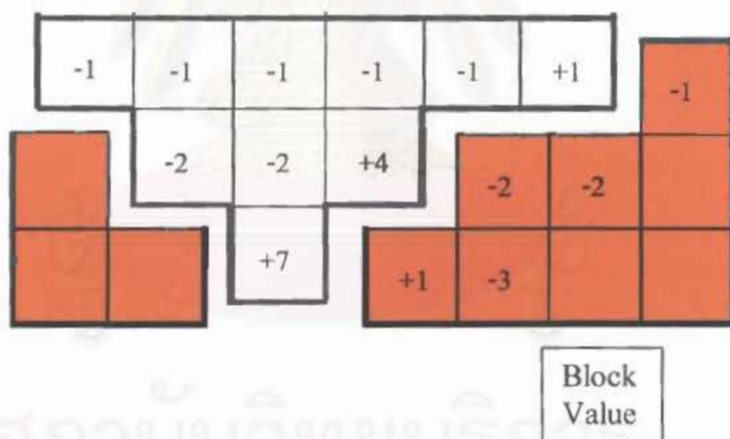
เริ่มต้นจากตำแหน่งด้านซ้าย กรวยจะถอดจากซ้ายไปด้านขวา และหยุดเมื่อพบกับบล็อกที่มีมูลค่าเป็นบวก ถ้าหากผลรวมสะสมของทุกบล็อกในกรวยมีค่าเป็นบวก (หรือมีค่าเป็นศูนย์) บล็อกทั้งหมดในกรวยจะถูกยกออก ถ้าหากผลรวมสะสมมีค่าเป็นลบ บล็อกในกรวยเหล่านี้จะไม่ถูกยกออก แต่กรวยจะถอดไปยังบล็อกที่มีมูลค่าเป็นบวกที่อยู่ถัดไปในแถวนี้

**ขั้นตอนที่ 3** กระบวนการหาค่าผลรวมเริ่มต้นทำการยกบล็อกในกรวยออกจะมีการทำซ้ำเรื่อย ๆ ทั้งทางด้านซ้ายไปขวา และจากด้านบนถึงด้านล่าง จนกระทั่งไม่มีบล็อกที่สามารถจะถูกยกออก

**ขั้นตอนที่ 4** ผลกำไรที่ได้เกิดจากการรวมตัวเลขมูลค่าของบล็อกที่ถูกยกออกตามภาพตัดขวางนี้

**ขั้นตอนที่ 5** อัตราส่วนของการขูดเจาะ โดยรวม (overall stripping ratio) สามารถหาได้จากจำนวนบล็อกมูลค่าบวกและจำนวนมูลค่าลบ

จากตัวอย่างรูปที่ 6.10 มีจำนวนบล็อกมูลค่าเป็นบวกมี 4 บล็อก จึงต้องใช้กรวยทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังนั้นถ้าใช้ระบบการตรวจจากบนลงล่าง (top-down rule) กรวยแรกบล็อกที่อยู่ในแถว 1 คอลัมน์ 6 ถูกยกออก กรวยที่สองเป็นบล็อกแถว 2 คอลัมน์ 4 ถูกยกออก กรวยที่สามเป็นบล็อกแถว 3 คอลัมน์ 3 ถูกยกออก ซึ่งเมื่อหาผลรวมมูลค่าของทุกบล็อกในกรวยทั้ง 3 ขั้นตอน (3 กรวย) ในแต่ละขั้นตอนนี้มีมูลค่าสะสมรวมบล็อกในกรวยเป็นบวก



รูปที่ 6.12 โครงร่างบ่อเหมืองสุดท้ายที่ให้ค่าอัตราส่วนการขูดเจาะที่เหมาะสมที่สุด

กรวยที่สี่บล็อกแถว 3 คอลัมน์ 4 ถูกยกออก แต่เมื่อทำการหาผลรวมมูลค่าแล้วปรากฏว่ามีค่าสะสมรวมเป็นลบ แสดงว่าบล็อกไม่ได้ถูกยกออก ไม่มีการขูดเจาะทำเหมืองในระดับนี้ จึงเหลือโครงร่างขบบ่อเหมืองสุดท้ายดังรูปที่ 6.12 ผลรวมมูลค่าสะสมของกรวยที่เป็นขบบ่อเหมืองสุดท้ายมีผลลัพธ์เป็น +3 ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนการขูดเจาะโดยรวม (overall stripping ratio : OSR) =  $7/3$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

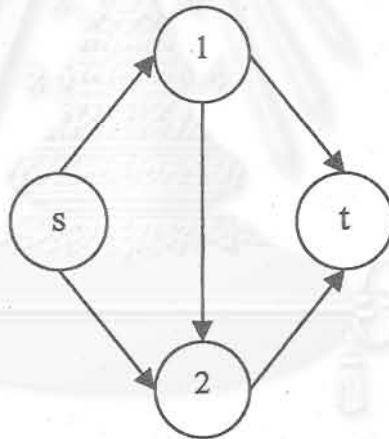


## 6.4 วิธีข่ายงานการไหลสูงสุด (Maximum Flow)

วิธีนี้ประยุกต์ข่ายงาน (network) ในการวางแผนเพื่อออกแบบเมืองเปิดภายหลังที่ได้ทำแบบจำลองบล็อกของบ่อเมืองเปิดเสร็จแล้ว และมีการกำหนดมูลค่าปัจจุบันสุทธิของบ่อเมืองเปิด การหาข่ายงานการไหลสูงสุดก็เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงอีกวิธีหนึ่ง

### 6.4.1 หลักการเบื้องต้นของขั้นตอนวิธีการไหลสูงสุด

ข่ายงาน (network) ปกติประกอบด้วยเซตหลายเซตหรือเขียนเป็นเซต  $(N, A)$  กำหนดให้  $N$  เป็นเซตของจุดต่อ (node) และ  $A$  เป็นเซตของเส้นส่วนโค้งอาร์กหรือเส้นเชื่อม (edge) ดังรูปที่ 6.13 กรณีของข่ายงานทั่วไปจุดต่อ  $s$  เป็นจุดต่อของแหล่งกำเนิดมีชื่อเรียกว่า source จุดต่อ  $t$  ที่เป็นแหล่งปลายทางมีชื่อเรียกว่า sink ทำให้สามารถสร้างเป็นแบบจำลองเชิงกายภาพทั่วไปได้



รูปที่ 6.13 ข่ายงานแบบง่าย ในรูปข่ายงานมี 4 จุดต่อ ค่า  $N = (s, 1, 2, t)$

และมีเส้นเชื่อม 5 เส้น ค่า  $A = [(s, 1), (s, 2), (1, 2), (1, t), (2, t)]$

### 6.4.2 การออกแบบในงานเมืองเปิดที่ใช้วิธีข่ายงานสูงสุด

Barnes and Johnson (1982) เป็นผู้ริเริ่มประยุกต์แนวข่ายงานการไหลที่ให้ค่าสูงสุด (maximum flow) มาใช้ในงานเมืองเปิด ขั้นตอนวิธีเริ่มต้นจากการกำหนดค่าบล็อกเชิงเศรษฐกิจใน 2 มิติ แล้วสร้างข่ายงานขึ้นมาจากนั้นวิเคราะห์ผลลัพธ์แต่ละจุดต่อที่เป็น node ในแนวไหลของข่ายงาน (network flow) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

### ตัวอย่างที่ 1 ข่ายงานการไหลสูงสุด

รูป 6.14 เป็นตัวอย่างของขั้นตอนวิธีการสร้างข่ายงานจากบล็อกที่ต้องการทำการขุดเจาะ กำหนดให้กลุ่มบล็อกมี 2 แนวระดับ (2 แถว) และ 5 คอลัมน์ มูลค่าบล็อกได้ระบุเป็นตัวเลขไว้ในแต่ละบล็อก กำหนดให้มีเงื่อนไขในการขุดเจาะที่อัตราส่วนความลาดชัน 1 : 1

	1	2	3	4	5
1	-1	-1	-2	-1	-2
2		1	6	1	

รูปที่ 6.14 กลุ่มบล็อกที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐกิจและใช้วิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1

การทำการขุดเจาะบล็อกที่อยู่ด้านล่าง ต้องมีการขุดเจาะบล็อกด้านบนออกก่อน ซึ่งเป็นแนวคิดแบบเดียวกับขั้นตอนวิธีอื่นที่ได้อธิบายมาแล้ว ยกตัวอย่าง ถ้าต้องการขุดเจาะบล็อก  $b_{2,3}$  ที่มีมูลค่า + 6 จำเป็นต้องขุดเจาะบล็อก 3 บล็อกที่อยู่ด้านบน ได้แก่ บล็อก  $b_{1,2}$ ,  $b_{1,3}$  และ  $b_{1,4}$  ซึ่งหาผลรวมมูลค่าสะสม (บล็อกในกรวย) เป็น + 2

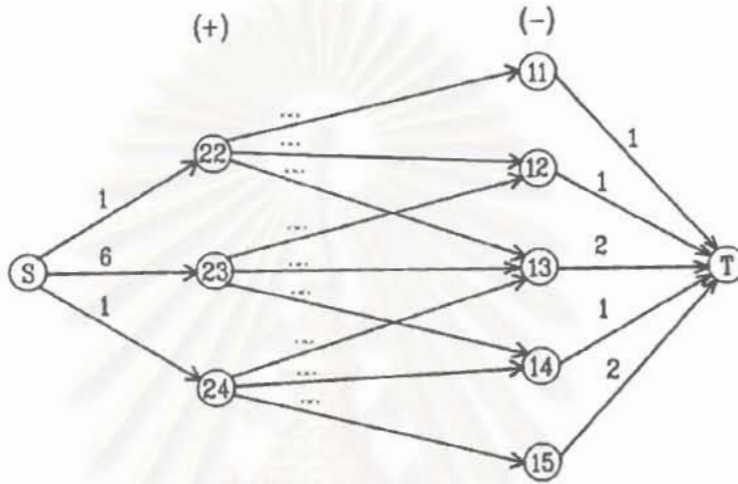
ต่อมาก็เริ่มสร้างข่ายงานที่ให้ผลลัพธ์เป็นมูลค่าสูงสุด หรือเรียกว่าการสร้างข่ายงานการไหลสูงสุด (maximum flow) ดังรูปที่ 6.15 มีการแปลงแบบจำลองบล็อก (block model) เป็นแบบฟอร์มข่ายงาน (network form) ตามขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนแรก จัดรูปแบบให้มีจุดต่อ (node) เพื่อให้แทนค่าบล็อกใหม่ บล็อกที่มีมูลค่าเป็นเครื่องหมายบวกอยู่คอลัมน์ด้านซ้ายมือ บล็อกที่มีมูลค่าเป็นเครื่องหมายลบอยู่คอลัมน์ด้านขวามือ

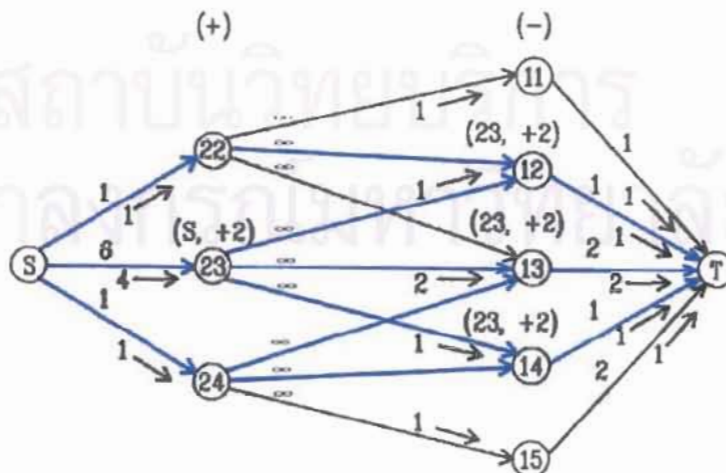
ขั้นตอนที่สอง กำหนดจุดต่อที่สมมุติขึ้นมา เป็นจุดต่อ  $s$  (ดูรูปที่ 6.15) อยู่ทางด้านซ้าย จากนั้นลากแนวเส้นเครือข่ายไปยังบล็อกที่มูลค่าบวกทั้งหมด 3 บล็อก [บล็อก  $b_{2,2}$ ,  $b_{2,3}$ ,  $b_{2,4}$ ] ส่วนตัวเลขมูลค่าแสดงไว้ด้านบนของเส้นเครือข่ายที่ชี้เข้า [เป็นเส้นตรงมีหัวลูกศร] ไปยังแต่ละบล็อก ซึ่งในรูปด้านซ้ายมีทั้งหมด 3 แนว

ขั้นตอนที่สาม กำหนดจุดต่อที่สมมุติขึ้นมา เป็นจุดต่อ T (ดูรูปที่ 6.15) อยู่ทางด้านขวา และลากแนวเส้นเครือข่ายไปยังบล็อกรที่มีมูลค่าลบ ทั้งหมด 5 บล็อก [ บล็อก  $b_{1,1}$ ,  $b_{1,2}$ ,  $b_{1,3}$ ,  $b_{1,4}$  และ  $b_{1,5}$  ] ส่วนตัวเลขมูลค่าแสดงไว้ด้านบนของเส้นเครือข่าย

ให้สังเกตว่าไม่มีการแสดงเครื่องหมายมูลค่าบวกหรือลบบนเส้นข่ายงาน ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 โครงข่ายงานที่ยกเป็นตัวอย่างของบ่อเหมืองเปิด



รูปที่ 6.16 ข่ายงานที่เป็นผลเฉลยของการหาขอบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด

**ขั้นตอนที่สี่** ให้ต่อแนวข่ายงานจากจุดต่อที่เป็นมูลค่าบวก ที่ถูกจัดไว้เป็นคอลัมน์ด้านซ้าย ไปยังแนวข่ายงานจุดต่อที่เป็นมูลค่าลบ ที่ถูกจัดไว้เป็นคอลัมน์ด้านขวา

พจน์ที่เป็นเครื่องหมายอนันต์ ( $\infty$ ) นิยามว่าเป็นการทำเหมืองโดยการขุดเจาะบล็อกรวมมูลค่าบวกมีกำลังความสามารถที่อนันต์ (infinite capacity)

**ขั้นตอนที่ห้า** การบรรลุเป้าหมายของขอบบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด เป็นการหาแนวทางที่สามารถขุดเจาะเพื่อนำบล็อกที่มีมูลค่าบวกและอยู่ด้านล่างให้หมด หรือสามารถให้มูลค่าสูงสุด (ตามเวลาที่ทำเหมืองปัจจุบัน)

จากการทำการวิเคราะห์รูปแบบข่ายงานการไหลซ้ำ (iteration) จะได้ค่าผลเฉลยของขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ที่ให้ผลตอบแทนสูงสุด ดังแสดงไว้ในแนวเส้นเครือข่ายสีน้ำเงินของรูปที่ 6.16

**ตัวอย่างที่ 2** กลุ่มบล็อกที่มีมากกว่าสองแนวระดับ

ตัวอย่างที่สองใช้กลุ่มบล็อกใหญ่ แสดงไว้ในรูป 6.17 กำหนดให้กลุ่มบล็อกมี 3 แนวระดับ และ 7 คอลัมน์ มูลค่าบล็อกถูกระบุเป็นตัวเลขเครื่องหมายบวกหรือลบ กำหนดให้มีเงื่อนไขในการขุดเจาะที่อัตราส่วนความลาดชัน 1 : 1

ถ้าหากมีบล็อกมูลค่าเป็นบวกบล็อกหนึ่งบล็อกใดอยู่บนระดับที่ 2 และต้องการขุดเจาะบล็อกในระดับนี้ จะมีการรวมมูลค่าทั้งหมดไว้กับบล็อกที่อยู่ด้านบนทั้งหมด กรณีที่ได้ผลรวมมูลค่าเป็นลบหรือศูนย์ จะไม่มีการทำการขุดเจาะบ่อเหมือง

	1	2	3	4	5	6	7
1	-2	-2	-2	-3	-3	2	-2
2		1	6	-1	6	-1	
3			3	-1	2		

รูปที่ 6.17 ภาพตัดขวางแนวตั้งกลุ่มบล็อกเป็นกรณีตัวอย่าง 2 ที่ใช้ข่ายงานการไหลวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด

ยกตัวอย่าง ถ้าจะทำการขุดเจาะบล็อก  $b_{2,3}$  ที่มีมูลค่า + 6 จำเป็นต้องขุดบล็อกจำนวน 3 บล็อกออก ได้แก่ บล็อก  $b_{1,2}$ ,  $b_{1,3}$  และ  $b_{1,4}$  แต่เมื่อหาผลรวมมูลค่าของบล็อกที่อยู่แถวแรกทั้ง 3 บล็อกได้เป็น  $-7$  แสดงว่าเซตของการขุดเจาะนี้ไม่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์

นอกจากนี้ในตัวอย่างที่ 2 นี้ ยังมีความแตกต่างกับตัวอย่างที่ 1 อีก 2 รายการย่อย

1) บล็อกที่อยู่แถวบนที่เป็นแถวแรกและเป็นบล็อกที่มีมูลค่าบวก และสามารถทำการขุดเจาะได้เลยโดยไม่ต้องรอผลการวิเคราะห์โดยใช้ข่ายงาน

2) การวิเคราะห์สามารถจะเริ่มต้นได้ต้องมีการสมมุติจุดต่อพิเศษ เพื่อให้มีบล็อกที่มีมูลค่าเป็นศูนย์ (ดูรูปที่ 6.18) อยู่ในคอลัมน์ขวา (เดิมกำหนดให้เป็นคอลัมน์บล็อกมีมูลค่าเป็นลบ) ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแนวการไหลผ่านจุดต่อนี้ได้ ซึ่งหมายถึงว่า บล็อกนี้สามารถทำการขุดเจาะได้ทุกช่วงเวลา

จากตัวอย่างที่ 2 นี้ บ่อเหมืองมี 3 ระดับ อาจแยกการวิเคราะห์เป็น 2 วิธี

วิธีแรก การต่อแนวเส้นข่ายงานสำหรับบล็อกที่อยู่ระดับที่ 3 และมีมูลค่าบวกกำหนดให้ต้องต่อไปยังบล็อกที่มีมูลค่าลบ ที่อยู่ในระดับแรก และที่อยู่ในระดับที่ 2 ที่ต้องขุดเจาะออกก่อน นำบล็อกระดับที่ 3 ออกมา

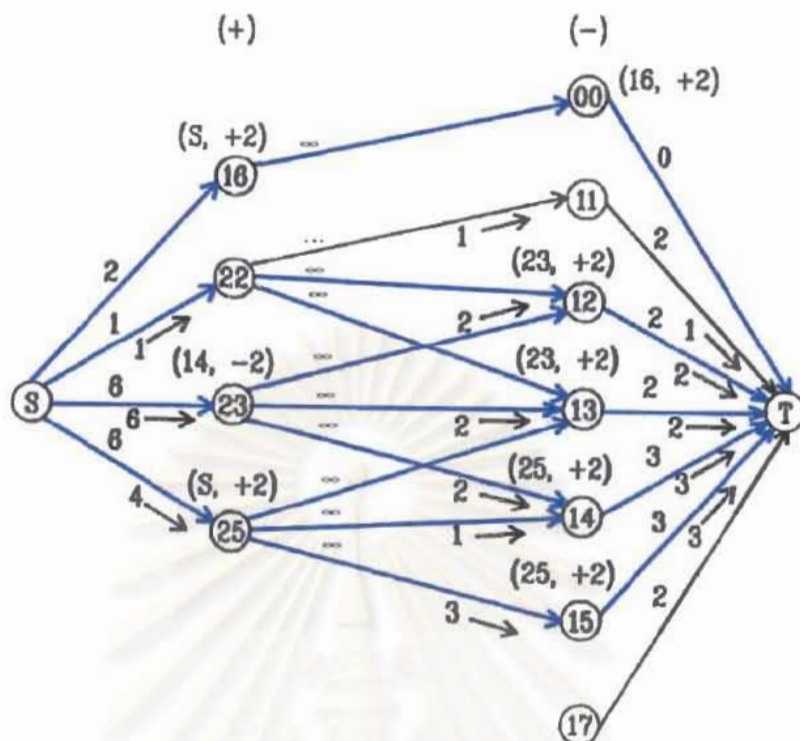
วิธีที่สอง เริ่มต้นทำการต่อแนวเส้นข่ายงานสำหรับกลุ่มบล็อกเหมือนกับกรณี ที่มีกลุ่มบล็อกเพียงแค่ 2 ระดับ หลังจากนั้นทำการเคลื่อนย้ายบล็อกที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะขุดเจาะทำเหมืองเปิดได้อย่างคุ้มทุน (มีผลรวมมูลค่าเป็นบวก) แล้วนำมารวมแยกไว้ในการทำเหมืองระดับที่ 3

ตัวอย่างข่ายงานแสดงเป็นภาพสเก็ตซ์ไว้ 2 รูปที่เป็นข่ายงานที่ต่อเนื่องกัน ได้แก่ รูปที่ 6.18 กับรูปที่ 6.19 เมื่อเริ่มต้นทำการวิเคราะห์เฉพาะ 2 ระดับแรก (รูปที่ 6.18) ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ใน 2 ระดับแรก มีบล็อกจำนวน 7 บล็อกที่เป็นโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ได้แก่ บล็อก  $b_{1,2}$ ,  $b_{1,3}$ ,  $b_{1,4}$ ,  $b_{1,5}$ ,  $b_{1,6}$ ,  $b_{2,3}$  และ  $b_{2,5}$

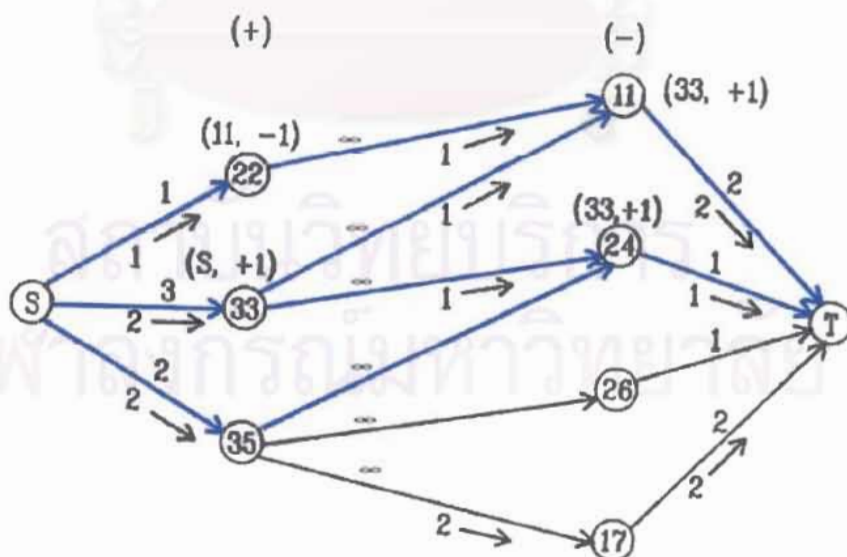
แต่เมื่อตรวจสอบรูปแบบของกลุ่มบล็อก ปรากฏว่า ในจำนวน 7 บล็อกนั้น บล็อกด้านล่างที่อยู่ระดับ 2 ได้แก่ บล็อก  $b_{2,3}$  หรือ  $b_{2,5}$  ไม่มีมูลค่าเพียงพอที่จะทำการขุดเจาะแยกเฉพาะแต่ละบล็อกของระดับ 2 อย่างไรก็ตามถ้าหากนำบล็อกด้านล่างมารวมมูลค่ากัน ก็มีมูลค่าที่คุ้มต่อการขุดเจาะบล็อกด้านบนออก

ในขั้นตอนต่อมา ทำการตรวจบล็อกที่เหลือ และพบว่าไม่อยู่ในโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ซึ่งได้แก่ บล็อก  $b_{1,1}$ ,  $b_{1,7}$ ,  $b_{2,2}$  จากการจัดเรียงแนวการไหลใหม่ บล็อกที่มีมูลค่าลบในระดับ 2 และยังไม่ได้นำมาวิเคราะห์หาผลเฉลยในขั้นตอนแรก ได้แก่ บล็อก  $b_{2,4}$  และ  $b_{2,6}$  ถูกนำมาหาผลรวมของมูลค่าบล็อกด้วย ถ้าหากบล็อกทั้งสองอยู่ในแนวเส้นข่ายงานที่ต้องขุดเจาะบล็อกที่มีมูลค่าบวกในระดับ 3





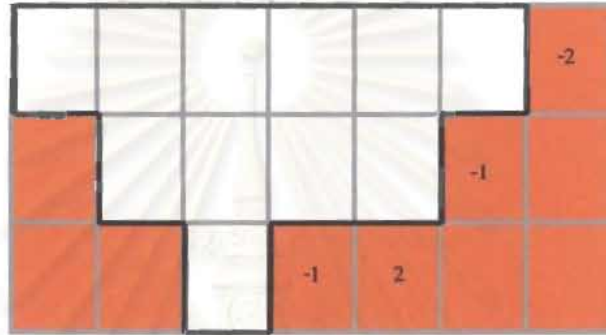
รูปที่ 6.18 โครงร่างข่ายงานแสดงผลเฉลยจากการทำซ้ำตามวิธีแรกจากตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 6.19 โครงร่างข่ายงานแสดงผลเฉลยจากการทำซ้ำตามวิธีที่สองจากตัวอย่างที่ 2

การแสดงผลงานที่เกิดจากการวิเคราะห์ขั้นตอนนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.19 ผลเฉลยจากการทำการวิเคราะห์ซ้ำ ได้ผลลัพธ์บล็อกที่อยู่ในบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดเป็นจำนวน 4 บล็อก ได้แก่ บล็อก  $b_{1,1}$ ,  $b_{2,2}$ ,  $b_{2,4}$  และ  $b_{3,3}$

ส่วนภาพสเก็ทของรูปที่ 6.20 เป็นการแสดงโครงร่างขบบ่อสุดท้ายที่มีการขุดเจาะจนถึงระดับที่ 3 มีบล็อกจำนวนทั้งหมด 11 บล็อกถูกขุดเจาะออกจากบ่อเหมือง คงเหลือบล็อกที่ไม่มีการขุดเจาะอีก 4 บล็อก



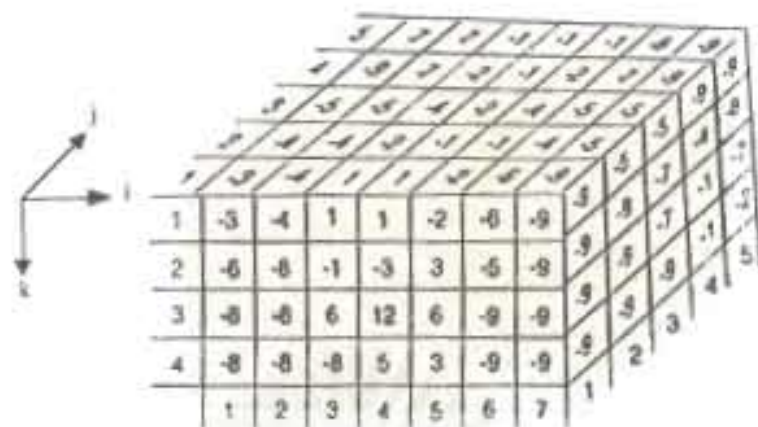
รูปที่ 6.20 ผลเฉลยของตัวอย่างที่ 2 เป็น โครงร่างขบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด

## 6.5 หลักการสร้างบล็อก 3 มิติ ตามแนวคิดของ Johnson & Sharp

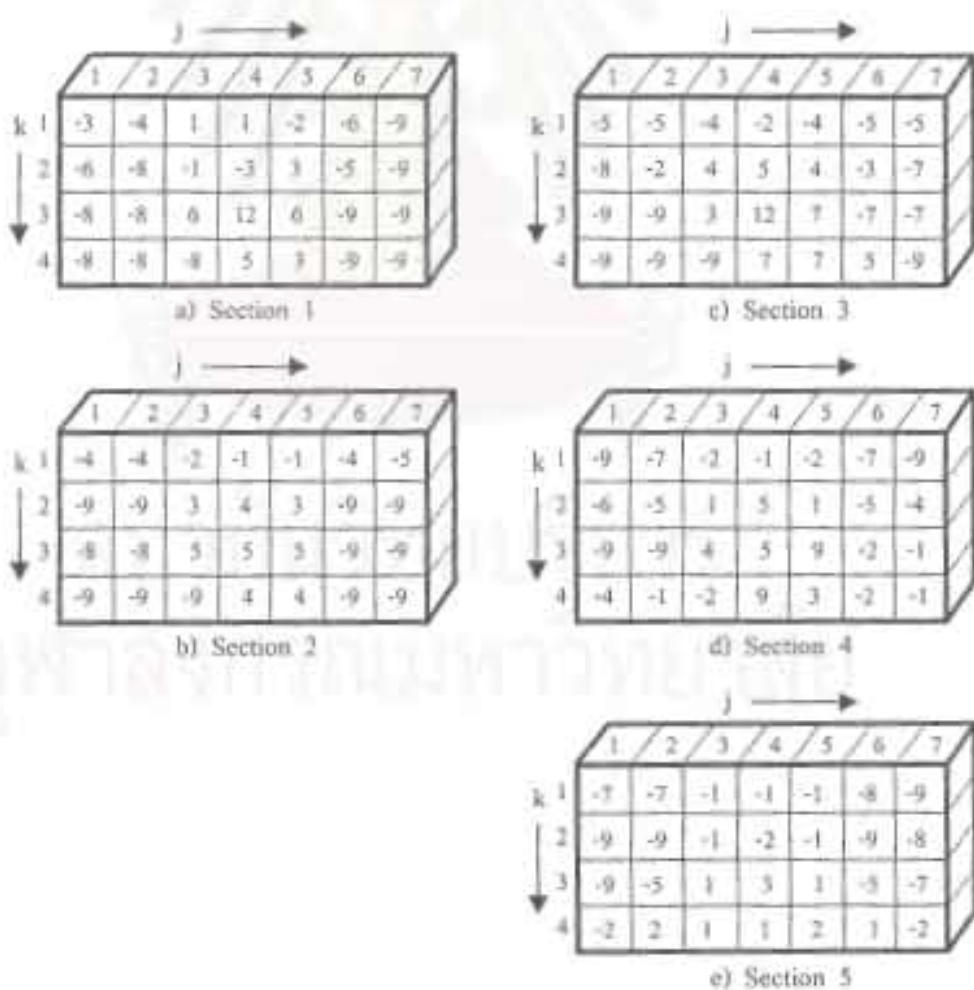
ข้อดีที่เป็นปัญหาหลักของการใช้โปรแกรมพลวัต 2 มิติ ได้แก่ การปรับเส้นขอบบ่อเหมืองให้เรียบ และมีปัญหาตรงตำแหน่งรอยต่อจุดสุดท้ายที่ต้องเชื่อมเข้ากับภาพตัดขวางในแนวทิศทางอื่น ต่อมา Johnson and Sharp (1971) ได้ริเริ่มที่ใช้ขั้นตอนวิธี 3 มิติ มาแทนที่ขั้นตอนวิธี 2 มิติ เพื่อให้ได้เส้นขอบต่อของแต่ละภาพตัดขวางที่ดีที่สุด และได้ตัวแทนภาพตัดขวางตามแนวยาว (longitudinal cross section) ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละระดับ

### 6.5.1 หลักการทั่วไปของวิธี Johnson and Sharp

แบบจำลองบล็อกใน 3 มิติที่เป็นตัวแทนแหล่งสะสมแร่ ตามวิธีวิเคราะห์ของ Johnson and Sharp ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.21 ทั้งนี้กำหนดเวกเตอร์  $(i, j, k)$  ใน 3 ทิศทางตามแกนคาร์ทีเซียน เพื่อให้มวลสินแร่ที่จำลองแบบเป็นบล็อก 3 มิติ



รูปที่ 6.21 แอมพลิจูดของเมตริก 3 มิติที่ใช้อธิบายแนวคิดวิธี Johnson and Sharp



รูปที่ 6.22 ภาพตัดขวางของเมตริก ตัวเลขบอกค่าเชิงสมมาตรที่กระจายไปในแต่ละระดับ

## 6.5.2 ขั้นตอนวิธีกับตัวอย่างของการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ขั้นตอนวิธีสำหรับการวิเคราะห์เชิง 3 มิติสามารถอธิบายได้ง่ายขึ้น ถ้าใช้ตัวอย่างเชิงตัวเลข (numerical exmple) โดยระบุแยกไคอะแกรมของกลุ่มบล็อก 3 มิติในรูปที่ 6.21 เป็น 5 ภาพตัดขวางของแบบจำลองบล็อก และอยู่ในระนาบ  $j-k$  ที่เป็น transverse or cross block (แสดงไว้ในรูปที่ 6.22) ทั้งนี้เรียกภาพตัดขวางตามต้นแบบ ที่ระบุไว้ในรายงานเดิมของ Johnson and Sharp เป็น section 1, section 2, ....., section 5 หรือความหมายอีกนัยหนึ่งว่า ภาพตัดขวางที่มีค่า  $j = 1, 2, \dots, 5$  ตามลำดับ การที่จะหาขีดจำกัดที่เหมาะสมที่สุด มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรก จำเป็นต้องกำหนดให้รูปแบบของกลุ่มบล็อกมีเสถียรภาพในลักษณะที่ทำงานในบ่อเหมืองอย่างปลอดภัย ข้อกำหนดคือต้องมีบล็อกในระดับหนึ่ง ( $i^{\text{th}}$  level) อยู่รวมในกระบวนการขุดเจาะนี้ นั่นคือต้องมีบล็อกระดับ  $i$  บนแต่ละค่า  $k$

ขั้นตอนที่ 2 ใช้สมการ 2 มิติเดิมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลรวมสะสมในแต่ละแถวของบล็อก โดยปรับปรุงให้มีการบังคับใช้ในแต่ละระดับได้

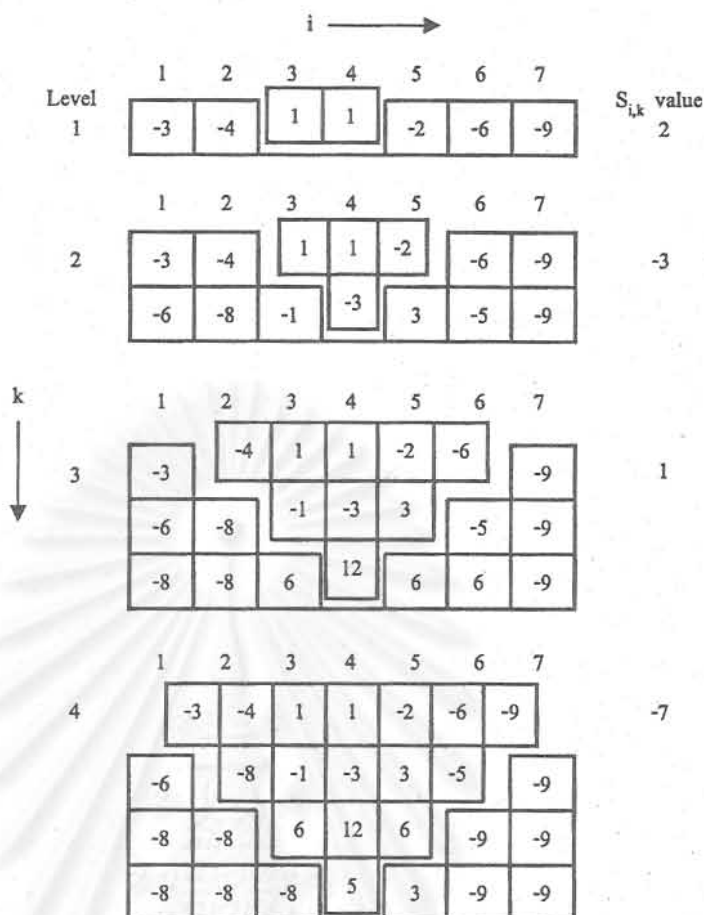
สมการหาผลรวมสะสม 2 มิติที่เขียนในรูปแบบใหม่ ได้แก่

$$\left( M_{i,j} = \sum_{q=1}^i m_{q,j} \right) \quad (6.5)$$

พจน์  $M_{i,j}$  แทนค่าผลรวมมูลค่าทั้งหมดของวัสดุ (บล็อก) ที่ถูกขุดเจาะในคอลัมน์  $j$  ที่อยู่บนบล็อก  $b_{i,j}$  ที่กำหนดให้ทำการขุดเจาะ และยังรวมการขุดเจาะของบล็อก  $b_{i,j}$  อีกด้วย จากสมการที่ 6.5 ทำให้สามารถจะสร้างนิพจน์ที่เป็นค่าผลรวม (sum : S) ในรูปแบบคล้ายคลึงกัน เป็นค่าผลรวมของบล็อก  $b_{i,j}$  เขียนตามนิยามได้เป็น

$$S_{i,k} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i,j} m_{i,j} / (i, j) \text{ is in the optimum contour for section } k, \\ \text{given that one must mine to level } i \text{ (} i^{\text{th}} \text{ level)} \end{array} \right\} \quad (6.6)$$

อธิบายความหมายของ  $S_{i,k}$  ได้อีกอย่างคือ ถ้าเป็นตามข้อกำหนดความลาดชันที่ 1 : 1 ค่า  $S_{i,k}$  เป็นมูลค่าสูงสุดและเป็นผลตอบแทนจากการขุดเจาะบล็อกออกในภาพตัดขวางถึงระดับชั้น level "i" ที่กำหนด



รูปที่ 6.23 ผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในรูปเป็นการแสดงค่าแต่ละระดับชั้นของภาพตัดขวางจาก section 1 ( $j = 1$ )

ตารางที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้โครงร่างผ่านฐานบล็อกของแต่ละระดับชั้นความสูงที่มีค่า level ที่  $k = 1, 2, 3, 4$  ตามลำดับ

ระดับชั้น (level) ที่เป็นค่า k	บล็อกที่เป็นขอบฐานกรวย และเส้นโครงร่างผ่าน
1	(1, 3), (1, 4)
2	(1, 3), (2, 4), (1, 5)
3	(1, 2), (2, 3), (3, 4), (2, 5), (1, 6)
4	(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4), (3, 5), (2, 6), (1, 7)



ค่า  $S_{i,k}$  จึงเป็นผลลัพธ์จากการใช้ขั้นตอนวิธี 2 มิติต่อ section  $k$  และบังคับให้มีรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดที่ต้องมีบล็อกในระดับชั้น level  $i$  อย่างน้อย 1 บล็อก

การเริ่มต้นวิเคราะห์เริ่มจาก section 1 (รูปที่ 6.23) ที่หาค่าแนวขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดที่กำหนดให้ทำเหมืองลึกลงไปถึงระดับชั้น level  $i$  (กรณีนี้ของ section 1 นี้มี 4 ระดับ) แสดงเป็นภาพสเก็ชไว้ในรูปที่ 6.23 และสรุปลักษณะโครงร่างของแต่ละขอบบ่อเหมือง ไว้ในตารางที่ 6.1 ในตารางแต่ละบล็อกของ  $b_{ij}$  จึงเขียนเป็นตัวเลขในวงเล็บเล็กแยกกระหว่างค่า  $i$  กับค่า  $j$  ของแต่ละบล็อก เช่น  $b_{1,3}$  เขียนเป็น (1, 3) เป็นต้น

มูลค่าของ  $S_{i,k}$  ที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดควรใช้ฐานกลุ่มบล็อกเป็นโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่ได้จากการวิเคราะห์ของบล็อกในแนวตัดขวาง (transverse or cross section) ทั้ง 4 ระดับ ถูกแสดงไว้ทางด้านขวาของรูปที่ 6.23 ที่อยู่ในภาพสเก็ช

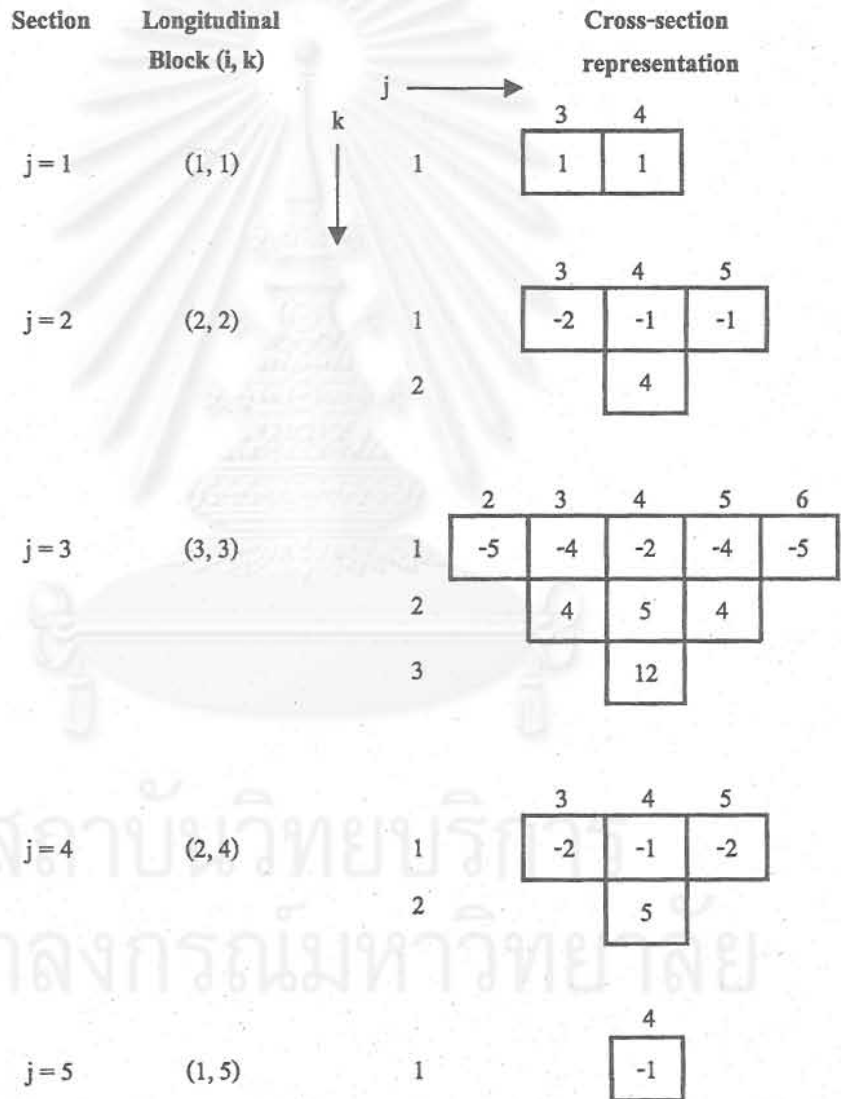
		j →				
		1	2	3	4	5
k ↓	1	2	-1	-2	-1	-1
	2	-3	0	-5	0	-5
	3	1	3	5	-7	-14
	4	-7	-13	7	-6	-33

รูปที่ 6.24 กลุ่มบล็อกที่เป็น longitudinal cross section

		j →				
		1	2	3	4	5
k ↓	1	2				-1
	2		0		0	
	3			5		
	4					

รูปที่ 6.25 โครงร่างที่เหมาะสมที่สุดของรูปที่ 6.24

มูลค่าตัวแปรของ  $S_{i,k}$  ที่มีค่าเท่ากับ มูลค่าตัวแปรของ  $M_{i,j}$  ในภาพตัดขวางหนึ่งจะถูกจัดรูปแบบให้อยู่เป็นคอลัมน์ และถูกนำไปรวมกับคอลัมน์ในที่ได้จากการวิเคราะห์บล็อกตัดขวางแนวอื่น ทำให้ได้รูปแบบกลุ่มบล็อกที่ตัดขวางแนวยาว (longitudinal section) ของแหล่งสะสมแร่ ดังรูปที่ 6.24 ตัวเลขมูลค่า  $M_{i,j}$  ถูกระบุไว้ในแต่ละบล็อกที่เรียงอยู่ในระนาบ  $j-k$  (ที่อยู่ในแนวยาว)



รูปที่ 6.26 โครงร่างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุด แสดงผลลัพธ์ขอบ longitudinal cross section ทั้ง 5 แนวตัด

**ขั้นตอนที่ 3** เป็นการเริ่มต้นใช้การรวมแถวสมมุติที่สร้างขึ้นมา (artificial row) ต่อภาพตัดขวางแนวยาว เพื่อหาเส้นขอบบ่อในแนวตามยาวที่เหมาะสมที่สุด

มูลค่าสุทธิของบ่อเหมือง หาได้จากการรวมค่าบล็อกที่อยู่ตั้งอยู่บน โครงร่างขอบบ่อสุดท้ายในระนาบ ตามยาว (บล็อกเรียงขนานในระนาบ  $j - k$ ) ของรูปที่ 6.25 มีค่าดังนี้

$$\text{Pit value} = 2 + 0 + 5 + 0 - 1 = 6$$

แต่ละบล็อก  $b_{i,k}$  ที่อยู่บนเส้นขอบบ่อตามแนวตัดขวางยาวที่มีค่าเหมาะสมที่สุด จะเป็นตัวแทนที่นิยามถึงขอบบ่อสุดท้ายที่ต้องขุดเจาะให้ถึงระดับ  $i$  (ทางด้านขวาของรูปที่ 6.26) ที่ถูกแสดงไว้แต่ละ cross section จำนวน 5 ระดับชั้น ตั้งแต่ค่า level ที่  $j = 1, 2, \dots, 5$  ตามลำดับ

ภาพสเก็ชรูปที่ 6.26 ตัวแทนของบล็อกตามยาว (longitudinal block) ที่ถูกเลือกมาเขียนเป็นตัวแทนของบล็อกที่เป็นบล็อกระดับต่ำสุด (bottom level) แต่ละแนวตัด โครงร่างขอบบ่อทั้งหมด (5 sections)

## 6.6 หลักการสร้างบล็อก 3 มิติตามแนวคิดของ Wilke and Wright

ข้อเสียของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ Lerchs-Grossmann คือการใช้หน่วยความจำในการคำนวณสูงเกินไป ในขณะที่วิธีกรวยเคลื่อนที่ผลลัพธ์อาจไม่ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด (non-optimizing) และยังคงต้องการทำการคำนวณที่ใช้เวลามาก

### 6.6.1 หลักการทั่วไปในการใช้โปรแกรมพลวัต 3 มิติ

แนวทางของโปรแกรมกำหนดการพลวัต (dynamic programming) เป็นแนวทางเลือกที่ต้องการออกแบบอย่างรวดเร็วเพื่อหาขอบบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุด และยังสามารถใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนตัว โดยการปรับเปลี่ยนวิธีจากวิเคราะห์ผลเชิง 2 มิติ เป็นการวิเคราะห์ผลเชิง 3 มิติ เหมาะกับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเชิงเศรษฐศาสตร์ของแหล่งสะสม

### 6.6.2 ขั้นตอนวิธีกับตัวอย่างของการหาผลลัพธ์

วิธีบล็อก 3 มิติตามแนวทางของ Wilke and Wright นี้มีขั้นตอนวิธี ตั้งแต่การปรับแก้เส้นรอยต่อ ก่อนเริ่มการใช้โปรแกรมพลวัตเพื่อวิเคราะห์กลุ่มบล็อก 3 มิติ

เนื้อหาในหัวข้อนี้มี รวบรวมมาจากบทความวิจัยและเอกสารเผยแพร่ของ Koenigsberg (1982), Wilke & Wright (1984), และ Wright (1987, 1989, 1990)

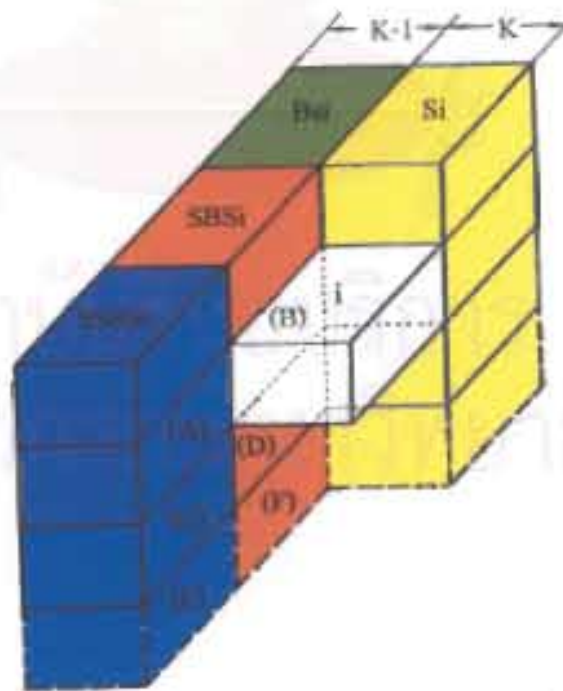
### 1. การปรับแก้เส้นรอยต่อขอบบ่อ

ข้อดีที่เป็นปัญหาหลักของการใช้โปรแกรมพลวัต 2 มิติ ได้แก่การปรับเส้นขอบบ่อเหมืองให้เรียบ ที่มีปัญหาตรงด้านแนวรอยต่อจุดสุดท้ายต้องเชื่อมเข้ากับภาพตัดขวางในแนวทิศทางอื่น

ตัวอย่างที่ดีสำหรับการประยุกต์ใช้โปรแกรมพลวัตพื้นฐาน 2 มิติไปยังปัญหาเชิง 3 มิติ เริ่มนำเสนอครั้งแรกโดย Johnson and Sharp (1971) แต่วิธีการดังกล่าวเกิดปัญหามรณะขอบบ่อเหมืองของแนวตัดขวางที่ต่อเนื่อง (consecutive sections) มีการเคลื่อน ไม่เชื่อมตรง (offset) ของแต่ละช่วงมากกว่า 1 คอลัมน์

ปัญหาของการปรับแก้รอยต่อขอบบ่อให้เรียบ (smoothing boundary) มีการแก้ไขโดย Koenigsberg (1982) โดยกำหนดให้มีเงื่อนไขพิเศษที่ผลักดันไปจากการวิเคราะห์เชิง 2 มิติ

นั่นคือในการวิเคราะห์เชิง 3 มิติ บล็อกจำนวน 1 บล็อก สามารถจะมีบล็อกถัดมาที่อยู่ใกล้เคียงที่สุด (nearest-neighbour blocks) ในทิศทางย้อนหลัง (backward direction) ได้มากถึง 4 คอลัมน์ (ดูรูปที่ 6.27) ในขณะที่สมมติฐานเดิมของการวิเคราะห์เชิง 2 มิติ กำหนดให้ 1 บล็อกมีบล็อกที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดในทิศทางย้อนหลังได้เพียง 1 บล็อก



รูปที่ 6.27 กลุ่มบล็อก 3 มิติ ที่มีการกำหนดจำนวนบล็อกที่ใกล้เคียงกับบล็อกพื้นฐาน  $[b_{i,j,k}]$  เป็นจำนวน 12 บล็อก

จากรูปที่ 6.27 กำหนดบล็อกพื้นฐานที่ใช้ข้างอิงเป็นบล็อกเดี่ยว (ไม่ระบายสีของบล็อก) เรียกชื่อบล็อก  $(i, j, k)$  หรือ  $b_{i,j,k}$  และมีบล็อกอีกจำนวน 4 บล็อกอยู่ใกล้เคียงกับบล็อกพื้นฐานในลักษณะทิศทางย้อนหลังบล็อกทั้ง 4 มีตำแหน่งใน 3 มิติต่างกัดังนี้

- $S_i$  ในคอลัมน์  $(j-1, k)$  อยู่ด้านข้างของ  $i$  (แสดงเป็นบล็อกสีเหลือง)
- $BS_i$  ในคอลัมน์  $(j-1, k-1)$  อยู่ด้านหลังติดกับด้านข้างของ  $i$  (แสดงเป็นบล็อกสีเขียว)
- $SBS_i$  ในคอลัมน์  $(j, k-1)$  อยู่ด้านข้างติดกับด้านหลังของ  $i$  (แสดงเป็นบล็อกสีส้ม)
- $SSBS_i$  ในคอลัมน์  $(j+1, k-1)$  อยู่ด้านข้างติดกับด้านหลังของ  $i$  (แสดงเป็นบล็อกสีน้ำเงิน)

ในการกำหนดเรื่องความลาดชันเพื่อให้ปัญหาง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงกำหนดมุมความชันมีอัตราส่วนเป็น 1 : 1 และต้องสอดคล้องกับ (satisfy) คอลัมน์ข้างเคียง

เมื่อวิเคราะห์คอลัมน์ข้างเคียงในทิศทางย้อนกลับ ได้สมการเวียนเกิดซ้ำ (recursion formula) สำหรับค่าของตัวเลขมูลค่าเชิงเศรษฐกิจ  $P_{i,j,k}$  บนบล็อก  $b_{i,j,k}$  เป็น

$$P_{i,j,k} = M_{i,j,k} + \max \left\{ \begin{array}{l} P_{S_i, j-1, k} \\ -P_{SBS(S_i), j-1, k-1} + P_{BS_i, j-1, k-1} \\ -P_{S(BS_i), j, k-1} + P_{SBS_i, j, k-1} \\ -P_{S(SSBS_i), j+1, k-1} + P_{SSBS_i, j+1, k-1} \end{array} \right. \quad (6.7)$$

พจน์ตัวแปรในสมการที่ 6.7 มีความหมายดังนี้

$P_{i,j,k}$  = มูลค่าเชิงเศรษฐกิจที่เหมาะสมที่สุดของบ่อเหมืองเปิดที่มีบล็อก  $b_{i,j,k}$  เป็นบล็อกสุดท้ายที่จะถูกวิเคราะห์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ พจน์นี้ แสดงมูลค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบล็อก  $b_{i,j,k}$  (ไม่ได้ระบายสี)

$M_{i,j,k}$  = เป็นค่าบล็อกคอลัมน์ที่กำหนด หรือเป็นค่าน้อยสุดที่จำนวนบล็อกจะถูกขุดเจาะ เมื่อตั้งต้นที่บล็อก  $b_{i,j,k}$  [วิธีการคำนวณทำในลักษณะเดียวกับกรณี  $M_{i,j}$  ที่เป็นค่า 2 มิติ]



$P_{Si, j-1, k}$  = เป็นมูลค่าเชิงเศรษฐกิจบ่อเหมืองของบล็อกข้างเคียงที่อยู่ถัดไป และบล็อกข้างเคียงนี้อยู่ในคอลัมน์  $(j-1, k)$  ซึ่งบล็อก  $Si$  ที่มีค่า  $P_{Si, j-1, k}$  ถูกระบายสีเหลือง

$P_{SBS (Si), j-1, k-1}$

= เป็นมูลค่าเชิงเศรษฐกิจของบล็อกที่อยู่ในคอลัมน์  $(j-1, k-1)$  มีมูลค่าที่เหมาะสมที่สุดเมื่อทำการคำนวณค่าของ  $P_{Si, j-1, k}$

$P_{BSi, j-1, k-1}$

= เป็นมูลค่าเชิงเศรษฐกิจของบล็อกที่อยู่ในคอลัมน์  $(j-1, k-1)$  ที่มูลค่านี้ถูกเลือก ให้เป็นค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับบล็อกข้างเคียง ในเหตุการณ์ (event) ที่บล็อก  $b_{SBS (Si), j-1, k-1}$  ไม่มีสภาพที่สามารถจะแทนกันได้ (incompatible) กับบล็อก  $b_{i, j, k}$  และกับบล็อก  $b_{BSi, j, k}$

พจน์ที่เหลือในสมการเวียนเกิดซ้ำ (สมการที่ 6.7) มีความหมายทำนองเดียวกัน ข้อสังเกตของสมการที่ 6.7 คือพจน์ตัวแปรที่มีเครื่องหมายลบ (negative terms) เป็นค่าตัวแก้ (correction value) ที่ใช้สำหรับให้บล็อกข้างเคียงอยู่ในสภาพที่แทนกันได้ (compatible) ตามเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนความลาดชัน 1 : 1

ค่าตัวแก้หมายถึงค่าบ่อเหมืองที่เป็นคอลัมน์แนวตัดขวาง  $(k-1)$  ของรูปที่ 6.27 ดังนั้น อาจมีความจำเป็นต่อไปที่จะต้องค่าตัวแก้ในคอลัมน์ที่อยู่ในแนวตัดขวางถัดไป เช่น ในแนวตัดขวาง  $(k-2)$ ,  $(k-3)$  เป็นต้น

## 2. การประยุกต์ใช้โปรแกรมพลวัตเชิง 3 มิติ

ข้อเสียของขั้นตอนวิธีที่ Koenigsberg นำเสนอนั้น ได้แก่ การที่มีค่าตัวแก้ของคอลัมน์ถัดไป ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดปัญหา degenerate ของ 3-D dynamic program เนื่องจากมีโอกาสที่การแก้คอลัมน์ในแนวตัดที่วกกลับมายังที่แนวตัดขวาง  $(k-1)$  ที่เป็นแนวตัดขวางเริ่มต้น

Wilke and Wright (1984) ได้แก้ปัญหานี้ในเรื่อง degenerate โดยการเพิ่มเป็นส่วน (increment) ในรูปแบบของกรวยที่เคลื่อนย้ายได้ (removal cone) และสามารถเพิ่มหรือลดบล็อกได้ แต่ก็ยังจำเป็นที่ต้องมีการกำหนดค่า  $P_{i, j, k}$  ไว้

แนวทางของ Wilke and Wright นี้ยังใช้สมมุติฐานเดิมในเรื่องโปรแกรมพลวัต 2 มิติ นั่นคือ กำหนดค่า  $P_{i,j,k}$  สำหรับบล็อก  $b_{i,j,k}$  และสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าของกรวยที่ถูกเคลื่อนย้ายออก รวมทั้งการหาความสัมพันธ์ที่บล็อก  $b_{i,j,k}$  มีค่าที่เป็นมูลค่าเชิงเศรษฐกิจที่เหมาะสมที่สุด กับอยู่ในสภาพที่สามารถจะแทนกันได้กับบล็อกข้างเคียง

เกณฑ์ที่ใช้ป้องกันปัญหาการเกิด degenerate ของโปรแกรม ได้แก่ ต้องแน่ใจว่าไม่มีค่าบล็อกใดที่ถูกนำมาใช้หรือนับ (count) เกินกว่า 1 ครั้ง หมายความว่า ค่าบล็อกที่เป็นค่า  $m_{i,j,k}$  อยู่ในค่าของกรวยที่เคลื่อนย้ายได้ ( $C_{i,j,k}$ ) กับอยู่ทั้งในบ่อเหมืองที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐกิจบล็อกใกล้เคียงเป็น  $P_{i-1,j-1,k}$  กับ  $P_{i-1,j+1,k}$  , และระหว่าง  $P_{i,j-1,k}$  กับ  $P_{i,j+1,k}$  รวมทั้ง  $P_{i+1,j-1,k}$  กับ  $P_{i+1,j+1,k}$

สมการเวียนเกิดซ้ำในรูปแบบใหม่นี้ หรือเรียกเป็น 3-D cone model ได้แก่

$$P_{i,j,k} = C_{i,j,k} + \max \{IP_L - IM_L\} \quad (6.8)$$

ความหมายพจน์ตัวแปรในสมการที่ 6.8 ได้แก่

$$P_{i,j,k} = \text{มูลค่าเชิงเศรษฐกิจที่เหมาะสมที่สุดของบ่อเหมืองบล็อกพื้นฐาน } b_{i,j,k}$$

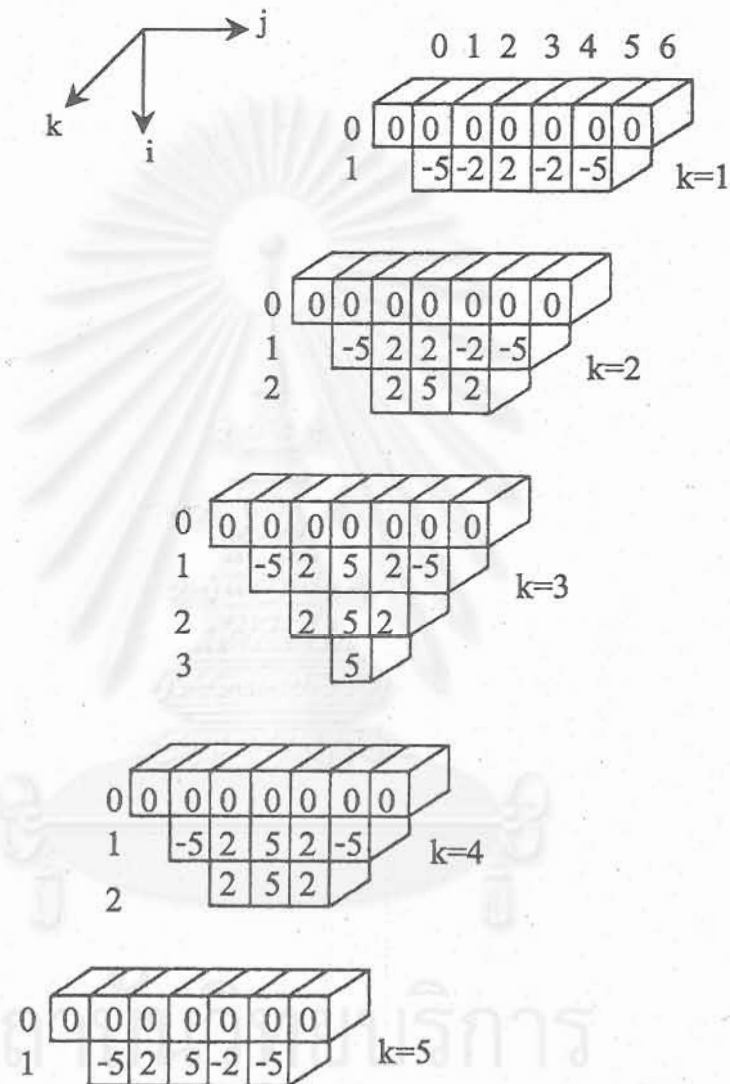
$$C_{i,j,k} = \text{ค่าจำนวนน้อยสุดของกรวยที่ถูกเคลื่อนย้ายต่อบล็อกพื้นฐาน } b_{i,j,k}$$

$$IP_L = P_{L,j-1,k} \quad \text{หรือ} \quad = P_{L,j+1,k}$$

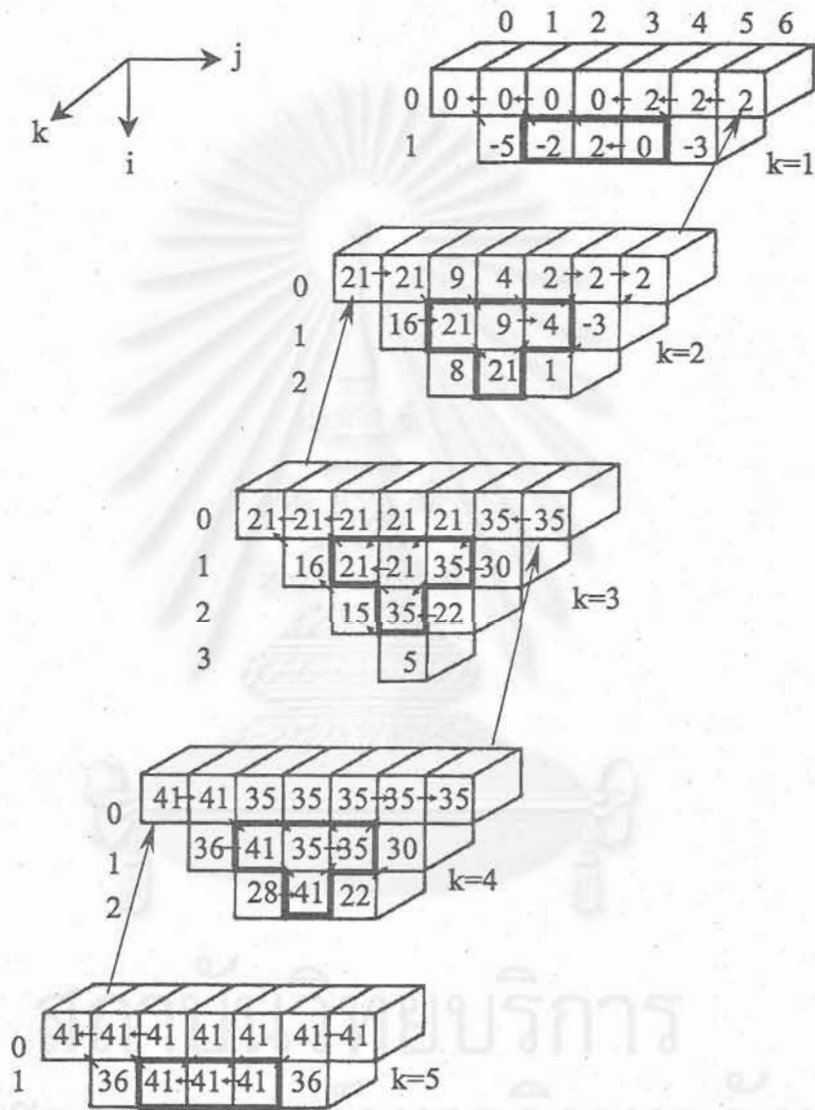
$$= \text{ค่าบ่อเหมืองต่อบล็อก } b_{L,j-1,k} \quad \text{หรือค่าบ่อเหมืองต่อบล็อก } b_{L,j+1,k} \quad \text{กำหนดให้ } L = i-1, L = i, L = i+1$$

$$IM_L = P_{L,j-1,k} \quad \text{หรือ} \quad = P_{L,j+1,k} \quad \text{ที่มีการเปลี่ยนหมู่ (associativity) ของเซตย่อยระหว่างค่า } P_{L,j-1,k} \cap C_{i,j,k} \quad \text{หรือระหว่างค่า } P_{L,j+1,k} \cap C_{i,j,k} \quad \text{กำหนดให้ } L = i-1, L = i, L = i+1$$

อนึ่งค่า  $IM_L$  นี้จัดเป็นค่าผลรวมมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของทุกบล็อกซึ่งอยู่ใน ส่วนร่วม (intersection) ของโครงร่างขอบบ่อเหมืองต่อบล็อก  $b_{L,j-1,k}$  หรือต่อบล็อก  $b_{L,j+1,k}$  และกรวยบนบล็อก  $b_{i,j,k}$



รูปที่ 6.28 บล็อกค้นแบบ 3 มิติที่ระบุมูลค่าเชิงเส้นทุกจุดบนแต่ละบล็อก  $[m_{i,j,k}]$   
 ในรูปมี 5 ภาพตัดขวาง หรือ  $k$  มี 5 ค่า ( $k = 1, 2, 3, 4, 5$ )



รูปที่ 6.29 ผลการวิเคราะห์จากบล็อกต้นแบบ (รูปที่ 6.28) ที่ได้โครงสร้างของ  
 ขอบบ่อเหมืองเชิง 3 มิติที่เหมาะสมที่สุด ใช้ขั้นตอนวิธี Wilke and Wright

ในทางกลับกัน ถ้าให้  $L = i + 1$  เขียนความสัมพันธ์การเปลี่ยนหมู่ของ เซตย่อยใหม่

$$P_{i+1, j \pm 1, k} \cap C_{i, j, k} = C_{i, j, k} \quad (6.9)$$

ซึ่งทำให้ได้สมการเวียนซ้ำตามรูปแบบของเงื่อนไขใหม่ เป็น

$$P_{i, j, k} = C_{i, j, k} + \max \begin{cases} IP_{i-1} - IM_{i-1} \\ IP_i - IM_i \\ IP_{i+1} - C_{i, j, k} \end{cases} \quad (6.10)$$

จากสมการที่ 6.10 ข้างบน ในการที่จะทำให้เกิดการปฏิบัติได้อย่างแท้จริง จำเป็นต้องคำนวณหาค่าบล็อกที่มีส่วนร่วมกับบล็อกเดิม เพื่อให้แน่ใจว่าบล็อกที่อยู่ในกรวยลอยจะอยู่ในบ่อเหมืองที่ทำการขุดเจาะร่วมกับบล็อกที่อยู่ข้างเคียง สมการที่ 6.10 ใช้หามูลค่าบ่อเหมืองในเชิง 3 มิติ มีเงื่อนไขบังคับให้ความลาดชันมีอัตราส่วน 1 : 1

### 3. ตัวอย่างการวิเคราะห์เชิง 3 มิติ

รูปที่ 6.28 แสดงตัวอย่างที่กำหนดให้มีบล็อกแบบ 3 มิติที่มีมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ มีค่าเป็น  $m_{i, j, k}$  โดยใช้แนวคิดที่เป็นบล็อกแบบจำลอง 5 แนวตัด การแก้ปัญหานี้ให้ใช้สมการเวียนซ้ำที่มีส่วนเพิ่มกรวย 3 มิติ  $[C_{i, j, k}]$  ที่เป็นสมการที่ 6.10

ผลเฉลยเป็น โครงร่างขบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการตรวจสอบบล็อกทั้ง 5 sections  $k = 1, 2, \dots, 5$  แสดงไว้ในรูปที่ 6.29 เป็นเส้นหนาที่บดตามขอบฐานบล็อก

ผลจากการที่ได้ใช้ขั้นตอน 3-D ของโปรแกรมพลวัต จะทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง แต่วิธีการนี้ยังมีข้อเสียที่ใช้เวลาในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เป็นเวลานาน อาจไม่เหมาะนำไปใช้กับโครงการขนาดใหญ่

## 6.7 หลักการสร้างบล็อก 3 มิติตามแนวคิดของ Yamatomi et al.

Yamatomi et al. (1994, 1995) ได้ทบทวนขั้นตอนวิธีการของ Wilke and Wright และได้นำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่เพื่อปรับปรุงโปรแกรมพลวัต 3 มิติ ที่มีการขุดเจาะแบบจำลองบล็อกในลักษณะของกรวย ดังที่จะอธิบายในหัวข้อนี้



### 6.7.1 สมมุติฐานใหม่สำหรับแบบจำลองกรวย 3 มิติ

การออกแบบเพื่อปรับปรุงโปรแกรมพลวัต 3 มิติ ที่มีการขุดเจาะแบบจำลองบล็อกในลักษณะของกรวย โดยมีการตั้งสมมุติฐานที่สำคัญเพื่อการตรวจสอบใหม่ ดังนี้

1. มีการพิจารณาว่าบล็อกที่มีมูลค่าเป็นลบ จะถูกนำเข้าไปวิเคราะห์ในหน่วยของกรวย 3 มิติหรือไม่ และหรือ
2. มีการพิจารณาว่าบล็อกที่มีมูลค่าเป็นลบที่อยู่ในหน่วยของกรวย 3 มิติและในการทำเหมืองไม่ถูกขุดเจาะ จะปล่อยทิ้งไว้และมั่นใจได้อย่างไรว่าจะไม่มีโอกาสเกิดผลกระทบต่อค่าความลาดชันของกรวย

### 6.7.2 แบบจำลองกรวย 3 มิติที่ใช้โปรแกรมพลวัต

จากรูปที่ 6.30 มวลสินแร่ที่เป็นบล็อก 3 มิติที่เป็นต้นแบบถูกแบ่งเป็นบล็อกลูกบาศก์ที่กำหนดขนาดให้คงที่เท่ากันทุกบล็อก ในกรณีนี้ทำให้สามารถนิยามตำแหน่ง (location) ของบล็อกขนาดเล็กลงๆ ที่อยู่ในแบบจำลองบล็อกต้นแบบ ได้ดังนี้

ตำแหน่งบล็อกพื้นฐาน  $b_{i,j,k}$  อยู่ที่ “ความลึกจากระดับพื้นผิวบน หรือที่เรียกว่าชั้นระดับ level”, อยู่ในทิศตะวันออกหรือทิศตะวันตก, ทิศใต้ หรือทิศเหนือ

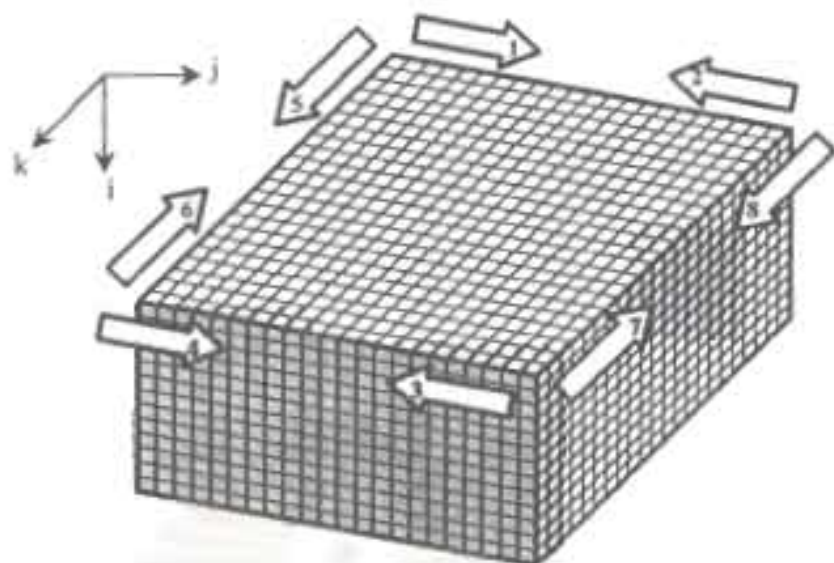
ในรูปที่ 6.30 แสดงโอกาสความน่าจะเป็นเชิง 3 มิติ ที่หากใช้กระบวนการวิเคราะห์หาผลรวมสะสมแบบเดินไปข้างหน้า (forward pass) มีโอกาสเป็นไปได้ 8 รูปแบบตาม หัวลูกศรที่ระบุหมายเลข โอกาสความเป็นไปได้แต่ละรูปแบบไว้

ถ้าหากใช้การวิเคราะห์ตามแนวคิดของ Wilke and Wright มีการสรุปเป็นหัวข้อย่อไว้ดังนี้

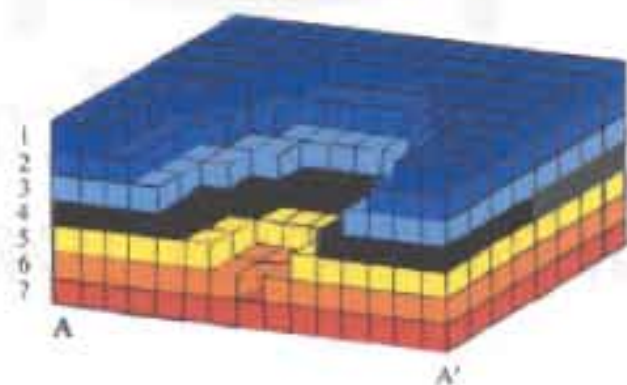
- 1) มีความคล้ายคลึงกับโปรแกรมพลวัต 2 มิติ (Lerchs and Grossmann, 1965) การคำนวณมูลค่าบ่อเหมืองเปิดเริ่มต้นจากจุดปลายด้านหนึ่งของแบบจำลองบล็อก เช่น บล็อก  $b_{1,1,1}$  (มีค่า  $i = 1, j = 1, k = 1$ ) ไปยังจุดปลายด้านตรงข้าม จากแนวตัดขวางหนึ่งไปยังอีกแนวตัดขวางหนึ่ง ( $k = 1, 2, \dots, k_{max}$ ) และการคำนวณของแนวตัดขวางก็เป็นไปตามแนวทิศทางค่า  $j$  ที่เพิ่มขึ้น เช่น จาก  $j = 1, 2, \dots, j_{max}$  หรือตามแนวทิศทางค่า  $j$  ที่ลดลงไป เช่น จาก  $j = j_{max}, \dots, 2, 1$

การวิเคราะห์ตามแนวทิศทางนี้ต้องมีกรเปลี่ยนสลับแนวทิศทางได้ เช่น ถ้าการคำนวณมูลค่าบ่อเหมืองเปิดอยู่ในแนวทิศทางที่เพิ่มค่า  $j$  ในแนวตัดเดิม เมื่อจะทำการคำนวณค่าในแนวตัดใหม่ที่ต่อเนื่องกัน จะต้องอยู่ในแนวทิศทางที่ลดค่า  $j$  ลง

- 2) ผังภาพและบล็อกไดอะแกรมรูปกรวยเชิง 3 มิติ ที่ใช้ในการออกแบบบ่อเหมืองแสดงไว้ในรูปที่ 6.31 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน รูปด้านบนเป็นผังภาพของกรวยที่มีชั้นระดับบนสุด



รูปที่ 6.30 แบบจำลองบล็อก 3 มิติ ตัวเลขที่อยู่ตรงกลางหัวลูกทรงกลมแสดงโอกาสความน่าจะเป็นถึง 8 ทิศทางที่ใช้การวิเคราะห์แบบ forward path



รูปที่ 6.31 ลักษณะที่กรวยกลมถูกนำมาใช้อธิบาย รูปแบบเป็นภาพผังของกรวย และรูปถ่างเป็นภาพตัดขวางในแนว AA'

ที่ระดับชั้นที่ 1 และชั้นระดับที่อยู่ต่ำสุดที่ระดับที่ 7 ส่วนรูปด้านล่างเป็นภาพตัดขวางในแนวที่กำหนด (แนว AA') โดยสเก็ทซ์เป็นรูปบล็อกโดอะแกรมเชิง 3 มิติ

3) มีการกำหนดค่า  $C_{i,j,k}$  เป็นค่ากรวยเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนบล็อก  $b_{i,j,k}$  และ  $P_{i,j,k}$  เป็นมูลค่าบ่อเหมืองเปิดของบล็อก  $b_{i,j,k}$

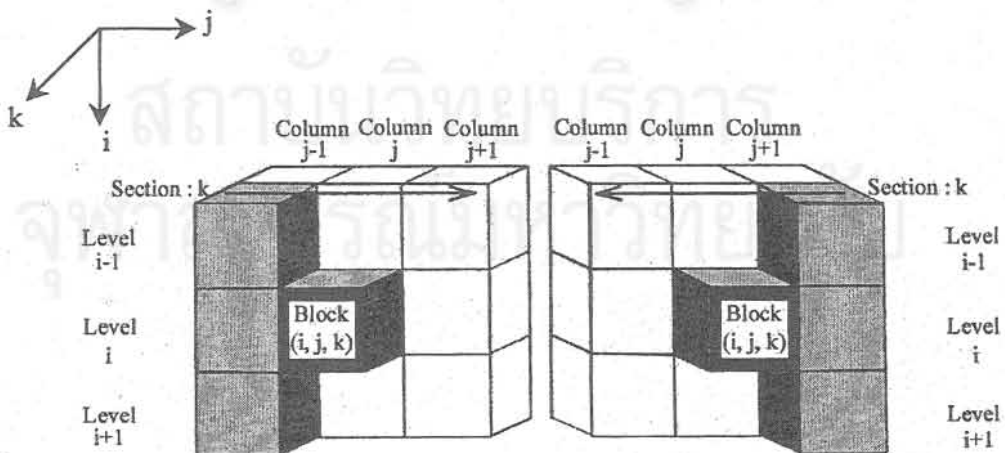
ในการนิยามเพื่อขยายใจความเพิ่มขึ้น มูลค่าบ่อเหมืองเปิด  $[P_{i,j,k}]$  เป็นมูลค่าเชิงเศรษฐกิจทั้งหมดที่เป็นผลจากการประเมินมูลค่ากรวยที่ร่วมกับบล็อก  $b_{i,j,k}$  ถูกขุดเจาะออกมา

ตัวอย่างในรูปที่ 6.32 ถ้าหากกำลังคำนวณมูลค่าบ่อเหมืองเปิดของบล็อก  $b_{i,j,k}$  จะทราบมูลค่าบ่อเหมืองกับมูลค่าบล็อกทั้งหมด ที่ได้ผ่านกระบวนการคำนวณในแนวตัดและในคอลัมน์อื่นมาแล้ว

ตามเงื่อนไขที่ให้ความชันมีอัตราส่วน 1 : 1 บล็อก  $b_{i,j,k}$  จะถูกเคลื่อนย้ายได้ ถ้าหากหนึ่งในสามบล็อกที่อยู่ใกล้เคียงกัน (ดูรูป 6.32) ในระดับ 3 ระดับ คือ  $i-1$ ,  $i$  และ  $i+1$  อยู่ในคอลัมน์ถัดไป คือคอลัมน์  $j+1$  หรือคอลัมน์  $j-1$

จากเหตุผลเชิงตรรกศาสตร์ ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกบล็อกที่อยู่ใกล้เคียงกันจากกลุ่มบล็อกกับคอลัมน์ทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม  $(i-1, j \pm 1, k)$ ,  $(i, j \pm 1, k)$ , and  $(i+1, j \pm 1, k)$  และ สมการที่ 6.11 ในหัวข้อที่ได้อธิบายมาแล้ว สามารถใช้ได้และนำมาเขียนซ้ำอีกที่ข้างล่าง

4) กรณีนี้ไม่เป็นเรื่องผิดปกติที่กรวยสามารถจะก่อกำเนิด (generate) ไปยังบล็อกที่ผูกพันกันในลักษณะซ้อนเหลื่อมกัน (overlap) มูลค่าเชิงเศรษฐกิจของกรวยที่เป็นค่า  $C_{i,j,k}$  ต้องถูกปรับค่าเข้าไปก่อนที่จะคำนวณหาค่าสูงสุด ไม่ใช่ไปรวมในขณะที่ในช่วงที่มีการซ้อนเหลื่อมเพื่อคำนวณหามูลค่าเชิงเศรษฐกิจของบ่อเหมืองเปิด [ค่า  $P_{i,j,k}$ ]



รูปที่ 6.32 โอกาสของการจัดหมู่ที่มีความน่าจะเป็นไปได้ สำหรับ บล็อก 3 บล็อกที่เป็นบล็อกข้างเคียง ตามวิธี DC/W

พจน์ที่สองด้านขวาของสมการที่ 6.11 เช่นพจน์  $P_{i-1,j\pm 1,k} \cap C_{i,j,k}$  แทนการปรับแก้ตามเงื่อนไขข้างต้นดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการนับมูลค่าบล็อกเชิงเศรษฐกิจใดๆ มากกว่าหนึ่งครั้ง

5) กระบวนการในหัวข้อย่อย 3-4 เป็นการหาผลรวมสะสมในรูปแบบที่แนววิเคราะห์ข้างหน้า (forward pass) หลังจากวิเคราะห์จนจบแล้ว ทำให้ได้มูลค่าบ่อเหมืองเปิดที่อยู่จุดปลายอีกด้านหนึ่งของบล็อก [บล็อกที่มีค่า  $i=1, j=j_{\max}, k=k_{\max}$ ]

ถ้าตัวเลขของ  $k_{\max}$  เป็นเลขคู่ สามารถคาดคะเนได้ว่า ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จะให้มูลค่าบ่อเหมืองเปิดที่มีค่าสูงสุด

นอกจากนี้เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่เป็นโครงร่างของขอบบ่อเหมืองเปิด ควรทำการวิเคราะห์ในรูปแบบที่แนววิเคราะห์ย้อนหลัง (backward pass) เพื่อทำให้เกิดการจัดหมู่ (combination) ที่ให้ผลลัพธ์ในเชิงที่เหมาะสมที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่บล็อกที่อยู่ปลายสุดด้านหนึ่งถึงบล็อกที่อยู่ตำแหน่งตั้งต้น

### 6.7.3 ขั้นตอนกรวยเชิงพลศาสตร์ตามแนวคิดของ Yamatomi et al.

จากผลการวิจัยในระยะหลัง Yamatomi et al. พบว่าขั้นตอนวิธีของ Wilke and Wright เป็นการใช้โปรแกรมพลวัตแก้ปัญหากรวยเชิงพลศาสตร์ 3 มิติด้วยวิธีหนึ่งหรือที่เรียกชื่อวิธีนี้สั้นๆว่า วิธี DC/W (dynamic cone algorithm proposed by Wilke and Wright) ภายหลังการวิเคราะห์พบว่า ให้ค่าผลกำไรน้อยกว่าใช้ขั้นตอนวิธีอื่น ที่ใช้การใช้วิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมที่เป็นเทคนิคในการให้กรวยเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตลอดเวลา (positive moving cone technique : PMC) หรือวิธีที่ Yamatomi et al. นำเสนอเทคนิคที่เป็นการเลือกที่จะขุดเจาะภายในกรวยเคลื่อนที่ (selective extraction moving cone technique : SEMC)

รายละเอียดเพื่อเปรียบเทียบว่า วิธี DW/C (ดูรูปที่ 6.32) มีข้อดีอย่างไรที่นำเสนอใหม่ของ Yamatomi et al. (รูปที่ 6.33) ในบทความวิจัยฉบับเดิมของ Yamatomi et al. ได้แสดงไว้เป็นตารางกับรูปประกอบ ที่ได้นำเสนอในปี 1995 หน้า 268—272 ทั้งนี้ผู้วิจัยโครงการนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องแล้ว และขอสรุปเหตุผลสั้น ๆ ที่อธิบายข้อดีของวิธี DW/C ดังกล่าว ดังนี้

1) วิธี DW/C มีวิธีการวิเคราะห์ได้ 8 ทิศทาง ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ไม่ควรมีความแตกต่างกันมากระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด แต่ Yamatomi et al. ได้แสดงผลเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์รูปแบบอื่น พบว่าวิธี DW/C ให้ผลลัพธ์ที่ช่วงแตกต่างกันมาก (ระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด) กว่าวิธีอื่น

2) วิธีของ DW/C มีเงื่อนไขบังคับที่ต้องเลือกบล็อกที่อยู่ถัดไป เป็นบล็อกที่อยู่ในชั้นระดับ  $k$  แต่ไม่มีการหาบล็อกที่อยู่บล็อกที่อยู่ถัดไปที่ระดับ  $(k-1)$  ที่อาจเป็นบล็อกที่มีโอกาสเป็น

ไปได้ (possible blocks) หรือกล่าวโดยสรุปก็คือ การจัดหมู่ใหม่ตามแนวคิดของ Yamatomi et al. ระหว่างบล็อกที่อยู่ข้างเคียงกับบล็อก  $b_{i,j,k}$  ควรมีทั้งหมด 12 บล็อก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.33

วิธีการที่นำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์แบบมี 12 บล็อกข้างเคียง (Yamatomi et al., 1994, 1995) ถูกเรียกสั้นๆ ว่าวิธี DW/SS (dynamic cone technique, section by section) และกำหนดสมการเวียนเกิดซ้ำที่สอดคล้องกับรูปที่ 6.33 ในรูปใหม่เป็น

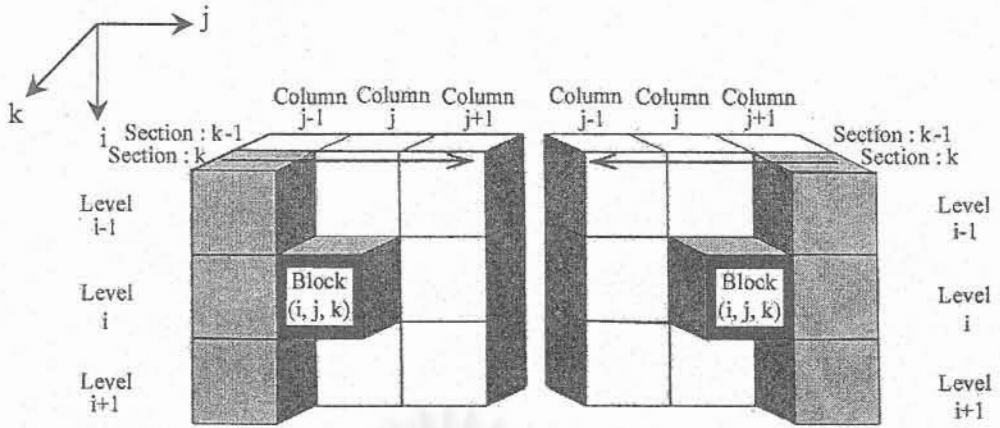
$$P_{i,j,k} = C_{i,j,k} + \max \left\{ \begin{array}{l} P_{i-1,j\pm 1,k} - P_{i-1,j\pm 1,k} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i,j\pm 1,k} - P_{i,j\pm 1,k} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i+1,j\pm 1,k} - P_{i+1,j\pm 1,k} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i-1,j-1,k-1} - P_{i-1,j-1,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i,j-1,k-1} - P_{i,j-1,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i+1,j-1,k-1} - P_{i+1,j-1,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i-1,j,k-1} - P_{i-1,j,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i,j,k-1} - P_{i,j,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i+1,j,k-1} - P_{i+1,j,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i-1,j+1,k-1} - P_{i-1,j+1,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i,j+1,k-1} - P_{i,j+1,k-1} \cap C_{i,j,k} \\ P_{i+1,j+1,k-1} - P_{i+1,j+1,k-1} \cap C_{i,j,k} \end{array} \right\} \quad (6.12)$$

ข้อเสียของการคำนวณด้วยวิธี DC/SS นี้คือ เวลาที่ใช้ในกระบวนการคำนวณมีช่วงระยะเวลาที่ใช้มากกว่าวิธี DC/W ถึง 4 เท่า แต่อาจแก้ไขโดยใช้เทคนิคพิเศษที่ให้วิถีที่เหมาะสมที่สุด (optimum path) สั้นลง สามารถทำได้โดยนำบล็อกที่อยู่ในแนวคิดขวางก่อนหน้า (preceeding section) จัดเข้าไปอยู่กลุ่มที่มีโอกาสเป็นไปได้ (possible or candidate group) เพื่อลดเวลาในการคำนวณลง

#### 6.7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลตามแนวคิดของ Yamatomi et al.

วิธีนี้เป็นการปรับปรุงวิธีการแบบดั้งเดิม ที่เป็นแบบ positive moving cone ตัวอย่างแสดงไว้เป็นลำดับขั้นตอนตั้งแต่รูปที่ 6.34 a ถึงรูปที่ 6.34 c ซึ่งเน้นให้เห็นถึงปัญหาของวิธีการเคลื่อนย้ายกรวยแบบเก่า ถึงแม้ว่าแบบจำลองบล็อกที่แสดงเป็นภาพ 2 มิติ แต่ก็สามารถที่จะนำมาใช้กับแบบจำลอง 3 มิติ ได้





รูปที่ 6.33 โอกาสของการจัดหมู่ที่มีความน่าจะเป็นไปได้ สำหรับ บล็อก 12 บล็อก ที่เป็นบล็อกข้างเคียง ตามวิธี DC/SS

จากรูปที่ 6.34 a กับรูปที่ 6.34 b มีบล็อกที่มีมูลค่าเป็นบวก ได้แก่ บล็อก  $b_{4,4}$  กับบล็อก  $b_{4,6}$  ถ้าหากทำการวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบเดิม จะพบว่าไม่สามารถจะขุดเจาะบล็อกหนึ่งบล็อกใดออกมาได้ (ถ้าแยกออกจากกัน) เพราะมูลค่าสะสมของการขุดเจาะโดยใช้กรวยเคลื่อนที่ (ในรูปที่ 6.34 b) เป็น  $-5$  กับ  $-1$  ตามลำดับ หมายความว่า การขุดเจาะต้องหยุดที่ระดับชั้น  $i = 4$  ทำให้ไม่สามารถที่จะนำบล็อกใดในแบบจำลองที่อยู่ข้างใต้ออกมาได้

ถ้าหากยินยอมให้การจำลองกระบวนการนี้เดินหน้าต่อไปนี้ จนถึงระดับชั้นที่  $i = 5$  จากนั้นทดลองใช้วิธีการเดิม (ภาพด้านซ้ายของรูปที่ 6.34 c) พบว่าวิธี PMC ให้มูลค่าสะสมจากการขุดเจาะได้ฐานบล็อก  $b_{5,5}$  เป็นค่า  $+1$  ซึ่งเป็นโอกาสที่ไม่พบบ่อยนัก เพราะถ้าบล็อก  $b_{5,5}$  มีมูลค่าเป็น  $-2$  (แทนที่จะเป็น  $-1$ ) การขุดเจาะด้วยวิธีนี้ไม่ได้ผลตอบแทนเป็นกำไรเลย

ต่อมาทดลองทำการขุดเจาะ 2 บล็อกร่วมกันในเวลาเดียวกันที่ระดับ  $i = 4$  ปรากฏว่ามีผลลัพธ์เป็นมูลค่าสะสมเท่ากับ  $+2$  ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกับมูลค่าบล็อก  $b_{5,5}$  เลย (ในทางด้านมูลค่าลบหรือบวก)

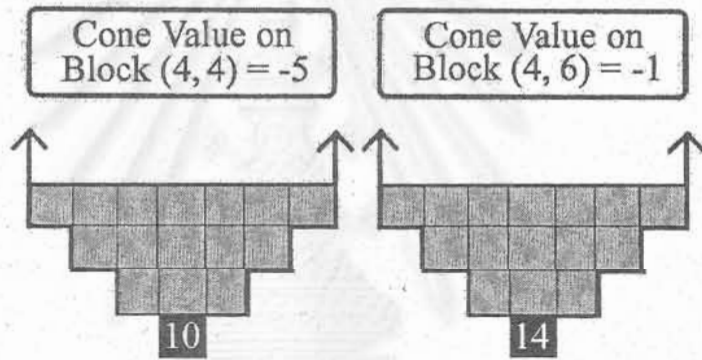
Yamatomi et al. (1995) เสนอแนะวิธีการแยกบางส่วน (partial extraction) ของกรวยออก เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นของวิธีการเคลื่อนที่ ตามตัวอย่างที่อธิบายมาก่อนหน้านี้

จากการพิจารณาใหม่อีกครั้ง บล็อกที่  $i = 4$  และ  $i = 5$  มีมูลค่าลบ ได้แก่  $b_{5,5}$  (มูลค่า  $-1$ ) และ  $b_{5,5}$  โดยไม่มีการยกออก (หรือขุดเจาะ) เพราะว่่าบล็อกทั้งสองนี้ไม่ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เป็นความลาดชันหน้าเหมืองเลย (อยู่ตรงกลางกรวย)

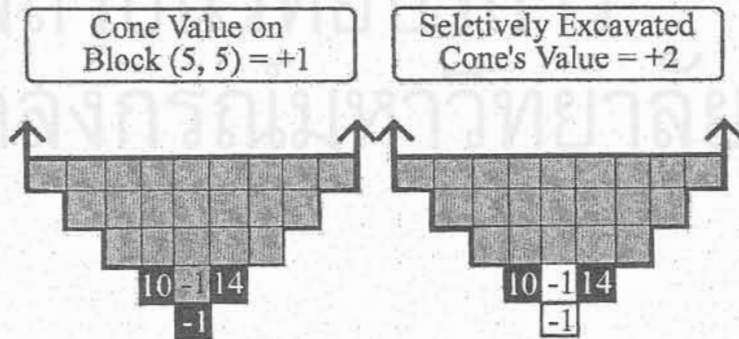
ในทางตรงกันข้าม บล็อก  $b_{3,3}$  (มูลค่า  $-1$ ) และ  $b_{3,7}$  (มูลค่า  $-1$ ) จำเป็นต้องขุดเจาะออก เพราะถ้าปล่อยไว้จะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพหน้าเหมือง เนื่องจากไม่สามารถทำให้ความลาดชันมีอัตราส่วนที่ 1:1 ตามข้อกำหนดไว้ (เพราะอยู่ริมขอบกรวย)

		j								
i		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2			-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
3				-1	-1	-1	-1	-1		
4					10	-1	14			
5						-1				

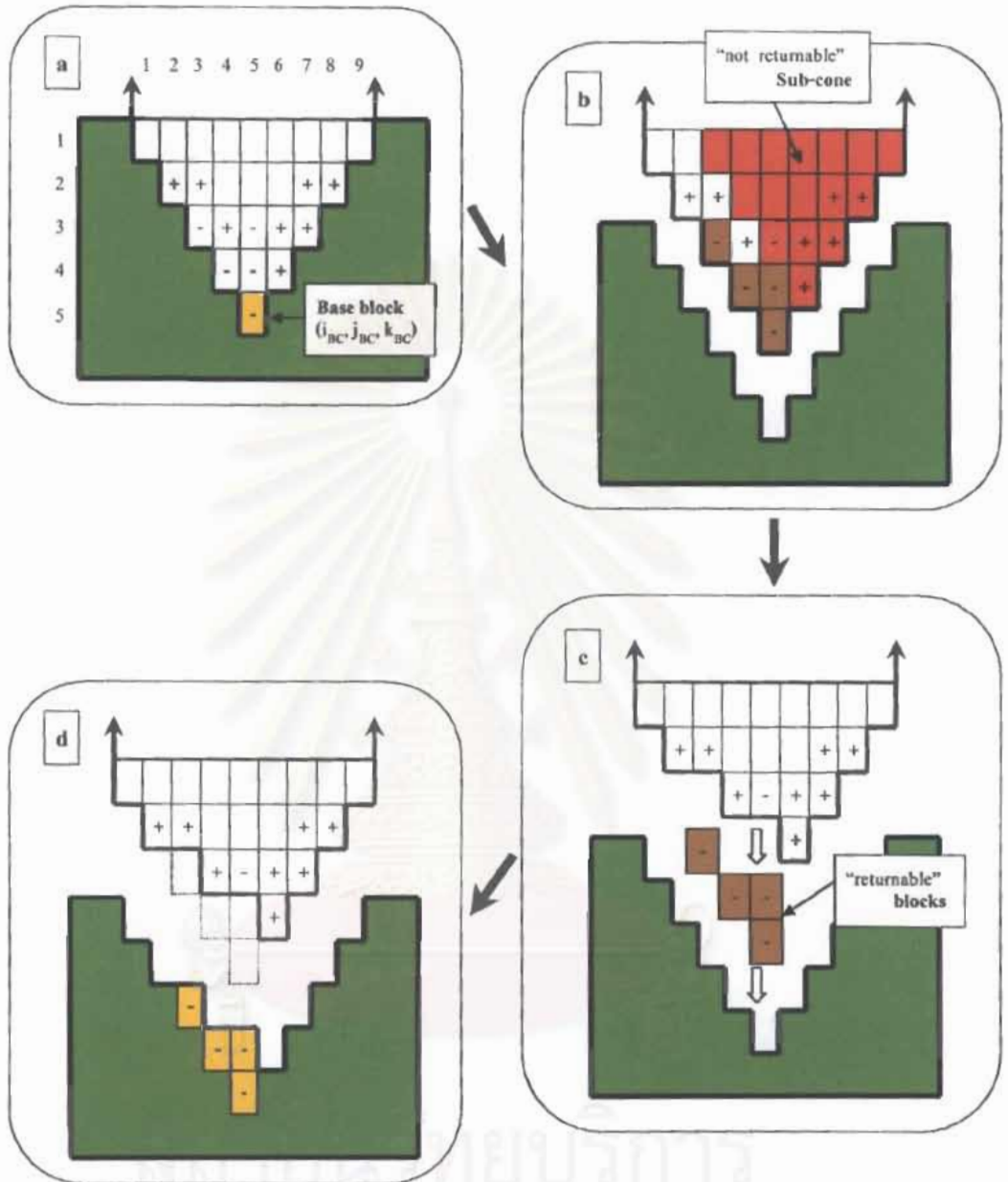
รูปที่ 6.34 a ภาพตัดขวางกลุ่มบล็อกที่สมมติเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์



รูปที่ 6.34 b ผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์แยกส่วนเป็นกรวย 2 กรวย สำหรับบล็อก  $b_{4,4}$  กับบล็อก  $b_{4,6}$



รูปที่ 6.34 c ผลลัพธ์ที่เกิดจากการเลือกวิเคราะห์แบบใหม่ที่ใช้การขุดเจาะร่วมกันระหว่างบล็อก 2 บล็อกที่อยู่ระดับชั้นเดียวกัน



รูปที่ 6.35 แผนภาพเต็ร่างเพื่อแสดงเป็นตัวอย่างของขั้นตอนวิธี

Selectively Extraction Dynamic Cone

การสร้างโปรแกรมย่อยที่เป็นรoutines (routine) ใช้สำหรับเลือกแยกส่วนกรวยออกเช่นในกรณีทีกล่าวข้างต้น รูปที่ 6.35 เป็นแผนภาพเค้าร่าง (schematic plan) ในการเขียนโปรแกรมย่อยที่เป็น routine สำหรับการเลือกเพื่อแยกส่วนดังกล่าว โดยผู้วิจัยได้สรุปขั้นตอนย่อยตั้งแต่ขั้นตอนย่อย a ถึง d ในรูปที่ 6.35 ไว้ดังนี้

a) ลำดับเค้าร่างแรก เป็นขั้นตอนย่อยของ step a ที่ใช้ตรวจสอบมูลค่าพื้นฐานของบล็อกที่อยู่ในระดับต่ำสุดของกรวย ที่เรียกว่า บล็อกพื้นฐาน (base block) ใช้สัญลักษณ์ของฐานบล็อกของกรวยทั้ง 3 มิติเป็น  $i_{BC}$ ,  $j_{BC}$ ,  $k_{BC}$  ถ้าหากพบว่าบล็อกนี้มีมูลค่าวกกระบวนการในการค้นหาบล็อกเพื่อส่งคืนกลับ (returnable blocks) ของ routine ก็จะหยุดการทำงาน

ถ้าหากพบว่ามูลค่าบล็อกที่อยู่บนฐานกรวยมีค่าเป็นลบ ให้ปล่อยทิ้งไว้ (ไม่มีการขุดเจาะทำเหมือง) หลังจากนั้นก็ตรวจสอบบล็อกที่อยู่ระดับบน (upper level) ของบล็อกล่างสุดที่เป็นฐานนี้ ซึ่งได้แก่บล็อกที่มี  $i = 4$  เขียนสัญลักษณ์เป็นรูปแบบใหม่ว่า เป็นบล็อกที่มี  $i = i_{BC} - 1$  (ดูรูป 6.35 a ที่แสดงในขั้นตอนย่อยของ step a)

b) ลำดับเค้าร่างที่สอง ทำการเลื่อนการค้นหาต่อไปที่ระดับสูงขึ้นไปเพื่อตรวจสอบว่ามีบล็อกที่มีมูลค่าเป็นลบต้องส่งคืนกลับหรือไม่ จนกระทั่งถึงบล็อกที่อยู่ในระดับบนสุด (top level) ของแบบจำลองนี้ ถ้าหากมูลค่าบล็อกใดบล็อกหนึ่งที่  $i < i_{BC}$ ,  $j$ ,  $k$  มีค่าบวก ให้แสดงแนวขอบเขต (tagging) ของกรวยไว้ เพื่อแสดงเป็นส่วนของกรวยย่อย (sub-cone) ซึ่งในรูปที่ 6.35 step b แสดงเป็นบล็อกที่มีจุดเล็กๆ อยู่ภายใน (ให้สังเกตว่าบล็อก  $b_{3,5}$  อยู่ในกรวยย่อยด้วย)

กลุ่มบล็อกที่มีจุดเล็กๆ อยู่ภายในเป็นส่วนที่ไม่ต้องการส่งกลับ เพราะประกอบกันเป็นกรวยย่อยที่ต้องขุดเจาะแล้ว นอกจากนี้ส่วนประกอบบล็อกของกรวยย่อยยังมีอัตราส่วนความลาดชันตามเงื่อนไขที่กำหนด

c) ลำดับเค้าร่างที่สาม หลังจากที่ได้เริ่มต้นกระบวนการใน step แล้ว บล็อกที่เป็นส่วนหนึ่งของกรวย 3 มิติเดิม แต่ไม่ได้รับการ tagging แสดงขอบเขตไว้ จะถูกนิยามเป็นบล็อกที่ถูกส่งคืนกลับ (returnable blocks) ซึ่งเป็นขั้นตอนย่อยของ step c ในรูปที่ 6.35 c

d) ลำดับเค้าร่างที่สี่ บล็อกที่ถูกส่งคืนกลับ ไม่ได้เป็นส่วนประกอบของกรวยย่อยอีกต่อไปและมูลค่าของบล็อกที่ส่งคืนกลับไม่ถูกขุดเจาะเป็นค่าลบ ดังนั้นด้วยเหตุผลเชิงตรรกศาสตร์จึงต้องกลับเครื่องหมายของตัวเลขมูลค่าเดิมเป็นบวก และนำไปรวมกับมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของกรวยบนฐานตำแหน่งพิกัด  $i_{BC}$ ,  $j_{BC}$ ,  $k_{BC}$  ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.35 d เป็นขั้นตอนย่อยใน step d

## บทที่ 7

### การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพิ่มเติม

กลยุทธ์การออกแบบ (design approach) เพื่อหาโครงร่างที่เหมาะสมที่สุดในบทนี้เป็น การอธิบายขั้นตอนวิธีที่มีการเผยแพร่ในปัจจุบัน เนื้อหาในส่วนนี้ช่วยทำให้รายงานวิจัยโครงการนี้ มีความสมบูรณ์และทันสมัยมากขึ้น ข้อดีของแนวทางการออกแบบที่นำเสนอเพิ่มเติมนี้ ได้แก่ ความพยายามปรับแก้ไขให้มีรูปแบบหลากหลายมากกว่าเดิม และรูปแบบเชิงเรขาคณิตของหน้าเหมืองมีความใกล้เคียงกับการปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม อย่างไรก็ตามเนื่องจากแนวทางที่ระบุในบทนี้ค่อนข้างเป็นแนวคิดที่ค่อนข้างใหม่ยังไม่มีผู้นำไปใช้มากนัก การวิเคราะห์ผลลัพธ์มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น ถึงแม้ว่าในการนำเสนอ ผู้วิจัยโครงการนี้พยายามหาจุดบกพร่องดังกล่าว แต่ข้อมูลดิบที่เป็นตัวแปรบางค่าเป็นสิ่งที่ระบุไว้ในเอกสารหรือบทความแล้วว่ามีค่าของตัวแปรข้อมูลเข้า (input) เป็นค่าเท่าไรหรือกำหนดไว้ในลักษณะนั้น สิ่งที่ได้คือการตรวจทานสมมุติฐาน สมการหาผลเฉลย และแก้ไขตัวเลขที่มีการพิมพ์ในเอกสารต้นฉบับไม่ถูกต้องเท่านั้น

#### 7.1 วิธีการปรับเปลี่ยนค่ามุมความลาดชันของบ่อเหมืองเปิด

การหาผลเฉลยโดยการใช้กลุ่มบล็อกที่เป็นตัวแทนของวัสดุที่ต้องขุดเจาะ และตั้งสมมุติฐานให้การขุดเจาะบล็อกมีความลาดเอียงที่อัตราส่วน 1:1 หรือมีค่ามุมความชันที่ 45 องศา ถ้าหากสามารถทำให้มุมของการตัดความลาดสูงกว่านี้ จะลดค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะบ่อเหมืองเปิดให้ต่ำลงไปอีก ผลตอบแทนที่เป็นจำนวนเงินรับสุทธิจะสูงมากขึ้น

ในสภาพความเป็นจริง ถ้าหน้าเหมืองมีความชันมากขึ้น เปรอร์เซ็นต์ความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะเกิดการพังทลายมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ในตลอดอายุการพัฒนางานเหมือง ดังนั้นผู้ออกแบบจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถทำให้ความลาดชันของบ่อเหมือง มีค่าสูงไม่เกินค่าขีดจำกัดที่เหมาะสมของเสถียรภาพและความปลอดภัยหน้างานขุดเจาะ

ขั้นตอนวิธี (algorithm) ของการออกแบบมีเงื่อนไขบังคับของการขุดเจาะบล็อกที่นำออกจากบ่อเหมืองเปิด ต้องมีการเปิดบล็อกที่วางตัวด้านบนใกล้พื้นผิวดินที่ขวางออกก่อนและ



กำหนดค่าอัตราส่วนของมุมความชันให้คงที่ ทำให้มีปัญหาต่อการขุดเจาะในพื้นที่ที่โครงสร้างของมวลดินเริ่มมีรูปร่างไม่แน่นอน หรือในธรรมชาติมวลดินแร่ถูกคลุมทับด้วยส่วนที่เป็นกากในระดับลึกที่แตกต่างกันในแต่ละแนวทิศทางโดยรอบ 360 องศา ดังนั้นการตั้งสมมุติฐานให้มุมความชันในแต่ละแนวทิศทางของการขุดเจาะบ่อเหมืองมีค่าไม่เท่ากัน จึงเป็นสิ่งที่น่าเป็นประโยชน์และใช้ปฏิบัติจริงในภาคสนามอยู่แล้ว

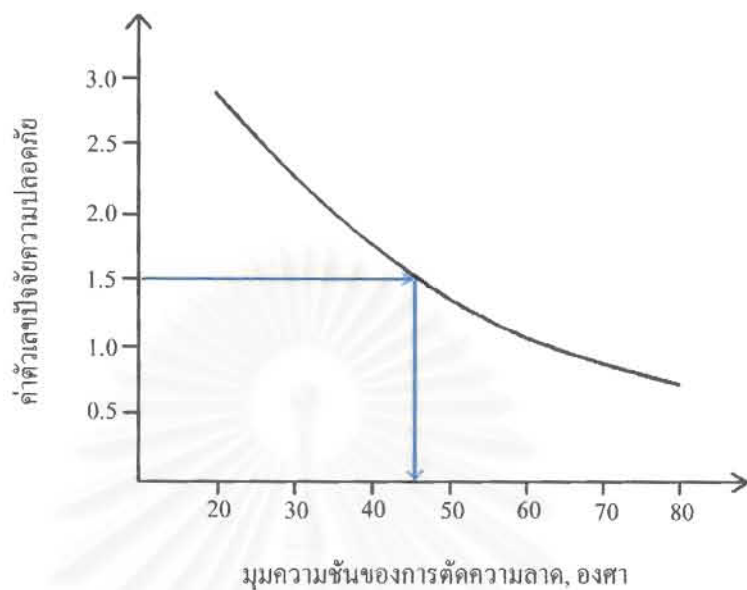
## 7.2 วิธีปรับแก้มุมความลาดชันของ Onur และ Khalokakaie

การออกแบบโครงสร้างบ่อเหมืองเปิดที่ได้สรุปและนำเสนอไว้ในหัวข้อนี้ อิงตามผลงานวิจัยของ Onur (1992) และ Khalokakaie (1999) กับบทความวิจัยของ Onur and Dowd (1992) และ Khalokakaie et al. (2000) ทั้งนี้ผู้วิจัยโครงการนี้มีการปรับแก้ดัดแปลงไปจากเดิมเพื่อเสริมเนื้อหาให้สมบูรณ์ขึ้นเท่าที่จำเป็น

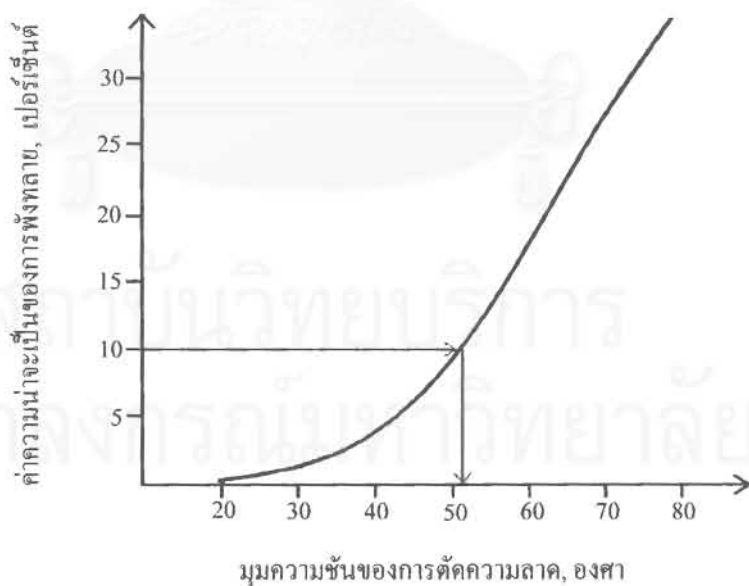
### 7.2.1 การคำนวณค่ามุมความชันของการตัดความลาด

แนวทางการคำนวณค่ามุมความชันนี้ ใช้กับการตัดชั้นตะพักในบ่อเหมืองเปิด (ทั้งที่เป็นเหมืองหินหรือเหมืองแร่) หรือใช้กับการตัดชั้นตะพักบริเวณที่เนินเชิงเขา วิธีการประเมินค่าเชิงเสถียรภาพควรใช้ทั้ง 2 แบบ ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic stability analysis) ซึ่งผู้วิจัยโครงการนี้เคยทำการวิจัยและนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ผลลัพธ์ทั้ง 2 รูปแบบ รายละเอียดดังกล่าวระบุไว้ในบทที่ 4 รายงานผลวิจัย โครงการเรื่อง “การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดินและใต้พื้นผิวดิน” (สง่า ตั้งชวาล, 2544) มีการลำดับวิธีวิเคราะห์แยกไว้ ตั้งแต่การพังทลายในมวลดิน (หรือมวลหิน) ที่มีรูปแบบเชิงเรขาคณิตอย่างง่ายไป จนถึงการพังทลายที่มีรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่ยุ่งยากซับซ้อน

ดังนั้นค่ามุมความชันในการตัดความลาดของชั้นตะพักในเหมือง ที่มีการพัฒนาเป็นรูปแบบขั้นบันได ควรมีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดและเชิงความน่าจะเป็นควบคู่กัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจเลือกมุมความชันของหน้าเหมือง ที่วิศวกรได้กำหนดค่าความสูงในแนวตั้งของชั้นตะพักไว้แล้ว ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ในหน้าถัดไป เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่ามุมความชันไว้ทั้ง 2 แบบ (รูปที่ 7.1 และ 7.2) ในเชิงอนุรักษ์ถ้าหากไม่มีข้อจำกัดด้านความคุ้มทุนของการขุดเจาะ ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกค่ามุมความชันของการตัดความลาดที่น้อยหรือต่ำกว่า



รูปที่ 7.1 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดของค่ามุ่มความชันที่อิงกับค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย



รูปที่ 7.2 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นของค่ามุ่มความชันที่อิงกับค่าเปอร์เซ็นต์โอกาสของการพังทลาย

## 7.2.2 การปรับแก้มุมความชันจากผิวดินถึงก้นบ่อ

การดำเนินงานเปิดหน้าเหมืองแบบขั้นบันได ค่าตัวแปรที่สำคัญเป็นมุมโดยรวมของความลาดชันของบ่อเหมือง (overall slope angle in the pit) ในแต่ละแนวทิศทางการทำกราดขุดเจาะ (ดูรูปที่ 7.3) เนื่องจากมวลสินแร่เป็นมวลสาร 3 มิติ จึงไม่สามารถกำหนดแนวตัดขวางเพียงแนวทิศทางการเดียวและใช้ได้ตลอดการพัฒนาหน้างาน ผลของการเปิดหน้างานในลักษณะเป็นบ่อเหมือง ทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องคำนวณค่ามุมความชันทุกทิศทางหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่ามุมความชันโดยรวมต้องมีการระบุไว้ทุกค่าของแนวทิศทางการเอียงเทของโครงสร้างหิน (dip direction) หรือทิศทางในแนวภาพตัดขวางตามที่กำหนดรอบบ่อเหมือง

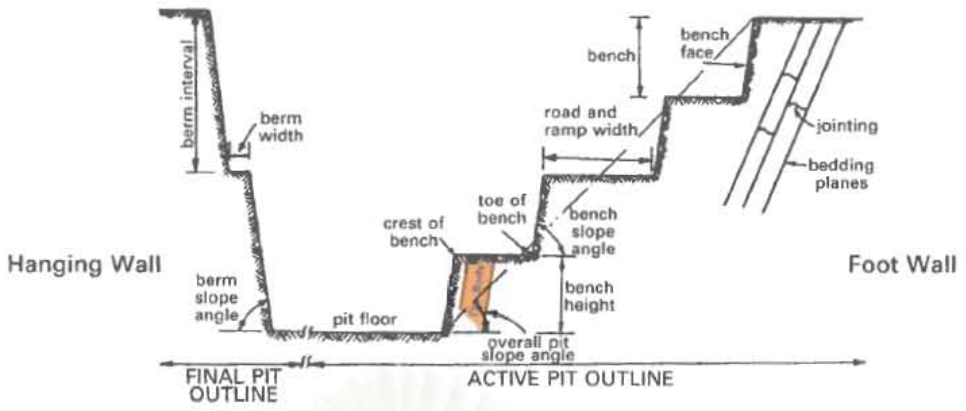
ตัวอย่างในรูปที่ 7.4 สมมติว่าบริเวณพื้นที่ก้นบ่อเหมืองเป็นวงกลม (circular-floored excavation) กำหนดไว้ให้มีการตัดชั้นตะพักเพียง 1 ระดับชั้นและให้คำนวณค่ามุมความชันทุกช่วงของ 15 องศาของแนวทิศทางการทำภาพตัดขวาง ดังนั้นจึงต้องทราบค่ามุมความชัน (slope angle) ทุกค่า dip directions หรือทุกค่าแนวทิศทางการทำภาพตัดขวางที่  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ, 345^\circ$  ตลอดทั้งบริเวณรอบบ่อเหมือง

จากการพิจารณาผังภาพของรูปที่ 7.4 ค่ามุมความชันโดยรอบบ่อเหมืองมีหลายค่าระหว่างค่าที่  $35^\circ$  จนถึง  $74^\circ$  ถ้าหากใช้ค่ามุมเพียงค่าเดียวที่  $35^\circ$  หรือเส้นโครงร่างขอบนอก (ที่เป็น crest) ของบ่อเหมืองเป็นวงกลมด้วย ข้อมเป็นหลักประกันในเรื่องความปลอดภัยได้ดี แต่ปริมาณของมวลสารที่ต้องขุดเจาะและนำออกจากบ่อเหมืองข้อมมีมากขึ้น ดังนั้นผลเฉลยที่ดีอีกแบบหนึ่ง ได้แก่ การใช้โครงร่างขอบบ่อด้านนอกเป็นวงรี (ellipse) ทำการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของผังบ่อเหมืองโดยแบ่งส่วนออกเป็น 4 จตุภาค (quadrant) กับมีค่าตัวแปรมุมความชันในแต่ละจตุภาคมี 6 ค่า กำหนดแนวทางวิเคราะห์ผลของแต่ละจตุภาคแบ่งเป็น 2 ทางเลือก

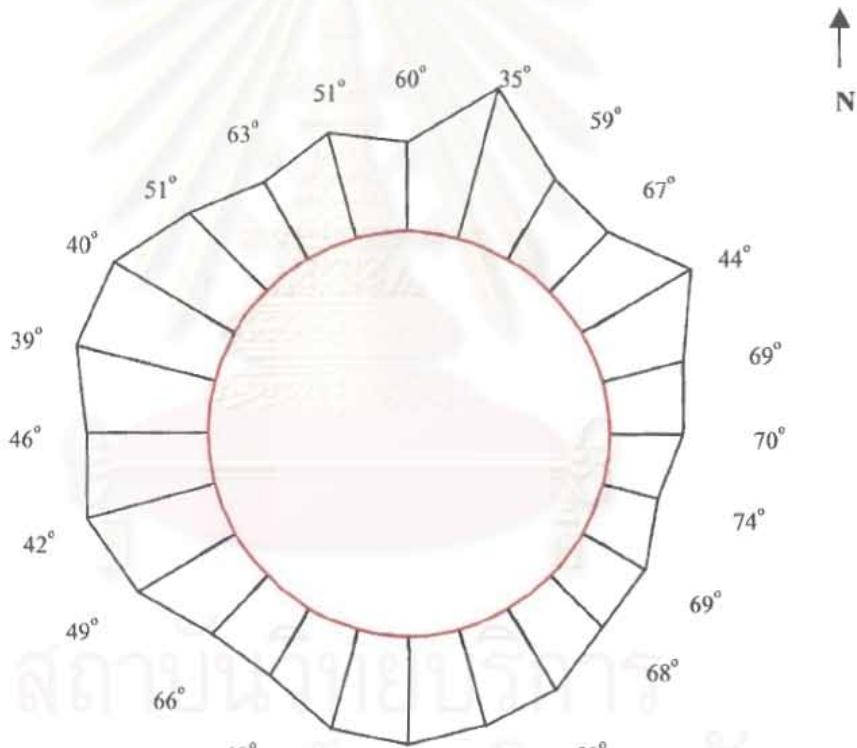
การวิเคราะห์ในแนวทางเลือกแรก ค่ามุมความชันที่ (เล็กสุด) ต่ำสุดที่อยู่ในจตุภาคนั้น ถูกเลือกเป็นค่าตัวแทนของพื้นที่รอบบ่อเหมืองในจตุภาคนั้น (ดูรูปที่ 7.5 a) ดังนั้นในจตุภาคที่หนึ่งของผังบ่อเหมืองรูปที่ 7.4 จะได้ค่ามุมความชันที่  $35^\circ$  เป็นตัวแทน การวิเคราะห์อีกแบบที่เป็นทางเลือกที่สอง กำหนดให้การขุดเจาะรอบบ่อเหมืองเป็นวงรี ดังนั้นในแต่ละจตุภาคจะมีค่ากึ่งแกนเอก (semi-major axis) กับค่ากึ่งแกนโท (semi-minor axis) ซึ่งสามารถหาจาก ค่ามิติเชิงเรขาคณิตของความลาดหน้าเหมือง กับการใช้สมการวงรีเพื่อหาผลเฉลยที่เป็นค่ากึ่งแกนเอก (ค่าตัวแปร a ของรูปที่ 7.5 a) กับค่ากึ่งแกนโท (ค่าตัวแปร b ของรูปที่ 7.5 b)

สมการหาค่าพิกัดของค่า d ที่เป็นระยะในแนวราบของผังจากตำแหน่งของจุดต่ำสุดที่เรียกว่า toe ไปยังจุดยอดปลายที่เป็นจุดสูงสุดที่เรียกว่า crest ของความลาดคือ

$$d = \frac{h}{\tan \alpha}, \quad x = d (\sin \theta), \quad y = d (\cos \theta) \quad (7.1)$$

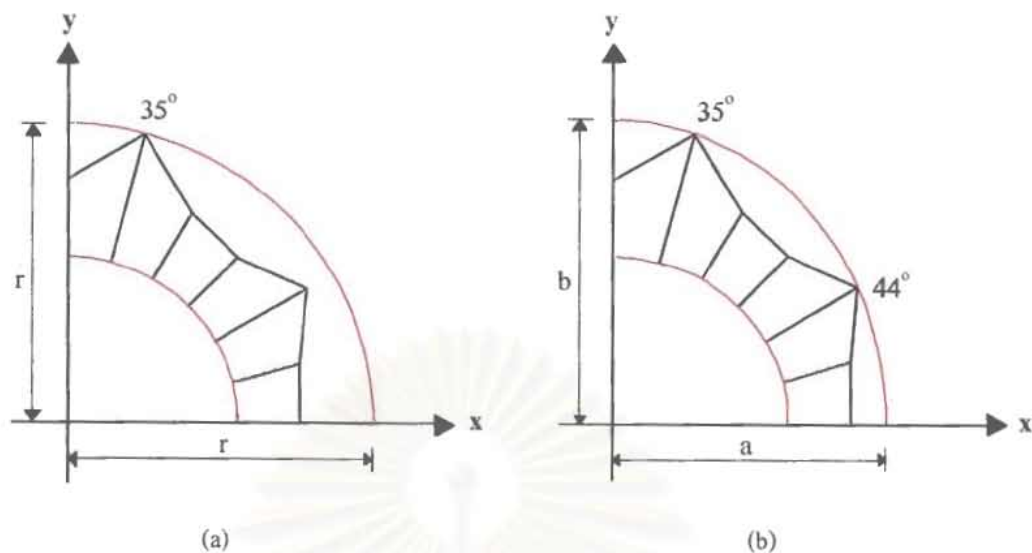


รูปที่ 7.3 การเปิดหน้างานเหมืองที่มีการขุดเจาะแบบตัดชั้นตะพักเป็นชั้นบันไดมุมความชันโดยรวมจะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความชันแต่ละระดับชั้น

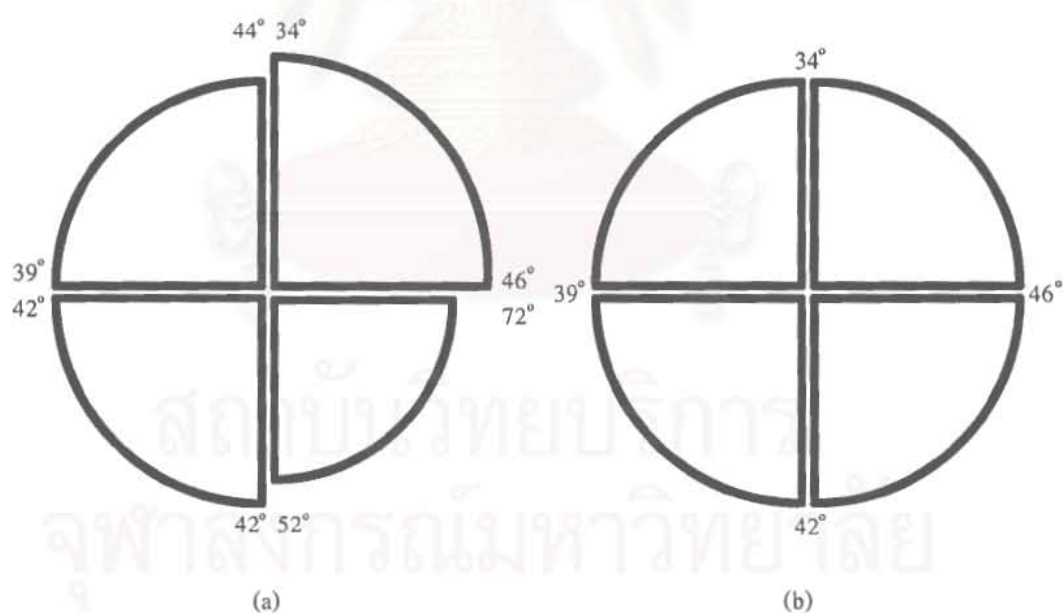


- จุดต่ำสุดของความลาด (slope toe)
- จุดสูงสุดของความลาด (slope crest)

รูปที่ 7.4 ตัวอย่างผังภาพแสดงค่ามุมความชัน โดยรอบบ่อเหมืองรูปวงกลมในรูปกำหนดให้มีการตัดชั้นตะพัก (bench) เพียงชั้นเดียว



รูปที่ 7.5 การปรับแก้ค่ามุมความชันของผังบ่อเหมืองในแต่ละจุดภาค ผังภาพ 7.5 a เป็นการปรับแก้แบบรูปวงกลม ผังภาพ 7.5 b เป็นการปรับแก้รูปวงรี



รูปที่ 7.6 การปรับแก้ค่ามุมความชันของผังบ่อเหมืองในแต่ละจุดภาค ผังภาพ 7.6 a เป็นค่ามุมความชันที่แสดงบนจุดปลายแต่ละจุดภาครอบบ่อเหมืองก่อนมีการปรับแก้ ผังภาพ 7.6 b เป็นการปรับแก้ค่ามุมความชันของทั้ง 4 จุดภาคแล้ว



นิยามของพจน์ตัวแปร  $h$  เป็นค่าความสูงในแนวตั้งของความลาด ส่วนพจน์  $\alpha$  เป็นค่ามุมความชัน และ  $\theta$  เป็นค่าแนวทิศทางการเอียงเทหรือแนวทิศทางที่ทำภาพตัดขวางในระนาบ  $x-y$

การหาพิกัดตำแหน่งของ 2 จุดระหว่างค่า  $x_1, y_1$  กับ  $x_2, y_2$  หากจากสมการวงรีที่จุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งจุดตั้งบนแกน คือ

$$Ax_1^2 + By_1^2 = 1 \quad (7.2)$$

$$Ax_2^2 + By_2^2 = 1$$

ทำให้สามารถหาค่าระยะกึ่งแกนเอก (ค่า  $a$ ) กับค่ากึ่งแกนโท (ค่า  $b$ ) ได้เป็น

$$a = \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (7.3)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{B}}$$

จากการหาผลเฉลยได้ค่าตัวแปร  $A$  และ  $B$  ในสมการข้างต้นเช่น

$$A = \frac{y_2^2 - y_1^2}{x_1^2 y_2^2 - x_2^2 y_1^2} \quad (7.4)$$

$$B = \frac{x_2^2 - x_1^2}{x_2^2 y_1^2 - x_1^2 y_2^2}$$

ซึ่งสามารถหาค่าตัวเลขมุมลาดชัน (slope angle number) ที่มีหน่วยเป็นองศาเป็น

$$\text{Slope angle number 1} = \text{Arctan} (d \times \sqrt{B}) \quad (7.5)$$

$$\text{Slope angle number 2} = \text{Arctan} (d \times \sqrt{A})$$

จากการวิเคราะห์ผลที่ใช้ทางเลือก 2 แบบทั้งที่เป็นวงกลมและเป็นวงรี ค่าของมุมความชันที่จุดต่อของส่วนแบ่งจุดภาคค่าใดที่เล็ก (ค่า) กว่า แสดง มีการลดจำนวนปริมาตรของการขุดเจาะลงไป ให้เลือกค่ามุมความชันที่เล็ก (ค่า) กว่า เป็นตัวแทนของผังของโครงร่างขอบนกรอบบ่อเหมืองเปิด ผลลัพธ์สุดท้ายที่เป็นค่ามุมความชันที่เหมาะสมที่สุดแสดงไว้ในรูปที่ 7.6 b

### 7.3 ขั้นตอนวิธี Lerchs-Grossmann ที่ใช้กับค่ามุมความชันที่แปรผันได้

การปรับแก้ให้มุมความชันของแบบจำลองบล็อกสามารถแปรผันได้ (variable slope angles) และนำขั้นตอนวิธีของ Lerchs-Grossmann มาหาผลเฉลยโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด เป็นการปรับแก้ให้สามารถนำมาใช้ได้กับการปฏิบัติจริงในภาคสนาม และการอธิบายหลักการวิธีวิเคราะห์ผล แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ นั่นคือ การวิเคราะห์ผลโดยใช้

ค่ามุมความชันที่แปรผันได้ (หนึ่งพื้นที่ขอบบ่อเหมือง มีค่าความชันค่าเดียว) กับการวิเคราะห์ผลโดยใช้ค่ามุมความชันที่แปรผันหลายค่า (มีมากกว่าหนึ่งพื้นที่ของผังขอบบ่อเหมือง ที่มีค่าความชันค่าเดียว)

การนิยามพื้นที่ทั้งบริเวณที่เป็นมวลสินแร่ หรือการนิยามส่วนวงของโดเมน (domain sector) ใช้แบบจำลองบล็อก 3 มิติเป็นตัวแทนแบบจำลองบล็อกต้องมีระนาบทิศทางไว้ด้วย (ดูรูปที่ 7.7 หน้าถัดไป) แต่ละพื้นที่ (หรือส่วนวง) ที่ต้องการแสดงความลาดชันของบ่อเหมืองมีการนิยามให้ค่ามุมความชันสำคัญ (principal slope angle) มีทั้งหมด 4 ค่า กับมีแนวระดับ 4 ทิศทาง (ทิศเหนือ, ทิศตะวันออก, ทิศใต้, ทิศตะวันตก)

นั่นคือ ตามรูปที่ 7.7 แต่ละพื้นที่หน้าเหมืองมีหน้าความลาดของเหมืองแบ่งออกเป็น north face slope, east face slope, south face slope, และ west face slope

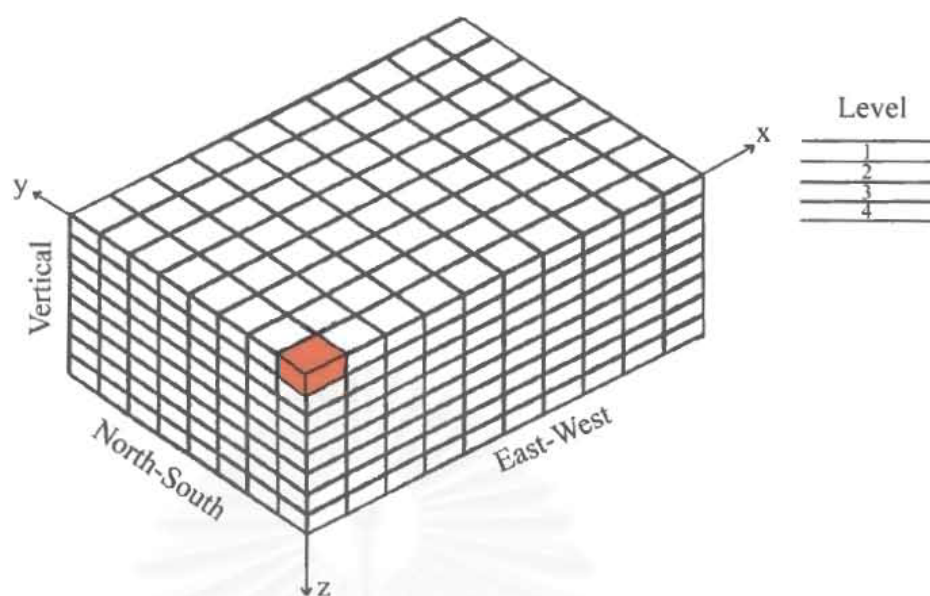
ระบบพิกัดของแบบจำลองบล็อก แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ระบบพิกัดชนิดแรก ใช้ระบบคาร์ทีเซียน [X-Y-Z] ซึ่งแกน X อยู่ในแนวทิศ west-east; แกน Y อยู่ในแนวทิศ south-north; แกน Z อยู่ในแนวทิศ vertical จุดกำเนิดของระบบตั้งอยู่ในตำแหน่งที่อยู่ชั้นระดับบนสุด (ทิศ southwest)

ระบบพิกัดชนิดที่สองคือระบบดัชนีพิกัด (coordinate index) เป็นดัชนี [i, j, k] ค่าพิกัด i, j และ k เพิ่มมากขึ้นตามค่าแกนพิกัด X, Y, Z ตัวแปรเสริมดังกล่าวช่วยทำให้นิยามแบบจำลองบล็อกของแหล่งสะสมหิน (สินแร่) ได้ชัดเจนขึ้น ได้แก่

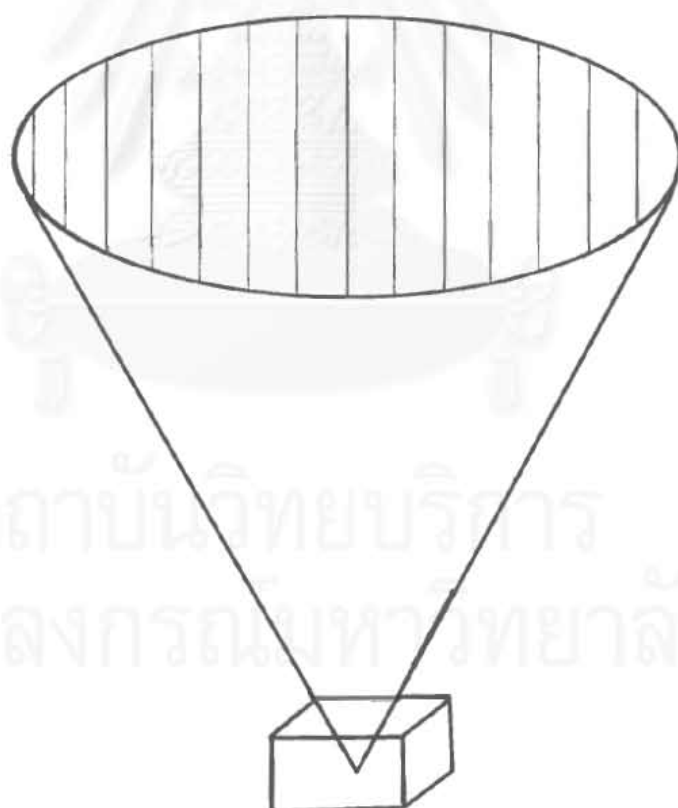
x dim	=	ขนาดมิติของบล็อกในแนวทิศทาง x (west-east)
y dim	=	ขนาดมิติของบล็อกในแนวทิศทาง y (south-north)
z dim	=	ขนาดมิติของบล็อกในแนวทิศทาง z (vertical)
num x	=	จำนวนของบล็อกในแนวทิศทาง x (west-east)
num y	=	จำนวนของบล็อกในแนวทิศทาง y (south-north)
num z	=	จำนวนของบล็อกในแนวทิศทาง z (vertical)
		หรือเป็นจำนวนของระดับชั้น (number of levels)

### 7.3.1 ขั้นตอนวิธี Variable Slope Angles

ความลาดชันโดยรวมของบ่อเหมืองเปิด สามารถใช้รูปกรวยจำลองแบบจากบล็อกพื้นฐานได้เพื่อแสดงผลของปริมาตรที่ถูกขุดเจาะ รูปที่ 7.8 เป็นการสร้างคั่นแบบของกรวยที่มีความแตกต่างจากกรวยของรูปที่ 6.6 (บทที่ 6) ตรงที่ในรูปที่ 7.8 กำหนดให้ส่วนปลายกรวย (apex) อยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของมวลสาร (กึ่งกลาง) ของบล็อกพื้นฐาน



รูปที่ 7.7 แบบจำลองบล็อกของแหล่งสะสมและระบบพิคคของบล็อก



รูปที่ 7.8 ดันแบบกรวยที่ใช้ในการคำนวณค่ามุมความชันของแบบจำลองบล็อก

จากรูปที่ 7.8 เมื่อทำการขยายแนวกรวยจากจุดกึ่งกลางของบล็อกพื้นฐานและขยายต่อแนวไปยังพื้นผิวดิน มุมด้านข้างของกรวยจะเป็นค่ามุมความชันสำคัญทั้ง 4 ค่ามุมลาดชัน

ถ้าหากปรากฏว่ามุมลาดชันของผนังกรวยทั้ง 4 แนวทิศทางสำคัญมีค่าไม่เท่ากัน จะมีผลทำให้พื้นที่ด้านบน (upper area) แต่ละระดับชั้น [เป็นพื้นที่ส่วนร่วมที่ถูกกรวยตัดผ่าน] ประกอบด้วย 4 จตุภาค แต่วงรีของแต่ละส่วนของจตุภาคมีความแตกต่างกัน

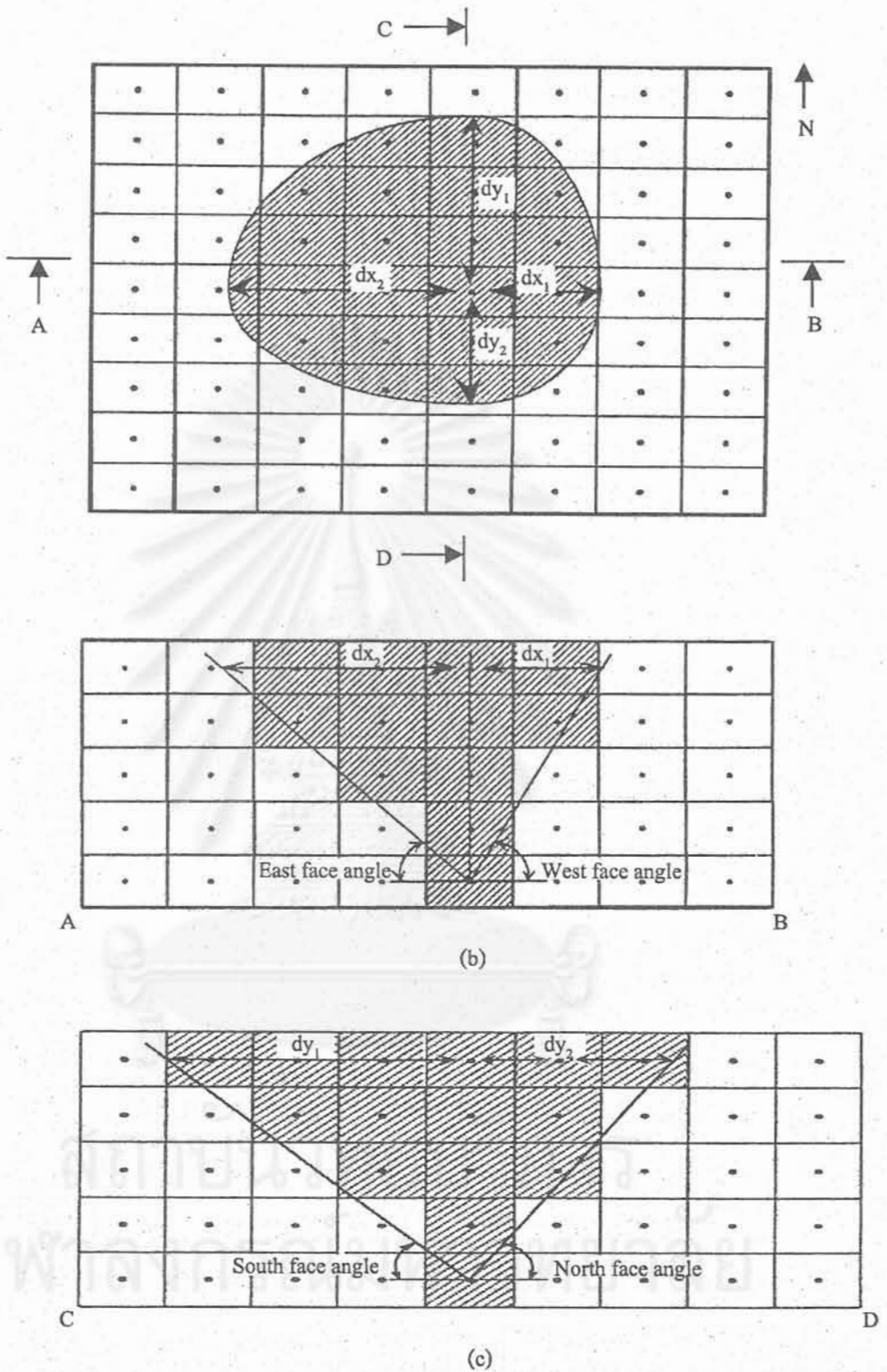
ถ้าหากปรากฏว่ามุมลาดชันของผนังกรวยทั้ง 4 แนวทิศทางสำคัญมีเท่ากันจะมีผลทำให้บล็อกที่อยู่ระดับชั้นด้านบนกรวย มีพื้นที่เป็นรูปวงกลมเพียง 1 วง

### 7.3.2 วิธี Variable Slope Angles ที่ใช้ในการขุดเจาะกรวย

การขุดเจาะบ่อเหมืองเปิดที่ประกอบกลุ่มบล็อกที่อยู่ในโครงร่างรูปกรวย เมื่อตั้งสมมุติฐานให้มุมความชันมีการแปรผันได้ Khalokakaie (1999) ได้แสดงขั้นตอนวิธีในการปรับเปลี่ยนค่ามุมของแต่ละระดับชั้น ที่การขุดเจาะเริ่มต้นจากบล็อกที่อยู่พื้นผิวดินไปยังบล็อกในกรวยที่อยู่ในระดับลึกในกรวย ดังต่อไปนี้

กำหนดให้มวลสินแร่มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและภาพผังเป็นรูปที่ใกล้เคียงกับวงรี ตัวอย่างรูปที่ 7.9 a เป็นผังรูปกรวยของแบบจำลองมวลสินแร่ที่แสดงกลุ่มบล็อกที่อยู่ระดับบนสุด มีแนวตัดขวางผ่านมวลสินแร่ 2 แนว (แนว AB และแนว CD) จากนิยามเดิมของการยินยอมให้มุมความชันแปรผันได้ แต่ละระดับชั้นของกลุ่มบล็อกจะประกอบด้วยค่ากึ่งแกนเอก 2 ค่า กับค่ากึ่งแกนโท 2 ค่า ที่พึ่งพิงกับค่ามุมความชันสำคัญทั้ง 4 ค่า ร่วมกับค่าระยะในแนวตั้งที่วัดจากจุดกึ่งกลางของบล็อกพื้นฐาน ไปยังจุดกึ่งกลางของบล็อกที่วางตัวอยู่ระดับบน รูปที่ 7.9 b กับรูปที่ 7.9 c เป็นภาพตัดขวางที่แสดงกลุ่มบล็อกทั้ง 2 แนวตัด (แนว AB และ CD) ที่มีแนวทิศทางแตกต่างกัน

กำหนดให้บล็อกต้นแบบที่จะนำมาคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของการขุดเจาะมวลสินแร่ ในรูปที่ 7.9 เป็น  $X_{i,j,k}$  และบล็อกนี้วางอยู่บนระดับชั้น  $k$  ( $k^{\text{th}}$  level) เมื่อใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติที่ระบุไว้ในตารางที่ 7.1 ตารางดังกล่าวประกอบด้วยสมการจำนวน 14 สมการที่ใช้หาค่าตัวแปรระยะกึ่งกลางแกนเอกกับระยะกึ่งกลางแกนโท และหาค่าตัวเลขจำนวนบล็อกในแนวทิศทางสำคัญ (principal direction) ที่อยู่ในกรวยของแต่ละระดับชั้น ตัวอย่างเช่น ถ้าหากจำนวนบล็อกที่อยู่ในพื้นที่ด้านบนสุดของระดับที่  $t$  ( $t^{\text{th}}$  level) ถูกคำนวณหาค่าใน 4 แนวทิศทางสำคัญ บล็อกทั้งหมด ได้แก่  $X_{m,n,k-t}$  ซึ่งพจน์  $m = i - m_2, i + m_1$  และ  $n = j - n_2, j + n_2$  ต้องถูกตรวจสอบก่อนว่าอยู่ภายในกรวยและต้องขุดเจาะออกหรือไม่ ทั้งนี้จะอิงสมการวงรี ตั้งแต่สมการที่ 7.14 – 7.19 (ดูตารางที่ 7.1 ประกอบ)

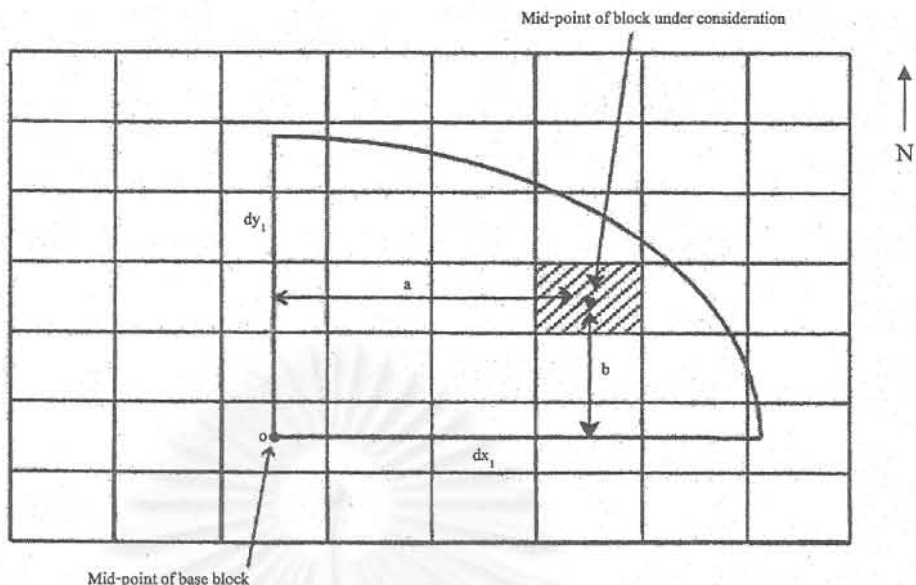


รูปที่ 7.9 การขุดเจาะมวลสินแร่ที่ตั้งสมมุติฐานให้เป็นการขุดเจาะภายในกรวย รูป 7.9 a เป็นผังกริดของมวลสินแร่ที่ประกอบด้วย 2 แนวตัดขวาง ส่วนรูปที่ 7.9 b เป็นภาพตัดขวางแนว AB หรือที่เรียกว่า northing section และรูปที่ 7.9 c เป็นภาพตัดขวางแนว CD หรือที่เรียกว่า easting section

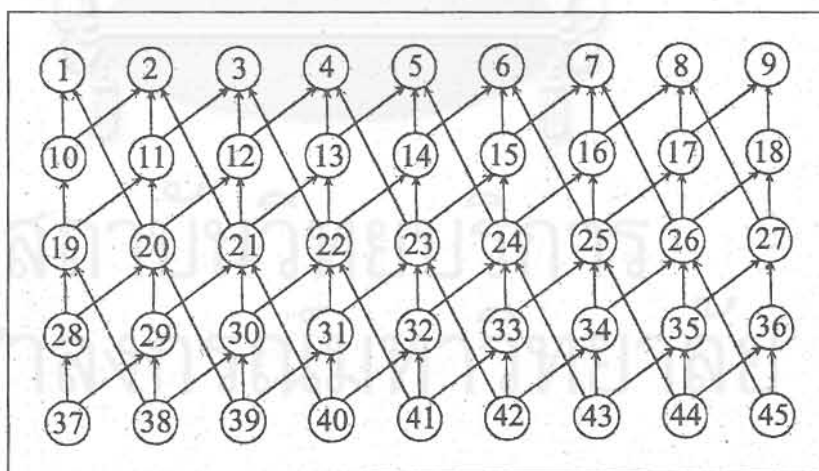


ตารางที่ 7.1 สมการที่เกี่ยวข้องกับ variable slope angles โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าตัวแปรทั้งที่เป็นระยะทางและค่ามุม

$dx_1 = \frac{(k - t) \times z \text{ dim}}{\tan(\text{west face angle})}$	(7.6)
$dy_1 = \frac{(k - t) \times z \text{ dim}}{\tan(\text{south face angle})}$	(7.7)
$dx_2 = \frac{(k - t) \times z \text{ dim}}{\tan(\text{east face angle})}$	(7.8)
$dy_2 = \frac{(k - t) \times z \text{ dim}}{\tan(\text{north face angle})}$	(7.9)
$m_1 = \frac{dx_1}{x \text{ dim}}$	(7.10)
$n_1 = \frac{dy_1}{y \text{ dim}}$	(7.11)
$m_2 = \frac{dx_2}{x \text{ dim}}$	(7.12)
$n_2 = \frac{dy_2}{y \text{ dim}}$	(7.13)
$a = x \text{ dim} \times (i - m)$	(7.14)
$b = y \text{ dim} \times (j - n)$	(7.15)
If $m$ is equal to or greater than $i$ and $n$ is equal to or greater than $j$	
$\text{Value} = \frac{a^2}{(dx_1)^2} + \frac{b^2}{(dy_1)^2}$	(7.16)
If $m$ is equal to or greater than $i$ and $n$ is less than or equal to $j$	
$\text{Value} = \frac{a^2}{(dx_1)^2} + \frac{b^2}{(dy_2)^2}$	(7.17)
If $m$ is less than or equal to $i$ and $n$ is less than or equal to $j$	
$\text{Value} = \frac{a^2}{(dx_2)^2} + \frac{b^2}{(dy_2)^2}$	(7.18)
If $m$ is less than or equal to $i$ and $n$ is equal to or greater than $j$	
$\text{Value} = \frac{a^2}{(dx_2)^2} + \frac{b^2}{(dy_1)^2}$	(7.19)



รูปที่ 7.10 พื้นที่ส่วนหนึ่งของจตุภาครูปวงรี ตำแหน่งจุด O เป็นจุดกึ่งกลางของบล็อกพื้นฐาน ค่าระยะ a กับ b วัดจากจุดกึ่งกลางบล็อกเล็กที่กำลังตรวจสอบหาค่าตัวแปรทั้งสอง



รูปที่ 7.11 กราฟระบุทิศทางที่ใช้เป็นตัวแทนภาพตัดขวางแนว north-south ของบล็อก 3 มิติ กำหนดให้ความลาดชัน east face =  $60^\circ$  และความลาดชัน west face =  $45^\circ$

รูปภาพผังของระดับชั้นที่ต้องการขุดเจาะ ( $t^{\text{th}}$  level) ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 7.10 เป็นผังภาพส่วนหนึ่งของจุดภาคที่ประกอบเป็นวงรี ตัวแปรที่ต้องการหาคือค่า  $a$  ที่เป็นระยะกึ่งแกนเอก (แนว west-east) กับค่า  $b$  ที่เป็นระยะกึ่งแกนโท (แนว south-north) ตามลำดับ ถ้าหากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.19 ได้ค่า “value” น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (หนึ่ง) เป็นสิ่งที่แสดงว่าบล็อกลูกที่มีค่าดังกล่าวต้องถูกขุดเจาะเคลื่อนย้ายออกก่อนบล็อกลูกพื้นฐาน ถ้าหากไม่ใช่กรณีดังกล่าว ก็มีความเป็นไปได้ที่บล็อกลูกนั้นอยู่นอกโครงร่างรูปกรวย ในขั้นตอนวิธีต่อไปใช้หาผลลัพธ์โดยใช้กราฟ (graph algorithm) จะใช้บล็อกที่อยู่ภายในกรวยและเป็นบล็อกสินแร่เท่านั้น [เพื่อขจัดเวลาที่สิ้นเปลืองไปกับการคำนวณบล็อกที่เป็นอากาศ]

กระบวนการที่ใช้กราฟนี้ไม่กำหนดให้ความลาดชันคงที่และไม่กำหนดให้มีการขุดเจาะเฉพาะบล็อกที่วางทับด้านบนของบล็อกสินแร่เพียงระดับชั้นเดียว (จะเป็นที่ระดับชั้นก็ได้) นอกจากนี้ในกระบวนการยังยินยอมให้ค่าแนวทิศทางสำคัญไม่พึ่งพิงกับค่าขนาดมิติของบล็อก

รูปที่ 7.11 เป็นผังภาพเชิงกราฟ ที่มีชื่อเฉพาะเรียกว่า กราฟระบุทิศทาง (directed graph) ใช้เป็นตัวแทนของภาพตัดขวางในแนว northing section ของแบบจำลองบล็อก 3 มิติ ข้อกำหนดในที่นี้ให้ค่ามุมความชันที่อยู่ด้านตะวันออก (east face) และมุมความชันที่อยู่ด้านตะวันตก (west face) ของแบบจำลองบล็อก มีค่าแตกต่างกันคือมีค่า  $60^\circ$  สำหรับด้านตะวันออก และมีค่า  $45^\circ$  สำหรับด้านตะวันตก จากรูปที่ 7.11 อ่านค่าผลลัพธ์ของบล็อกหมายเลข 23 ที่อยู่ในกรวย (ที่ต้องการขุดเจาะ) มีจุดปลาย (ที่เป็นแนวหัวลูกศรของกราฟ) ซึ่งไปยังบล็อกหมายเลข 4, 5, 6, 7, 14 และ 15

### 7.3.3 วิธี Multiple Variable Slope Angles ที่ใช้ในการขุดเจาะกรวย

ในกรณีที่มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น ด้วยเหตุผลเชิงเสถียรภาพและความปลอดภัยของหน้างานขุดเจาะ การขุดเจาะบล็อกในกรวยอาจเป็นไปได้ที่ค่าความลาดชันของบ่อเหมืองไม่เท่ากันในทุกส่วนของมวลสินแร่

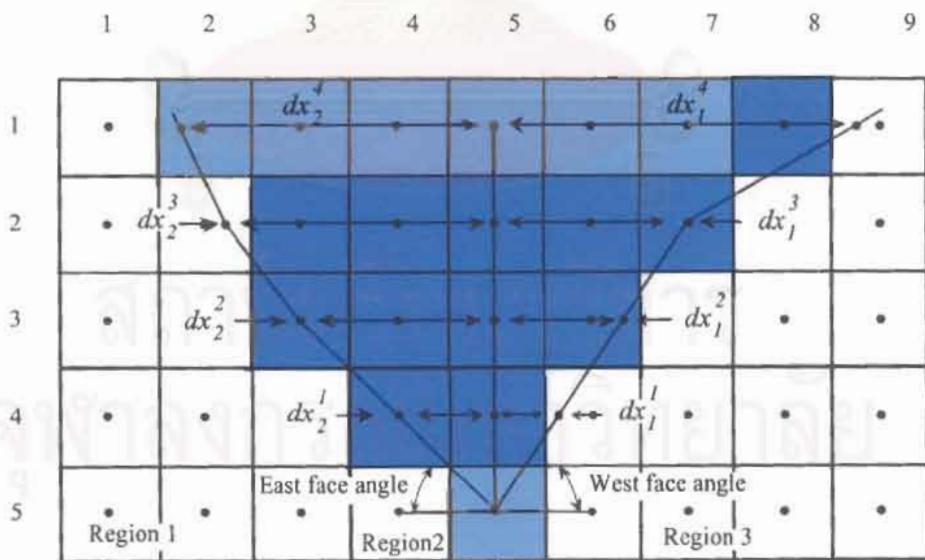
ขั้นตอนวิธีของการหาผลลัพธ์จึงต้องแบ่งให้มวลสินแร่เป็นพื้นที่เล็กๆ หรือโดเมนส่วนวงเล็กๆ ซึ่งมวลหินที่ล้อมรอบมีคุณสมบัติคงที่ แต่การตัดความลาดของบล็อกมวลสินแร่ในกรวยมีค่าความชันแตกต่างกัน ในแต่ละพื้นที่หรือแต่ละโดเมนส่วนวง ซึ่งเป็นแนวทางที่จะอธิบายต่อไปถึงการที่ใช้ค่ามุมความลาดในแต่ละบล็อกแบ่งออกเป็น 4 แนวทิศทาง

ในกรณีที่มีการแปรผันค่ามุมความชันหลายระดับ (multiple variable slopes) ระหว่างที่ทำการขุดเจาะจากชั้นตะพักหนึ่งไปยังอีกชั้นตะพักหนึ่ง มีผลทำให้เกิดวงแหวนหรือวงหุ้ม (envelope) จากบล็อกพื้นฐานไปยังพื้นผิวที่อยู่ด้านบน (ดูรูปที่ 7.12 ประกอบ) ขึ้นอยู่กับว่าค่าความชันบ่อเหมืองจะถูกกำหนดให้เป็นค่าอะไร ค่าของปริมาตรมวลสาร (ที่เป็นบล็อก) จะถูก

ชุดเจาะออกจากบ่อเหมือง ตั้งแต่จุดกึ่งกลางบล็อกพื้นฐานจนถึงจุดกึ่งกลางบล็อกที่อยู่ระดับบนพื้นผิว สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่อิงค่าฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติ

ขั้นตอนวิธีของการคำนวณกรวย 3 มิติ มีความคล้ายคลึงกับกรวย 2 มิติ พิจารณาจากรูปที่ 7.12 ที่เป็นภาพตัดขวางแนว northing section การใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าผลเฉลยเริ่มจากบล็อกที่อยู่ระดับชั้น  $k$  ( $k^{\text{th}}$  level) หรือจัดเป็นแถว  $k$  ( $k^{\text{th}}$  row) และคอลัมน์  $j$  ( $j^{\text{th}}$  column) ซึ่งจุดตั้งต้นกรวยเริ่มต้นจากจุดกึ่งกลางของบล็อกพื้นฐาน 2 มิติ หรือบล็อก  $X_{k,j}$  นี้

มุมความชันของกรวยในภาพตัดขวางมี 2 ด้าน ส่วนที่เป็น east face angle และส่วนที่เป็น west face angle โดยแสดงเป็นเส้นเชื่อมที่ต่อจากจุดกึ่งกลางบล็อกของแต่ละระดับชั้น ตัวแปรเสริมที่ระบุในรูปที่ 7.12 คือพจน์  $dx_1^i$  กับพจน์  $dx_2^i$  เป็นค่าระยะทางที่วัดจากแนวกึ่งกลางบล็อกพื้นฐาน ถึงจุดกึ่งกลางบล็อกที่อยู่ระดับบนบล็อกพื้นฐานไป 1 ระดับชั้น [ทางด้านตะวันตกและทางด้านตะวันออก ตามลำดับ] ส่วนพจน์  $m_1^i$  กับพจน์  $m_2^i$  เป็นค่าจำนวนบล็อกที่อยู่ในกรวยและอยู่ระดับบนบล็อกพื้นฐานไป 1 ระดับชั้น [ทางด้านตะวันตกและทางด้านตะวันออก ตามลำดับ]



รูปที่ 7.12 กรวยทรง 2 มิติ ที่แสดงการหาปริมาตรของมวลสารที่ถูกชุดเจาะ  
ในภาพตัดขวางนี้ ค่าของมุมความชันแปรผันของกรวยได้หลายค่า  
พื้นที่ของกรวยที่แตกต่างกันถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

ตารางที่ 7.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับ multiple variable slope angles โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าตัวแปรทั้งที่เป็นค่าระยะทางและค่ามุม

$dx_1^1 = \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(k, j)]}$	(7.20)
$dx_2^1 = \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(k, j)]}$	(7.21)
$m_1^1 = \frac{dx_1^1}{x \text{ dim}}$	(7.22)
$m_2^1 = \frac{dx_2^1}{x \text{ dim}}$	(7.23)
$ml_1^1 = \frac{dx_1^1}{x \text{ dim}} + 0.5$	(7.24)
$ml_2^1 = \frac{dx_2^1}{x \text{ dim}} + 0.5$	(7.25)
$dx_1^2 = dx_1^1 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(k - 1, j + ml_1^1)]}$	(7.26)
$dx_2^2 = dx_2^1 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(k - 1, j + ml_2^1)]}$	(7.27)
$m_1^2 = \frac{dx_1^2}{x \text{ dim}}$	(7.28)
$m_2^2 = \frac{dx_2^2}{x \text{ dim}}$	(7.29)
$ml_1^{t-1} = \frac{\sum_{i=1}^{t-1} dx_1^i}{x \text{ dim}} + 0.5$	(7.30)
$nl_1^{t-1} = \frac{\sum_{i=1}^{t-1} dy_1^i}{y \text{ dim}} + 0.5$	(7.31)
$ml_2^{t-1} = \frac{\sum_{i=1}^{t-1} dx_2^i}{x \text{ dim}} + 0.5$	(7.32)



ตารางที่ 7.2 (ต่อ) สมการที่เกี่ยวข้องกับ multiple variable slope angles โดยใช้ฟังก์ชันเชิงตรีโกณมิติหาค่าตัวแปรทั้งที่เป็นค่าระยะทางและค่ามุม

$nl_2^{t-1} = \frac{\sum_{i=1}^{t-1} dy_2^i}{y \text{ dim}} + 0.5 \quad (7.33)$
$dx_1^t = \sum_{i=1}^{t-1} dx_1^i + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(i + ml_1^{t-i}, j, k - t + 1)]} \quad (7.34)$
$dy_1^t = \sum_{i=1}^{t-1} dy_1^i + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{south face angle of block}(i, j + nl_1^{t-i}, j, k - t + 1)]} \quad (7.35)$
$dx_2^t = \sum_{i=1}^{t-1} dx_2^i + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(i - ml_2^{t-i}, j, k - t + 1)]} \quad (7.36)$
$dy_2^t = \sum_{i=1}^{t-1} dy_2^i + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{north face angle of block}(i, j - nl_2^{t-i}, k - t + 1)]} \quad (7.37)$
$m_1^t = \frac{dx_1^t}{x \text{ dim}} \quad (7.38)$
$n_1^t = \frac{dy_1^t}{y \text{ dim}} \quad (7.39)$
$m_2^t = \frac{dx_2^t}{x \text{ dim}} \quad (7.40)$
$n_2^t = \frac{dy_2^t}{y \text{ dim}} \quad (7.41)$

พจน์ตัวแปรเสริมอื่นอีก ได้แก่ zdim กับ xdim เป็นขนาดมิติของบล็อกในแนวตั้งและในแนวราบตามลำดับ กรณีของรูปที่ 7.11 กำหนดให้บล็อก 2 มิติเขียนเป็น  $X_{k-1, m}$  อยู่ระดับบนบล็อกพื้นฐานไป 1 ระดับขึ้น และเป็นบล็อกที่อยู่ในกรวย โดยที่ค่าพจน์ตัวห้อย  $m = j - m_2^1, j + m_1^1$

ตารางที่ 7.2 เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับ multiple variable slope angles เป็นสมการทั้งหมด 22 สมการ ตั้งแต่สมการที่ 7.20 ถึงสมการที่ 7.41 ให้หาค่าระยะทางกับใช้หาค่าของมุม

จากสมการที่ 7.24 กับ 7.25 ค่าตัวเลข 0.5 เป็นตัวเลขที่เพิ่มเข้ามาในสมการเพื่อปรับแก้ในส่วนของจำนวนบล็อก ที่ปรับให้เป็นเลขภาคจำนวนเต็ม (integer part) ส่วนสมการที่ 7.26 ถึง 7.29 ใช้หาระยะกับจำนวนบล็อกของแต่ละระดับชั้นที่อยู่บนบล็อกพื้นฐานที่กำหนด ทั้งนี้สมการที่ 7.20 ถึงสมการที่ 7.29 (รวม 10 สมการ) ใช้กับกรวยรูป 2 มิติ

ถ้าหากตั้งสมมุติฐานต่อไปให้บล็อก  $X_{k-2, m}$  เป็นบล็อกที่ต้องการขุดเจาะและอยู่บนระดับชั้นบล็อกพื้นฐานไปอีก 2 ระดับ พจน์ตัวห้อย  $m = j - m_2^2, j + m_1^2$  กระบวนการหาค่าจะซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงระดับพื้นผิวดิน

Khalokalaie et al. (2000) ได้ระบุว่า ขั้นตอนวิธีของ multiple variable slopes สามารถดัดแปลงการหาผลเฉลยจาก 2 มิติมาเป็น 3 มิติ ถ้าหากพื้นที่เหมืองมีมากกว่า 1 พื้นที่ หรือมีมากกว่า 1 ส่วนวง ควรทำการกำหนดค่าความชันของแต่ละบริเวณไว้ บล็อกใดที่มีจุดกึ่งกลางอยู่ภายในพื้นที่ ก็จะตั้งสมมุติฐานให้อยู่ในกรวยที่ต้องการขุดเจาะด้วย

การที่จะดัดแปลงให้เป็นการคำนวณกรวยทรง 3 มิติ ให้กำหนดแกนมี 4 และจำนวนทิศทางมี 4 ทิศทางของระดับชั้นที่  $t$  ( $t^{\text{th}}$  level) ที่อยู่เหนือบล็อกพื้นฐานที่กำหนดเป็นดัชนีพิกัด 3 มิติ คือ บล็อก  $X_{i, j, k}$  สมการหาผลเฉลยของกรวย 3 มิติ คล้ายคลึงกับที่ใช้กับกรวย 2 มิติ ได้แก่ สมการที่ 7.30 ถึงสมการที่ 7.41 (รวม 12 สมการ) ที่อยู่ในตารางที่ 7.2

### 7.3.4 ตัวอย่างการคำนวณการขุดเจาะบล็อกที่มี Variable Angles

ตัวอย่างที่แสดงในหัวข้อย่อหน้านี้ ใช้รูปที่ 7.11 ที่เป็นกรวยทรง 2 มิติ และมีค่าของความลาดชันเป็นแบบ multiple variable slope angles โจทย์ตัวอย่างกำหนดให้มีการขุดเจาะบล็อกที่อยู่ระดับชั้นที่ 5 (แถว 5) กับคอลัมน์ที่ 5 (ซึ่งเป็นบล็อกพื้นฐานที่อยู่ตรงส่วนปลายของกรวยกลับหัว) ค่ามุมความชันของพื้นที่ทั้ง 3 พื้นที่ของรูปที่ 7.12 ได้ระบุไว้ในตารางที่ 7.3 ข้างล่าง

ตารางที่ 7.3 มุมความชันของแต่ละพื้นที่สำหรับรูปกรวย 2 มิติ ที่มีแนวตัดขวาง northing section

พื้นที่หมายเลข	East Face Angle	West Face Angle
1	58°	40°
2	45°	55°
3	42°	30°

**ผลเฉลย**

ขั้นตอนที่ 1 หาระยะทางและจำนวนบล็อกในกรวยที่ระดับที่สูงกว่าบล็อกพื้นฐาน 1 ระดับชั้น (เป็นระดับชั้นที่ 4 ในรูป 7.11) โดยใช้สมการที่ 7.20 ถึง 7.23 (จำนวน 4 สมการ) ดังนี้

$$dx_1^1 = \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(5,5)]} = \frac{10.0}{\tan 55} = 7.0$$

$$dx_2^1 = \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(5,5)]} = \frac{10.0}{\tan 45} = 10.0$$

$$m_1^1 = \frac{7.0}{10.0} = 0$$

$$m_2^1 = \frac{10.0}{10.0} = 1$$

สรุปผลขั้นตอนที่ 1 ได้ว่ามีจำนวน 2 บล็อก ได้แก่ บล็อก (4, 4) กับบล็อก (4, 5) ที่ต้องขุดเจาะออก ก่อนที่จะสามารถขุดเจาะบล็อก (5, 5) ออกมา

ขั้นตอนที่ 2 หาระยะทางและจำนวนบล็อกในกรวยที่ระดับที่สูงกว่าบล็อกพื้นฐาน 2 ระดับชั้น (เป็นระดับชั้นที่ 3 ในรูป 7.11) โดยใช้สมการที่ 7.24 ถึง 7.29 (จำนวน 6 สมการ) ซึ่งมีกระบวนการปรับแก้เลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็มด้วย

$$ml_1^1 = \frac{dx_1^1}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{7.0}{10.0} + 0.5 = 1$$

$$ml_2^1 = \frac{dx_2^1}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{10.0}{10.0} + 0.5 = 1$$

$$dx_1^2 = dx_1^1 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(4,6)]} = 7.0 + \frac{10.0}{\tan 55} = 14.0$$

$$dx_2^2 = dx_2^1 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(4,4)]} = 10.0 + \frac{10.0}{\tan 45} = 20.0$$

$$m_1^2 = \frac{dx_1^2}{x \text{ dim}} = \frac{14.0}{10.0} = 1$$

$$m_2^2 = \frac{dx_2^2}{x \text{ dim}} = \frac{20.0}{10.0} = 2$$

สรุปผลขั้นตอนที่ 2 ได้ว่ามีจำนวน 4 บล็อก ได้แก่ บล็อก (3, 3), (3, 4), (3, 5) กับบล็อก (3, 6) ที่ต้องขุดเจาะออก ก่อนที่จะสามารถขุดเจาะบล็อก (5, 5) ออกมา

ขั้นตอนที่ 3 หาระยะทางและจำนวนบล็อกในกรวยที่ระดับที่สูงกว่าบล็อกพื้นฐาน 3 ระดับชั้น (เป็นระดับชั้นที่ 2 ในรูป 7.11) โดยใช้สมการที่ 7.24 ถึง 7.29 (จำนวน 6 สมการ) ซึ่งมีกระบวนการปรับแก้เลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็มด้วย

$$\begin{aligned}
 ml_1^2 &= \frac{dx_1^2}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{14.0}{10.0} + 0.5 = 1 \\
 ml_2^2 &= \frac{dx_2^2}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{20.0}{10.0} + 0.5 = 2 \\
 dx_1^3 &= dx_1^2 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(3,6)]} = 14.0 + \frac{10.0}{\tan 55} = 21.0 \\
 dx_2^3 &= dx_2^2 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(3,3)]} = 20.0 + \frac{10.0}{\tan 58} = 26.2 \\
 m_1^3 &= \frac{dx_1^3}{x \text{ dim}} = \frac{21.0}{10.0} = 2 \\
 m_2^3 &= \frac{dx_2^3}{x \text{ dim}} = \frac{26.2}{10.0} = 2
 \end{aligned}$$

สรุปผลขั้นตอนที่ 3 ได้ว่ามีจำนวน 5 บล็อก (2, 3), (2, 4), (2, 5), (2, 6) กับบล็อก (2, 7) ที่ต้องขุดเจาะออก ก่อนที่จะสามารถขุดเจาะบล็อก (5, 5)

ขั้นตอนที่ 4 หาระยะทางและจำนวนบล็อกในกรวยที่ระดับที่สูงกว่าบล็อกพื้นฐาน 4 ระดับชั้น (เป็นระดับชั้นที่ 1 ที่เป็นชั้นบนสุดในรูป 7.11) โดยใช้สมการที่ 7.24 ถึง 7.29 (จำนวน 6 สมการ) ซึ่งมีกระบวนการปรับแก้เลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็มด้วย

$$\begin{aligned}
 ml_1^3 &= \frac{dx_1^3}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{21.0}{10.0} + 0.5 = 2 \\
 ml_2^3 &= \frac{dx_2^3}{x \text{ dim}} + 0.5 = \frac{26.2}{10.0} + 0.5 = 3
 \end{aligned}$$

$$dx_1^4 = dx_1^3 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{west face angle of block}(2,7)]} = 21.0 + \frac{10.0}{\tan 30} = 38.3$$

$$dx_2^4 = dx_2^3 + \frac{z \text{ dim}}{\tan[\text{east face angle of block}(2,2)]} = 26.2 + \frac{10.0}{\tan 58} = 32.4$$

$$m_1^4 = \frac{dx_1^4}{x \text{ dim}} = \frac{38.3}{10.0} = 3$$

$$m_2^4 = \frac{dx_2^4}{x \text{ dim}} = \frac{32.4}{10.0} = 3$$

สรุปผลขั้นตอนที่ 4 ซึ่งเป็นตอนสุดท้าย ได้ว่ามีจำนวน 7 บล็อก ได้แก่ บล็อก (1, 2), (1, 2), (1, 3), (1, 4), (1, 5), (1, 6), (1, 7) กับบล็อก (1, 8) ที่ต้องขุดเจาะออก ก่อนที่จะสามารถขุดเจาะบล็อก (5, 5) ออกมา

## 7.4 ขั้นตอนวิธีอื่นสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองบล็อก 3 มิติ

การหาโครงร่างแบบจำลองบล็อก 3 มิติ นอกเหนือจากที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 และหัวข้อก่อนหน้าในบทที่ 7 ยังมีแนวคิดของนักวิจัยท่านอื่นที่ได้นำเสนอขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่ความแตกต่างไปจากที่ระบุไว้มาแล้ว ผู้วิจัยโครงการนี้ขอสรุปแนวคิดหลักของขั้นตอนวิธีอื่นที่น่าสนใจ ที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์โครงร่างขอบบ่อเหมือง 3 มิติ ไว้โดยสรุป ดังต่อไปนี้

### 7.4.1 แนวคิดของวิธี Transportation

ขั้นตอนวิธีนี้เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่แตกต่างไปจากวิธีใช้กราฟระบุทิศทาง (directed graph method) หรือวิธีหาค่าจากข่ายงานการไหลสูงสุด (maximum flow method) ซึ่งการนำเสนอวิธี transportation มาใช้หาผลลัพธ์โครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดนี้ มีจุดประสงค์ที่ต้องการลดเวลาของการคำนวณของคอมพิวเตอร์เมื่อมวลสินแร่มีลักษณะที่ซับซ้อน

การเริ่มต้นตั้งปัญหาของระบบ transportation จะมีความคล้ายคลึงกับการจัดส่งสินค้าจากแหล่งเก็บในโกดังไปยังตลาดซื้อขาย (Huttagosol, 1991 ; Hattagosol and Cameron, 1992) การหาผลเฉลยเป็นการหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุดของการขนส่งสินค้า ซึ่งต้องสอดคล้องกับความต้องการของทั้งแหล่งเก็บและของตลาดซื้อขาย



สมการตั้งต้นของการแก้ปัญหาจากการขนส่งเริ่มจาก

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j} \quad (7.42)$$

ทั้งนี้สมการที่ 7.42 มีเงื่อนไขบังคับ ดังนี้

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = s_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7.43)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j} = d_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7.44)$$

ความหมายของพจน์ทั้ง 3 สมการ คือ พจน์  $s_i$  เป็นแหล่งอุปทาน (supply) ที่มีสินค้าไว้จำหน่ายที่จุดตั้งต้น พจน์  $d_j$  เป็นแหล่งอุปสงค์ (demand) ที่ต้องการรับสินค้าไว้ที่จุดปลายทาง พจน์  $c_{i,j}$  เป็นต้นทุนต่อหน่วย (unit cost) ที่มีแนวทิศทางการขนส่ง route  $(i, j)$  พจน์  $x_{i,j}$  เป็นจำนวนสินค้าที่ต้องส่งจาก  $i$  ไปยัง  $j$  ทั้งนี้มีเงื่อนไขบังคับเพิ่มเติมว่าสินค้าต้องเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์  $[x_{i,j} \geq 0]$

ขั้นตอนของการใช้วิธีแก้ปัญหาจากการขนส่ง (สมการ 7.42) ซึ่งเป็นวิธีจำลองตามแบบฉบับของกำหนดการเชิงเส้น (classical linear programming) มาหาค่าผลเฉลยโครงร่างขอบอ้อมเมือง 3 มิติ มีการระบุไว้ในบทความวิจัย (Huttaggosol and Cameron, 1992) ที่แสดงไว้ในเอกสารการประชุมเสนอผลงานวิจัยนานาชาติ หน้า 444-448 รวมทั้งได้ยกตัวอย่างเชิงตัวเลข (numerical example) ไว้ในหน้า 448-449 ก็มีการแสดงกรณีศึกษาของเมืองเปิดทองคำกับเมืองเมืองทองคำป็นเงินไว้เป็นจำนวน 2 เมือง ตามรายละเอียดของบทความวิจัยที่นำเสนอ มีการกำหนดให้ใช้วิธีวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ต่ำสุดของหน่วยของต้นทุนในแนวเส้นทาง (unit path cost) หรือการหาผลลัพธ์ในแนวเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยสุด โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมกำหนดการเชิงเส้น ทั้งนี้การขุดเจาะยังใช้ระบบของกรวยเคลื่อนที่ในแนวภาพตัดขวางที่กำหนด

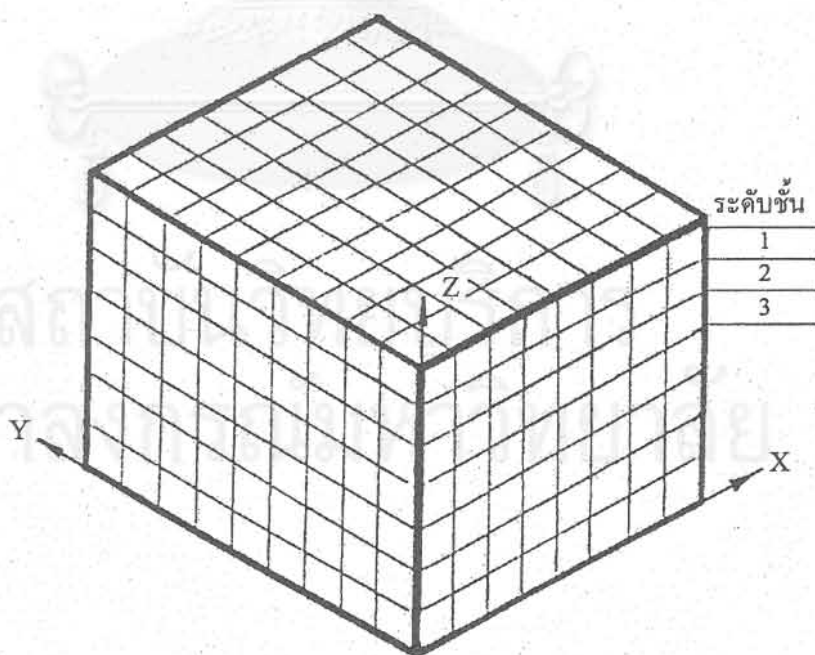
ข้อเด่นของวิธี transportation อีกอย่างคือ รหัสคำสั่งของคอมพิวเตอร์ (computer code) มีขั้นตอนวิธีที่อ่านเข้าใจง่าย ตรงไปตรงมา มีตัวแปรเสริมที่เป็นข้อมูลเข้าของระบบการคำนวณไม่มากเหมือนวิธีอื่น และประสิทธิภาพของการคำนวณโดยรวมไม่ได้ดีกว่าการใช้วิธีการทางระบุทิศทาง หรือการใช้วิธีการไหลสูงสุด

## 7.4.2 แนวคิดของวิธี Mining Sequences

การปรับปรุงวิธีหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของการขุดเจาะ อาจทำได้โดยการจัดลำดับของการทำเหมืองที่มีค่าเหมาะสมที่สุด (optimum mining sequence) วิธีการนี้เป็นสิ่งที่วิศวกรใช้วางแผนเพื่อตัดสินใจว่า ส่วนใดของแหล่งสะสมแร่ ที่เวลาไหนต้องนำเอาสินแร่ออกหรือที่เวลาไหนต้องนำเอากากออกจากบ่อเหมือง

จุดยุ่งยากของการทำงานเพื่อลำดับเวลาการขุดเจาะที่เหมาะสมที่สุด เกิดจากการจัดหมู่ของตัวแปรเสริมที่เป็นข้อมูลเข้า บางครั้งต้องใช้วิธีลองผิด-ถูก หรือใช้กราฟิกเชิงโต้ตอบ (interactive graphics) การบรรยายสรุปในหัวข้อนี้เป็นผลงานวิจัยของสถาบันวิศวกรรมเหมืองแร่ ที่กรุงเบอร์ลิน ประเทศเยอรมัน ซึ่งมีการเผยแพร่ใน Transactions, IMM (Huang, 1992) ที่เขียนจากวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกปี ค.ศ. 1992 ที่เป็นภาษาเยอรมัน ทั้งนี้มีการประยุกต์แบบจำลองเชิงโต้ตอบและโปรแกรมซอฟต์แวร์เพื่อหาการจัดลำดับการเปิดบล็อก 3 มิติในพิกคาร์ทที่เขียนที่เหมาะสมที่สุด (ดูรูปที่ 7.13 ประกอบ)

แบบจำลองการจัดลำดับ (sequence model) ที่ Shuzhang Huang (1992) สร้างขึ้นมาใช้กราฟิกเชิงโต้ตอบสนับสนุน รหัสคำสั่งที่เป็นซอฟต์แวร์ประกอบด้วยโปรแกรมกำหนดการเชิงเส้น 3 ระบบ ข้อมูลเข้าที่จำเป็นได้ระบุไว้ในตารางที่ 7.4 (ไม่ได้แปลความหมายของคำศัพท์เป็นภาษาไทยไว้ในตาราง) ก่อนดำเนินการหาผลลัพธ์ค่าอะไร ข้อมูลเข้าในตารางที่ 7.4 ต้องมีการปรับให้ทันสมัยก่อน



รูปที่ 7.13 แบบจำลองบล็อก 3 มิติในระบบพิกคาร์ทที่เขียน ใช้เป็นตัวแทนของการคำนวณเพื่อจัดลำดับขุดเจาะบล็อกเล็กๆ ในแบบจำลองรูปลูกบาศก์

ตารางที่ 7.4 ข้อมูลเข้าที่จำเป็นที่ต้องนำไปคำนวณในโปรแกรมซอฟต์แวร์กำหนด  
การเชิงเส้นใน 3 ระบบ โดยอิงกับแบบจำลองของรูปที่ 7.12

a) Number of rows, columns and benches in three-dimensional block model
b) Dimensions of blocks (width and height on each bench)
c) Specific gravity of ore and waste, $t/m^3$
d) Grade, $g_{ij}$ , of each variable $j$ in each block $i$ , %
e) Proportion of ore, $O_i$ ( $0 \leq O_i \leq 1$ ), in each block $i$ , Proportion of ore in each block can be calculated if coordinates of polygons representing ore areas on each bench are given.

ในบทความวิจัยของ Shuzhang Huang ได้มีการอธิบายโปรแกรมกำหนดการเชิงเส้นไว้ มีรายละเอียดตั้งแต่หน้า A 126 – A 130 เนื้อหาโดยสรุปแบ่งระบบของโปรแกรมที่เขียนจากสมการในระบบ LP (linear programming) ไว้ 3 ส่วน ดังนี้

1. ระบบ LP ในการหาลำดับทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดเพื่อขุดเจาะบล็อกสินแร่
2. ระบบ LP ในการหาลำดับทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดเพื่อขุดเจาะบล็อกที่เป็นกาก
3. ระบบ LP ในการหาลำดับทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดเพื่อขุดเจาะบล็อกสินแร่ที่เป็น exposed ore blocks

#### โปรแกรมใน ส่วนที่ 1

โปรแกรม LP ส่วนนี้ใช้คำนวณหาลำดับเวลาที่เหมาะสม ในการขุดเจาะบล็อกสินแร่ปกติ ที่เป็นขั้นตอนหลักลำดับแรก มีการแบ่งส่วนโปรแกรมที่ 1 นี้ออกเป็นส่วนย่อย ได้แก่

1.1 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) เป็นการตั้งเกณฑ์ของค่าต่ำสุดที่เป็นเกรดสินแร่ในระบบ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันทั้งสัดส่วนสินแร่ในบล็อกกับสัดส่วนของกากในบล็อก รวมทั้งมีการกำหนดตัวประกอบค่าถ่วงน้ำหนัก (weighted factor) ไว้ด้วย

1.2 เงื่อนไขบังคับ (constraint) ข้อกำหนดเหล่านี้ต้องระบุไว้ล่วงหน้าก่อนการคำนวณ ซึ่งเงื่อนไขบังคับส่วนใหญ่ เป็นคุณภาพที่เป็นเกรดสินแร่ กำลังความสามารถของการผลิตจากการใช้เครื่องจักรกลในเมือง รูปแบบเชิงเรขาคณิตที่จำกัดการเปิดบล็อกหน้างานพัฒนาเหมือง และลักษณะของการขุดเจาะโดยรวมที่เป็น sink cut มีความคล้ายคลึงกับกรวย 3 มิติ

1.3 การกำหนดบล็อกที่เป็น บล็อกที่ต้องการขุดเจาะ หรือ candidate block ซึ่งเป็นบล็อกที่มีเกรดสูงสุดในช่วงเวลาที่ทำการขุดเจาะ ในการคำนวณเพื่อเลือกบล็อกที่เป็น candidate block นอกจากต้องเป็นบล็อกที่สามารถใช้เครื่องจักรกลขุดเจาะได้แล้ว (minable block) ยังมีการกำหนดเกณฑ์ที่เหมาะสมอื่นประกอบเช่น ความกว้างของทางลาดที่เชื่อม

ระหว่างชั้นตะพัก (lamp width) ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนบล็อกที่อยู่ระดับบนกับจำนวนบล็อกที่อยู่ในช่วงเวลาการขุดเจาะ (ที่อยู่ชั้นระดับล่าง) เป็นต้น

### โปรแกรมใน ส่วนที่ 2

โปรแกรมส่วนนี้ใช้คำนวณหาลำดับเวลาที่เหมาะสมในการขุดเจาะบล็อกที่ไม่สามารถซื้อขายได้ จัดเป็นบล็อกที่เป็นกาก ทั้งนี้ต้องการให้มีการใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง การขุดเจาะบล็อกหินแร่ในช่วงบางเวลาอาจไม่ได้ใช้เต็มสมรรถนะ หรือมีเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ว่างจึงมีการจัดลำดับเวลาที่ใช้ในการขุดเจาะบล็อกที่เป็นกากด้วยโปรแกรม LP ส่วนนี้ที่เป็นขั้นตอนหลักลำดับที่ 2 แบ่งออกเป็นส่วยย่อย ได้แก่

2.1 การจัดรูปแบบ (formulation) เพื่อหาลำดับเวลาที่เป็นทางเลือกในการขุดเจาะบล็อกที่เป็นกาก ซึ่งอาจต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความต้องการขุดเจาะก่อน (priority coefficient of excavation) ที่ใช้ในสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ให้มีค่าสูงกว่าปกติ ทำให้ต้องเปิดบล็อกที่เป็นกากก่อน

2.2 การกำหนดบล็อกที่เป็นกาก ให้เป็น candidate block ทั้งนี้โดยใช้เงื่อนไขของบล็อกที่สามารถเปิดทำเหมืองได้ร่วมกับค่าของความกว้างของคันทาง ระหว่างระดับชั้นที่ลึกแตกต่างกัน

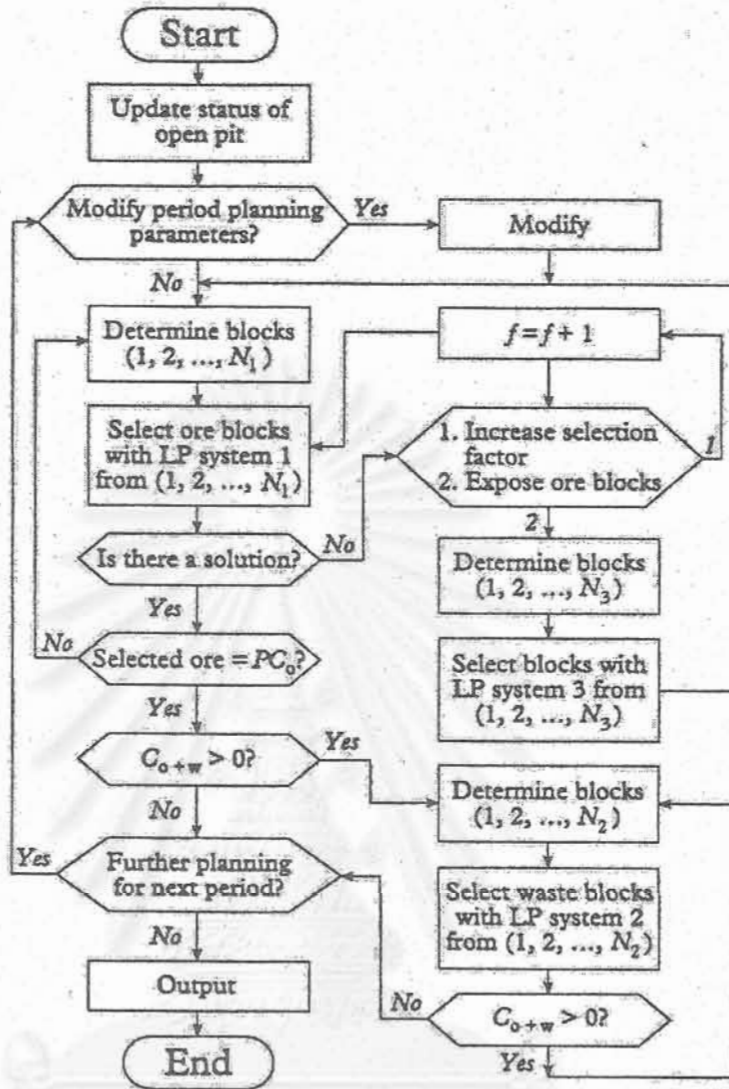
### โปรแกรมใน ส่วนที่ 3

โปรแกรมส่วนนี้เป็นส่วนพิเศษที่เพิ่มเข้ามาในระบบ เพื่อแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทำการพัฒนาหน้าเหมือง ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ค่าเฉลี่ยของเกรดหินแร่ต่ำใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้มีการขุดเจาะบล็อกหินแร่ออก เพื่อให้กระบวนการจัดลำดับเวลาในการพัฒนาเหมืองสามารถดำเนินต่อไปได้ จำเป็นต้องมีการเพิ่มตัวแปรเสริมที่เป็นค่าตัวประกอบในการเลือก (selection factor) เข้าไปในระบบ LP ซึ่งโปรแกรม LP ส่วนนี้ที่เป็นขั้นตอนหลักลำดับที่ 3 แบ่งออกเป็นส่วยย่อย ได้แก่

3.1 การกำหนดเงื่อนไขบังคับเชิงวิกฤต (critical constraint) เป็นการใช้การวิเคราะห์เกรดหินแร่เชิงสถิติของแต่ละระดับชั้น ระหว่างระดับชั้นที่กำลังพัฒนากับระดับชั้นที่อยู่ด้านบน โดยใช้เงื่อนไขตั้งต้นที่คล้ายคลึงกับการกำหนดคุณภาพของเกรดจากบล็อกหินแร่ปกติ

3.2 การกำหนดบล็อกที่ต้องการเปิดทำเหมืองก่อน (prior mining) ข้อกำหนดในหัวข้อย่อยนี้ อาจจำเป็นต้องใช้ถ้าหากในระหว่างทำการขุดเจาะที่ระดับชั้นหนึ่งมีบล็อกหินแร่โผล่ (exposed block) เกินกว่าหนึ่งบล็อก เพื่อให้สามารถควบคุมคุณภาพที่เป็นเกรดหินแร่ในระบบ

เนื้อหาลำดับต่อมาของบทความวิจัย เป็นการแสดงแผนเค้าร่าง (schematic plan) ของการจัดลำดับ (ดูรูปที่ 7.14) ซึ่งเป็นการโครงสร้างหลักของแบบจำลองที่เป็นส่วนจำเพาะของการวางแผน (planning module) ที่ใช้ระบบ LP จำนวน 3 ระบบ



$C_0$	= the ore blocks must be selected for mining in a time period	$C_{o+w}$	= the ore and waste blocks to be selected for mining
$N_1$	= the number of blocks in the LP system 1	$N_2, N_3$	= the number of blocks in the LP system 2 and 3, respectively
$PC_0$	=tonnage of ore blocks	$f$	= selection factor

รูปที่ 7.14 แผนภาพเค้ร่างระบบ LP ที่อิงจากผลงานของ Shuzhang Huang ใช้เป็นโครงสร้างในการเขียน โปรแกรมซอฟต์แวร์ของแบบจำลองบล็อก 3 มิติ พจน์ตัวแปรเสริมระบุความหมายภาษาอังกฤษไว้ในกรอบเล็กได้แผนภาพ



กรณีศึกษาของการจัดลำดับเวลาที่เหมาะสมในการพัฒนาเหมืองนี้ ได้ทดลองใช้กับเหมืองเปิดที่เหมืองหินปูนขนาดเล็ก ที่มีการควบคุมคุณภาพของส่วนประกอบ 4 ส่วนที่อยู่ในหินปูน (limestone) ที่จัดส่งไปยังโรงถลุง สารประกอบและธาตุเหล่านี้ ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{P}$  ซึ่งในกรณีศึกษามีการกำหนดค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักที่มีความแตกต่างกันของแต่ละส่วนประกอบไว้ด้วย ผลลัพธ์จากการวางแผนมีการลำดับเวลาในการขุดเจาะบดลือกหินปูนจากแบบจำลองบดลือกลูกบาศก์ 3 มิติ เป็น 5 ลำดับช่วงเวลา โปรแกรม LP ที่ใช้กราฟิกเชิงโต้ตอบนี้ สามารถตอบสนองความต้องการลูกค้าในเรื่องคุณภาพสินแร่ ที่เป็นตัวเลขเปอร์เซ็นต์ค่าเกรดต่ำสุดของส่วนประกอบในหินปูนได้เป็นอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 8

### กรณีศึกษาของเหมืองเปิด

เนื้อหาในบทนี้ ในส่วนแรกเป็นการกำหนดหลักเกณฑ์การประเมินหาความเหมาะสมของเหมืองเปิด ส่วนที่สองเป็นการบรรยายกรณีศึกษาของเหมืองเปิดที่เป็นเหมืองแร่ในต่างประเทศ ที่มีการใช้วิธีการวิเคราะห์หาผลลัพธ์โครงการขบอบ่สุดท้ายที่เหมาะสมที่สุดในรูปแบบที่แตกต่างกัน ส่วนที่สามเป็นกรณีศึกษาของเหมืองหินกับเหมืองแร่ในประเทศ ทั้งนี้ได้มีการสำรวจตรวจสอบในภาคสนามหน้างานเหมืองหลายแห่ง รวมทั้งมีความพยายามเลือกเหมืองที่มีความแตกต่างกันในรูปแบบของการพัฒนา ชนิดกับขนาดของเหมือง สภาพภูมิประเทศและสภาพธรณีวิทยา ตลอดจนความแตกต่างในเรื่องจำนวนเงินลงทุนของเหมืองกับขนาดของเครื่องจักรกลและอุปกรณ์

#### 8.1 หลักการเบื้องต้นในการจำแนกประเภทของแหล่งเหมืองเปิด

การประเมินผลเพื่อกำหนดขบอบ่เหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด ผู้วิจัยโครงการอาจมีแนวคิดที่แตกต่างจากผู้วิจัยท่านอื่น ได้แก่ แนวคิดในการจำแนกประเภทของเหมืองเปิดก่อนดำเนินการหาวิธีออกแบบขบอบ่เหมืองเปิด ด้วยเหตุผลหลัก 4 ประการคือ

1. ชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ประโยชน์ (หรือซื้อขาย) มีความแตกต่างกัน เช่น หินที่ระเบิดมาเพื่อบดย่อยให้ได้ขนาด สินแร่โลหะ สินแร่โลหะ ความแตกต่างเหล่านี้มีผลต่อการกำหนดค่าตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินขนาดเหมือง วิธีการพัฒนาหน้างานขุดเจาะ ความคุ้มค่าในการพัฒนาเพื่อนำวัสดุที่เป็นหินหรือสินแร่มาใช้ประโยชน์ และมีผลต่อเสถียรภาพของงานขุดเจาะที่กระทำในมวลหินเป็นส่วนใหญ่ หรืองานขุดเจาะที่กระทำในมวลดินเป็นส่วนใหญ่
2. รูปแบบเชิงเรขาคณิตของการทำเหมืองเปิด มีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนระหว่างเหมืองหินกับเหมืองแร่ การทำเหมืองหินส่วนใหญ่เป็นการตัดความลาดเนินเขาในขณะที่การทำเหมืองแร่เป็นการขุดบ่อเหมืองเปิดเพื่อนำสินแร่ที่ถูกคลุมทับออกมา เพื่อแยกแร่หรือถลุงแร่ ให้มีความบริสุทธิ์เพียงพอต่อการซื้อขายในท้องตลาด

3. ความสมบูรณ์ของวัสดุตัวแทนในการทำเหมืองเปิดมีความแตกต่างกันมาก ภายในแหล่งหินหนึ่งอาจมีความแตกต่างน้อยระหว่างเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบ หรือเกรดของแร่ที่ประกอบในมวลหินภายในเขตประทานบัตร ความสมบูรณ์ภายในมวลหินที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันอาจแตกต่างกันไม่มาก แต่สำหรับแหล่งแร่ นั้น โอกาสที่จะเกิดความแตกต่างของแต่ละตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันในเขตประทานบัตรเป็นไปได้สูง ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์โลหะที่เป็นเกรดแร่ในมวลสินแร่มีได้ตลอดเวลา

4. จากเหตุผลทั้ง 3 ประการดังกล่าว ตัวแปรหลักที่เป็นค่าใช้จ่ายของการทำเหมืองหินจึงพึ่งพิงกับค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดหินและการขนย้ายหินที่แตกหักไปยังโรงบดย่อยหิน แต่ค่าใช้จ่ายของการทำเหมืองแร่มีตัวแปรที่ต้องคำนึงมากกว่านั้น ปกติมีการใช้วัตถุระเบิดในเหมืองแร่น้อยกว่าเหมืองหิน บุคลากรที่เป็นผู้ปฏิบัติงานในเหมืองหินกับเหมืองแร่มีความถนัดงานหน้าเหมืองที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ลักษณะของงานเหมืองหินมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่าเหมืองแร่จึงมีผลกระทบต่อวิธีการออกแบบเหมืองด้วย

## 8.2 กรณีศึกษาของเหมืองหิน

กรณีศึกษาการออกแบบเหมืองหินนี้ใช้แนวทางที่นำเสนอโดย The Institute of Quarrying, United Kingdom (White and Robinson, 1995) เป็นหลัก โดยประยุกต์ร่วมกับผลงานวิจัยของผู้วิจัยอื่นหลายโครงการ (MacKenzie, 1967; Dick et al., 1973; Hustrulid and Kuchta, 1995) และผลงานของหัวหน้าโครงการวิจัยเอง (สง่า ตั้งชวาล, 2543 ก กับ 2543 ข) โดยประมวลผลการออกแบบเพื่อหาความเหมาะสมที่สุดในเชิงหน่วยค่าใช้จ่ายรวม (total unit cost) สำหรับการพัฒนางานเหมืองหิน

### 8.2.1 การหาค่าความเหมาะสมที่สุดของการระเบิดหินให้แตกหัก

งานเปิดเหมืองหินจำเป็นต้องใช้วัตถุระเบิดตลอดเวลา การหาค่าความเหมาะสมจึงขึ้นกับชนิดของวัตถุระเบิดและการออกแบบวิธีการระเบิดหิน ที่มีการพัฒนาในหลายรูปแบบในประเทศ วัตถุระเบิดหลักยังคงเป็น AN-FO (Ammonium Nitrate plus Fuel Oil) ร่วมกับไดนาไมต์ที่เป็นแท่งสารเจลประเภทไนโตรกลีเซอริน (nitroglycerine gelatine) แต่ตัวแปรหลักภายหลังการระเบิดหินเพื่อหาความเหมาะสมจะเป็นงานบดย่อยหิน ตัวแปรร่วมที่ต้องพิจารณาหาความเหมาะสมอีกรูปแบบหนึ่ง ได้แก่ เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่จัดซื้อหรือเช่า จำเป็นต้องมีลำดับขั้นตอนในการใช้งานกับการบำรุงรักษาให้เหมาะสมอีกด้วย

งานพัฒนาเมืองหินต้องวางแผนทั้งระบบ เพื่อให้การแบ่งงานสำหรับบุคลากรในองค์กร และมีการใช้งานเครื่องจักรกลเกิดประสิทธิภาพสูงสุด มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยของหินที่ผลิตได้มีค่าการผลิตต่ำสุด การปฏิบัติงานไม่อยู่ในสถานะที่เสี่ยงเกินขีดจำกัดของความปลอดภัย

การออกแบบขอบบ่อเหมืองหิน มีขั้นตอนที่ต้องวิเคราะห์ร่วมกันตั้งแต่ จำนวนของชั้นตะพักและความลาดชันที่เหมาะสม จำนวนทางลาดในเมือง และเส้นทางขนส่งลำเลียงจากหน้าเหมืองไปยังโรงโม่หรือลานสตั๊กหิน รูปแบบของหลุมเจาะ ชนิดของแพดเทิร์นการระเบิดที่ให้ค่าการแตกหักที่ดีมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เครื่องจักรกลที่ใช้ในการเจาะระเบิดและขนส่งลำเลียง ขนาดของมวลหินที่แตกหักได้ชิ้นส่วนที่เหมาะสมก่อนลำเลียงไปบดย่อยในโรงโม่

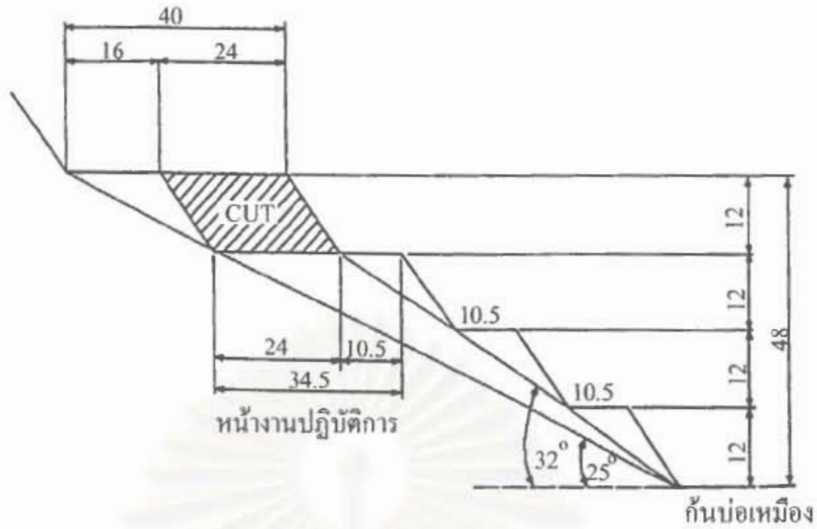
### 1. การออกแบบชั้นตะพักในเมืองหิน

วิศวกรสามารถคำนวณจำนวนของชั้นตะพักในเขตประทานบัตรเหมืองหิน โดยอาศัยความรู้เชิงเรขาคณิต ดังแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 8.1 หน้าถัดไป โดยกำหนดความชันของชั้นตะพักย่อย จำนวน 4 ชั้น ให้มุมความชันหน้าความลาดหินคงที่ตลอดเวลา ความกว้างที่เปิดหน้างานนั้นควรออกแบบให้เหมาะสำหรับการใช้รถ shovel ขนาดกลางปฏิบัติงานขุดตัดได้สะดวก

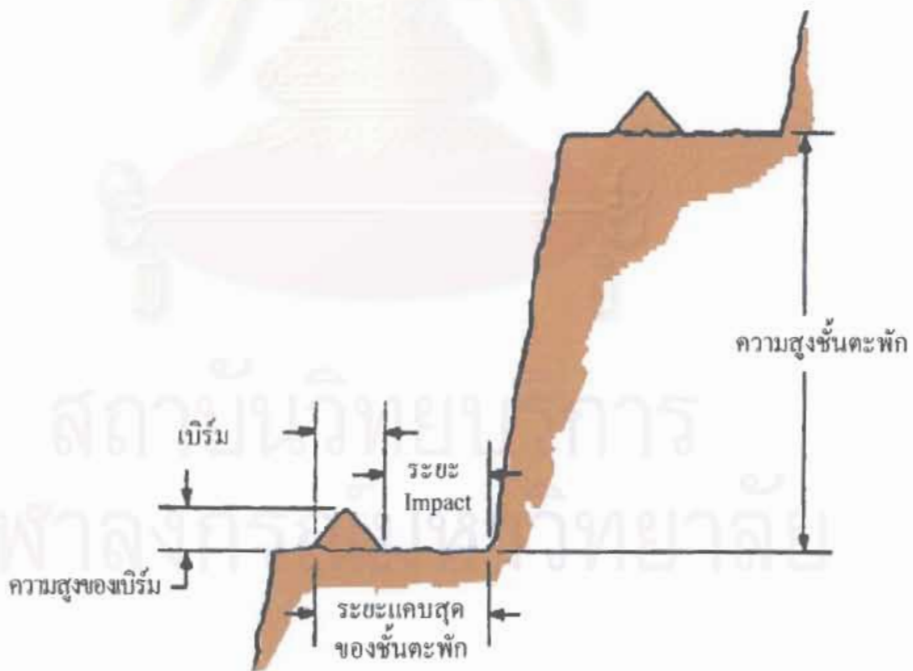
ในการระเบิดหินนั้น อาจมีหินปลิวกระเด็นจากหลุมเจาะไปยังตะพักที่อยู่ในระดับที่ต่ำลงไป หรือเศษหินตรงขอบปลายตะพักอาจหล่นลงไปในตะพักด้านล่างได้ จึงต้องทำคันทินเสริมเพื่อป้องกันอุบัติเหตุดังกล่าว ขนาดของคันทินที่เสริมขึ้นมาบนตะพักนี้ มีข้อเสนอแนะจาก Ritchie (1963) ให้สัดส่วนกับความสูงกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตชั้นตะพัก ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 มิติของคันทินเสริมที่แปรเปลี่ยนตามระยะและขนาดความสูงของชั้นตะพัก (หน่วยเป็นเมตร)

ความสูงชั้นตะพัก (Bench Height)	ระยะห่างถึงคันทิน (Impact Zone)	ความสูงของชั้นเบิร์ม (Berm Height)	ความกว้างของ ชั้นเบิร์ม (Berm Width)	ความกว้างของ ชั้นตะพัก (Bench Width)
7.5	1.5	0.8	2	3.5
15	5	1	3	8
30	7	1	3	10



รูปที่ 8.1 การตัดชั้นตะพักจากระดับบนสุดที่เปิดหน้าเหมืองจนถึงระดับต่ำสุดที่มีการผลิตหิน การออกแบบวิธีนี้เป็นการกำหนดมุมความชันของชั้นตะพักแต่ละชั้นให้คงที่ ตัวเลขแสดงระยะมีหน่วยเป็นเมตร



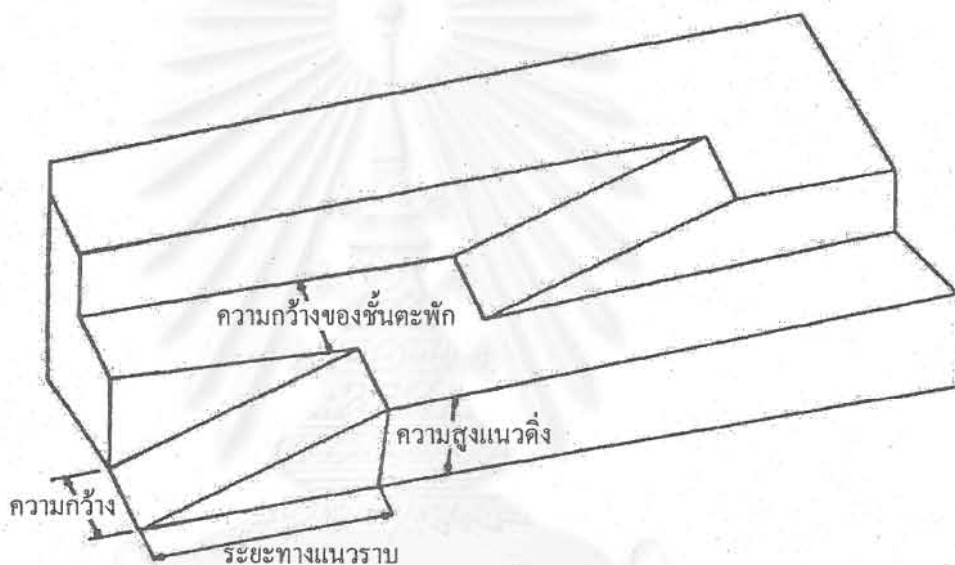
รูปที่ 8.2 การเสริมชั้นค้ำหินบนตะพักเพื่อป้องกันผลกระทบจากหินปลิว และหินที่หล่นไต่จากการทำงานของเครื่องจักรกลค้ำหินบนตะพัก



ชั้นคันทินเสริมช่วยให้การใช้เครื่องจักรกลมีความปลอดภัยสูงขึ้น คล้ายกับราวกันรถตกของทางหลวงหรือสะพาน กองคันทินเสริมควรสูงไม่ต่ำกว่ารัศมีของล้อรถบรรทุก และมุมของความชันประมาณ 35 องศา

## 2. การออกแบบถนนในบ่อเหมืองเปิด

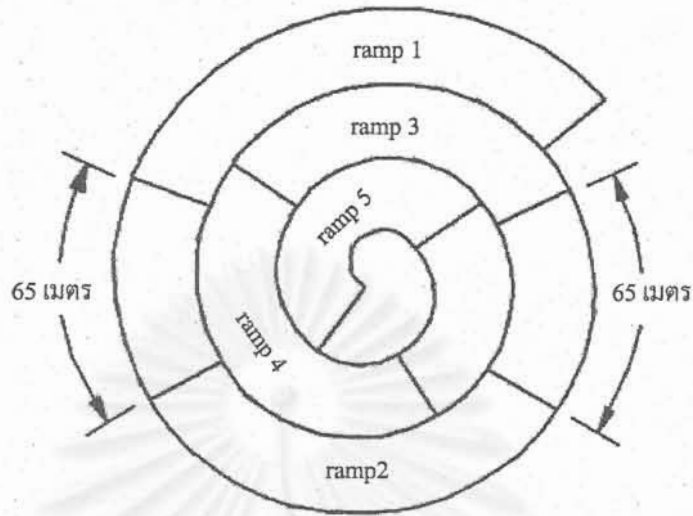
กรณีที่มีการตัดความลาดเพื่อทำเป็นถนนในบริเวณบ่อเหมืองเปิด ดังไดอะแกรมในรูปที่ 8.3 มีจุดประสงค์เพื่อให้เครื่องจักรกลขนาดหนักสามารถปฏิบัติงานหน้างานที่จะทำการระเบิดได้อย่างสะดวก หรือเพื่อขนส่งลำเลียงหินที่ระเบิดแล้วไปยังโรงโม่บดย่อย



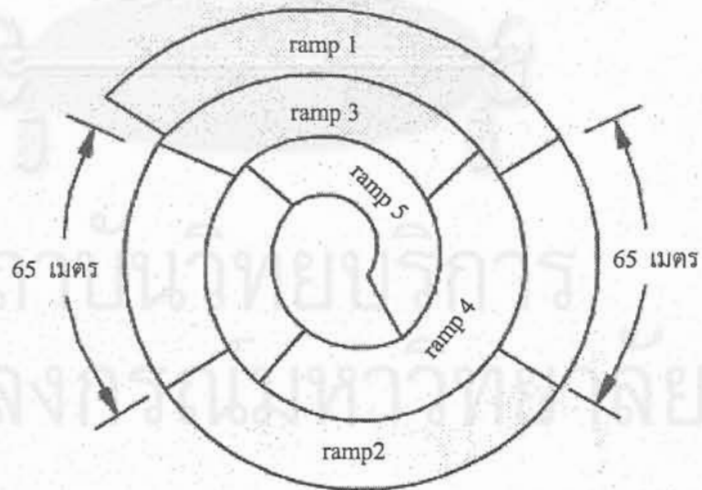
รูปที่ 8.3 ไดอะแกรมทางลาดที่ตัดเชื่อมระหว่างชั้นตะพักในบ่อเหมืองเปิด

ปกติมีหลายกรณีที่แนวตัดถนนเป็นข้อมูลเข้าที่จำเป็นและใช้ในการออกแบบจำลอง หากสามารถหาขีดจำกัดขอบบ่อเหมืองได้แล้ว ถนนที่ตัดเป็นทางลาดก็สามารถปรับให้เข้ากับการออกแบบบ่อเหมืองเปิดที่เปลี่ยนแปลงไปได้

การออกแบบถนนเพื่อขนส่งลำเลียงภายในบ่อเหมืองเปิด แนวถนนจะเป็นทางโค้งและอาจมีการตัดทางลาด (ramp) ผ่านชั้นตะพักหลายชั้น และอาจกำหนดให้มีจุดเริ่มต้นที่ด้านต่ำสุดของบ่อเหมืองจากนั้นแนวทางลาดอาจวนรอบขอบบ่อแบบทวนเข็มนาฬิกา (นิยมใช้ในประเทศที่ขับรถเลนขวา) หรือเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา (หากขับรถเลนซ้าย) ตัวอย่างในรูปที่ 8.4 และ 8.5 แสดงแนวทางลาดที่วนทั้งสองรูปแบบ โดยมีความกว้าง 15.5 เมตร ส่วนทางลาดที่วนเป็นก้นหอยจากก้นบ่อที่กำหนดไว้ที่ 65 เมตร



รูปที่ 8.4 การตัดทางลาด 5 ระดับที่มีเส้นทางเวียนเป็นก้นหอยแบบทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 8.5 การตัดทางลาด 5 ระดับที่มีเส้นทางเวียนเป็นก้นหอยตามแบบเข็มนาฬิกา

### 3. การประเมินเสถียรภาพของเหมืองหิน

กรณีทั่วไปของการตัดชั้นตะพักในบ่อเหมืองเปิดหรือตัดชั้นตะพักเนินเขา มีการประเมินเสถียรภาพปกติโดยอาศัยทฤษฎีการพังทลายของ Mohr-Coulomb รูปแบบการพังทลายของหน้างานเหมืองหินที่พบบ่อยแบบการพังทลายแนวระนาบกับการพังทลายรูปปลีมี ผู้วิจัยได้นำเสนอรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ไว้ใน บทที่ 4 รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ (สง่า ตั้งชวาล, 2544) โดยลำดับวิธีการวิเคราะห์แยกไว้ ตั้งแต่การพังทลายที่เป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตอย่างง่ายจนกระทั่งเป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่ยุ่งยากซับซ้อน

การประเมินเสถียรภาพควรมีทั้งผลการวิเคราะห์เชิงกำหนด และผลการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกมุมความชันของหน้าตะพักที่ได้กำหนดความสูงในแนวตั้งไว้แล้ว กราฟผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบใช้เปรียบเทียบค่ามุมความชันของการตัดความลาดระหว่างผลลัพธ์ค่ามุมความชันจากการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด (deterministic stability analysis) และผลลัพธ์ค่ามุมความชันจากการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic stability analysis) ได้ค่าไม่เท่ากัน ในเชิงอนุรักษ์ผู้ปฏิบัติงานควรเลือกมุมความชันที่น้อยกว่าไม่มีข้อจำกัดด้านความคุ้ม

รูปแบบเชิงเรขาคณิตของชั้นตะพักและระดับของความเสถียร ในการปฏิบัติงานเหมืองเปิด เป็นสิ่งที่วิศวกรกับผู้ปฏิบัติงานภาคสนามจำเป็นต้องตัดสินใจ ในงานเชิงวิศวกรรมเหมืองแร่ มีการเสนอเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Pine, 1992; Whitman, 2000) ตามรูปแบบของความเสถียร ซึ่งได้แยกระดับขั้นของปัญหาการพังทลาย ที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อพัฒนางานเหมืองเปิด เกณฑ์การยอมรับที่ระบุในตารางที่ 8.2 ผู้วิจัยได้ปรับแก้จากข้อมูลดั้งเดิมเล็กน้อย เพื่อประยุกต์ใช้ทั่วไปในงานเหมืองเปิดของเหมืองหินหรือเหมืองแร่ ที่ต้องอาศัยวัตถุระเบิดเป็นหลัก

ตารางที่ 8.2 เกณฑ์การยอมรับเมื่อวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างความเสถียรกับตัวเลขเชิงเสถียรภาพสำหรับเหมืองเปิดที่ใช้ได้ทั้งเหมืองหินและเหมืองแร่

ชนิดของการปฏิบัติการ	ช่วงระยะเวลา ก่อนมี การพังทลาย	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความน่าจะเป็นใน การพังทลาย
สิ่งก่อสร้างงานวิศวกรรม โยธาที่มีอายุการใช้งานนาน	นานมาก	น้อยกว่า 0.5%
โครงสร้างสิ่งก่อสร้างทั่วไป	นาน	0.5 – 1.5%
เหมืองเปิดขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง	ปานกลาง	1.5 – 15%
เหมืองเปิดขนาดใหญ่	ปานกลาง	1.5 – 15%
หน้างานเหมืองทั่วไป	สั้น	15 – 30%
งานตัดระดับหรือตัดทางลาดชันดิน (ชันหิน) ชั่วคราว	สั้นมาก	30 – 50%

#### 4. การพิจารณาหน่วยค่าใช้จ่ายรวมของการพัฒนาเหมืองหิน

การพัฒนางานเหมืองหินนั้น ค่าการผลิตหินมีหน่วยค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนัก (หรือปริมาตร) ของหินที่ผลิตอยู่หลายค่า ตัวแปรค่าใช้จ่ายเหล่านี้แยกพิจารณาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดหินก่อนเข้าโรงโม่ กับค่าใช้จ่ายของการบดย่อยให้ได้ขนาด ในการวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์ ผู้วิจัยโครงการมีข้อเสนอแนะว่า ควรแยกพิจารณาตามขนาดของเหมืองเปิดเป็น 2 ประเภท (สง่า ตั้งชวาล, 2543 ข) เพราะจำนวนเงินลงทุนในการจัดซื้อเครื่องจักรกลและอุปกรณ์แตกต่างกันมาก ระหว่างเหมืองขนาดใหญ่กับเหมืองขนาดเล็ก ปกติหลุมเจาะระเบิดเหมืองหินขนาดใหญ่มีขนาดตั้งแต่ 200 มม. ขึ้นไป และการระเบิดแต่ละครั้งมีปริมาตรหินตั้งแต่ 30,000 ลบ.ม. หรือมากกว่านี้ หนึ่งตัวแปรอื่นที่เป็นค่าสมรรถนะของเครื่องจักรกลที่มีผลต่อการผลิตโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการผลิตหินที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนด้วย

##### ก). หน่วยค่าใช้จ่ายของการผลิตหินก่อนส่งโรงโม่

การผลิตหินต้องการทำให้เกิดการแตกหักของมวลหินระเบิดที่ ได้ขึ้นส่วนขนาดเหมาะสมกับปากโม่ที่บดย่อยหิน (primary crusher) ตามที่ได้ออกแบบหรือจัดซื้อไว้ หน่วยค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนัก (ปริมาตร) หินที่ผลิต มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

- ค่าใช้จ่ายในการเจาะหลุมระเบิด (drilling) คำนวณเป็นหน่วยค่าใช้จ่ายต่อจำนวนหลุมเจาะ ถ้ามีหลุมเจาะในแพดเทิร์นของหน้างานระเบิดเพิ่มขึ้น หน่วยค่าใช้จ่ายจะสูงขึ้นตามจำนวนหลุมเจาะ และมีผลทำให้มวลหินเกิดการแตกหักได้ขึ้นส่วนเล็กละเอียดมากขึ้น

- ค่าใช้จ่ายในการระเบิด (blasting) คำนวณเป็นหน่วยค่าใช้จ่ายโดยตรงกับวัตธุระเบิดที่ใช้ตามแพดเทิร์นของหน้างานระเบิด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าค่าปริมาณน้ำหนักวัตธุระเบิดต่อปริมาตรแน่นของหินระเบิดมีค่าสูงขึ้น ถ้าต้องการให้มวลหินแตกเป็นชิ้นส่วนเล็กละเอียดมากขึ้น ปกติค่าใช้จ่ายประเภทนี้ยังรวมถึงการระเบิดย่อยครั้งที่สอง (secondary blasting) หรือการใช้อุปกรณ์ breaker เพื่อทำให้หินที่ได้จากการระเบิดครั้งแรกขึ้นส่วนขนาดใหญ่แตกมีขนาดเล็กลงเหมาะกับการขุดตักและขนย้าย

- ค่าใช้จ่ายในการขนตัก (loading) เพื่อเคลื่อนย้ายหินระเบิด คำนวณเป็นหน่วยค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้รถ shovel หรือ รถ front end loader ในการตักขุดหินที่แตกหักและขนออกจากบริเวณหน้างานระเบิดไปลำเลียงใส่รถบรรทุกหิน ถ้าชิ้นส่วนหินมีขนาดเล็ก หน่วยค่าใช้จ่ายจะลดต่ำลงเพราะการขุดตักสะดวกได้ปริมาณหินที่ขนตักเป็นปริมาณมากกว่าหนึ่งถ้ามีค่าเหมาะจ่ายในการคั่นกองหินหรือปรับถนน ก็รวมค่าใช้จ่ายอยู่ในหมวดการขนตักด้วย หรือถ้ามีการใช้ breaker ในช่วงขนตักและยังไม่ได้รวมไว้กับการเจาะระเบิดก็ให้รวมค่าใช้จ่ายในการกระแทกหินให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้เครื่องจักรกลทำงานได้สะดวกไว้ในหมวดนี้ได้

- ค่าใช้จ่ายในการลำเลียงขนย้าย (hauling) เพื่อบรรทุกหินระเบิดไปยังปากโมหรือถาดสต็อกหิน จำนวนเป็นหน่วยค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้รถบรรทุกสิบล้อ หรือรถบรรทุกประเภทเปิดท้าย (dump truck) ลำเลียงขนย้ายหินต่อระยะทางที่บรรทุกจากหน้างานระเบิดไปยังกองสต็อกหรือปากโม ถ้าชิ้นส่วนหินระเบิดเล็กละเอียด การขนย้ายทำได้รวดเร็วเนื่องจากรถสามารถบรรทุกหินได้ปริมาณมากขึ้น หน่วยค่าใช้จ่ายของการลำเลียงขนย้ายต่อระยะทางก็ลดลง

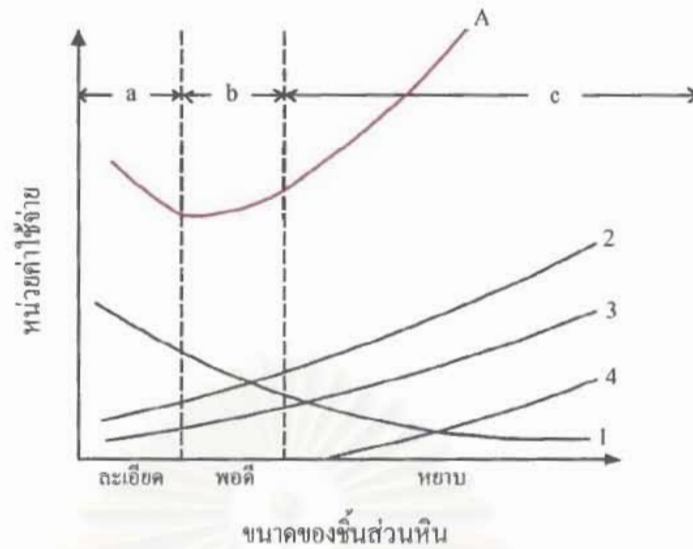
ข). หน่วยค่าใช้จ่ายของการบดย่อยหิน

- ค่าใช้จ่ายในการบดย่อยหิน (crushing) จำนวนเป็นหน่วยค่าใช้จ่ายที่มีผลต่อการบดย่อยให้ได้ขนาดหินที่เหมาะสมกับงานก่อสร้าง ถ้าการระเบิดหินครั้งหนึ่งได้ขนาดหินระเบิดเป็นชิ้นส่วนเล็กจำนวนมาก หมายถึง ขนาดหินที่ผ่านตะแกรงปากโมที่เรียกว่า ขนาด undersize มีมาก จำนวนหินที่ค้างบนตะแกรง (ขนาด oversize) ซึ่งต้องผ่านกระบวนการบดย่อยด้วยเครื่องโมหินครั้งแรกอีกครั้ง (primary crusher) ก็มีน้อยลง หน่วยค่าใช้จ่ายของการบดย่อยต่อน้ำหนัก (ปริมาตร) หินที่ผลิตจะลดต่ำลง ทั้งนี้เพราะหน่วยค่าใช้จ่ายในการบดย่อยหินครั้งแรก เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการใช้พลังงานในการบดย่อยหินให้ได้ขนาดเล็กลง ถ้าลดหน่วยค่าใช้จ่ายในการบดย่อยหินครั้งแรกได้ ก็สามารถลดค่าใช้จ่ายรวมของกระบวนการบดย่อยหินให้ต่ำลงได้

เมื่อทราบตัวแปรย่อยที่เป็นหน่วยค่าใช้จ่ายของแต่ละรายการ แล้วก็นำมาพล็อตเทียบกับขนาดเฉลี่ยของชิ้นส่วนหินที่แตกหักเนื่องจากการระเบิด จากนั้นก็สร้างกราฟยอดรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (เส้นที่ 1) ดังรูปที่ 8.6 ลักษณะของกราฟ (ส่วนใหญ่) จะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่จุดต่ำสุดประมาณชิ้นส่วนหินขนาดกลาง (ระหว่างขนาดละเอียดผ่านตะแกรง ถึงขนาดหยาบค้างบนตะแกรง) วิศวกรหน้าเหมืองมีหน้าที่เลือกตำแหน่งที่เหมาะสม จากขอบบนกับขอบล่างที่หาค่าเฉพาะได้จากเหมืองนั้น โดยพิจารณาจากเครื่องเจาะที่สามารถนำมาปฏิบัติ การเจาะหลุมระเบิดได้อย่างสะดวก รวมทั้งเครื่องจักรกลที่ใช้ร่วมกันในการพัฒนาหน้างานเหมืองหิน

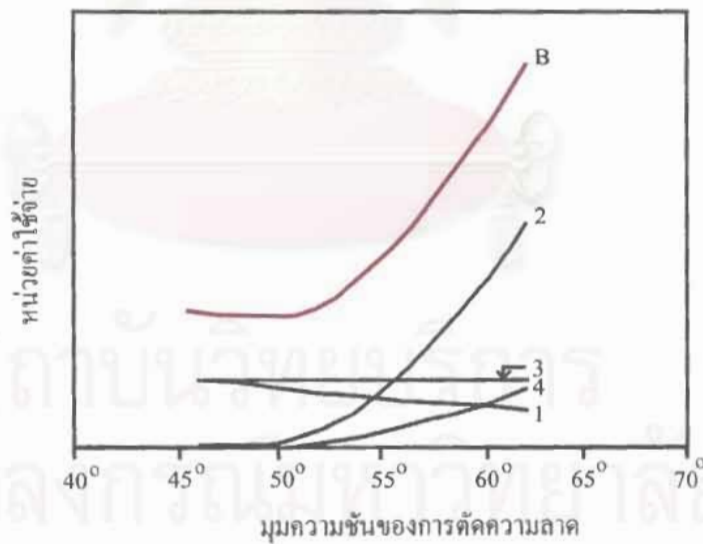
จากข้อมูลสารสนเทศที่ระบุใน เอกสารของ The Institute of Quarrying, Nottingham (White and Robinson, 1995) ระบุว่า ค่าใช้จ่ายในเหมืองหินของส่วนที่เป็นกระบวนการบดย่อยเพื่อลดขนาด ซึ่งเป็นค่าการบดหิน (crushing) แยกขนาดของก้อนหิน (screening) กับการกองสต็อก (stocking) มีค่าใช้จ่ายโดยรวม เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิต สำหรับค่าเจาะระเบิดและลำเลียงขนย้ายรวมกันเพียง 33 เปอร์เซ็นต์ ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ซึ่งจากการสอบถามเป็นการส่วนตัว ข้อมูลสารสนเทศดังกล่าวค่อนข้างสูงกว่าความเป็นจริงของการปฏิบัติงานในประเทศไทยเล็กน้อย ในความคิดเห็นของทีมงานวิจัย โครงการนี้ ควรอยู่ระหว่าง 25-26 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิต ส่วนค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดและลำเลียงขนย้ายมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง





- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 = ค่าเช่าหุ้ยมและระเบิดหิน       | A = ค่าใช้จ่ายโดยรวมคำนวณตามขนาดของหินที่ระเบิด |
| 2 = ค่าขุดตักและขนส่งถ้ำเลียง      | a = ขนาดละเอียดย                                |
| 3 = ค่าบดบอ่ยให้ไ้ขนาด             | b = ขนาดพอดี                                    |
| 4 = ค่าปรับแต่งและลดขนาดหินหน้างาน | c = ขนาดหยาบ                                    |

รูปที่ 8.6 กราฟการประเมินหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาเหมืองหิน



- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1 = ค่าขุดเจาะในการตัดความลาด | 4 = ค่าใช้จ่ายต่อเนื่องจากการพังทลาย    |
| 2 = ค่าซ่อมและเก็บกวาดวัสดุ   | B = ค่าใช้จ่ายโดยรวมเมื่อมีโอกาสพังทลาย |
| 3 = ค่าปรับแต่งความลาด        |   |

รูปที่ 8.7 การสร้างกราฟค่าใช้จ่ายรวมที่เป็นผลมาจากการพังทลาย

## 8.2.2 เกณฑ์ในการพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเหมืองเปิด

การผลิตหินเมื่อเน้นเรื่องความคุ้มค่าและผลประโยชน์ จึงทำให้เกิดเงื่อนไขในการพัฒนาหน้างานเหมืองเปิดที่วิศวกรอาจต้องออกแบบให้มีมุมความลาดชันสูง ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหน้างานเหมืองเปิดมีค่าที่ระดับต่ำสุด จึงต้องมีเกณฑ์เพิ่มเติมในการพิจารณาค่าใช้จ่ายโดยรวม ดังนี้

### 1. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมหรือเก็บกวาดวัสดุตกค้าง

ถ้าเพิ่มความชันของชั้นตะพักหน้างานเจาะระเบิด ความเสี่ยงของการพังทลายก็จะมีมากขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประเมินตัวเลขค่าใช้จ่าย ที่อาจเกิดจากอุบัติเหตุก้อนหินขนาดใหญ่จากหน้างานปฏิบัติการหล่นมาขวางถนน หรือกีดขวางการทำงาน ค่าใช้จ่ายดังกล่าวนี้มีชื่อเฉพาะเรียกว่า clean up cost ได้แก่การซ่อม (ถนนหรือบริเวณหน้างานเหมือง) หรือค่าใช้จ่ายในการเก็บกวาดวัสดุที่ตกค้างบนความลาด (หรือถนน) ถ้าหากก้อนหินที่หล่นมามีขนาดใหญ่ค่าใช้จ่ายประเภทนี้จะสูงตามไปด้วย

### 2. ค่าใช้จ่ายในการปรับแต่งความลาดหน้างานขุดเจาะ

ค่าใช้จ่ายในการปรับแต่ง (reformation cost) นี้ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ทำการขุดเจาะเป็นมวลดินการปรับแต่งมุมความชันหน้างาน ค่าใช้จ่ายจะต่ำกว่าการปรับแต่งมุมความชันหน้างานของมวลหิน การปรับแต่งปกติกระทำด้านบนของชั้นตะพัก

### 3. ค่าใช้จ่ายต่อเนื่องจากการพังทลายของความลาด

ถ้าหากผนังเหมืองเปิดมีการพังทลาย ในบางครั้งจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายต่อเนื่อง (consequence cost) เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากการเก็บกวาดวัสดุตกค้างหน้างานแล้ว เช่น ชันส่วนหินที่ไถลเลื่อนอาจทำให้ทางลาดที่ตัดเชื่อมกับชั้นตะพักเสียหาย หรือบางทีมวลวัสดุไถลเลื่อนไปคลุมชั้นหน้างานระดับล่าง ที่ทางเหมืองวางแผนจะพัฒนาในครั้งต่อไป เป็นต้น นอกจากนี้ อาจมีเครื่องจักรกลเสียหายจากงานขุดเจาะก็นับเป็นค่าใช้จ่ายต่อเนื่องที่มีโอกาสเป็นไปได้เช่นกัน

ตัวอย่างการสร้างกราฟตามเกณฑ์ของมุมความลาดชันที่ผู้ปฏิบัติการเลือกตัด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.7 ทำให้ได้กราฟค่าใช้จ่ายทั้งหมดขึ้นอีกเส้นหนึ่ง (เส้นที่ 2) ดังนั้นถ้ารวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดจากกราฟทั้งสองเส้น ตามเงื่อนไขเฉพาะที่กำหนดสำหรับแต่ละเหมือง เช่น กำหนดค่าที่มุมความชันของการตัดความลาดที่ค่าเดียวกัน ก็จะได้ค่าใช้จ่ายรวมสุทธิของค่ามุมความชันนั้น ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์และปรับแก้หาจุดที่เหมาะสมที่สุดอีกครั้ง ในการออกแบบแสดงขีดจำกัดสุดท้ายของขอบเขตในการเปิดบ่อเหมือง

### ตารางที่ 8.3 ค่าใช้จ่ายจริงในการผลิตหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่

รูปแบบเชิงราคาชนิดหินระเบิดและงานเจาะ

กำลังการผลิต	700,000 ตัน / เดือน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ	7 3/8 นิ้ว
ระยะห่างระหว่างแถวหินระเบิด (B)	5.5 - 6 เมตร
ระยะห่างระหว่างรูเจาะ (S)	8.5 - 9 เมตร
จำนวนรูที่เจาะต่อวัน	35 หลุม / วัน
จำนวนวันที่เจาะต่อเนื่อง	20 วัน / เดือน
ความสูงของหน้างาน	14 เมตร
ความลึกของหลุมเจาะ	17 เมตร
ความกว้างท่าของหิน	2.6
ประสิทธิภาพของงานเจาะที่ระเบิด	95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มที่ 1 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนเจาะ)

พนักงาน (ส่วนเจาะ)	
ค่าใช้จ่ายหลัก	
เงินเดือนผู้บริหาร	50,000 บาท
เงินเดือนพนักงานบัญชีและธุรการ	10,000 บาท
เงินเดือนพนักงานซ่อมบำรุงหรือตรวจสอบการซ่อมบำรุง (รวม)	100,000 บาท
ค่าที่พักสำนักงาน	12,000 บาท
ค่าจ้างพนักงานรักษาความปลอดภัย	10,000 บาท
เงินเดือนพนักงานขับรถเจาะ	11,000 บาท / คน
จำนวนรถเจาะที่ใช้	4 คัน
จำนวนพนักงานขับรถต่อรถหนึ่งคัน	1 - 2 คน
จำนวนพนักงานขับรถเจาะทั้งหมด	7 คน
รวมเงินเดือนพนักงานขับรถเจาะ	77,000 บาท
เงินเดือนวิศวกรและหัวหน้างาน	50,000 บาท
รวม เฉพาะส่วนพนักงานส่วนเจาะ	309,000 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายสนับสนุน	
ค่าจ้างผู้รับเหมารถ	100,000 บาท / เดือน
เครื่องจักรกล + อุปกรณ์การเจาะ	
ค่าใช้จ่ายหลัก	
ราคารถเจาะ	11,000,000 บาท
อายุการใช้งานรถเจาะ	10 ปี
ราคาซาก (รถเจาะ)	1,100,000 บาท
ค่าเสื่อมราคารถเจาะต่อคัน	82,500 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมราคารถเจาะ (รวม)	330,000 บาท / เดือน

กลุ่มที่ 1 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนเจาะ)

ค่าใช้จ่ายสนับสนุน	
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ต่อตันต่อชั่วโมง	50 ลิตร / ชั่วโมง
จำนวนชั่วโมงที่เจาะ	6 - 8 ชั่วโมง / วัน
จำนวนวันที่เจาะ	20 วัน / เดือน
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ต่อเดือน	10,000 ลิตร / เดือน
ราคาน้ำมันต่อลิตร	12.59 บาท / ลิตร
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถเจาะต่อตัน	125,900 บาท / เดือน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงต่อเดือน	503,600 บาท / เดือน
น้ำมันเครื่อง	40 ลิตร / คัน / ครั้ง
อายุการใช้งาน	250 ชั่วโมง (เจาะ)
ราคาน้ำมันเครื่องต่อลิตร	50 บาท / ลิตร
ค่าน้ำมันเครื่องต่อรถเจาะหนึ่งคัน	1,280 บาท / เดือน
ค่าน้ำมันเครื่องต่อเดือน	5,120 บาท / เดือน
ราคารถเจาะ	72,000 บาท
อายุการใช้งานรถเจาะ	3 เดือน
ค่าเสื่อมราคารถเจาะต่อเดือน	96,000 บาท / เดือน
ค่าแรงผู้รับเหมารถเจาะต่อเดือน	10,000 บาท / เดือน
ค่าน้ำมันไฮดรอลิกของรถเจาะต่อเดือน	2,500 บาท / เดือน
ค่าน้ำมันหล่อลื่นรถเจาะ	5,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพสายไฮดรอลิกต่อเดือน	1,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพโช้แทคของรถเจาะต่อเดือน	2,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพก้านเจาะต่อเดือน	90,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพ Adapter ของก้านเจาะต่อเดือน	40,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพปลอกก้านเจาะต่อเดือน	1,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพทรงอากาศ	1,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพ กรองน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันไฮดรอลิก น้ำมันเกียร์	3,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์อื่นๆ ของรถเจาะ	5,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมสภาพหัวเจาะและก้านเจาะ Jack Hammer	500 บาท / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่อเดือน	644,000 บาท / เดือน
รายการระยะสัปดาห์ตรวจงานเจาะและระเบิด	500,000 บาท / คัน
จำนวนรถระยะสัปดาห์ตรวจงานเจาะและระเบิด	1 คัน
ราคาซาก (รถระยะ)	100,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	5 ปี
ค่าน้ำมันรถต่อเดือน	6,666.67 บาท / คัน / เดือน
ค่าใช้จ่ายสำหรับรถตรวจงาน	6,666.67 บาท / เดือน
สรุปค่าใช้จ่ายในการเจาะรถต่อตัน	2.85 บาท / ตัน

ตารางที่ 8.3 (ต่อ) ค่าใช้จ่ายจริงในการผลิตหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่

รูปแบบเชิงราคาผลิตภัณฑ์ระเบิดและงานเจาะ

กำลังการผลิต	700,000 ตัน / เดือน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ	7 3/8 นิ้ว
ระยะห่างระหว่างแถวหน้าระเบิด (B)	5.5 - 6 เมตร
ระยะห่างระหว่างรูเจาะ (S)	8.5 - 9 เมตร
จำนวนรูที่เจาะต่อวัน	35 หลุม / วัน
จำนวนวันที่เจาะต่อเดือน	20 วัน / เดือน
ความสูงของหน้างาน	14 เมตร
ความลึกของหลุมเจาะ	17 เมตร
ความดันขี้เทาของหิน	2.6
ประสิทธิภาพของงานเจาะกับระเบิด	95 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มที่ 2 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนระเบิด)

พนักงาน (ส่วนระเบิด)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
เงินเดือนหัวหน้าแผนกเจาะระเบิด	25,000 บาท
จำนวนพนักงานระเบิด	3 คน
เงินเดือนพนักงานระเบิด	16,000 บาท / คน
จำนวนคนงานระเบิด	10 คน
เงินเดือนคนงานระเบิด	10,000 บาท / คน
รวมเงินเดือนแผนกระเบิด	173,000 บาท
ค่าใช้จ่ายผันแปร	
จำนวนลูกจ้างรายวัน	2 คน
ค่าแรงต่อคนต่อวัน	197 บาท / คน
ค่าจ้างแรงงานระเบิดต่อเดือน	7,880 บาท / เดือน
เครื่องจักร + วัสดุระเบิด	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคาถาวรระเบิด	2,500,000 บาท / ตัน
อายุการใช้งาน	10 ปี

กลุ่มที่ 2 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนระเบิด)

เครื่องจักร + วัสดุระเบิด (ต่อ)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคาซาก	250,000 บาท
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	6,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมราคาถาวรระเบิด	18,750 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายถาวรระเบิดต่อเดือน	24,750 บาท / เดือน
เครื่องจักร + วัสดุระเบิด	
ค่าใช้จ่ายผันแปร	
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อหลุม	310 กก. / หลุม
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อครั้ง	10,850 กก. / ครั้ง
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อเดือน	217,000 กก. / เดือน
ต้นทุนการผสม AN-FO ต่อกิโลกรัม	10.80 บาท / กก.
ค่าวัสดุระเบิด AN-FO ต่อเดือน	2,343,600 บาท / เดือน
ราคา Special Dynamite ต่อกิโลกรัม	450 บาท
ปริมาณ Special Dynamite ต่อหลุม	0.4 กก. / หลุม
ปริมาณ Special Dynamite ต่อครั้ง	14 กก. / ครั้ง
ปริมาณ Special Dynamite ต่อเดือน	280 กก. / เดือน
ค่าวัสดุระเบิด Special Dynamite ต่อเดือน	126,000 บาท / เดือน
ราคาแท่ง Nonel	235 บาท / ดอก
จำนวนแท่ง Nonel	30 ดอก / ครั้ง
ค่าแท่ง Nonel	164,500 บาท / เดือน
ค่าวัสดุสิ้นเปลืองอื่นๆ	60,000 บาท / เดือน
มูลค่าใช้จ่ายในการระเบิดต่อตัน	4.14 บาท / ตัน

ตารางที่ 8.3 (ต่อ) ค่าใช้จ่ายจริงในการผลิตหินในเมืองเปิดขนาดใหญ่

ส่วนการขนค้ำถ้ำเสียง

รายละเอียดข้อมูล	
จำนวนรถค้ำที่ใช้จริง (มีทั้งหมด 6 คัน)	4 คัน
ระยะทางเฉลี่ยขาไป	1.5 กม.
ระยะทางเฉลี่ยขากลับ	1.5 กม.
อัตราเร็วเฉลี่ย	35 กม. / ชม.
เวลาดันทางขาไปและกลับ + เวลาพัก	11 นาที
เวลารอที่และเวลาพัก	3 นาที
เวลารอรถค้ำ	1 นาที
รอบการบรรทุก	15 นาที
จำนวนรอบบรรทุกต่อรถค้ำ 1 คัน	3 คัน
จำนวนรอบบรรทุกทั้งหมด	12 คัน
ปริมาตร Bucket	10 ลบ.ม.
1 ลบ.ม. ของหิน (หลวม)หนัก	1.60 ตัน
Bucket Capacity	16 ตัน
Truck Capacity	80 ตัน
ชั่วโมงการทำงาน	10 ชั่วโมง
ประสิทธิภาพของงาน	90 เปอร์เซ็นต์
จำนวนหินที่สกัดได้	34,560 ตัน / วัน
จำนวนวันทำงาน	20 วัน / เดือน
จำนวนหินที่สกัดได้ต่อเดือน	691,200 ตัน / เดือน

กลุ่มที่ 3 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)

พนักงาน (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
เงินเดือนวิศวกร	35,000 บาท / เดือน
จำนวนหัวหน้าคนงาน	4 คน
เงินเดือนหัวหน้าคนงาน	20,000 บาท / คน
เงินเดือนหัวหน้าคนงานทั้งหมด	80,000 บาท
จำนวนคนขับรถค้ำ	2 คน / คัน
เงินเดือนคนขับรถค้ำ	15,000 บาท / เดือน
เงินเดือนคนขับรถค้ำทั้งหมด	120,000 บาท / เดือน
จำนวนคนขับรถบรรทุก	2 คน / คัน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุก	12,000 บาท / เดือน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุกทั้งหมด	288,000 บาท / เดือน
รวมเงินเดือน	523,000 บาท / เดือน

เครื่องจักร (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคาถดถอยสำหรับเครื่องจักรและระเบิด	500,000 บาท / คัน
จำนวนถดถอยสำหรับเครื่องจักรและระเบิด	1 คัน
ราคาซาก	50,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	5 ปี

กลุ่มที่ 3 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)

เครื่องจักร (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	7,500 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	1,000 บาท / คัน / เดือน
ค่าใช้จ่ายสำหรับรถตรวจงาน	8,500 บาท / เดือน
ราคารถค้ำ	30,000,000 บาท / คัน
ราคาซาก	4,500,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	10 ปี
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	212,500 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือนต่อคัน	140,000 บาท / คัน / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายรถค้ำต่อคัน	352,500 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายสำหรับรถบรรทุก	1,410,000 บาท / เดือน
ราคารถบรรทุก (ขนาดกลางและขนาดใหญ่)	10,000,000 บาท / คัน
ราคาซาก	1,000,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	10 ปี
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	75,000 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือนต่อคัน	20,000 บาท / คัน / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายรถบรรทุกต่อคัน	95,000 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายสำหรับรถบรรทุก	1,140,000 บาท / เดือน
ค่ารถ Bull Dozer สำหรับค้ำถ้ำเสียง (ให้เช่า)	500,000 บาท / เดือน
ค่ารถ Motor Grader สำหรับค้ำถ้ำเสียง (ให้เช่า)	50,000 บาท / เดือน
ค่ารถฉีดน้ำ (ให้เช่า)	80,000 บาท / เดือน
ค่า Breaker (ให้เช่า)	200,000 บาท / เดือน
รวมรายการเช่า	830,000 บาท / เดือน

กลุ่มที่ 3 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนค้ำถ้ำเสียง)

ค่าใช้จ่ายผันแปร	
ราคาน้ำมันดีเซล	12 บาท / ลิตร
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่รถค้ำใช้	90 ลิตร / ชั่วโมง
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถค้ำต่อคัน	10,800 บาท / วัน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถค้ำต่อคัน	216,000 บาท / เดือน
รวมค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถค้ำ	864,000 บาท / เดือน
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกใช้	50 ลิตร / ชั่วโมง
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	6,000 บาท / วัน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	120,000 บาท / เดือน
รวมค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุก	1,440,000 บาท / เดือน
รวมรายการที่เชื้อเพลิง	2,304,000 บาท / เดือน

สรุปค่าใช้จ่าย	
รวมค่าใช้จ่ายการถักและขน	6,215,580 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายในการค้ำถ้ำและขน	8.99 บาท / ตัน



### ตารางที่ 8.4 ค่าใช้จ่ายจริงในการเจาะหลุมระเบิดในเหมืองหินเปิดขนาดเล็กลงถึงปานกลาง

รูปแบบกิจกรรมการผลิตระเบิดและวางระเบิด

กำลังการผลิต	120,000 ตัน / เดือน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ	3.50 นิ้ว
ระยะห่างระหว่างแถวระเบิด (B)	3.35 เมตร
ระยะห่างระหว่างรูเจาะ (S)	4.25 เมตร
จำนวนรูที่เจาะต่อวัน	30 หลุม / วัน
จำนวนวันที่เจาะต่อเดือน	25 วัน / เดือน
ความสูงของหน้างาน	9 เมตร
ความลึกของหลุมเจาะ	8 เมตร
ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง	2.5
ประสิทธิภาพของงานระเบิด	90 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มที่ 1 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนเจาะ)

พนักงาน	
ค่าใช้สอยรถ	
เงินเดือนผู้บริหาร	30,000 บาท
เงินเดือนพนักงานบัญชีและธุรการ (รวม)	12,000 บาท
เงินเดือนพนักงานซ่อมบำรุงหรือตรวจสอบการขุดบ่อบำรุง (รวม)	45,000 บาท
ค่าไฟฟ้าสำนักงาน	4,500 บาท
ค่าจ้างพนักงานรักษาความปลอดภัย	5,000 บาท
เงินเดือนพนักงานขับรถเจาะต่อคน	9,000 บาท
จำนวนรถเจาะที่ใช้	2 คัน
จำนวนพนักงานขับรถต่อรถหนึ่งคัน	2 คน
จำนวนพนักงานขับรถเจาะทั้งหมด	4 คน
รวมเงินเดือนพนักงานขับรถเจาะ	36,000 บาท
เงินเดือนวิศวกรและหัวหน้างาน	23,000 บาท
รวม พนักงานทุกส่วน (เจาะ+ระเบิด)	155,500 บาท/เดือน
ค่าใช้จ่ายด้านรถ	
ค่าเช่ารถบรรทุก	- บาท/เดือน
เครื่องจักร - อุปกรณ์เจาะระเบิด	
ค่าใช้จ่ายรถ	
ราคารถเจาะ	4,850,000 บาท
อายุการใช้งานรถเจาะ	10 ปี
ราคาซาก (รถเจาะ)	485,000 บาท
ค่าเสื่อมราคาต่อรถเจาะต่อคัน	36,375 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมราคารถเจาะ (รวม)	72,750 บาท/เดือน

กลุ่มที่ 1 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนเจาะ)

ค่าใช้จ่ายด้านรถ	
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ต่อคันต่อวัน	40 ลิตร/วัน
จำนวนวันที่เจาะต่อเดือน	25 วัน/เดือน
จำนวนชั่วโมงที่เจาะ	8 ชั่วโมง/วัน
ราคาน้ำมันต่อลิตร	12.90 บาท/ลิตร
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถเจาะต่อเดือน	8,000 บาท/เดือน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถต่อเดือน	163,200 บาท/เดือน
น้ำมันเครื่อง	25 ลิตร/คัน/ครั้ง
อายุการทำงาน	250 ชั่วโมง
ราคา น้ำมันเครื่องต่อลิตร	50 บาท/ลิตร
ค่าน้ำมันเครื่องต่อรถเจาะหนึ่งคัน	1,000 บาท/เดือน
ค่าน้ำมันเครื่องต่อเดือน	2,000 บาท/เดือน
ราคาดอกเจาะ	6,000 บาท
อายุการใช้งานดอกเจาะ	3 เดือน
ค่าเสื่อมราคาดอกเจาะต่อเดือน	4,000 บาท
ค่าเช่าผู้รับเหมาร่วมขุดเจาะต่อเดือน	- บาท/เดือน
ค่าน้ำมันไฮดรอลิกของรถเจาะต่อเดือน	2,250 บาท/เดือน
ค่าน้ำมันหล่อลื่นรถเจาะ	2,000 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพสายไฮดรอลิกต่อเดือน	1,750 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพโช้กระของรถเจาะต่อเดือน	1,000 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพก้านเจาะต่อเดือน	11,000 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพเชือกต่อเดือน	1,600 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพอุปกรณ์เจาะต่อเดือน	4,200 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพรถอู่กลาง	1,000 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพรถน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันไฮดรอลิก น้ำมันเกียร์	1,200 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์อื่นๆ ของรถเจาะ	500 บาท/เดือน
ค่าเสื่อมสภาพหัวเจาะและก้านเจาะ Jack Hammer	500 บาท/เดือน
รวมค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	27,660 บาท/เดือน
ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษารถต่อเดือน	54,800 บาท/เดือน
ราคารถกระบะสำหรับบรรทุกงานเจาะและระเบิด	500,000 บาท/คัน
จำนวนรถกระบะสำหรับบรรทุกงานเจาะและระเบิด	1 คัน
ราคาซากรถ (รถกระบะ)	100,000 บาท/คัน
อายุการใช้งาน	5 ปี
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	6,666.67 บาท/เดือน
ค่าใช้จ่ายสำหรับรถกระบะ	6,666.67 บาท/เดือน
สรุปค่าใช้จ่ายในการเจาะต่อเดือน	537 บาท/เดือน

ตารางที่ 8.4 (ต่อ) ค่าใช้จ่ายจริงในการเจาะหลุมระเบิดในเหมืองหินเปิดขนาดเล็กถึงปานกลาง

รูปแบบเชิงราคาคณิตหาระเบิดและงานเจาะ

กำลังการผลิต	120,000 ตัน / เดือน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ	3.5 นิ้ว
ระยะห่างระหว่างแถวหน้าระเบิด (B)	3.35 เมตร
ระยะห่างระหว่างรูเจาะ (S)	4.25 เมตร
จำนวนรูที่เจาะต่อวัน	30 หลุม / วัน
จำนวนวันที่เจาะต่อเดือน	25 วัน / เดือน
ความสูงของหน้างาน	8 เมตร
ความลึกของหลุมเจาะ	9 เมตร
ความกว้างเฉพาะของหิน	2.5
ประสิทธิภาพของงานเจาะกับระเบิด	90 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มที่ 2 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนระเบิด)

พนักงาน (ส่วนระเบิด)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
เงินเดือนหัวหน้าแผนกเจาะระเบิด	- บาท
จำนวนหัวหน้าคนงานระเบิด	1 คน
เงินเดือนหัวหน้าคนงานระเบิด	10,000 บาท / คน
จำนวนพนักงานระเบิด	5 คน
เงินเดือนพนักงานระเบิด	4,500 บาท / คน
รวมเงินเดือนแผนกระเบิด (รวมอยู่ในส่วนเจาะแล้ว)	32,500 บาท
ค่าใช้จ่ายผันแปร	
จำนวนลูกจ้างรายวัน	- คน
ค่าแรงต่อคนต่อวัน	- บาท / คน
ค่าจ้างแรงงานระเบิดต่อเดือน	- บาท / เดือน
เครื่องจักร + วัสดุระเบิด	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคารถบรรทุกระเบิด	500,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	5 ปี

กลุ่มที่ 2 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนระเบิด)

เครื่องจักร + วัสดุระเบิด (ต่อ)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคาซาก	125,000 บาท
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	6,000 บาท / เดือน
ค่าเสื่อมราคาถาวรระเบิด	6,250 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายรถบรรทุกระเบิดต่อเดือน	12,250 บาท / เดือน
เครื่องจักร + วัสดุระเบิด	
ค่าใช้จ่ายผันแปร	
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อหลุม	30 กก. / หลุม
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อครั้ง	900 กก. / ครั้ง
ปริมาณ AN-FO ที่ใช้ต่อเดือน	22,500 กก. / เดือน
ต้นทุนการผสม AN-FO ต่อκιโลกรัม	14.40 บาท / กก.
ค่าวัสดุระเบิด AN-FO ต่อเดือน	324,000 บาท / เดือน
ราคา Dynamite ต่อκιโลกรัม	90 บาท / กก.
ปริมาณ Dynamite ต่อหลุม	2.0 กก. / หลุม
ปริมาณ Dynamite ต่อครั้ง	60 กก. / ครั้ง
ปริมาณ Dynamite ต่อเดือน	1,500 กก. / เดือน
ค่าวัสดุระเบิด Dynamite ต่อเดือน	135,000 บาท / เดือน
ราคาแก๊สไฟฟ้าธรรมดาต่อคอก	27 บาท / คอก
ปริมาณที่ใช้แก๊ส	30 คอก/ครั้ง
ค่าแก๊สไฟฟ้าธรรมดาต่อเดือน	20,250 บาท / เดือน
ค่าวัสดุสิ้นเปลืองอื่นๆ	10,000 บาท / เดือน
สรุปค่าใช้จ่ายในการระเบิดต่อตัน	4.08 บาท / ตัน

ตารางที่ 8.4 (ต่อ) ค่าใช้จ่ายจริงในการเจาะหลุมระเบิดในเหมืองหินเปิดขนาดเล็กลงถึงปานกลาง

ส่วนการขนถักถ้ำเสียง

รายละเอียดของชุด	
จำนวนรถบรรทุกที่ใช้งานจริง (มีทั้งหมด 3 คัน)	2 คัน
ระยะทางเฉลี่ยขาไป	1.5 กม.
ระยะทางเฉลี่ยขากลับ	1.5 กม.
อัตราเร็วเฉลี่ย	35 กม./ชม.
เวลาดำเนินทางขาไปและกลับ + เวลาพัก	5.5 นาที
เวลารอที่และเวลาข	1 นาที
เวลารอรถบรรทุก	1 นาที
รอบการบรรทุก	7.5 นาที
จำนวนรอบบรรทุกต่อรถบรรทุก 1 คัน	4 คัน
จำนวนรอบบรรทุกทั้งหมด	8 คัน
ปริมาตร Bucket	5 ลบ.ม.
1 ลบ.ม.ของหิน (หลวม) หนัก	1.55 ตัน
Bucket Capacity	7.75 ตัน
Truck Capacity	20 ตัน
ชั่วโมงการทำงาน	6 ชั่วโมง
ประสิทธิภาพของงาน	90 เปอร์เซ็นต์
จำนวนหินที่สกัดได้	6,912 ตัน / วัน
จำนวนวันทำงาน	25 วัน / เดือน
จำนวนหินที่สกัดได้ต่อเดือน	172,800 ตัน / เดือน

กลุ่มที่ 3 พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนถักถ้ำเสียง)

พนักงาน (ส่วนขนถักถ้ำเสียง)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
เงินเดือนวิศวกร	25,000 บาท / เดือน
จำนวนหัวหน้าคนงาน	2 คน
เงินเดือนหัวหน้าคนงาน	15,000 บาท / คน
เงินเดือนหัวหน้าคนงานทั้งหมด	30,000 บาท
จำนวนคนขับรถบรรทุก	1 คน / คัน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุก	10,000 บาท / เดือน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุกทั้งหมด	20,000 บาท / เดือน
จำนวนคนขับรถบรรทุก	1 คน / คัน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุก	9,000 บาท / เดือน
เงินเดือนคนขับรถบรรทุกทั้งหมด	72,000 บาท / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายเงินเดือน	147,000 บาท / เดือน
เครื่องจักร (ส่วนขนถักถ้ำเสียง)	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ราคารถกระบะสำหรับบรรทุกงานเจาะและระเบิด	500,000 บาท / คัน
จำนวนรถกระบะสำหรับบรรทุกงานเจาะและระเบิด	1 คัน
ราคาซาก	50,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	5 ปี

กลุ่มที่ 3 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนถักถ้ำเสียง)

เครื่องจักร (ส่วนขนถักถ้ำเสียง) ต่อ	
ค่าใช้จ่ายคงที่	
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	7,500 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือน	1,000 บาท / คัน / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายสำหรับรถบรรทุก	8,500 บาท / เดือน
ราคารถบรรทุก	3,400,000 บาท / คัน
ราคาซาก	510,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	10 ปี
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	24,083.33 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือนต่อคัน	40,000 บาท / คัน / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายรถบรรทุกต่อคัน	64,083.33 บาท / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายสำหรับรถบรรทุก	128,166.66 บาท / เดือน
ราคารถบรรทุก	1,700,000 บาท / คัน
ราคาซาก	170,000 บาท / คัน
อายุการใช้งาน	10 ปี
ค่าเสื่อมราคาต่อคันต่อเดือน	12,750 บาท / คัน / เดือน
ค่าบำรุงรักษาต่อเดือนต่อคัน	15,000 บาท / คัน / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายรถบรรทุกต่อคัน	27,750 บาท / เดือน
รวมค่าใช้จ่ายสำหรับรถบรรทุก	222,000 บาท / เดือน
ค่ารถ Bull Dozer สำหรับดินกองหิน (เหมือง)	80,000 บาท / เดือน
ค่ารถ Motor Grader สำหรับดินกองหิน (เหมือง)	65,000 บาท / เดือน
ค่ารถขุดน้ำ (เหมือง)	25,000 บาท / เดือน
ค่า Breaker (เหมือง)	50,000 บาท / เดือน
รวมรายการเหมือง	220,000 บาท / เดือน

กลุ่มที่ 3 (ต่อ) พนักงาน + เครื่องจักรกล (ส่วนขนถักถ้ำเสียง)

ค่าใช้จ่ายผันแปร	
ราคาน้ำมันดีเซล	12.50 บาท / ลิตร
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่รถบรรทุกใช้	90 ลิตร / ชั่วโมง
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	6,750 บาท / วัน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	168,750 บาท / เดือน
รวมค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุก	337,500 บาท / เดือน
ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกใช้	40 ลิตร / ชั่วโมง
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	3,000 บาท / วัน
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุกต่อคัน	75,000 บาท / เดือน
รวมค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรถบรรทุก	600,000 บาท / เดือน
รวมรายการค่าเชื้อเพลิง	937,500 บาท / เดือน

สรุปค่าใช้จ่าย	
รวมค่าใช้จ่ายคงที่และผันแปร	1,663,166.66 บาท / เดือน
ค่าใช้จ่ายในการหักค่าเสื่อมราคา	9.62 บาท / คัน

### 8.2.3 กรณีศึกษาเรื่องค่าใช้จ่ายสำหรับเหมืองหินในการผลิตหินย่อย

ในหัวข้อนี้เป็นข้อมูลภาคสนามที่ได้ทำการศึกษามาแล้วในช่วงกลางปี พ.ศ. 2543 (สง่า ตั้งชวาล, 2543 ข) และผลจากการสำรวจภาคสนามในต้นปี พ.ศ. 2545 ทีมงานวิจัยโครงการได้สอบถามข้อมูลค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิด การขนตักและการลำเลียงหินเพื่อมาปรับปรุงสถานที่เดิม จากความร่วมมือของผู้ประกอบการเหมืองหินหลายเหมืองที่มีการทำแผนเปิดหน้างานอย่างมีระบบ ทำให้สามารถนำมาปรับแก้ตารางค่าใช้จ่ายเดิมที่ทำไว้ในงานวิจัยโครงการเดิมที่เสร็จสิ้นไปแล้ว

การนำเสนอเรื่องค่าใช้จ่ายในการผลิตหินของรายงานฉบับนี้ มีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงสำหรับเหมืองหินตามขนาดของการปฏิบัติการระเบิดหน้างาน แต่โครงการวิจัยไม่สามารถระบุชื่อเหมืองใดเหมืองหนึ่งได้ เพราะข้อมูลค่าใช้จ่ายจัดเป็นความลับของแต่ละบริษัท ตัวเลขที่นำเสนอจึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนตามขนาดของการปฏิบัติการในเหมืองหิน ความถูกต้องแม่นยำนั้นยังจัดอยู่ในระดับปานกลาง ข้อมูลดิบที่ระบุไว้ในรายงานฉบับนี้มีการปรับแก้ให้ใช้ได้กับสถานการณ์ปัจจุบัน

ตารางที่ 8.3 เป็นการประเมินค่าใช้จ่ายมีหน่วยเป็นบาทต่อตัน ในการผลิตหินของเหมืองขนาดใหญ่ (เจาะระเบิดหินเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์) โดยแยกเป็นค่าใช้จ่ายคงที่กับค่าใช้จ่ายผันแปร และสรุปเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการเจาะต่อตัน ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการระเบิดหินต่อตัน และค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการตักและขนหินต่อตัน

ตารางที่ 8.4 เป็นการประเมินค่าใช้จ่ายหน่วยเป็นบาทต่อตัน ในการผลิตหินของเหมืองขนาดเล็กถึงปานกลาง (เจาะระเบิดหินเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง) โดยแยกเป็นค่าใช้จ่ายคงที่กับค่าใช้จ่ายผันแปร และสรุปค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อตันหินที่ระเบิดในลักษณะเดียวกัน

ภาพถ่ายที่แสดงในกระดาษ A<sub>4</sub> เป็นภาพที่ถ่ายไว้เมื่อต้นปี 2545 ในช่วงที่ทำการเก็บข้อมูลดิบภาคสนาม และขอคำปรึกษาจากเหมืองเปิดหลายแห่งในประเทศ (ทั้งเหมืองหินและเหมืองแร่) เกี่ยวกับแบบจำลองที่เหมาะสมซึ่งอาจนำมาจำลองแบบ (simulation) ของขอบบ่อเหมืองเปิดในประเทศ ตลอดจนขอทราบข้อมูลที่เป็นข้อมูลเฉพาะเรื่อง ซึ่งทางทีมงานคาดว่า จะเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้คำนวณเพื่อสร้างแบบจำลอง ตัวอย่างข้อมูลภาคสนามบางอย่าง เช่น ความสูงของชั้นตะพัก มุมความชันของหน้าเหมือง สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อทดลองจำลองแบบก่อนทำการพัฒนาแบบจำลองจริง

รูปที่ 8.8 เป็นภาพถ่ายของหน้าเหมืองขนาดใหญ่พัฒนาเพื่อผลิตหินปูนในปัจจุบัน ภาพบน (รูปที่ 8.8 ก) เป็นภาพถ่ายมุมกว้างของหน้าเหมืองบริษัทปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ภาพถ่าย (รูปที่ 8.8 ข) เป็นภาพถ่ายหน้าเหมืองบริษัทปูนซิเมนต์ไทย นครหลวง อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี



รูปที่ 8.8 ก หน้าเหมืองหินปูนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มทส.) อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





## สถาปัตยกรรมขรรค์

รูปที่ 8.8 ข หน้าเหมืองหินปูนของบริษัทปูนซิเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี



รูปที่ 8.9 ก หน้าเหมืองหินปูนของบริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ จำกัด อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี





รูปที่ 8.9 ๙ โรงบดย่อยหิน ที่ทำการผลิตหินย้อยระหว่างหินปูนสลับกับหินแกรนิต บริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ จำกัด อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี

ภาพถ่ายของเหมืองหินขนาดปานกลาง (รูปที่ 8.9) ภาพบนเป็นภาพถ่ายเหมืองหินปูนของบริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ อำเภอนาทม จังหวัดกาญจนบุรี (รูปที่ 8.9 ก) ภาพล่างเป็นภาพถ่ายมุมกว้างโรงโม่หินบริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์ (รูปที่ 8.9 ข)

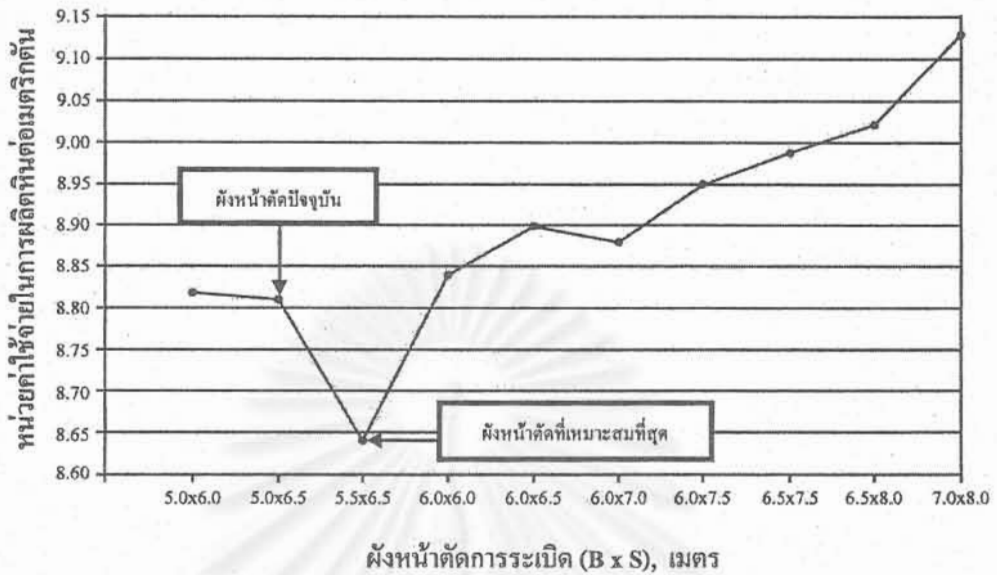
โรงบดขยี้หิน ของบริษัทศิลาสมบูรณ์ทรัพย์นี้ได้ตัดแปลงให้มีการบดขยี้ได้ทั้งหินระเบิดที่เป็นหินปูนและที่เป็นหินแกรนิต โดยสลับเวลาการบดขยี้เป็นช่วงของเดือนตามความต้องการของตลาดกับความเหมาะสมในการจัดการบุคลากรในเหมืองให้มีการทำงานที่เหมาะสม เช่นเดือนหนึ่งบดขยี้หินปูน เดือนต่อมาสลับมาบดหินแกรนิต (ที่เจาะระเบิดจากหน้าเหมืองแหล่งอื่นของบริษัท) เป็นต้น

#### 8.2.4 กรณีศึกษาเรื่องค่าใช้จ่ายในการผลิตหินเพิ่มเติม

การหาความเหมาะสมในการออกแบบเหมืองหินในประเทศ ที่มงานผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้ปรับกระบวนการผลิตในเหมืองอย่างมีประสิทธิภาพทั้งระบบ (สง่า ตั้งชวาล, 2543 ข) โดยจัดลำดับงานและความรับผิดชอบของบุคลากรในเหมืองให้เหมาะสมกับงานเฉพาะอย่าง ควรเลือกหน้าที่เหมาะกับเพศเทิร์นของการระเบิด ตามข้อสมมุติที่ให้การแตกหักเหมาะสมและเสียค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดและขนตักหินหน้างานระเบิดต่ำสุด จากนั้นวางแผนลำดับขั้นตอนการใช้เครื่องจักรกลกับอุปกรณ์ในการเจาะระเบิด และการขนตักถ้ำเสียงอย่างเหมาะสม

แนวทางที่เหมืองหินแต่ละแห่งสามารถทดลองทำได้ เช่นการเปลี่ยนระยะของพื้นที่หน้าตัดที่จะทำการระเบิด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับความลึกของหลุมเจาะระเบิดคงที่) นั่นคือมีการปรับเปลี่ยนค่า 2 ค่า ได้แก่ ค่าระยะห่างระหว่างแถวที่เป็นความหนาของหน้าระเบิด หรือเรียกว่าระยะเบอร์เดน (burden, B) กับค่าระยะห่างระหว่างหลุมเจาะในแถวเดียวกัน (ที่ตั้งฉากกับหน้าระเบิด) หรือเรียกว่า ระยะสเปซซิง (spacing, S)

ตัวอย่างในรูปที่ 8.10 เหมืองหิน (ขนาดเล็กหรือใหญ่) ผู้ทดลองสามารถตรวจหาผลลัพธ์ของขนาดเหมืองหินระเบิด โดยการวัดค่าขนาดเฉลี่ยหินที่แตกหักด้วยวิธีอย่างง่ายหรือใช้สูตรเชิงประสพการณ์คำนวณขนาดเฉลี่ยของหินระเบิด จากนั้นก็บันทึกค่าใช้จ่ายของแต่ละเหมืองในการเจาะระเบิดและขนย้าย เพื่อระบุเพศเทิร์นที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่องในเหมืองหิน (ตารางที่ 8.5) ทั้งนี้อาจตัดแปลงให้แตกต่างไปจากที่ระบุไว้ในตารางที่ 8.3 กับ 8.4 เพราะว่ารายจ่ายบางรายการอาจใช้วิธีจ้างเหมาแทนได้ เพราะสะดวกต่อการควบคุมประสิทธิภาพของผลงานและลดค่าใช้จ่ายในการจัดจ้างบุคลากรของเหมืองเอง นอกจากนี้ยังมีความหลากหลายเรื่องชนิดกับรูปแบบของเครื่องจักรกล ที่ทำให้การคำนวณสมรรถนะกับค่าเสื่อมสภาพและค่าบำรุงรักษาแตกต่างกันไป



รูปที่ 8.10 การวางแผนหาแพตเทิร์นการระเบิดที่เหมาะสม สำหรับเหมืองหิน

ตารางที่ 8.5 การประเมินรูปแบบแพตเทิร์นของผังหน้าระเบิด กับค่าใช้จ่ายทั้งหมด ในการผลิตหินต่อตัน ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการเจาะ การระเบิด การขนตัก การลำเลียงไปปากไม่ คำนวณร่วมกับสมรรถนะของการทำงาน

Blast Pattern (B x S, เมตร)	ค่าใช้จ่าย ในการเจาะหลุม (บาท / ตัน)	ค่าใช้จ่าย ในการระเบิดหิน (บาท / ตัน)	ค่าใช้จ่าย ในการขนตักลำเลียง (บาท / ตัน)
ผังหน้าระเบิด แบบ 5.0 x 6.0	3.44	4.26	8.82
ผังหน้าระเบิด แบบ 5.0 x 6.5	3.42	4.25	8.81
ผังหน้าระเบิด แบบ 5.5 x 6.5	3.38	4.22	8.64
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.0 x 6.0	3.24	4.10	8.84
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.0 x 6.5	3.18	4.02	8.90
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.0 x 7.0	3.15	3.92	8.87
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.0 x 7.5	3.13	3.99	8.95
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.5 x 7.5	3.10	4.04	8.99
ผังหน้าระเบิด แบบ 6.5 x 8.0	3.02	4.16	9.03
ผังหน้าระเบิด แบบ 7.0 x 8.0	2.98	4.40	9.13



### 8.3 กรณีศึกษาของเหมืองแร่

กรณีศึกษาการออกแบบเหมืองแร่นี้ใช้แนวทางของต่างประเทศ ที่ผู้เขียนบทความนำเสนอในวารสารหรือการประชุมทางวิชาการนานาชาติ ข้อมูลที่นำเสนอในบางครั้งไม่ได้ระบุในรายละเอียด ผู้วิจัยโครงการจึงทำการปรับแก้บ้างเพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการออกแบบที่อธิบายไว้ในบทที่ 6-7 ส่วนที่ทีมงานวิจัยคาดว่ามีความเป็นไปได้ก็จะนำหลักการมาปรับใช้กับเหมืองแร่ในประเทศ มีการเสนอแนะไว้ในหัวข้อย่อยบทนี้

#### 8.3.1 กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่ใช้ค่า Stripping Ratio

เหมืองแร่ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาของการออกแบบขอบบ่อเหมืองเปิด ในการตัดสินใจเปิดหน้างานที่ระดับลึกลงไปอีก โดยพึ่งพิงตัวแปรการขุดเจาะที่เป็นค่าอัตราส่วนของ waste/ore (ค่า stripping ratio) ได้แก่ แหล่งสินแร่ TAZADIT ของบริษัท MIFERMA สาธารณรัฐแอฟริกาใต้ (Reibell, 1969)

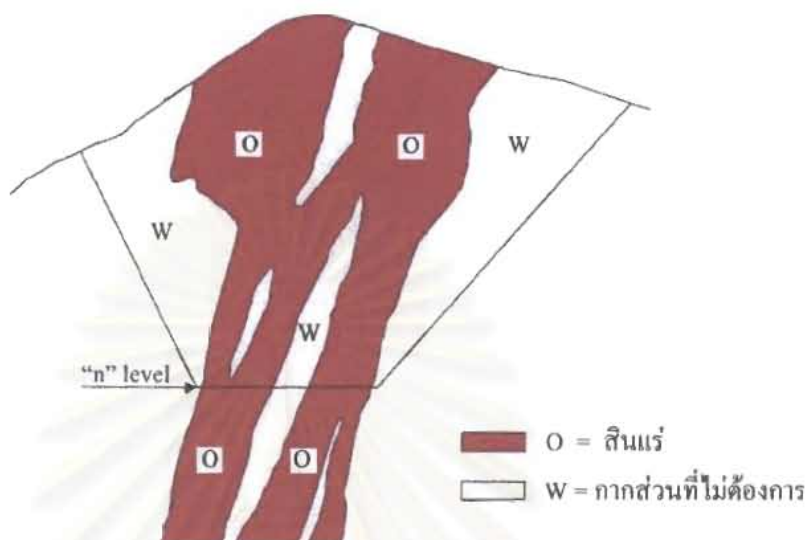
##### 1. สภาพและธรณีวิทยาแหล่งแร่

สินแร่ที่เหมืองผลิต เป็นแร่ฮีมาไทต์ที่มีเปอร์เซ็นต์โลหะสูง (high grade hematite) อยู่ในโครงสร้างชุดหิน Itabirite Formation มวลหินในบริเวณแหล่งแร่นี้ถูกกระบวนการเทคโทนิคทำให้สินแร่ hematite เป็นกะเปาะหรือเลนส์ (ดูรูป 8.11) มีผลทำให้ได้มวลสินแร่ที่มีเปอร์เซ็นต์โลหะ 50-60 % Fe เริ่มพัฒนาเหมืองตั้งแต่ปี ค.ศ. 1963 และค่าเฉลี่ยของผลิตผลประมาณ 4.5 ล้านตันต่อปี แร่ hematite ที่บริสุทธิ์ที่วิเคราะห์ทางเคมีอยู่ระหว่าง 64-65 % Fe จัดเป็นแร่ที่มีเกรดดี

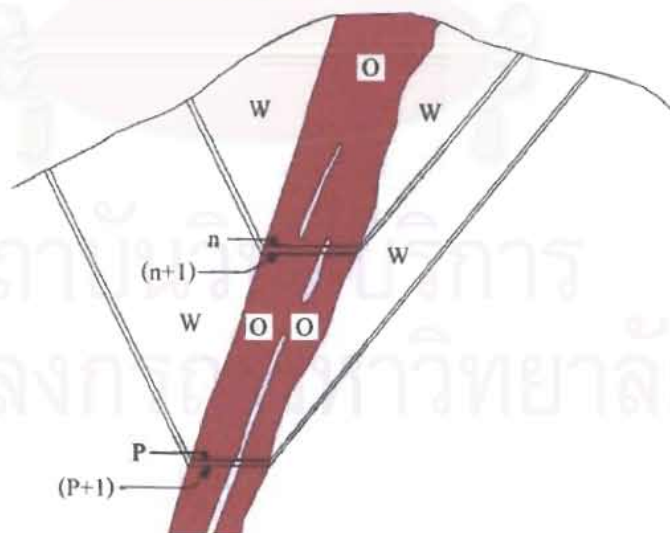
มวลสินแร่ที่เป็นกะเปาะคล้ายเลนส์มีมุมเอียงชันประมาณ 65-70 องศา และยังอยู่ในระดับที่ลึกกว่าชั้นที่สินแร่ไหลบนพื้นผิวดินถึง 500 เมตร

##### 2. จุดประสงค์ของการออกแบบ

การทำเหมืองต้องการขุดสินแร่ในระดับที่ลึกสุด ที่เป็นระดับที่ยอมรับได้ในเชิงความคุ้มทุน ปัญหาเบื้องต้นจึงเป็นการหาสัดส่วน ระหว่างสิ่งที่ไม่ต้องการกับสิ่งที่เป็นสินแร่ซึ่งทางเหมืองต้องการนำมาซื้อขายในท้องตลาด ในกรณีที่ตัดชั้นตะกั่วให้ลึกถึงระดับที่วางแผน [ใช้สัญลักษณ์ของชั้นระดับนี้ว่า "n level"] ควรมีการแยกส่วนที่ไม่ต้องการ ที่เรียกว่า waste ออกจากมวลสินแร่เหล็กที่เรียกว่า ore ทั้งส่วนที่มีปะปนกันในระดับลึกจนถึงพื้นเหมือง กับส่วนที่ปะปนกับมวลหินในบริเวณผนังเพดาน (hanging wall) และส่วนที่ปะปนกับมวลหินในผนังด้านพื้น (foot wall)



รูปที่ 8.11 ภาพตัดขวางแสดงมวลสินแร่หลักของแหล่ง TAZADIT (ไม่ได้กำหนดมาตราส่วนไว้) ในหินชุด Itabirite



รูปที่ 8.12 ภาพตัดขวางของปัญหาที่ต้องการหาจุดเหมาะสมที่สุด เมื่อทำการเปิดเหมืองลึกลงไปอีกหนึ่งระดับ หรือถึงระดับลึกที่พอดีกับจุดคุ้มทุน

จากผลการคำนวณหาเสถียรภาพโดยใช้คุณสมบัติของหินในบริเวณ การตัดความลาดที่ปลอดภัยมีช่วงความชันระหว่าง 40-60 องศา และนิยามของค่าอัตราส่วนเฉลี่ยในการขุดเจาะสำหรับเหมืองนี้ เป็นค่าน้ำหนักหน่วยเป็นเมตริกตันของ waste ที่ต้องขุดนำออกไปจากบริเวณหน้างานเหมืองเปิด เทียบอัตราส่วนกับน้ำหนักเป็นเมตริกตันของ ore ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยต่อปีของการทำเหมือง และประมาณการค่าใช้จ่ายในการขุดสินแร่ก็ใช้ค่าที่คำนวณในปีเดียวกัน

นิยามเฉพาะของการนำส่วนที่เป็น waste ออกโดยการตัดชั้นตะพัก (bench) ลง จำนวน 1 ระดับชั้น และนำไปเทียบกับส่วนที่เป็น ore ที่นำออกมาได้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า differential stripping ratio ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเข้าในระหว่างการทำเหมืองขณะนั้น หน้าเหมืองอยู่ที่ระดับชั้น n level ถ้าจะเปิดเหมืองให้ถล่มไปอีกต้องตัดชั้นตะพักลงไปถึงระดับชั้น (n + 1) level นั่นคือ ขอบบ่อหน้างานเหมืองเปิดในส่วนหนึ่งที่เป็นหินมีโอกาสขยายกว้างขึ้น แต่จำนวนของสินแร่จะมีปริมาณน้อยลง (ดูรูปที่ 8.12 ประกอบ) การปฏิบัติงานอาจไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจเมื่อค่าใช้จ่ายสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่ราคาขายอาจคงที่ ทำให้วิศวกรต้องเปลี่ยนวิธีการทำเหมืองจากการทำเหมืองเปิดบนพื้นผิวดินเป็นการทำเหมืองใต้ดินแทน

### 3. หลักการสร้างสมมติฐานในการออกแบบ

ลำดับขั้นตอนการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบขอบบ่อเหมืองแหล่งแร่เหล็ก TAZADIT มีดังนี้

3.1 ตั้งสมมติฐานของปริมาตรในการขุดเจาะที่ระดับต่ำสุดของ  $n_1$  level เป็น

- ปริมาตรของ ore เท่ากับ  $O_1$
- ปริมาตรของ waste เท่ากับ  $W_1$

3.2 ในทำนองเดียวกันปริมาตรที่ระดับ  $n_2$  level เป็น

- ปริมาตรของ ore เท่ากับ  $O_2$
- ปริมาตรของ waste เท่ากับ  $W_2$

3.3 ค่าของ differential stripping ratio ตามนิยามที่กล่าวมาแล้วคือ

$$= \frac{W_2 - W_1}{O_2 - O_1}$$

3.4 เปรียบเทียบว่าจะมีผลกำไรหรือไม่ ให้ดูจากกำไรได้จากการนำสินแร่ปริมาตร  $(O_2 - O_1)$  ไปขายว่าเป็นเงินเท่าไร และค่าใช้จ่ายที่เกิดจากนำปริมาตร  $(O_2 - O_1) + (W_2 - W_1)$  ออกมา ถ้าราคาสินแร่ที่นำออกมามากกว่าก็แสดงว่ามีกำไร

3.5 หากผลลัพธ์จากการคำนวณในข้อ 3.4 ยังมีกำไร ก็ทำการขุดเจาะต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งจะได้ชั้นตะพักต่ำลงเป็น  $(n_3 - n_2)$ ,  $(n_4 - n_3)$  จนกระทั่งไม่คุ้มค่า

3.6 ในเชิงปฏิบัติงานจริง การคำนวณค่า differential stripping ratio จะทำเพียง 3 ระดับชั้น (3 level) เท่านั้น จากข้อมูลเพิ่มเติมของเหมือง (ซึ่งไม่ได้ระบุรายละเอียดไว้ในเนื้อหาบทความ) ได้ชั้นตะพักที่มีความสูงในแนวตั้ง 12 เมตรซึ่งสมควรขุดเจาะ 3 ระดับชั้น คือ

- 294 ม. – 306 ม.
- 346 ม. – 358 ม.
- 398 ม. – 410 ม.

กำหนดให้ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดของชั้นตะพัก 3 ชั้นนี้เป็น  $P_1, P_2, P_3$  ตามลำดับจากการคาดคะเนเหมือง จะใช้เวลาในการขุดเจาะหน้างานระเบิดแต่ละชั้นตะพัก เท่ากับ 10 เดือน

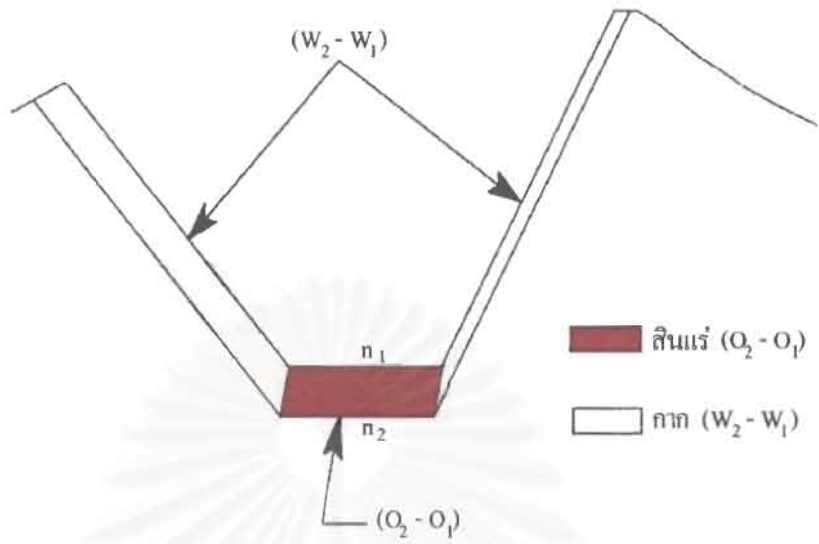
รูปที่ 8.13 เป็นไดอะแกรมแสดงสมมุติฐานของการตัดหน้าเหมือง ซึ่งต้องตัดผนังเหมืองทั้งสองด้านที่เป็นหินออก เพื่อนำสินแร่ที่ระดับ  $n_1$  level จนถึงที่ระดับ  $n_2$  level ออกมาเพื่อนำส่งโรงบดย่อยแร่ ส่วนรูปที่ 8.14 เป็นการสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตามข้อมูลเฉพาะในเหมืองที่ทราบค่า differential cost ทั้งสามจุด จากการกำหนดค่าให้  $P_0$  เป็นราคา (price) สินแร่ที่หน้าเหมือง ทำให้ระบุได้ว่าจุดซึ่งคุ้มทุนอยู่ที่ระดับการขุดเจาะลึก 346 เมตร

#### 4. การกำหนดขอบบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด

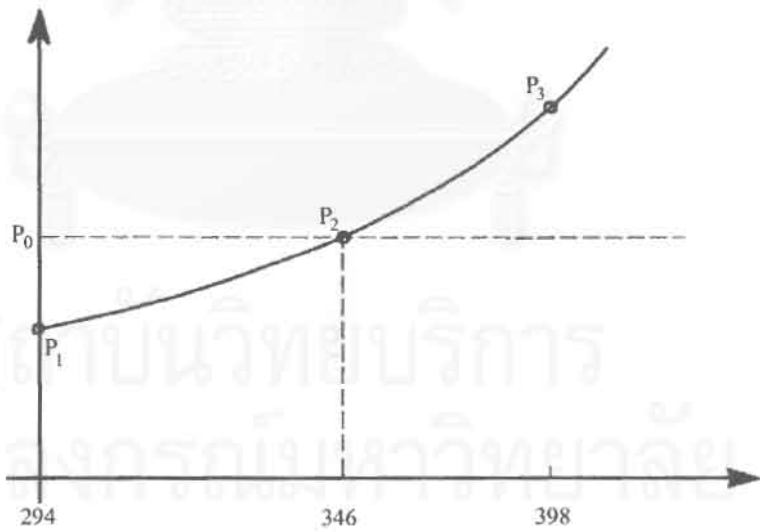
ปัญหาของการลำดับชั้นตอนที่เหมาะสมในการนำส่วนที่เป็น waste ออกเพื่อให้สามารถเปิดหน้างานนำเอาสินแร่ที่ระดับ  $n$  level ออกมาได้ แยกเป็นประเด็นได้ดังนี้

4.1 ปัญหาของ ore ที่ต้องขนย้ายลำเลียงออกจากระดับชั้นตะพักล่างสุดไปยังโรงบดย่อยแร่ ถ้าการขุดเจาะบ่อเหมืองลึกลงมากขึ้น ระยะเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการขนย้ายลำเลียงสินแร่ออกจากบ่อเหมืองก็นานมากขึ้น ค่าใช้จ่ายก็เพิ่มสูงขึ้น เฉพาะกรณีของการประเมินผลนี้ สมมุติว่าสินแร่ที่นำออกมามีใบสั่งซื้อแล้ว ค่าสินแร่จึงไม่ต้องปรับลด (discount)

4.2 ปัญหาของ waste ที่ต้องขนย้ายลำเลียงออกจากบ่อเหมืองมีความแตกต่างจากสินแร่ การแผ่กระจายของส่วนที่ไม่ต้องการ (เศษหินและแร่เกรดต่ำเกินไปจนไม่สามารถขายได้) มีอยู่ตลอดแนวความสูงของขอบบ่อเหมืองเปิด เริ่มตั้งแต่จุดล่างสุด (bottom) ไปจนถึงจุดที่เป็นขอบบนพื้นผิวดิน (rim) จึงต้องวางแผนขุดเจาะวัสดุของส่วนที่ไม่ต้องการสลับกันในแต่ละปี ระหว่างปีคริสต์ศักราชที่เป็นเลขคี่ (odd year) กับปีคริสต์ศักราชที่เป็นเลขคู่ (even year) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.15 การทำงานย่อมต้องใช้เวลาหลายปีในการนำส่วนที่ไม่ต้องการออกจนหมด การพัฒนาเหมืองในส่วนของ waste ต้องมีการปรับลดค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะที่ระดับบนที่อยู่เหนือชั้น  $n$  level ที่มี ore อยู่ ปกติการทำเหมืองในระดับลึก ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะของวัสดุทุกส่วนเพิ่มสูงขึ้น จึงต้องวางแผนการผลิตในช่วงระยะยาว เช่น 10-15 ปี เพื่อนำมาเฉลี่ยค่าใช้จ่ายประกอบการพิจารณาจุดคุ้มทุนที่เหมาะสมที่สุด

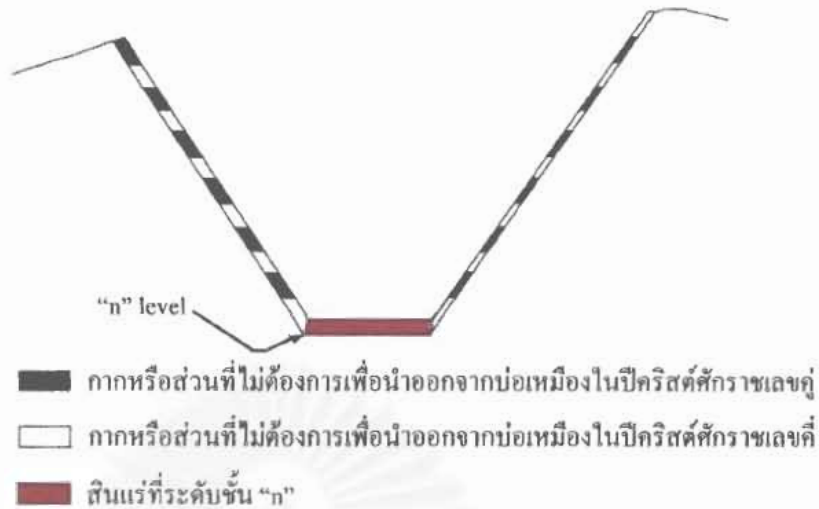


รูปที่ 8.13 โค้ดแกรมขอบเขตของการขุดเจาะจาก  $n_1$  ถึง  $n_2$  level สำหรับ ส่วนที่ไม่เป็นสินแร่ (W) กับส่วนที่เป็นสินแร่เหล็ก (O)



รูปที่ 8.14 กราฟการพยากรณ์ระดับลึกที่คุ้มทุน กำหนดราคาของสินแร่ที่ค่า  $P_0$





รูปที่ 8.15 การวางแผนการขุดเจาะเพื่อนำสินแร่เหล็กที่ระดับความลึก n การสลับปีในการทำงานที่ขุดเจาะและขนย้ายลำเลียงออกจากบ่อเหมือง

ตารางที่ 8.6 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนที่ใช้ค่าอัตราส่วนการขุดเจาะเป็นเกณฑ์

ก. การประเมินหาปริมาณหินระหว่างระดับลึก 394 เมตร				
ข้อมูลสถานที่	ปริมาณสินแร่ที่เป็นหัวแร่ (ลบ.ม.)	ปริมาณแร่เกรดต่ำซื้อขายไม่ได้ (ลบ.ม.)	ปริมาณดินและหิน (ลบ.ม.)	จำนวนน้ำหนักเป็น $10^3$ x ตัน ในเชิงค่าใช้จ่าย
ระดับทำงานลึก 394 เมตร ของ n level	9,034,900	5,870,800	24,206,700	35,827.1
ระดับทำงานลึก 406 เมตร	9,608,440	6,262,880	27,779,410	39,984.1
ผลต่าง	573,540	392,080	3,572,710	4,157

ข. การประเมินหาค่าใช้จ่ายจากอัตราส่วน stripping ratio		
ชนิดของวัสดุ	ความกว้างจำเพาะ	น้ำหนักเป็น $10^3$ x ตัน
สินแร่ที่เป็นหัวแร่	3.5	2,000
แร่เกรดต่ำ	3.3	1,180
ดินและหิน	3.0	13,200

อัตราส่วน stripping ratio =  $(13,200 + 1,180) : 2,000 = 7.2$   
 คำนวณค่าใช้จ่าย differential stripping ratio ในขั้นตอนนี้  $4,157 : 2,000 = 2.0785$  หรือ 8.314

4.3 การคำนวณปริมาตรของ waste และ ore อิงตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตของบ่อเหมือง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่วิศวกรประจำเหมืองเขียนขึ้น เพื่อหาค่าใช้จ่ายของการพัฒนาเหมืองแต่ละช่วงระดับ เช่น จำนวนค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการขุดเจาะไปถึงระดับความลึก  $n$  เป็นค่าแรก และคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการขุดเจาะที่ระดับ  $(n + 1)$  เป็นค่าที่สอง ทำให้สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละชั้นตะกักได้เมื่อลบค่าแรกออกจากค่าที่สอง

ตัวอย่างในตารางที่ 8.6 (ปรับแก้ตัวเลขจากข้อมูลเดิมเพื่อให้อ่านเข้าใจง่าย) เป็นผลสรุปค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะต่อตันของการเปิดหน้างานที่ระดับลึกต่างกันจากระดับความลึกที่ 346 เมตร ถึงระดับ 358 เมตร มีค่าอัตราส่วน differential stripping ratio เท่ากับ 1.7915 หรือ ถ้ากำหนดให้เสียค่าขุดเจาะ 4 ดอลลาร์ต่อตัน ค่าใช้จ่ายในการทำเหมืองตามอัตราส่วนต่อตันนี้คือ 7.18 ดอลลาร์จากราคาสินแร่หน้าเหมือง 7.3 ดอลลาร์ต่อตัน แสดงว่า ยังมีผลกำไรจากการทำเหมืองที่ค่าความลึกระดับนี้ แต่การทำงานที่ระดับความลึกนี้เข้าใกล้จุดคุ้มทุนมากแล้ว

### 5. การปรับแก้ขอบบ่อเหมืองเปิด

การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ดีของความลึกแต่ละระดับลึกของสินแร่ ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการกำหนดขอบเขตของสินแร่ ทั้งในส่วนภาพตัดขวางของสินแร่และส่วนภาพแผนผังของสินแร่ที่ระดับความลึกนั้น เช่น ถ้าข้อมูลธรณีวิทยาแหล่งแร่จากหลุมเจาะไม่ดีพอ อาจทำให้แปลความหมายภาพตัดขวางของสินแร่กับผังภาพของสินแร่ที่ระดับ  $n$  level ผิดพลาดได้ ก็เกิดความสูญเสียเพราะไม่สามารถขุดเจาะสินแร่ที่ระดับนั้นได้หมด หรือเสียเวลาในการพัฒนาเหมืองโดยไม่จำเป็น หรือเสียค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะส่วนที่เป็น waste มากกว่าส่วนที่เป็น ore

ตัวอย่างการขุดเจาะที่ระดับความลึก 346 เมตร หน้าเหมืองที่ระดับนี้มีตำแหน่งการขุดเจาะของขอบบ่อที่  $a_1$  กับ  $b_1$  (ดูรูปที่ 8.16) จะเห็นว่ามวลสินแร่แสดงตำแหน่งที่ถูกต้อง (ทราบจากผลลัพธ์การเจาะหลุมสำรวจเพิ่ม) ควรอยู่ที่  $a_2$  กับ  $b_2$  นั่นคือ มีการเปิดหน้างานในส่วนที่ไม่จำเป็น และต้องเสียค่าใช้จ่ายไปด้วยในเวลาเดียวกัน 2 บริเวณ (ดูรูปที่ 8.16 ประกอบ) คือ

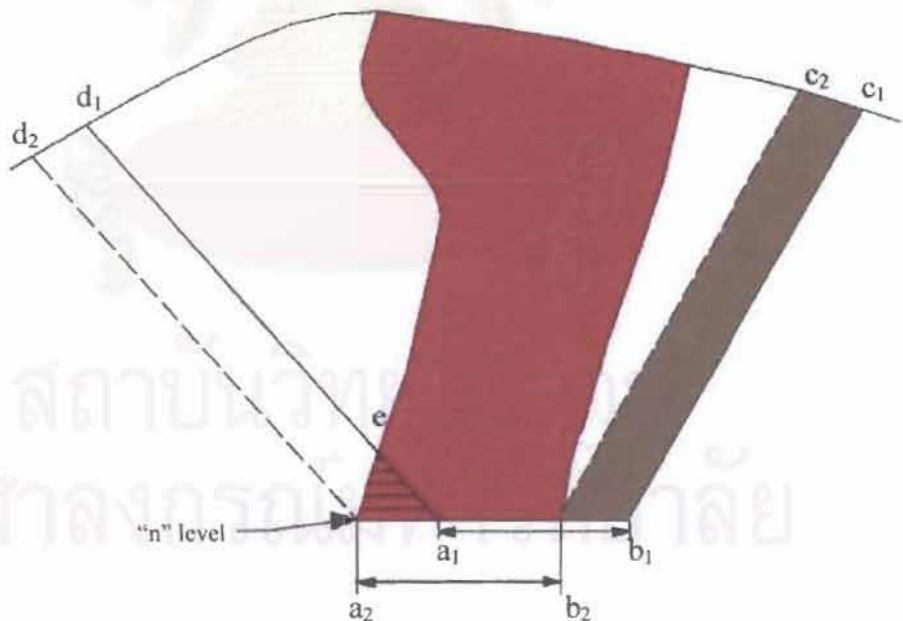
— บริเวณที่เป็น waste ต้องขุดเจาะออกเกินความจำเป็น ได้แก่ พื้นที่สี่เหลี่ยมของตำแหน่ง  $b_1 - b_2 - c_2 - c_1$

— บริเวณที่เป็น ore ที่ทำการขุดเจาะได้ไม่หมด และต้องสูญเสียไป หากการกำหนดตำแหน่งสินแร่ที่ระดับนี้ผิดพลาดได้แก่ พื้นที่สามเหลี่ยมของตำแหน่ง  $a_1 - a_2 - e$  การขุดเจาะใหม่เพื่อให้ได้สินแร่บริเวณสามเหลี่ยมนี้ ต้องเปิดพื้นที่ในส่วนของพื้นที่สี่เหลี่ยม  $e - a_2 - d_2 - d_1$  ซึ่งไม่น่าคุ้มทุน

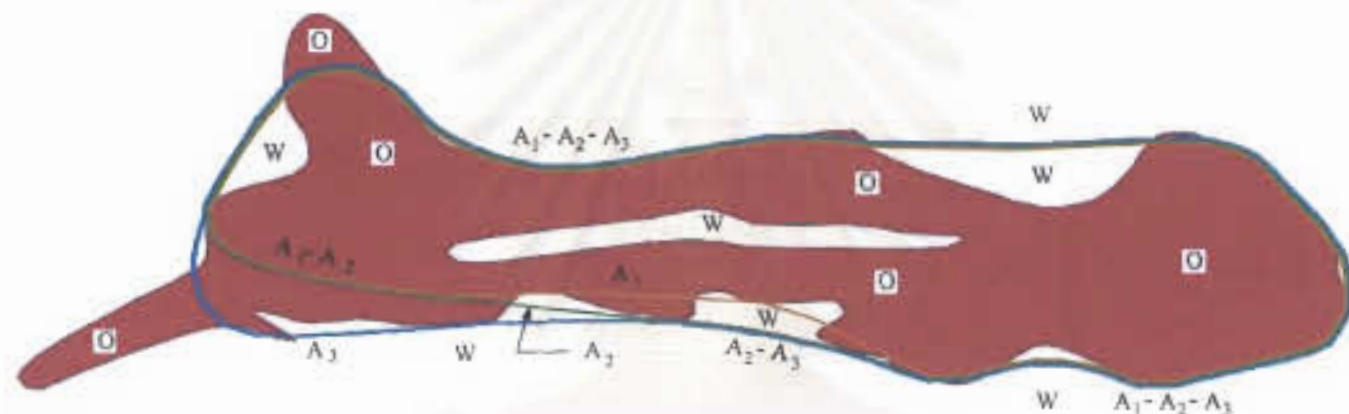
การกำหนดขอบเขตของก้นบ่อที่ระดับความลึก 346 เมตร นอกจากต้องพึงพิงกับข้อมูลหลุมเจาะสำรวจแล้ว ยังต้องทำให้แผนผัง (layout) แต่ละระดับความลึกมีรูปแบบที่ง่าย ทั้งในรูป

แบบร่างของส่วนโค้งเว้า การคำนวณจำเป็นต้องทำซ้ำไปมา เพื่อหาขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดจากแนวแผนผังที่เป็นทางเลือกระดับนี้ ดังภาพผังรูปที่ 8.17 แสดงแนวทางเลือกไว้ 3 แนว ทางเลือกแรกมีสัญลักษณ์  $A_1$  (ใช้อักษรพิมพ์ตัวใหญ่สำหรับภาพผัง) เป็นแนวที่ไม่เปลี่ยนแปลงจะคงที่ไว้ แต่แนว  $A_2$  เป็นแนวทางเลือกที่สองซึ่งมีการปรับแก้ให้มีพื้นที่การขุดเจาะปานกลาง แต่สามารถขุดสินแร่ได้มากขึ้น ส่วนแนว  $A_3$  เป็นแนวที่สามารถปรับแก้ได้อีกครั้งให้มีพื้นที่การขุดเจาะมากที่สุด สามารถขุดสินแร่ได้เกือบทั้งหมดในระดับนี้

ในการต่อเส้นขอบบ่อเหมืองที่ระดับนี้ เส้น  $A_1 - A_2$  หมายถึง แนวร่วมระหว่างขอบบ่อ  $A_1$  กับ  $A_2$  ทำนองเดียวกัน  $A_2 - A_3$  หมายถึง แนวร่วมระหว่างขอบบ่อ  $A_2$  กับ  $A_3$  ส่วนเส้น  $A_1 - A_2 - A_3$  หมายถึง แนวร่วมระหว่างขอบบ่อ  $A_1, A_2$  กับ  $A_3$



รูปที่ 8.16 ผลของการแปลความหมายธรณีวิทยาแหล่งแร่ผิดพลาด ทำให้ต้องสูญเสียสินแร่ไป พร้อมกับสูญเสียค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะส่วนที่ไม่จำเป็น



- $A_1$  - แนวที่ไม่เปลี่ยนแปลง (พื้นที่น้อยสุด)
- $A_2$  - แนวทางเลือกของพื้นที่ขนาดกลาง
- $A_3$  - แนวทางเลือกของพื้นที่ขนาดใหญ่
- $O$  - ถิ่นแร่
- $W$  - ทากหรือส่วนที่ไม่ต้องการ

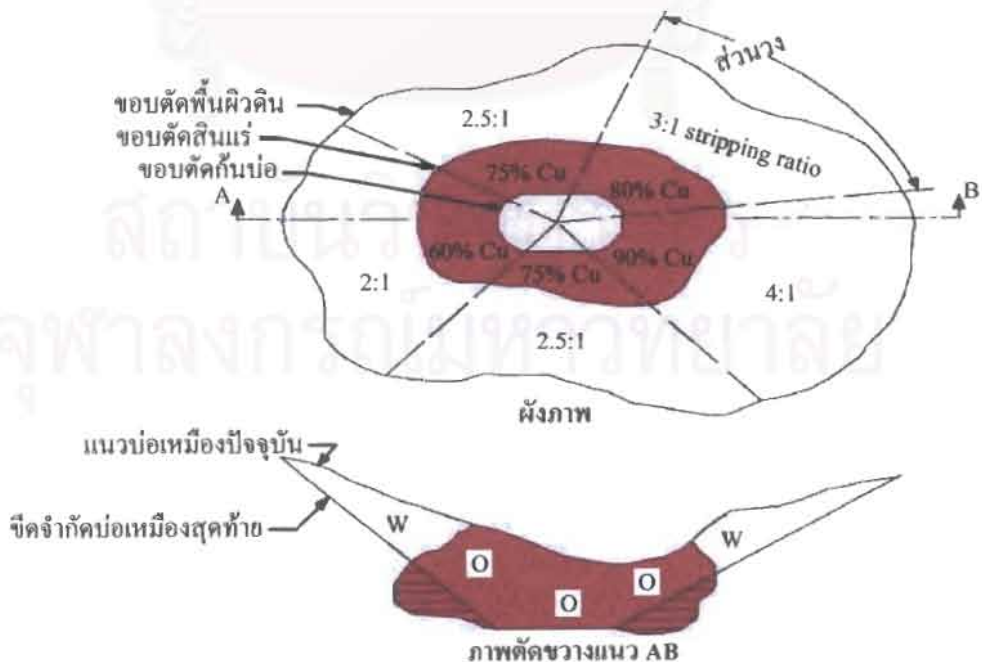
รูปที่ 8.17 ผังภาพการออกแบบขอบบ่อที่ระดับความลึก 364 เมตร มีทางเลือกในการวิเคราะห์ 3 แนวทาง ได้แก่แนวเส้น  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $A_3$

### 8.3.2 กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่ใช้แบบจำลองของบล็อก

เหมืองแร่ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาในการออกแบบขอบบ่อเหมืองเปิดในหัวข้อนี้ ใช้แบบจำลองที่มีการปรับเปลี่ยนข้อมูลเข้าในลักษณะของบล็อกเมทริกซ์ (block matrix) โดยอาศัยเทคนิคทรงกรวยเคลื่อนที่ (moving cone technique) กรณีศึกษาอิงการประยุกต์วิธีการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ที่เหมืองทองแดงชื่อ Kennecott Copper Corp. รัฐยูทาห์ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเรียบเรียงจากบทความวิจัยจำนวน 3 บทความ ได้แก่ บทความแรก "Computer Techniques in Mine Planning" ของ Carlson et al. (1966); บทความที่สอง "Open Pit Mine Design" ของ Pana and Devey (1973) และบทความที่สาม "Case Study in Open Pit Limit Analysis" ของ Crawford and Davey (1979) การนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ ในรายงานฉบับนี้ ผู้วิจัยพยายามคัดแปลงเนื้อหาโดยมุ่งประเด็นเฉพาะที่การออกแบบขอบบ่อเหมืองเปิดเท่านั้น

#### 1. ธรณีวิทยาแหล่งแร่

สินแร่ที่เหมืองผลิตคือ แร่ทองแดงซัลไฟด์แบบ copper sulfide porphyry deposit ที่มีสารเจือปนอื่นอีก ได้แก่ ทองคำ เงิน และ  $\text{MoS}_2$  มวลสินแร่สะสมอยู่ในหินอัคนีประเภทแทรกซอน (intrusive) ที่สัมผัสกับหินตะกอนซึ่งเป็นหินปูนกับหินดินดาน (ดูรูปที่ 8.18) การประเมินผลทางธรณีวิทยาแหล่งแร่ใช้ภาพตัดขวางที่มีรหัสของชนิดหิน ให้รหัส 01 = หินปูน, รหัส 02 = หินดินดาน, รหัส 03 = หินอัคนีแทรกซอน การผลิตแร่ในเหมือง ส่วนที่เป็น ore grade จะส่งไปยังเครื่องบดย่อยแร่ เพื่อแยกหัวแร่ (head or concentration) ออกจากกากแร่ (gangue) ซึ่งเป็นแร่เกรดต่ำหรือเศษหินที่ไม่สามารถซื้อขายได้



รูปที่ 8.18 ผังภาพและภาพตัดขวางแนวคิ่งแสดงธรณีวิทยาแหล่งแร่ทองแดงในบริเวณ



## 2. ขั้นตอนหลักในการออกแบบขอบบ่อเหมืองเปิด

ในกระบวนการวิเคราะห์หมีแบ่งขั้นตอนหลักได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการกำหนดให้ข้อมูลถูกแปลเป็นภาษาเครื่องที่คอมพิวเตอร์เข้าใจ (data assembling) ช่วงที่สองเป็นการปฏิบัติการด้วยคอมพิวเตอร์ (computer operations) ซึ่งเป็นการป้อนข้อมูลเข้า การออกแบบบ่อเหมืองเปิด การวิเคราะห์แสดงผลลัพธ์ ช่วงที่สามเป็นการวิเคราะห์ทบทวนผลลัพธ์เชิงวิศวกรรม (engineering analysis)

การเสนอแนะในหัวข้อต่อไปเป็นการอธิบายอย่างย่อ เพื่อแสดงตัวอย่างกรณีศึกษาที่อาจนำไปใช้ทดลองกับกรณีศึกษาของเหมืองแร่อื่น ที่มีรูปแบบการพัฒนาหน้างานเหมืองเปิดในลักษณะเดียวกัน

### ก) การกำหนดและการแปลข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินผล

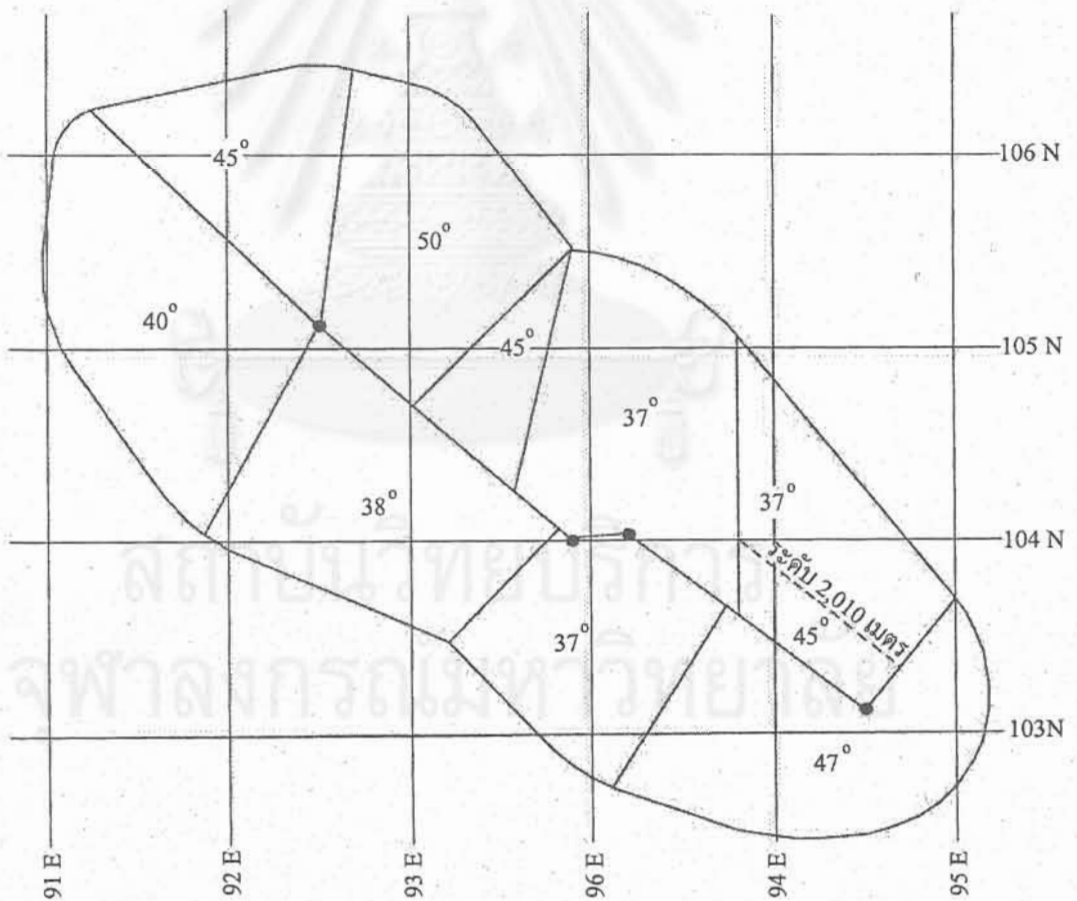
ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หมี 4 เขต คือ เขตแรกเป็นสภาพพื้นผิวของภูมิประเทศ เขตที่สองเป็นแบบจำลองมวลสินแร่ เขตที่สามเป็นการกำหนดค่ามุมความชันสุดท้ายของขอบบ่อเหมือง ส่วนเขตสุดท้าย (เขตที่สี่) เป็นข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์

การกำหนดบล็อกเมทริกซ์สำหรับเป็นข้อมูลเข้า เพื่อใช้ในการออกแบบแหล่งสะสมสินแร่ในบริเวณ มีขนาดใหญ่มาก พื้นที่ 1,676 x 1,219 ตร.ม. (5,500 x 4,000 ตร.ฟุต) และมีความลึก (สูง) 451 เมตร (1,480 ฟุต) การวางตัวของแบบจำลองบล็อกอยู่ในแนวตะวันตก-ตะวันออก และแนวเหนือ-ใต้

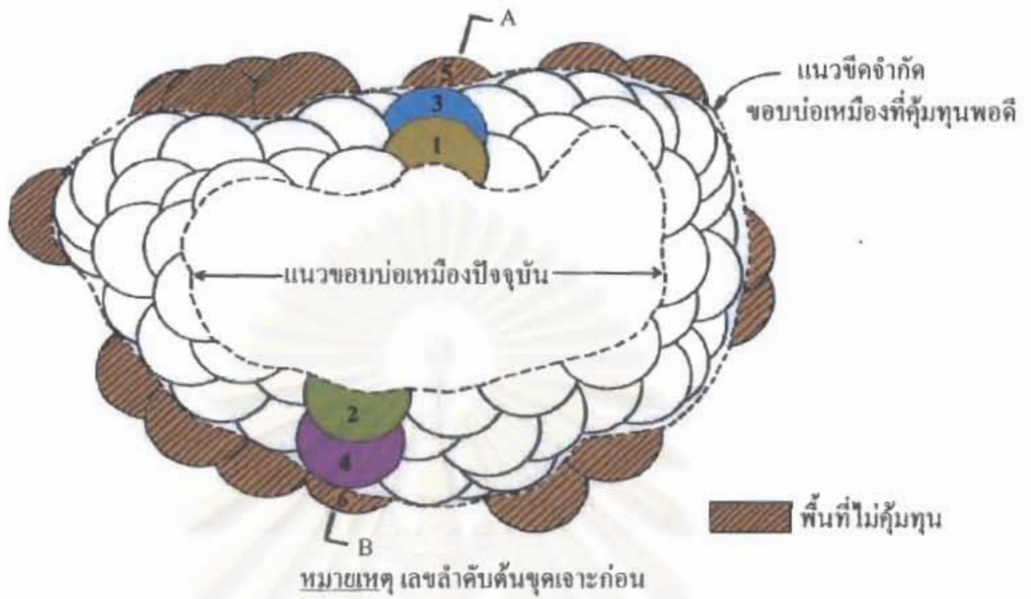
สมมุติฐานทั่วไปของบล็อกเมทริกซ์เป็นการกำหนดน้ำหนักกับเกรดแร่ และเงื่อนไขบังคับ (constraint) ทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมสำหรับการวางแผนพัฒนาการผลิตแร่ในระยะยาว โดยใช้เครื่องจักรกลกับอุปกรณ์ที่จัดซื้อไว้แล้วในเหมือง

การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากหลุมเจาะจำนวนมาก มีผลทำให้สามารถกำหนดครหัทสรณ์ในแบบจำลองได้ก่อนข้างละเอียด ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นมวลวัสดุที่อยู่กับที่เป็นสินแร่ 2.632 ตัน/ลบ.ม. และส่วนที่ต้องทิ้งเป็นหย่อมดินนอกบ่อมีค่าเฉลี่ย 2.273 ตัน/ลบ.ม. ค่ามุมความชันโดยรวมในการตัดความลาดแสดงผลในรูปที่ 8.19 สำหรับผังแผนที่ระดับความสูง 2,010 เมตร หนึ่งจากข้อมูลเพิ่มเติมเชิงค่าใช้จ่าย ทำให้สามารถจำกัดขอบเขตผังขอบบ่อเหมืองได้หลายแนวทาง (รูปที่ 8.20 ก) และมีการวางแผนในการขุดเจาะเพื่อนำวัสดุออกจากบ่อเหมืองอย่างเป็นอนุกรมต่อเนื่อง (series of removal increments) ตลอดจนกำหนดบริเวณซึ่งการทำเหมืองไม่มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจเพราะไม่คุ้มทุน และการลำดับขั้นตอนของการเปิดหน้างาน โดยใช้หมายเลขระบุไว้บนผัง หมายเลขบนภาพตัดขวาง (รูปที่ 8.20 ข) เลขลำดับแรก (เลข 1) เป็นส่วนที่ต้องทำการขุดเจาะเพื่อเปิดเอาวัสดุ (สินแร่และวัสดุเจือปน) ออกก่อน ขุดเจาะหมายเลข 2, 3, 4 ตามลำดับ ส่วนหมายเลข 5, 6 นั้นเป็นทางเลือกสุดท้ายที่อาจปล่อยไว้ไม่ต้องทำรายการ

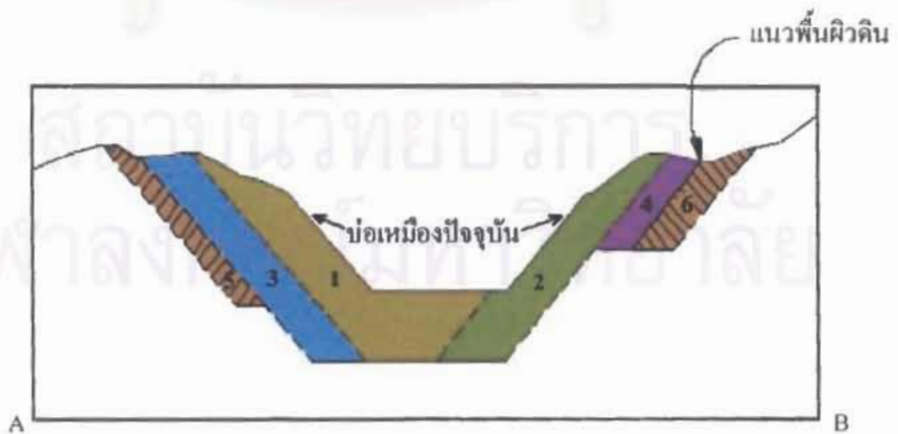
ข้อมูลเข้าแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ทั้งนี้ได้ระบุค่าไว้ 3 ตาราง ในส่วนตารางแรก (ตารางที่ 8.7) เป็นแบบจำลองของบล็อกสินแร่ ตารางที่สองเป็นการวางแผนระยะยาวสำหรับประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเพื่อผลิตแยกแร่และถลุงโลหะ กับราคาซื้อขายโลหะ ตารางที่สามเป็นการวิเคราะห์หาขอบเขตจำกัดของบ่อเหมืองเปิด เทียบกับค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะ การถลุง และการปฏิบัติงานในโรงโม่บดย่อย โรงแยกแร่และถลุงแร่โลหะ



รูปที่ 8.19 การกำหนดมุมความลาดชันจากผังขอบบ่อเหมืองในปี ค.ศ. 1979



รูปที่ 8.20 ก ผังแสดงขอบบ่อปัจจุบัน กับบริเวณอื่นที่วางแผนจุดเจาะในอนาคต



รูปที่ 8.20 ข ภาพตัดขวางแนว AB ของขอบบ่อเหมือนที่แสดงตัวเลขลำดับชั้นการจุดเจาะ การจุดเจาะพื้นที่บางแห่งไม่คุ้มทุนในช่วงระยะเวลาที่ประเมินผล

ตารางที่ 8.7 แบบจำลองแร่ที่ใช้การบรรจุข้อมูลในบล็อกเมทริกซ์

รายการข้อมูลเข้าตามชนิดแร่	Mineral Model Data	หน่วย (Units)
แร่โลหะทองแดงที่ป้อน	Feed Cu	เปอร์เซ็นต์
แร่ MoS <sub>2</sub> ที่ป้อน	Feed MoS <sub>2</sub>	เปอร์เซ็นต์
แร่ทองคำที่ป้อน	Feed Au	ออนซ์ / ตัน (เมตริก)
แร่เงินที่ป้อน	Feed Ag	ออนซ์ / ตัน (เมตริก)
หัวแร่ทองแดงที่ได้กลับคืนจากกระบวนการแยกแร่	Cu concentration recovery	เปอร์เซ็นต์
เกรดหัวแร่ทองแดง	Cu concentration grade	เปอร์เซ็นต์
โลหะทองแดงที่ได้กลับคืนจากกระบวนการถลุง	Cu smelting recovery	เปอร์เซ็นต์
การลอยโลหะทองแดงจากกระบวนการถลุง	Cu in blister	เปอร์เซ็นต์
โลหะทองแดงที่บริสุทธิ์จากกระบวนการถลุง	Cu refining recovery	เปอร์เซ็นต์
หัวแร่โมลิบดีนัมที่ได้กลับคืนจากกระบวนการแยกแร่	MoS <sub>2</sub> concentration recovery	เปอร์เซ็นต์
หัวแร่โมลิบดีนัมที่แปลงสภาพจากกระบวนการแยกแร่	MoS <sub>2</sub> conversion recovery	เปอร์เซ็นต์
หัวแร่ทองคำที่ได้กลับคืนจากกระบวนการแยกแร่	Au concentration recovery	เปอร์เซ็นต์
โลหะทองคำที่บริสุทธิ์จากกระบวนการถลุง	Au refining recovery	เปอร์เซ็นต์
หัวแร่เงินที่ได้กลับคืนจากกระบวนการแยกแร่	Ag concentration recovery	เปอร์เซ็นต์
โลหะเงินที่บริสุทธิ์ จากกระบวนการถลุง	Ag refining recovery	เปอร์เซ็นต์

หมายเหตุ: น้ำหนัก 1 ออนซ์ เท่ากับ 28.349 กรัม; 1 ตัน (เมตริก) = 1,000 กก.

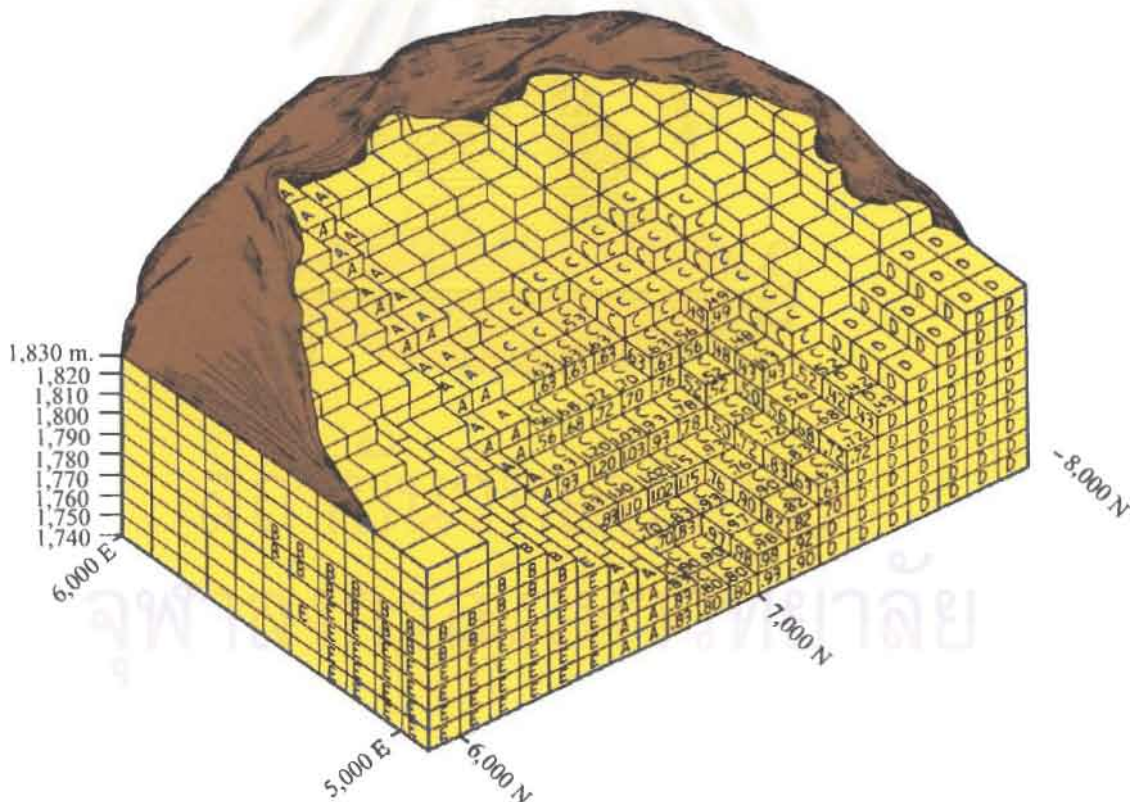
ตารางที่ 8.8 การวางแผนระยะยาวในการประเมินค่าใช้จ่ายทั้งระบบ

รายการข้อมูลเข้าตามชนิดงานหน้าเหมืองหรือโรงถลุง	Format Data Costs for Mining and Processing	หน่วย (Units)
การเจาะหลุมระเบิด	Drilling	ดอลลาร์ / ตัน (ore and waste)
การระเบิด	Blasting	ดอลลาร์ / ตัน (ore and waste)
การตักขน	Loading	ดอลลาร์ / ตัน (ore and waste)
การลำเลียงขนย้าย	Hauling	ดอลลาร์ / รถบรรทุก (ต่อชั่วโมงทำงาน)
การทิ้ง waste ที่ลานห่ออม	Waste dumping	ดอลลาร์ / ตัน (waste)
การกองสัณแร่ในบ่อเหมือง	Pit dumping	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การปฏิบัติงานเหมืองทั่วไปเกี่ยวกับสินแร่	Mine operation for ore	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การปฏิบัติงานเหมืองทั่วไปเกี่ยวกับดินและหิน	Mine operation for waste	ดอลลาร์ / ตัน (waste)
การตักขนสินแร่อีกครั้ง	Ore reloading	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การลำเลียงย้ายสินแร่อีกครั้ง	Ore haulage	ดอลลาร์ / ตัน (waste)
การแยกหัวแร่ออกจากสินแร่	Head concentrating	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การลำเลียงขนย้ายหัวแร่	Head concentrating delivery	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การถลุงโลหะจากหัวแร่	Smelting	ดอลลาร์ / ตัน (head)
การปฏิบัติงานในโรงงานสำหรับสินแร่	General operation for ore	ดอลลาร์ / ตัน (ore)
การปฏิบัติการในโรงงานสำหรับดินและหิน	General operation for waste	ดอลลาร์ / ตัน (waste)
การหล่ออบชุบโลหะในโรงงาน	General operation for blister	ดอลลาร์ / ตัน (blister)
การอบชุบ การหล่อ การตักขน และการขนส่งโลหะ	Blister, casting, loading and freight	ดอลลาร์ / ตัน (blister)
การถลุง	Smelting	ดอลลาร์ / ตัน (blister)
ราคาขาย (รวมค่าขนส่ง)	Selling and delivery	ดอลลาร์ / กิโลกรัม โลหะทองแดงบริสุทธิ์



ตารางที่ 8.9 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของการผลิตและถลุงแร่ เพื่อกำหนดขอบบ่อเหมือง

รายการข้อมูลเข้าตามชนิดงานหน้าเหมืองหรือโรงถลุง	Items of Data Costs for Mining and Processing	Costs (ค่าใช้จ่าย) (ดอลลาร์)
การขุดเจาะท่าเหมือง (ต่อน้ำหนักเป็นตัน)	Excavation for mining (weight in tons)	x (waste)
การขุดเจาะท่าเหมือง (ต่อน้ำหนักเป็นตัน)	Excavation for mining (weight in tons)	x (ore)
การขนส่งขนย้ายสินแร่ (ต่อน้ำหนักเป็นตัน)	Ore haulage (weight in tons)	x (ore)
การแยกหัวแร่ (ต่อน้ำหนักเป็นตัน)	Concentrating (weight in tons)	x (ore)
การขนส่งหัวแร่ (ตัน)	Concentrating delivery (tons)	x (conc.)
การถลุงโลหะ (ตัน)	Smelting (tons)	x (conc.)
การขนส่งถลุงโลหะที่เคลือบอบชุบ (ตัน)	Blister casting loading and freight (tons)	x (blister)
การปฏิบัติการในโรงงานเกี่ยวกับสินแร่ (ตัน)	Plant operation for ore (tons)	x (ore)
การปฏิบัติการในโรงงานเกี่ยวกับหางแร่และอื่น ๆ (ตัน)	Plant operation for waste (tons)	x (waste)
การปฏิบัติการในโรงงานเกี่ยวกับโลหะที่อบชุบ (ตัน)	Plant operation for blister metal (tons)	x (blister)
การถลุงโลหะให้บริสุทธิ์ (ตัน)	Refining (tons)	x (blister)
ราคาขาย (รวมค่าขนส่ง)	Selling and delivery	ดอลลาร์ / กิโลกรัมโลหะบริสุทธิ์



รูปที่ 8.21 บล็อกมวลสินแร่สามมิติ ที่ใช้เป็นตัวแทนการประเมินผลของเหมืองแร่ทองแดง บริษัท Kennecott Copper Corp. (KCC)



### ข) การปฏิบัติการทางคอมพิวเตอร์

ลำดับขั้นตอนของการปฏิบัติการ โดยใช้คอมพิวเตอร์มี 5 ขั้นตอนหลัก เริ่มตั้งแต่การป้อนข้อมูลเข้า การสร้างบล็อก การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ การจำลองแบบของบ่อเหมืองเปิด และการแสดงผลพร้อมออก ดังคำอธิบายโดยย่อต่อไปนี้

#### 1) ขั้นตอนที่หนึ่ง การป้อนข้อมูลเข้า

ข้อมูลเข้าแบบจำลองบล็อกแร่ ระบบจะแปลงข้อมูลค่าแห่งให้อยู่ในแถวกับคอลัมน์ของเมทริกซ์พร้อมแสดงระดับความสูงไว้ด้วย ดังภาพไดอะแกรม 3 มิติ ของรูปที่ 8.21

#### 2) ขั้นตอนที่สอง การประเมินบล็อกเชิงเศรษฐศาสตร์

มีการแยกประเภทวัสดุสำหรับบล็อกที่ถูกจัดเป็นสินแร่สำหรับป้อน โรงแยกแร่ (mill feed) กับบล็อกที่เป็นกากวัสดุที่ไม่ต้องการ (waste) มูลค่าสุทธิ (net value) และ จำนวนเงินรับที่เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เพื่อหาจุดคุ้มทุนของการขุดเจาะ ตามสมการเชิงประสพการณ์ของ breakeven stripping ratio เป็น

$$\frac{\text{Value of Ore Per Ton} - \text{Production Cost Per Ton}}{\text{Stripping Cost Per Ton}} \quad (8.1)$$

#### 3) ขั้นตอนที่สาม การลำดับขั้นตอนในการขุดเจาะ

รูปแบบการนำวัสดุออกจากบ่อเหมือง ได้แสดงลำดับขั้นตอนเป็นตัวเลขไว้แล้วในรูปที่ 8.20 แต่ต้องมีการประชุมปรึกษาเพื่อทำความเข้าใจระหว่างพนักงานก่อน เนื่องจากจำเป็นต้องมีการกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินใจในหลายเรื่อง เช่น เกรดค่าสุดของสินแร่ อัตราส่วนมวลวัสดุที่ทำการขุดเจาะ สภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ของแหล่งสะสม เมื่อประเมินผลโดยรวมแล้วจึงสามารถแบ่งบริเวณออกเป็นหลายพื้นที่ได้ เช่น พื้นที่ที่เหมาะสมต่อการขุดเจาะมากที่สุด (most likely) พื้นที่ที่ไม่เหมาะสมต่อการขุดเจาะอย่างยิ่ง (least likely) ทั้งนี้ ในส่วนที่เหมาะสมต่อการขุดเจาะ มีการจำลองแบบเพื่อพัฒนาทำเหมืองในขั้นตอนต่อไป

#### 4) ขั้นตอนที่สี่ การจำลองแบบขุดเจาะโดยใช้บล็อก

การประเมินผลเพื่อจำลองแบบการทำเหมืองโดยใช้บล็อก มีการปฏิบัติการทั้งหมด 4 แบบ คือ

– การก่อกำเนิดหรือการสร้าง (generate) ปริมาตรในรูปแบบเรขาคณิตของบล็อกที่จะทำ การขุดเจาะ

- การคำนวณมูลค่าสุทธิสะสม (cumulative net value) สำหรับการขุดเจาะแต่ละชั้นของบล็อกต้นแบบ ตัวเลขค่าใช้จ่าย บล็อกที่มีเครื่องหมายบวกหมายถึง สิ้นแร่ที่เป็น ส่วนตัวเลขค่าใช้จ่ายของบล็อกที่มีเครื่องหมายลบหมายถึง ส่วนที่ไม่ต้องการที่เป็นรายจ่าย (ดูรูปที่ 8.22)

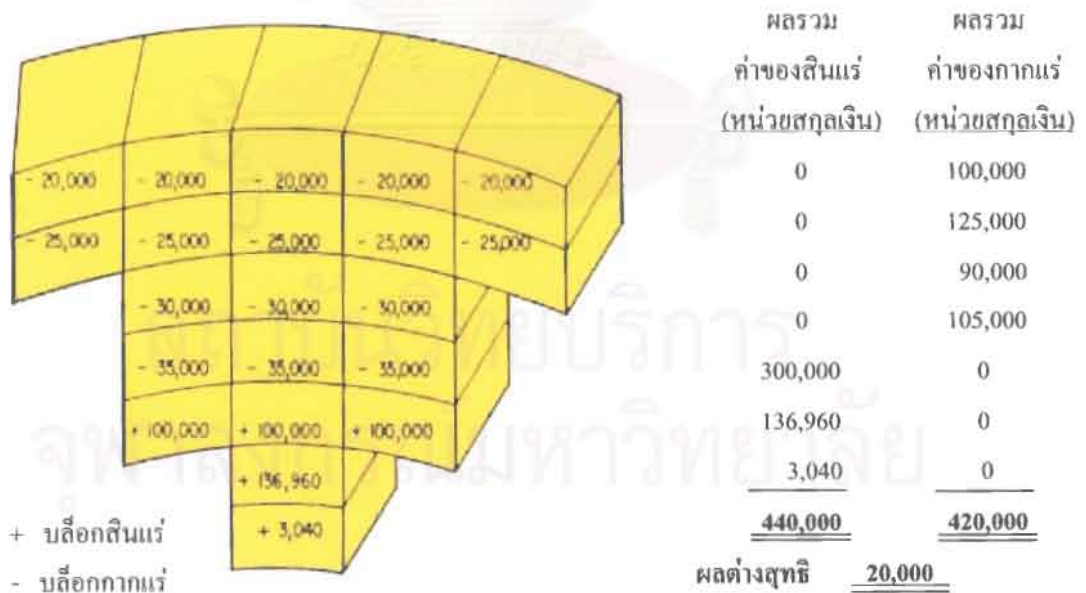
- การประเมินผลบล็อกรูปแบบที่คำนวณมูลค่าสุทธิสะสม ว่าสมควรที่จะได้รับผลกำไรจากการทำเหมืองหรือไม่ โดยหาค่าแตกต่างสุทธิของรายรับกับรายจ่าย (net difference)

- การเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำของบล็อกต้นแบบ เพื่อใช้ในการปรับแก้สภาพภูมิประเทศเมื่อมีการขุดเจาะวัสดุออกจากบ่อเหมืองเปิดจริง

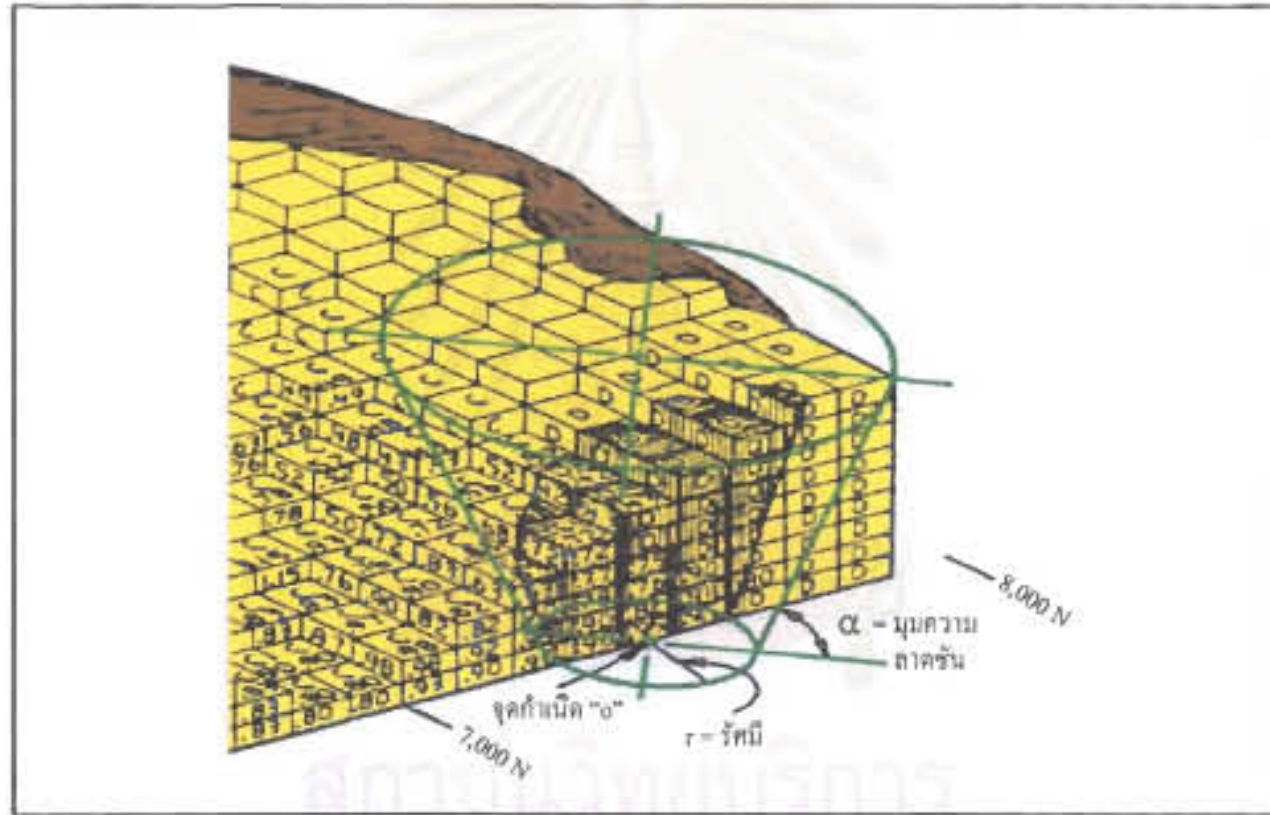
จากลักษณะ โดยรวมของบล็อกที่มีการแผ่กระจายจากกันบ่อ สามารถปรับแก้กลุ่มบล็อกนี้ให้มีลักษณะเป็นกรวยหน้าตัด (frustum) ที่แนวเส้นด้านข้างเป็นขอบของทรงกรวย ดังกราฟิกตัวอย่างของกรวยหน้าตัดเดี่ยวในรูปที่ 8.23

#### 5) ขั้นตอนสุดท้าย การแสดงผลข้อมูลออกจากระบบ

การทำเหมืองเปิดจะหยุดที่จุดคุ้มทุน ดังนั้น โปรแกรมที่ใช้คำนวณมูลค่าสุทธิจะหยุดจำลองแบบเมื่อไม่มีค่าบวกในพื้นที่แล้ว แต่การสำรวจบล็อกต่อไปเพื่อสร้างต้นแบบยังดำเนินต่อไป เมื่อปฏิบัติการขุดและตรวจสอบข้อมูลออกที่แสดงผลสรุปบล็อกที่ขุดเจาะของแต่ละทรงกรวยแล้วจะสามารถประเมินแนวขอบเขตสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุดของบ่อเหมืองเปิดได้



รูปที่ 8.22 การประเมินการลงทุนเพื่อหาค่าขุดเจาะสุทธิของบล็อกต้นแบบ  
หน่วยสกุลเงินเป็นดอลลาร์สหรัฐอเมริกา



รูปที่ 8.23 ภาพกราฟิกแสดงกระจายหน้าตัดของบล็อกตัวแทนที่ใช้ในการกำหนดขอบบ่อเหมือง

### 8.3.3 กรณีศึกษาเหมืองแร่ที่ค่ามูมความชันเปลี่ยนได้ในการขุดเจาะ

การขุดเจาะบ่อเหมืองเปิดที่มีโครงร่างรูปกรวย เมื่อตั้งสมมุติฐานในกลุ่มบล็อกที่อยู่ในกรวยที่ค่ามูมความชันของการขุดเจาะบล็อกแปรผันได้ ถูกยกเป็นกรณีศึกษา ตัวอย่างและเนื้อหาหลักในหัวข้อย่อยนี้เป็นผลงานวิจัยของ Dowd (1995), Khalokakaie (1999) และของ Khalokakaie et al. (2000) มีการแสดงขั้นตอนวิธีในการปรับเปลี่ยนค่ามูมของแต่ละระดับชั้นที่มีการขุดเจาะบล็อกในกรวยที่อยู่ในระดับลึกภายในบ่อเหมือง

#### 1. สภาพและธรณีวิทยาของแหล่งแร่

เหมืองแร่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาหัวข้อนี้ เป็นเหมืองทองคำที่ประเทศสวีเดน มวลสินแร่เป็นแร่ทองคำเกรดต่ำ มีรูปแบบของมวลที่ไม่สม่ำเสมอ แหล่งสะสมชื่อ Björkdal อยู่ห่างจากเมือง Skellefteå (อยู่ในภาคเหนือของประเทศ) ทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณ 35 กิโลเมตร

ลักษณะของโซนแร่ทองคำในพื้นที่ Björkdal มีข่างานแร่ทองคำปะปนสายควอร์ตซ์ (quartz vein) ที่สัมผัสกับหินหลายประเภท ตั้งแต่หินข้างเคียง ที่เป็นหินแกรนิตไคโอไรต์ยุคเก่า (older granodiorite) กับหินปูนกับหินภูเขาไฟสีจางแร่ทองคำมีรูปแบบหลากหลายไม่แน่นอน (erratic) ผลึกเม็ดแร่ทองคำอยู่กระจัดกระจายภายใน และโดยรอบสายควอร์ตซ์ ขนาดของผลึกแร่เกิดเป็นเม็ดใหญ่ หรือเม็ดเล็กละเอียด บดย่อยออกจากสายควอร์ตซ์ได้ง่าย

#### 2. จุดประสงค์ในการออกแบบ

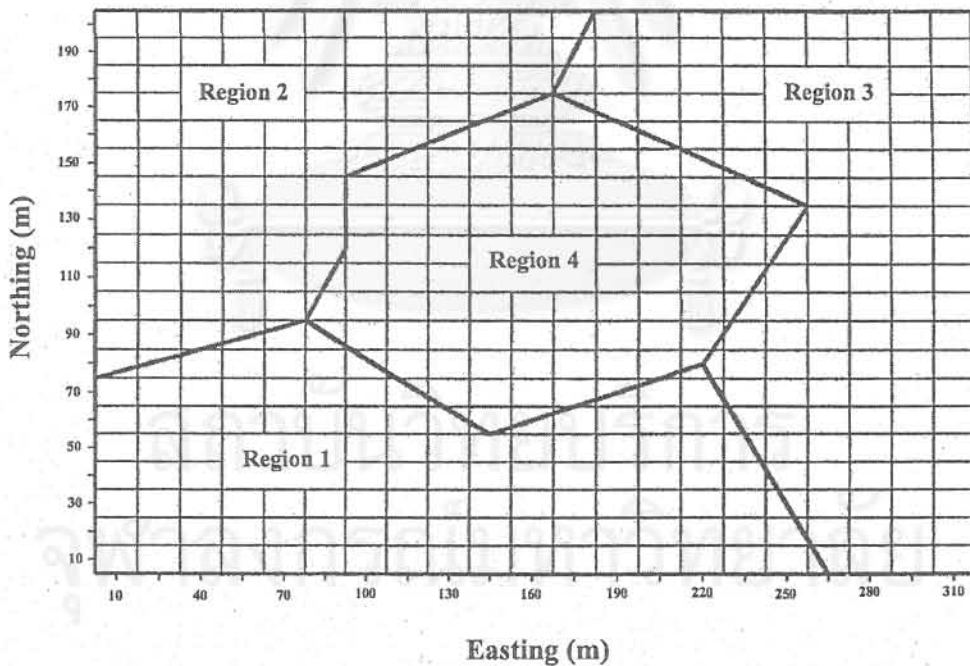
เนื่องจากมวลสินแร่ทองคำในบ่อเหมืองมีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแร่ต่ำ และเกิดแพร่กระจายตลอดทั้งบริเวณ การขุดเจาะพื้นที่โซนสายแร่จึงเป็นบริเวณกว้าง และควรคำนึงถึงความคุ้มทุนที่ต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการนำวัสดุทั้งที่เป็นแร่ทองคำกับส่วนที่เป็นกากออกจากบ่อเหมืองและต้องการคัดแปลงความลาดชันของการตัดชั้นตะพักของแต่ละบริเวณ ตามค่าผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพของความปลอดภัยในระดับที่ให้ผลตอบแทนเป็นจำนวนเงินรับสูงสุด

#### 3. แนวทางการวางแผนเพื่อพัฒนาบ่อเหมือง

การที่จะสามารถออกแบบบ่อเหมืองได้ตามจุดประสงค์ นอกจากคำนึงถึงเปอร์เซ็นต์เกรดแร่ที่ได้จากการประเมินผลเชิงสถิติแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัย กับค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะวัสดุทั้งส่วนที่เป็นสินแร่กับส่วนที่เป็นกาก

ตารางที่ 8.10 ค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะสินแร่และกากที่แปรผันตามความลึกแต่ละระดับชั้น

ค่าช่วงของระดับชั้น, เมตร (ค่า 0 อยู่ที่ผิวดิน)	หน่วยสกุลเงิน Krona/ตัน	
	กาก (waste)	สินแร่ (ore)
0-120	11.00	11.00
120-130	11.30	11.30
130-140	11.60	11.60
140-150	11.90	11.90
150-160	12.20	12.20
160-170	12.50	12.50
170-180	12.80	12.80
180-200	13.20	13.20



รูปที่ 8.24 ผังภาพบริเวณโซนสายแร่ของเหมือง Bjoikdal ในประเทศสวีเดน  
พื้นที่ของการคำนวณแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ และมี 4 หน่วยงานเหมือง  
[ดูรูปบล็อก 3 มิติที่ใช้เป็นต้นแบบ แสดงไว้ในรูปที่ 7.7 บทที่ 7]



ก. พังของบริเวณที่ต้องการเปิดเหมือง

แหล่งสะสมที่เป็นพื้นที่โซนสายแร่ ถูกแบ่งบริเวณทั้งหมดเป็น 4 บริเวณ มีการกำหนดชื่อเรียกบริเวณเหล่านี้ตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 8.24 ได้แก่ region 1, region 2, region 3 และ region 4 ตามลำดับ กำหนดให้บล็อกแบบจำลอง (มีทั้งสินแร่และกาก) ของแหล่งสะสมแร่ ทองคำใน 3 มิติ เป็น  $101 \times 82 \times 36$  บล็อก ซึ่งแกนพิกัดคาร์ทีเซียนทั้ง 3 แกนของแบบจำลองมีความลึกในแนวตั้ง เท่ากับ 36 ระดับชั้น (level)

ข. การประเมินผลลัพท์และการออกแบบจำลองกลุ่มบล็อกของแหล่งสะสม

กลุ่มบล็อกในแบบจำลอง มีการประเมินเกรดสินแร่เชิงสถิติด้วยวิธี Kringing ที่กำหนดให้ค่าน้ำหนักของสินแร่ที่ค้ำค่าต่อการลงทุน (recoverable tonnage of ore) ที่มีหน่วยน้ำหนักเป็นตัน ค่าขีดจำกัดคุณภาพกำหนดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์สินแร่ที่ระดับ cutoff grade กลุ่มบล็อกของแหล่งสะสมที่จัดเป็นบล็อก 3 มิติ เท่ากับ  $15 \times 10 \times 5$  เมตร หรือมีค่าขนาดมิติและแนวทิศทางที่ขนานกับแกนคาร์ทีเซียนทั้ง 3 ทิศทาง ดังนี้

- ระยะ 15 เมตร ทางทิศ east – west
- ระยะ 10 เมตร ทางทิศ north-south
- ระยะ 5 เมตร ทางทิศ vertical

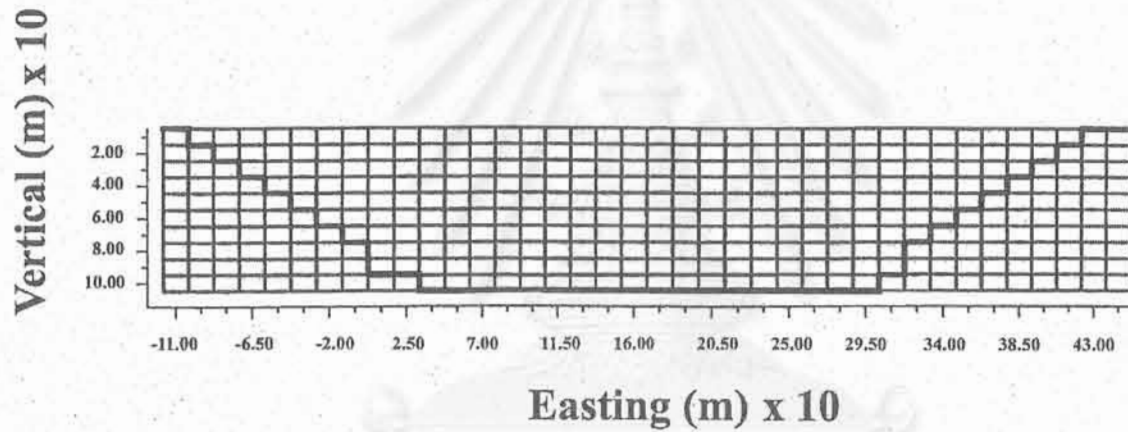
การประเมินผลลัพท์ของค่าน้ำหนักสินแร่ (หน่วยเป็นตัน) ที่ทางเหมืองสามารถที่จะขุดเจาะมาใช้ประโยชน์ได้ (recoverable) มีการเลือกชนิดของหน่วยการทำเหมือง เป็นบล็อก

- ระยะ 5 เมตร ทางทิศ east-west
- ระยะ 4 เมตร ทางทิศ north-south
- ระยะ 5 เมตร ทางทิศ vertical

ส่วนตารางที่ 8.10 แสดงค่าตัวแปรเสริมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะบล็อกออก ค่าคงที่ทั้งเชิงกายภาพและเชิงเศรษฐศาสตร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ

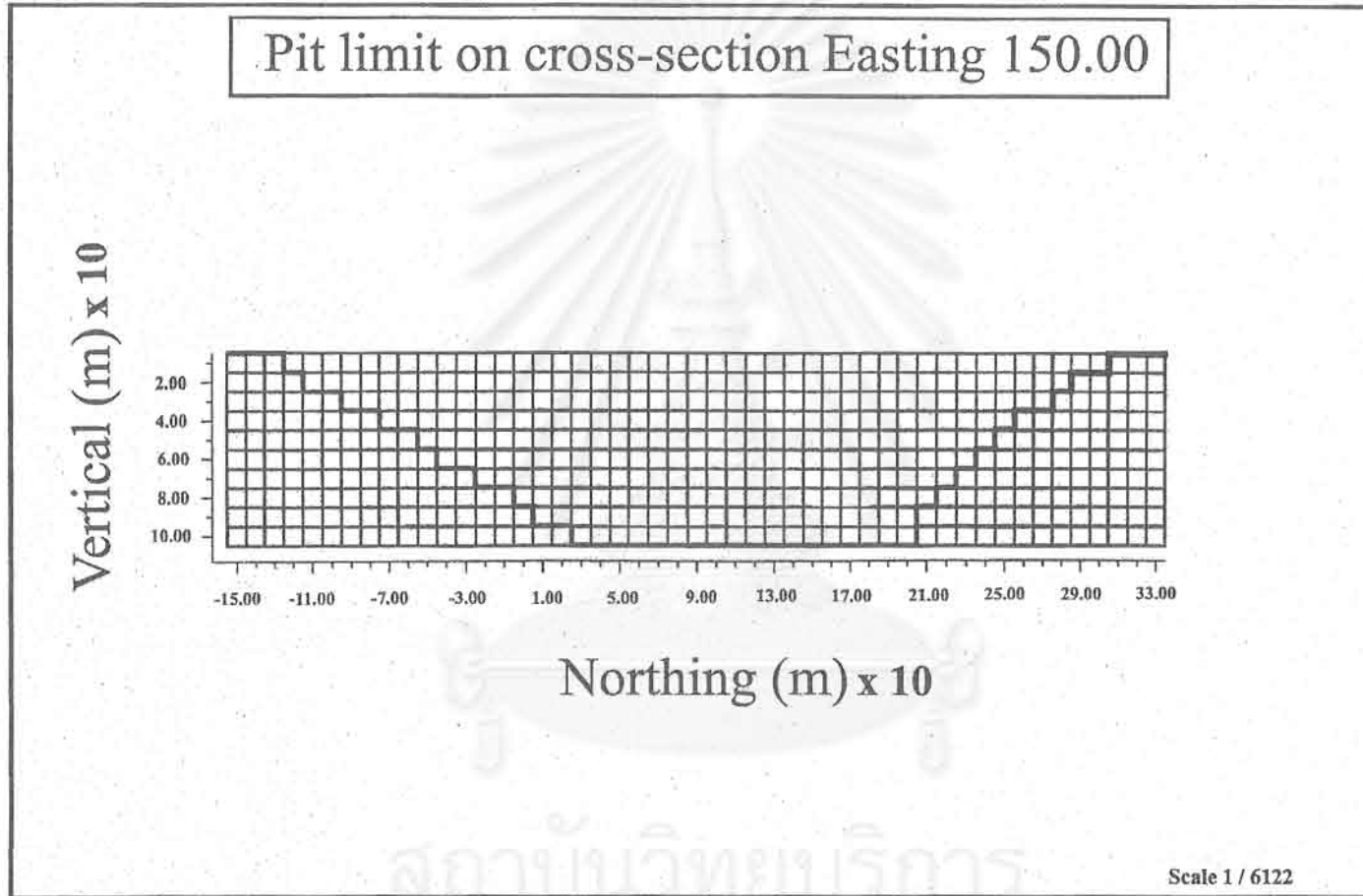
- ความหนาแน่นของสินแร่และกาก ใช้ค่าเฉลี่ยที่ 2.71 ตันต่อตารางเมตร
- ค่าใช้จ่ายในการแยกและแต่งแร่ 52 หน่วยสกุลเงินของสวีเดน (เป็น Krona) ต่อดันของสินแร่ ราคาทองคำ 90 หน่วยสกุลเงินต่อกรัม และเปอร์เซ็นต์ที่สามารถนำสินแร่ออกจากบ่อเหมืองมาได้ (recovery) เท่ากับ 90%

Pit limit on cross-section Northing 120.00



Scale 1 / 4681

รูปที่ 8.25 ภาพตัดขวางแสดงโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดแสดงเป็นเส้นทึบดำรูปที่เป็นภาพขวางข้างบนนี้ มีการตัดในแนว northing 120.00 เมตร (ของรูปผังภาพที่ 8.24) และมีการปรับเส้นขอบบ่อเหมืองให้เรียบ มาตรฐานภาพตัดขวาง (รูปบน) เทียบกับต้นฉบับที่เป็นวิทยานิพนธ์ Khalokakaie (1999) เท่ากับ 1/4681



รูปที่ 8.26 ภาพตัดขวางแสดงโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดแสดงเป็นเส้นทึบดำรูปที่เป็นภาพขวางข้างบนนี้ มีการตัดในแนว easting 150.00 เมตร (ของรูปผังภาพที่ 8.24) และมีการปรับเส้นขอบบ่อเหมืองให้เรียบ มาตราส่วนภาพตัดขวาง (รูปบน) เทียบกับต้นฉบับที่เป็นวิทยานิพนธ์ Khalokakaie (1999) เท่ากับ 1/6122

ในการออกแบบการตัดความลาด กำหนดให้มุมความชันหลัก (principal slope angle) ทั้ง 4 ผังหน้าเหมืองแปรผันได้ตามค่ามุมความชันที่เหมาะสมเชิงเสถียรภาพและเศรษฐศาสตร์ อนึ่ง ตัวแปรเสริมดังกล่าวระบุไว้ในตารางที่ 8.11 ทั้งนี้หาผลลัพธ์สุดท้ายที่วิเคราะห์อิงตามแนวทางสมการต้นแบบของการหาค่าตัวแปรเสริม ที่ระบุไว้ในหัวข้อ 7.3.3 บทที่ 7 ใช้หาแนวโครงร่างขอบบ่อเหมือง ตามขั้นตอนวิธี multiple variable slope angles

ตารางที่ 8.11 ค่ามุมความลาดชันหลักที่แตกต่างกันทั้ง 4 พื้นที่กับ 4 บริเวณ ผังหน้าเหมือง (ดูรูปที่ 8.24 ประกอบ)

พื้นที่ในการประเมินผล (แสดงเป็นผังภาพรูป 8.24)	ค่ามุมความชันหลักตามผังหน้างานเหมืองแต่ละพื้นที่			
	north face	east face	south face	west face
Region 1	30°	40°	42°	38°
Region 2	41°	37°	50°	46°
Region 3	35°	35°	35°	35°
Region 4	39°	39°	46°	46°

การประเมินผล เริ่มจากให้บล็อกเล็กๆ จำนวน 1 บล็อกที่ประกอบในแบบจำลองบล็อก 3 มิติ มีค่าคงที่เท่าค่าตั้งต้นที่ขนาด 15 x 10 x 10 เมตร และบล็อกเล็กยังอยู่ในแนวทิศทางเดิม คือ east, north และ vertical ตามลำดับ ค่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ได้จำนวนบล็อกที่ต้องขุดเจาะ ในแต่ละค่าระดับชั้น (มีทั้งหมด 36 ระดับชั้น ความลึกแต่ละระดับชั้นเป็น 5 เมตร) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8.12 ถ้าทดลองตัดภาพตัดขวางของผังบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด จะได้โครงร่างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุดในแนวตัดนั้น

ตารางผลลัพธ์สุดท้ายที่ระบุค่าที่คำนวณจากโปรแกรมนี้ คอลัมน์แรกเป็นตัวเลขระดับชั้นที่เริ่มจาก ระดับผิวดิน (กำหนดให้เป็น level 1) ต่อมาเมื่อทำการขุดเจาะลึกลงไปแนวตั้งอีก 5 เมตร จะเป็นจุดต่อระหว่าง level 1 และ level 2 ได้ค่าจำนวนบล็อกที่ขุดเจาะในบ่อเหมือง หรืออยู่ภายในกรวยกลับหัว 3 มิติ ระบุเป็นค่า pit (คอลัมน์ที่ 2) และแยกระบุชนิดของบล็อกที่ขุดเจาะออกจากบ่อเหมืองว่าเป็นค่า ore (คอลัมน์ที่ 3) หรือค่า waste (คอลัมน์ที่ 4)

ผลจากการคำนวณค่าน้ำหนักวัสดุ (ของสินแร่และกาก) ที่ให้ค่าความหนาแน่นคงที่ตามที่ระบุไว้ในคอลัมน์ที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนการประเมินค่าใช้จ่ายที่ให้อิงตามระดับความลึกของการขุดเจาะได้ระบุไว้ในตารางที่ 8.10 โดยแบ่งค่าใช้จ่ายทั้งหมด 8 ระดับชั้นความลึก ที่เริ่มตั้งแต่ 1.10 ถึง 13.20 Krona / ton จะระบุค่า [(Krona / ton) x 10<sup>4</sup>] ไว้ในคอลัมน์ที่ 6, 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.12 ผลลัพธ์การวิเคราะห์หาขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด  
ที่ใช้ขั้นตอนวิธีของ multiple variable slope angles  
(ใช้ข้อมูลเข้าจากผังภาพที่ 8.24 ตารางที่ 8.10 และ 8.11)

level number	number of blocks			minable weight, tons		monetary units/ton		grade g/t
	pit	ore	waste	ore	waste	ore	waste	
1	0	0	0	-	-	-	0	0
2	7	0	7	-	14,227.50	-	-15.70	0
3	20	0	20	1,261.20	39,388.80	-	-44.20	0
4	47	6	41	8,321.00	87,206.50	28.20	-72.10	1.534
5	89	19	70	18,943.70	161,948.80	71.40	-133.70	1.516
6	98	24	74	23,070.90	176,114.10	120.40	-149.20	1.642
7	116	23	93	26,635.00	209,135.00	172.80	-180.70	1.787
8	115	22	93	30,349.50	203,388.00	223.70	-183.40	1.831
9	132	31	101	38,982.50	229,307.50	313.70	-208.10	1.890
10	188	70	118	88,491.20	293,618.80	986.60	-243.10	2.241
11	304	109	195	149,660.50	468,219.50	1,638.90	-406.30	2.195
12	381	160	221	229,524.30	544,858.20	2,661.40	-462.70	2.258
13	652	186	466	257,278.20	1,067,911.80	2,804.60	-1,009.10	2.179
14	833	192	641	274,901.70	1,418,170.90	2,903.70	-1,398.50	2.131
15	912	199	713	294,251.10	1,559,389.00	3,259.60	-1,543.80	2.193
16	884	213	671	290,374.60	1,506,382.40	2,632.30	-1,443.50	1.996
17	899	183	716	230,409.90	1,596,807.60	2,006.20	-1,523.70	1.956
18	853	181	672	216,524.70	1,517,197.80	2,190.40	-1,428.10	2.140
19	793	181	612	224,820.80	1,386,951.80	2,453.20	-1,295.30	2.227
20	730	182	548	225,121.90	1,258,603.10	2,529.70	-1,171.20	2.257
21	734	212	522	270,892.70	1,220,962.20	3,666.30	-1,133.80	2.536
22	723	228	495	286,762.70	1,182,734.80	3,542.20	-1,045.60	2.405
23	663	209	454	285,203.30	1,062,344.20	3,118.60	-986.90	2.217
24	638	233	405	312,822.60	983,912.40	3,298.20	-862.00	2.173
25	650	281	369	389,399.20	931,725.80	4,327.10	-766.20	2.244
26	652	344	308	464,991.10	860,198.90	5,262.10	-619.00	2.268
27	625	324	301	441,324.80	828,987.80	5,652.30	-606.60	2.460
28	579	342	237	478,614.20	698,203.30	6,984.80	-456.90	2.667
29	479	296	183	415,863.80	557,703.70	5,937.70	-381.90	2.623
30	384	241	143	338,962.90	441,517.10	4,642.50	-290.70	2.554
31	300	223	77	295,231.10	314,518.90	3,920.70	-153.80	2.516
32	220	181	39	249,775.20	197,374.80	4,036.90	-66.20	2.856
33	150	137	13	195,474.30	109,400.70	3,117.20	-28.00	2.816
34	100	94	6	140,512.90	62,737.10	2,686.10	-12.10	3.192
35	57	56	1	83,122.60	32,729.90	1,964.20	-2.70	3.741
36	23	23	0	35,842.00	10,905.50	700.10	0.00	3.230
Total	15,030	5,405	9,625	7,313,691.10	23,234,784.10	89,853.70	-20,324.90	2.380



แต่ในส่วนของบล็อกสินแร่ จะเป็นตัวเลขที่มีเครื่องหมายบวก และในส่วนของบล็อกที่เป็นกาก จะเป็นตัวเลขที่มีเครื่องหมายลบ

คอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ 8.12 เป็นค่าเฉลี่ยเกรดสินแร่ทองคำปนกาก ที่เป็นค่าเฉลี่ยของบล็อกที่วางตัวอยู่ในแต่ละระดับชั้น ค่าเฉลี่ยนี้เป็นผลจากการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธี Kriging (Dowd, 1995) หน่วยของค่าเฉลี่ยเกรดบล็อกเป็น กรัมต่อตัน

ถ้าหากอ่านค่าในแต่ละแถวของตารางที่ 8.12 จะเป็นค่าตัวแปรเสริมในแต่ละระดับชั้นของการขุดเจาะรวม 36 ระดับชั้น ส่วนแถวสุดท้าย (แถวที่ 37) เป็นผลรวมตัวเลขในแต่ละคอลัมน์ ยกเว้นตัวเลขสุดท้าย ที่เป็นคอลัมน์ค่าเกรดเฉลี่ย ค่าตัวเลข 2.380 กรัมต่อตัน เป็นค่าเฉลี่ยที่หาจากวิธี Kriging ไม่ใช่เป็นค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวเลขค่าเฉลี่ยทั้งหมดที่หาจากผลรวมของเกรดในแต่ละระดับชั้น แล้วหารด้วยจำนวนระดับชั้นทั้งหมด

กรณีที่ต้องการตรวจสอบโครงร่างขอบบ่อเหมือง สามารถที่จะเลือกตัดภาพตัดขวางของภาพขอบบ่อเหมืองได้ ตัวอย่างที่คัดลอกมาจากวิทยานิพนธ์ของ Khalokakaci (1999) เป็นภาพตัดขวางของผังรูปที่ 8.24 ในแนว easting 150.00 กับแนว northing 120.00 เมตร ตามลำดับ รูปภาพตัดขวางดังกล่าวได้มีการปรับขอบบ่อด้านล่างสุดให้เรียบ และปรับมาตราส่วนให้เหมาะสมกับขนาดกระดาษของรายงานวิจัยโครงการนี้

สิ่งที่เห็นค่อนข้างชัดเจนในตารางผลลัพธ์กับภาพตัดขวาง ได้แก่ วิธี multiple variable slope angles นี้ สามารถออกแบบการขุดเจาะความลาดชันที่มีค่าที่แปรผันได้ และยังสามารถกำหนดให้แบบจำลองบล็อก 3 มิติ เป็นบล็อกกรุปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือเป็นบล็อกกรุปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามความเหมาะสมที่อิงกับสภาพทางภูมิประเทศกับธรณีวิทยาของแหล่งสะสมในบริเวณ

### 8.3.4 กรณีศึกษาเหมืองแร่ในประเทศ

กรณีศึกษาเบื้องต้นของเหมืองแร่ในประเทศนี้ได้มาจากผลการศึกษาตรวจสอบภาคสนามที่มิวจัยได้คัดเลือกเหมืองแร่เปิดไว้ 2 เหมืองซึ่งมีการผลิตสินแร่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ เหมืองแร่เฟลด์สปาร์ จังหวัดตาก และเหมืองแร่บิชไมท์ จังหวัดพิจิตร

การนำเสนอที่ระบุในรายงานฉบับนี้ ส่วนหนึ่งเป็นแนวคิดที่ทางมิวจัยได้จากการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับวิศวกรประจำเหมือง อีกส่วนหนึ่งได้จากการศึกษาข้อมูลสารสนเทศของต่างประเทศแล้วนำมาประยุกต์กับงานเหมืองเปิดในประเทศ

### 8.3.4.1 เหมืองแร่เฟลด์สปาร์ บริษัท พิพัฒน์กร จำกัด

เหมืองแร่เฟลด์สปาร์ของบริษัท พิพัฒน์กร จำกัด มีสำนักงานเหมืองตั้งอยู่ที่ 238/9 หมู่ที่ 6 ตำบลวังประจบ อำเภอเมือง จังหวัดตาก และมีสำนักงานใหญ่ตั้งอยู่ที่ 120/2-3 ถนนศาลาแดง แขวงสีลม เขตบางรัก กรุงเทพมหานคร

#### 1. ธรณีวิทยาแหล่งแร่

ปัจจุบันแหล่งแร่ของบริษัท พิพัฒน์กร จำกัด เปิดทำการ 3 แหล่ง คือ แหล่งแร่नाเสง แหล่งแร่ร่วมเย็น และแหล่งแร่บุญบันดาล ตั้งอยู่ในเขตท้องที่หมู่ที่ 6 ตำบลวังประจบ และ หมู่ที่ 7 ตำบลโป่งแดง อำเภอเมือง จังหวัดตาก ประทานบัตรแหล่งแร่ทั้งหมดนี้ได้ระบายสิทธิ (ดูรูปที่ 5.26) แสดงขอบเขตไว้ในแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร มาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L 7017 ระวัง 4842 I แผ่น "บ้านน้ำดิบ"

สินแร่ที่ทำการผลิต เป็นแร่เฟลด์สปาร์ที่มีสารประกอบ  $\text{Na}_2\text{O}$  สูง (เกิน 5 % และอาจสูงถึง 10%) จึงเรียกว่าแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ใช้เป็นวัสดุทำส่วนตัวภายใน (body) เครื่องเซรามิกซ์หรือเครื่องสุขภัณฑ์ สารประกอบอื่นรองลงมาที่มีผลสำคัญต่อการจัดเกรดแร่ ได้แก่  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ตามลำดับ

รูปแบบของแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในเขตประทานบัตร มี 3 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง (แหล่งแร่नाเสง) เป็นแร่เฟลด์สปาร์สะสมอยู่ใน vein ได้สายหินแกรนิตสีจาง ประเภท leucogranite เกิดสะสมในแนวรอยเลื่อนที่ตัดผ่านมวลหินแกรนิต (ดูสมมุติฐานของการเกิดในรูปที่ 8.29) พื้นที่แหล่งสะสมนี้กว้างเกิน 300 ไร่ แบบที่สอง (แหล่งแร่ร่วมเย็น) แร่เฟลด์สปาร์เกิดเป็นหินสการ์น (skarn rock) เป็นโซนที่เกิดจากกระบวนการแปรสภาพแบบสัมผัสในหินแกรนิต แบบที่สาม (แหล่งแร่บุญบันดาล) แร่เฟลด์สปาร์เกิดเป็นทั้งหินสการ์นและสายหินลูโคแกรนิต

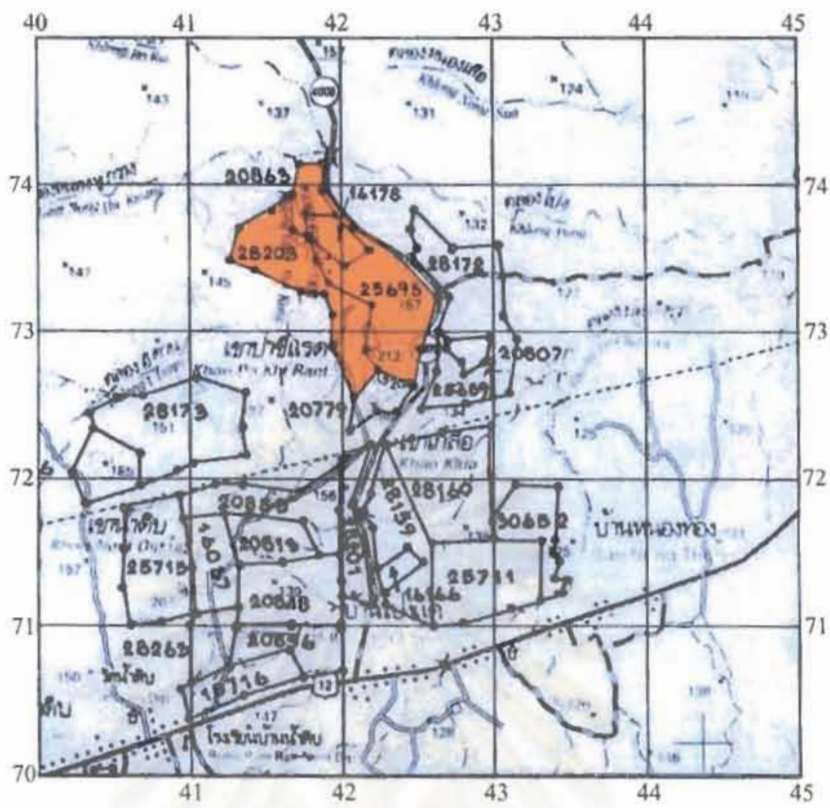
แหล่งแร่नाเสง เป็นแหล่งที่ให้ผลผลิตของสินแร่เฟลด์สปาร์มากที่สุด ส่วนแหล่งแร่อื่นเป็นแหล่งแร่สำรองที่จะทำการผลิตเมื่อมีความต้องการของตลาด

#### 2. การพัฒนาเหมืองแร่เฟลด์สปาร์

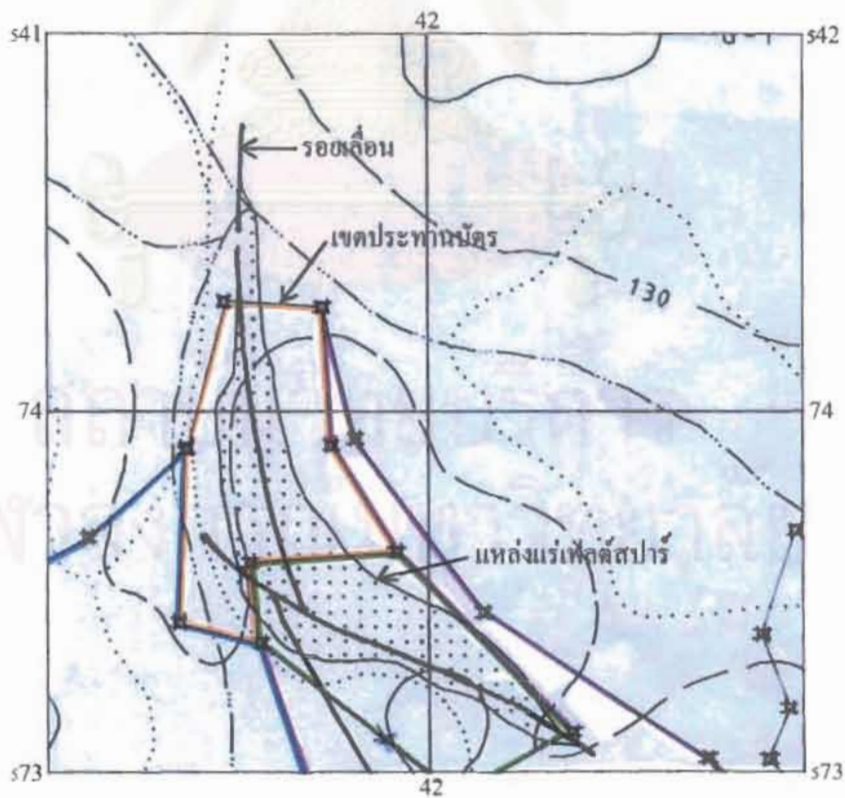
การเกิดของแร่เฟลด์สปาร์ มักพบในผนังหิน (dike) ที่แทรกตามแนวรอยเลื่อน การทำเหมืองเปิดเป็นแบบเหมืองหาบที่ใช้การเจาะระเบิดเพื่อเปิดหน้าดิน ไปยังบริเวณที่เป็นสายหินลูโคแกรนิต ความกว้างของสายหินระหว่าง 50-100 เมตร และมีมุมปลั่ง (plunge angle) ค่อนข้างชัน แนวโน้มของสายหินลูโคแกรนิตจะลึกลงจากระดับพื้นผิวดินเป็นร้อยเมตรขึ้นไปจึงต้องเปิดบ่อเหมืองให้เป็นวงรีกว้างหลายสิบไร่เพื่อผลิตแร่ที่ยังเหลืออีกประมาณ 2 ล้านเมตริกตัน (จากการคาดการณ์) ภายหลังระเบิดแล้วมีการขนตักลำเลียงสินแร่ไปยังลานสตั๊กแร่เพื่อบดย่อยให้ได้ขนาด 5 มม. และแยกเกรดตามคุณสมบัติเชิงเคมี



รูปที่ 8.27 ภาพถ่ายมุมกว้างของแหล่งน้ำแสงของเหมืองแร่เฟลด์สปาร์ บริษัท พิพัฒนา จำกัด



รูปที่ 8.28 ขอบเขตประทานบัตรเหมืองแร่เฟลด์สปาร์ในแผนที่ภูมิประเทศ  
มาตราส่วน 1:50,000 ระวัง 4842 I แผ่นบ้านน้ำดิบ



รูปที่ 8.29 สมมุติฐานการเกิดของแร่เฟลด์สปาร์ในแหล่งน้ำแสง จากแผนที่เหมือง  
ที่ปรับเป็นมาตราส่วน 1:10,000 (อิงเลขพิกัดจากแผนที่ 1:50,000)



แร่เฟลด์สปาร์เกรดสูงมักมีเปอร์เซ็นต์  $\text{Na}_2\text{O}$  สูงระหว่าง 9-10% มี  $\text{K}_2\text{O}$  ต่ำกว่า 0.5% และมีเปอร์เซ็นต์  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ต่ำกว่า 1% ส่วน  $\text{SiO}_2$  ไม่เกิน 70% คุณสมบัติเชิงเคมีของแร่ดังกล่าวจัดเป็นประเภทสินแร่เกรดสูง คุณภาพดีถึงดีมาก ราคาซื้อขายจะสูงสุดสำหรับสินแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ประมาณ 800-1,200 บาท/เมตริกตัน ขึ้นอยู่กับความต้องการของโรงงานเซรามิกซ์หรือโรงงานผลิตเครื่องสุขภัณฑ์

ในส่วนของสินแร่เฟลด์สปาร์เกรดต่ำจะมีค่าเปอร์เซ็นต์  $\text{Na}_2\text{O}$  ต่ำประมาณ 5-8% และค่าเปอร์เซ็นต์  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จะสูงเกินกว่า 0.5% และ 1% ตามลำดับ แร่เฟลด์สปาร์ประเภทนี้จัดเป็นสินแร่เกรดต่ำ นอกจากราคาซื้อขายค่อนข้างต่ำกว่าประเภทเกรดดี ประมาณ 20-30% แล้ว ตลาดยังไม่ค่อยมีความต้องการอีกด้วย เหมือนจึงนำมาผสมกับสินแร่เกรดดีเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้สูงขึ้นกว่าเดิม ก่อนนำไปบดขยี้ให้ได้ขนาดกับการนำไปใช้งาน

เครื่องจักรกลที่ใช้ในเมืองเป็นเครื่องเจาะหลุมระเบิด รถตักเสียด้านหน้ารถชุดแบบแบ็คโฮและรถบรรทุกแบบเทท้าย การเจาะระเบิดใช้แพตเทิร์นปกติที่มีการระเบิดพร้อมกันทีเดียวในแถว ปริมาณของหินปนแร่ในแต่ละครั้งที่มีการระเบิดประมาณ 3,000 เมตริกตัน เส้นผ่านศูนย์กลางก้อนแร่ภายหลังการระเบิด มีขนาด 80% น้อยกว่า 0.75 เมตร ( $D_{80}$ ) แต่ส่วนที่เป็นหินแกรนิตจะมีขนาด 80% น้อยกว่า 1 เมตร

ในการเปิดหน้างานของส่วนที่เป็นมวลดินปนหิน พบว่า อัตราส่วนของ waste/ore ค่อนข้างสูงตั้งแต่ 8:1 ถึง 10:1 ค่าใช้จ่ายในการขนย้ายลำเลียงจะสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิด เพราะโรงบดขยี้แร่ตั้งอยู่ในบริเวณสำนักงานของเหมือง ค่อนข้างไกลจากบ่อเหมือง คำนวณเป็นระยะทางได้ประมาณ 6 กิโลเมตร แต่ในกรณีของโรงบดขยี้หินนั้นตั้งอยู่ในเขตประทานบัตรของเหมือง มีระยะทางขนส่งใกล้กว่าเพียง 2 กิโลเมตร เท่านั้น

สัดส่วนค่าใช้จ่ายของการผลิตแร่เฟลด์สปาร์ มีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนการขนตักลำเลียงสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด (รวมถึงค่าใช้จ่ายการบดขยี้ครั้งแรก) ประมาณการตัวเลขของการผลิตยังไม่สามารถสรุปได้ในขณะนี้เพราะยังอยู่ระหว่างการรวบรวมข้อมูลภาคสนาม แต่ทีมงานวิจัยคาดว่าจะสูงกว่าค่าที่ระบุในตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตหินของเหมืองขนาดเล็กถึงปานกลาง (ตารางที่ 8.4 บทนี้) ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าใช้จ่ายสุทธิโดยรวมหลังผ่านกระบวนการบดขยี้ให้ได้ขนาดเล็กอาจสูงถึง 80-100 บาท/เมตริกตันของแร่เฟลด์สปาร์

### 3. ข้อคิดเห็นและเสนอแนะในการหาขอบบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด

ระบบการจัดการของเหมืองเปิดบริษัท พิพัฒน์กร จำกัด เป็นองค์กรที่กำหนดให้กิจกรรมการผลิตแร่ควบคุมโดยสำนักงานส่วนเหมือง (จังหวัดตาก) ส่วนการทำสัญญาและติด



ต่อข้อขยายควบคุมโดยสำนักงานใหญ่ (กรุงเทพมหานคร) ข้อมูลของทีมงานวิจัยได้รับจากส่วนเหมืองทั้งหมด แนวคิดเกี่ยวกับการออกแบบหาขีดจำกัดของขอบบ่อเหมืองเปิด มีดังนี้

ก) ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ผลลัพธ์

การคำนวณหาจุดคุ้มทุนของการผลิตแร่โดยอิงค่าอัตราส่วนการขุดเจาะ ที่กำหนดเป็นค่า stripping ratio ยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแปรเดียวในการใช้ตัดสินใจได้เพราะลักษณะธรณีวิทยาหน้าเหมืองของบางแหล่งไม่เหมาะสมกับวิธีการคำนวณแบบนี้ เช่น แหล่งแร่รวมเยนที่มีลักษณะการกำเนิดเป็นโซนแร่ตามแนวแปรสัณฐาน การทำเหมืองของแหล่งนี้ควรเป็นแบบเลือกขุดเจาะเฉพาะแหล่งในโซน หรือเป็นแบบ selective mining

แนวทางการคำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการผลิตของเหมืองนี้ จำเป็นต้องใช้ผลรวมค่าใช้จ่ายของการผลิต (รายจ่าย) และผลรวมราคาแร่ที่ผลิตได้ (รายรับ) ของแต่ละเดือน (หรือสัปดาห์) แล้วประเมินเป็นผลกำไรหรือขาดทุนของแต่ละช่วง แต่การคำนวณแบบนี้ไม่สามารถแยกเป็นรายการย่อยได้ชัดเจน เช่น ระบุเป็นค่าเจาะหลุมระเบิดกับค่าวัสดุระเบิดที่ใช้เพื่อให้ได้แร่หนัก 1 เมตริกตัน เป็นต้น

ถ้าจะออกแบบการขุดเจาะโดยใช้บล็อกเมตริกซ์ ก็ยังขาดข้อมูลเข้าที่เป็นตัวแปรสำคัญ บางตัว ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะว่า ควรสร้างแบบจำลองของสายหินลูโคแกรนิตขึ้นมาในแนวตัดขวางแนวหนึ่ง และกำหนดจำนวนเงินรับทั้งหมด (revenue) ของแต่ละบล็อกตามตัวเลขที่ตั้งขึ้นมาเป็นเลขฐาน ตัวอย่างเช่น ตัวเลขของราคาขายสินแร่ในบล็อก (ที่สมมุติขึ้นมา) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงราคาสินแร่ เหมืองก็สามารถปรับแต่งและคำนวณซ้ำใหม่เพื่อหาจำนวนเงินรับที่เหมาะสมของแต่ละบล็อก

เมื่อต้องการหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของแต่ละบล็อก ก็ต้องกำหนดเวลาที่ใช้ในการขุดเจาะ โดยอาศัยบุคลากรกับเครื่องจักรกลของเหมืองในสภาวะปัจจุบัน ซึ่งทางเหมืองต้องเป็นผู้ป้อนข้อมูลเข้าที่ตัวแปรค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อระยะเวลา (เดือนหรือสัปดาห์) เพื่อตรวจสอบความคุ้มทุนของแต่ละบล็อก

ข) ทางเลือกอื่นเพื่อหาความเหมาะสมในการเปิดเหมือง

ตามปกติการวิเคราะห์หาความเหมาะสมของการเปิดขอบบ่อเหมือง ขึ้นอยู่กับการพัฒนาในส่วนที่เป็น waste กับ ore ให้มีสัดส่วนที่ได้ค่ามูลค่าปัจจุบันสูงสุด (ค่า NPV สูงสุด) สำหรับเหมืองแร่เฟลด์สปาร์นี้ ส่วนที่เป็นกากและถูกนำไปกองทิ้งในลานหินนอกบ่อเหมือง ได้แก่ หินแกรนิตสีจาง หินประเภทนี้เป็นมวลหินอัคนีที่เย็นตัวช้าภายใต้เปลือกโลกมีเนื้อหินเกาะติดกันระหว่างผลึกแร่แน่น แร่ประกอบหิน นอกจากเป็น แร่ควอร์ตซ์กับแร่เฟลด์สปาร์แล้ว ยังพบแร่ไมกาปะปนด้วย

ถ้าหากทางเหมืองสามารถนำหินแกรนิตสีจางมาใช้เป็นหินก่อสร้าง โดยทำหินปูพื้นทางของถนนหลวง เช่น นำหินแกรนิตที่ย่อยได้ขนาดทำเป็นโครงสร้าง base หรือ subgrade ของถนนหลักที่มีการจราจรหนาแน่น ความคงทนของถนนที่มีหินรองพื้นเป็นหินแกรนิตย่อมสูงกว่าหินปูน ประกอบกับพื้นผิวของก้อนหินแกรนิตมีความขรุขระสูงกว่าหินปูน มีการไถลื่นของล้อยางรถยนต์ในระยะที่สั้นกว่าพื้นผิวถนนหินปูน ดังนั้นถ้าหากมีการทดสอบหินจนเป็นยอมรับของกรมทางหลวง หรือกรมโยธาธิการ และมีการนำหินแกรนิตสีจางไปใช้ในถนนหลวงจะทำให้ส่วนที่ถูกทิ้งเป็นกากในบ่อเหมืองมีคุณค่าทันที เพราะสามารถซื้อขายได้ สมมุติฐานของการคำนวณจะแปรเปลี่ยนไป บล็อกหลายบล็อกที่เคยประมาณค่าเป็นศูนย์หรือติดลบ (รายจ่าย) จะกลายเป็นบล็อกที่เป็นเลขบวก (รายรับ) ทำให้ค่ามูลค่าปัจจุบันของบล็อกสูงขึ้น ผลกำไรของเหมืองจะสูงขึ้น แนวขอบเขตเดิมของบ่อเหมืองสามารถขยายได้ขอบบ่อเหมืองกว้างขึ้น

แนวคิดเรื่องหินแกรนิตดังที่ระบุข้างบนนี้ คงไม่สามารถใช้ได้กับการทำเหมืองหินปกติ เพราะค่าใช้จ่ายในการผลิตหินแกรนิตอย่างเดียว อาจไม่คุ้มทุนกับราคาที่ซื้อขายในปัจจุบันที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 80 - 100 บาทต่อเมตริกตันของหินย่อย (เบอร์ 1) แต่ถ้ามีการผลิตสินแร่เฟลด์สปาร์ด้วย และขอบผนังเหมืองที่จำเป็นต้องระเบิดเปิดหน้าหินแกรนิตออกจะทำให้หินส่วนนี้มีคุณค่าแทนที่จะถูกทิ้งเป็นกากหรือส่วนที่ไม่ต้องการ

#### 8.3.4.2 เหมืองแร่ยิปซัม บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

ปัจจุบันเหมืองแร่ยิปซัมของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) มีสำนักงานเหมืองตั้งอยู่ที่ ตำบลวังจี้ว ถึงอำเภอคงเจริญ จังหวัดพิจิตร และยังมีสำนักงานใหญ่ที่อยู่ในเครือของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด เลขที่ 1 ถนนปูนซิเมนต์ไทย เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

##### 1. ธรณีวิทยาแหล่งแร่

แหล่งแร่ยิปซัมของเหมืองนี้ (รูปที่ 8.30) มีลักษณะทางธรณีวิทยาคล้ายคลึงกับแหล่งแร่ยิปซัมอีกแหล่งหนึ่งที่อยู่ห่างประมาณ 20 กิโลเมตร (ในเขตอำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์) ขอบเขตประทานบัตรของแหล่งแร่ยิปซัมที่จังหวัดพิจิตร (รูปที่ 8.31) แสดงไว้บนแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร มาตรฐาน 1:50,000 ราว 5140 IV มีเนื้อที่เกือบ 300 ไร่ และเป็นเหมืองยิปซัมแห่งแรกของประเทศ มีการเปิดทำเหมืองครั้งแรก ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2499



รูปที่ 8.30 ภาพถ่ายมุมกว้างของแหล่งแร่ิปซัมของเหมืองแร่ิปซัม บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

สถาบันวิศวกรรม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะทางธรณีวิทยาของการกำเนิดแร่ยิปซัม (gypsum) ที่อิงตามแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี มาตราส่วน 1:250,000 ระบุว่า ND 47-4 แหล่งสะสมแร่เกิดจากการตกผลึกจากสารละลาย ในช่วงยุค Carboniferous – Permian การวางตัวของสายแร่มีการแผ่กระจายเป็นชั้นยิปซัม ความหนา ตั้งแต่ 5 - 25 เมตร ค่าความชันของสายแร่มีมุมเอียงเทไม่แน่นอน ทั้งนี้บริเวณผิวบนของชั้นแร่ยิปซัมที่ส่วนใหญ่เป็นมวลดินมีการผูกพันค่อนข้างสูง ส่วนชั้นหินที่รองรับชั้นแร่ยิปซัมเป็นหินตะกอนที่เรียกว่าแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ที่มีความหนาของชั้นแอนไฮไดรต์มากกว่า 10 เมตร

## 2. การพัฒนาเหมืองแร่ยิปซัม จังหวัดพิจิตร

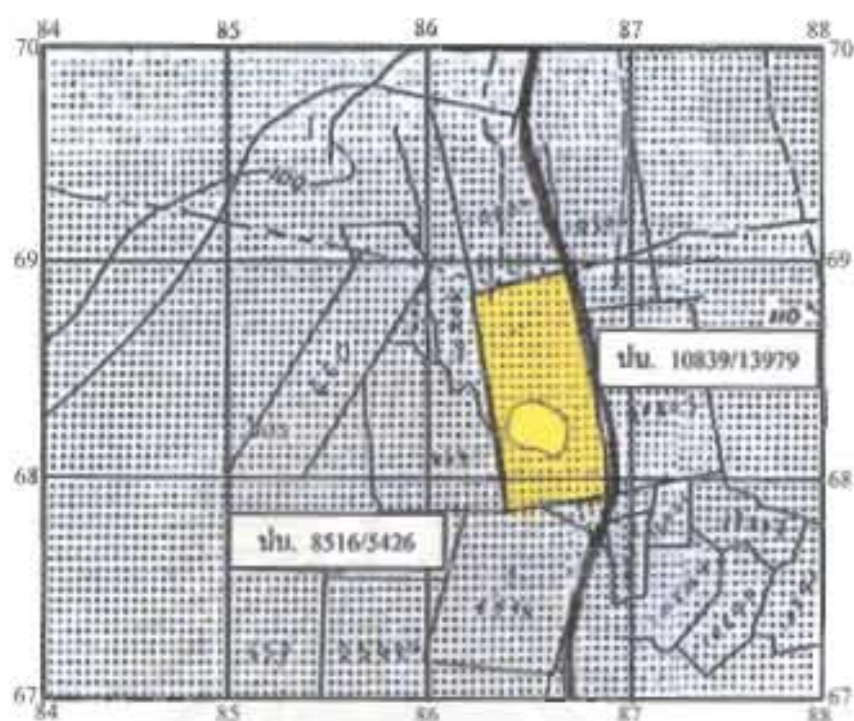
จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจและการแปลความหมายทางธรณีวิทยา คาดว่าจะมีปริมาณสำรองของแร่ยิปซัมในแหล่งสะสมนี้อีกประมาณ 2.5 ล้านตัน ซึ่งถ้าหากใช้เครื่องจักรกลที่มีอยู่ในเหมืองอย่างเต็มสมรรถนะ อายุของเหมืองควรเหลืออีกประมาณ 4-6 ปี

ขั้นตอนการทำเหมืองเปิดเป็นการขุดเจาะที่ใช้วัตถุระเบิด และทุกขั้นตอนเป็นการจ้างเหมาให้ผู้รับเหมาทำการระเบิดและตักขน ตามแผนผังการทำเหมืองที่แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ไว้ในรูปที่ 8.32 แสดงขั้นตอนลำดับแรกเป็นการเจาะสำรวจเพื่อทำเหมือง และลำดับขั้นตอนถัดมาเป็นการเปิดหน้าดิน จนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่เป็นการจัดส่ง

ลำดับแรกของการทำเหมือง เป็นการเจาะสำรวจเพื่อหาข้อมูลด้านปริมาณและคุณภาพของแร่ยิปซัม รวมทั้งดูความต่อเนื่องของสายแร่ ปกติเว้นระยะห่างระหว่างหลุมเจาะประมาณ 40 เมตร ความลึกของหลุมเจาะ 30 เมตร

การเปิดหน้าดินเป็นขั้นตอนถัดมาในการทำเหมือง หน่วยงานขุดเจาะถูกตัดเป็นบล็อกโดยใช้รถแบ็คโฮแล้วใช้รถบรรทุกเทเท้ายาไปถมกลับในบ่อเหมือง หรือบางส่วนถูกนำมาถมไว้บริเวณห่อมดินก่อนทำการเจาะหลุมระเบิด อาจมีโขดดินหรือ โขดแร่ยิปซัมบางส่วนที่ทำให้ผิวพื้นด้านบนขรุขระเป็นตะปุ่มตะป่ำ จึงต้องใช้เครื่องเจียร (surface cutter) ปรับพื้นผิวจนเรียบพอที่จะให้เครื่องเจาะเข้ามาทำงานได้ แร่ยิปซัมในส่วนที่ถูกเจียรนี้จะมีลักษณะเป็นผง เนื่องจากความละเอียดของเม็ดแร่เพียงพอต่อข้อกำหนดของโรงงาน จึงไม่ต้องผ่านกระบวนการบดย่อย ขนดักมากองเพื่อเตรียมส่ง โรงงานปูนซีเมนต์ต่อไป

ผังหน้าระเบิดเป็นแพตเทิร์นสลับฟันปลา (staggered pattern) รูเจาะขนาด 3 นิ้ว (76 มม.) ระยะของ เบอร์ดิน กับ สเปซซิง = 2 และ 1.5 เมตรตามลำดับ ความสูงของหน้าเหมือง 10 เมตร วัตถุระเบิดที่ใช้เป็น AN-FO มีไดนาไมต์ประเภท gelatin dynamite วางอยู่กันหลุม จุดระเบิดพร้อมกันในเวลาเดียวไม่มีการถ่วงจังหวะ ซึ่งอาจมีผลกระทบทางด้าน การสั่นสะเทือนอยู่บ้างแต่ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 8.31 ขอบเขตประทานบัตรของเมืองเรือบังที่ตำบลวังจี้ จังหวัดพิจิตร



รูปที่ 8.32 ขั้นตอนของผังการทำเหมืองเรือบังที่ตำบลวังจี้ จังหวัดพิจิตร



แร่ยิปซัมที่ผ่านการระเบิดและแตกหักมีขนาดไม่เกิน 1 เมตร จะถูกนำไปผ่านการบดย่อยในโรงโม่บดย่อย ที่ใช้เครื่องโม่ชุดแรกเป็นแบบ jaw mobile crusher ให้มีขนาดไม่เกิน 100 มม. บริเวณที่ทำการบดย่อยใกล้หน้างานระเบิด แล้วกองไว้ในลานสต็อกเพื่อเตรียมนำส่งโรงงานปูนซีเมนต์ แร่บางส่วนผ่านตะแกรงสั่น (vibrating screen) ให้มีขนาดไม่เกิน 25 มม. เพื่อใช้ในกรณีที่ทางโรงงานต้องการแร่ยิปซัมขนาดเล็กพิเศษเช่นใช้ในการทำยิปซัมบอร์ด เป็นต้น

ปริมาณที่ทางส่วนเหมืองจะสต็อกไว้ จะเพียงพอกับที่ทางโรงงานต้องการใช้เป็นระยะเวลา 1 เดือน การจัดส่งไปยังโรงงานส่วนใหญ่จะอยู่ในจังหวัดสระบุรี โดยใช้รถพ่วงกับรถกึ่งพ่วงเป็นหลัก

### 3. ข้อคิดและเสนอแนะในการหาขอบบ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด

ระบบการจัดการของเหมืองยิปซัมที่จังหวัดพิจิตรนี้ เป็นการจ้างเหมาโดยวิศวกรกับทีมงานของบริษัทเป็นผู้ควบคุมงาน ค่าใช้จ่ายในการผลิตแร่ แบ่งออกเป็นหลายรายการตามลักษณะหน้างาน ตั้งแต่ การเปิดหน้าดิน การปรับพื้นผิว การเจาะระเบิด การบดย่อยและขนตักแร่ยิปซัมขึ้นรถบรรทุกส่งโรงงาน การสูบน้ำออกจากบ่อเหมือง และค่าการบริหารในส่วนของเหมือง รวมค่าใช้จ่ายในการผลิต (ไม่รวมค่าขนส่งไปโรงงานที่สระบุรี) เท่ากับ 75 บาทต่อเมตริกตัน ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการเจาะระเบิดกับการบดย่อยจะใกล้เคียงกัน ประมาณ 20 บาทต่อเมตริกตัน

จากสารสนเทศที่แยกแยะแสดงไว้ในตารางที่ 8.13 มีจุดเด่นกับจุดด้อยของสภาพแหล่งสะสมสินแร่ยิปซัม ดังนี้

1) ลักษณะเด่นที่เอื้ออำนวยต่อการทำเหมือง คือ สภาพธรณีวิทยา ความหนาของชั้นเปลือกดิน และคุณภาพแร่

การวางแผนผลิตสินแร่บริเวณนี้ค่อนข้างง่าย แนวสายแร่ที่เป็นชั้นยิปซัมมีความหนาสม่ำเสมอ และวางตัวค่อนข้างราบ ชั้นเปลือกดินมีความหนาแค่ 6 เมตรซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการเปิดหน้าดินน้อย คุณภาพของสินแร่ในแหล่งสะสมนี้ค่อนข้างคงที่และมีสารประกอบของ  $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  เฉลี่ยที่ค่า 97 %

2) ลักษณะด้อยที่เป็นอุปสรรคต่อการทำเหมือง คือ ระบบการจ้างเหมา พื้นที่บ่อเหมืองกับรูปแบบการระเบิดกับอายุการทำงานของเครื่องจักรกล กับความต้องการของโรงงานต่อแร่ยิปซัม

ตารางที่ 8.13 ข้อมูลสภาพทั่วไปกับข้อมูลด้านการผลิตของเหมืองยิปซัม

<b>1. ข้อมูลสภาพทั่วไปของเหมือง</b>		
- พื้นที่ประทานบัตร	298-2-28	ไร่
- พื้นที่บ่อเหมือง	110	ไร่
- พื้นที่หน้างานผลิต	10-2-00	ไร่
- ความหนาของชั้นเปลือกดิน	6	เมตร
- ความหนาชั้นแร่ยิปซัม	24	เมตร
- ความลึกบ่อเหมืองโดยรวม	30	เมตร
<b>2. ข้อมูลด้านการผลิต</b>		
- กำลังการผลิต (full capacity)	564,000	ตัน/ปี
- ปริมาณสำรองคงเหลือ	2.5	ล้านตัน
- อายุเหมืองโดยประมาณ	4-6	ปี
- ชั่วโมงการทำงาน	8	ชั่วโมง/วัน

การปรับปรุงกระบวนการผลิตในบางกรณีอาจมีความขัดแย้งกับสัญญาที่ทางเหมืองได้ทำกับผู้รับเหมา จึงเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งในด้านการบริหารและควบคุมการผลิต ในสภาวะปัจจุบันพื้นที่บ่อเหมืองมีถึง 100 กว่าไร่ ค่อนข้างกว้างเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้างานผลิตแร่ (10 ไร่) ที่มีขนาดเล็กเพียง 10 % ของบ่อเหมือง เมื่อฝนตกจะมีจุดรับน้ำมาก จึงเสียดำใช้จ่ายในการสูบน้ำออกจากบ่อเหมืองสูง

เครื่องจักรกลที่ใช้ในปัจจุบันมีอายุการใช้งานมานานพอสมควร (เกิน 5 ปี) ในบางครั้งก็เสียในระหว่างการทำงาน และการวางแผนเทิร์นของการระเบิดเป็นแบบจุดระเบิดพร้อมกันทีเดียว ถ้าต้องการให้ได้ขนาดพอเหมาะกับการบดย่อยจะต้องลดระยะของพื้นที่หน้าตัดที่จะทำการระเบิดแคบลง จำนวนหลุมเจาะโดยรวมจะเพิ่มขึ้น

การทำการผลิตแร่ในเหมือง เป็นไปตามความต้องการของโรงงานซึ่งคล้ายคลึงกับการผลิตแร่ของเหมืองอื่นที่พึ่งพิงกับความต้องการของตลาด ในบางช่วงของระยะเวลา ปริมาณความต้องการลดลง ย่อมมีผลต่อการจัดการเพื่อให้เครื่องจักรกลในเหมืองได้ใช้งานตลอดเวลา

แนวคิดที่ทางวิศวกรประจำเหมืองและทีมงานวิจัยมีความเห็นสอดคล้องกัน ในการปรับปรุงแผนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงกว่านี้ ได้แก่ ตลาดของแร่ยิปซัมควรมีการระบุความต้องการเป็นระยะยาว (หลายเดือนหรือเป็นปี) เพื่อป้องกันความแปรปรวนในเรื่องการใช้งาน

เครื่องจักรกล การเจาะระเบิดควรเน้นให้มีการใช้แก๊ปไฟฟ้าถ่วงจังหวะ เพื่อให้สามารถเพิ่มระยะของเบอร์คอนกับระยะของสเปซซิงให้กว้างขึ้น การเจาะหลุมกับการใช้วัตถุระเบิดจะลดลงช่วยลดต้นทุนในการผลิตลง

แนวคิดอีกอย่างหนึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนหน้างานผลิตแร่ อาจทำการปรับให้ความสูงของชั้นตะพัก (bench) ให้มากขึ้น ลักษณะของการตัดตะพักในปัจจุบันมี 2 ระดับ ความกว้างของชั้นตะพักทั้งสอง เท่ากับ 20 เมตร และความสูง 10 เมตร ข้อดีของการมีหน้างานผลิตแร่สองหน้างาน (2 bench) ก่อนทำการระเบิดถ้าหากหน้างานหนึ่งมีปัญหาเรื่องคุณภาพของมวลสินแร่ก็อาจเปลี่ยนหน้างานได้ทันที แต่ข้อเสียของการมีหน้างานผลิตสองหน้าคือ ในช่วงแรกของการผลิตต้องเปิดหน้าดินที่คลุมทับสายแร่เป็นปริมาณมาก และเป็นการเพิ่มพื้นที่รับน้ำฝน เสียค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำออกจากบ่อเหมืองมาก ถ้าหากวางแผนให้การผลิตเป็นตะพักเพียง 1 ระดับ (1 bench) ความสูง 20 เมตร จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ลดน้อยลงไปมาก การจำลองแบบโดยใช้บล็อกเมทริกซ์อาจนำมาใช้ในการวางแผนล่วงหน้าสำหรับการออกแบบการทำเหมืองในขั้นตอนนี้ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 9

### บทสรุปของโครงการวิจัย

งานวิจัยโครงการนี้ ใช้ชื่อหัวข้อโครงการ “บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน” กำหนดเป้าหมายของการวิจัยเพื่อหาวิธีการออกแบบหน้างานเหมืองเปิดที่มีโครงร่างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุด และผลสำเร็จจากโครงการวิจัยนี้ สามารถเป็นแนวทางมาตรฐานที่เป็นประโยชน์กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น สถาบันการศึกษา หน่วยงานของรัฐที่ออกกฎระเบียบกับควบคุมด้านนโยบายสำหรับการผลิตแร่และหิน รวมทั้งเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการ อนึ่งถ้าหากแนวทางที่นำเสนอไว้ในผลการวิจัยยังไม่ค่อยเหมาะสม ผู้ปฏิบัติการหน้าเหมือง สามารถนำไปปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมกับชนิดของแหล่งแร่ (หิน) และสภาพทางภูมิประเทศกับสภาพทางธรณีวิทยาของเหมืองเปิดที่กำลังดำเนินการ

#### 9.1 แนวทางเบื้องต้นของการออกแบบบ่อเหมืองเปิด

หลักการเบื้องต้นของการออกแบบเหมืองเปิดมีการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 ก่อนข้างละเอียด ซึ่งเป็นการนำเสนอขั้นตอนการวางแผนก่อนทำการพัฒนาหน้าเหมืองเปิด ได้แก่ การศึกษาธรณีวิทยาของแหล่งสะสมกับการประเมินศักยภาพของแหล่งหิน (แร่) จากนั้นในช่วงการวางแผนเพิ่มเติม วิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานควรพิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญในอีกหลายด้าน ตั้งแต่ปัจจัยพื้นฐานของการเปิดเหมือง การแยกประเภทมวลสาร และปรากฏการณ์ในธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของมวลสาร ในระหว่างที่ขุดเจาะวัสดุออกจากบ่อเหมือง

การวางแผนพัฒนาบ่อเหมืองเปิดเบื้องต้น จำเป็นต้องหาความเหมาะสมของการออกแบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะของพื้นที่บ่อเหมือง เช่น ความสูงหน้างานขุดเจาะ ความลาดชันของบ่อเหมืองเปิด ระดับชั้นความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (หรือแหล่งหิน) เป็นต้น

#### 9.2 ขั้นตอนวิธีเพิ่มเติมของการออกแบบบ่อเหมืองเปิด

ขั้นตอนต่อมาของการนำเสนอของรายงานวิจัยฉบับนี้ (ซึ่งเป็นฉบับสุดท้าย) เป็นวิธีการออกแบบบ่อเหมืองเปิด มีการนำเสนอรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการประเมินหาความเหมาะสม

ของเหมืองเปิด (บทที่ 4) และขั้นตอนวิธีการออกแบบภาคสนามเพื่อกำหนดโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิด (บทที่ 5-7)

การประเมินความเหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นของการพัฒนาหน้าเหมือง ทั้งนี้เพื่อหาค่าโอกาสของความเป็นไปได้ที่จะดำเนินการเปิดเหมืองให้ได้ต่อเนื่องจนตลอดอายุของโครงการ เภณท์ที่ใช้ประเมินความเหมาะสม แบ่งออกเป็น 4 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ การใช้ธรณีสถิติหาค่าความสมบูรณ์ของแหล่งแร่ (หิน) การจัดระบบและลำดับการผลิต การจัดการเพื่อให้มีการใช้เครื่องจักรกลและอุปกรณ์ในสภาวะสูงสุด และเกณฑ์การประเมินสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์หาความเหมาะสมเชิงการลงทุน

เทคนิคของการออกแบบหาโครงร่างของบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด มีการนำเสนอขั้นตอนไว้ 2 แนวทาง ได้แก่ วิธีการออกแบบด้วยมือ กับการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้รูปแบบหน้างานที่เหมาะสมกับกระบวนการพัฒนาหน้างานเหมืองเปิดที่สุด และส่งผลให้การผลิตแร่ (หิน) มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเป็นการเสนอแนวทางของการปฏิบัติงานที่ให้ผลตอบแทนเป็นจำนวนเงินรับสุทธิของบ่อเหมืองปัจจุบัน ที่มีค่าสูงสุด

กรณีศึกษาที่มีการนำเสนอในบทที่ 8 มีการแยกตามประเภทของเหมือง ระหว่างเหมืองหินกับเหมืองแร่ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพธรณีวิทยาของเหมืองร่วมกับเป้าหมายของการผลิต ทั้งนี้มีการอิงต้นแบบของกรณีศึกษาเหมืองเปิดต่างประเทศ

ผลสรุปสุดท้ายของโครงการวิจัย ที่ระบุเป็นหัวข้อ 9.3 เป็นการเสนอแนวทางที่มีความเป็นไปได้ในการวางแผนเพื่อเปิดเหมือง ในกรณีที่เหมืองหิน (เหมืองแร่) ในบริเวณแหล่งสะสมนั้น ยังไม่มีการออกแบบ โครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด

### 9.3 แนวทางมาตรฐานของการออกแบบโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิด

การนำเสนอแนวทางการออกแบบโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดต่อไปนี้ แยกอธิบายเป็น 2 หัวข้อย่อย ขั้นตอนแรกเป็นการออกแบบ โครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดโดยภาพรวมสำหรับเหมืองที่มีการผลิตหินไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทำซีเมนต์ หรือเหมืองที่มีการผลิตหินย่อยใช้ใน งานก่อสร้าง และเหมืองแร่ที่มีลักษณะมวลสินแร่วางตัวในแนวราบ หรือเกือบอยู่ในระดับราบ และเป็นชั้นหนาต่อเนื่องกันตลอดบริเวณ (เช่น แร่ลิกไนต์) กับขั้นตอนที่สองเป็นการออกแบบโครงร่างขอบบ่อที่จัดเป็นกรณีเฉพาะ อันเป็นผลมาจากความแตกต่างในเรื่องธรณีวิทยาของหน้าเหมืองกับมวลสินแร่ที่มีการวางตัวในหลายรูปแบบ และการประเมินผลการตัดความลาดเชิงเสถียรภาพที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐศาสตร์ของการทุน



### 9.3.1 การออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมืองเปิดโดยภาพรวม

แนวทางการออกแบบ โดยภาพรวมสำหรับเหมืองเปิดที่มีการผลิตหินไปใช้ในการทำซีเมนต์หรือในงานก่อสร้าง กับการผลิตแร่ที่มวลสินแร่วางตัวในแนวค่อนข้างราบ มีดังต่อไปนี้

1. ทำการวางแผนเพื่อออกแบบเบื้องต้น ตามผลสรุปหัวข้อ 9.1 ของบทนี้ ในส่วนที่เป็นงานเพิ่มเติมอาจเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการขยายมาตราส่วน เช่นขยายแผนที่ภูมิประเทศเดิม จากมาตราส่วน 1: 50,000 ถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นจนได้ขนาดมาตราส่วนเหมาะสมกับขนาดของหน้าเหมืองหิน หรือมีการเสริมหลุมเจาะสำรวจเพื่อหาความสมบูรณ์ของแหล่งหิน กับการระบุตำแหน่งหรือกำหนดค่าการวางตัวของระนาบความไม่ต่อเนื่องในมวลหินภายในบ่อเหมือง

2. ทำการประเมินหาความเหมาะสมในหลายแนวทาง ทั้งทางด้านการผลิตกับความสัมพันธ์ของแหล่ง การลำดับงานบางส่วนควรมีการประเมินก่อนทำการผลิต ในช่วงที่มีการผลิตและก่อนปิดบ่อเหมือง ตามแนวทางที่เป็นผลสรุปในหัวข้อ 9.2

3. ทำการออกแบบด้วยมือหรือด้วยคอมพิวเตอร์ รวมทั้งมีการกำหนดเงื่อนไขบังคับในการพัฒนาหน้าเหมืองสำหรับแต่ละขั้นตอนวิธี จนได้ผลลัพธ์ที่เป็น final pit layout

ตัวอย่างเพิ่มเติมของการออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมือง ที่แสดงการลำดับขั้นตอนของการวางแผนเพื่อนำไปใช้กับการพัฒนาเหมืองเปิดในประเทศ เป็นการวางแผนจัดการเหมืองหินปูนในประเทศเยอรมัน (Huang, 1993) เหมืองนี้ต้องการออกแบบเปิดบ่อเหมืองภายในช่วงเวลา 5 คาบ (6 bench) พร้อมกับมีการวางแผนเพื่อควบคุมคุณภาพสารประกอบในหินปูนที่ผลิตก่อนนำส่งไปใช้ในโรงถลุงโลหะ

ตารางที่ 9.1 หน้าถัดไป (พิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ) แสดงถึงข้อมูลเบื้องต้นของการวางแผนการจัดลำดับการทำเหมือง (mining sequences) และออกแบบเปิดหน้าเหมืองโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น (linear programming, LP) คอลัมน์ที่ 1 เป็นค่าธาตุกับสารประกอบหลักที่ต้องการทำการควบคุมคุณภาพ ในมวลหินปูนที่ทำการผลิตมีการควบคุมคุณภาพสาร 4 ตัวแปรหลัก ได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , S, P คอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าตัวเลขเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบ (จาก 100 %) และธาตุ (ถ้าตัวเลขต่ำกว่า 1/100 เปอร์เซ็นต์) คอลัมน์ที่ 3 และ 4 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าเกรดเฉลี่ย (average grade) ในบ่อเหมือง กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, S.D.) โดยกำหนดให้ตัวแปรมีการแจกแจงค่าแบบปกติ ตามลำดับ คอลัมน์ที่ 5, 6, 7 เป็นค่าตัวแปรเสริมของเกรด (เป็นเปอร์เซ็นต์) ที่กำหนดให้มีค่าขีดจำกัดล่าง ( $G_{L,j}$  = lower limit of quality variable j) อยู่ในคอลัมน์ที่ 5 กับมีค่าขีดจำกัดบน ( $G_{U,j}$  = upper limit of quality variable j) อยู่ในคอลัมน์ที่ 7 ส่วนค่าเกรดเฉลี่ยของแต่ละตัวแปร (j) ที่ต้องทำให้ต่ำสุด ( $G_j$ ) ที่ระบุในคอลัมน์ที่ 6 มีค่าเดียวกันกับคอลัมน์ที่ 3 ที่เป็นค่าเกรดเฉลี่ยความต้องการของโรงถลุงโลหะ

ตามรูปแบบการเขียนโปรแกรมเชิงเส้นของ Shuzhang Huang ต้องกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักของตัวประกอบหลัก (weighting factor,  $W_j$ ) ในการวางแผนควบคุมคุณภาพ ตัวเลขที่เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรหลักที่ระบุไว้ในคอลัมน์ที่ 8 (ตารางที่ 9.1) ไม่ได้แสดงว่าใช้วิธีการเชิงสถิติวิธีใด เพื่อกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักดังกล่าว ตามความเข้าใจของผู้วิจัยคาดว่าค่าเกรดของสารที่เป็นอันตรายต่อกระบวนการถลุงโลหะจะถูกกำหนดไว้สูง แต่สารที่มีผลกระทบต่อกระบวนการถลุงต่ำจะกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ต่ำ เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์ของธาตุกำมะถันและธาตุฟอสฟอรัส ที่กำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเป็น 400 และ 540 แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของสารประกอบ  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  กำหนดค่าเป็น 0.02 และ 4 ตามลำดับ

นอกจากนี้ในการวางแผนขั้นต้นที่สอดคล้องกับลักษณะของภูมิประเทศกับข้อมูลเชิงธรณีวิทยาของแหล่งหินปูนนี้ มีการกำหนดให้สินแร่ที่ผลิต (หินปูนที่ระเบิดและคำนวณเป็นบล็อกในโปรแกรม) เท่ากับ 2,800,000 ตัน [เป็นค่า  $PC_0$  หรือ tonnage of ore blocks ที่แสดงไว้ในแผนภาพเค้าร่างของระบบโปรแกรมเชิงเส้น ในรูปที่ 7.14 หน้า 145] กับค่าน้ำหนักของสินแร่กับกาก [ค่า  $C_{O+W}$  ในแผนภาพของรูปที่ 7.14] เท่ากับ 4,100,000 ตัน ส่วนค่าของตัวเลขที่เป็นองค์ประกอบในการคัดเลือก [ค่า  $f$  ในแผนภาพของรูปที่ 7.14] กำหนดให้เท่ากับ 2.5

ตารางที่ 9.1 การวางแผนเบื้องต้นสำหรับเหมืองหินปูนที่ต้องการควบคุมคุณภาพหินปูนที่ผลิตก่อนนำส่งโรงถลุงโลหะ (Shuzhang Huang, 1993)

Constituent	consumer requirement, %	ore in ultimate pit		planning parameter			Weighting factor, $W_j$
		average grade, %	standard deviation, S.D.	$G_{Lj}$	$G_j$	$G_{Uj}$	
CaO	$\geq 52.5$	54.0	1.52	53.00	54.00	54.50	0.02
$\text{SiO}_2$	$\leq 0.32$	0.262	0.12	0.20	0.262	0.300	4
S	$\leq 0.32 \times 10^{-2}$	$0.255 \times 10^{-2}$	$0.09 \times 10^{-2}$	$0.20 \times 10^{-2}$	$0.255 \times 10^{-2}$	$0.300 \times 10^{-2}$	400
P	$\leq 0.25 \times 10^{-2}$	$0.185 \times 10^{-2}$	$0.07 \times 10^{-2}$	$0.12 \times 10^{-2}$	$0.185 \times 10^{-2}$	$0.235 \times 10^{-2}$	540

$PC_0 = 2,800,000$  t;  $PC_{O+W} = 4,100,000$  t; selection factor,  $f = 2.5$ .

ผลลัพธ์จากการวางแผนขั้นต้นเป็นแนวทางพัฒนาท่าเหมืองตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด กำหนดการทำเหมืองเป็น 5 คาบเวลา ค่าตัวเลขที่แสดงไว้ในตารางที่ 9.2 เป็นค่าจำนวนน้ำหนักของสินแร่กับกาก และค่าเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบหลักในหินปูน คอลัมน์ที่ 1 เป็นระยะของช่วงคาบเวลากับค่า S.D. ของสารทั้ง 4 ที่ถูกจัดเป็นตัวแปรหลักกับใช้ในการวิเคราะห์ผล

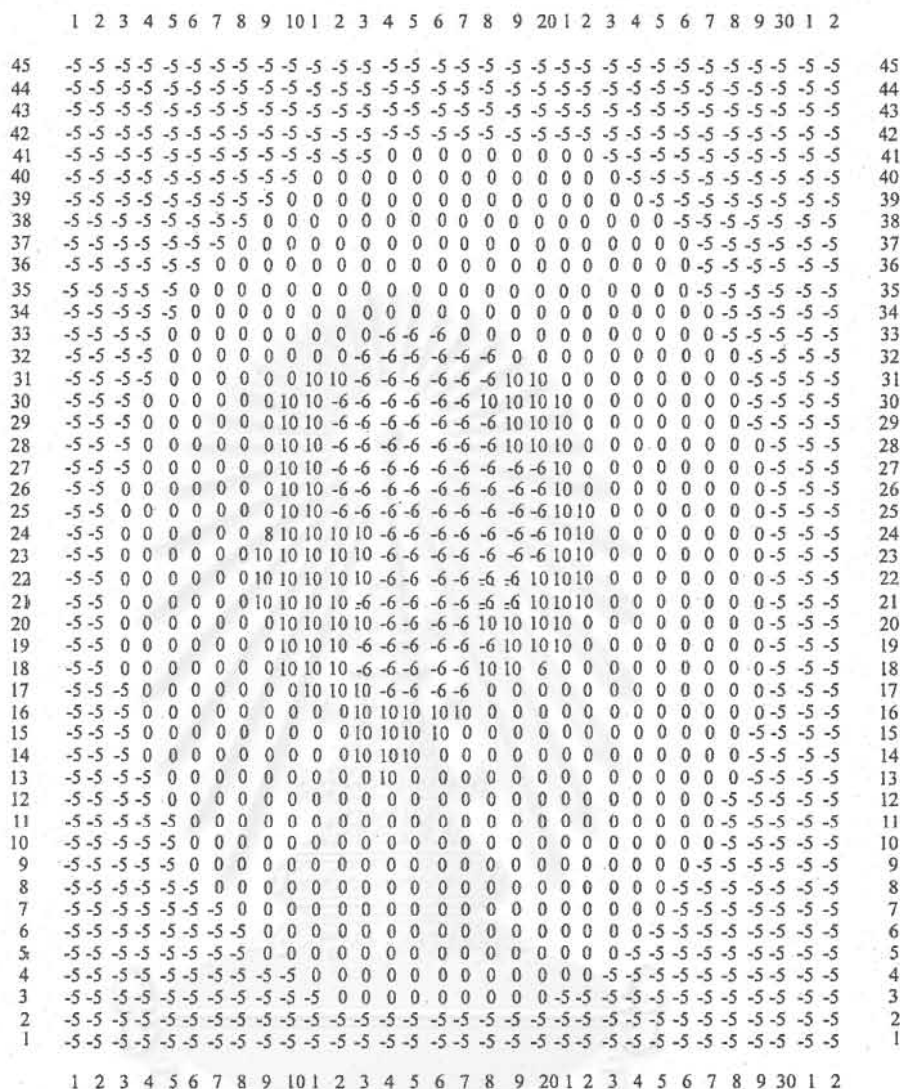
คอลัมน์ที่ 2 เป็นจำนวนน้ำหนักของบดล็อกสินแร่ที่กำหนดให้แต่ละคาบเวลาเท่ากับ 2.8 ล้านตัน คอลัมน์ที่ 3 เป็นจำนวนน้ำหนักของบดล็อกสินแร่กับกากที่กำหนดให้แต่ละคาบเวลาเท่ากับ 4.1 ล้านตัน คอลัมน์ที่ 4 และ คอลัมน์ที่ 5 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าเกรดเฉลี่ย (mean) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของสารประกอบ CaO, SiO<sub>2</sub> ที่กำหนดให้หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ คอลัมน์ที่ 6 และ 7 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าเกรดเฉลี่ยกับค่า S.D. ของธาตุ S, P ที่กำหนดให้หน่วยน้ำหนัก เป็น เปอร์เซ็นต์  $\times 10^{-2}$

ตารางที่ 9.2 ผลลัพธ์จากการวางแผนเพื่อทำเหมืองเป็น 5 คาบเวลาโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นที่เขียนโดย Shuzhang Huang (1993)

	ore, t $\times 10^6$	ore + waste, t $\times 10^6$	CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	S, % $\times 10^{-2}$	P, % $\times 10^{-2}$
period 1	2.80	4.10	53.86	0.2620	0.2550	0.1850
S.D.			1.52	0.1196	0.0911	0.0692
period 2	2.80	4.10	54.00	0.2620	0.2554	0.1850
S.D.			2.14	0.1465	0.1113	0.0717
period 3	2.80	4.10	54.00	0.2620	0.2549	0.1850
S.D.			2.37	0.1067	0.1028	0.0715
period 4	2.80	4.10	54.00	0.2620	0.2550	0.1850
S.D.			2.10	0.1136	0.1015	0.0708
period 5	2.80	4.10	54.15	0.2620	0.2523	0.1850
S.D.			1.23	0.1083	0.0949	0.0754

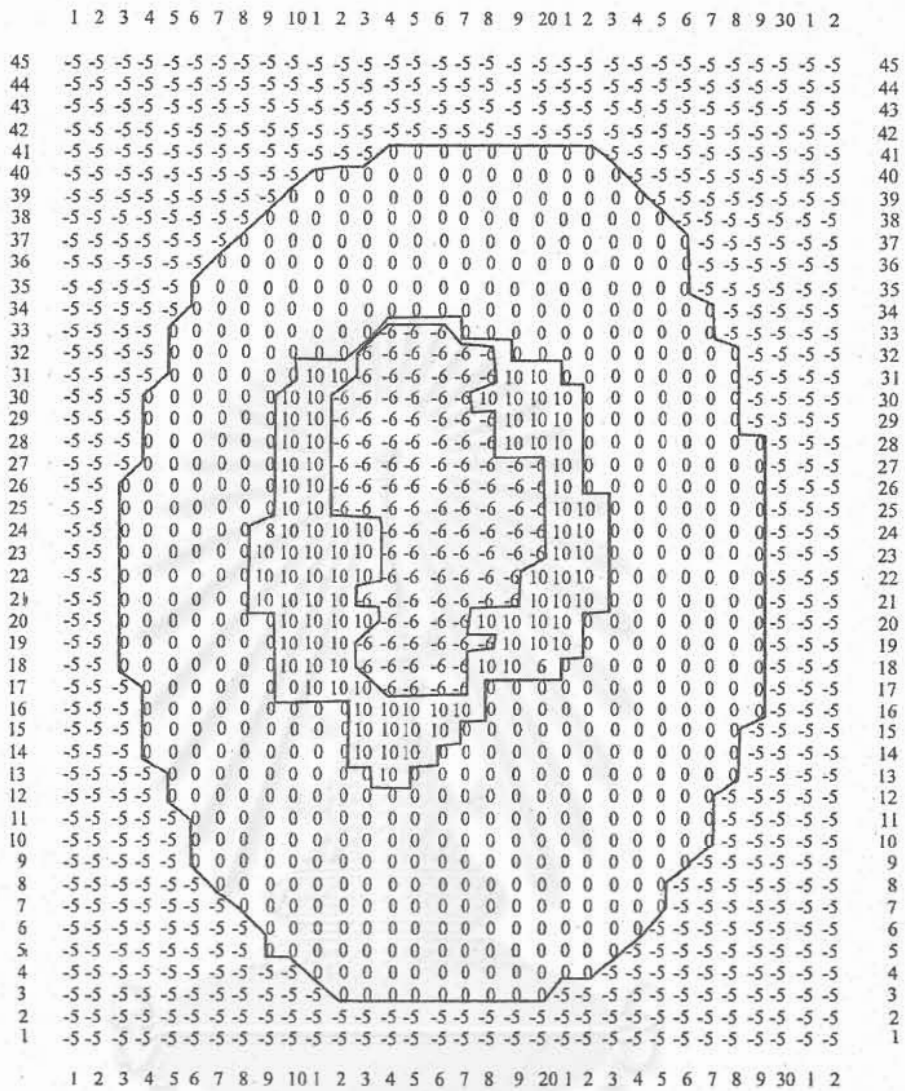
S.D. = standard deviation.

การแสดงผลลัพธ์ข้อมูลออก (output) จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้นมีการระบุไว้เป็นผังหมายเลขอารบิก ตัวอย่างผังในรูป 9.1 เป็นการวางแผนขุดเจาะบดล็อกระหว่างคาบเวลาที่ 2 (bench 3) จากรูปที่ 9.1 หมายเลข 5 เป็นบดล็อกที่อยู่นอกโครงร่างขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ส่วนหมายเลข 6 เป็นบดล็อกที่กำลังทำเหมืองและถูกขุดเจาะในช่วงคาบเวลาข้างหน้า (ที่เป็นคาบเวลาที่ 1) หมายเลข 10 เป็นบดล็อกที่ถูกขุดเจาะออกไปหมดแล้ว ส่วนหมายเลขอื่นมีความหมายเชิงระบุค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของการพัฒนาขุดเจาะบดล็อกในเหมือง หมายเลข 9 เป็นบดล็อกที่ถูกขุดเจาะออกไป 90 เปอร์เซ็นต์ หมายเลข 8 เป็นบดล็อกที่ถูกขุดเจาะออกไป 80 เปอร์เซ็นต์ และหมายเลข 0 เป็นบดล็อกที่ขุดเจาะออกไป 0 เปอร์เซ็นต์ (บดล็อกที่ไม่ได้วางแผนทำการขุดเจาะ)



No. 0 = Block will not be mined	No. 8 = Block will be 80% extracted
No. 5 = Block outside ultimate pit limit	No. 9 = Block will be 90% extracted
No. 6 = Block has been mined or selected for mining in a previous period	No. 10 = Block will be totally extracted

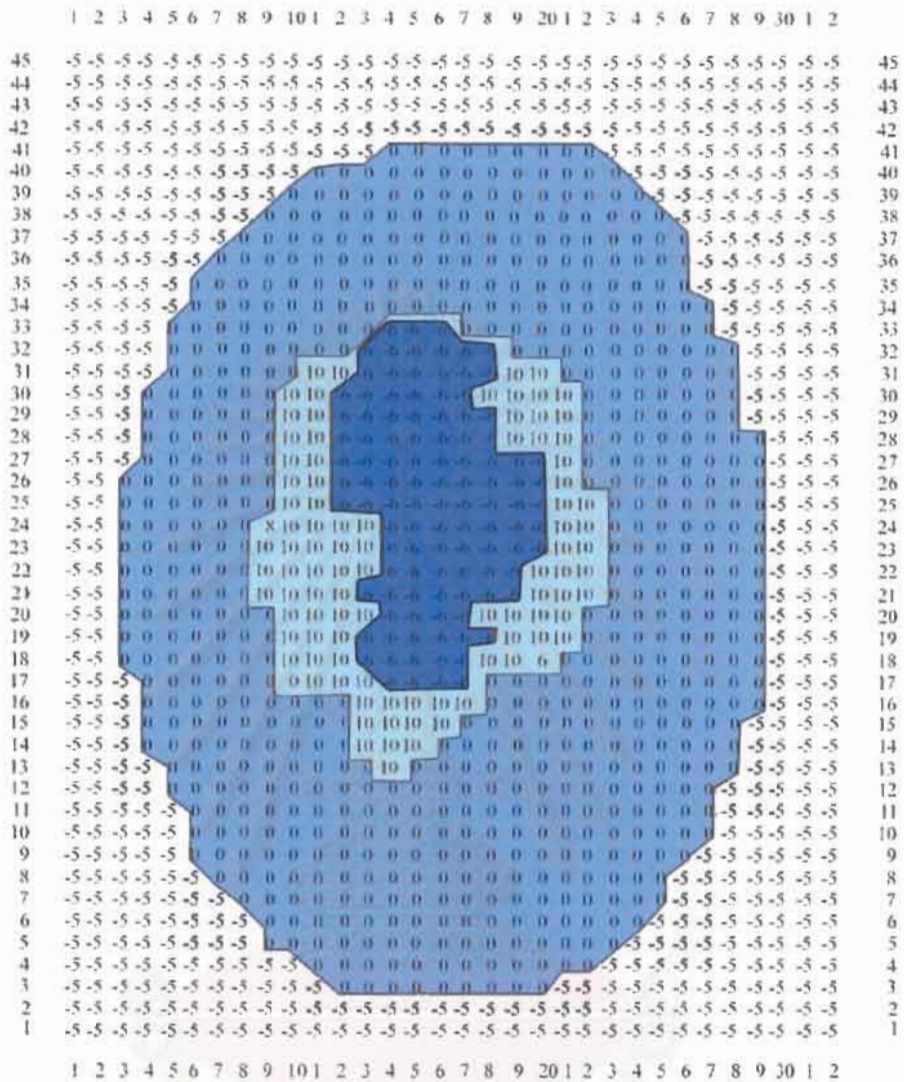
รูปที่ 9.1 ผังหน้าเหมืองที่เป็นผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้นแสดงตำแหน่งของบล็อก (เป็นตัวเลขอารบิก) ระหว่างการทำเหมืองในคาบเวลาที่ 2 ของการตัดขั้นตะพักที่ 3 เพื่อการพัฒนาเหมืองหินปูน (Shuzhang, 1993)



No. 0 = Block will not be mined	No. 8 = Block will be 80% extracted
No. 5 = Block outside ultimate pit limit	No. 9 = Block will be 90% extracted
No. 6 = Block has been mined or selected for mining in a previous period	No. 10 = Block will be totally extracted

รูปที่ 9.2 ผังหน้าเหมืองที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ถากเส้นต่อแนวโครงร่าง ขอบบ่อเหมืองเปิด แสดงบล็อกที่มีลำดับการพัฒนาต่างกัน





No. 0 = Block will not be mined	No. 8 = Block will be 80% extracted
No. 5 = Block outside ultimate pit limit	No. 9 = Block will be 90% extracted
No. 6 = Block has been mined or selected for mining in a previous period	No. 10 = Block will be totally extracted

รูปที่ 9.3 ผังหน้าเหมืองที่ผู้วิจัยโครงการนี้ ลากเส้นต่อแนวโครงร่าง ขอบบ่อเหมืองเปิด และใช้สีระบายพื้นที่ผังบล็อกหน้าเหมือง สีผังพื้นที่บล็อกที่มีลำดับการพัฒนาต่างกัน ถูกระบายสีต่างกัน

รูปที่ 9.2 เป็นการแสดงโครงร่างขอบบ่อเหมืองหินปูนที่ผู้วิจัยโครงการนี้ลากเส้นแนวโครงร่างไว้เป็นกรณีตัวอย่าง เพื่อแยกกลุ่มบล็อกต่างหมายเลขออกจากกัน รูปที่ 9.3 ผู้วิจัยได้ระบายสีแสดงพื้นที่ในบริเวณแต่ละ โครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดเพื่อสังเกตได้ง่าย

แนวทางจากกรณีตัวอย่างดังกล่าว สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางเปิดบ่อเหมืองหินหรือเหมืองแร่ที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนในประเทศได้ ทั้งนี้อาจจำเป็นต้องทำการดัดแปลงให้เหมาะสมกับสภาพของเหมืองเปิดในประเทศ ซึ่งตัวแปรหลัก ได้แก่ ขนาดของเหมืองที่ทำการพัฒนา กับสภาพธรณีวิทยาในบริเวณแหล่งหิน เช่น มวลหินมีการวางตัวในแนวระดับเดียวกันตลอด และเปอร์เซ็นต์เกรดหินในบริเวณไม่แปรผันมาก เป็นต้น

### 9.3.2 การออกแบบโครงร่างขอบบ่อเหมืองเปิดเฉพาะกรณี

แนวทางการออกแบบเฉพาะกรณีในหัวข้อนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับเหมืองหินและเหมืองแร่ที่มีรูปแบบหลากหลาย องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบ คือ ลักษณะของการวางตัวสายแร่ (vein) หรือการวางตัวของมวลสินแร่ (orebody) การออกแบบตัดความลาดหน้าเหมืองและความแปรผันของเกรดสินแร่ในบ่อเหมืองเปิด การอธิบายแนวทางการวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อย่อยต่อไป นี้มีจุดประสงค์ให้สามารถใช้เป็นแนวทางต้นแบบของเหมืองเปิดภายในประเทศ

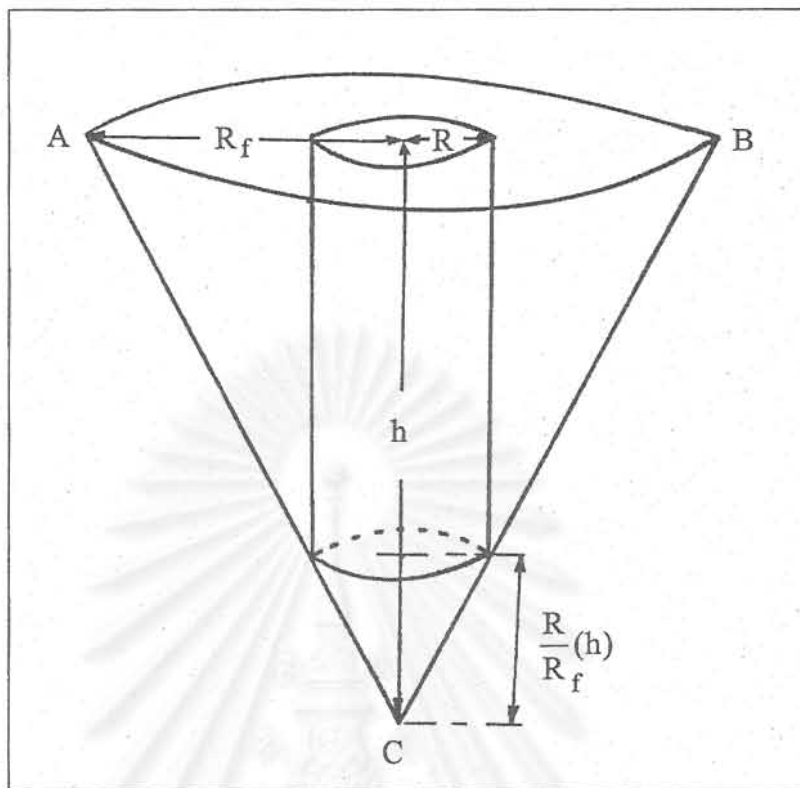
#### 9.3.2.1 การออกแบบตามลักษณะการวางตัวของมวลสินแร่

แหล่งสะสมสินแร่ (หิน) ในหลายบริเวณมีการวางตัวของสายแร่หรือมวลสินแร่ไม่ได้อยู่ในแนวระนาบราบและต่อเนื่องกันตลอดทั้งในบริเวณเขตสัมปทาน การออกแบบเฉพาะกรณีจึงจำเป็นต้องให้มีความสัมพันธ์กับสภาพการวางตัวของมวลสินแร่ในบ่อเหมืองเปิด เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะสิ่งไม่ต้องการ (กาก) ออกไปจากบริเวณบ่อเหมืองที่วางแผนเพื่อทำการพัฒนา

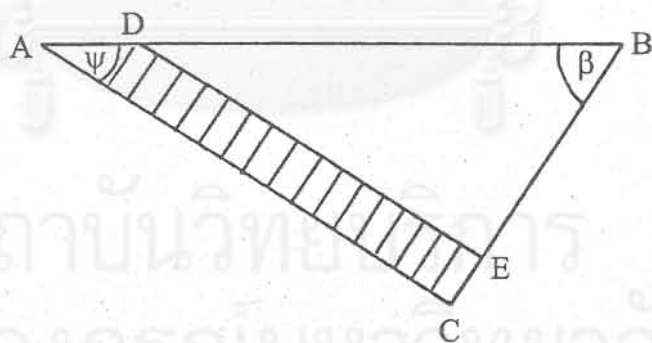
ค่าตัวเลขอัตราส่วนของการขุดเจาะ หรือที่เรียกว่า stripping ratio ควรมีการวิเคราะห์ตามลักษณะของการวางตัวของมวลสินแร่ในบริเวณ จนเกิดความมั่นใจว่าได้ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเชิงเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน ที่เรียกชื่อเฉพาะว่า economic stripping ratio จากการขุดเจาะตามอัตราส่วนนี้จะให้ผลตอบแทนของการทำเหมืองมีกำไรสูงสุด

#### 1. กรณีที่มวลสินแร่วางตัวในแนวตั้ง

ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาอัตราส่วนการขุดเจาะในกรณีที่มวลสินแร่ (แสดงภาพสเก็ตซ์ไว้ในรูปที่ 9.4) เป็นรูปทรงกระบอกแบบ circular pipe วางตัวอยู่ในแนวตั้งกับพื้นผิวดิน (vertical orebody) ก่อนประเมินผลตั้งสมมุติฐานให้เปอร์เซ็นต์เกรดสินแร่มีค่าคงที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 9.4 แบบจำลองการวางตัวของมวลสินแร่ ที่วางตัวในแนวตั้งแบบ circular pipe



รูปที่ 9.5 แบบจำลองการวางตัวของมวลสินแร่ ที่วางตัว  
ในแนวเอียงแบบ tabular (Plewman, 1970)

ตลอดมวลสินแร่ ถ้าหากมีการกำหนดค่าตัวเลขของมาตราส่วนของรูปแบบเชิงเรขาคณิตไว้ในภาพสเก็ตซ์ จะหาค่าระยะรัศมีวงกลมของมวลทรงกระบอก (circular radius, R) กับค่าระยะรัศมีที่เป็นขอบบ่อเหมืองสุดท้าย (radius of the ultimate pit,  $R_f$ ) จากภาพตัดขวางในแนวดิ่งได้ จากความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตคำนวณหาอัตราส่วนการขุดเจาะโดยรวม [overall stripping ratio หรือใช้สัญลักษณ์เป็น  $(SR)_{\text{overall}}$ ]

$$[SR]_{\text{overall}} = \frac{\frac{1}{3}(R_f)^2 - R^2 - \frac{2}{3} \frac{R^3}{R_f}}{R^2 - \frac{2}{3} \frac{R^3}{R_f}} \quad (9.1)$$

ถ้าหากการขุดเจาะสามารถทำให้มุมความลาดชันหน้าเหมืองมีค่าสูงสุด ก็จะได้ค่า economic stripping ratio {ระบุสัญลักษณ์เป็น  $(SR)_E$ } ได้ดังนี้

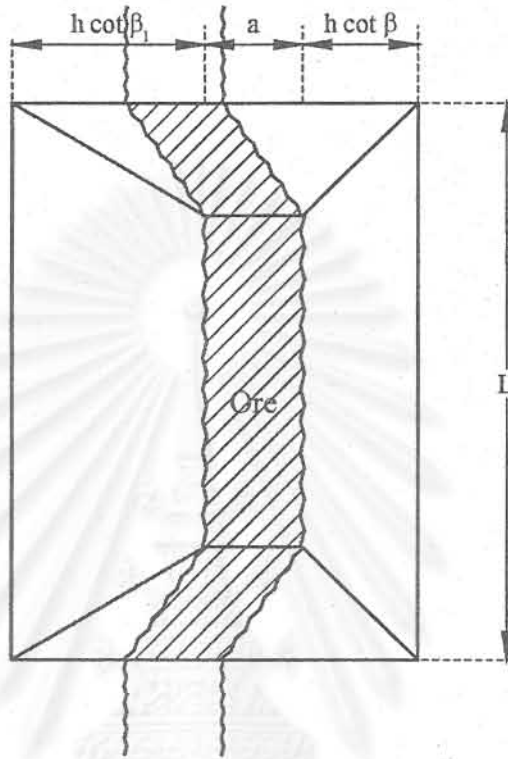
$$[SR]_E = \frac{(R_f - R)}{R} \quad (9.2)$$

## 2. กรณีที่มวลสินแร่วางตัวในแนวเอียงกับพื้นผิวดิน

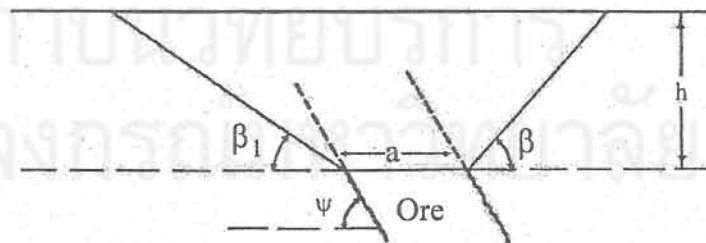
ตัวอย่างของการวิเคราะห์หาอัตราส่วนของการขุดเจาะในกรณีที่มวลสินแร่มีรูปทรงเป็นแท่งสี่เหลี่ยมแบนที่มีค่าความหนาแน่นน้อย (tabular shape) แสดงเป็นภาพสเก็ตซ์ของรูปที่ 9.5 ภาพตัดขวางมวลสินแร่คือ ADEC มีค่ามุมเอียงเท (dip angle) ของมวลสินแร่เป็น  $\psi$  ระยะ AB เป็นค่าระยะพื้นผิวดินในแนวราบ ส่วนเส้นแนว BC คือ แนวเส้นที่พัฒนาเพื่อเปิดหน้าเหมือง (advancing face) กำหนดให้พื้นที่สามเหลี่ยม DBE ในรูปที่ 9.5 เป็นส่วนของ waste จึงกำหนดอัตราส่วนการขุดเจาะเบื้องต้นที่หาจากระยะมิติของมวลสินแร่รูป tabular หรือใช้สัญลักษณ์เป็น  $(SR)_{\text{initial}}$  ได้ค่าความสัมพันธ์ เป็น

$$[SR]_{\text{initial}} = \frac{BE}{EC} = \frac{DB}{AD} \quad (9.3)$$

Plewman (1970) แนะนำวิธีการหาค่าอัตราส่วนการขุดเจาะดังกล่าวไว้ในการประชุม  
เสนอผลงานวิจัยหัวข้อเรื่อง Open Pit Mining Symposium มีการเสนอแนะวิธีการเพิ่มเติมโดย



รูปที่ 9.6 ก ผังหน้าตัดของแบบจำลองการวางมวลสินแร่  
ที่ปรับปรุงจากรูปที่ 9.5 (Stuck, 1970)



รูปที่ 9.6 ข ภาพตัดขวางของแบบจำลองการวางมวลสินแร่  
ที่ปรับปรุงจากรูปที่ 9.5 (Stuck, 1970)



Stucke (1970) โดยระบุไว้ในเอกสารการประชุมหน้า 251-252 Stucke ได้ปรับปรุงให้ประยุกต์ได้กับมวลสินแร่ที่มีรูปแบบไม่พึงพิงกับความยาวของแนวสันหิน (strike length) ดังแสดงเป็นผังกับภาพตัดขวางของมวลสินแร่ ไว้ในรูปที่ 9.6 ค่า  $(SR)_{initial}$  ในรูปแบบใหม่คือ

$$\left. \begin{aligned} [SR]_{initial} &= \frac{\text{waste area}}{\text{ore area}} \\ &= \frac{\{L(a + h\cot\beta + h\cot\beta_1)\} - (La)}{La} \\ &= \frac{h}{a}(\cot\beta + \cot\beta_1) \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

ถ้าหากทำเหมืองลงไปในระดับลึกจนถึงก้นบ่อเหมือง กำหนดให้ พจน์  $b$  เป็นค่าระยะความกว้างของ waste ที่ระดับก้นบ่อ สมการที่ 9.4 จะเปลี่ยนมาเป็นสมการใหม่ที่ไม่พึงพิงกับความยาวของแนวสันหิน คือ

$$[SR]_{initial} = \frac{b + h(\cot\beta + \cot\beta_1)}{a} \quad (9.5)$$

จากความรู้พื้นฐานทางเศรษฐศาสตร์ของการทำเหมือง ค่า  $(SR)_{initial}$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบใหม่คือ

$$\left. \begin{aligned} [SR]_{initial} &= \frac{\text{plan area waste}}{\text{plan area ore}} \\ &= \frac{M - N}{N} = \frac{M}{N} - I \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

$$\text{or } M = N[(SR)_{initial} + I]$$

$$\text{where } M = \text{plan area of pit} \quad (9.7)$$

$$N = \text{horizontal cross-sectional area of ore.}$$

พิจารณาจากรูปที่ 9.6 แสดงว่า ค่าระยะมิติ  $L$  ที่เป็นความยาวแนว strike ของมวลสินแร่ ไม่มีผลกระทบต่อสมการหาอัตราส่วนการขุดเจาะ และค่ามุม  $\beta_1$  ที่อยู่ทางด้าน foot wall ของ

มวลสินแร่จะมีผลต่อการขุดเจาะเมื่อค่ามุม  $\beta_1 = \psi$  ดังนั้นถ้าการขุดเจาะทำให้  $\tan \beta$  ที่อยู่ทางด้าน hanging wall ของมวลสินแร่มีค่าความชันสูงสุด ค่าอัตราส่วนในสมการที่ 9.4 และ 9.6 จะเป็นค่า  $(SR)_E$  หรือ economic stripping ratio ทำให้หาขีดจำกัดของโครงร่างขอบบ่อเหมืองได้จากสมการข้างล่าง

$$M_E = N[(SR)_E + 1] \quad (9.8)$$

where  $M_E =$  plan area of pit in which it given the maximum net present value.

พจน์ตัวแปร  $N$  ที่เป็นผืนพื้นที่ของมวลสินแร่มีค่าคงที่ ส่วนพจน์ตัวแปร  $M_E$  ที่เป็นผืนพื้นที่ขอบบ่อที่มีขนาดพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดให้เป็นบริเวณขุดเจาะที่ให้ผลตอบแทนสูงสุด ดังนั้นค่า  $M_E$  สามารถคำนวณได้จากการตั้งสมมติฐานให้  $\beta$  เป็นมุมที่ค่าความชันสูงสุด แต่ยังคงมีความปลอดภัยเพียงพอที่จะทำการขุดเจาะ ทำให้คำนวณหาค่าพจน์ตัวแปรที่เป็นค่า  $(SR)_E$  ในสมการที่ 9.8 ได้ มีผลทำให้ทราบค่าระยะ AB ของรูปที่ 9.5 ซึ่งเป็นระยะทางในแนวราบของโครงร่างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด

### 9.3.2.2 การออกแบบตัดความลาดชันภายในขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด

ก่อนกำหนดมุมความลาดชันของบ่อเหมืองได้นั้น วิศวกรจำเป็นต้องทราบระยะทางในแนวราบที่เป็นระยะห่างของขอบบ่อเหมืองสุดท้าย ในภาพตัดขวางแนวใดแนวหนึ่งเสียก่อน เช่น ระยะ AB ของรูปที่ 9.5 ทั้งนี้เพื่อกำหนดตำแหน่งตั้งต้นของแนวความลาดชันโดยรวม (line of overall slope angle) ที่บนพื้นผิวดิน ก่อนเริ่มการตัดความลาดของตะพักที่เป็น bench 1

ในเชิงเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน เพื่อให้มีการเสียค่าใช้จ่ายในการขุดเจาะน้อยที่สุด การตัดความลาดหน้าเหมืองเปิดให้มีค่าความชันสูงสุดเป็นสิ่งที่ควรปฏิบัติ แต่ในการปฏิบัติงานภาคสนาม ยังมีเงื่อนไขทางด้านความปลอดภัยสำหรับเสถียรภาพของมวลสาร ที่อาจเกิดการพังทลายระหว่างที่มีการตัดความลาดเนื่องจากความชันหน้าเหมืองสูงเกินไป และเงื่อนไขตั้งต้นสำหรับการกำหนดค่ามุมความลาดชัน โดยรวมจากการตัดกลุ่มบล็อกลูกที่จะทำเหมือง

การคำนวณค่ามุมความลาดมีการนำเสนอแนวทางไว้แล้วในหัวข้อ 7.2.1 ของรายงานฉบับนี้ ส่วนการอธิบายในรายละเอียดเพิ่มเติมในบทสรุปนี้ ผู้วิจัยได้รวบรวมมาจากเอกสารอ้างอิง จำนวนหลายรายการ ที่สำคัญ ได้แก่ Hoek and Bray (1981); Pine (1992); Cernica (1995); Khalokakaie (1999) และสง่า ดังชวาล (2544)

การนำเสนอในหัวข้อนี้มีการเรียบเรียงกับดัดแปลงใหม่ให้เหมาะสมกับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลสารที่อาจเกิดการพังทลายในแนวระนาบ ทั้งนี้มีการตั้งสมมุติฐานให้ครอบคลุมไว้หลายสถานะภาพของการตัดความลาด เช่น มวลสารที่วิเคราะห์มีสถานะภาพทั้งแห้งและเปียก มวลความลาดไม่มีรอยแตกจากแรงดึง กับมีรอยแตกจากแรงดึง และการตัดชั้นตะพักความลาดมีการกำหนดค่ามุมเอียงของตะพักด้านบน เพื่อความสะดวกของการใช้เครื่องจักรกลในการปรับคันมวลดิน (หิน) ออกจากหน้าเหมือง เป็นต้น

แนวทางการประเมินผลเสถียรภาพหน้างานชุดเจาะมีการแสดงค่าผลลัพธ์ไว้ทั้งในรูปแบบที่คำนวณจากวิธีการเชิงกำหนด (deterministic method) กับวิธีการเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic method) ทำให้วิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานมีทางเลือกมากขึ้น ก่อนตัดสินใจกำหนดค่ามุมความชันในการตัดความลาด

### 1. สถานะภาพของการพังทลายของมวลสารในแนวระนาบ

กำหนดให้สถานะภาพของการพังทลายในแนวระนาบ มีทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่

- การพังทลายของมวลความลาดที่แห้ง (dry slope) แต่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง
- การพังทลายของมวลความลาดที่เปียก (wet slope) แต่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง
- การพังทลายของมวลความลาดที่มีรอยแตกจากแรงดึง ในด้านบนของพื้นผิวความลาด (upper slope surface)
- การพังทลายของมวลความลาดที่มีรอยแตกจากแรงดึง ในด้านหน้าความลาด (slope face)

รูปที่ 9.7 ถึง 9.10 เป็นภาพสเก็ทซ์แสดงรูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองความลาดที่ใช้วิเคราะห์หาเสถียรภาพของมวลสารบนระนาบทั้ง 4 รูปแบบ ดังกล่าวข้างบน

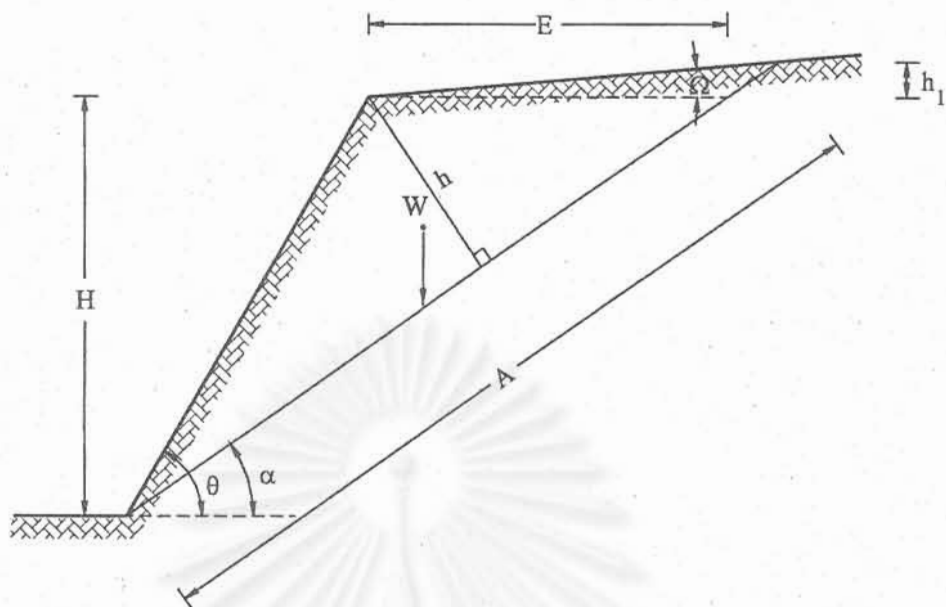
### 2. สัญลักษณ์สำหรับพจน์ตัวแปรของแบบจำลองเชิงเรขาคณิต

จากแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบดังกล่าว มีการกำหนดสัญลักษณ์ (notation) ที่เป็นทั้งภาษาอังกฤษกับภาษากรีก ร่วมกับการระบุค่าหน่วยในระบบ S.I. ไว้ดังนี้

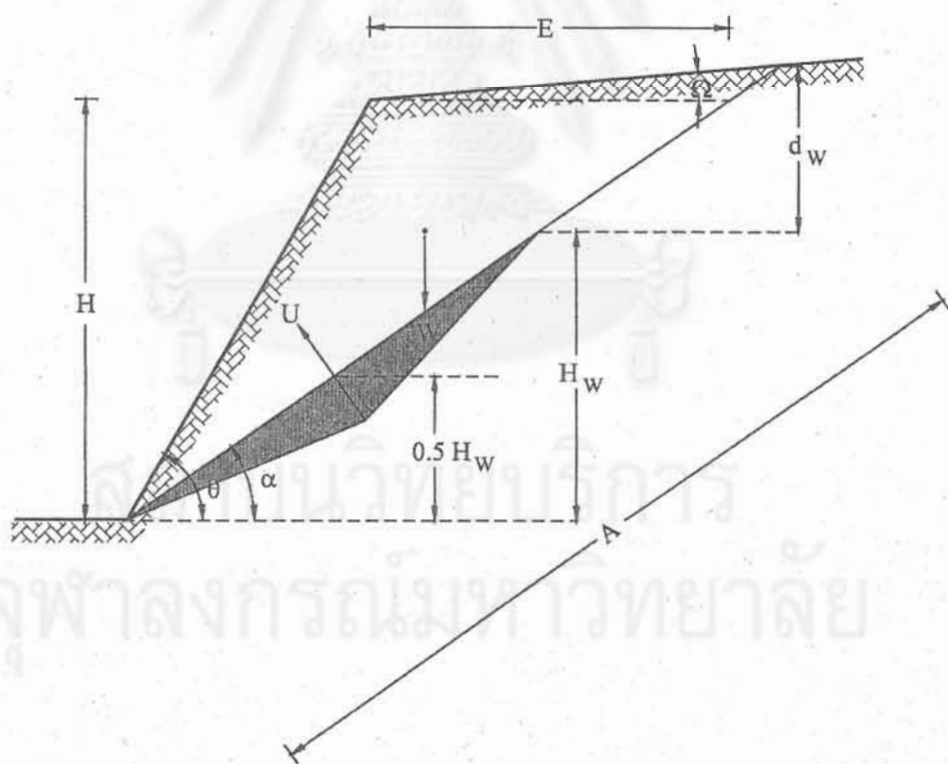
$F$  = ตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย (factor of safety)

$c$  = โคฮีชัน (cohesion) ที่เป็นแรงยึดติดในมวลสาร หน่วย  $\text{kN/m}^2$

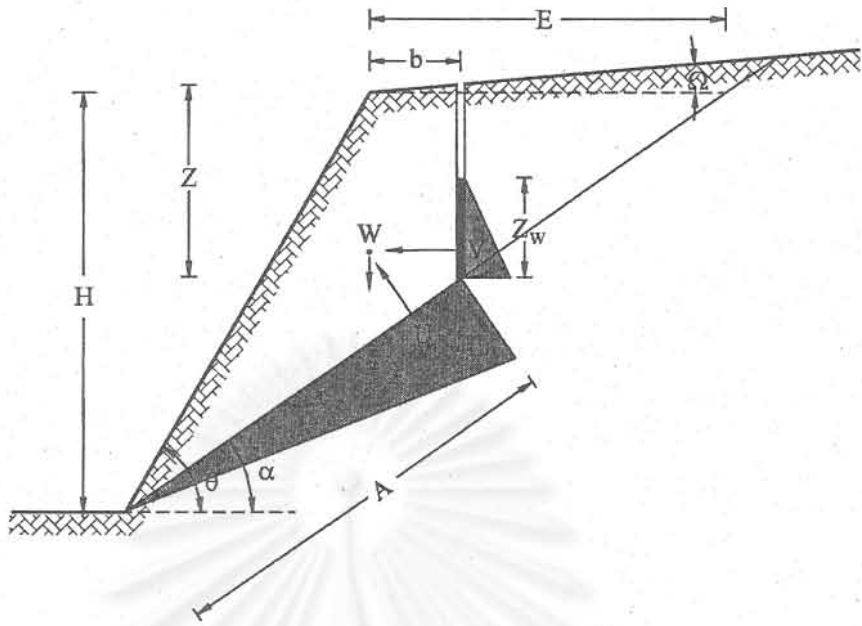
$\phi$  = มุมเสียดทานภายในของมวลสาร หน่วย องศา



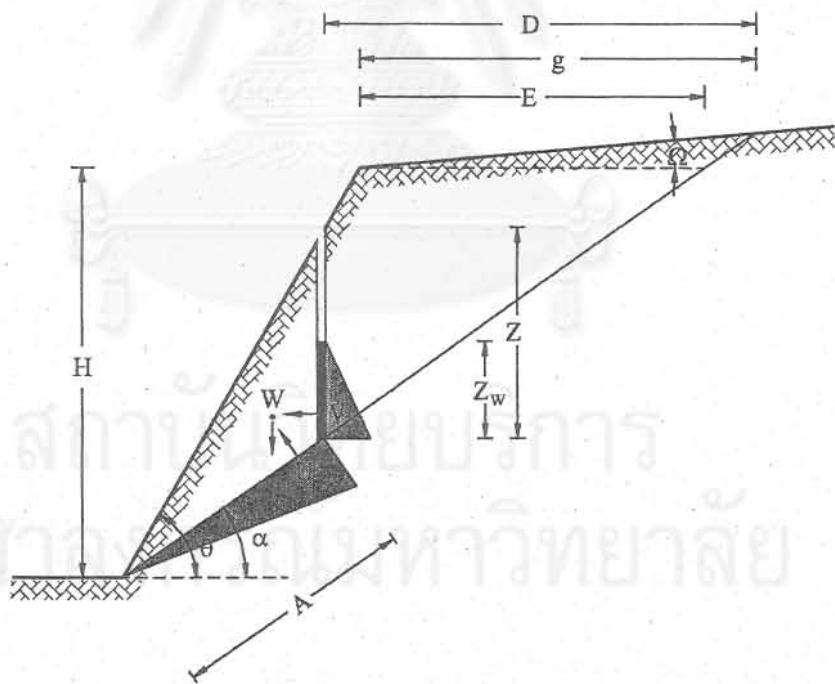
รูปที่ 9.7 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลาย  
ตามแนวระนาบของมวลสารที่แข็ง ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง



รูปที่ 9.8 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลาย  
ตามแนวระนาบของมวลสารที่เปื่อย ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง



รูปที่ 9.9 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลาย  
ตามแนวระนาบของมวลสารที่เปียก ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง  
อยู่ในพื้นผิวด้านบนของชั้นตะกัก



รูปที่ 9.10 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองการพังทลาย  
ตามแนวระนาบของมวลสารปกติ มีรอยแตกจากแรงดึง  
อยู่ในด้านหน้าความลาด



- $\alpha$  = มุมเอียงเทของระนาบการพังทลาย หน่วย องศา  
 $\theta$  = มุมความชันของการตัดความลาดหน้าเหมือง หน่วย องศา  
 $\Omega$  = มุมความชันของชั้นตะกั่วด้านบนความลาด หน่วย องศา  
 $\gamma_R$  = หน่วยน้ำหนักของมวลสารที่เป็นหิน หน่วย  $\text{kN/m}^3$   
 $\gamma_S$  = หน่วยน้ำหนักของมวลสารที่เป็นดิน หน่วย  $\text{kN/m}^3$   
 $\gamma_W$  = หน่วยน้ำหนักของน้ำ หน่วย  $\text{kN/m}^3$   
 $d_w$  = ความลึก (วัดจากตะกั่วด้านบนถึงระดับน้ำ) ของระดับน้ำใต้ดิน หน่วย m  
 $H$  = ความสูง (วัดจาก slope toe ถึง slope crest) ของชั้นตะกั่วความลาด หน่วย m  
 $h$  = ระยะเส้นตั้งฉากวัดจาก slope crest ถึง failure plane หน่วย m  
 $h_1$  = ความสูงของชั้นตะกั่วด้านบน (วัดจาก slope crest ถึง failure plane ตัดกับชั้นตะกั่วด้านบน) หน่วย m  
 $Z$  = ความลึก (ระยะในแนวตั้ง) ของรอยแตกจากแรงดึง หน่วย m  
 $Z_w$  = ความลึก (ระยะในแนวตั้ง) ของน้ำที่ขังในรอยแตก หน่วย m  
 $H_w$  = ความสูง (วัดจากตะกั่วด้านล่างถึงระดับน้ำ) ของระดับน้ำใต้ดิน หน่วย m  
 $A$  = พื้นฐานของบล็อกมวลสารที่ไถลเลื่อน (ความหนา 1 เมตร) หน่วย  $\text{m}^2$   
 $W$  = น้ำหนักของบล็อกมวลสารที่ไถลเลื่อน (ความหนา 1 เมตร) หน่วย  $\text{kg/m}$   
 $U$  = ความดันยกตัวของน้ำบนระนาบที่เอียงเท (ความหนา 1 เมตร) หน่วย  $\text{kN/m}^2$   
 $V$  = ความดันของน้ำในระนาบรอยแตก (ความหนา 1 เมตร) หน่วย  $\text{kN/m}^2$   
 $E$  = ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึง failure plane หน่วย m  
 $b$  = ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึง tension crack ที่อยู่ในพื้นผิวด้านบนของชั้นตะกั่ว หน่วย m  
 $g$  = ระยะในแนวราบที่วัดจาก tension crack ที่อยู่ในหน้าความลาด ถึงตำแหน่งที่ failure plane ตัดชั้นตะกั่วด้านบน หน่วย m  
 $D$  = ระยะในแนวราบที่วัดจาก slope crest ถึงตำแหน่งที่ failure plane ที่ตัดชั้นตะกั่วด้านบน หน่วย m

### 3. สมการเชิงกำหนดของแบบจำลองเชิงเรขาคณิต

จากแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบดังกล่าว มีการกำหนดสมการสำหรับวิธีการหาค่าเชิงกำหนดที่ค่าผลเฉลยเป็นตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย การแสดงนิพจน์ของสมการระบุไว้ใน ตารางที่ 9.3-9.4

สมการในตารางที่ 9.3 ใช้กับกรณีของมวลสารความลาด (หินหรือดิน) ที่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) ส่วนสมการในตารางที่ 9.4 ประยุกต์กับปรากฏการณ์ของมวลสารที่เกิดตามธรรมชาติบ่อยมากกว่า ได้แก่ มวลสารความลาด (หินหรือดิน) ที่มีรอยแตกจากแรงดึง ทั้งที่เป็นปรากฏการณ์ปกติของมวลสารเอง หรือเกิดจากการปฏิบัติงานขุดเจาะระเบิดหิน

ตารางที่ 9.3 สมการต้นแบบในการหาผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ที่กำหนดให้มวลความลาดมีค่ามุมเอียงเทของชั้นตะกอนด้านบน แต่ไม่มีรอยแตกจากแรงดึง

<b>Condition I – Dry Slope without tension crack.</b>	
$F = \frac{c.A}{W.\sin\alpha} + \cot\alpha.\tan\phi$	(9.9)
$E = H(\cot\alpha - \cot\theta)$	(9.10)
$h_1 = \frac{\sin\alpha(\sin\Omega)E}{\sin(\alpha - \Omega)}$	(9.11)
$A = \frac{H + h_1}{\sin\alpha}$	(9.12)
$W = 0.5(A)\gamma_R H \left\{ \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin\theta} \right\}$	(9.13)
<b>Condition II – Wet slope without tension crack.</b>	
$F = \frac{c.A + (W.\cos\alpha - U)\tan\phi}{W.\sin\alpha}$	(9.14)
$E = H(\cot\alpha - \cot\theta)$	(9.15)
$h_1 = \frac{\sin\alpha(\sin\Omega)E}{\sin(\alpha - \Omega)}$	(9.16)
$A = \frac{H + h_1}{\sin\alpha}$	(9.17)
$W = 0.5(A)\gamma_R H \left\{ \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin\theta} \right\}$	(9.18)
$U = \frac{1}{4} \gamma_W . H_W^2 . \frac{1}{\sin\alpha}$	(9.19)

ตารางที่ 9.4 สมการต้นแบบในการหาผลลัพท์เชิงเสถียรภาพ ที่กำหนดให้มวลความลาด มีค่ามุมเอียงเทของชั้นตะกอนด้านบน และมีรอยแตกจากแรงดึง

<b>Condition III – Natural slope with tension crack.</b>	
<b>Case 1: crack in the upper slope surface.</b>	
$F = \frac{c.A + (W.\cos\alpha - U - V\sin\alpha)\tan\phi}{W.\sin\alpha + V.\cos\alpha}$	(9.20)
$Z = H + b\tan\Omega - (b + H\cot\theta)\tan\alpha$	(9.21)
$A = (H\cot\theta + b)\sec\alpha$	(9.22)
$W = 0.5\gamma_R [H^2 \cot\theta + 2bH + b^2 \tan\Omega - (H\cot\theta + b)^2 \tan\alpha]$	(9.23)
$U = 0.5\gamma_W Z_W A$	(9.24)
$V = 0.5\gamma_W Z_W^2$	(9.25)
<b>Condition IV – Natural slope with tension crack.</b>	
<b>Case 2: crack in the slope face.</b>	
$F = \frac{c.A + (W.\cos\alpha - U - V\sin\alpha)\tan\phi}{W.\sin\alpha + V.\cos\alpha}$	(9.26)
$Z = [H - (g - D)\tan\theta] - [(H\cot\theta) - (g - D)]\tan\alpha$	(9.27)
$E = H(\cot\alpha - \cot\theta)$	(9.28)
$A = [(H\cot\theta) - (g - D)]\sec\alpha$	(9.29)
$W = 0.5\gamma_R \left[ \begin{array}{l} (H)(E) - \{Z + (g - D)\tan\theta\} \\ \cdot \{g - D\} + E\} + \{(g - D)^2 \tan\theta\} \end{array} \right]$	(9.30)
$U = 0.5\gamma_W Z_W A$	(9.31)
$V = 0.5\gamma_W \frac{Z^2}{W}$	(9.32)

#### 4. ผลลัพท์จากการประเมินผลเชิงเสถียรภาพ

จากสมการแบบจำลองทั้ง 4 สถานะภาพ ที่ระบุไว้ทั้งหมดจำนวน 24 สมการ เริ่มตั้งแต่ สมการที่ 9.9 ถึงสมการที่ 9.32 ผู้วิจัยโครงการนี้ใช้เป็นต้นแบบสมการ ในการวิเคราะห์หา ค่า ผลลัพท์เชิงเสถียรภาพทั้ง 2 แนวทาง

ถ้าหากใช้วิธีเชิงกำหนด (deterministic method) ซึ่งเป็นวิธีการแทนค่าเฉลี่ยของตัวแปรลง ในสมการที่เหมาะสมกับสถานะภาพของมวลสารที่ในแนวทิศทางการทำการขุดเจาะเพื่อพัฒนา

หน้าเหมือง ค่าตัวแปรบางค่าสามารถตรวจวัดโดยตรงจากหน้างานขุดเจาะ เช่น ความสูงในแนวโค้งของความลาด ระยะห่างของรอยแตกจากแรงดึงเมื่อเทียบกับ slope crest เป็นต้น แต่ค่าตัวแปรบางค่าต้องมีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น ค่าโคฮีชัน ค่ามุมเสียดทานภายในของมวลสาร เป็นต้น

การใช้วิธีเชิงกำหนด สามารถใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาคำนวณค่าผลลัพธ์ได้ และคำตอบที่ได้จะเป็นค่าตัวเลขบ่งชี้ความปลอดภัย เพียงค่าเดียว เมื่อเทียบกับการตัดความลาดที่คำนวณความชันที่วิศวกรได้กำหนดไว้หรือวางแผนล่วงหน้า

ถ้าหากใช้วิธีเชิงความน่าจะเป็น (probabilistic method) จะเป็นการยากที่จะใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาคำนวณได้ ทั้งนี้เพราะในกระบวนการหาค่าเชิงความน่าจะเป็นจะมีการแยกตัวแปรของการวิเคราะห์ผลที่แตกต่างกัน ได้แก่

1) ตัวแปรปกติที่เป็นตัวแทนสำหรับค่าเฉลี่ยของขนาดมิติหรือค่ามุมเชิงเรขาคณิตต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ความสูงหน้าเหมือง ค่ามุมความชันของการตัดความลาด เป็นต้น

2) ตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่เป็นตัวแทนสำหรับค่าที่มีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ซึ่งค่าตัวแปรสุ่มเหล่านี้ต้องมีการจำลองแบบ (simulation) โดยการใช้โปรแกรมมาตรฐานที่บรรจุใน Windows ของคอมพิวเตอร์ โปรแกรมมีการก่อกำเนิด (generate) ค่าตัวเลขตามกระบวนการสุ่มตัวอย่าง จากค่าเฉลี่ย (mean) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ที่กำหนดหรือคำนวณไว้ก่อนทำการจำลองแบบ หรืออีกแนวทางหนึ่งใช้สมการของการแจกแจงค่าเชิงความน่าจะเป็นที่ค้นคว้าจากตำราสถิติหรือวิทยานิพนธ์ ยกตัวอย่างสมการที่ 4.41 ถึง 4.47 ที่ระบุไว้ในหน้า 165-167 เอกสารวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของ Khalokakaie (1999) เป็นต้น

ผู้วิจัยโครงการนี้ ได้เลือกตัวแปรสุ่มที่กำหนดไว้เฉพาะ แต่ละรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการพังทลายทั้ง 4 รูปแบบ ในการจำลองแบบ (simulation) เพื่อทำการสุ่ม ต้องมีกระบวนการทำซ้ำจากโปรแกรม ค่าที่เลือกควรมีจำนวนตั้งแต่ 10,000-100,000 ค่า

ตัวแปรสุ่ม (random variable) ที่ผู้วิจัยเลือกมาทำการจำลองแบบ มีดังนี้

- ก) ตัวแทนค่าตัวแปรสุ่มของการพังทลายตามสถานะภาพแรก (เป็น condition I ในตารางที่ 9.3) ที่เป็นการตัดความลาดของมวลที่แห้งและไม่มียอยแตก ได้แก่ ค่า cohesion, friction angle และ mass unit weight (rock or soil)
- ข) ตัวแทนค่าตัวแปรสุ่มของการพังทลายตามสถานะภาพที่สอง (condition II ในตารางที่ 9.3) ที่เป็นการตัดความลาดของมวลที่เปียกและไม่มียอยแตก ได้แก่ ค่า cohesion, friction angle, mass unit weight และ height of water table

- ค) ตัวแทนค่าตัวแปรสุ่มของการพังทลายตามสถานะภาพที่สาม (condition III ในตารางที่ 9.4) ที่เป็นการตัดความลาดของมวลธรรมชาติมีรอยแตกในพื้นที่ผิวตะพักด้านบน ได้แก่ ค่า cohesion, friction angle, mass unit weight และ ratio of water in tension crack [ $Z_w / Z$ ]
- ง) ตัวแทนค่าตัวแปรสุ่มของการพังทลายตามสถานะภาพที่สี่ (condition IV ในตารางที่ 9.4) ที่เป็นการตัดความลาดของมวลธรรมชาติมีรอยแตกในพื้นที่ผิวน้ำความลาด ได้แก่ ค่า cohesion, friction angle, mass unit weight และ ratio of water in tension crack [ $Z_w / Z$ ]

เมื่อทำการคำนวณค่าผลลัพธ์ของแต่ละกรณี จะมีค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัยเท่ากับจำนวนของค่าที่เกิดจากการจำลองแบบ (simulation) เช่น ทำการจำลองแบบตัวแปรสุ่มไว้จำนวน 100,000 ครั้ง จะมีค่าตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย จำนวน 100,000 ค่า ดังนั้นตามหลักการของการจำลองแบบมาตรฐาน เช่น ใช้วิธี Monte Carlo simulation จะหาค่าตัวเลขเชิงความน่าจะเป็นของการพังทลาย ที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า probability of failure (ใช้สัญกรณ์เป็น  $p_f$ ) คือค่าความน่าจะเป็นของตัวเลขปัจจัยความปลอดภัย ที่น้อยกว่า 1 (หนึ่ง) เขียนความสัมพันธ์เป็น

$$P_f = \frac{\text{Number of factors of safety less than 1 (one)}}{\text{Total number used in simulation}} \quad (9.33)$$

แต่เนื่องจากค่า values ที่ได้จากข้อมูลเข้า (input data) ดังกล่าวมีการเลือกมาสุ่มก่อนทำการคำนวณหาค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพของการพังทลาย ผลจากการคำนวณซ้ำในกระบวนการ [เป็นจำนวนครั้งที่สุ่ม (เช่น 10,000 ครั้ง)] หาค่าตัวเลขความน่าจะเป็นของการพังทลายได้ดังนี้คือ

$$P_f = \text{Probability of failure} = \frac{K_1}{(K_1 + K_2)} \quad (9.34)$$

where  $K_1$  = number used in simulation for factor of safety less than 1 [ $< 1$ ]

$K_2$  = number used in simulation for factor of safety equal or more than 1 [ $\geq 1$ ]



การคำนวณค่า  $p_c$  อาจใช้โปรแกรมแบบแผ่นตารางทำการ (spread sheet) ช่วยในการหาค่าผลลัพธ์ เช่น ใช้โปรแกรม Microsoft Excel หาค่าที่ต้องคำนวณซ้ำเป็นพันครั้งขึ้นไป หรืออีกวิธีหนึ่งใช้การเขียนโปรแกรมสำเร็จรูป (packaged program) โดยอิงสมการต้นแบบสำหรับแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของความลาดทั้ง 4 แบบ เพื่อคำนวณหาค่าผลลัพธ์เฉพาะแต่ละสถานะภาพของมวลสาร ค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของการพังทลาย เช่น มีโอกาสเท่ากับ  $1/10,000$  สำหรับในการตัดความลาดตามค่ามุมความชันหน้าเหมือง (slope angle) ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าก่อนทำการคำนวณ

ภายหลังจากการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ทั้ง 2 แนวทาง ทั้งจากวิธีเชิงกำหนด กับวิธีเชิงความน่าจะเป็น วิศวกรสามารถตัดสินใจได้ง่ายขึ้นว่า ควรกำหนดค่ามุมความชันในการวางแผนการขุดเจาะกลุ่มบล็อกรถของบ่อเหมืองเปิดที่ค่ามุมใด จึงให้ผลตอบแทนเป็นจำนวนเงินรับสุทธิสูงสุด

### 9.3.2.3 การออกแบบเฉพาะเป็นกรณีพิเศษของโครงสร้างขอบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุด

การออกแบบเฉพาะเป็นกรณีพิเศษ (ไม่จำเป็นต้องใช้กับทุกเหมือง) ต้องอาศัยการประชุมปรึกษากับวางแผนร่วมกันอย่างสม่ำเสมอ ระหว่างฝ่ายบริหารกับบุคลากรที่เกี่ยวข้องทั้งที่ปฏิบัติงานในออฟฟิศกับในภาคสนาม

เงื่อนไขกับการกำหนดค่าขีดจำกัดของโครงสร้างขอบบ่อที่เหมาะสมที่สุด อาจต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่เขียนขึ้นมาอย่างมีวัตถุประสงค์เฉพาะเพื่อแก้ปัญหาของเหมืองเปิดนั้น กลยุทธ์ที่ใช้ในการออกแบบมีบรรยายไว้หลายแนวทางในเนื้อหาบทที่ 6 ของรายงานฉบับนี้ เริ่มตั้งแต่วิธี Lerchs-Grossmann วิธีกรวยเคลื่อนที่ (floating cone) แต่แนวทางการออกแบบดังกล่าวมีขีดจำกัดให้ค่ามุมความชันของการตัดความลาดคงที่ หรือเท่ากับ 45 องศา จึงอาจต้องนำแนวทางที่เสนอแนะโดย Khalokakaie et al. (2000) มาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมความลาดชันที่ไม่จำเป็นต้องเท่ากันตลอดทุกชั้นตะกัก

การออกแบบ โครงสร้างขอบบ่อเหมืองที่ใกล้เคียงความเป็นจริง ต้องใช้เงื่อนไขเชิงบล็อกร 3 มิติ มาช่วยในการวิเคราะห์ผล เช่น แนวทางที่เสนอแนะโดย Johnson and Sharp (1971); Wilke and Wright (1984); Yamatomi et al. (1995) เป็นต้น แต่การวิเคราะห์ตามแนวทางดังกล่าวจะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีเชิง 2 มิติ ค่อนข้างมาก

เงื่อนไขทางด้านการลงทุน เป็นสิ่งที่ต้องนำมาวิเคราะห์ก่อนสรุปผลของการออกแบบโครงสร้างขอบบ่อเหมือง ผู้ประกอบการควรกำหนดค่าตัวแปรหลักที่มีการแยกกลุ่มหรือจัดหมู่ก่อนทำการหาผลลัพธ์เชิงเศรษฐศาสตร์ที่เป็นค่าโอกาสความน่าจะเป็นของโครงการ ค่าผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็นจะอิงกับค่าผลตอบแทนจากการลงทุนที่เป็นผลกำไร หรือคำนวณหาค่า NPV (net present value) หรือค่า discounted cash flow ในช่วงระยะเวลาที่ทำเหมือง ความแม่นยำจาก

การวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์จากการลงทุน ขึ้นอยู่กับความอ่อนไหว (sensitivity) เชิงตัวเลขของ สมมุติฐาน กับตัวแปรเสริมเชิงการผลิต

งานวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เป็นการพัฒนาหน้าเหมือง โดยส่วนใหญ่มีจุดประสงค์ที่ทำการผลิตหินหรือผลิตสินแร่ในช่วงระยะเวลาไม่ยาวนาน การลงทุนมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงในเรื่องความคุ้มทุนได้ ในอีกรูปแบบหนึ่งการลงทุนในระดับที่ต่ำเกินสภาพความเป็นจริง ก็มีผลถึงความปลอดภัยต่อบุคลากรกับผู้ปฏิบัติงาน และอาจก่อให้เกิดผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อมได้ การวางแผนเพื่อพัฒนาบ่อเหมืองในระดับที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นแนวทางที่ดีที่สุดของการทำเหมือง

ผู้วิจัยคาดว่าต้นแบบที่นำเสนอในบทสรุป และรายละเอียดของการวิเคราะห์ที่มีการอธิบายไว้ในหลายส่วนของรายงานฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ในการสร้างต้นแบบของการพัฒนาบ่อเหมืองเปิดในประเทศ ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหินหรือสินแร่จะสูงขึ้น และช่วยลดความเสี่ยงของการลงทุนก่อนทำการพัฒนาเหมืองเปิด

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บรรณานุกรม



1. พันธุ์เทพ หัตถโกศล และธีรวัฒน์ หังสสูตร (2544)  
 "ผลกระทบของวิธีออกแบบบ่อเหมือง และขนาดของบล็อกในการคำนวณปริมาณสำรองแร่" การประชุมทางวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหการ และปิโตรเลียม ครั้งที่ 6 : REUSE 2001 ตุลาคม 2544 ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 1-10 ถึง หน้า 1-15
2. สง่า ตั้งชวาล (2543 ก)  
 "ความน่าเชื่อถือในการออกแบบระเบิดหิน และควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม" รายงานหลักฉบับสมบูรณ์ เงินทุนวิจัยทุนงบประมาณแผ่นดิน มิถุนายน 2543 สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 189 หน้า กับแผ่นดิสก์ โปรแกรม จำนวน 1 ชุด
3. สง่า ตั้งชวาล (2543 ข)  
 "การวางแผนทั้งระบบในการเปิดหน้างานขุดเจาะโดยใช้วัตถุระเบิด" รายงานหลักฉบับสมบูรณ์ เงินทุนวิจัยทุนงบประมาณแผ่นดิน พฤษภาคม 2543 สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 170 หน้า
4. สง่า ตั้งชวาล (2544)  
 "การประเมินความเสี่ยงและความเชื่อถือได้ของเสถียรภาพของงานการขุดเจาะบนพื้นผิวดิน และได้พื้นผิวดิน" รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช เมษายน 2544 สำนักบริหารวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำนวน 207 หน้า
5. สง่า ตั้งชวาล, ชูเวช ชาญสง่าเวช, สุรพล ภู่วิจิตร, ภิญโญ มีชำนะ, สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย (2543)  
 "โครงการจัดทำแผนการจัดการผลิต และใช้หินอุตสาหกรรมเพื่อการก่อสร้าง" รายงานหลักฉบับสมบูรณ์พร้อมแผนที่ประกอบรายงาน แหล่งเงินทุนวิจัยภายนอก กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี พฤษภาคม 2543 จำนวน 223 หน้า กับแผนที่ขนาดใหญ่ประกอบ จำนวน 1 ชุด

6. Armstrong, D. (1990)

"Ultimate Pit Definition," In *"Surface Mining: 2<sup>nd</sup> Edition,"* Vol. 1, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 5, Section 5.2, pp. 465-469.

7. Barnes, R.J. and T.B. Johnson (1982)

"Bounding Techniques for the Ultimate Pit Limit Problem," In 17<sup>th</sup> Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, " Johnson and Barnes, Editors, Society of Mining Engineers of the AIME, New York, Session 7, Chapter 25, pp. 263-273.

8. Bohnet, E.L. (1990)

"Optimum Production Scheduling," In *"Surface Mining: 2<sup>nd</sup> Edition,"* Vol. 1, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 5, Section 5.4, pp. 476-479.

9. Borquez, G.L. and J.V. Thompson (1990)

"Feasibility Studies," In *"Surface Mining: 2<sup>nd</sup> Edition,"* Vol. 1, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 4, Section 4.2, pp. 396-423.

10. Cai, W.L. (1992)

"Sensitivity Analysis of 3-D Model Block Dimensions in the Economic Open Pit Limit Design," In *"23<sup>rd</sup> Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry,"* Y.C. Kim, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Section 10, Chapter 47, pp. 475-486.

11. Call, R.D. and J.P. Savely (1990)

"Open Pit Rock Mechanics," In *"Surface Mining: 2<sup>nd</sup> Edition,"* Vol. 2, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 6, Section 6.8, pp. 860-882.

12. Carlson, T.R., J.D. Erikson, D.T. O'Brian and M.T. Pana (1966)  
"Computer Techniques in Mine Planning," *Journal, Mining Engineering - SME*, Vol. 18, No. 5, pp. 53-56, and p. 80.
13. Cernica, J.N. (1995)  
"Geotechnical Engineering: Soil Mechanics" John Wiley & Sons, New York, 453 p.
14. Crawford, J.T. and R.K. Davey (1979)  
"Case Study in Open-Pit Limit Analysis," In *"Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry,"* A. Weiss, Editor, SME of the AIME, New York, Section 3.3, Chapter 3, pp. 310-318.
15. Dick, R.A., L.R. Fletcher and Dennis V. D'Andrea (1973)  
"A Study of Fragmentation from Bench Blasting in Limestone at a Reduced Scale," *U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations*, No. 7704, 24 p.
16. Dohm, Jr., G.C. (1979)  
"Circular Analysis — Open Pit Optimization," In *"Open Pit Mine Planning and Design,"* J.T. Crawford, III and W.A. Hustrulid, Editors, SME of the AIME, Section 4, Chapter 21, pp. 281-310.
17. Dowd, P.A. (1995)  
"Björkdal Gold-Mining Project, Northern Sweden," (*Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry)*), Vol. 104, pp. A149-A163.
18. Dowd, P.A. and A.H. Onur (1993)  
"Open-Pit Optimization — Part 1: Optimal Open-Pit Design," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry)*, Vol. 102, pp. A95-A104.



19. Hoek, E. and J.W. Bray (1981)

"Rock Slope Engineering: Revised Third Edition, " The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 p.

20. Huttagosol, P. (1991)

"A Computer Design of Ultimate Pit Limit Using Transportation Algorithm, " *Ph.D. Thesis*, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

21. Huttagosol, P. and R.E. Cameron (1992)

"A Computer Design of Ultimate Pit Limit By Using Transportation Algorithm, " In "23<sup>rd</sup> Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry," Y.C. Kim, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Section 10, Chapter 47, pp. 443-460.

22. Hustrulid, W. and M. Kuchta (1995)

"Open Pit Mine Planning & Design: Vol. 1 — Fundamentals," A.A. Blakema, Rotterdam, Netherlands, 636 p.

23. Johnson, T. B. and R.J. Barnes (1988)

"Application of the Out-of-Kilter Algorithm to Mine Design Problems," In "*Engineering Design, Better Results through Operations Research Methods*," R.V. Levary, Editor, Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York, Chapter 7, Section 7.3, pp. 497-517.

24. Johnson, T.B. and R.J. Barnes (1988)

"Application of the Max Flow Algorithm to the Ultimate Pit Design," In "*Engineering Design, Better Results through Operations Research Methods*," R.V. Levary, Editor, Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York, Chapter 7, Section 7.4, pp. 518-531.

25. Johnson, T.B. and W.E. Sharp (1971)

"A Three-Dimensional Dynamic Programming Method for Optimal Ultimate Open Pit Design, " *U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations*, No. 7553, 25 p.

26. Journel, A.G. (1980)

"The Lognormal Approach to Predicting Local Distribution of Selective Mining Unit Grades," *Journal, Mathematical Geology*, Vol. 12, No. 4, pp. 285-303.

27. Journel, A.G and Huijbregts, C.J. (1978)

"Mining Geostatistics," Academic Press, London, 600 p.

28. Khalokakaie, R. (1999)

"Computer-Aided Optimal Open Pit Design with Variable Slope Angles," *Ph.D. Thesis*, University of Leeds, United Kingdom.

29. Khalokakaie, R., P.A. Dowd and R.J. Fowell (2000)

"Incorporation of Slope Design into Optimal Pit Design Algorithms," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry)*, Vol. 109, pp. A70-A76.

30. Khalokakaie, R., P.A. Dowd and R.J. Fowell (2000)

"Lerchs-Grossmann Algorithm with Variable Slope Angles," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry)*, Vol. 109, pp. A77-A85.

31. Kim, Y.C. (1978)

"Ultimate Pit Limit Design Methodologies Using Computer Models — The State of Art," *Journal, Mining Engineering - SME*, Vol. 30, No. 10, pp. 1454-1459.

32. Koenigsberg, E. (1982)

"The Optimum Contours of an Open Pit Mine : An Application of Dynamic Programming," In "*17<sup>th</sup> Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*," Johnson and Barnes, Editors, Society of Mining Engineers of the AIME, New York, Session 7, Chapter 26, pp. 274-287.

33. Krige, D.G. (1961)

"On the Departure of Ore Value Distributions from the Lognormal Model in South African Gold Mines," *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 61, pp.231-244; and Vol. 62, p. 63.

34. Krige, D.G. (1962)

"Effective Pay Limits for Selective Mining; Economic Aspects of Stopping through Unpayable Ore," *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 62, pp. 345-364.

35. Lerchs, H. and I.F. Grossmann (1965)

"Optimum Design of Open-Pit Mines, " *Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin*, Vol. 58, No. 633, pp. 47-54.

36. Lilly, P.A. (2000)

"The Minimum Total Cost Approach to Optimum Pit Slope Design, " *Proceedings of the Ninth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, " Panagiotou and Michalakopoulos, Editors, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 77-82.

37. MacKenzie, A.S. (1967)

"Optimum Blasting," *Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual Minnesota Mining Symposium*," Duluth, Minnesota, pp. 181-188.

38. Mackenzie, B.W. (1970)

"Evaluating the Economics of Mine Development, " *Canadian Mining Journal*, Vol. 91, No. 12, December 1970, pp. 43-47.

39 Noble, A.C. (1992)

"Ore Reserve/ Resource Estimation," In *"SME Mining Engineering Handbook,"* Vol.1, H.L. Hartman, Senior Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Section 5, Chapter 5.6, pp. 344-358.

40. O'Neil, T.J. (1980)

"Procedures for the Preliminary Financial Evaluation of Metal Mining Ventures," In *"Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry,"* A. Weiss, Editor, SME of the AIME, New York, Section 3.7, Chapter 4, pp. 556-580.

41. Onur, A.H. (1992)

"Optimal Open Pit Design and Planning, " *Ph.D. Thesis*, University of Leeds, United Kingdom.

42. Onur, A.H. and P.A. Dowd (1993)

"Open-Pit Optimization — Part 2: Production Scheduling and Inclusion of Roadways," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry),* Vol. 102, pp. A105-A113.

43. Pana, T.M. and R.K. Davey (1973)

"Open-Pit Mine Design," *SME Mining Engineering Handbook*, Vol. 2, Cummins and Given, Editors, AIME, New York, Section 30, Chap. 30.3, pp. 30-7 to 30-19.

44. Peters, W.C. (1978)

"Exploration and Mining Geology," John Wiley and Sons, New York, 696 p.

45. Pine, R.J. (1992)

"Risk Analysis Design Applications in Mining Geomechanics," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry),* Vol. 101, pp. A149-A158.

46. Plewman, R.P. (1970)

"The Basic Economics of Open Pit Mining, " In "Open Pit Mining Symposium 1970: Proceedings on the Planning Open Pit Mines" P.W.J. Van Rensburg, Editor, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Session 1, pp. 1-8.

47. Reibell, H.V. (1969)

"Deep Open-Pit Optimization," In "*A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry*," A. Weiss, Editor, SME of the AIME, New York, Section 4, pp. 359-372.

48. Rendu, J.M. and G. Mathieson (1990)

"Statistical and Geostatistical Methods," In "*Surface Mining: 2<sup>nd</sup> Edition*," Vol. 1, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 3, Section 3.3, pp. 301-348.

49. Ritchie, A.M. (1963)

"Evaluation of Rockfall and Its Control," *Highway Research Record*, Highway Research Board, Vol. 17, pp. 13-28.

50. Shuzhang Huang (1993)

"Computer-Based Optimization of Open-Pit Mining Sequences," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy: Section A (Mining Industry)*, Vol. 102, pp. A125-A133.

51. Sloan, D.A. (1983)

"Mine Management," Chapman and Hall, London, 495 p.

52. Soderberg, A. and D.O. Rausch (1968)

"Pit Planning and Layout," In "*Surface Mining*," E.P. Pfeider, Editor, The Seeley W. Mudd Series, AIME, New York, Section 4, Chapter 4.1, pp. 141-165.



53. Stucke, H.J. (1970)

"Discussion on Session 1: The Basic Economics of Open Pit Mining," In "Open Pit Mining Symposium 1970: Proceedings of the Planning Open Pit Mines" P.W.J. Van Rensburg, Editor, The South African institute of Mining and Metallurgy, pp. 251-252.

54. White, T.E. and P. Robinson (1995)

"The Use of Explosives in Quarrying," The Institute of Quarrying, Nottingham, United Kingdom, 212 p.

55. Whitman, R.V. (2000)

"Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 583-593.

56. Whittle, J. (1990)

"Open Pit Optimization," In "*Surface Mining : 2<sup>nd</sup> Edition*," Vol. 1, B.A. Kennedy, Editor, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, Chapter 5, Section 5.3, pp. 470-475.

57. Whittle, J. and C.L. Wharton (1995)

"Optimising Cut-Offs Over Time," In "*APCOM XXV 1995, Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries*," The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, pp. 261-265.

58. Whateley, M.K.G. and P.K. Harvey, Editors (1994)

"Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories, *Special Publication No. 79*, Geological Society, London, 271 p.

59. Wilke, F.L. and E.A. Wright (1984)

"Determining the Optimal ultimate Pit Design for Hard Rock Open pit Mines Using Dynamic programming (in German)," *Erzmetall*, Vol. 37, pp. 138-144.

60. Wright, E. A. (1987)

"The Use of Dynamic Programming for Open Pit Mine Design: Some Practical Implications," *Mining Science and Technology*, Vol. 4, January 1987, pp. 97-104.

61. Wright, E. A. (1990)

"Open Pit Mine Design Models: An Introduction with Fortran/77 Programs," *Series on Mining Engineering, Vol. 8*, Trans Tech Publications (Clausthal-Zellerfeld, Germany), 187 p.

62. Yamatomi, J., G. Mogi and U. Yamaguchi (1994)

"Computation Algorithms for Three-Dimensional Open Pit Designs, In "Proceedings 16<sup>th</sup> World Mining Congress," Vol. 1, Section B-41, pp. 592-601.

63. Yamatomi, J., G. Mogi, A. Akaike and U. Yamaguchi (1995)

"Selective Extraction Dynamic Cone Algorithm for Three-Dimensional Open Pit Designs," In "APCOM XXV 1995, Application of Computer and Operations Research in the Minerals Industries," The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, pp. 267-274.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก

### โปรแกรมการตัดมุมความลาดในบ่อเหมือง

เนื้อหางานวิจัย โครงการ “บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะสมที่สุด สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่ และเหมืองหิน” ที่ระบุไว้ในภาคผนวกนี้ เป็นการบรรยายเกี่ยวกับ โปรแกรมสำเร็จรูปที่ช่วยในการออกแบบตัดความลาดหน้าตะพักของบ่อเหมืองเปิด โปรแกรมจะคำนวณหาผลลัพธ์เป็นค่ามุมความชันทั้งรูปแบบเชิงกำหนดกับรูปแบบเชิงความน่าจะเป็น ทำให้วิศวกรมีทางเลือกที่จะใช้ค่ามุมความลาดที่เหมาะสมทั้งทางด้านความปลอดภัยของการทำงานภาคสนาม กับทางด้านความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

#### 10.1 คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับ โครงการวิจัยนี้ ไฟล์ทั้งหลายบรรจุไว้ในแผ่น CD และกล่องที่ใส่แผ่น CD ถูกทำให้ติดกับปกหลังด้านในของรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ซึ่งทีมงานพัฒนาโปรแกรม ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. สง่า ตั้งชวาต เป็นผู้วิจัยและค้นคว้ากับสร้างสมการต้นแบบ ที่เป็นผลเฉลยของค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพ ถ้ากำหนดให้มีการตัดความลาดที่ค่ามุมความชันค่าใดค่าหนึ่ง ผู้วิจัยยังกำหนดขั้นตอนวิธี (algorithm) รูปแบบของการคำนวณ การป้อนข้อมูลเข้า การจัดลำดับการคำนวณผลลัพธ์ กับแสดงผลของข้อมูลออก ตลอดจนการจัดรูปแบบของเมนูหน้าจอ ส่วนผู้เขียนโปรแกรม ได้แก่ นายสุรชัย ลิพทาเกียรติ (วศบ. โยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ทำหน้าที่ในการเลือกใช้ภาษาที่เขียนโปรแกรม ออกแบบโครงสร้างโปรแกรม กับกำหนดรหัสต้นฉบับ (source code) เพื่อคำนวณและแสดงผลลัพธ์

##### 10.1.1 การจัดเตรียมกับการติดตั้งโปรแกรม Slope Cut Design

โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป (packaged program) ที่คำนวณโดยใช้ภาษา Pascal และใช้ตัวแปลโปรแกรม (compiler) ด้วย Borland Delphi, Version 6 กำหนดให้มีการใช้งานบน Microsoft Windows 95, Windows 98 หรือ Windows อื่นที่ Version สูงกว่า

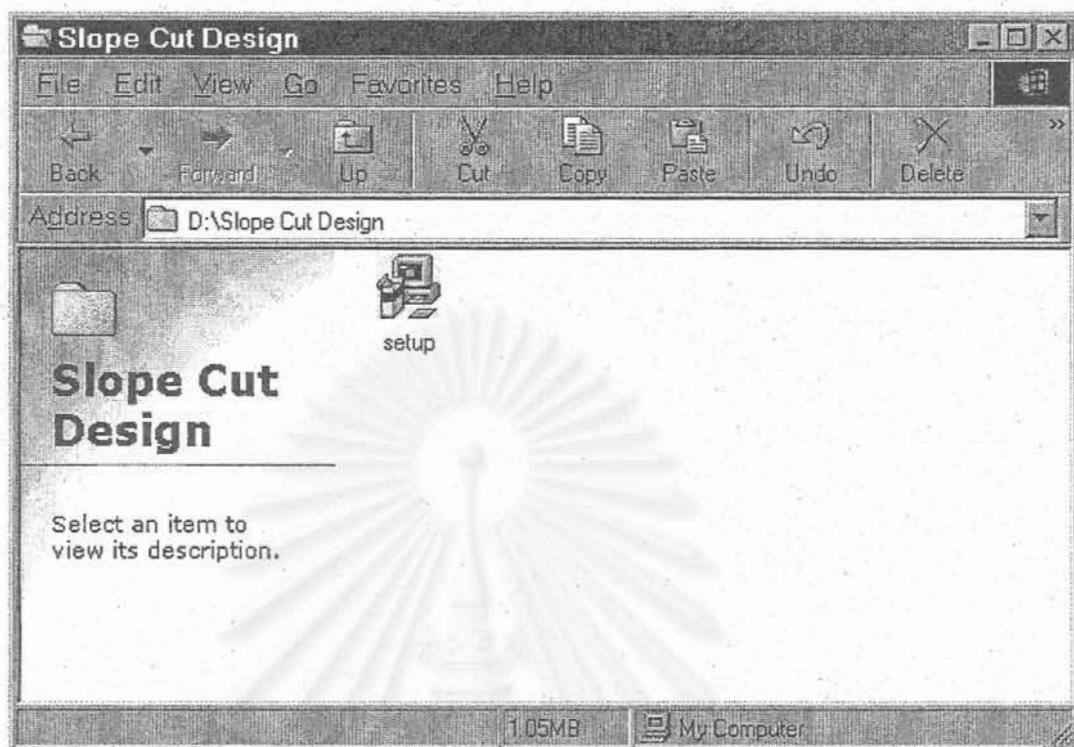
การจัดเตรียม โปรแกรม (setup) เพื่อลงในหน่วยขั้วงานหรือแผ่นบันทึก (disk drive) สามารถทำได้ทันทีเมื่อใช้แผ่น CD (ที่บรรจุในกล่องด้านในของปกหลัง) ใสในเครื่องคอมพิวเตอร์และเรียกตำแหน่งของหน่วยขั้วงานของแผ่น CD นั้น

### 10.1.2 ขั้นตอนการจัดเตรียมกับการติดตั้งโปรแกรม

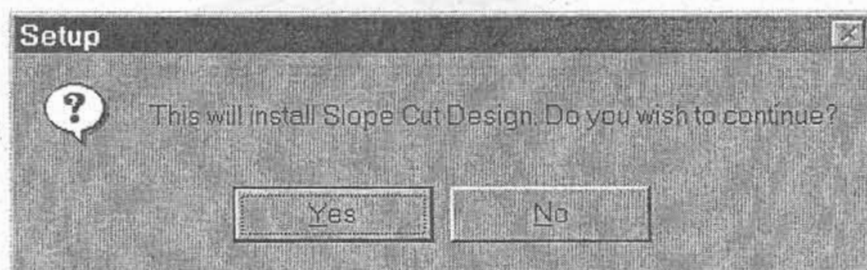
ขั้นตอนวิธีการจัดเตรียมโปรแกรม เพื่อติดตั้งลงในหน่วยขับจานหรือแผ่นบันทึกของคอมพิวเตอร์ของผู้ที่ต้องการใช้โปรแกรม Slope Cut Design นี้แสดงเป็นภาพของหน้าจอคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนเริ่มตั้งแต่รูปที่ 10.1 ถึงรูปที่ 10.6 สำหรับคำอธิบายเพิ่มเติม มีดังนี้

1. ไฟล์ที่บรรจุในแผ่น CD ที่แนบมากับรายงานฉบับสมบูรณ์ มีหลายไฟล์ ตั้งแต่ไฟล์ชื่อ Manual เป็นไฟล์คู่มือเพื่อการแนะนำโปรแกรม ไฟล์ชื่อ Pic เป็นไฟล์ภาพกราฟิกของรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการตัดความลาดทั้ง 4 กรณี กับไฟล์ชื่อ Slope Cut Design เป็นไฟล์โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาผลลัพธ์จากการตัดความลาด
2. ถ้าต้องการจะติดตั้งโปรแกรมลงในหน่วยขับจานของคอมพิวเตอร์ ใช้ Folder ของโปรแกรม ซึ่งปรากฏไฟล์ Setup.exe ดังรูปที่ 10.1 ที่เป็นลักษณะของภาพบนจอเพื่อให้สามารถจัดเตรียมและติดตั้งลงในคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้โปรแกรม
3. ขั้นตอนต่อมา โปรแกรม Setup จะเริ่มต้นตั้งคำถามผู้ใช้ เพื่อให้ยืนยันว่าจะดำเนินการติดตั้งโปรแกรม ซึ่งผู้ใช้ต้องกดปุ่มเมาส์ ตรงตำแหน่ง Yes (ดูรูปที่ 10.2)
4. ต่อมาโปรแกรมจะแสดงภาพบนหน้าจอเป็นคำอธิบายสั้น ๆ เพื่อแนะนำและให้ผู้ใช้โปรแกรมเลือกที่จะดำเนินการติดตั้ง (ดูรูปที่ 10.3)
5. หลังจากที่ใช้โปรแกรม กดปุ่มเมาส์ตรงตำแหน่ง Next ของรูปที่ 10.3 แล้ว โปรแกรมจะแสดงภาพหน้าจอเป็นรูปที่ 10.4 เพื่อให้ทำปฏิบัติการเลือกตำแหน่งของ disk drive และ directory เมื่อต้องการให้ดำเนินการในขั้นตอนต่อไป ให้กดปุ่มเมาส์ตรงคำว่า Next
6. ขั้นตอนต่อไปเป็นการสรุปกระบวนการจัดเตรียมโปรแกรม (setup) เพื่อที่จะเริ่มการติดตั้ง (installation) ดังภาพที่แสดงบนหน้าจอของรูปที่ 10.5 ถ้าหากต้องการให้โปรแกรมเริ่มกระบวนการติดตั้งให้กดปุ่มเมาส์ตรงตำแหน่ง Install โปรแกรมจะเริ่มทำการติดตั้ง
7. ถ้าหากเสร็จสิ้นกระบวนการติดตั้งแล้ว โปรแกรมจะแสดงเป็นภาพหน้าจอดังรูปที่ 10.6 ก่อนที่จะเริ่มใช้งานโปรแกรมหรือย้ายตำแหน่งของโปรแกรมให้ปรากฏเป็นสัญลักษณ์รูป (icon) เพื่อสร้างทางลัด (shortcut) บน desktop ต้องกดปุ่มเมาส์ตรงตำแหน่ง Finish เสียก่อน

อนึ่งมวลสารที่ต้องการทำการขุดเจาะนั้น อาจเป็นมวลหินหรือมวลดิน ดังนั้นจะมีเมนูให้เลือกว่าต้องการใช้โปรแกรม เพื่อหาค่าผลลัพธ์ของมวลสารประเภทใดก่อนเริ่มการใช้งานคำนวณค่าตามเงื่อนไขและสภาวะต่าง ๆ ดังหน้าจอที่แสดงไว้ในรูปที่ 10.7



รูปที่ 10.1 หน้าจอของคอมพิวเตอร์ เมื่อเริ่มเรียก โปรแกรมย่อย Setup.exe

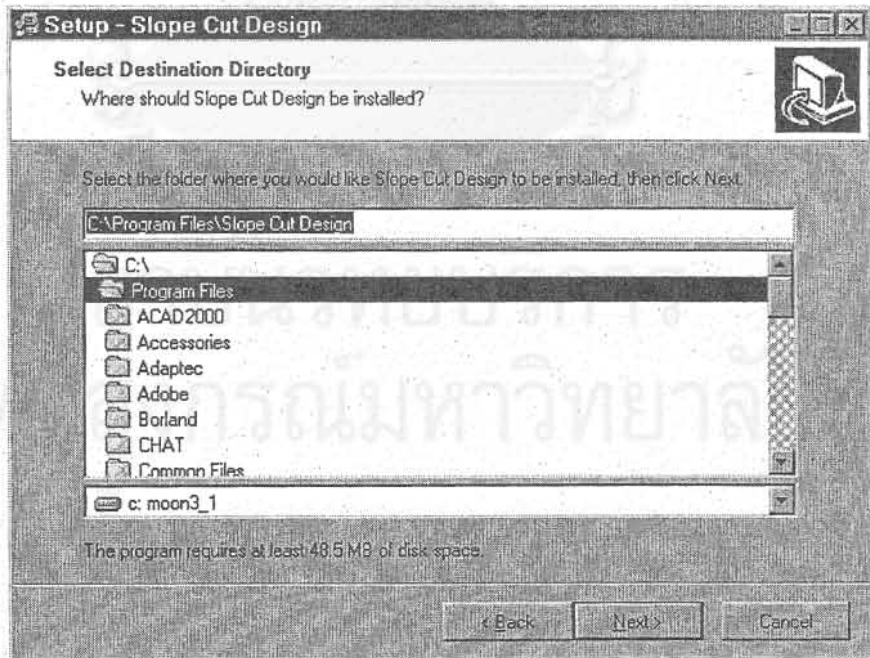


รูปที่ 10.2 หน้าจอที่ต้องการให้ผู้ทำปฏิบัติการยืนยันเรื่องการจัดเตรียม

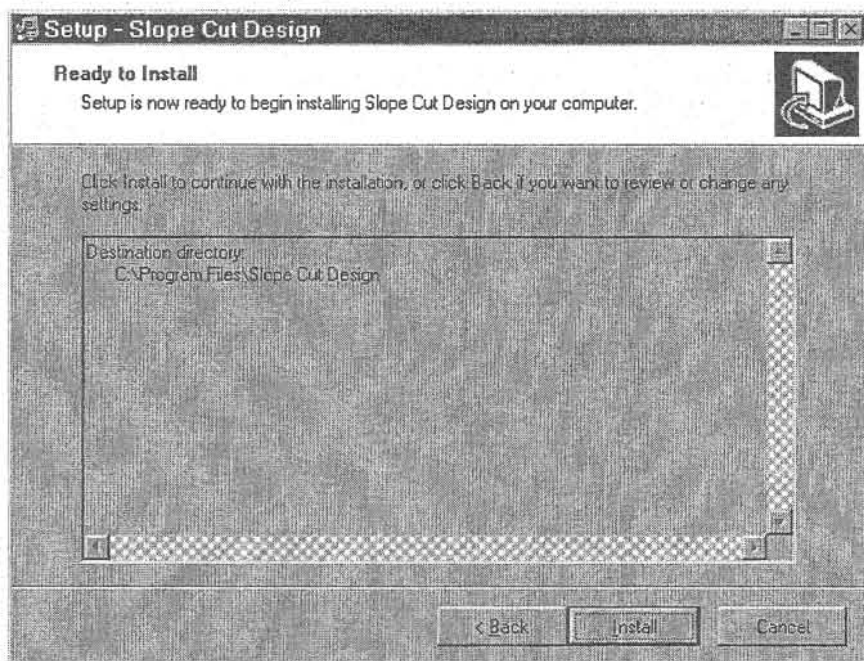




รูปที่ 10.3 คำแนะนำก่อนเริ่มกระบวนการจัดเตรียม โปรแกรม Slope Cut Design



รูปที่ 10.4 ตำแหน่งสมมุติที่ผู้ทำปฏิบัติการเลือก drive และ directory



รูปที่ 10.5 ผลสรุปเมื่อจัดเตรียมเสร็จแล้ว และกำลังจะเริ่มการติดตั้ง โปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 10.6 หน้าจอเมื่อการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ แต่ผู้ทำปฏิบัติการ ต้องเลือกปุ่มเมาส์ ตรงตำแหน่ง Finish ด้วย

## 10.2 การใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป Slope Cut Design

เมื่อเริ่มต้นใช้งาน โปรแกรมบน Windows ภาพหน้าจอของโปรแกรมหลัก ที่ปรากฏจะเป็นดังรูปที่ 10.8 จุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้โปรแกรมมีทางเลือก (option) ที่จะหาผลลัพธ์ตามสภาพหน้างานขุดเจาะมวลสาร (หินหรือดิน) ในบ่อเหมืองเปิด

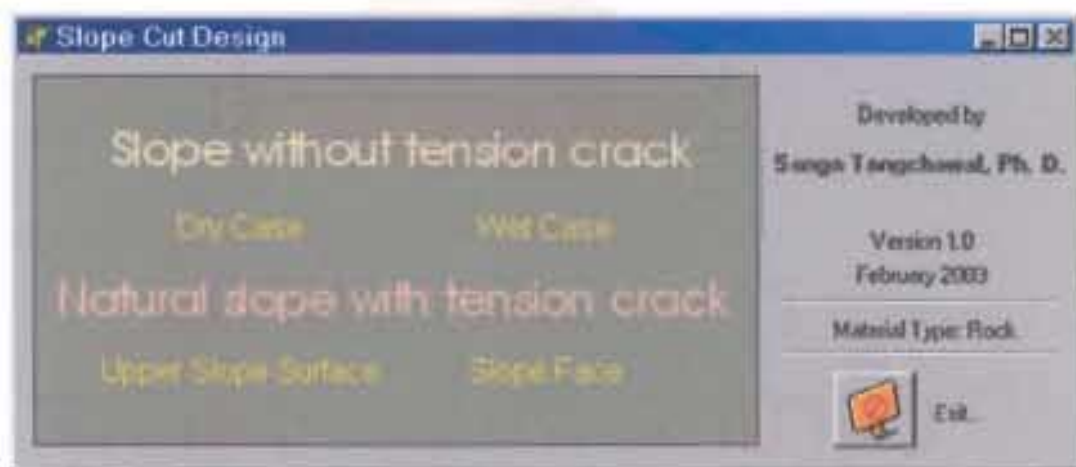
### 10.2.1 เงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการณของมวลสารที่ขุดเจาะ

การบรรยายหลักการและเงื่อนไขตามสภาวะการณของมวลสารในรูปแบบที่แตกต่างกันนี้ได้นำเสนอหลักการกับสมการต้นแบบไว้ในในบทที่ 9 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ ส่วนการแสดงผลภาพบนหน้าจอเมื่อเริ่มต้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มีดังต่อไปนี้

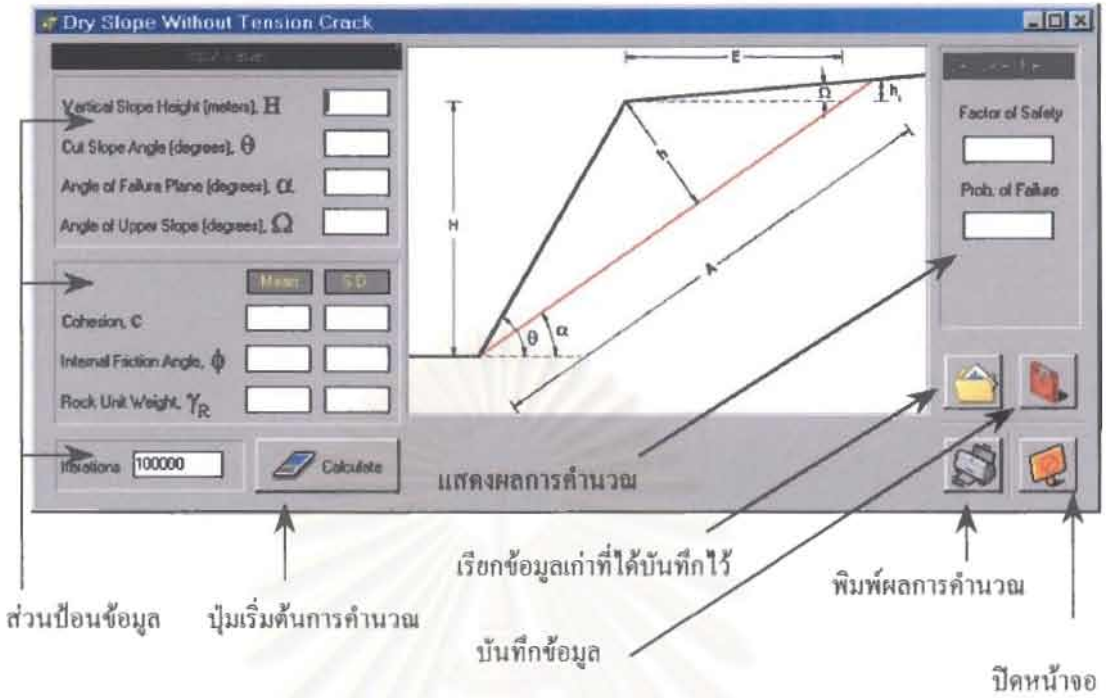
1. กรณีแรกเป็น condition I: Dry Case เมื่อกดปุ่มเมาส์ตรงตำแหน่ง Dry Case โปรแกรมจะแสดงหน้าจอเป็นรูปแบบเมนูที่ทีมงานวิจัยสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับหาผลลัพธ์ของมวลสารที่แห้งไม่มีความคั่นน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง (ดูรูปที่ 10.9) ในกระบวนการคำนวณ ส่วนรายละเอียดอื่นที่แสดงตำแหน่งที่ผู้ใช้ควรลากเมาส์ไปที่ใด ได้มีการแสดงเป็นแนวลูกศรพร้อมกับคำอธิบายไว้แล้วในภาพหน้าจอของรูปที่ 10.9
2. กรณีที่ 2 เป็น condition II: Wet Case ที่เป็นการตั้งสมมุติฐานให้มวลสารมีน้ำได้ดินมาแทรกในบางส่วน (partial wet) หรือมวลสารอิ่มตัว (saturated) ถ้าผู้ใช้โปรแกรมกดปุ่มเมาส์ตรงตำแหน่ง Wet Case จะได้รูปแบบหน้าจอแสดงไว้ในรูปที่ 10.10
3. จากทั้ง 2 กรณีดังกล่าว มีการตั้งสมมุติฐานว่าไม่มีปรากฏการณของรอยแตกจากแรงดึง (tension crack) ปรากฏในมวลสารที่ต้องการตัดความลาด แต่สภาวะการณปกติที่พบบ่อย มวลสารมักเกิดรอยแตกจากแรงดึง (ที่เป็นผลจากน้ำบนพื้นผิวดินกัดเซาะ หรือจากการระเบิดหิน) ทำให้ต้องมีการสร้างสมการต้นแบบของความลาดที่เกิดตามธรรมชาติ (natural slope) ขึ้นมาเพื่อแยกวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ถ้าผู้ใช้เลือกใช้โปรแกรมของ Natural slope with tension crack ก็จะมีเงื่อนไขที่แตกต่าง 2 รูปแบบ รูปที่ 10.11 เป็นกรณีที่มียรอยแตกจากแรงดึงปรากฏอยู่บนพื้นผิวด้านบนของตะพักด้านบนของความลาด (upper slope surface) ซึ่งจะมีภาพที่ปรากฏกับการป้อนข้อมูลเข้าที่แตกต่างกับ กรณีที่มีรอยแตกจากแรงดึงปรากฏอยู่บนหน้าความลาด (slope face) ดังรูปที่ 10.12 ผู้ใช้โปรแกรมจึงควรตรวจสอบสภาวะหน้างานขุดเจาะมวลสารก่อนเลือกว่าจะใช้กรณีไหน



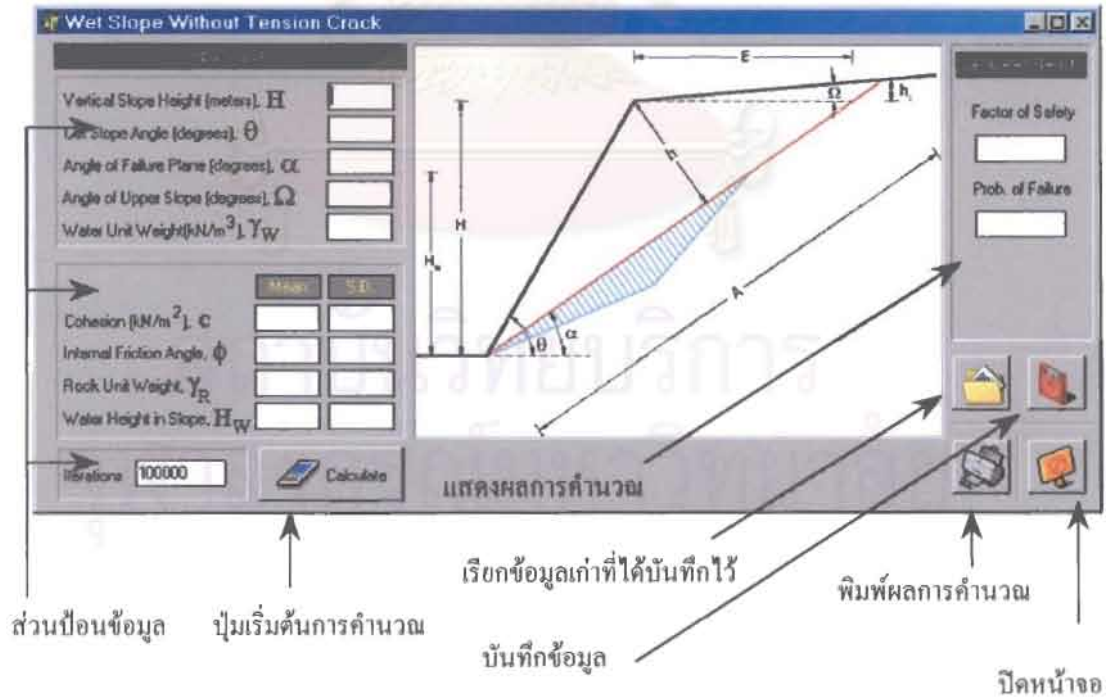
รูปที่ 10.7 หน้าจอที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องเลือกประเภทของมวลสาร ก่อนเริ่มกระบวนการป้อนข้อมูลเข้าและคำนวณค่าผลลัพธ์



รูปที่ 10.8 เงื่อนไขและรูปแบบที่โปรแกรม Slope Cut Design ทำผลลัพธ์ เจริญเสถียรภาพจากการพังทลายตามแนวระนาบได้

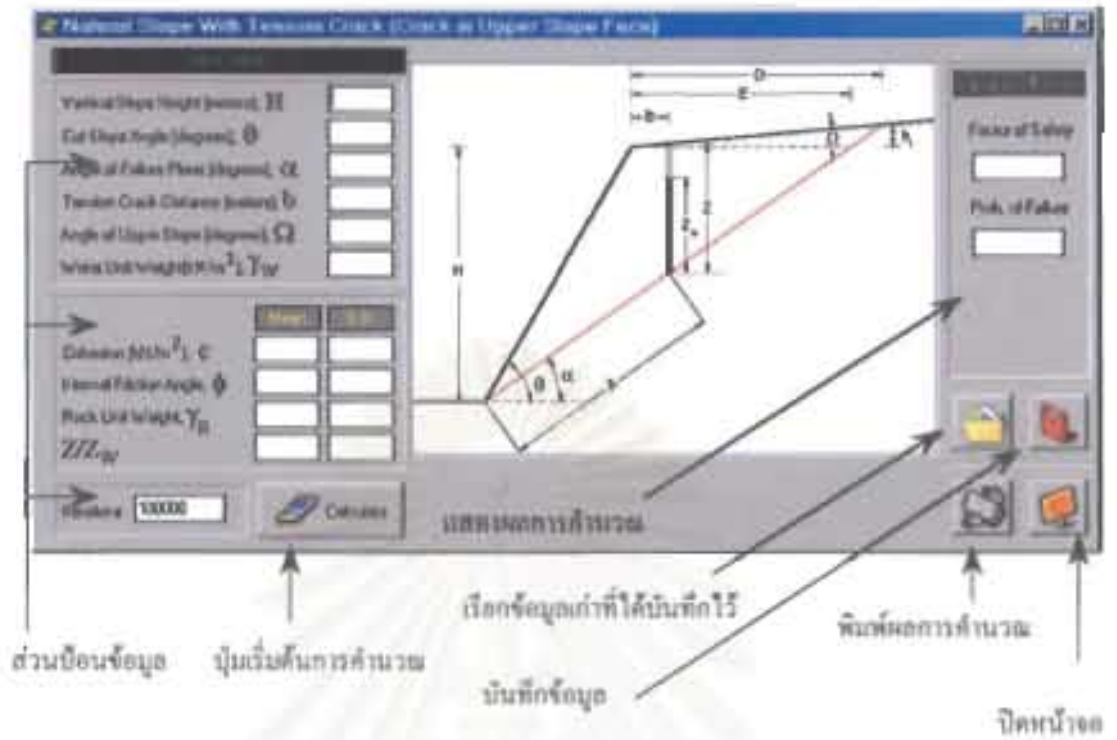


รูปที่ 10.9 ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการ ต้องป้อนข้อมูลเข้า สำหรับ dry case

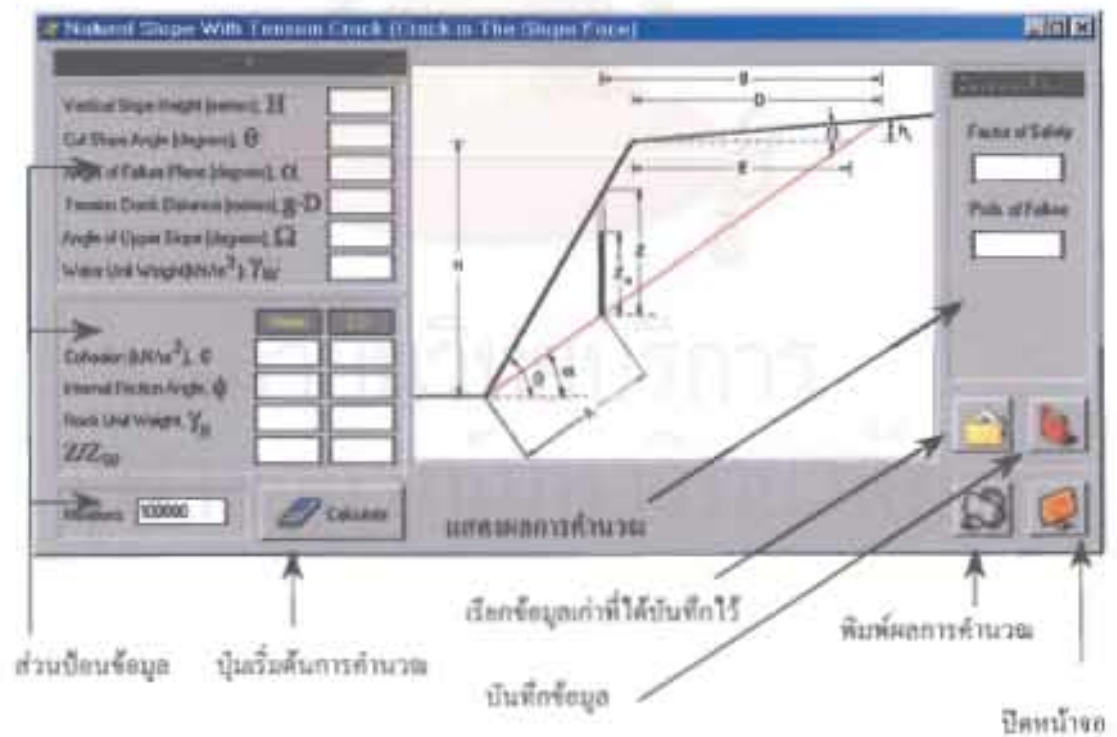


รูปที่ 10.10 ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการ ต้องป้อนข้อมูลเข้า สำหรับ wet case





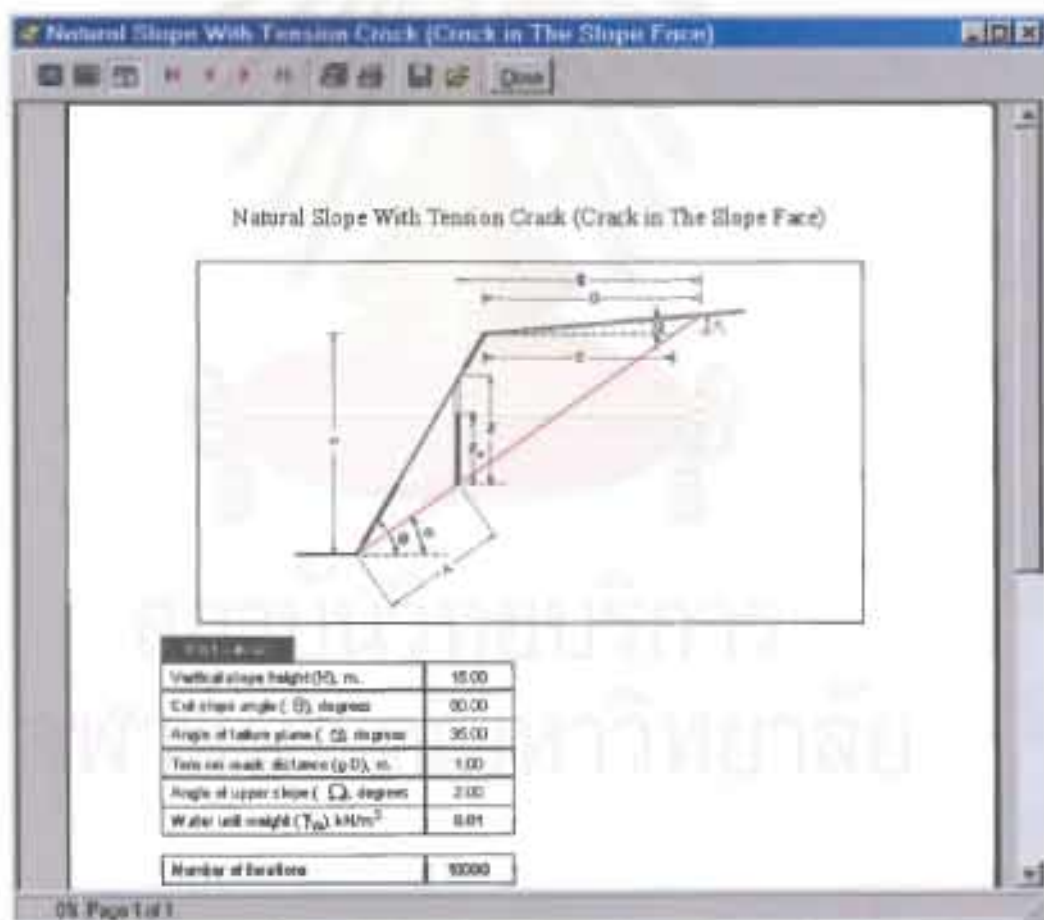
รูปที่ 10.11 ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการต้องป้อนข้อมูลเข้า  
 สำหรับ natural slope with tension crack in the upper slope surface



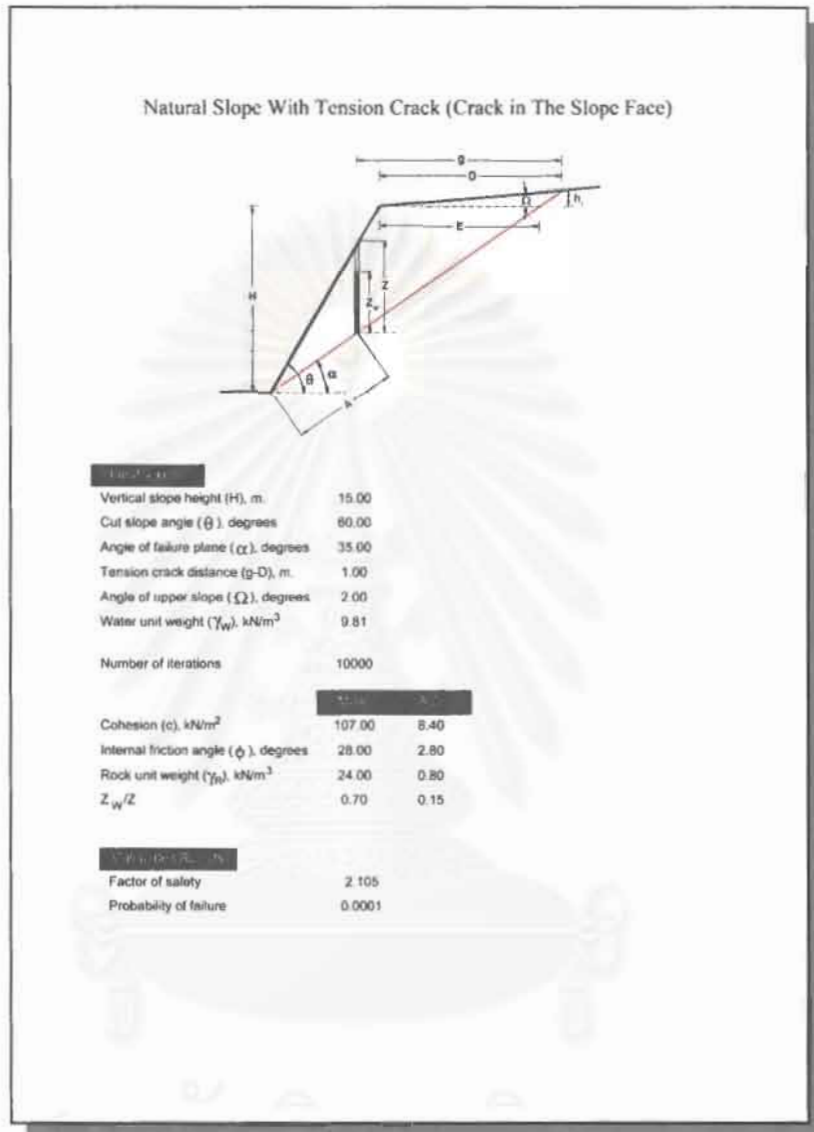
รูปที่ 10.12 ภาพกราฟิกกับรูปแบบเมนูทางเลือก ที่ผู้ทำปฏิบัติการ ต้องป้อนข้อมูลเข้า  
 สำหรับ natural slope with tension crack in the slope face

### 10.2.2 ตัวอย่างการแสดงผลสำหรับข้อมูลออกที่ได้จากการทำปฏิบัติการ

ตัวอย่างที่นำเสนอในรูปที่ 10.13 และรูปที่ 10.14 เป็นการแสดงผลที่ได้จากการทำปฏิบัติการ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Slope Cut Design ผู้วิจัยได้เลือกสภาวะการพังของมวลสารที่เป็น condition IV: Natural slope with tension crack in the slope face หลังจากที่ผู้ใช้โปรแกรมป้อนข้อมูลเข้า (ตามรูปที่ 10.13) และเลือกที่จะให้โปรแกรมคำนวณซ้ำ (iteration) เพื่อหาค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น โดยการสุ่มเป็นจำนวน 10,000 ครั้ง สำหรับตัวแปรที่เป็น random variables ของ condition IV นั่นคือ ค่าตัวแปร cohesion, internal friction angle, unit weight of mass และ ratio of water height in the tension crack



รูปที่ 10.13 แผนภูมการป้อนข้อมูลเข้า สำหรับตัวอย่างการตัดความลาด  
ที่เป็น natural slope with tension crack in the slope face.



รูปที่ 10.14 แสดงการทำการสุ่ม กับค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงเสถียรภาพ ของตัวอย่าง ความลาดที่เป็น natural slope with tension crack in the slope face

ค่าผลลัพธ์สุดท้ายดังแสดงไว้ในรูปที่ 10.14 จะมี 2 ค่า นั่นคือในการคำนวณค่าตัวเลขเชิงเสถียรภาพตามสมมติฐานของการกำหนดตัวแปร (ที่สมมุติเป็นค่าเฉลี่ย) ดังนี้ เมื่อทำการตัดความลาดที่ความสูงในแนวตั้ง 15 เมตร มุมเอียงตะพักด้านบน 2 องศา และค่ามุมความชันของการตัดความลาด 60 องศา กำหนดให้ค่าคุณสมบัติมวลสารที่เป็นหินปูน มีหน่วยน้ำหนัก  $24 \text{ kN/m}^3$  ระบายที่มีโอกาสเกิดการพังทลายได้ตัดผ่านมวลสารและเอียงเป็น มุม 35 องศา มีค่าคุณสมบัติของค่า cohesion กับค่า internal friction angle เท่ากับ  $107 \text{ kN/m}^2$  กับ 28 องศา ตามลำดับ และอัตราส่วนของระดับน้ำในรอยแตกจากแรงดึงกำหนดให้เป็น 0.7 ส่วนตำแหน่งของรอยแตกอยู่ห่างจาก slope crest ในแนวราบ เท่ากับ 1 เมตร จากการคำนวณโดยโปรแกรมจะได้ค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงกำหนด คือ  $F = 2.105$  สำหรับค่าตัวเลขเชิงความน่าจะเป็นที่เป็นผลจากการทำการคำนวณซ้ำเป็นจำนวน 10,000 ครั้ง จะได้ ค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น คือ  $\text{probability of failure} = 0.0001$

อนึ่งตามที่ได้บรรยายหลักการไว้ในบทที่ 9 ค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงกำหนดจะได้เป็นตัวเลขค่าเดียวเพราะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร ในบางครั้งโปรแกรมสำเร็จรูปอาจแสดงค่าตัวเลขผลลัพธ์เชิงความน่าจะเป็น ระบุเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษว่า less than 1/10000 ถ้าหากว่าได้ค่าผลลัพธ์จากการคำนวณซ้ำของค่าโอกาสความน่าจะเป็นจากการพังทลายน้อยกว่า 0.0001 หมายความว่าจากกรณีที่มีการประเมินผลนี้ โอกาสที่การพังทลายจะเกิดขึ้นเมื่อตัดความลาดชันที่ค่ามุมดังกล่าว มีความเป็นไปได้ต่ำมาก