

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องบัดหินผสมในการผลิตปูนมอร์ต้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF ROLLER MILL PARAMETER FOR AGGREGATED LIMESTONE IN MORTAR  
PRODUCTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องบดหินผสมในการผลิต ปูนมอร์ต้า
โดย	นายปรัชญ์พล พวงศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูตีมา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์)	

ปรัชญ์พล พวงศิริ : การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเครื่องบดหินผสมในการผลิตปูนมอร์ต  
 ต้า. ( ANALYSIS OF ROLLER MILL PARAMETER FOR AGGREGATED LIMESTONE  
 IN MORTAR PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

ปูนซีเมนต์มอร์ต้าได้รับการพัฒนาเพื่อใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง  
 วัตถุประสงค์สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนคือทราย กระบวนการบดเป็นกระบวนการหนึ่งของการผลิตเพื่อ  
 ลดขนาดของหินปูนเป็นทรายให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ (ขนาด 0.1-0.6 มม.) ส่วนที่เหลือจะเป็นผง  
 ละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 มม. อาจเป็นมลภาวะทางอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องมีการจัดเก็บและ  
 กำจัดต่อไป การศึกษานี้จึงได้ทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องบดแบบ  
 ลูกกลิ้งแนวตั้งเพื่อปรับปรุงการบดให้สามารถเพิ่มสัดส่วนของทรายที่ได้ขนาดและลดปริมาณผงหรือ  
 ฝุ่นละเอียดลง จากผลการทดลองได้ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับการปรับตั้งเครื่องบด  
 แบบลูกกลิ้งแนวตั้งดังนี้ อัตราป้อนวัตถุดิบ 130 ตัน/ชั่วโมง แรงอัดบด 103 บาร์ ความเร็วในการ  
 หมุนของโต๊ะ 9.5 รอบต่อนาที และอัตราการดูดผงละเอียด 37,838 ลบ.ม./ชั่วโมง ทำให้สัดส่วน  
 ของทรายเพิ่มจาก 62.91% เป็น 77.34% คิดเป็นผลผลิตเพิ่มขึ้น 14% ในขณะที่สัดส่วนของผง  
 ละเอียดลดลงจาก 37% เป็น 14.80%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
 ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170939621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Limestone Milling Process, Cement Industry, Mortar Production,  
Vertical Roller Mill

Prachapol Poungsiri : ANALYSIS OF ROLLER MILL PARAMETER FOR  
AGGREGATED LIMESTONE IN MORTAR PRODUCTION. Advisor: Assoc. Prof.  
JITTRA RUKIJKANPANICH, D.Eng.

Mortar cement has been developed for widespread use in the construction industry. One of the important raw materials used in the mortar production is sand. Milling process was once used to digest aggregated limestone to produce sand of the desired size (0.1-0.6 mm.), with the residue being a significant volume of powder smaller than 0.1 mm. The powder or fine dust can pollute the air, interrupt the milling process, and necessitate storage and removal of the powder. The optimal set parameters of the vertical roller mill were investigated in this study to improve the limestone milling operation, increase the desired sand, and decrease powder. According to the experimental results, the estimated values of parameters reflected that feed rate of raw material at 130 tons per hour, milling pressure 103 bar, table rotating speed 9.5 rpm, and find dust suction rate at 37,838 m<sup>3</sup>/h could increase the proportion of sand from 62.91% to 77.34% implying productivity risen by 14% while the proportion of the percentage of fine powder decreased from 37.00% to 14.80%

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้โดยการได้รับความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา ฐักิจการพานิช ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้คำแนะนำและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ ตลอดจนการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่เสมอมาตั้งแต่เริ่มจนสำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา ศาสตราจารย์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เสียสละเวลามาช่วยตรวจสอบความถูกต้อง และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองงานกรณีศึกษา รวมไปถึงคณะผู้บริการ หัวหน้างาน ตลอดจนผู้ร่วมปฏิบัติงานทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัย นอกจากนี้ยังร่วมกันทำงานด้วยความมุ่งมั่นและตั้งใจจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี และประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

ปรัชญ์พล พวงศิริ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ตัวชี้วัดของงานวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 1.2.....	7
บทที่2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment).....	10
2.1.1 หลักการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล [3].....	10
2.1.2 รูปแบบทั่วไปของการทดลองแฟคทอเรียล.....	15
2.2 เครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical roller mill).....	18
2.2.1 วิธีการทำงานในส่วนของการบดวัตถุดิบ.....	19
2.2.2 วิธีการทำงานในส่วนของการคัดแยกขนาด.....	23
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง .....	24
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง .....	26
2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 ระยษณียามถึงปัญหา (Define Phase).....	28
3.1 ปัญหาทางธุรกิจ (Business case).....	28
3.2 แลลงการณัปัญหา (Problem statement).....	28
3.3 กำหนดตัวชี้วัดของโครงการ (Project metric).....	29
3.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objective) .....	29
3.5 ขอบเขตของโครงการ (Project scope) .....	29
3.6 ข้อจำกัดของโครงการ (Project constraints).....	29
3.7 สมาชิกผู้ร่วมทำโครงการ (Team member).....	30
3.8 ระยะเวลาดำเนินโครงการ (Project timeline).....	30
3.9 สรุปขั้นตอนการนิยามปัญหา.....	30
บทที่ 4 ระยะการวัด (Measure phase).....	31
4.1 ศึกษากระบวนการบดหินปูนของโรงงานกรณีศึกษา .....	31
4.1.1 การป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องบด (Feeding).....	32
4.1.2 การบดหินปูน (Milling).....	35
4.1.3 การคัดแยกขนาดหินปูน (Classifying).....	36
4.1.4 วัตถุดิบหินปูน (Limestone).....	39
4.1.5 ตัวแปรตอบสนอง (Response variable).....	40
4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis; MSA).....	41
4.2.1 วิเคราะห์ความแปรผันของตำแหน่ง (Location Variation Analysis).....	42
4.2.2 วิเคราะห์ความแปรผันของความกว้าง (Width Variation Analysis).....	44
4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis; PCA) .....	50



4.4	สรุประยะการวัด .....	52
บทที่ 5	ระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) .....	54
5.1	วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา .....	54
5.2	การทดลองเบื้องต้น .....	58
5.2.1	ออกแบบการทดลองเบื้องต้น .....	58
5.2.2	วิธีการทดลอง .....	60
5.2.3	วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น .....	62
5.2.4	การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง .....	67
5.3	สรุประยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา .....	69
บทที่ 6	ระยะปรับปรุงกระบวนการ (Improvement phase) .....	71
6.1	ปัจจัยนำเข้าการทดลอง .....	71
6.2	ออกแบบการทดลอง .....	72
6.3	วิธีการทดลอง .....	74
6.4	วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	76
6.5	การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง .....	83
6.6	การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม .....	85
6.7	สรุประยะปรับปรุงกระบวนการ .....	88
บทที่ 7	ระยะติดตามและควบคุมผล (Control phase) .....	89
7.1	ตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง .....	89
7.2	วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง .....	91
7.3	ติดตามผลหลังการปรับปรุง .....	94
บทที่ 8	สรุปผลงานวิจัย .....	97
8.1	ระบายนิยามปัญหา .....	97
8.2	ระยะการวัด .....	97

8.3 ระยะเวลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา .....	98
8.4 ระยะเวลาปรับปรุงกระบวนการ .....	99
8.5 ระยะเวลาติดตามและควบคุม.....	100
8.6 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย.....	100
บรรณานุกรม.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	105



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

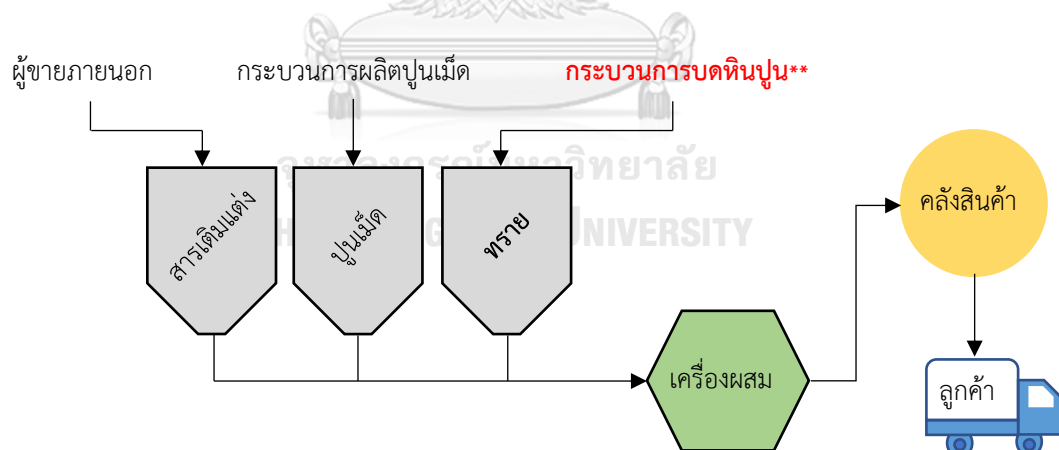
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีบทบาทและความสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในประเทศไทยอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ถือเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตรวมกันทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ 60 ล้านตันต่อปี [1] ซึ่งหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการเป็นอย่างมากก็คือ ปูนมอร์ต้า (Mortar)

ปูนมอร์ต้าหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปูนสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกพัฒนาต่อมาจากปูนซีเมนต์ เพื่อช่วยให้การทำงานมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยปกติแล้วผู้ใช้งานปูนซีเมนต์จะต้องมีทั้งความรู้และพื้นที่ในการผสมปูนตามสัดส่วนของลักษณะการใช้งาน แต่สำหรับการใช้งานปูนมอร์ต้านั้นเพียงแค่นำไปผสมกับน้ำก็สามารถใช้งานได้ทันที นอกจากนี้ทางบริษัทผู้ผลิตยังมีการควบคุมมาตรฐานในขั้นตอนการผสมปูนมอร์ต้าซึ่งจะทำให้ลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนของการผสมปูนอีกด้วย และเนื่องจากปูนมอร์ต้ามีอายุการเก็บรักษาที่จำกัด ดังนั้นการผลิตปูนมอร์ต้าของโรงงานกรณีศึกษาจึงเป็นการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า (Make to order) เป็นหลัก

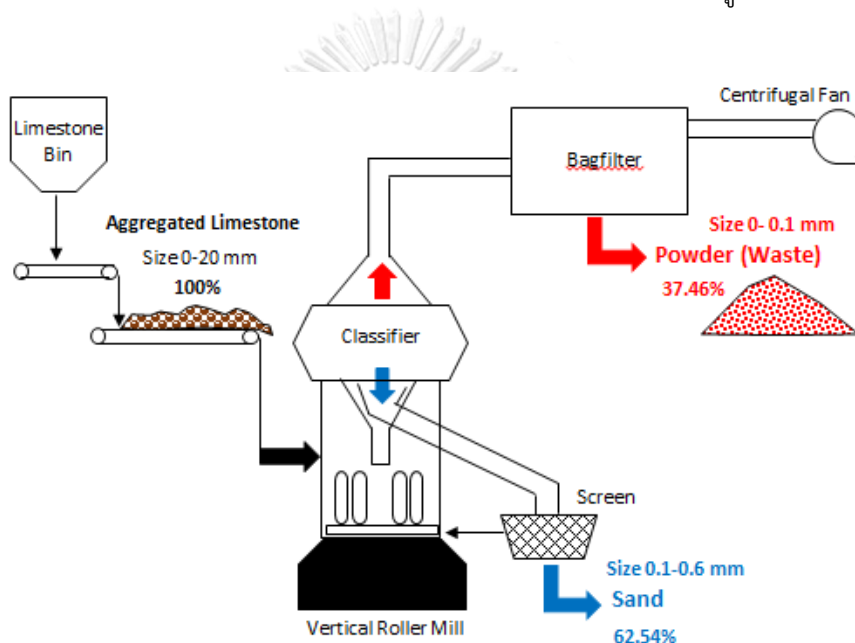


ภาพที่ 1.1 ส่วนผสมในกระบวนการผลิตปูนมอร์ต้า

โดยทั่วไปแล้วในกระบวนการผลิตปูนมอร์ต้าจะประกอบไปด้วยวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ (Cement), ทราย (Sand) และสารเติมแต่ง (Additive) ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษามีวิธีการจัดหาวัตถุดิบแต่ละชนิดจากแหล่งที่มาแตกต่างกัน และนำวัตถุดิบแต่ละชนิดมาจัดเก็บแยกกันไว้ในถัง ดังภาพที่ 1.1 หลักจากนั้นวัตถุดิบทั้งหมดจะถูกนำไปผสมและคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง

ผสมปูน โดยมีสัดส่วนในการผสมขึ้นอยู่กับสูตรของแต่ละบริษัทผู้ผลิต และประเภทการใช้งาน เช่น งานฉาบ งานก่อ งานเทพื้น หรืองานซ่อมแซมทั่วไป เมื่อวัตถุดิบทั้งหมดผสมกันจนกลายเป็นปูนมอร์ต้าแล้วจะนำไปจัดเก็บไว้ในไซโลเพื่อบรรจุถุงหรือโหลคิใส่รถบรรทุกขายให้กับลูกค้าต่อไป

วัตถุดิบทรายถือเป็นส่วนผสมหลักที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้กับโครงสร้างของปูนมอร์ต้า และทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานและความทนทานดีขึ้น [2] ซึ่งปูนมอร์ต้าบางประเภทใช้ทรายเป็นส่วนผสมถึง 65-68 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงให้ความสำคัญกับขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบทรายเป็นอย่างมาก เพื่อให้มีวัตถุดิบเพียงพอต่อการผลิตปูนมอร์ต้าและไม่ให้เกิดความล่าช้าในกระบวนการผลิตที่อาจจะส่งผลกระทบต่อลูกค้า



ภาพที่ 1.2 กระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบทรายของโรงงานกรณีศึกษาใช้วิธีการนำหินปูน (Limestone) จากเหมืองมาลดขนาดด้วยด้วยกระบวนการของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical roller mill process) แสดงดังภาพที่ 1.2 ซึ่งเครื่องจักรทั้งหมดในกระบวนการทำงานแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Interlock นั่นคือกระบวนการจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อเครื่องจักรทุกตัวอยู่ในสภาวะที่พร้อมใช้งาน และเริ่มทำงานตามลำดับที่ได้มีการตั้งค่าไว้ แต่ถ้ามีอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเกิดการขัดข้อง หรือเกิดปัญหาในขั้นตอนการทำงานกระบวนการของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งจะหยุดทำงานทันที หรือไม่สามารถทำงานได้จนกว่าจะได้รับการแก้ไข

กระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งเริ่มจากการให้รถบรรทุกนำหินปูนที่มีขนาดตั้งแต่ 0 – 20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.3 (a) จากเหมืองมาเทลงบนสายพานลำเลียงมาเก็บไว้ในถัง และป้อนเข้าเครื่องบดด้วยสายพานลำเลียงแบบเครื่องชั่งน้ำหนัก (Conveyor weigh scale) หินปูนบางส่วนที่โดนบดจนมีอนุภาคเล็กจะถูกลำเลียงขึ้นสู่อุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier) ที่ติดตั้งอยู่เหนือเครื่องบด และคัดแยกออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือส่วนที่มีขนาด 0.1 – 0.6 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.3 (b) เรียกว่า ทราย (Sand) ซึ่งจะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังทรายที่มีความจุ 840 ตัน ก่อนส่งไปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนมอร์ต้าในลำดับถัดไป และอีกส่วนหนึ่งคือส่วนที่มีขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1.3 (c) มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหมือนแป้ง เรียกว่า ผงละเอียด (Fine powder) และถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาถือว่าผงละเอียดนี้เป็นของเสีย (waste) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง จึงต้องหาวิธีที่จะกำจัดออก เนื่องจากถ้าไซโลเต็มก็จะทำให้กระบวนการบดหินปูนต้องหยุดชะงักไปด้วย



(a) หินปูนขนาดผสม

(b) ทราย (0.1-0.6 มม.)

(c) ผงละเอียด (&lt;0.1 มม.)

ภาพที่ 1.3 ลักษณะของหินปูนก่อนและหลังผ่านกระบวนการบด

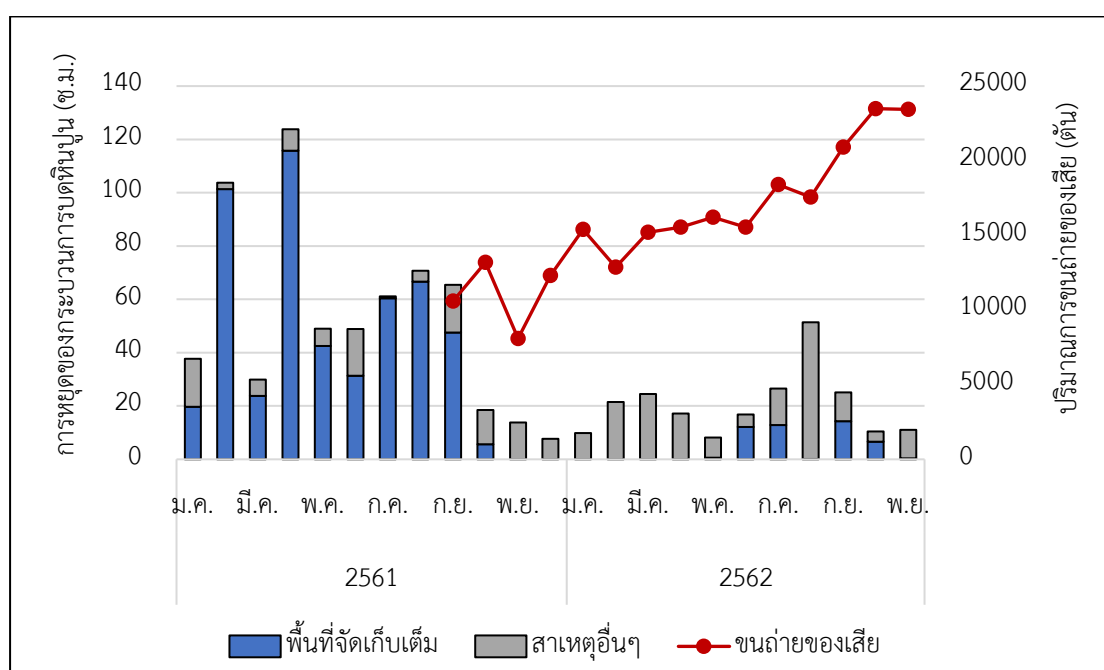
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

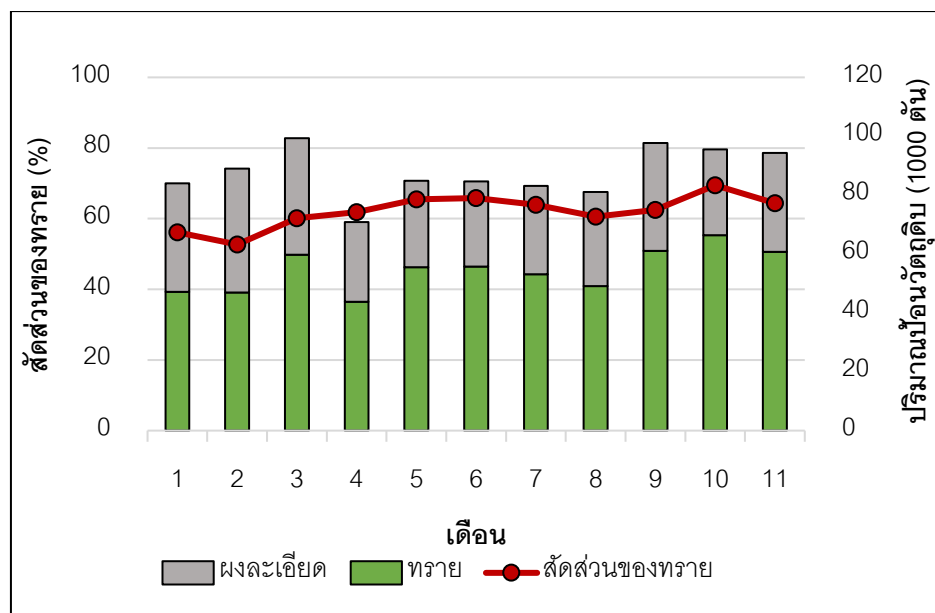
จากการเก็บข้อมูลการหยุดชะงักของกระบวนการบดหินปูนแต่ละเดือน แสดงในรูปแบบกราฟ ดังภาพที่ 1.4 พบว่าปี พ.ศ. 2561 กระบวนการบดหินปูนเกิดการหยุดชะงักเป็นระยะเวลานาน และส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการที่ไซโลจัดเก็บผงละเอียดเต็ม (กราฟแท่งสีน้ำเงิน) ทำให้ต้องหยุดรอเพื่อขนถ่ายผงละเอียดไปกำจัดที่อื่น ต่อมาปัญหานี้ส่งผลทำให้กระบวนการผลิตปูนมอร์ต้าไม่สามารถผลิตได้ตามความต้องการของลูกค้าเนื่องจากวัตถุดิบทรายไม่เพียงพอ

เดือน กันยายน พ.ศ.2561 มีการแก้ไขปัญหาโดยเริ่มมีการนำรถบรรทุกมาขนถ่ายผงละเอียดออกจากไซโลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาเพื่อไม่ให้กระบวนการบดหินปูนต้องหยุดชะงัก ซึ่งก็ทำให้ปัญหาการหยุดชะงักของกระบวนการบดหินปูนลดลงอย่างเห็นได้ชัด และบางเดือนไม่มีการหยุดชะงักจากสาเหตุนี้เลย แต่ในขณะเดียวกันก็เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากการขนถ่ายผงละเอียด และมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 1.4 (กราฟเส้นสีแดง) จากความต้องการปูนมอร์ต้าของลูกค้าที่มีมากขึ้น และในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2562 มีการขนถ่ายของเสียออกเป็นจำนวน 23,431.5 ตัน คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น 307,421.4 บาท นอกจากนี้การขนส่งผงละเอียดด้วยรถบรรทุกทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเป็นฝุ่นละอองในอากาศ และเป็นปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศภายในโรงงานอีกด้วย ทำให้จำเป็นต้องทำปรับปรุงกระบวนการบดหินปูนเพื่อให้มีสัดส่วนที่เป็นผงละเอียดลดลง ในขณะเดียวกันจะทำให้สัดส่วนทรายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดผลผลิตสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 1.4 การหยุดชะงักของกระบวนการบดหินปูนและปริมาณการขนถ่ายผงละเอียดเพื่อไปกำจัด



ภาพที่ 1.5 สัดส่วนของทรายและผงละเอียดต่อปริมาณการป้อนวัตถุดิบ

จากการศึกษากระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของโรงงานกรณีศึกษา พบว่าโดยปกติแล้วเครื่องบดชนิดล้อยอดแนวตั้งนิยมใช้ในการลดขนาดวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูง แต่เนื่องจากมีสาเหตุบางประการที่ทำให้โรงงานกรณีศึกษานำมาดัดแปลงและใช้ในกระบวนการบดหินปูนเพื่อผลิตเป็นทรายที่มีขนาดตามความต้องการ 0.1 – 0.6 มิลลิเมตร และตั้งค่าพารามิเตอร์การทำงานตามประสบการณ์ของพนักงานควบคุมเครื่องจักร เมื่อเก็บข้อมูลในสภาวะการทำงานปัจจุบันของกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง พบว่าในการป้อนวัตถุดิบหินปูนเฉลี่ย 130-150 ตันต่อชั่วโมง ได้สัดส่วนของทรายประมาณ 62 เปอร์เซ็นต์ดังภาพที่ 1.5 (กราฟเส้นสีแดง) และในทางกลับกันเป็นสัดส่วนของผงละเอียดประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงต้องการที่จะลดสัดส่วนของผงละเอียดจากกระบวนการบดหินปูน โดยการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่จะทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในการผลิตปูนมอร์ต้า

## 1.3 ตัวชี้วัดของงานวิจัย

สัดส่วนของทรายเพิ่มขึ้นเป็น 75% ในขณะที่สัดส่วนของฝุ่นละเอียดลดลงเหลือน้อยกว่า 25%

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาเฉพาะกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของบริษัท ThyssenKrupp Industrial Solutions รุ่นที่ RMR 51/26 ในโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 1.1

1.4.2 หินปูนที่นำมาใช้บดเป็นหินที่ถูกคัดทิ้งมาจากกระบวนการโม่หิน (Crushing) ที่อยู่บนเหมืองหินปูนในโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0 – 20 มิลลิเมตร

1.4.3 การทำงานของเครื่องบดอยู่ในสภาวะที่คงที่ (Stable state)

ตารางที่ 1.1 ลักษณะและข้อจำกัดของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของบริษัท ThyssenKrupp Industrial Solution รุ่นที่ RMR51/26

ห้องบดวัตถุดิบ	
- เส้นผ่านศูนย์กลางห้องบดวัตถุดิบ (มิลลิเมตร)	7,400
- เส้นผ่านศูนย์กลางโตะหมุน (มิลลิเมตร)	5,260
- ความเร็วโตะหมุน (รอบต่อนาที)	23.92
- เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้ง (มิลลิเมตร)	2,600
- จำนวนลูกกลิ้ง	4
อุปกรณ์คัดแยกขนาด	
- เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (มิลลิเมตร)	4,700
- ปริมาณลมที่ไหลผ่าน (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	640,000
- ความเร็วต่ำสุดขาออกชุดเกียร์ (รอบต่อนาที)	14
- ความเร็วสูงสุดขาออกชุดเกียร์ (รอบต่อนาที)	82



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถกำหนดสภาวะการทำงานให้เครื่องบดชนิดลูกกลิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.5.2 ลดต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตปูนมอร์ต้า
- 1.5.3 ลดพื้นที่จัดเก็บของเสียเพื่อนำไปวางแผนจัดเก็บผลิตภัณฑ์อื่นที่มีมูลค่า
- 1.5.4 ลดปัญหาฝุ่นละอองที่เกิดจากการฟุ้งกระจายขณะขนส่งผงละเอียด

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 1.2

- 1.6.1 กำหนดหัวข้อปัญหา และตัวชี้วัดของงานวิจัย
- 1.6.2 ศึกษาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีและเทคนิคที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหา
- 1.6.3 ศึกษากระบวนการทำงานที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อปัญหาภายในโรงงานและนิยามถึงปัญหา
- 1.6.4 ศึกษาและวิเคราะห์ระบบการวัดค่าของตัวแปรตอบสนองที่สนใจ
- 1.6.5 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และกำหนดพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ 4 ตัวที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทราย ได้แก่

### A.) อัตราป้อนวัตถุดิบ (Feed rate)

คือปริมาณการป้อนหินปูนเข้าเครื่องบดวัตถุดิบเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งมีหน่วยเป็น ตันต่อชั่วโมง ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าอัตราป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้น จะทำให้มีโอกาสที่จะได้ปริมาณของทรายมากขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ในกรณีที่เพิ่มอัตราป้อนวัตถุดิบแต่ปริมาณทรายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือไม่เพิ่มขึ้นเลยก็จะทำให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลง และในปัจจุบันมีการใช้อัตราป้อนวัตถุดิบตั้งแต่ 130 ตันต่อชั่วโมงไปจนถึง 150 ตันต่อชั่วโมง เพราะฉะนั้นในการทดลองนี้จะแบ่งระดับของอัตราป้อนวัตถุดิบออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 130, 140 และ 150 ตันต่อชั่วโมง

### B.) แรงบดอัด (Milling pressure)

คือแรงดันของระบบไฮดรอลิกที่ใช้ลูกกลิ้งที่วางอยู่บนโต๊ะหมุน (Rotating table) ซึ่งมีหน่วยบาร์ (bar) และการเพิ่มแรงบดอัดจะทำให้หินปูนมีขนาดเล็กลง แต่ถ้าตั้งค่าน้อยเกินไปประสิทธิภาพในการบดก็จะลดลงไปด้วยเช่นกัน ปัจจุบันตั้งค่าอยู่ในช่วง 110 – 125 บาร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ 3 ระดับ ได้แก่ 100, 110 และ 120 บาร์

### C.) ความเร็วการหมุนของโต๊ะ (Table rotating speed)

คือความเร็วการหมุนของโต๊ะที่รองรับวัตถุดิบ ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ผ่านชุดเกียร์ มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm) การหมุนของโต๊ะจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและวัตถุดิบจะ

กระจายตัวออกผ่านไปยังได้ลูกกลิ้ง ซึ่งความเร็วในการหมุนของโตะจะควบคุมทิศทางและพฤติกรรมของวัตถุดิบในการบด ปัจจุบันมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ 50% ทำให้โตะหมุนมีความเร็ว 11.9 รอบต่อนาที และในการทดลองนี้จะใช้ 3 ระดับ ได้แก่ 9.5, 11.9 และ 14.3 รอบต่อนาที

#### D.) อัตราลมดูด (Suction rate)

คือปริมาณการไหลของลมดูดที่ลำเลียงวัตถุดิบที่ถูกบดแล้วภายในระบบ ซึ่งเกิดจากการทำงานของพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal fan) มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปัจจุบันมีการทำงานไม่เกิน 40,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

1.6.6 ปรับปรุงแก้ไขปัญหาของกระบวนการ โดยการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าสัดส่วนของทรายมากที่สุด และจัดทำมาตรฐานของการทำงานให้กับพนักงาน

1.6.7 ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง และติดตามผลการดำเนินการผลิตจริงเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลักทำการปรับปรุงแก้ไข

1.6.8 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1.6.9 นำเสนอผลงานวิจัย

1.6.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

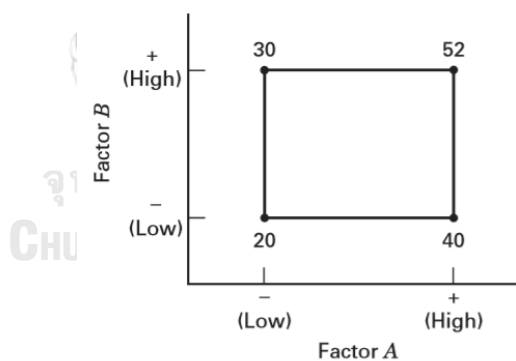
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

##### 2.1.1 หลักการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล [3]

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการทดลองที่เกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของปัจจัยควบคุมตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เพราะว่ามี การทดลองเกิดขึ้นหรือทำซ้ำในทุกระดับของแต่ละปัจจัยที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่น ต้องการทำการทดลองที่ a ระดับของปัจจัย A และ b ระดับของปัจจัย B ซึ่งการทดลองจะประกอบไปด้วยทั้งหมด ab การทดลอง และเรียกว่า การไขว้กันของระดับปัจจัย

ผลกระทบของปัจจัยจะถูกนิยามในรูปของตัวแปรตอบสนองที่การเปลี่ยนระดับของปัจจัย และเรียกว่า ผลกระทบหลัก (Main effect) เพราะมันบ่งบอกถึงปัจจัยที่สนใจในการทดลอง ตัวอย่าง การทดลองอย่างง่าย แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ค่าตอบสนอง y ของการทดลองแฟคทอเรียลแบบสองตัวแปร

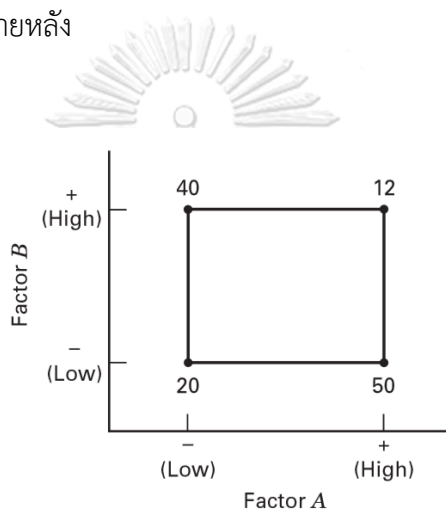
ซึ่งมี 2 ปัจจัยถูกออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ เรียกว่า “ต่ำ” และ “สูง” แสดงเป็นสัญลักษณ์ “-” และ “+” ตามลำดับ ผลกระทบหลักของปัจจัย A ในการทดลอง คือผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองที่ระดับต่ำและสูงของปัจจัย A

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21$$

นั่นหมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย A จากต่ำไปสูงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองเพิ่มขึ้น 21 หน่วย และในทำนองเดียวกันผลกระทบหลักของปัจจัย B คือ

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11$$

แต่ถ้าปัจจัยมีมากกว่า 2 ระดับ วิธีการนี้ต้องถูกปรับเปลี่ยนเพราะว่ามีทางอื่นที่จะกำหนดผลกระทบของปัจจัย ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง



ภาพที่ 2.2 การทดลองแฟคทอเรียลแบบสองตัวแปรที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

บางการทดลองอาจพบว่าความแตกต่างของผลตอบสนองระหว่างระดับของปัจจัยหนึ่งไม่เหมือนกับระดับของปัจจัยอื่นๆทั้งหมด แสดงว่าเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัย ตัวอย่างเช่น พิจารณา 2 ปัจจัยของการทดลองแบบแฟคทอเรียล แสดงดังภาพที่ 2.2 ที่ระดับต่ำของปัจจัย B ผลของปัจจัย A คือ

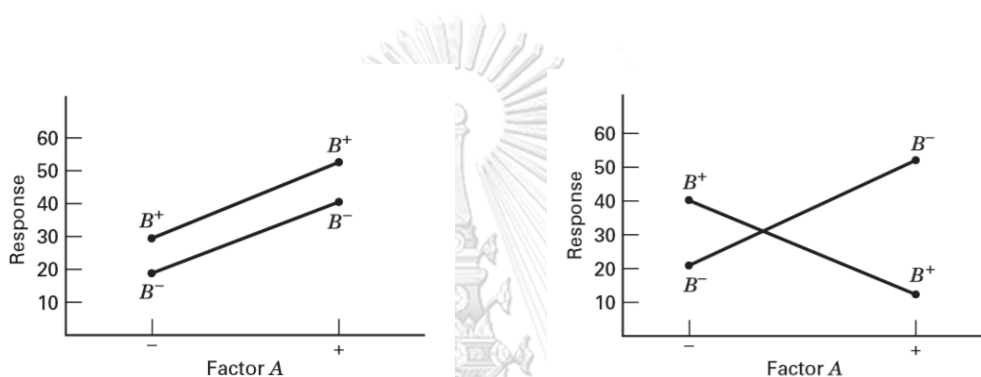
$$A = 50 - 20 = 30$$

และที่ระดับสูงของปัจจัย B ผลของปัจจัย A คือ

$$A = 12 - 40 = -28$$

เนื่องจากผลของปัจจัย A ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย B ที่ถูกเลือก จะเห็นว่าไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B และขนาดของอันตรกิริยานี้คือ  $AB = (-28-30)/2 = -29$

หลักการนี้อาจถูกนำเสนอด้วยกราฟ และเมื่อนำข้อมูลของผลตอบสนองจากภาพที่ 2.1 มาพล็อตเปรียบเทียบปัจจัย A สำหรับระดับของปัจจัย B ทั้ง 2 ระดับ แสดงดังภาพที่ 2.3 พบว่าเส้นกราฟของระดับต่ำและสูงมีลักษณะขนานกัน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ในทำนองเดียวกัน เมื่อพล็อตข้อมูลของผลตอบสนองในภาพที่ 2.2 ปรากฏว่าเส้นกราฟไม่ขนานกัน แสดงดังภาพที่ 2.4 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B



ภาพที่ 2.3 การทดลองที่ไม่มีอันตรกิริยา      ภาพที่ 2.4 การทดลองที่มีผลของอันตรกิริยา

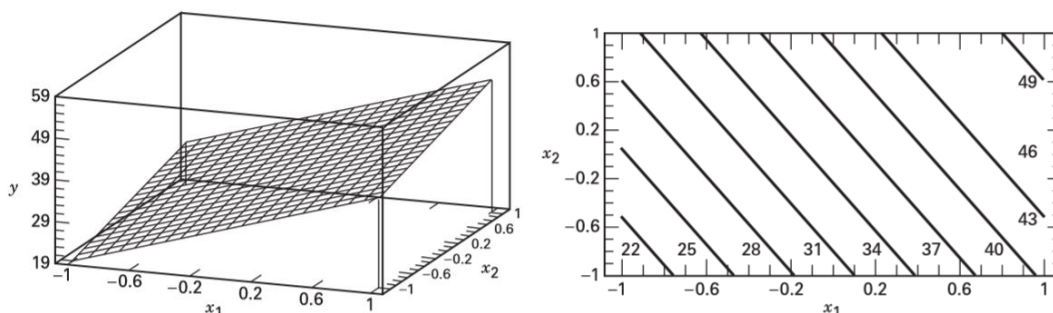
กราฟนี้มีประโยชน์ในการช่วยอธิบายถึงนัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้กราฟนี้ในการวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเพราะลักษณะภายนอกของกราฟอาจทำให้ตีความผิดพลาดได้

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายถึงอันตรกิริยาในรูปแบบอื่น ๆ ได้อีก สมมติว่าปัจจัยที่สนใจทั้งคู่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น ต้นแบบวิเคราะห์การถดถอยของการทดลองแฟคทอเรียลสองตัวแปรสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon$$

ซึ่ง  $y$  คือค่าตอบสนอง,  $\beta$  คือค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา,  $x_1$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย A,  $x_2$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย B และ  $\epsilon$  คือพจน์ของความคลาดเคลื่อน โดยค่าของ

$x_1$  และ  $x_2$  ถูกจำกัดที่  $-1$  ถึง  $1$  (ที่ระดับต่ำและสูงของปัจจัย A และ B) และ  $x_1x_2$  เป็นตัวแทนของ  
อันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B



(a) กราฟพื้นผิวของผลตอบสนอง (b) กราฟค่าตอบสนอง  $y$  บนระนาบ  $x_1x_2$

ภาพที่ 2.5 กราฟพื้นผิวของผลตอบสนอง  $y$  และกราฟผลตอบสนอง  $y$  บนระนาบ  $x_1, x_2$  ของสมการ

$$\hat{y} = 35.5 + 10.5x_1 + 5.5x_2$$

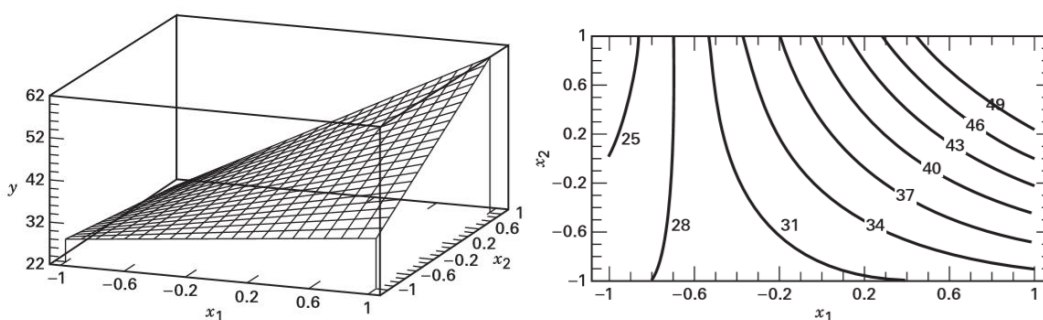
จากการทดลองที่แสดงดังภาพที่ 2.1 พบว่าผลกระทบหลักของปัจจัย A และ B เท่ากับ 21 และ 11 ตามลำดับ ค่าประมาณของ  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  คือค่าครึ่งหนึ่งของผลกระทบหลักที่สอดคล้องกัน เพราะฉะนั้น  $\beta_1 = 21/2 = 10.5$  และ  $\beta_2 = 11/2 = 5.5$  ซึ่งค่าผลกระทบของอันตรกิริยา  $AB = 1$  ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของอันตรกิริยาในสมการวิเคราะห์การถดถอยคือ  $\beta_{12} = 1/2 = 0.5$  ค่าพารามิเตอร์  $\beta_0$  คือค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทั้งหมด หรือ  $\beta_0 = (20+40+30+52)/4 = 35.5$  เพราะฉะนั้น สมการวิเคราะห์การถดถอย คือ

$$\hat{y} = 35.5 + 10.5x_1 + 5.5x_2$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของอันตรกิริยามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของผลกระทบหลัก เราสามารถบอกได้ว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ สามารถลดรูปพจน์  $0.5x_1x_2$  ได้

$$\hat{y} = 35.5 + 10.5x_1 + 5.5x_2$$

สมการนี้สามารถถูกอธิบายได้ในรูปแบบของกราฟ แสดงดังภาพที่ 2.5 เมื่อเราพล็อตข้อมูลของค่าตอบสนอง ( $y$ ) ที่ทุกๆค่าของ  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นพื้นผิว 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 2.5(a) เรียก กราฟพื้นผิวของค่าตอบสนอง (Response surface plot) และภาพที่ 2.5(b) แสดงเส้นกราฟของค่าตอบสนอง  $y$  คงที่ บนระนาบ  $x_1, x_2$  ซึ่งพื้นผิวของค่าตอบสนองมีลักษณะเป็นระนาบเดียวกันและลักษณะของเส้นกราฟทั่วไปเป็นเส้นตรงขนานกัน



(a) กราฟพื้นผิวของผลตอบสนอง

(b) กราฟค่าตอบสนอง  $y$  บนระนาบ  $x_1, x_2$

ภาพที่ 2.6 กราฟพื้นผิวตอบสนอง  $y$  และกราฟผลตอบสนอง  $y$  บนระนาบ  $x_1, x_2$  ของสมการ

$$\hat{y} = 35.5 + 10.5x_1 + 5.5x_2 + 8x_1x_2$$

สมมติว่าถ้าการทดลองพบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย A และ B มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ภาพที่ 2.6 แสดงกราฟพื้นผิวของค่าตอบสนอง และกราฟทั่วไปของสมการ

$$\hat{y} = 35.5 + 10.5x_1 + 5.5x_2 + 8x_1x_2$$

พื้นผิวที่มีการบิดของระนาบ ดังภาพที่ 2.6(a) แสดงว่าอันตรกิริยามีผลอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปัจจัยทั้งสอง และการบิดตัวของพื้นผิวนี้นำผลให้เส้นกราฟที่พล็อตค่าคงที่ของผลตอบสนอง  $y$  ในระนาบ  $x_1, x_2$  มีลักษณะเป็นโค้ง แสดงดังภาพที่ 2.6(b) ดังนั้นอันตรกิริยาคือรูปร่างของความโค้งที่ซ่อนอยู่ภายใต้พื้นผิวของค่าตอบสนองของการทดลอง

โดยทั่วไปแล้วเมื่ออันตรกิริยามีผลอย่างมากและสอดคล้องกับผลกระทบหลักที่มีเพียงเล็กน้อย อาจทำให้ผู้ทำการทดลองวิเคราะห์ผิดพลาดว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองเฉพาะผลกระทบของปัจจัยนี้ที่ระดับต่างของอีกปัจจัย จะพบว่าผลกระทบของ



ปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง ดังนั้นควรพิจารณาที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมากกว่าผลกระทบหลัก

### 2.1.2 รูปแบบทั่วไปของการทดลองแฟคทอเรียล

สำหรับการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย สามารถอธิบายขยายความไปสู่กรณีทั่วไปที่มี a ระดับของปัจจัย A, b ระดับของปัจจัย B, c ระดับของปัจจัย C และอื่นๆในการทดลองแฟคทอเรียล โดยปกติจะมี  $abc\dots n$  การทดลองถ้ามีการกำหนดให้ทำซ้ำ n ครั้ง ซึ่งถ้ามีความเป็นไปได้ที่อันตรกิริยามีผลต่อค่าตอบสนอง ต้องมีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อหาผลรวมความคลาดเคลื่อนของค่าตอบสนองนั้น

ถ้าปัจจัยทั้งหมดในการทดลองคงที่ เราสามารถสร้างสมการและทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลกระทบหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) การทดสอบทางสถิติด้วยวิธี F-test ทำได้โดยการหารค่าเฉลี่ยกำลังสองของผลกระทบหลักและอันตรกิริยาด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean square error; MSE) และทดสอบที่ปลายด้านบน (Upper tail) ซึ่งจำนวนระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ของผลกระทบหลักก็คือระดับของปัจจัยลบหนึ่ง และจำนวนระดับขั้นความเสรีของอันตรกิริยาคือผลคูณของจำนวนระดับขั้นความเสรีที่เป็นองค์ประกอบของอันตรกิริยา ตัวอย่างรูปแบบสมการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 3 ปัจจัย

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, b$

$k = 1, 2, \dots, c$

$l = 1, 2, \dots, n$

สมมติว่าปัจจัย A, B และ C คงที่ ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 2.1 การทดสอบทางสถิติด้วยวิธี F-test คำนวณได้จากค่าคาดหวังของค่ากำลังสองเฉลี่ยของผลกระทบหลักและอันตรกิริยาที่ทดสอบ

ตารางที่ 2.1 รูปแบบของตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง 3 ปัจจัยคงที่

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	Expected mean square	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	a-1	MS <sub>A</sub>	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a-1}$	MS <sub>A</sub> / MS <sub>E</sub>
B	SS <sub>B</sub>	b-1	MS <sub>B</sub>	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b-1}$	MS <sub>B</sub> / MS <sub>E</sub>
C	SS <sub>C</sub>	c-1	MS <sub>C</sub>	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c-1}$	MS <sub>C</sub> / MS <sub>E</sub>
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	MS <sub>AB</sub>	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	MS <sub>AB</sub> / MS <sub>E</sub>
AC	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	MS <sub>AC</sub>	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	MS <sub>AC</sub> / MS <sub>E</sub>
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	MS <sub>BC</sub>	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b-1)(c-1)}$	MS <sub>BC</sub> / MS <sub>E</sub>
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	SMS <sub>ABC</sub>	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	MS <sub>ABC</sub> / MS <sub>E</sub>
Error	SS <sub>E</sub>	abc(n-1)	MS <sub>E</sub>	$\sigma^2$	
Total	SS <sub>T</sub>	Abcn-1			

ปกติการคำนวณค่าต่างๆในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทำได้อย่างสำเร็จครบถ้วนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามสูตรการคำนวณผลรวมกำลังสองในตารางก็ยังคงถูกใช้ประโยชน์บ้างบางครั้ง ผลรวมกำลังสองของค่าตอบสนองทั้งหมดหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

ผลรวมกำลังสองของผลกระทบหลักหาได้จากผลตอบสนองทั้งหมดของแต่ละปัจจัย

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{...k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

ผลรวมกำลังสองของอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยหาได้จากสมการ

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

ผลรวมกำลังสองของอันตรกิริยาระหว่าง 3 ปัจจัยหาได้จากสมการ

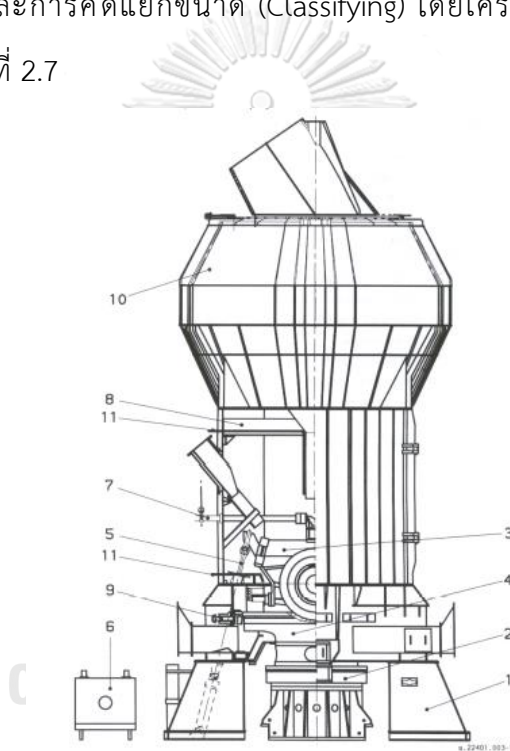
$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

แต่อย่างไรก็ตามถ้าการทดลองแฟคทอเรียลนั้นเกี่ยวข้องกับปัจจัยแบบสุ่ม จะไม่สามารถทดสอบทางสถิติด้วยวิธีนี้ได้ ซึ่งจะต้องคำนวณค่าคาดหวังเฉลี่ยกำลังสอง (Expected mean squares) ด้วยวิธีใหม่ที่ถูกต้อง

## 2.2 เครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical roller mill)

[4] เครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการลดขนาดแร่ธาตุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ [5] โดยทั่วไปแล้วเครื่องบดแบบนี้จะประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ถูกยึดแน่นจำนวน 2 หรือ 4 ลูก และโต๊ะหมุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.5 ไปจนถึง 7.5 เมตร ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของอุตสาหกรรมนั้นๆ

[6] กระบวนการลดขนาดวัตถุดิบด้วยเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งเหมาะสำหรับใช้บดวัตถุดิบที่มีลักษณะแข็งปานกลางไปจนถึงอ่อน ซึ่งมีหน้าที่การทำงาน 2 อย่าง ได้แก่ การบดวัตถุดิบ (Milling) และการคัดแยกขนาด (Classifying) โดยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง มีส่วนประกอบ ดังภาพที่ 2.7

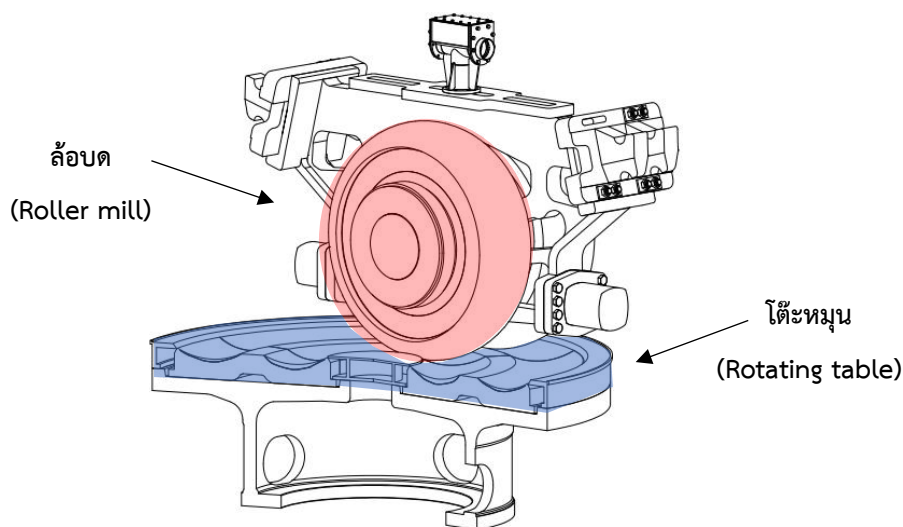


ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical roller mill)

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. ผนังของเครื่องบด (Housing)      | 7. อุปกรณ์เสริมอื่นๆ (Accessories)      |
| 2. ชุดขับเคลื่อน (Drive unit)      | 8. อุปกรณ์ช่วยและติดตั้ง                |
| 3. ลูกกลิ้งแบบคู่ (Roller pair)    | 9. หัวฉีดวงแหวน (Nozzle ring)           |
| 4. โต๊ะหมุน (Rotating table)       | 10. อุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier)      |
| 5. แท่งที่จับยึด (Tie rod)         | 11. ระบบฉีดน้ำ (Water injection system) |
| 6. ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) |   |

## 2.2.1 วิธีการทำงานในส่วนของการบดวัตถุดิบ

วัตถุดิบถูกป้อนเข้าเครื่องบดวัตถุดิบที่ท่อทางเข้า ซึ่งจะตกลงตรงกลางของแท่นบดและถูกลำเลียงเข้าไปใต้ล้อบดด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของแท่นบด และวัตถุดิบที่ถูกบดจะหลุดออกจากขอบของแท่นบดไปผสมรวมกับลมที่ไหลผ่านหัวฉีดแหวน (Nozzle Ring) อย่างต่อเนื่อง วัตถุดิบบางส่วนหรือทั้งหมดที่หลุดออกจากขอบของแท่นบดนี้จะถูกลำเลียงขึ้นไปยังอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier) ที่ติดตั้งอยู่เหนือห้องบดวัตถุดิบ ซึ่งที่อุปกรณ์คัดแยกขนาดนี้จะแบ่งแยกวัตถุดิบออกเป็น 2 ส่วน ผลลัพธ์ที่ถูกลบจะละเอียดถูกลำเลียงไปที่เครื่องกรองฝุ่น และผลลัพธ์ที่มีขนาดใหญ่จะตกลงกลับสู่ห้องบดวัตถุดิบ และมีบางส่วนสามารถถูกลำเลียงออกจากกระบวนการของหม้อบดวัตถุดิบด้วยอุปกรณ์ลำเลียงชนิดสกรูหรือท่อลาดเอียงที่ถูกดัดแปลงเพิ่มเข้ามา และเรียกผลลัพธ์ส่วนนี้ว่า “ทราย” โดยแต่ละส่วนของเครื่องบดวัตถุดิบมีหลักการออกแบบดังนี้



ภาพที่ 2.8 โต๊ะหมุนและลูกกลิ้งในเครื่องบดวัตถุดิบ

### 2.2.1.1 โต๊ะหมุน (Rotating table)

คือโต๊ะรองรับวัตถุดิบที่ถูกขับเคลื่อนให้หมุนด้วยมอเตอร์ ซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นวงกลมและมีร่องคู่ (Double groove) เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการบดวัตถุดิบ (Retention Time) และทำให้ชั้นความหนาของวัตถุดิบบนโต๊ะหมุนมีความสม่ำเสมอซึ่งความแตกต่างของรัศมีลูกกลิ้งและร่องของโต๊ะหมุนมีผลอย่างมากต่อสถานะของรูปร่างวัตถุดิบที่อยู่ใต้ลูกกลิ้ง โดยจะทำให้ความสามารถในการบดวัตถุดิบและการใช้พลังงานของหม้อบดวัตถุดิบมีความสม่ำเสมอเมื่อชิ้นส่วนมีการสึกหรอ

### ลูกกลิ้ง (Roller)

ในเครื่องบดวัตถุบด จะมีลูกกลิ้งจำนวน 2 คู่ ทำงานอยู่บนโต๊ะหมุน ดังภาพที่ 2.8 ด้วยหลักการที่ออกแบบมาให้ลูกกลิ้งมีลักษณะเป็นคู่เพราะจะทำให้ความเร็วของโต๊ะหมุนและลูกกลิ้งมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการลื่นไถล (Slip) ของวัตถุบดที่ไหลผ่าน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการบดลดลง นอกจากนี้การออกแบบในลักษณะนี้ยังทำให้ลูกกลิ้งและโต๊ะหมุนเกิดการสึกหรอน้อยอีกด้วย

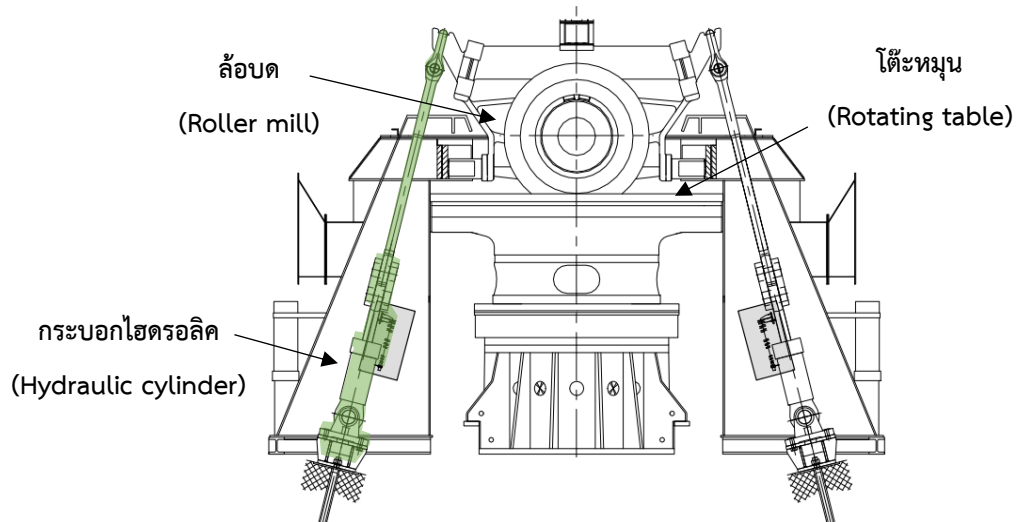
ลูกกลิ้งจะถูกยึดไว้เป็นคู่เข้ากับกระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder) ให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระได้ทั้ง 3 แกน และมีการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตั้งได้จนถึงจุดคราก (Yield point) ของอุปกรณ์ ในขณะที่หมุนรอบแกนแนวนอนได้บนความสามารถของอุปกรณ์ควบคุมทิศทาง ซึ่งถ้าลูกกลิ้งด้านในถูกยกขึ้นด้วยวัตถุบดที่มีขนาดใหญ่ ลูกกลิ้งด้านนอกก็จะถูกกดลงบนวัตถุบดด้วยแรงที่มากขึ้น เพราะเหตุนี้ทำให้ลูกกลิ้งแต่ละอันจะคอยส่งเสริมการทำงานของกันและกัน ซึ่งการทำงานที่สัมพันธ์กันของลูกกลิ้งนี้จะส่งผลให้กระบวนการบดวัตถุบดมีประสิทธิภาพสูง

#### 2.2.1.2 หัวฉีดแหวน (Nozzle ring)

ถูกติดตั้งวางไว้บริเวณที่เป็นช่องลมบริเวณขอบรอบโต๊ะหมุนก่อนเข้าเครื่องบดวัตถุบด ทำให้ช่องลมเข้าเครื่องบดวัตถุบดมีลักษณะเป็นคอขวด (bottleneck) ส่งผลให้ลมที่ไหลเข้ามามีความเร็วสูง และสามารถนำพาเอาวัตถุบดที่ถูกบดแล้วและถูกเหวี่ยงออกจากขอบของโต๊ะหมุนขึ้นไปสู่อุปกรณ์คัดแยกขนาด ซึ่งความเร็วลมที่ออกจากหัวฉีดแหวนนี้เป็นตัวแปรที่ต้องมีความแน่นอนในกระบวนการบดวัตถุบด เพราะถ้าความเร็วลมลดลงจะทำให้วัตถุบดตกลงสู่อุปกรณ์ลำเลียงและกลับเข้าเครื่องบดใหม่ ทำให้เกิดวัตถุบดสะสมเป็นจำนวนมาก และทำให้มีภาระ (Load) มากเกินไป

#### 2.2.1.3 ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system)

แรงบดที่ใช้สำหรับการบดวัตถุบดถูกสร้างขึ้นจากระบบไฮดรอลิก ซึ่งใช้กระบอกไฮดรอลิก 2 อันต่อลูกกลิ้งหนึ่งคู่ ดังภาพที่ 2.9 เพื่อให้เกิดแรงในการบดเท่ากันในขณะที่ลูกกลิ้งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากที่สุด การทำงานสามารถปรับแรงดันไฮดรอลิกได้ตามความต้องการเพื่อปรับเปลี่ยนแรงในการบดให้เข้ากับสภาวะการทำงานจริง และในสภาวะที่เครื่องบดวัตถุบดเริ่มทำงานแรงดันไฮดรอลิกจะถูกปรับให้น้อยลงเพื่อลดแรงบิด (Torque) ที่เกิดกับลูกกลิ้ง นอกจากนี้กระบอกไฮดรอลิกแต่ละอันจะถูกติดตั้งเข้ากับถังเก็บความดัน (Accumulator) เพื่อรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันจากการที่ขึ้นความหนาของวัตถุบดยกล้อบดให้สูงขึ้น



ภาพที่ 2.9 การทำงานของระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system)

#### 2.2.1.4 ขอบวงแหวน (Dam ring)

เนื่องจากลูกกลิ้งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นการติดตามผลการสึกหรอของลูกกลิ้งและโต๊ะหมุนจะทำให้มั่นใจว่าชิ้นส่วนเหล่านี้มีการสัมผัสกับวัตถุบดได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามชั้นความหนาของวัตถุบดที่เหมาะสมเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบดวัตถุบดอย่างแน่นอน ซึ่งชั้นความหนาของวัตถุบดนี้ถูกควบคุมโดยการปรับความสูงของขอบวงแหวนที่กั้นอยู่บริเวณรอบวงของโต๊ะหมุน

การทำงานที่ผิดปกติของเครื่องบดวัตถุบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งสามารถเกิดได้หลากหลายสาเหตุจากกระบวนการบดวัตถุบดที่อุปกรณ์เชื่อมต่อกันด้วยคำสั่งไมโครคอมพิวเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น สาเหตุ และวิธีการแก้ไข

ตารางที่ 2.2 ความผิดปกติในกระบวนการบัดวัตถุด้วยเครื่องบัดวัตถุชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

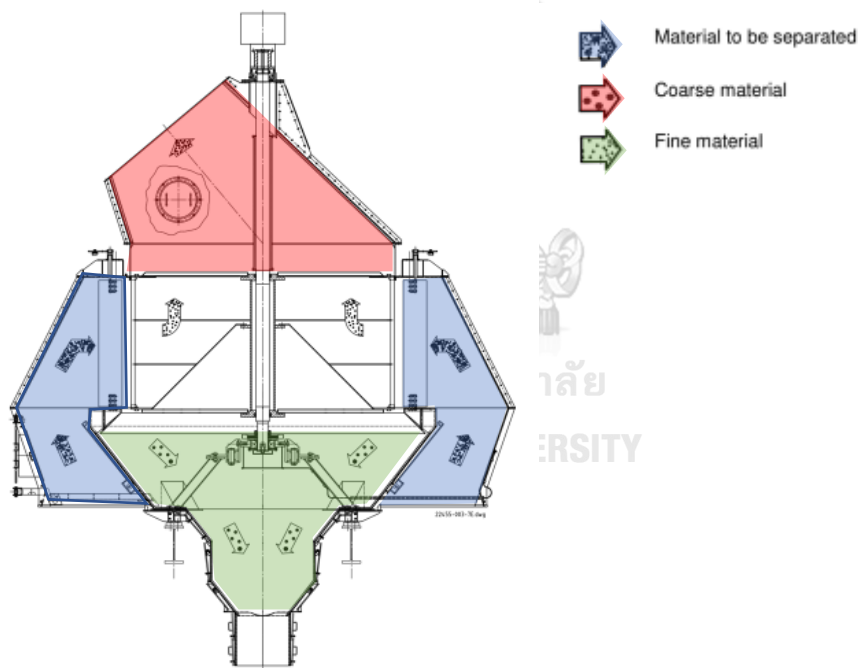
ความผิดปกติ (Fault)	สาเหตุ (Cause)	แก้ไข (Elimination)
- วัตถุบิดในเครื่องบนน้อยเกินไป		
การสั่นสะเทือน	ป้อนวัตถุบิดเข้าน้อยเกินไป	เพิ่มอัตราการป้อนวัตถุบิดเข้า ถ้าจำเป็น
ความแตกต่างของความดัน ในหม้อบดลดลง	ความผิดพลาดในการ ควบคุมประตูก้อนลม	ตรวจเช็คการควบคุมระบบ
	ความผิดปกติของพัดลม	ซ่อมแซมพัดลม
	ข้อต่อของท่อลมมีรอยรั่ว	ซ่อมหรือเปลี่ยนข้อต่อ
	อุปกรณ์ตรวจวัดมีปัญหา	เปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจวัด
- วัตถุบิดในเครื่องบนมากเกินไป		
ความแตกต่างของความดัน ในเครื่องบดเพิ่มขึ้น	ป้อนวัตถุบิดเข้ามากเกินไป	ลดอัตราการป้อนวัตถุบิดเข้า
	แรงในการบดไม่เพียงพอ	เพิ่มความดันไฮดรอลิก
เป็นไปได้ที่จะเกิดการ สั่นสะเทือน	หัวฉีดแหวนอุดตัน	ทำความสะอาดหัวฉีดแหวน
	ความผิดพลาดในการ ควบคุมระบบ	ตรวจเช็คการควบคุมระบบ
	ปริมาณลมในระบบไม่ เพียงพอ	ตรวจเช็คเส้นทางของลมและ ประตูก้อนลมแต่ละตำแหน่ง
	มอเตอร์ใช้พลังงานสูง	ตรวจเช็คความหนาของชั้น วัตถุบิด และปรับเปลี่ยนความ สูงของวงแหวนของแท่นบด



การทำงานที่ผิดปกติของเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งสามารถเกิดได้หลากหลายสาเหตุจากกระบวนการบดวัตถุดิบที่อุปกรณ์เชื่อมต่อกันด้วยคำสั่งไมโครคอมพิวเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะบ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น สาเหตุ และวิธีการแก้ไข

### 2.2.2 วิธีการทำงานในส่วนของเครื่องคัดแยกขนาด

วัตถุดิบจะถูกคัดแยกขนาดโดยอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่เหนือห้องบดวัตถุดิบ โดยวัตถุดิบจะถูกนำส่งมาที่อุปกรณ์คัดแยกขนาดผ่านทางแผ่นบังคับลมน (Guide vane) ที่สามารถปรับมุมได้ และผ่านเข้ามายังส่วนที่เป็นใบพัด (Rotor) ดังภาพที่ 2.10 วัตถุดิบที่มีอนุภาคเล็กจะถูกคัดแยกออกผ่านใบพัดไป (พื้นที่สีแดง) ส่วนที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านไปได้ จะถูกใบพัดตีตกลงมายังท่อรูปทรงกรวย (Tailing cone) ที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของเครื่องบดวัตถุดิบ (พื้นที่สีเขียว)



ภาพที่ 2.10 อุปกรณ์คัดแยกขนาดของเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

การควบคุมความละเอียดของวัตถุดิบสามารถปรับตั้งค่าความเร็วของใบพัดที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และมุมของแผ่นบังคับทิศทางลมให้มีความสัมพันธ์กัน ถ้าต้องการเพิ่มความละเอียดของวัตถุดิบที่ผ่านขึ้นไป สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วการหมุนของใบพัด หรืออาจจะปรับเพิ่มมุม

ของแผ่นบังคับลมก็ได้ แต่ถ้าต้องการลดความละเอียดของวัตถุดิบที่ผ่านขึ้นไป สามารถทำได้โดยการลดความเร็วการหมุนของใบพัด หรืออาจจะปรับลดมุมของแผ่นบังคับลมก็ได้ หรือทำทั้งสองแบบก็ได้เช่นกัน

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

งานวิจัยเรื่อง “Operational parameters affecting the vertical roller mill performance” [7] ได้แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในกระบวนการบดแร่ทองคำ โดยทำการทดลองปรับค่าสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันทั้งหมด 16 การทดลอง และสุ่มเก็บตัวอย่างเมื่อสภาวะนั้นมีการทำงานที่คงที่ (Steady state) ซึ่งตัวแปรควบคุม 3 ตัวได้แก่ ความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier rotor speed), แรงดันการบด (Working pressure) และความเร็วแท่นบด (Table speed) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกับอัตราการผลิต (Product rate) และขนาดของผลิตภัณฑ์ (Product size) คือความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดกล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วใบพัดจะทำให้อัตราการผลิตและขนาดผลิตภัณฑ์ลดลง และการควบคุมกระบวนการลดขนาดสามารถทำได้โดยการปรับความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดให้สัมพันธ์กับปริมาณการไหลของลมและแรงดันการบด ซึ่งการเพิ่มแรงดันการบดจะทำให้สามารถเพิ่มอัตราการผลิตขึ้นได้ จากการทดลองเพิ่มแรงดันการบดขึ้น 66 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาด 310 และ 400 รอบต่อนาที สามารถเพิ่มอัตราการผลิตขึ้น 37 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดและแรงดันการบดเป็นปัจจัยที่มีประสิทธิผลต่ออัตราการผลิต ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยนี้พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแรงดันการบดต่อความเร็วใบพัดขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อัตราการผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มความเร็วแท่นบดจาก 84 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที ที่ความเร็วใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดและแรงดันการบดคงที่ที่ 310 รอบต่อนาที และ 10 บาร์ ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้จาก 541 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 598 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และทำให้ขนาดของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 62 ไมโครเมตร เป็น 69 ไมโครเมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงบอกว่าความเร็วของแท่นบดเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้

งานวิจัยเรื่อง “Unstable vibration of roller mills” [8] ได้แสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน (Vibration) ของหม้อบดวัตถุดิบในกระบวนการบดวัตถุดิบ และแนวทางสำหรับลดการสั่นสะเทือน โดยเริ่มศึกษาสาเหตุของการสั่นแบบไม่คงที่ (Unstable vibration) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่แบบไถล (Slip motion) ของล้อบดวัตถุดิบ และสามารถสรุปได้ว่าความถี่ธรรมชาติของการทำงานของแท่นบดมีความสัมพันธ์กันกับความถี่ของการสั่นสะเทือนแบบไม่คงที่ ต่อมาได้ทดลองเกี่ยวกับลักษณะของแรงเสียดทานและแรงกดทับของวัตถุดิบ ผลการทดลองบอกว่าวัตถุดิบที่ถูกบดจะมีคุณสมบัติของแรงหว่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยตัวเอง นอกจากนี้ผู้ทำการวิจัยได้นำเสนอโมเดลวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกับสมการของการเคลื่อนที่เพื่อใช้พิจารณาคุณสมบัติของแรงหว่งนี้ ซึ่งค่าความผันผวนมีความใกล้เคียงกับผลของการทดลอง

จากงานวิจัยเรื่อง “Performance of the static air classifier in a Vertical Spindle Mill” [9] ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier) ในอุตสาหกรรมหม้อบดวัตถุดิบชนิดล้อหมุนแนวตั้ง (Vertical spindle mill; VSM) โดยพิจารณาขนาดและความหนาแน่นของถ่านหินที่บริเวณทางเข้า (Classifier feed) และที่ส่งกลับมามากใหม่ (Classifier reject) งานวิจัยได้แสดงตัวแปรควบคุม 3 ตัว ได้แก่ ชนิดของถ่านหิน อัตราการไหลของลม และแรงดันการบด ผลของการทดลองพบว่าถ่านหินส่วนที่ถูกส่งกลับมามากใหม่มีสัดส่วนประมาณ 7 ถึง 10 และผลผลิตที่ได้มีสัดส่วนของอนุภาคที่น้อยกว่า 90 ไมโครเมตร ลดลงจาก 32 เปอร์เซ็นต์ของถ่านหินบริเวณทางเข้าเป็น 24 เปอร์เซ็นต์ถ่านหินที่ถูกส่งกลับมามากใหม่ หลังจากผ่านกระบวนการคัดแยกขนาด ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่ากระบวนการคัดแยกขนาดนี้มีสมรรถนะต่ำ และที่อัตราการไหลของลมระหว่าง 62.8 – 53.2 ตันต่อชั่วโมง เป็นช่วงที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการคัดแยกขนาด อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราการไหลของลมน้อยกว่า 44 ตันต่อชั่วโมง ส่วนปัจจัยชนิดของถ่านหินและแรงดันการบดไม่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการคัดแยกขนาด งานวิจัยได้เสนอแนะให้ปรับค่าอัตราการไหลของลมและแรงดันการบดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคัดแยกขนาดและการลดขนาดของวัตถุดิบ

จากงานวิจัยเรื่อง “Research of iron ore grinding in a vertical roller mill” [10] ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของปัจจัยควบคุมในกระบวนการบดแร่เหล็ก 2 ชนิด ได้แก่ Kiruna และ Mertainen และออกแบบการทดลองด้วยวิธีแบบแฟคทอเรียล 3 ตัวแปร คือ ความสูงวงแหวน (Dam ring height), แรงดันการบด (Grinding pressure) และ ความเร็วอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Separator

speed) ผลการทดลองพบว่า ความเร็วอุปกรณ์คัดแยกเป็นปัจจัยที่ส่งผลกับขนาดของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน ส่วนความสูงวงแหวนแทบจะไม่มีผลกับขนาดของผลิตภัณฑ์ แต่ในทางตรงกันข้ามที่แรงดันการบดสูงทำให้ขนาดผลิตภัณฑ์เล็กลง และเป็นที่น่าสนใจตรงกันว่าแรงดันการบดเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแรงดันการบดสามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้ แต่อัตราการผลิตสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดันการบด 65 เปอร์เซ็นต์ และที่แรงดันการบด 30 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด และเมื่อนำความสัมพันธ์ของปัจจัยมาวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression model) โดยมี 2 วัตถุประสงค์ ได้แก่ ใช้พลังงานให้น้อยที่สุด และสัดส่วนของการแตกตัวอิสระของแร่ดีที่สุด โดยไม่สนใจพลังงานที่ใช้ สำหรับแร่เหล็กชนิด Kiruna สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ตามเป้าหมายทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ตามโมเดลวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณที่ความละเอียด 45 ไมโครเมตร ประกอบไปด้วย ความสูงวงแหวน 31%, แรงดันการบด 29.5% และ ความเร็วอุปกรณ์คัดแยกขนาด 60% และสำหรับแร่เหล็กชนิด Mertainen โมเดลที่ทำให้สัดส่วนของการแตกตัวอิสระของแร่ดีที่สุดที่ความละเอียด 90 ไมโครเมตร คือ ต้องใช้แรงดันการบดสูงที่สุดและความสูงวงแหวนต่ำที่สุด ซึ่งใช้พลังงาน 8.6 kWh/t และสภาวะที่ทำให้เสียพลังงานน้อยที่สุด 6.1 kWh/t ที่ความละเอียด 62 ไมโครเมตร ประกอบด้วย ความสูงวงแหวน 16% แรงดันการบด 35% และความเร็วอุปกรณ์คัดแยก 46%

### 2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

งานวิจัยเรื่อง “Study on appropriate method of Teflon production by design of experiment technique” [11] เป็นการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อของเสียในกระบวนการผลิตเทฟลอนและหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเทฟลอน 2 ชนิด ได้แก่ PV102(G201) และ PV103(F4PN) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง เริ่มจากการระดมความคิดเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเทฟลอนด้วยเครื่องมือแผนผังก้างปลา (Cause and effect diagram) จนได้ 5 ปัจจัยที่น่าจะมีผลกระทบต่อของเสียในกระบวนการผลิต และนำไปทำการทดลองด้วยวิธี  $2^k$  แฟคทอเรียล ปรากฏว่ามีเพียง 4 ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ อุณหภูมิโซน 1, อุณหภูมิโซน 2, อุณหภูมิโซน 3 และอุณหภูมิโซน 4 และสภาวะการทำงานที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด ได้แก่ ที่อุณหภูมิแต่ละโซนเท่ากับ  $350^{\circ}\text{C}$ ,  $370^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  และ  $280^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และความเร็วของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 80 เซนติเมตรต่อชั่วโมง เมื่อนำไปใช้ผลิตเทฟลอน PV102(G201) และ

PV103(F4PN) เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่า มีสัดส่วนของเสียลดลง 33.9% คิดเป็นมูลค่า 500,000 บาท และ 24.65% คิดเป็นมูลค่า 600,000 บาท ตามลำดับ

งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องเชื่อมอุลตราโซนิคสำหรับการผลิตชุดเสื้อคลุมแพทย์ผ่าตัด” [12] ได้แสดงผลการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเครื่องเชื่อมอุลตราโซนิคในอุตสาหกรรมการผลิตเสื้อคลุมผ่าตัด และหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมอุลตราโซนิคสำหรับการผลิตเสื้อคลุมผ่าตัด ปัจจัยควบคุมที่ศึกษามี 3 ตัว ได้แก่ ความเร็วในการทำงานของเครื่องเชื่อมอุลตราโซนิค เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดในกระแสไฟฟ้า และความดันในการจับยึดชิ้นงาน และที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยควบคุมทั้ง 3 อย่างนี้มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมและความต้านทานแรงดันน้ำของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมอุลตราโซนิคคือตั้งค่าความเร็วการทำงานของเครื่องเชื่อมอุลตราโซนิคที่ 50% แอมพลิจูดในกระแสไฟฟ้า 50% และความดันจับยึดชิ้นงาน 34 PSI ตามลำดับ เมื่อนำระดับของปัจจัยควบคุมที่กล่าวมานี้ไปทำการผลิตจะทำให้ประสิทธิภาพของเรื่องเชื่อมอุลตราโซนิคเพิ่มขึ้นจาก 88% เป็น 99% และงานในกระบวนการ ณ เวลาหนึ่ง (Work in process; WIP) ลดลง 83%

## 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในการลดขนาดวัตถุบดชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหิน แร่เหล็ก หรือแร่ทองคำ เป็นต้น พบว่าปัจจัยที่ถูกกล่าวถึงว่ามีผลกระทบต่อขนาดของวัตถุบดมากที่สุดก็คือ แรงดันบดอัด (Milling Pressure) และนอกจากนี้ยังมีบางงานวิจัยที่พูดถึงปริมาณการไหล (Flow rate) ของลมในระบบ และความเร็วโตะหมุนอีกด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นการศึกษาเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในการลดขนาดวัตถุบดให้มีความละเอียดเพียงส่วนเดียวเท่านั้น แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะนำเครื่องบดชนิดนี้มาใช้ในกระบวนการลดขนาดหินปูนให้ได้ขนาดตามความต้องการ และส่วนที่มีความละเอียดจะกลายเป็นของเสีย ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำมาทำการทดลองในกระบวนการลดขนาดหินปูน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้สัดส่วนของทรายขนาด 0.1-0.6 มม. มากที่สุด

### บทที่ 3

## ระยษณียามถึงปัญหยา (Define Phase)

งานวิจัยฉบับนี้จะประยุกต์ใช้หลักการ DMAIC ตามแนวคิด Six Sigma มาใช้อ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ ขั้นตอนนิยามถึงปัญหา (Define phase) ขั้นตอนการวัด (Measure phase) ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis phase) ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improvement phase) และสุดท้ายขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล (Control phase) ตามลำดับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนิยามปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งถือเป็นขั้นตอนแรกของการปรับปรุงกระบวนการ โดยจะนำเสนออยู่ในรูปแบบของสัญญาโครงการ (Project charter) ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 3.1 ปัญหยาทางธุรกิจ (Business case)

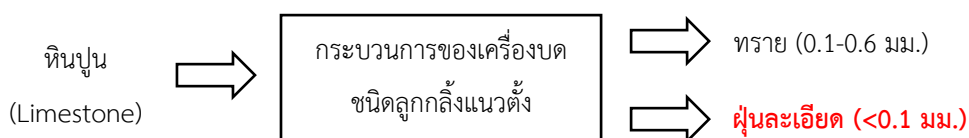
การที่เกิดของเสียในกระบวนการผลิตที่มีลักษณะเป็นฝุ่นละออย นอกจากจะทำให้บริษัทสูญเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดแล้ว ยังส่งผลต่อมลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการกำจัดของเสียอีกด้วย

#### 3.2 แลลงการณ์ปัญหยา (Problem statement)

โรงงานกรณีศึกษามีการผลิตปูนมอร์ต้าขายให้กับลูกค้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้กระบวนการเตรียมวัตถุดิบทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตปูนมอร์ต้าไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการของลูกค้า เนื่องจากพื้นที่จัดเก็บของเสียเต็มทำให้กระบวนการต้องหยุดชะงักตามไปด้วย ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นวิธีกำจัดของเสียในหลากหลายแนวทาง และการให้รถบรรทุกวิ่งขนถ่ายของเสียที่มีลักษณะเป็นฝุ่นละออยเพื่อไปใช้ในกระบวนการอื่นๆเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กัน ซึ่งนอกจากจะส่งผลเสียต่อกระบวนการอื่นๆแล้วยังทำให้เกิดต้นทุนในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อมลภาวะทางอากาศตามมาอีกด้วย

ปัจจุบันกระบวนการเตรียมวัตถุดิบทรายของโรงงานกรณีศึกษาจะใช้วิธีการนำหินปูนมาลดขนาดให้ได้ตามต้องการด้วยกระบวนการของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical roller mill) ซึ่ง

ปัจจุบันการทำงานของกระบวนการนี้จะได้ทรายเฉลี่ย 62 เปอร์เซ็นต์ของการป้อนเข้าหินปูน ส่วนที่เหลืออีก 38 เปอร์เซ็นต์จะออกมาเป็นผงละเอียด หรือของเสีย



ภาพที่ 3.1 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบทรายในการผลิตปูนมอร์ต้า

### 3.3 กำหนดตัวชี้วัดของโครงการ (Project metric)

3.3.1 ตัวชี้วัดหลักของโครงการ (Primary metric) : สัดส่วนของทรายเพิ่มขึ้นเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของการป้อนเข้าหินปูน

3.3.2 ตัวชี้วัดรองของโครงการ (Secondary metric) : สัดส่วนของฝุ่นละเอียดลดลง

3.3.3 ตัวชี้วัดที่เป็นผลกระทบต่อโครงการ (Consequential metric) : กำลังการผลิตอาจจะลดลงขึ้นกับความสามารถในการบดของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

### 3.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ (Project Objective)

กระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งสามารถผลิตทรายได้สัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของการป้อนเข้าหินปูน

### 3.5 ขอบเขตของโครงการ (Project scope)

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาเฉพาะกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งมีลักษณะและข้อจำกัดตามตารางที่ 1.1

### 3.6 ข้อจำกัดของโครงการ (Project constraints)

3.6.1 หินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการป้อนเข้าของกระบวนการมีขนาดที่ไม่แน่นอน เพราะว่าเป็นหินปูนที่ไม่สามารถขายเป็นหินคลุกให้กับลูกค้าได้ และถูกคัดทิ้งผสมกันมาจากเหมืองหินปูนของโรงงานกรณีศึกษา

3.6.2 การศึกษาและทดลองต้องอยู่ในขอบเขตความสามารถของเครื่องจักรที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิตเพราะการผลิตต้องดำเนินการแบบต่อเนื่องทุกวัน

### 3.7 สมาชิกผู้ร่วมทำโครงการ (Team member)

- 3.7.1 ผู้จัดการฝ่ายผลิต (Production manager)
- 3.7.2 ผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุง (Maintenance manager)
- 3.7.3 วิศวกรควบคุมการผลิต (Production engineer)
- 3.7.4 วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง (Maintenance engineer)
- 3.7.5 วิศวกรตรวจสอบคุณภาพ (Quality control engineer)
- 3.7.6 พนักงานควบคุมเครื่องจักร (Production operator)
- 3.7.7 ช่างเทคนิค (Technician)

### 3.8 ระยะเวลาดำเนินโครงการ (Project timeline)

ขั้นตอนการทำงานเป็นไปตามหัวข้อที่ 1.6 ในบทที่ 1 ซึ่งใช้ระยะเวลา 2 ปี

### 3.9 สรุปขั้นตอนการนิยามปัญหา

จากปัญหาในการเตรียมวัตถุดิบทรายในการผลิตปูนมอร์ต้าของโรงงานกรณีศึกษา ที่เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเพิ่มมากขึ้นและยังเกิดเป็นมลภาวะทางอากาศในขั้นตอนการกำจัดของเสียนี้อีกด้วย ซึ่งปัจจุบันกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งสามารถผลิตทรายได้ 62 เปอร์เซ็นต์ของการป้อนเข้าหินผสม และเกิดเป็นของเสีย 38 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์และปรับปรุงกระบวนการบดหินปูนให้ได้สัดส่วนทรายเพิ่มขึ้นเป็น 75 เปอร์เซ็นต์

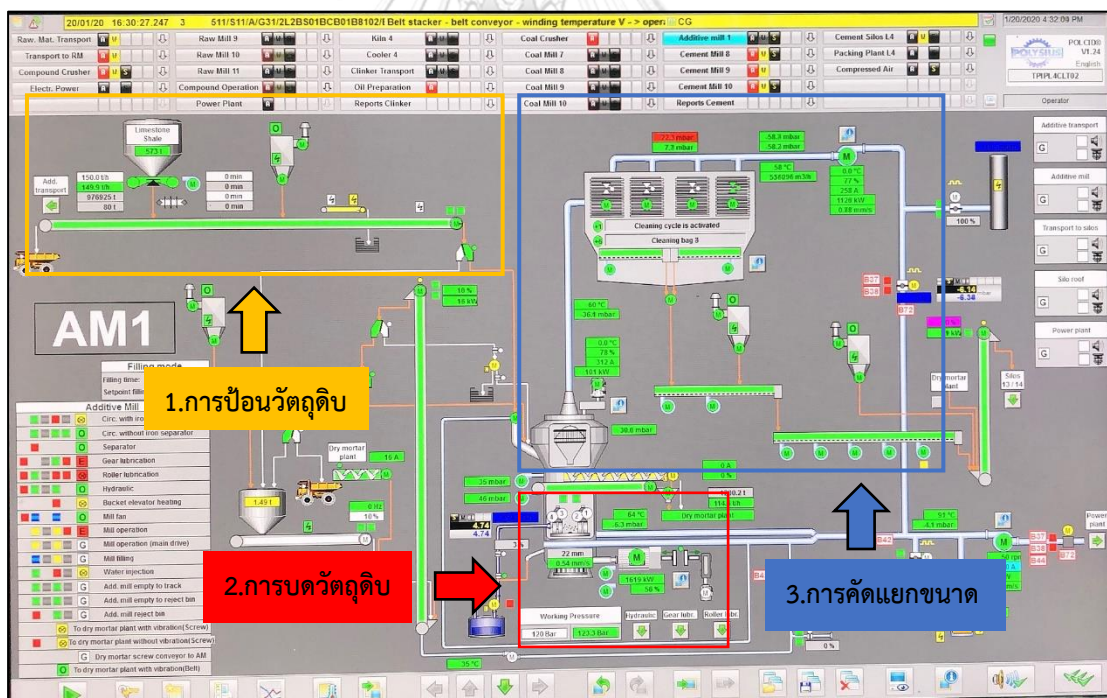


## บทที่ 4 ระยะการวัด (Measure phase)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษากระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของโรงงานกรณีศึกษา และวิเคราะห์ระบบการวัดของตัวแปรตอบสนองของงานวิจัยฉบับนี้

### 4.1 ศึกษากระบวนการบดหินปูนของโรงงานกรณีศึกษา

กระบวนการบดหินปูนของโรงงานกรณีศึกษามีหน้าที่เตรียมวัตถุดิบทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญสำหรับการผลิตปูนมอร์ต้า โดยการนำหินปูนที่มีขนาดตั้งแต่ 0 - 20 มิลลิเมตร จากเหมืองมาลดขนาดด้วยเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งที่ถูกติดตั้งให้ทำงานอย่างต่อเนื่องร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ และควบคุมการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติที่เรียกว่า ระบบ Interlock



ภาพที่ 4.1 หน้าจอควบคุมการทำงานของกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

การปรับตั้งหรือควบคุมการทำงานของเครื่องจักรทำได้โดยการป้อนคำสั่งผ่านหน้าจอกอมพิวเตอร์แสดงผล ดังภาพที่ 4.1 และเครื่องจักรจะทำงานได้ก็ต่อเมื่ออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทุกตัว

พร้อมทำงาน แต่ถ้ามีอุปกรณ์ใดอย่างน้อยหนึ่งตัวขัดข้องระบบก็จะหยุดทำงานทันที โดยการทำงานของกระบวนการบดหินปูนจะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การป้อนวัตถุดิบเข้า (Feeding) การบดวัตถุดิบ (Milling) และการคัดแยกขนาด (Classifying)

#### 4.1.1 การป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องบด (Feeding)

การป้อนหินปูนเข้าเครื่องบดวัตถุดิบถือเป็นการทำงานส่วนแรกของกระบวนการบดหินปูน โดยหินปูนจะถูกนำส่งมาจากเหมืองด้วยรถบรรทุกและมาเทที่บริเวณสายพาน จากนั้นถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในถังบรรจุที่มีขนาดความจุ 840 ตัน หลังจากนั้นเมื่อระบบเริ่มการทำงาน เครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพาน (Weight scale conveyor) จะป้อนหินปูนเข้าสู่เครื่องบด โดยปรับความเร็วของสายพานอัตโนมัติสัมพันธ์กับน้ำหนักของหินปูนบนสายพานตามอัตราป้อนวัตถุดิบที่ต้องการ

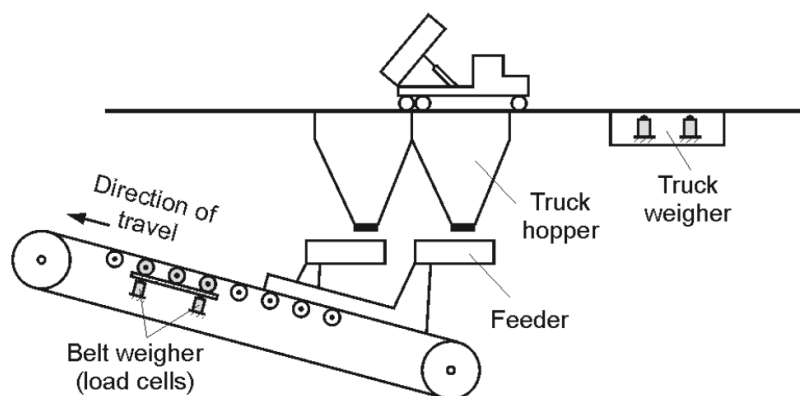
การทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพาน (Weight scale conveyor) จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างโหลดเซลล์ (Load cell) และสายพานลำเลียง ดังภาพที่ 4.2 เมื่อมีการตั้งค่าอัตราป้อนวัตถุดิบ (Feed rate) โหลดเซลล์จะแปลงค่าน้ำหนักของหินปูนบนสายพานช่วงที่มีการติดตั้งเครื่องชั่งน้ำหนักเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และส่งงานกลับไปยังมอเตอร์ให้ทำงานขับเคลื่อนสายพานลำเลียงด้วยความเร็วตามค่าอัตราป้อนวัตถุดิบที่ถูกคำนวณจากโปรแกรม ณ ช่วงเวลานั้น โดยปกติแล้วความสามารถของสายพานชั่งน้ำหนักนี้ปรับตั้งค่าอัตราป้อนหินปูนได้มากที่สุด 280 ตัน/ชั่วโมง



ภาพที่ 4.2 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพานลำเลียงที่ใช้ป้อนหินปูนเข้าเครื่องบด

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพานนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำได้ด้วยวิธีบรรทุกไปชั่งน้ำหนัก (Weighed load testing) [13] คือการบรรทุกทุกน้ำหนักไปชั่งเปรียบเทียบกับเครื่องชั่งที่

สามารถเชื่อถือได้ โดยเครื่องชั่งที่ใช้อ้างอิงสามารถเป็นแบบการชั่งน้ำหนักไหลต่อเนื่องหรือแบบไม่ต่อเนื่องหรือจะเป็นการชั่งน้ำหนักแบบหยุดนิ่ง ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การทดสอบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพานโดยใช้รถบรรทุกไปชั่ง (Belt weigher testing using a truck weigher)

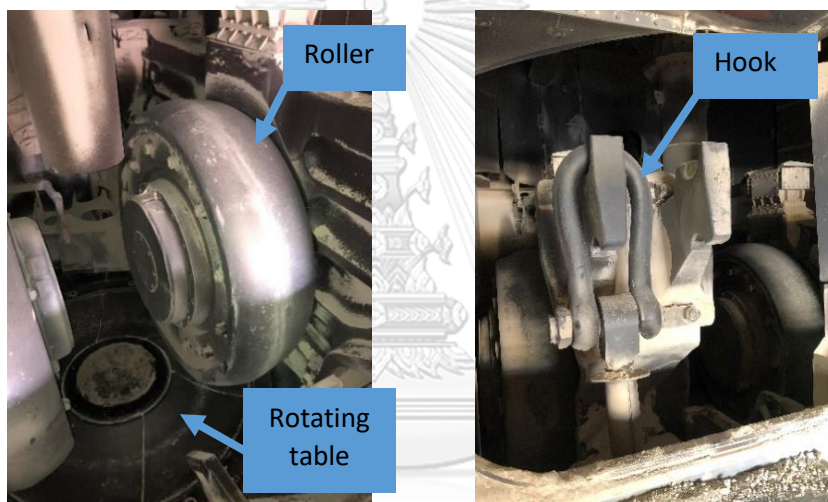
สำหรับงานโรงงานกรณีศึกษาจะให้รถบรรทุกนำหินปูนไปชั่งเปรียบเทียบกับเครื่องชั่งบริเวณทางเข้า-ออกของโรงงานที่ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักรถบรรทุกของลูกค้าที่มาซื้อปูนซึ่งเป็นเครื่องชั่งที่มีความน่าเชื่อถือ หลังจากนั้นทำการสอบเทียบด้วยวิธี Span Calibration โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัด ผลการสอบเทียบพบว่ามีค่าความผิดพลาด (Error) 0.06 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

<b>INSTRUMENT SECTION</b>																																																																														
<b>WEIGHFEEDER MATERIAL TEST REPORT</b>	<b>PAGE 1 OF 1</b>																																																																													
<b>UNIT UNDER TEST (UUT)</b>																																																																														
EQUIPMENT NAME : WEIGHFEEDER	LOCATION : HG Limestone Additive Mill																																																																													
MANUFACTURE : HASLER	MODEL : SCM II																																																																													
ID NO./TAG NO. : 2R1AW01	SPECIFICATION : +/- 3.00 % Error																																																																													
INSTRUMENT RANGE : 0-360 t/h	CAL. RANGE : 200.00 t/h																																																																													
TEST DATE. :	NEXT DUE DATE. :																																																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TRUCK No.</th> <th>LIGHT Weight*</th> <th>HEAVY Weight*</th> <th>Material Weight*</th> <th>HASLER belt Scale*</th> <th>%Error*</th> <th>SPAN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>15.323</td> <td>18.397</td> <td>3.074</td> <td>5.357</td> <td>74.27%</td> <td>1.165</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>15.320</td> <td>19.290</td> <td>3.970</td> <td>6.388</td> <td>60.91%</td> <td>1.090</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15.317</td> <td>20.850</td> <td>5.533</td> <td>5.359</td> <td>-3.14%</td> <td>0.700</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>15.312</td> <td>23.172</td> <td>7.860</td> <td>8.356</td> <td>6.31%</td> <td>0.750</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>15.316</td> <td>23.760</td> <td>8.444</td> <td>8.187</td> <td>-3.04%</td> <td>0.705</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>15.314</td> <td>23.714</td> <td>8.400</td> <td>8.405</td> <td>0.06%</td> <td>0.705</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>		TRUCK No.	LIGHT Weight*	HEAVY Weight*	Material Weight*	HASLER belt Scale*	%Error*	SPAN	1	15.323	18.397	3.074	5.357	74.27%	1.165	2	15.320	19.290	3.970	6.388	60.91%	1.090	3	15.317	20.850	5.533	5.359	-3.14%	0.700	4	15.312	23.172	7.860	8.356	6.31%	0.750	5	15.316	23.760	8.444	8.187	-3.04%	0.705	6	15.314	23.714	8.400	8.405	0.06%	0.705																												
TRUCK No.	LIGHT Weight*	HEAVY Weight*	Material Weight*	HASLER belt Scale*	%Error*	SPAN																																																																								
1	15.323	18.397	3.074	5.357	74.27%	1.165																																																																								
2	15.320	19.290	3.970	6.388	60.91%	1.090																																																																								
3	15.317	20.850	5.533	5.359	-3.14%	0.700																																																																								
4	15.312	23.172	7.860	8.356	6.31%	0.750																																																																								
5	15.316	23.760	8.444	8.187	-3.04%	0.705																																																																								
6	15.314	23.714	8.400	8.405	0.06%	0.705																																																																								
<p>Hint * Material Weight = Heavy Weight - Light Weight</p> <p>* %Error = <math>\frac{\text{Hasler Value} - \text{Material Weight}}{\text{Material Weight}} \times 100 \%</math></p> <p>* Units = Tons.</p>																																																																														
TESTED BY : Naruedom J. CHECKED BY : Noppanan K. (ENGINEER)																																																																														

ภาพที่ 4.4 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพานที่ใช้ป้อนหินปูนเข้าเครื่องบดโดย  
 หน่วยงานซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดของโรงงานกรณีศึกษา

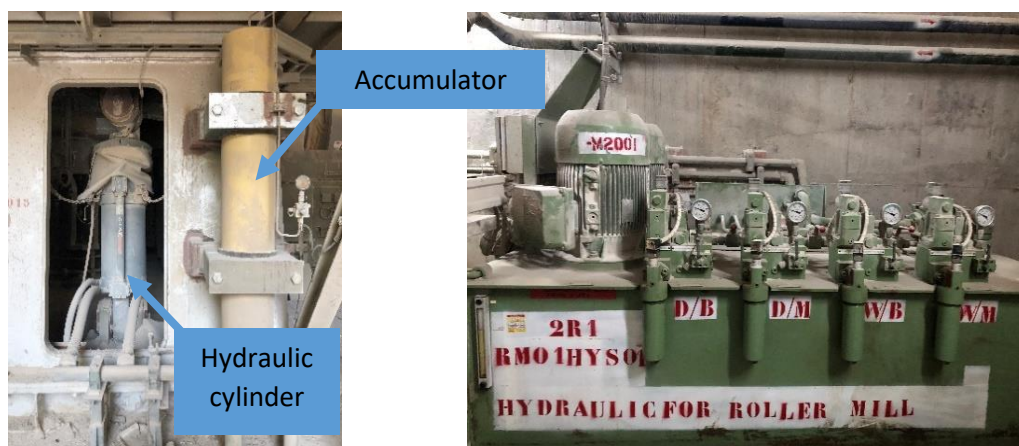
#### 4.1.2 การบดหินปูน (Milling)

หินปูนที่ถูกป้อนเข้าเครื่องบดวัตถุบดจะตกลงบริเวณกึ่งกลางของโต๊ะหมุน และกระจายออกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เข้าสู่ใต้ลูกกลิ้งที่ถูกยึดด้วยตะขอ (Hook) ให้วางตั้งอยู่บนโต๊ะหมุน ดังภาพที่ 4.5 ตะขอนี้จะเชื่อมต่อกับกระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic cylinder) ที่ทำงานร่วมกับชุดควบคุมแรงดันไฮดรอลิกที่สามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 100 บาร์ ไปจนถึง 160 บาร์ ซึ่งแรงดันนี้จะถูกส่งผ่านตะขอเพื่อไปดึงลูกกลิ้งให้แนบสนิทอยู่บนโต๊ะหมุนและเกิดการบดทับหินปูนไปด้วย นอกจากนี้ระบบไฮดรอลิกยังถูกติดตั้งเข้ากับถังเก็บแรงดัน (Accumulator) ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งบรรจุด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อช่วยดูดซับแรงยกตัวแบบฉับพลันที่เกิดจากการแทรกตัวของหินปูนเข้าสู่ภายใต้ลูกกลิ้งอีกด้วย

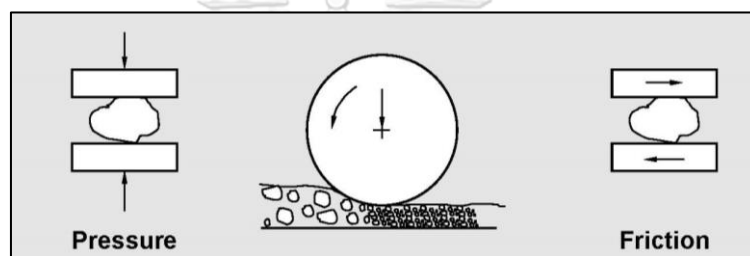


ภาพที่ 4.5 ลักษณะของลูกกลิ้งที่วางอยู่บนโต๊ะหมุนและถูกยึดด้วยตะขอ

แรงดันจากระบบไฮดรอลิกที่ส่งผ่านตะขอไปกดลูกกลิ้งให้บดทับหินปูนในขณะที่หินปูนกำลังเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ใต้ลูกกลิ้งด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) จากการทำงานของโต๊ะหมุนที่ควบคุมการทำงานด้วยมอเตอร์ผ่านชุดเกียร์และสามารถตั้งค่าความเร็วในการหมุนได้สูงสุด 23.92 รอบต่อนาที ด้วยเหตุนี้ทำให้หินปูนเกิดการแตกตัวและมีขนาดเล็กลง ด้วยหลักการของแรงกด (Pressure) และแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างลูกกลิ้งและโต๊ะหมุน ดังภาพที่ 4.7 [14] โดยมี 3 กลไกที่จะทำให้หินปูนมีขนาดเล็กลง ได้แก่ การกัดกร่อน (Abrasive) การตัดเฉือน (Shear) และการบดอัด (Compression)



ภาพที่ 4.6 ถังเก็บแรงดันที่ต่อเข้ากับชุดควบคุมแรงดันไฮดรอลิก



ภาพที่ 4.7 หลักการในการแตกตัวของวัตถุดิบที่ถูกบดด้วยลูกกลิ้งและโต๊ะหมุน

#### 4.1.3 การคัดแยกขนาดหินปูน (Classifying)

กระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดวัตถุดิบชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งเป็นการทำงานในระบบปิด (Closed system) ที่ภายในมีลมดูดเพื่อคอยลำเลียงวัตถุดิบที่ถูกบดแล้วให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่อุปกรณ์คัดแยกขนาด ซึ่งลมดูดนี้เกิดขึ้นจากการทำงานของพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal fan) ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับท่อลมผ่านอุปกรณ์คัดแยกขนาดไปยังเครื่องบดวัตถุดิบ ดังภาพที่ 4.8

มีงานวิจัยอธิบายถึงลมดูดในกระบวนการของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งไว้ว่ามีบทบาทและหน้าที่ในการช่วยลดความชื้น ลำเลียงวัตถุดิบ และคัดแยกวัตถุดิบ [15] ซึ่งหลังจากที่หินปูนถูกบดด้วยลูกกลิ้งและถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้กระจายหลุดออกจากขอบของโต๊ะหมุน ในขณะนั้นจะมีลมดูดไหลสวนกลับขึ้นมาและนำพาหินปูนบางส่วนไปยังอุปกรณ์คัดแยกขนาด (Classifier) ที่ติดตั้งอยู่เหนือห้องบดวัตถุดิบ ดังภาพที่ 4.9



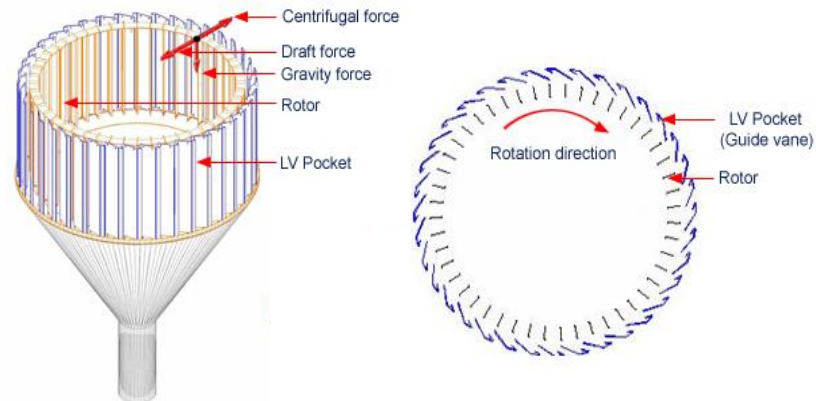
ภาพที่ 4.8 พัดลมหอยโขงขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับท่อลมไปยังเครื่องบดวัตถุดิบ



ภาพที่ 4.9 อุปกรณ์คัดแยกขนาดที่ติดตั้งอยู่เหนือห้องบดวัตถุดิบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

อุปกรณ์คัดแยกขนาดจะมีลักษณะเป็นใบพัดที่หมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งลมดูดจะลำเลียงหินปูนเข้าไปที่ใบบังคับทิศทางลม (Guide vane) ผ่านไปยังใบพัดหมุน ดังภาพที่ 4.10 เพื่อคัดแยกขนาด โดยหินปูนที่มีความละเอียดมากจะไหลผ่านใบพัดขึ้นไปพร้อมกับลมดูด ถูกนำไปกักเก็บเป็นของเสีย (Waste) เพื่อรอการกำจัดต่อไป



ภาพที่ 4.10 หลักการทำงานของอุปกรณ์คัดแยกขนาด

ในขณะเดียวกันหินปูนบางส่วนที่มีน้ำหนักจะกระทบกับใบพัดตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity force) และไหลออกจากเครื่องบดวัตถุดิบลงสู่สายพานลำเลียง ดังภาพที่ 4.11 เพื่อส่งไปใช้เป็นวัตถุดิบทรายของกระบวนการผลิตปูนมอร์ต้าในขั้นตอนถัดไป



ภาพที่ 4.11 ท่อทรายที่ออกจากเครื่องบดวัตถุดิบลงสู่สายพานลำเลียง

หินปูนบางส่วนที่มีน้ำหนักทำให้ลมดูดไม่สามารถนำพาขึ้นไปยังอุปกรณ์คัดแยกขนาดได้ก็จะตกลงสู่อุปกรณ์ลำเลียงในแนวตั้งที่เรียกว่า Recirculated Bucket Elevator ดังภาพที่ 4.12 ซึ่งจะลำเลียงหินปูนเหล่านั้นวนกลับเข้าห้องบดและถูกบดซ้ำอีกครั้ง





ภาพที่ 4.12 Recirculated Bucket Elevator

#### 4.1.4 วัตถุประสงค์หินปูน (Limestone)

ในกระบวนการลดขนาดของหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของโรงงานกรณีศึกษานี้ จะใช้หินปูนที่เป็นของเสีย (Waste) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการโม่หิน (Crusher) ซึ่งหินปูนดังกล่าวนี้มีขนาดตั้งแต่ 0 – 20 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4.13 ซึ่งไม่ตรงตามความต้องการและไม่สามารถส่งขายให้กับลูกค้าได้



ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างของหินปูนที่ใช้ในกระบวนการ

จากการนำตัวอย่างของหินปูนไปคัดแยกขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงพบว่า มีผงละเอียด (ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร) ในหินปูนเฉลี่ย 6.48% ดังนั้นเมื่อนำหินปูนมาใช้ในกระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งมีความเป็นไปได้ที่จะได้สัดส่วนของทรายไม่เกิน 93.52% ของปริมาณหินปูนทั้งหมด

#### 4.1.5 ตัวแปรตอบสนอง (Response variable)

ตัวแปรตอบสนองที่สนใจในงานวิจัยนี้ก็คือสัดส่วนของทราย (Proportion of sand) ต่ออัตราป้อนเข้าหินปูน ซึ่งปริมาณของทรายที่ไหลออกจากเครื่องบดวัตถุดิบและอ่านค่าได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักที่ติดตั้งกับสายพานลำเลียง ดังภาพที่ 4.14 โดยเครื่องชั่งน้ำหนักนี้จะแสดงผลออกมาในรูปแบบของน้ำหนักสะสมของทรายที่ไหลผ่านสายพานช่วง 1 เมตร (ช่วงของแควร์รับน้ำหนักได้สายพาน) ที่มีหน่วยเป็น กิโลกรัม และคำนวณออกมาเป็นปริมาณการไหลของทรายที่มีหน่วยเป็น ตันต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับการทำงานของสายพานที่มีความเร็วคงที่ 1.33 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.14 เครื่องชั่งแบบสายพานลำเลียง (Belt weigher) ที่ใช้อ่านค่าปริมาณทราย



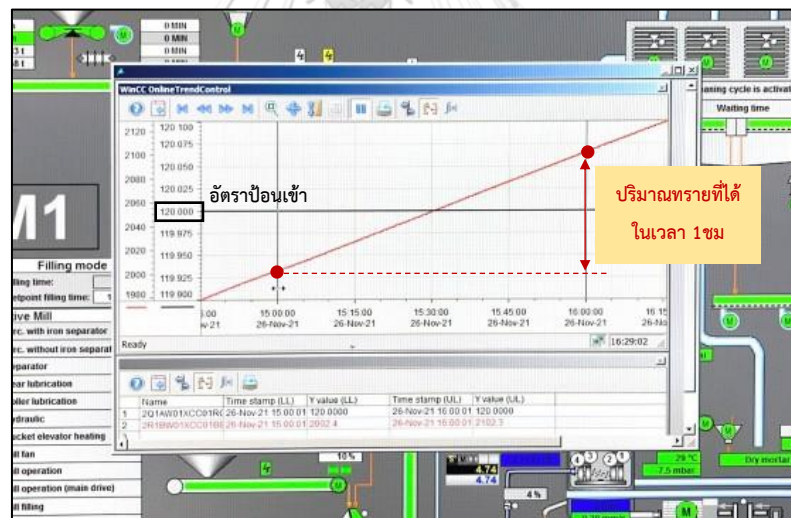
ภาพที่ 4.15 การสอบเทียบเครื่องชั่งแบบสายพานโดยหน่วยงานซ่อมบำรุง

การตรวจสอบหรือสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักนี้จะทำตามรอบของการตรวจเช็คสภาพเครื่องจักรประจำสัปดาห์ ซึ่งเป็นแผนการตรวจเช็คที่ถูกกำหนดไว้ให้ทำเป็นประจำโดยหน่วยงานซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดของโรงงานการศึกษาโดยใช้วิธีการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักกับตุ้ม

น้ำหนักมาตรฐาน ดังภาพที่ 4.15 [13] ซึ่งวิธีนี้เป็นหนึ่งในการจำลองการวัดกับภาระที่ใหญ่หนึ่งที่ประสิทธิภาพมากสำหรับกระบวนการที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและตำแหน่งรองรับน้ำหนักของสายพาน

#### 4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis; MSA)

กระบวนการวัดถือเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อความผันแปร (Variation) ของผลการทดลอง ซึ่งความผันแปรนี้อาจทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้ โดยปกติแล้วผลการทดลองจะประกอบไปด้วยค่าจริง ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากพนักงาน และค่าความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ระบบการวัดก่อนเริ่มทำการทดลองเพื่อกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความผิดพลาดด้วยการทำให้ระบบการวัดเป็นมาตรฐาน

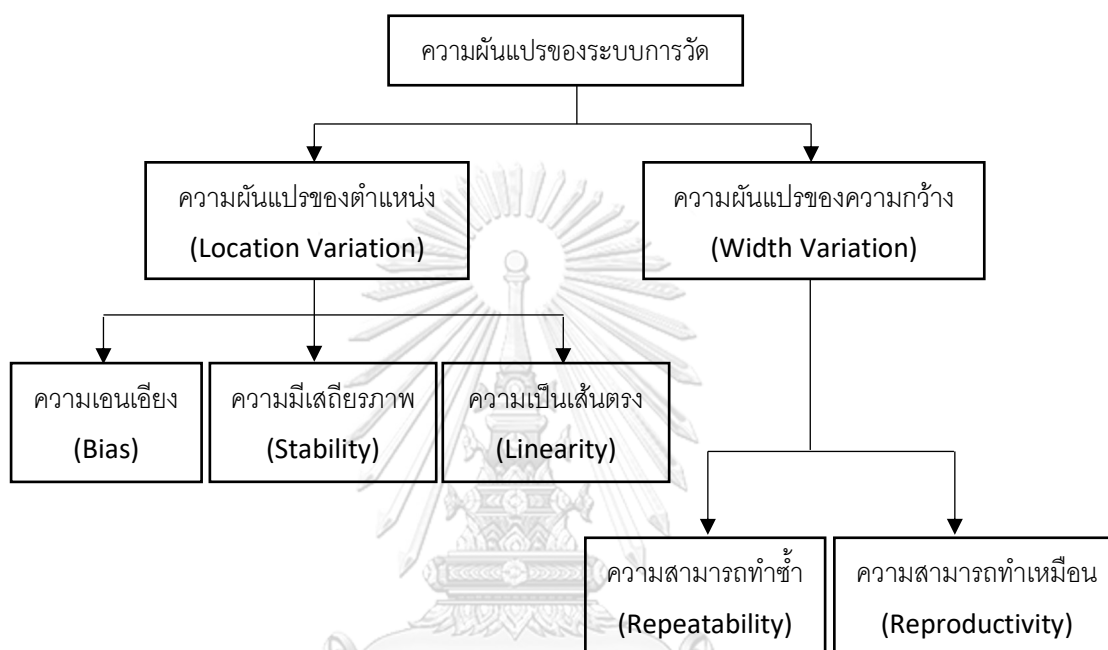


ภาพที่ 4.16 หน้าจอแสดงผลการวัดสัดส่วนของทราย

การวัดค่าสัดส่วนของทรายในการทดลองนี้จะวัดน้ำหนักสะสมของทรายที่ไหลผ่านเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพาน ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (1 ชั่วโมง) จากกราฟที่หน้าจอแสดงผล และเทียบกับอัตราการป้อนเข้าที่บันทึกไว้ในช่วงเวลานั้น ดังภาพที่ 4.16

การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement system analysis; MSA) เป็นการลดความผันแปร (Variation) ที่เกิดขึ้นในระบบการวัดเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยที่ความผันแปรในระบบการวัดสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ดังภาพที่ 4.17 ได้แก่ ความผันแปรของตำแหน่ง (Location Variation) เป็นลักษณะของการวัดหลายๆครั้งแล้วค่าเฉลี่ยในการวัดใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง และความผันแปรของความกว้าง (Width Variation) เป็นลักษณะของความแตกต่างของการวัดชิ้นงานเดิมด้วยเครื่องมือวัดอันเดิม โดยทั่วไปเรียกว่า ความแม่นยำ (Precision)



ภาพที่ 4.17 การจำแนกประเภทของความผันแปรของระบบการวัด

#### 4.2.1 วิเคราะห์ความแปรผันของตำแหน่ง (Location Variation Analysis)

การวิเคราะห์ความแปรผันของตำแหน่งสามารถวัดได้จากค่าความเอนเอียงของน้ำหนักทรายที่อ่านจากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพาน โดยใช้ตม่น้ำหนักมาตรฐานขนาด 20.625 กิโลกรัม ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งนำมาแขวนไว้ในตำแหน่งที่เป็นแคร่รองรับน้ำหนักของสายพาน ดังภาพที่ 4.19 ที่มีอยู่ทั้งสองข้างของสายพานลำเลียง หลังจากนั้นอ่านค่าน้ำหนักซ้ำ (Replicate) จำนวนข้างละ 10 ครั้ง ผลของค่าน้ำหนักที่อ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.18 ต้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 20.625 กิโลกรัม



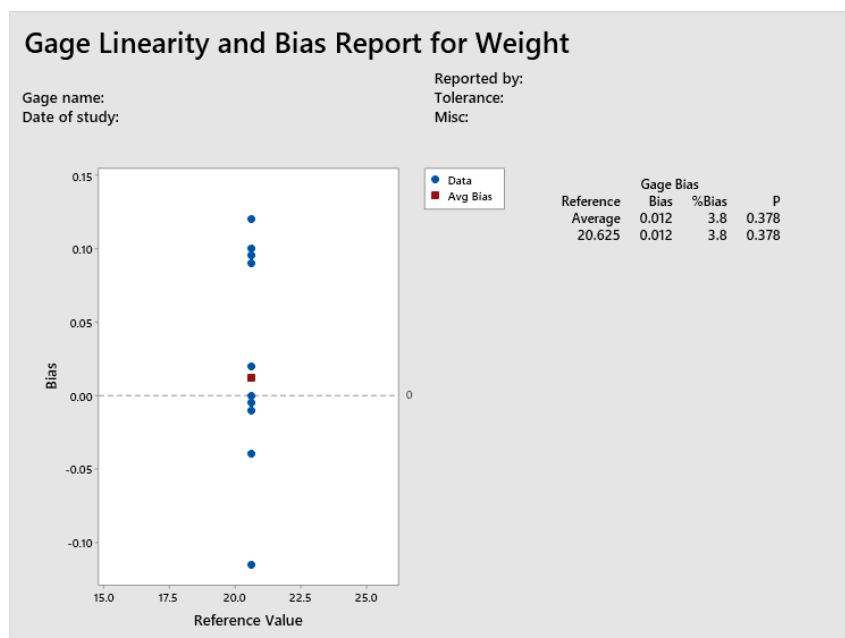
ภาพที่ 4.19 ตำแหน่งในการแขวนต้มน้ำหนักเพื่อสอบเทียบเครื่องชั่งแบบสายพาน

ตารางที่ 4.1 ค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากการแขวนต้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 20.625 กิโลกรัม

ครั้งที่	ตำแหน่ง	
	1	2
1	20.62	20.62
2	20.63	20.63
3	20.51	20.75
4	20.63	20.63
5	20.65	20.63
6	20.72	20.62
7	20.63	20.62
8	20.72	20.59
9	20.63	20.63
10	20.62	20.73

เมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 4.1 ไปวิเคราะห์ความเอนเอียง (Bias) ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าระบบการวัดนี้มีความเอนเอียง 3.8% ดังภาพที่ 4.20 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ความ

เอนเอียง นอกจากนี้ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.378 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นแสดงว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่อ่านได้มีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงของตม้มน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเอนเอียงด้วยโปรแกรม Minitab

#### 4.2.2 วิเคราะห์ความแปรผันของความกว้าง (Width Variation Analysis)

การทดลองเพื่อวิเคราะห์ระบบการวัดค่าสัดส่วนของทรายในงานวิจัยนี้จะใช้พนักงานวัดจำนวน 4 คน ซึ่งเป็นพนักงานควบคุมเครื่องจักรที่ต้องอ่านและบันทึกค่าสัดส่วนของทรายในกระบวนการ และเริ่มออกแบบตารางการทดลองโดยเลือกค่าสัดส่วนของทรายในช่วงเวลาที่แตกต่างกันมาทั้งหมด 15 สภาวะการทำงาน โดยให้พนักงานวัดค่าสัดส่วนของทรายในแต่ละสภาวะการทำงาน และทำซ้ำจำนวน 2 ครั้ง

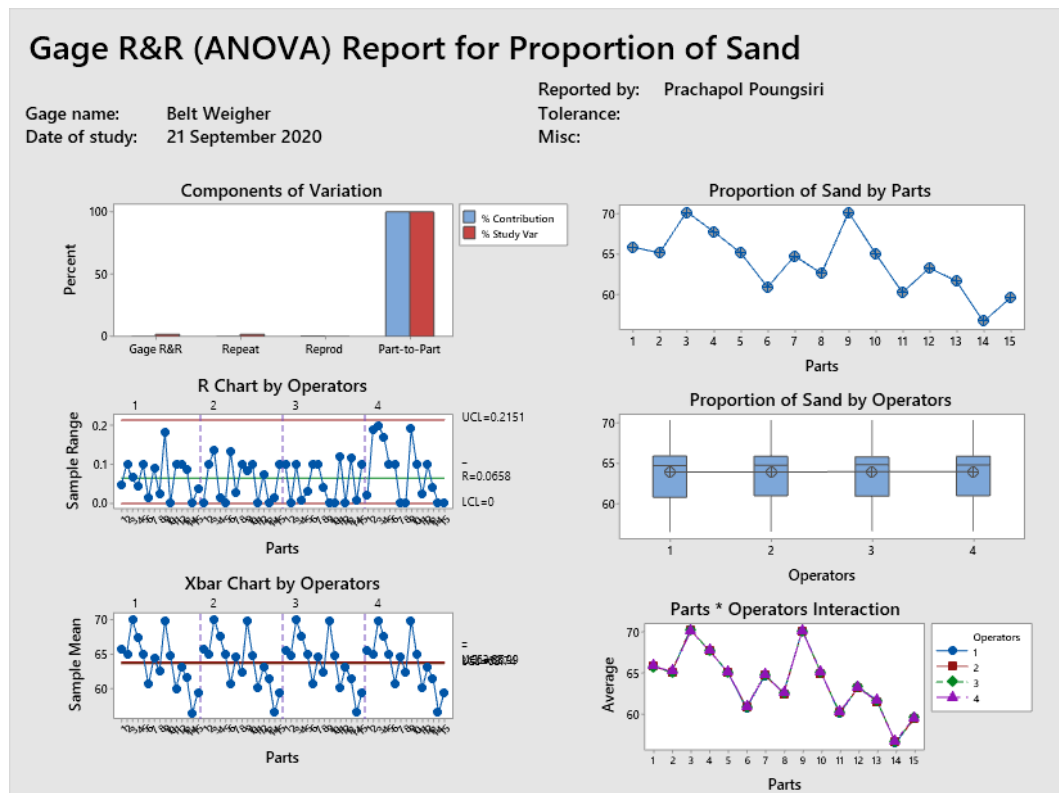
พนักงานแต่ละคนทำการอ่านค่าน้ำหนักสะสมของทรายของแต่ละสภาวะการทำงานที่กำหนดบนหน้าจอแสดงผลเทียบกับอัตราป้อนเข้า ซึ่งในการวัดจะทำแบบสุ่มหรือแบบไม่เรียงลำดับเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการเรียนรู้ ผลการวัดค่าสัดส่วนของทรายที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าสัดส่วนของทรายเพื่อใช้วิเคราะห์ระบบการวัด (หน่วยเป็น %)

	พนักงาน A	พนักงาน B	พนักงาน C	พนักงาน D

สภาวะการทำงาน	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	ครั้งที่2
1	65.85	65.80	65.80	65.78	65.70	65.80	65.80	65.80
2	65.00	65.10	65.00	65.05	65.00	65.00	65.10	65.24
3	70.13	70.20	70.10	70.00	70.20	70.10	70.24	70.20
4	67.69	67.70	67.72	67.60	67.66	67.70	67.70	67.77
5	65.00	65.10	65.10	65.10	65.13	65.10	65.10	65.00
6	60.71	60.70	60.80	60.93	60.80	60.90	60.93	60.82
7	64.69	64.60	64.67	64.70	64.80	64.70	64.70	64.70
8	62.63	62.60	62.50	62.50	62.50	62.54	62.40	62.50
9	70.19	70.00	70.00	70.19	70.10	70.10	70.08	70.00
10	65.00	65.00	64.90	65.00	65.00	65.00	65.00	65.10
11	60.22	60.10	60.20	60.19	60.10	60.00	60.20	60.22
12	63.30	63.20	63.22	63.20	63.30	63.30	63.15	63.10
13	61.69	61.60	61.50	61.57	61.50	61.62	61.50	61.61
14	56.62	56.60	56.60	56.60	56.59	56.60	56.50	56.50
15	59.54	59.50	59.40	59.50	59.60	59.50	59.50	59.50

ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดด้วยวิธี Gage R&R พบว่าหลังจากให้พนักงานทั้ง 4 คน ทำการวัดค่าสัดส่วนของทรายในแต่ละสภาวะการทำงานจนครบแล้ว นำผลการทดลองไปวิเคราะห์ผลด้วยวิธี Gage R&R โดยใช้โปรแกรม Minitab



ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ Gage R&R ด้วยโปรแกรม Minitab

การวิเคราะห์ระบบการวัดค่าสัดส่วนของทรายในกระบวนการ ด้วยวิธี Gage R&R โดยโปรแกรม Minitab ทำให้ได้แผนภาพและตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการประเมินผลเครื่องมือวัด ดังภาพที่ 4.21 และ 4.22 และสามารถสรุปได้ดังนี้

4.2.2.1 จากแผนภาพกราฟพิสัยเปรียบเทียบโดยพนักงานวัด (R Chart by operators) ในภาพที่ 4.21 พบว่าตำแหน่งของค่าพิสัยมีความแตกต่างกันมากกว่า 5 ค่า เพราะฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าสัดส่วนของทรายในแต่ละสภาวะการทดลองได้ นอกจากนี้ยังเห็นว่าการวัดของพนักงานคนที่ 4 ค่าที่วัดซ้ำกัน 2 ครั้ง มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก แต่ยังคงอยู่ในช่วงควบคุมด้านบน (UCL) และช่วงควบคุมด้านล่าง (LCL) ดังนั้นยังเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งในการทดลองอาจจะต้องควบคุมให้มากกว่าคนอื่น

4.2.2.2 จากแผนภาพกราฟค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบโดยพนักงานวัด (X-bar Chart by Operators) ในภาพที่ 4.21 พบว่าค่าเฉลี่ยของการวัดสัดส่วนของทรายของพนักงานแต่ละคนอยู่นอกเหนือเส้นควบคุมมากกว่า 1 ใน 3 แสดงว่าความผันแปรจากการวัดมีค่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับ



ความผันแปรจากกระบวนการ เพราะฉะนั้นข้อมูลจากการวัดสามารถนำมาประมาณค่าความผันแปรของกระบวนการได้

4.2.2.3 จากภาพที่ 4.22 พบว่า Number of Distinct Categories มีค่าเท่ากับ 80 ซึ่งมีค่ามากกว่า 14 ที่เป็นค่าแนะนำ ดังนั้นแสดงว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถในการจำแนกแยกแยะข้อมูลที่แตกต่างกันในระดับที่สามารถยอมรับได้ และสามารถนำข้อมูลไปใช้ประมาณความผันแปรของกระบวนการได้

4.2.2.4 จากแผนภาพกราฟอันตรกิริยาของสภาวะการทำงานและพนักงานวัด ในภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าเส้นกราฟการวัดสัดส่วนทรายที่แต่ละสภาวะการทำงานของพนักงานทั้ง 4 คนค่อนข้างทับซ้อนกัน แสดงว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกัน (Interaction) ระหว่างพนักงานวัดและสภาวะการทำงาน ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพนักงานค่าสัดส่วนทรายที่วัดได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และมีผลสอดคล้องกับตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนกับอันตรกิริยา (ANOVA with Interaction) ในภาพที่ 4.22 ที่มีค่า P-Value ของอันตรกิริยาของสภาวะการทำงานและพนักงานเท่ากับ 0.107 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นแสดงว่าไม่มีผลต่อค่าสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2.5 จากแผนภาพพล็อตค่าสัดส่วนของทรายในแต่ละสภาวะการทำงานของกระบวนการตามลำดับ ดังภาพที่ 4.21 พบว่าแต่ละสภาวะการทำงานจะให้ค่าสัดส่วนทรายที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ไม่ได้พิจารณาอันตรกิริยาของสภาวะการทำงานและพนักงานวัด ดังภาพที่ 4.22 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นแสดงว่ามีอย่างน้อย 1 สภาวะการทำงานที่ได้ค่าสัดส่วนของทรายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2.6 จากแผนภาพกราฟ Box plot หรือ Whisker plot ของค่าสัดส่วนของทรายเปรียบเทียบกันระหว่างพนักงานวัดทั้ง 4 คน ดังภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยในการวัดสัดส่วนของทรายของพนักงานแต่ละคนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ไม่ได้พิจารณาอันตรกิริยาของสภาวะการทำงานและพนักงานวัด ดังภาพที่ 4.22 ที่มีค่า P-value เท่ากับ 0.468 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าผลของการวัดค่าสัดส่วนของทรายของพนักงานทั้ง 4 คน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถให้พนักงานคนไหนวัดค่าสัดส่วนของทรายก็ได้ไม่มีความแตกต่างกัน

4.2.2.7 จากภาพที่ 4.22 ตารางวิเคราะห์ส่วนประกอบของความแปรปรวน (Variation Component) บ่งบอกว่าถ้าเปรียบเทียบความผันแปรทั้งหมดของระบบ (Total variation) เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วยความผันแปรที่เกิดจากระบวนการ (Part to part) 99.97 เปอร์เซ็นต์ และความผันแปรที่เกิดจากระบบการวัด (Total Gage R&R) มีเพียง 0.03 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เกิดมาจากความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) เท่านั้น ดังนั้นซึ่งสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความผันแปรเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งความผันแปรส่วนใหญ่มาจากกระบวนการ

4.2.2.8 การประเมินผลการวัด (Gage Evaluation) จากภาพที่ 4.22 ความแปรผันจากระบบการวัดเทียบกับความแปรผันของกระบวนการ (%SV หรือ P/TV) คิดเป็น 1.75% และความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) คิดเป็น 5.02% ซึ่งล้วนแล้วแต่มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 10% เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าความผันแปรที่เกิดจากระบบการวัดนี้มีค่าน้อยมา ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องปรับปรุงระบบการวัดให้มีความผันแปรลดลง

### Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	14	1631.90	116.565	21560.8	0.000
Operators	3	0.01	0.004	0.7	0.554
Parts * Operators	42	0.23	0.005	1.4	0.107
Repeatability	60	0.23	0.004		
Total	119	1632.37			

$\alpha$  to remove interaction term = 0.05

### Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Parts	14	1631.90	116.565	26056.0	0.000
Operators	3	0.01	0.004	0.9	0.468
Repeatability	102	0.46	0.004		
Total	119	1632.37			

### Gage R&R

#### Variance Components

Source	VarComp	95% CI	%Contribution (of VarComp)	95% CI
Total Gage R&R	0.0045	(0.003, 0.007)	0.03	(0.01, 0.06)
Repeatability	0.0045	(0.003, 0.006)	0.03	(0.01, 0.06)
Reproducibility	0.0000	(0.000, 0.002)	0.00	(0.00, 0.01)
Operators	0.0000	(0.000, 0.002)	0.00	(0.00, 0.01)
Part-To-Part	14.5700	(7.809, 36.240)	99.97	(99.94, 99.99)
Total Variation	14.5745	(7.814, 36.244)	100.00	

Process tolerance = 8

#### Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	95% CI	Study Var (6 × SD)	95% CI	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.06689	(0.059, 0.082)	0.4013	(0.355, 0.491)	1.75
Repeatability	0.06689	(0.059, 0.078)	0.4013	(0.353, 0.465)	1.75
Reproducibility	0.00000	(0.000, 0.040)	0.0000	(0.000, 0.243)	0.00
Operators	0.00000	(0.000, 0.040)	0.0000	(0.000, 0.243)	0.00
Part-To-Part	3.81707	(2.795, 6.020)	22.9024	(16.767, 36.120)	99.98
Total Variation	3.81765	(2.795, 6.020)	22.9059	(16.772, 36.122)	100.00

Source	95% CI	%Tolerance (SV/Toler)	95% CI
Total Gage R&R	(1.09, 2.47)	5.02	(4.43, 6.13)
Repeatability	(1.09, 2.48)	5.02	(4.41, 5.81)
Reproducibility	(0.00, 1.06)	0.00	(0.00, 3.03)
Operators	(0.00, 1.06)	0.00	(0.00, 3.03)
Part-To-Part	(99.97, 99.99)	286.28	(209.59, 451.50)
Total Variation		286.32	(209.65, 451.53)

Number of Distinct Categories = 80

95% CI = (57.3369, 129.487)

ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการประเมินผลเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรม Minitab

### 4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis; PCA)

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการเป็นการทดลองเพื่อให้เข้าใจถึงสถานะของการทำงานในปัจจุบันด้วยดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) ก่อนจะนำไปสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและทำการปรับปรุงกระบวนการให้ไปในแนวทางที่ดีขึ้นทั้งในด้านความผันแปรของกระบวนการและค่าเป้าหมายของตัวแปรตอบสนอง ซึ่งงานวิจัยนี้มีตัวแปรสนองที่สนใจคือสัดส่วนของทรายที่ได้จากกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งที่จะนำมาวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ในกรณีที่กระบวนการมีขีดจำกัดของข้อกำหนดพิเศษเพียงด้านเดียว

$$C_{pk} = \text{Min}(C_{pu}, C_{pl}) \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$C_{pu} = \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} \quad (4.2)$$

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \quad (4.3)$$

โดย

$\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนของทราย

$\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนของทราย

USL คือ ขีดจำกัดของข้อกำหนดด้านบน

LSL คือ ขีดจำกัดของข้อกำหนดด้านล่าง

การเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้ทำการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการจะเก็บตัวอย่างค่าสัดส่วนของทรายจากกระบวนการผลิตในสถานะปัจจุบันมาจำนวน 40 ตัวอย่าง ในตารางที่ 4.3 และทำการทดสอบสมมติฐานการกระจายตัวแบบปกติ (Normality) ของข้อมูล โดยตั้งสมมติฐานว่า

$H_0$  (สมมติฐานหลัก) : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

$H_a$  (สมมติฐานรอง): ข้อมูลไม่มีการกระจายตัวแบบปกติ

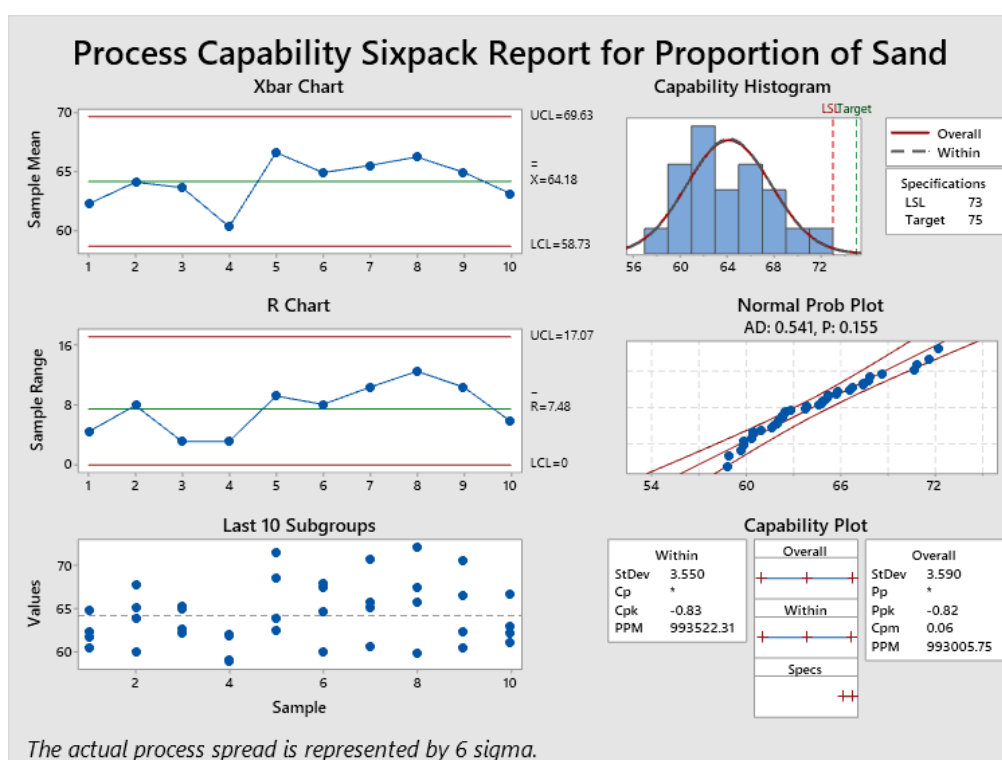
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าสัดส่วนของทรายก่อนการปรับปรุงกระบวนการ (หน่วยเป็น %)

การทดลองที่	พนักงาน	สัดส่วนทราย	การทดลองที่	พนักงาน	สัดส่วนทราย
1	1	61.60	21	3	59.80
2	1	62.30	22	3	67.87
3	1	60.40	23	3	64.57
4	1	64.81	24	3	67.43
5	1	59.81	25	3	65.05
6	1	67.73	26	3	65.77
7	1	65.15	27	3	70.81
8	1	63.76	28	3	60.47
9	1	65.19	29	3	67.40
10	1	62.08	30	3	59.70
11	2	64.87	31	4	65.68
12	2	62.50	32	4	72.17
13	2	61.92	33	4	62.29
14	2	58.79	34	4	60.30
15	2	58.90	35	4	70.67
16	2	61.82	36	4	66.53
17	2	63.85	37	4	60.93
18	2	71.58	38	4	66.73
19	2	68.62	39	4	62.80
20	2	62.40	40	4	62.10

จากตรวจสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนของทรายในกระบวนการบัดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้วิธีทดสอบแอนเดอร์สัน - ดาร์ลิง (Anderson – Darling Test) ดังภาพที่ 4.23 พบว่ากราฟความน่าจะเป็น Normal probability plot มีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่า P-value เท่ากับ 0.155 ซึ่งมาค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และเมื่อพิจารณาแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (Mean) และพิสัย (Rang) กลุ่มตัวอย่างของสัดส่วนของทรายพบว่าทุกจุดอยู่

ภายใต้เส้นขอบเขตพิภักควบคุมด้านบน (Upper control limit) และเส้นขอบเขตพิภักควบคุมด้านล่าง (Lower control limit) เพราะฉะนั้นกระบวนการนี้อยู่ในสภาวะที่สามารถควบคุมได้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) จากภาพที่ 4.23 พบว่ามีค่าเท่ากับ  $-0.83$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้านเดียว  $1.25$  เนื่องจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมายและความแปรปรวนของกระบวนการมีค่ามากเกินไปกว่ายอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงกระบวนการให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนของทรายเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย  $75\%$  และมีความแปรปรวนลดลง



ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง

#### 4.4 สรุประยะการวัด

จากการศึกษากระบวนการบัดหินปูนพบว่าเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสายพาน ที่ใช้ในการวัดค่าสัดส่วนของทรายซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนองที่สนใจในงานวิจัยนี้ ได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องมือวัด และจากการวิเคราะห์ระบบการวัดจากพนักงานจำนวน 4 คน พบว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของค่าสัดส่วนทรายในแต่ละสภาวะการทำงาน และอิทธิพลร่วมกันระหว่างสภาวะการทำงานกับพนักงานไม่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมี

นัยสำคัญ ซึ่งการทดลองสามารถเปลี่ยนแปลงพนักงานวัดได้โดยไม่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในระบบการวัด トラバドที่ยังใช้มาตรฐานและอุปกรณ์ในการวัดเดิม

นอกจากนี้ความแปรผัน (Variation) ทั้งหมดของกระบวนการมาจากความแปรผันของระบบ 99.97% ในขณะที่ความผันแปรจากระบบการวัดมีค่า 0.03% ซึ่งเป็นค่าที่น้อยและเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) คิดเป็น 5.02% ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 10% เนื่องจากความผันแปรจากการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบการวัดแต่อย่างใด



## บทที่ 5

### ระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase)

ในบทนี้จะเป็นการระดมสมองเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้กระบวนการผลิตหยุดด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งได้ค่าสัดส่วนของทรายน้อย

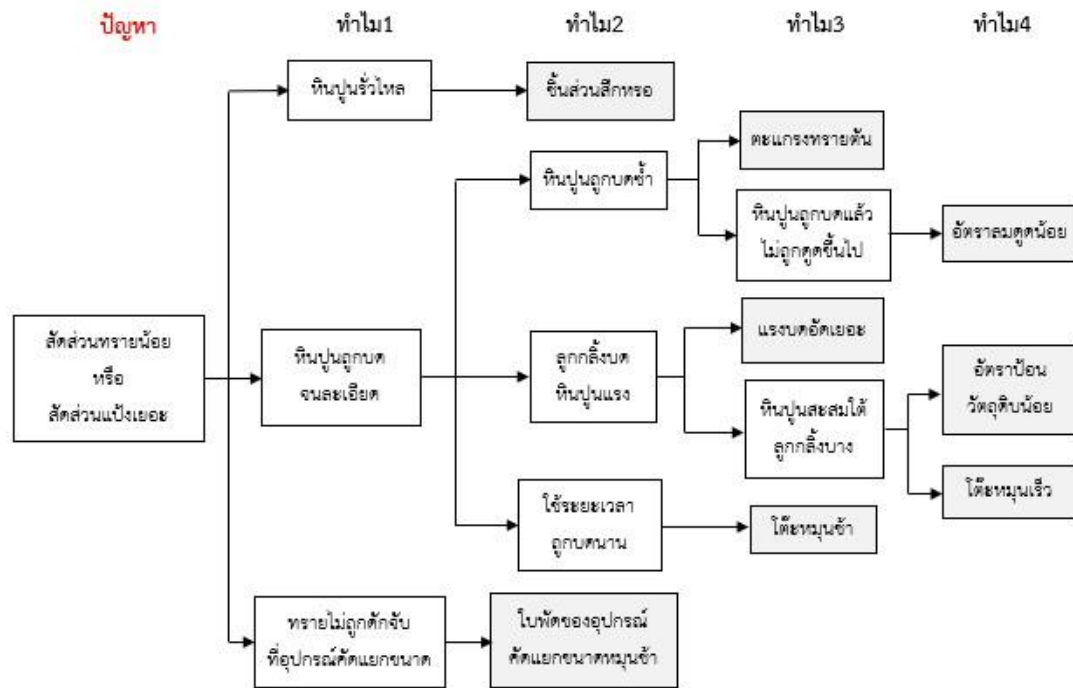
#### 5.1 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้งแนวตั้งนี้เราจำเป็นต้องหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาก่อน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหามีหลายวิธีด้วยกัน เช่น แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and effect diagram) แผนภาพพาเรโต (Pareto chart) และการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (Failure mode and effect analysis, FMEA) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค why-why analysis เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายในกระบวนการผลิตน้อย หรือเกิดเป็นผงละเอียดที่เป็นของเสียเป็นจำนวนมาก เนื่องจากผู้ทำวิจัยคิดว่าวิธีนี้จะสามารถทำให้ค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา และนำมาแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหานี้จะรวบรวมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ได้แก่ ผู้จัดการฝ่ายผลิต (Production manager) หัวหน้าฝ่ายซ่อมบำรุง (Maintenance Manager) วิศวกรฝ่ายผลิต (Production engineer) วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง (Maintenance engineer) วิศวกรควบคุมคุณภาพ (Quality control engineer) พนักงานควบคุมเครื่องจักร (Production operator) และช่างเทคนิค (Technician) เพื่อให้ได้สาเหตุจากทุกด้านให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยวิธี Why-why analysis ภาพที่ 5.1 พบว่าการที่กระบวนการผลิตด้วยเครื่องบดชนิดล้อยอดแนวตั้งของโรงงานการศึกษาได้สัดส่วนที่เป็นทรายน้อย และสัดส่วนของเสียหรือผงละเอียดเยอะมาจาก 8 สาเหตุ โดยจะนำสาเหตุเหล่านี้มาพิจารณาเพื่อหามาตรการป้องกันและคัดเลือกเป็นปัจจัยนำเข้าการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตในขั้นตอนถัดไป





ภาพที่ 5.1 แผนภาพวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยวิธี Why-Why analysis

จากตารางที่ 5.1 เป็นการระดมสมองเพื่อพิจารณาถึงเหตุผลในการหามาตรการในการแก้ปัญหาและคัดเลือกปัจจัยนำเข้าการทดลอง โดยจะแบ่งสาเหตุที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายน้อย ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สาเหตุที่มาจากความบกพร่องในกระบวนการนั้นคือ การชำรุดหรือสึกหรอของเครื่องจักร (ลำดับที่1) และการติดตั้งของตะแกรงคัดขนาดทราย (ลำดับที่2) ซึ่งได้จัดทำมาตรการแก้ไขโดยให้มุ่งเน้นในเรื่องของการตรวจเช็คเครื่องจักรประจำวันของพนักงานตามรายการของใบตรวจเช็ค (check sheet) ที่ได้จัดทำไว้ตามหลักการของการของการบำรุงรักษาด้วยตัวเอง (Autonomous maintenance) และให้รับผิดชอบการแก้ไขทันทีเมื่อพบความผิดปกติ

สาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการปรับตั้งค่าสภาวะการทำงานของกระบวนการ ได้แก่ อัตราลมดูด แรงบดอัด อัตราป้อนเข้า และความเร็วของโต๊ะหมุน ซึ่งจะนำมาทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์และหาค่าที่เหมาะสมของสภาวะการทำงานในกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง เพื่อให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด และกำหนดเป็นมาตรฐานการทำงานให้กับพนักงาน ยกเว้นสภาวะการทำงานของอุปกรณ์คัดแยกขนาดที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพขนาดของทรายที่ได้

ตารางที่ 5.1 การจำแนกสาเหตุ ประเภทของสาเหตุ และมาตรการป้องกัน

ลำดับ	สาเหตุ	ประเภท	มาตรการ
1	ชิ้นส่วนเครื่องจักรชำรุด/สึกหรอ	ความบกพร่องในกระบวนการ	จัดทำ check sheet และติดตามการตรวจเช็คประจำวัน
2	ตะแกรงคัดขนาดทรายอุดตัน	ความบกพร่องในกระบวนการ	จัดทำ check sheet และติดตามการตรวจเช็คประจำวัน
3	อัตราการดูด	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	นำไปใช้ในการทดลอง
4	แรงบดอัดเยอะ	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	นำไปใช้ในการทดลอง
5	อัตราป้อนวัตถุดิบน้อย	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	นำไปใช้ในการทดลอง
6	โต๊ะหมุนทำงานเร็ว	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	นำไปใช้ในการทดลอง
7	โต๊ะหมุนทำงานช้า	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	นำไปใช้ในการทดลอง
8	ใบพัดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดหินชำ	การปรับตั้งค่าสภาวะการทำงาน	กำหนดให้คงที่ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพขนาดของทราย

ตารางที่ 5.2 ปัจจัยนำเข้าการทดลองและระดับของปัจจัย

สัญลักษณ์ ใช้แทน	ปัจจัย (Factor)	หน่วย (Unit)	ระดับ (Level)		
			-1	0	1
A	อัตราป้อนวัตถุดิบ (Feed Rate)	Ton/h	130	140	150
B	แรงอัดบด (Milling Pressure)	bar	100	110	120
C	ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating Table Speed)	rpm	9.5	11.9	14.3
D	อัตราการดูด (Suction rate)	$\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	34	36	38

นำสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์มากำหนดเป็นปัจจัยนำเข้าการทดลองจะได้ทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนวัตถุดิบ (Feed rate) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยปัจจัย A แรงอัดบด (Milling pressure) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยปัจจัย B ความเร็วในการหมุนของโต๊ะ (Table rotating

speed) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยปัจจัย C และอัตราการดูด (Suction rate) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยปัจจัย D และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยโดยให้ระดับต่ำ (Low) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย -1 ระดับสูง (High) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย +1 และระดับกึ่งกลาง (Center) แทนด้วยสัญลักษณ์ 0 ดังตารางที่ 5.2

- อัตราป้อนเข้า (Feed rate) คือปริมาณของหินปูนที่ถูกป้อนเข้าเครื่องบดวัตถุดิบ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง โดยการกำหนดค่าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีหน่วยเป็น ตันต่อชั่วโมง การใช้อัตราป้อนวัตถุดิบในปริมาณมากอาจจะทำให้ได้ปริมาณทรายมากตามไปด้วย แต่ถ้าปริมาณของทรายเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเท่าเดิมก็จะทำให้สัดส่วนของทรายน้อยลงเช่นกัน ปัจจุบันกระบวนการบดหินปูนได้สัดส่วนของทรายเฉลี่ยประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการผลิตปูนมอร์ต้ามีความต้องการทรายอย่างน้อย 90 ตันต่อชั่วโมง ดังนั้นต้องใช้อัตราป้อนวัตถุดิบประมาณ 140 ตันต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้เป็นระดับกึ่งกลางในการทดลอง และให้ระดับต่ำและสูงเป็น 130 ตันต่อชั่วโมงและ 140 ตันต่อชั่วโมงตามลำดับ
- แรงบดอัด (Milling pressure) คือแรงดันของระบบไฮดรอลิกที่ส่งผ่านตะขอ (Hook) ไปกดบนลูกกลิ้ง มีหน่วยเป็นบาร์ (bar) ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ใช้เครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในกระบวนการบด [7] แร่ทอง (Gold ore) และ [10] แร่เหล็ก (Iron ore) พบว่าแรงบดอัดมีผลกระทบต่ออัตราการผลิตและขนาดของวัตถุดิบที่ใช้อย่างมีนัยสำคัญ [15] แต่ถ้าแรงบดอัดมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและการสึกหรอของโต๊ะหมุนเพิ่มมากขึ้นทำให้มีอายุการใช้งานลดลงด้วยเช่นกัน [16] นอกจากนี้ยังมีอีกงานวิจัยที่อธิบายถึงแรงบดอัด หรือแรงกดทับของลูกกลิ้งที่กดอยู่บนโต๊ะหมุนว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง และการเพิ่มขึ้นของแรงบดอัดจะทำให้ความละเอียดของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ปัจจุบันการปรับแรงอัดบดจะต้องมากกว่า 100 บาร์ เพื่อให้หินปูนเกิดการแตกตัว ดังนั้นจึงจะใช้เป็นระดับต่ำในการทดลอง ส่วนระดับกึ่งกลางและระดับสูงจะใช้ 110 บาร์ และ 120 บาร์ ตามลำดับ
- ความเร็วในการหมุนของโต๊ะ (Rotating table speed) คือความเร็วรอบการหมุนของโต๊ะที่รองรับหินปูน มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที ซึ่งปัจจัยนี้ส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของหินปูนให้ถูกบดได้ลูกกลิ้ง และการทำงานของโต๊ะหมุนจะถูกควบคุมด้วยมอเตอร์และชุดเกียร์ที่มีการปรับรอบตั้งแต่ 0% ไปจนถึง 100% ของการทำงานมอเตอร์ [17] ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการ

บดถ่านหิน (Coal) พบว่าความเร็วของโตะหมุนจะตอบสนองต่อการบดเมื่อวัตถุดิบถูกบดอยู่ภายใต้แรงดันระหว่างโตะหมุนและลูกกลิ้ง ปัจจุบันมีการตั้งค่าโตะหมุนให้มีความเร็ว 11.9 รอบต่อนาที ซึ่งจะใช้เป็นระดับกึ่งกลางของการทดลอง และกำหนดระดับต่ำและระดับสูงเป็น 9.5 รอบต่อนาทีและ 14.3 รอบต่อนาที ตามลำดับ

- อัตราลมดูด (Suction rate) คือปริมาณลมดูดที่เกิดขึ้นจากการทำงานของพัดลมหอยโข่ง มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งพัดลมจะสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 - 100 เปอร์เซ็นต์ของการทำงานมอเตอร์ [9] มีงานวิจัยบอกว่าอัตราลมดูดในเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อสัดส่วนของวัตถุดิบที่จะถูกนำกลับมาบดซ้ำใหม่อีกครั้ง ซึ่งการปรับอัตราลมดูดน้อยเกินไปจะทำให้หินปูนที่ถูกบดแล้วบางส่วนถูกนำมาบดซ้ำอีกครั้ง และอาจจะทำให้สัดส่วนของผงละเอียดเพิ่มมากขึ้นและสัดส่วนของทรายน้อยลง ปัจจุบันตั้งค่าอัตราลมดูดเฉลี่ยอยู่ที่ 34,000 ลบ.ม./ชั่วโมง ซึ่งให้เป็นระดับต่ำในการทดลอง และกำหนดระดับสูง 38,000 ลบ.ม./ชั่วโมง เนื่องจากถ้าปรับมากกว่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพขนาดของทราย ดังนั้นระดับกึ่งกลางคือ 36,000 ลบ.ม./ชั่วโมง

## 5.2 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นนี้จะเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบปัจจัยที่นำเข้าการทดลองทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (Feed rate) แรงบดอัด (Milling pressure) ความเร็วโตะหมุน (Rotating table speed) และอัตราลมดูด (Suction rate) ว่ามีผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือไม่ เป็นเพียงการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่จะนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในขั้นตอนถัดไป

### 5.2.1 ออกแบบการทดลองเบื้องต้น

โดยจะใช้วิธีออกแบบการทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียล [3] ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่นิยมใช้กันอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการทดลองมีหลายปัจจัย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีจำนวนการทดลองน้อยที่สุด แต่ยังสามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีเงื่อนไขว่าปัจจัยในการทดลองคงที่ ทำการทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ และข้อมูลมีการแจกแจงปกติ นอกจากนี้การออกแบบการทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียลยังถูกใช้งานในกรณีที่ต้องการคัดกรองปัจจัยอีกด้วย แต่เนื่องจากการทดลองเกิดขึ้นที่ 2 ระดับของปัจจัยเท่านั้น ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะตั้งอยู่

บนสมมติฐานว่าตัวแปรตอบสนองมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงระดับของปัจจัย และเพื่อตรวจสอบสมมติฐานนี้จึงได้เพิ่มระดับจุดกึ่งกลาง (Center point) ของปัจจัยเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลกำลังสองของแต่ละปัจจัยด้วย ซึ่งในการทดลองนี้จะพิจารณาปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า แรงดันการบิด ความเร็วโรต๊ะหมุน และอัตราลมดูด

เนื่องจากในการทดลองนี้มี 4 ปัจจัย ดังนั้นการออกแบบการทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียล หรือ การทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ 2 ระดับของปัจจัย โดยที่  $k$  คือจำนวนของปัจจัยในการทดลอง ( $k=4$ ) ดังนั้น  $2^4$  แฟคทอเรียลจะมีการทดลองร่วมของปัจจัย (Treatment combination) ทั้งหมด  $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$  การทดลอง และการทดลองที่ระดับกึ่งกลางของปัจจัยอีก 3 การทดลอง ดังตารางที่ 5.3 โดยกำหนดให้ระดับสูงแทนด้วยสัญลักษณ์บวก (+) ระดับต่ำแทนด้วยสัญลักษณ์ลบ (-) และระดับกึ่งกลางแทนด้วยศูนย์ (0) ซึ่งรูปแบบการทดลอง  $2^4$  แฟคทอเรียลและเพิ่มจุดกึ่งกลางข้างต้นจะมีจำนวนการทดลองรวมกันทั้งหมด 19 การทดลอง แต่สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ทำการทดลองซ้ำ (Replicate) ที่ระดับการทดลองละ 3 ครั้ง โดยจะทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอก

ตารางที่ 5.3 ตารางออกแบบการทดลอง  $2^4$  แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ และเพิ่มจุดกึ่งกลาง

Run	Factors			
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0

### 5.2.2 วิธีทำการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้จะทำการทดลองในรูปแบบของการผลิตจริงของโรงงานการศึกษา ที่มีการทำงานวันละ 3 กะ (Shift) และมีพนักงานควบคุมเครื่องจักรทั้งหมด 4 คน ที่สลับกันมาทำงานกะละ 1 คน โดยจะให้ทำการทดลองกะ (Shift) ละ 1 การทดลองเท่านั้นเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการผลิตให้กับลูกค้า ซึ่งมีทั้งหมด 57 การทดลอง

5.2.2.1 เตรียมความพร้อมวัตถุดิบหินปูนที่จะนำมาใช้ในการบดลดขนาด พร้อมทั้งให้ช่างเทคนิคตรวจเช็คสภาพเครื่องจักรประจำวันก่อนเริ่มทำการทดลอง

5.2.2.2 ปรับแรงดันแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) ในถังเก็บแรงดัน (Accumulator) ให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของแรงบดอัดที่จะใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 5.4 ตารางผลการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธี 2<sup>4</sup> แฟคทอเรียล และเพิ่มจุดกึ่งกลาง

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้าการทดลอง				สัดส่วนของทราย (%)			ค่าเฉลี่ย
	อัตรา ป้อนเข้า (ตัน/ช.ม.)	แรงดัน การบด (บาร์)	ความเร็ว โตะหมุน (รอบ/นาที)	อัตราลมดูด (ลบ.ม./ช.ม.)	การทำซ้ำครั้งที่			
					1	2	3	
1	130	100	9.5	34,000	61.38	62.08	61.62	61.69
2	150	100	9.5	34,000	53.13	53.47	53.87	53.49
3	130	120	9.5	34,000	66.23	66.46	65.77	66.15
4	150	120	9.5	34,000	52.00	51.40	51.80	51.73
5	130	100	14.3	34,000	59.92	59.31	60.46	59.90
6	150	100	14.3	34,000	58.93	58.53	57.60	58.36
7	130	120	14.3	34,000	68.38	68.15	68.69	68.41
8	150	120	14.3	34,000	54.07	52.73	54.20	53.67
9	130	100	9.5	38,000	79.15	79.38	78.31	78.95
10	150	100	9.5	38,000	66.33	66.00	65.53	65.96
11	130	120	9.5	38,000	65.92	65.69	66.38	66.00
12	150	120	9.5	38,000	60.60	60.87	60.93	60.80
13	130	100	14.3	38,000	72.23	72.38	71.31	71.97
14	150	100	14.3	38,000	58.13	57.67	58.47	58.09
15	130	120	14.3	38,000	64.23	63.77	63.54	63.85
16	150	120	14.3	38,000	61.60	61.07	60.73	61.13
17	140	110	11.9	36,000	69.23	67.85	68.92	68.67
18	140	110	11.9	36,000	62.47	61.93	61.80	62.07
19	140	110	11.9	36,000	66.00	66.29	66.43	66.24

5.2.2.3 ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการตามลำดับการทดลองแบบสุ่มในตารางการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

5.2.2.4 ควบคุมการทำงานของกระบวนการให้อยู่ในสภาวะคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.2.3.5 เริ่มเก็บค่าน้ำหนักสะสมของทรายที่ไหลผ่านเครื่องชั่งแบบสายพานเป็นเวลา 1

ชั่วโมง

5.2.3.6 บันทึกค่าของปริมาณของทรายที่ได้ในเวลา 1 ชั่วโมง เทียบกับอัตราป้อนเข้าหินปูนที่ใช้ในการทดลองนั้นลงในตารางที่ 5.4

5.2.3.7 ทำการทดลองจนกว่าจะครบ 57 การทดลอง และผลการทดลองทั้งหมดแสดงอยู่ในตารางที่ 5.4

### 5.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการออกแบบการทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียลจะเป็นไปตามรูปแบบของสมการที่ 5.1 ซึ่งการทดลองนี้พิจารณาปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ( $k = 4$ ) ดังนั้นจึงประกอบไปด้วยผลกระทบจากปัจจัยหลัก 4 เทอม และผลกระทบจากปัจจัยร่วม 6 เทอม ที่ต้องถูกนำมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อสัดส่วนของทราย

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^4 \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5.1)$$

โดยที่  $\beta_j$  แทนผลกระทบจากปัจจัยหลัก และ  $\beta_{ij}$  แทนผลกระทบจากปัจจัยร่วม แต่ในการทดลองนี้จะพิจารณาถึงอิทธิพลจากความโค้ง (Curvature) ของผลตอบสนองด้วย ดังนั้นสมการข้างต้นจึงไม่เพียงพอต่อการใช้วิเคราะห์ จึงต้องใช้รูปแบบของสมการพื้นผิวตอบสนอง สมการที่ 5.2 ที่มีเทอมกำลังสองของปัจจัยร่วมอยู่ด้วย

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^4 \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^4 \beta_{jj} x_j^2 + \epsilon \quad (5.2)$$

การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลอง  $2^4$  แฟคทอเรียล จะใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการพิจารณาถึงผลกระทบจากปัจจัยหลัก (Main effect) และผลกระทบจากปัจจัยร่วม (Interaction) ที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในหัวข้อนี้จะใช้ผลการทดลองจาก



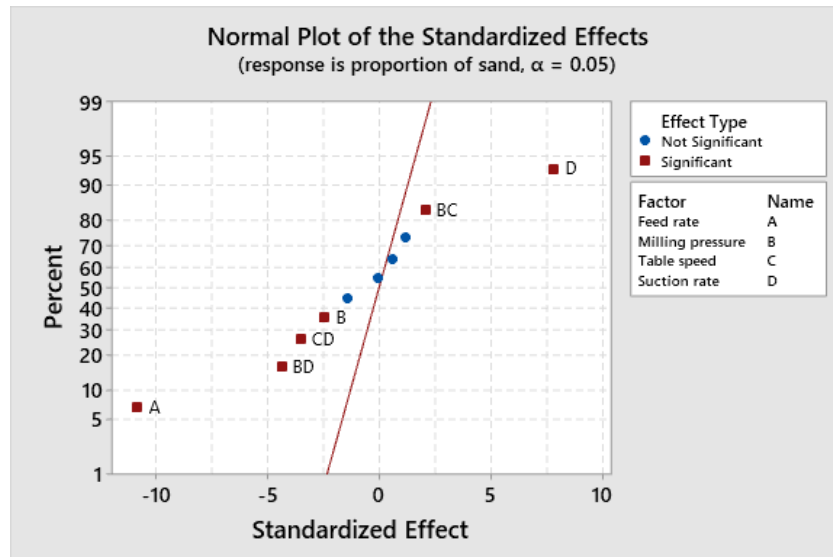
ตารางที่ 5.4 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ที่เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
2.94480	85.87%	81.89%	76.18%			
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	11	2055.66	186.88	21.55	0.000	
Linear	4	1620.70	405.18	46.72	0.000	
Feed rate	1	1018.47	1018.47	117.45	0.000	
Milling pressure	1	52.03	52.03	6.00	0.019	
Table speed	1	16.57	16.57	1.91	0.175	
Suction rate	1	533.64	533.64	61.54	0.000	
2-Way Interactions	6	325.40	54.23	6.25	0.000	
Feed rate*Milling pressure	1	0.04	0.04	0.00	0.947	
Feed rate*Table speed	1	11.80	11.80	1.36	0.250	
Feed rate*Suction rate	1	3.18	3.18	0.37	0.548	
Milling pressure*Table speed	1	37.48	37.48	4.32	0.044	
Milling pressure*Suction rate	1	165.59	165.59	19.10	0.000	
Table speed*Suction rate	1	107.31	107.31	12.37	0.001	
Curvature	1	109.55	109.55	12.63	0.001	
Error	39	338.20	8.67			
Lack-of-Fit	5	329.62	65.92	261.14	0.000	
Pure Error	34	8.58	0.25			
Total	50	2393.86				

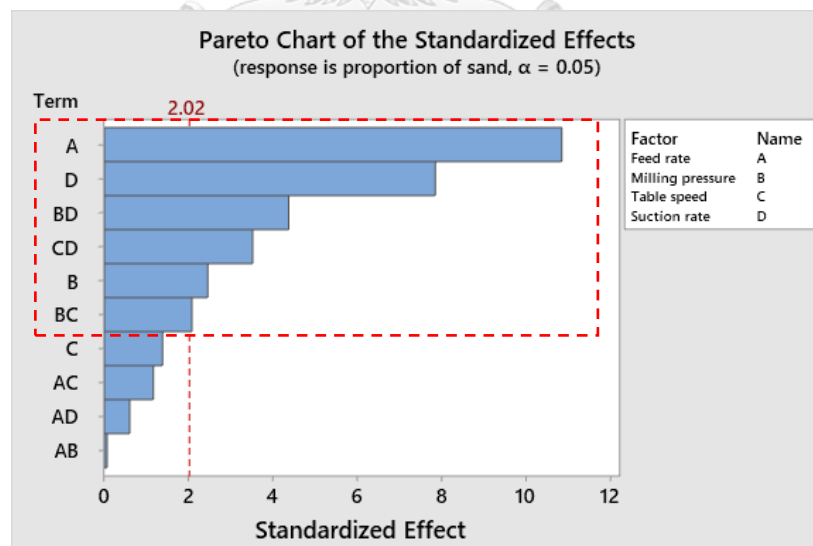
ภาพที่ 5.2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ภาพที่ 5.2 พบว่าผลกระทบหลัก (Main effect) ของปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (A) แรงดันการบด (B) และอัตราการดูด (D) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ความเร็วโตะหมุน (C) ส่งผลกระทบบต่อสัดส่วนของทรายในเชิงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ซึ่งผลกระทบจากปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มี 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันการบด (B) x ความเร็วโตะหมุน

(C) แรงดันการบด (B) x อัตราลมดูด (D) และความเร็วโตะหมุน (C) x อัตราลมดูด (D) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าผลกระทบร่วมของอัตราป้อนเข้ากับปัจจัยอื่น ๆ มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นอัตราป้อนเข้าไม่มีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 5.3 กราฟแจกแจงปกติของผลกระทบมาตรฐาน



ภาพที่ 5.4 แผนภาพพาเรโตของผลกระทบมาตรฐาน

จากกราฟการแจกแจงปกติของผลกระทบมาตรฐาน (Normal plot of the standardized effects) แสดงให้เห็นภาพรวมของผลกระทบจากปัจจัยหลักและผลกระทบจากปัจจัยร่วมที่ส่งผล

กระทบต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีทั้งหมด 6 ปัจจัย ดังภาพที่ 5.3 (จุดสี่เหลี่ยมสีแดง) โดยจะแบ่งเป็นผลกระทบจากปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (A) แรงดันการบด (B) และอัตราการมุด (D) และผลกระทบจากปัจจัยร่วมอีก 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันการบด  $\times$  ความเร็วโต๊ะหมุน (BC) แรงดันการบด  $\times$  อัตราการมุด (BD) และความเร็วโต๊ะหมุน  $\times$  อัตราการมุด (CD) ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพพารेटอของผลกระทบมาตรฐาน (Pareto chart of the standardized effects) ที่แสดงอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งหมด 6 ปัจจัย โดยเรียงลำดับจากปัจจัยที่มีอิทธิพลมากไปจนถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อย ดังภาพที่ 5.4

นอกจากนี้ การเพิ่มจุดกึ่งกลางในการทดลองยังทำให้ทราบว่าอิทธิพลจากความโค้ง (Curvature) ของผลตอบสนองมีค่า P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จากสมมติฐาน

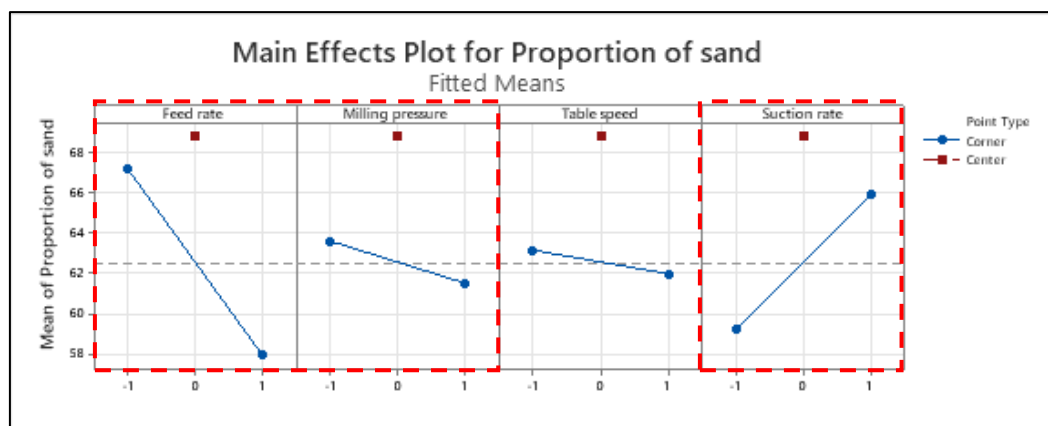
$$H_0: \beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33} + \beta_{44} = 0$$

$$H_1: \beta_{11} + \beta_{22} + \beta_{33} + \beta_{44} \neq 0$$

จึงสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและผลตอบสนองมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design) ในการวิเคราะห์แทนวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลกระทบจากปัจจัยหลักและสัดส่วนของทรายสามารถอธิบายได้จากกราฟผลกระทบหลัก แสดงดังภาพที่ 5.5 โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้น ได้แก่ อัตราป้อนเข้า แรงดันการบด และอัตราการมุด เมื่ออัตราป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไประดับสูง หรือจาก 130 ตันต่อชั่วโมง ไปยัง 150 ตันต่อชั่วโมง ทำให้สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มลดลงจาก 67.3% ไปยัง 58.0% และถ้าแรงดันการบดเปลี่ยนแปลงระดับจากระดับต่ำไประดับสูง หรือจาก 100 บาร์ไปยัง 120 บาร์ จะทำให้สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มลดลงจาก 63.8% ไปยัง 61.8% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงระดับของอัตราป้อนเข้าและแรงดันการบดส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายไปในทิศทางเดียวกัน แต่อิทธิพลของอัตราป้อนเข้าที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายมากกว่าอิทธิพลจากแรงดันการบด ในขณะที่ถ้าอัตรา

ลมดูดเปลี่ยนแปลงระดับจากระดับต่ำไประดับสูง หรือจาก 34,000 m<sup>3</sup>/h ไปยัง 38,000 m<sup>3</sup>/h ทำให้ สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 59.4% ไปเป็น 66.0%



ภาพที่ 5.5 ผลกระทบจากปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทราย

ผลกระทบจากปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดัง ภาพที่ 5.6

1. แรงดันการบด x ความเร็วโตะหมุน (BC)

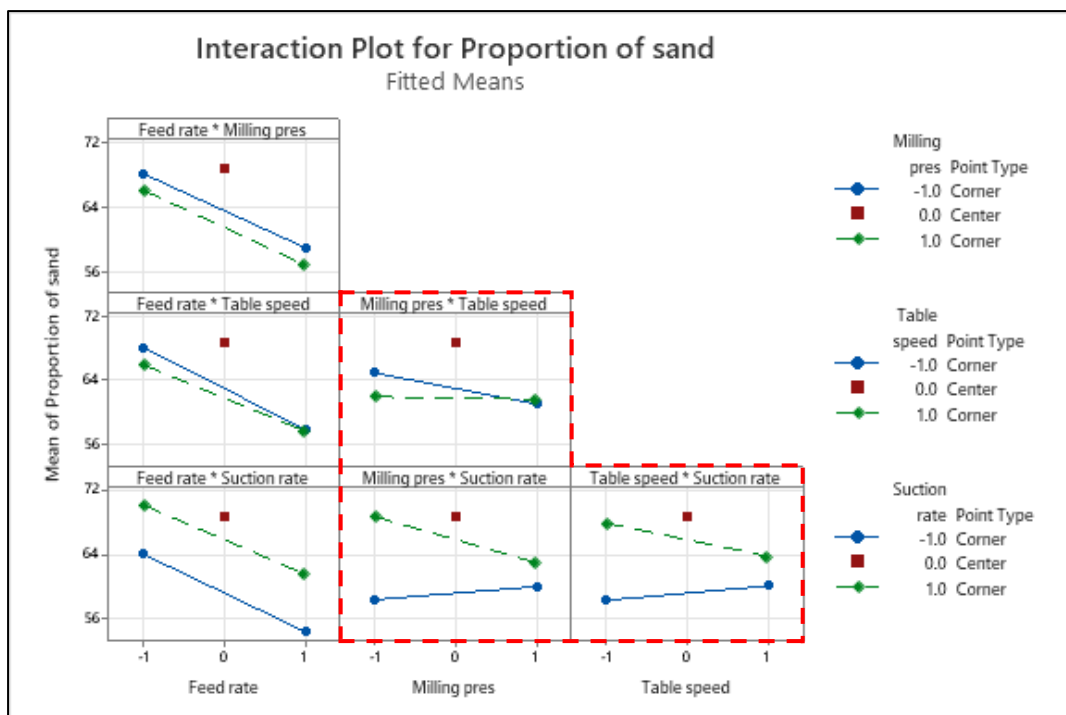
เมื่อเปลี่ยนระดับของแรงดันการบดจากระดับต่ำไปยังระดับสูงที่ความเร็วโตะหมุนระดับต่ำจะทำให้สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มลดลง แต่ถ้าแรงดันการบดเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปยังระดับสูงที่ความเร็วโตะหมุนอยู่ระดับสูง สัดส่วนของทรายจะมีค่าคงที่

2. แรงดันการบด x อัตราลมดูด (BD)

เมื่อแรงดันการบดเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปยังระดับสูงในขณะที่อัตราลมดูดระดับต่ำจะทำให้สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันถ้าแค่แรงดันการบดเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปยังระดับสูงที่ความเร็วโตะหมุนอยู่ในระดับสูง สัดส่วนของทรายจะมีแนวโน้มลดลง

3. ความเร็วโตะหมุน x อัตราลมดูด (CD)

เมื่อความเร็วโตะหมุนเปลี่ยนแปลงระดับจากระดับสูงไปยังระดับต่ำในขณะที่อัตราลมดูดอยู่ที่ระดับสูง สัดส่วนของทรายจะมีแนวโน้มลดลง แต่ถ้าความเร็วโตะหมุนเปลี่ยนแปลงระดับจากระดับต่ำไปยังระดับสูงที่อัตราลมดูดอยู่ในระดับต่ำ สัดส่วนของทรายจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



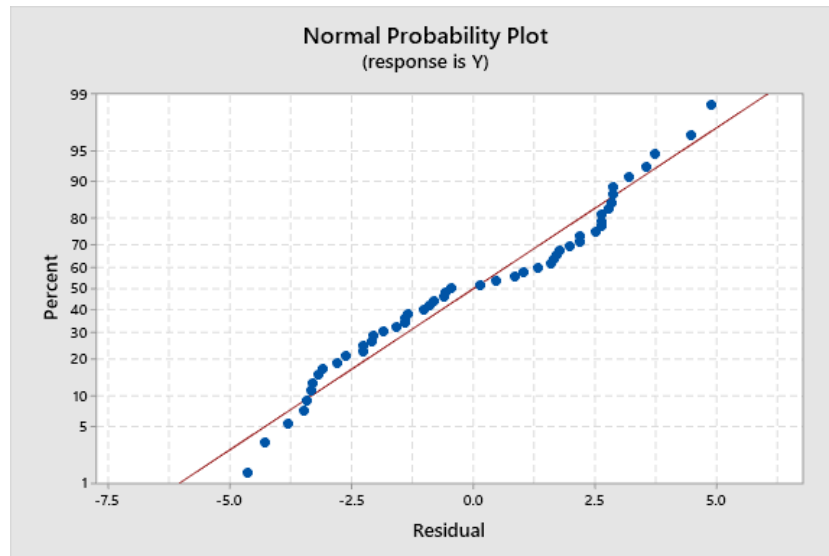
ภาพที่ 5.6 ผลกระทบจากปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทราย

#### 5.2.4 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสัดส่วนทรายจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง เพื่อไม่ให้เกิดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยและการพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายมีความผิดพลาด ซึ่งการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองสามารถทำได้โดยวิธีการวิเคราะห์จากกราฟค่าส่วนตกค้าง (Residual) และจะตรวจสอบสมมติฐาน 3 อย่าง ได้แก่

##### 5.2.4.1 สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

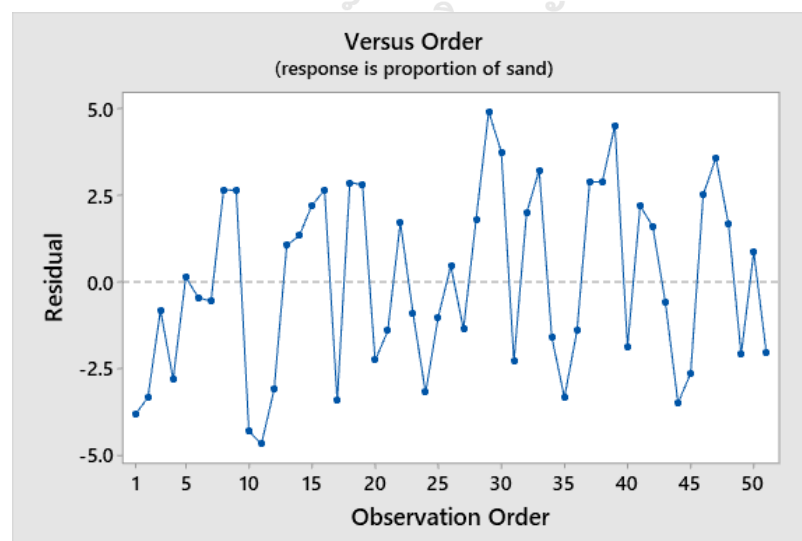
การตรวจสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติสามารถพิจารณาได้จากกราฟความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างจากแบบจำลอง ดังภาพที่ 5.7 ซึ่งจากกราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างที่พล็อตจากโปรแกรม Minitab พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลค่าสัดส่วนของทรายมีการแจกแจงปกติเป็นไปตามสมมติฐานข้างต้น



ภาพที่ 5.7 การแจกแจงความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง (Residual)

#### 5.2.4.2 สมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

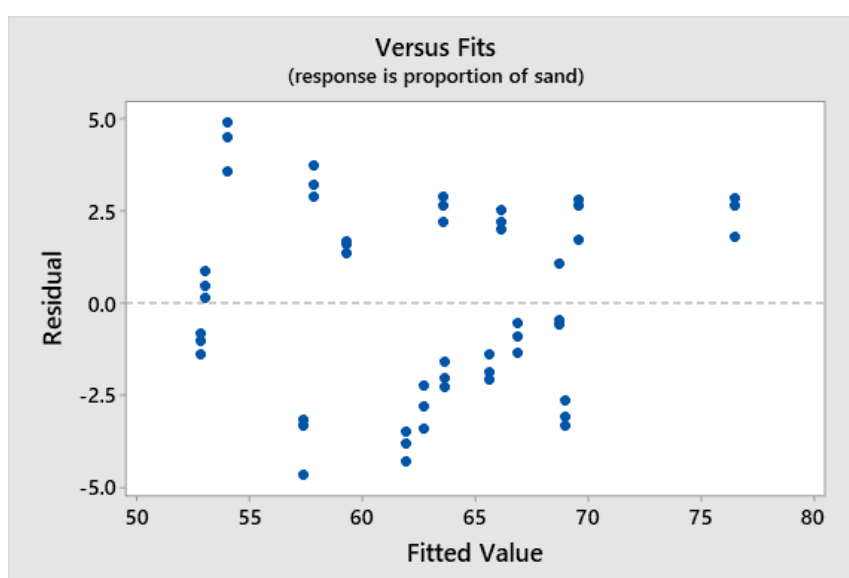
การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลอง ซึ่งจากการพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Minitab แล้วพบว่าค่าส่วนตกค้างของสัดส่วนทรายมีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน และไม่มีแนวโน้มไปทางใดทางหนึ่ง ดังภาพที่ 5.8 ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าสัดส่วนของทรายที่ได้จากแบบจำลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของลำดับการทดลองและค่าส่วนตกค้าง

### 5.2.4.3 สมมติฐานของความแปรปรวน (Variance)

การตรวจสอบความแปรปรวนของสัดส่วนทรายที่ได้จากแบบจำลองจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพยากรณ์สัดส่วนของทรายกับค่าส่วนตกค้าง ซึ่งจากการพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Minitab แล้วพบว่าส่วนตกค้างของชุดข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบแนวแกน 0 ทั้งทางด้านที่เป็นบวกและลบ ดังภาพที่ 5.9 ไม่มีรูปแบบของกรวยปากปิดหรือกรวยปากเปิด ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าค่าสัดส่วนของทรายที่ได้จากแบบจำลองมีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของค่าพยากรณ์และค่าส่วนตกค้าง (Residual)

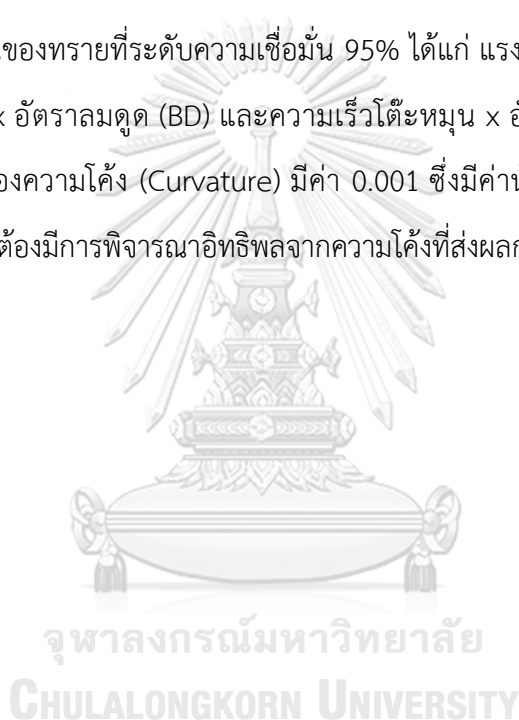
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 5.3 สรุประยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งพบสาเหตุที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายน้อยทั้งหมด 8 สาเหตุ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สาเหตุที่มาจากความบกพร่องของกระบวนการ 2 สาเหตุ ซึ่งได้จัดทำมาตรการให้พนักงานช่างเทคนิคตรวจเช็คเครื่องจักรประจำวันแล้วให้รีบดำเนินการแก้ไขทันทีเมื่อพบสิ่งผิดปกติ และสาเหตุของการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอีก 6 สาเหตุ แต่สามารถนำมาพิจารณาเป็นปัจจัยนำเข้าการทดลองได้เพียง 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (Feed rate) แรงดันบดอัด (Milling pressure) ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating table speed) และอัตราการดูด (Suction rate)

หลังจากนั้นนำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นมาทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ 2 ระดับของปัจจัย หรือเรียกว่า  $2^4$  แฟคทอเรียล และเพิ่มจุดกึ่งกลางเพื่อตรวจสอบอิทธิพลจากความโค้งของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายด้วย

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ อัตราป้อนเข้า แรงดันการบด และอัตราการดูด ในขณะที่ความเร็วของโตะหมุนไม่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทราย แต่มีผลกระทบรวมระหว่างแรงดันการบดและอัตราการดูด ซึ่งอิทธิพลจากปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ แรงดันการบด x ความเร็วโตะหมุน (BC) แรงดันการบด x อัตราการดูด (BD) และความเร็วโตะหมุน x อัตราการดูด (CD) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า P-Value ของความโค้ง (Curvature) มีค่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.005 เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาอิทธิพลจากความโค้งที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายด้วย





## บทที่ 6

### ระยะปรับปรุงกระบวนการ (Improvement phase)

จากการทดลองในบทที่ 5 ด้วยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ 2 ระดับของปัจจัย และเพิ่มจุดกึ่งกลาง พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญทั้งในรูปแบบของผลกระทบจากปัจจัยหลักและผลกระทบจากปัจจัยร่วมทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (Feed rate) แรงดันการบด (Milling pressure) ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating table speed) และ อัตราลมดูด (Suction rate) นอกจากนี้ยังพบว่ามีอิทธิพลจากความโค้งที่มีผลต่อสัดส่วนของทรายอีกด้วย ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงต้องใช้หลักการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design, RSM) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้นต่อสัดส่วนของทราย และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด

#### 6.1 ปัจจัยนำเข้าการทดลอง

ปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง มาจากการทดลองในบทที่ 5 ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยระดับของแต่ละปัจจัยแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ระดับของปัจจัยที่จะนำมาทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

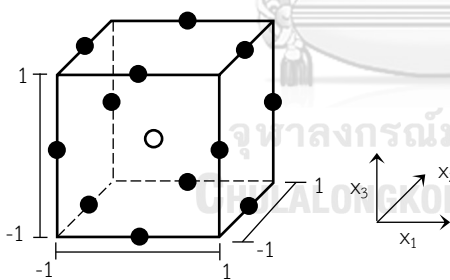
สัญลักษณ์ (Symbol)	ปัจจัย (Factor)	หน่วย (Unit)	ระดับ (Level)		
			-1	0	1
A	อัตราป้อนวัตถุดิบ (Feed Rate)	Ton/h	130	140	150
B	แรงอัดบด (Milling Pressure)	bar	100	110	120
C	ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating Table Speed)	rpm	9.5	11.9	14.3
D	อัตราลมดูด (Suction rate)	$\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$	34	36	38

## 6.2 ออกแบบการทดลอง

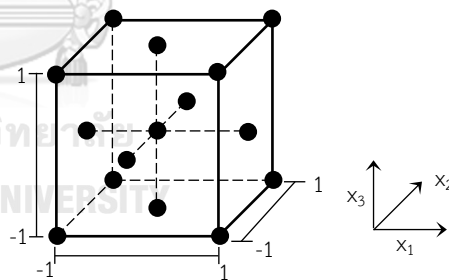
การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design, RSM) เป็นการเก็บข้อมูลและทดลองเชิงสถิติเพื่อใช้สร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ถึงอิทธิพลจากหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรตอบสนองนั้น

เนื่องจากการทดลองในบทที่พบว่ามีอิทธิพลกำลังสอง (Second order) ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการของการออกแบบพื้นผิวตอบสนองในการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยและตัวแปรตอบสนองและสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด โดยมีปัจจัยนำเข้าการทดลองทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนเข้า แรงดันการบด ความเร็วโตะหมุน และอัตราลมดูด

การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมี 2 วิธี นั่นคือ การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-behnken design) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เป็น การออกแบบพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แต่มีความแตกต่างกันตรงที่การปฏิบัติรวมของระดับปัจจัย (Treatment combination)



ภาพที่ 6.1 ตัวอย่างการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน



ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างการทดลองส่วนผสมกลาง

การออกแบบส่วนผสมกลางจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ การทดลอง  $2^k$  แฟคทอเรียล จำนวน  $n_f$  การทดลอง การทดลองบนแกน (Axial) ของปัจจัยจำนวน  $2k$  การทดลอง และการทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Center point) จำนวน  $n_c$  การทดลอง แสดงดังภาพที่ 6.1 ในการออกแบบพื้นผิวตอบสนองด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องกำหนดระยะของปัจจัยที่ทำการทดลองบนแกน ( $\alpha$ ) และจำนวนการทดลองที่จุดกึ่งกลาง ( $n_c$ ) ส่วนการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะเป็นการออกแบบที่ 3 ระดับของปัจจัย

เพื่อพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสม โดยวิธีนี้ถูกออกแบบมาจากการรวมกันของ  $2^k$  แพคทอเรียลที่มีการบล็อกแบบไม่สมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 6.1

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนองด้วยวิธีออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design) ที่มีรูปแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2 ซึ่งใช้ปัจจัยนำเข้าการทดลองที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จำนวน 4 ปัจจัยจากผลการทดลองในบทที่ 5 ได้แก่ อัตราป้อนเข้า แรงดันการบด ความเร็วโตะหมุน และอัตราลมดูด โดยกำหนดให้สัญลักษณ์ลบ (-) แทนระดับต่ำ บวก (+) แทนระดับสูง เลขศูนย์ (0) แทนระดับกึ่งกลาง และอัลฟา ( $\alpha$ ) แทนระดับบนแกนของปัจจัย

ตารางที่ 6.2 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design)

Run	Factors				Point types
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	
2	+	-	-	-	
3	-	+	-	-	
4	+	+	-	-	
5	-	-	+	-	
6	+	-	+	-	
7	-	+	+	-	
8	+	+	+	-	Factorial
9	-	-	-	+	point
10	+	-	-	+	
11	-	+	-	+	
12	+	+	-	+	
13	-	-	+	+	
14	+	-	+	+	
15	-	+	+	+	
16	+	+	+	+	

Run	Factors				Point types
	A	B	C	D	
17	$-\alpha$	0	0	0	Axial point
18	$+\alpha$	0	0	0	
19	0	$-\alpha$	0	0	
20	0	$+\alpha$	0	0	
21	0	0	$-\alpha$	0	
22	0	0	$+\alpha$	0	
23	0	0	0	$-\alpha$	
24	0	0	0	$+\alpha$	
25	0	0	0	0	Center point
26	0	0	0	0	
27	0	0	0	0	

แต่เนื่องจากการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design, CCD) มีการทดลองบางส่วนที่เหมือนกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่ 2 ระดับของปัจจัยในบทที่ 5 ดังนั้นจึงนำผลการทดลองในส่วนนี้มาวิเคราะห์ต่อ และทำการทดลองเพิ่มเติมบนแกนของปัจจัยจำนวน  $2k$  การทดลอง ( $k=4$ ) และที่จุดกึ่งกลางเพิ่มอีกจำนวน 3 การทดลอง

### 6.3 วิธีกรทดลอง

การทดลองนี้มีจำนวนการทดลองรวมของปัจจัย (Treatment combination) ทั้งหมด 30 การทดลองจาก 4 ปัจจัย และมีการทำซ้ำ (Replicate) การทดลองรวมของปัจจัยละ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.3 ซึ่งจะดำเนินการทดลองต่อจากบทที่ 5 เนื่องจากการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design, CCD) มีการทดลองรวมของปัจจัยบางส่วนเหมือนกันกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial design) โดยจะทำการทดลองตั้งแต่ลำดับที่ 20 เป็นต้นไป และจะทำการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดจากปัจจัยภายนอก

ตารางที่ 6.3 ค่าสัดส่วนของทรายของการออกแบบส่วนผสมกลาง

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้าการทดลอง				สัดส่วนของทราย (%)			ค่าเฉลี่ย
	อัตรา ป้อนเข้า (ตัน/ช.ม.)	แรงดัน การบด (บาร์)	ความเร็ว โตะหมุน (รอบ/นาที)	อัตราลมดูด (ลบ.ม./ช.ม.)	ทำซ้ำครั้งที่			
					1	2	3	
1	130	100	9.5	34,000	61.38	62.08	61.62	61.69
2	150	100	9.5	34,000	53.13	53.47	53.87	53.49
3	130	120	9.5	34,000	66.23	66.46	65.77	66.15
4	150	120	9.5	34,000	52.00	51.40	51.80	51.73
5	130	100	14.3	34,000	59.92	59.31	60.46	59.90
6	150	100	14.3	34,000	58.93	58.53	57.60	58.36
7	130	120	14.3	34,000	68.38	68.15	68.69	68.41
8	150	120	14.3	34,000	54.07	52.73	54.20	53.67
9	130	100	9.5	38,000	79.15	79.38	78.31	78.95
10	150	100	9.5	38,000	66.33	66.00	65.53	65.96
11	130	120	9.5	38,000	65.92	65.69	66.38	66.00
12	150	120	9.5	38,000	60.60	60.87	60.93	60.80
13	130	100	14.3	38,000	72.23	72.38	71.31	71.97
14	150	100	14.3	38,000	58.13	57.67	58.47	58.09
15	130	120	14.3	38,000	64.23	63.77	63.54	63.85
16	150	120	14.3	38,000	61.60	61.07	60.73	61.13
17	140	110	11.9	36,000	69.23	67.85	68.92	68.67
18	140	110	11.9	36,000	62.47	61.93	61.80	62.07
19	140	110	11.9	36,000	66.00	66.29	66.43	66.24
20	130	110	11.9	36,000	60.07	59.43	59.86	59.79
21	150	110	11.9	36,000	68.79	68.86	69.79	69.14
22	140	100	11.9	36,000	67.79	66.64	66.50	66.98
23	140	120	11.9	36,000	60.64	61.00	60.21	60.62
24	140	110	9.5	36,000	64.79	65.21	65.71	65.24

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้าการทดลอง				สัดส่วนของทราย (%)			ค่าเฉลี่ย
	อัตรา ป้อนเข้า (ตัน/ช.ม.)	แรงดัน การบด (บาร์)	ความเร็ว โตะหมุน (รอบ/นาที)	อัตราลมดูด (ลบ.ม./ช.ม.)	ทำซ้ำครั้งที่			
					1	2	3	
25	140	110	14.3	36,000	68.29	69.79	68.14	68.74
26	140	110	11.9	34,000	67.57	68.93	67.50	68.00
27	140	110	11.9	38,000	67.36	68.36	67.21	67.64
28	140	110	11.9	36,000	68.50	69.07	67.57	68.38
29	140	110	11.9	36,000	68.71	67.21	69.00	68.31
30	140	110	11.9	36,000	66.71	68.36	67.86	67.64

#### 6.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

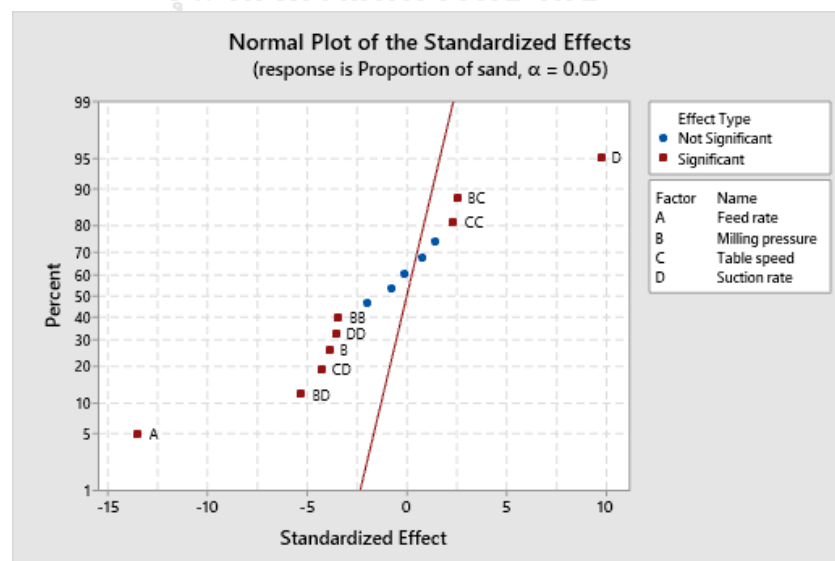
จากตารางผลการทดลอง ตารางที่ 6.3 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลในบทที่ 5 นั่นคืออิทธิพลจากปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (A) แรงดันการบด (B) และอัตราลมดูด (D) ส่วนผลกระทบจากปัจจัยร่วมมี 3 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันการบด x ความเร็วโตะหมุน (BC) แรงดันการบด x อัตราลมดูด (BD) และความเร็วโตะหมุน x อัตราลมดูด (CD) ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังภาพที่ 6.3

จะเห็นว่าจากการวิเคราะห์ผลการทดลองในเฟสที่ 1 ความเร็วโตะหมุนไม่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งในการทดลองนี้ความเร็วโตะหมุนมีค่า P-value เท่ากับ 0.055 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าความเร็วของโตะหมุนไม่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากความโค้งพบว่าความเร็วโตะหมุนกำลังสองมีค่า P-value เท่ากับ 0.021 ซึ่งส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับอัตราป้อนเข้า แรงดันการบด และอัตราลมดูด

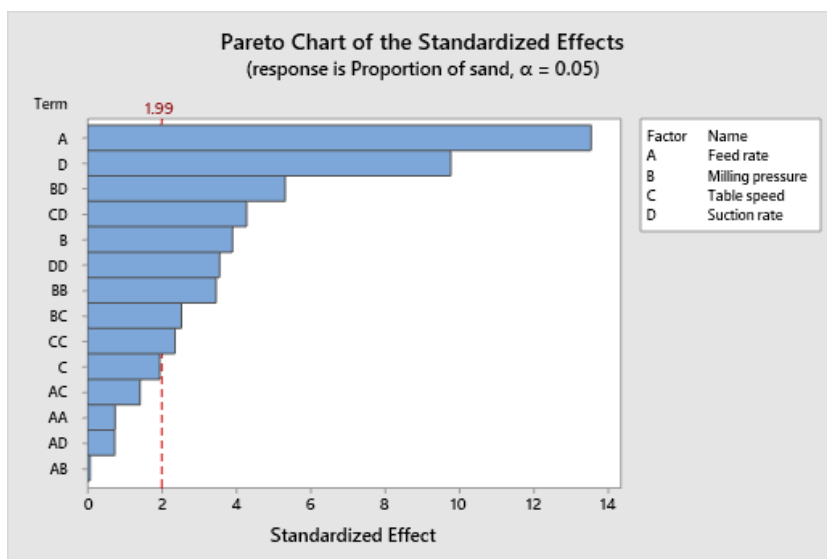
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	2553.26	182.38	31.06	0.000
Linear	4	1746.06	436.52	74.35	0.000
Feed rate	1	1074.70	1074.70	183.04	0.000
Milling pressure	1	89.02	89.02	15.16	0.000
Table speed	1	22.30	22.30	3.80	0.055
Suction rate	1	560.04	560.04	95.38	0.000
Square	4	481.80	120.45	20.51	0.000
Feed rate*Feed rate	1	3.26	3.26	0.55	0.459
Milling pressure*Milling pressure	1	70.05	70.05	11.93	0.001
Table speed*Table speed	1	32.53	32.53	5.54	0.021
Suction rate*Suction rate	1	73.99	73.99	12.60	0.001
2-Way Interaction	6	325.40	54.23	9.24	0.000
Feed rate*Milling pressure	1	0.04	0.04	0.01	0.936
Feed rate*Table speed	1	11.80	11.80	2.01	0.160
Feed rate*Suction rate	1	3.18	3.18	0.54	0.464
Milling pressure*Table speed	1	37.48	37.48	6.38	0.014
Milling pressure*Suction rate	1	165.59	165.59	28.20	0.000
Table speed*Suction rate	1	107.31	107.31	18.28	0.000
Error	75	440.36	5.87		
Lack-of-Fit	11	418.64	38.06	112.16	0.000
Pure Error	64	21.72	0.34		
Total	89	2993.62			

ภาพที่ 6.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 6.4 กราฟแจกแจงปกติของผลกระทบมาตรฐานของสัดส่วนทราย



ภาพที่ 6.5 แผนภาพพาเรโตของผลกระทบมาตรฐาน

จากกราฟการแจกแจงปกติของผลกระทบมาตรฐาน (Normal plot of the standardized effects) ภาพที่ 6.4 แสดงอิทธิพลจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายโดยปัจจัยที่อยู่ห่างออกจากเส้นตรงบนกราฟจะยังมีอิทธิพลต่อสัดส่วนของทรายมาก แต่ปัจจัยที่อยู่ในแนวเส้นตรงคือปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าสัดส่วนของทราย ส่วนแผนภาพพาเรโตของผลกระทบมาตรฐาน (Pareto chart of the standardized effects) ภาพที่ 6.5 เป็นกราฟแท่งที่แสดงอิทธิพลจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทราย ถ้าแท่งกราฟของปัจจัยที่ยาวจะยังมีอิทธิพลต่อสัดส่วนของทราย แต่แท่งกราฟที่มีความยาวไม่ถึง 1.99 คือปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายด้วยโปรแกรม Minitab สามารถนำมาเขียนเป็นสมการแทนความสัมพันธ์เพื่อใช้พยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายได้ในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression equation) ดังสมการที่ 6.1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของแต่ละเทอมปัจจัยแสดงดังภาพที่ 6.6 และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้


$$Y = 67.022 - 4.461A - 1.284B - 0.643C + 3.220D - 3.193B^2 + 1.854C^2 - 3.277D^2 + 0.884BC - 1.857BD - 1.495CD \quad (6.1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าสัดส่วนของทราย (%)



- A คือ ระดับของอัตราป้อนเข้า มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1  
 B คือ ระดับของแรงดันการบด มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1  
 C คือ ระดับของความเร็วโต๊ะหมุน มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1  
 D คือ ระดับของอัตราการดูด มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1

ซึ่งสมการนี้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8468 ดังนั้นความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของสัดส่วนทรายที่พยากรณ์ได้จากสมการนี้มีความถูกต้องแม่นยำ 84.68% และด้วยจำนวนปัจจัยทั้งหมดในสมการทำให้การพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด 82.74% ซึ่งสามารถดูได้จากค่า  $R^2(\text{adj})$  ดังภาพที่ 6.7



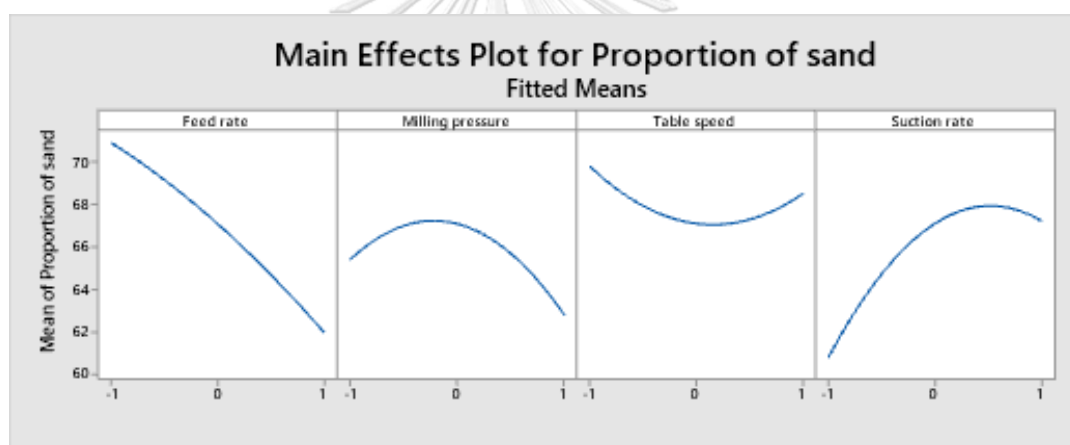
Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	67.022	0.428	156.56	0.000	
Feed rate	-4.461	0.328	-13.61	0.000	1.00
Milling pressure	-1.284	0.328	-3.92	0.000	1.00
Table speed	-0.643	0.328	-1.96	0.054	1.00
Suction rate	3.220	0.328	9.82	0.000	1.00
Milling pressure*Milling pressure	-3.193	0.826	-3.87	0.000	2.54
Table speed*Table speed	1.854	0.826	2.25	0.027	2.54
Suction rate*Suction rate	-3.277	0.826	-3.97	0.000	2.54
Milling pressure*Table speed	0.884	0.348	2.54	0.013	1.00
Milling pressure*Suction rate	-1.857	0.348	-5.34	0.000	1.00
Table speed*Suction rate	-1.495	0.348	-4.30	0.000	1.00

ภาพที่ 6.6 ตารางค่าสัมประสิทธิ์แต่ละเทอมในสมการถดถอย

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.40945	84.68%	82.74%	79.14%

ภาพที่ 6.7 ค่า  $R^2$  และ  $R^2(\text{adj})$  ของแบบจำลอง

จากภาพที่ 6.8 พบว่าอิทธิพลจากปัจจัยหลักของอัตราป้อนเข้า (A) แรงดันการบด (B) และอัตราการดูด (D) มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นว่าเมื่ออัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราป้อนเข้าหिनปูนแต่ปริมาณของทรายไม่เพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลง ขณะที่ความสัมพันธ์ของแรงดันการบด ความเร็วโต๊ะหมุน และอัตราการดูด ที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นแสดงว่าอิทธิพลจากความโค้งที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายมาจากทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ผลกระทบจากปัจจัยกำลังสองของทั้ง 3 ปัจจัยนี้ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักและสัดส่วนของทราย

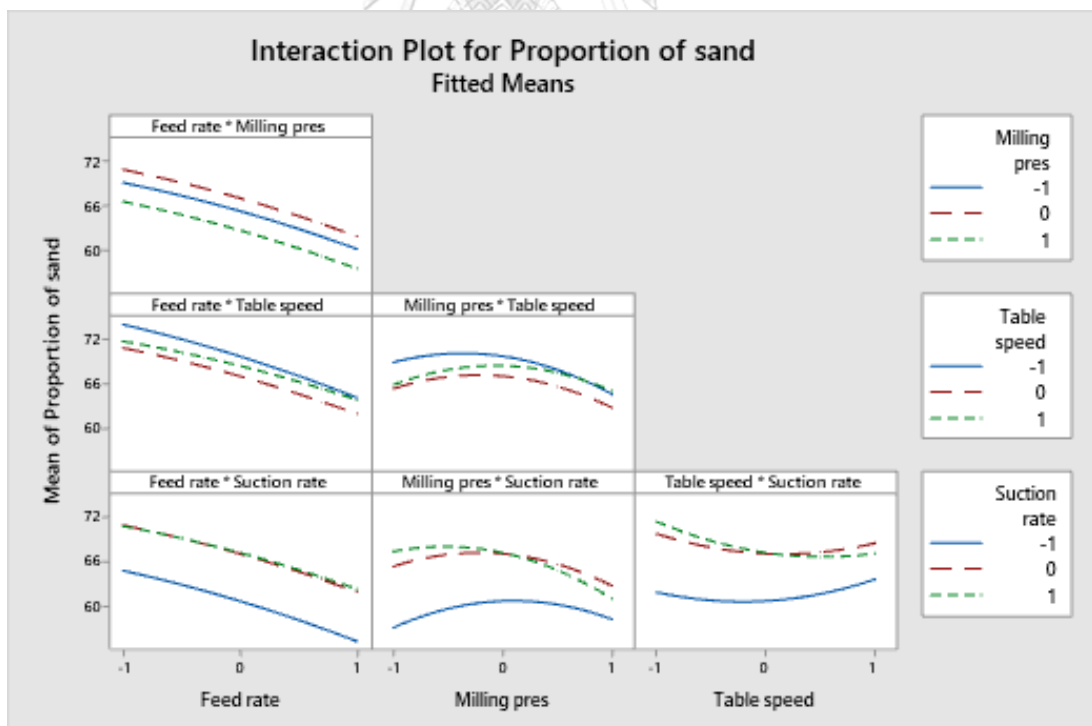
ความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วมและสัดส่วนของทรายสามารถอธิบายได้จากกราฟอิทธิพลจากปัจจัยร่วมสำหรับสัดส่วนของทราย (Interaction plot for proportion of sand) และกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot) ดังภาพที่ 6.9 และภาพที่ 6.10 ตามลำดับ ดังนี้

อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของอัตราป้อนเข้าและแรงดันการบดไม่มีผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อระดับของอัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นสัดส่วนของทรายมีค่าลดลง และมีอัตราการลดลงที่เท่ากันในทุกะดับของแรงดันการบด โดยที่แรงดันการบด 110 บาร์ จะให้ค่าสัดส่วนของทรายมากที่สุดที่ระดับของอัตราป้อนเข้าเดียวกัน

อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของอัตราป้อนเข้าและความเร็วโต๊ะหมุนไม่มีผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อระดับของอัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นสัดส่วนของทรายมีค่าลดลง และมีอัตราการลดลงที่เท่ากันในทุกะดับของความเร็วโต๊ะหมุน โดยที่ความเร็วโต๊ะหมุน 11.9 รอบต่อนาที สัดส่วนของทรายจะมีค่าน้อยที่สุดที่ระดับของอัตราป้อนเข้าเดียวกัน

อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของอัตราป้อนเข้าและอัตราการมุดไม่มีผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อระดับของอัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นสัดส่วนของทรายมีค่าลดลง และมีอัตราการลดลงที่เท่ากันในทุกะดับของอัตราการมุด โดยที่อัตราการมุด 38,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะทำให้สัดส่วนของทรายมีค่ามากที่สุดที่ระดับของอัตราป้อนเข้าเดียวกัน

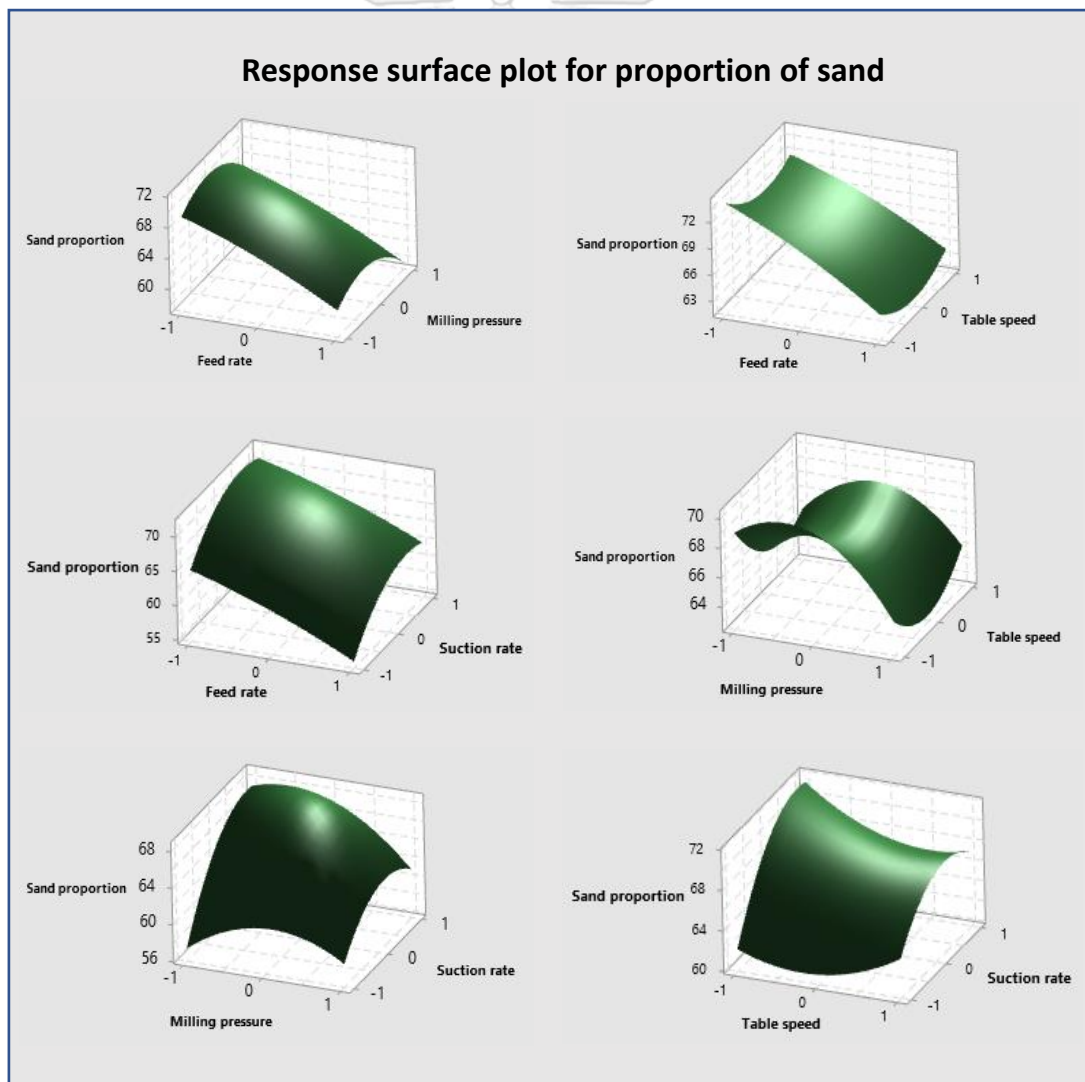
อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของแรงดันการบดและความเร็วโต๊ะหมุนส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่แรงดันการบดระดับสูงสัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วโต๊ะหมุนเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเร็วโต๊ะหมุนเพิ่มขึ้นที่แรงดันการบดระดับต่ำจะทำให้สัดส่วนของทรายจะมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วมและสัดส่วนของทราย (Interaction Plot for Proportion of Sand)

อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของแรงดันการบดและอัตราการดูดส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่แรงดันการบดระดับต่ำสัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการดูดเพิ่มขึ้น และสัดส่วนของทรายมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราการดูดอยู่ที่ระดับสูง แต่ที่แรงดันการบดระดับสูงสัดส่วนของทรายมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราการดูดอยู่ที่ระดับกึ่งกลาง

อิทธิพลจากปัจจัยร่วมของความเร็วโต๊ะหมุนและอัตราการดูดส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความเร็วโต๊ะหมุนระดับต่ำสัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการดูดเพิ่มขึ้น และสัดส่วนของทรายมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราการดูดอยู่ที่ระดับสูง แต่ที่ความเร็วโต๊ะหมุนระดับสูงสัดส่วนของทรายมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราการดูดอยู่ที่ระดับกึ่งกลาง



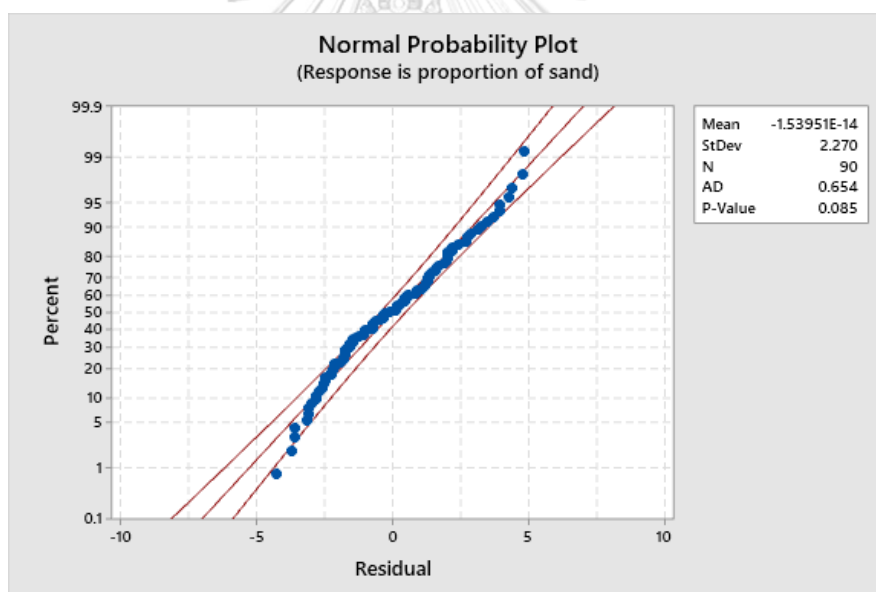
ภาพที่ 6.10 กราฟพื้นผิวตอบสนองสำหรับสัดส่วนของทราย

## 6.5 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และได้แบบจำลองที่จะนำไปใช้พยากรณ์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังสมการที่ 6.1 ก่อนที่จะนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองก่อนว่าเป็นไปตามสมมติฐานของการทดลองหรือไม่ โดยจะพิจารณาจากค่าของส่วนตกค้างที่ได้จากแบบจำลอง โดยสมมติฐาน 3 อย่าง ได้แก่

### 6.5.1 สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

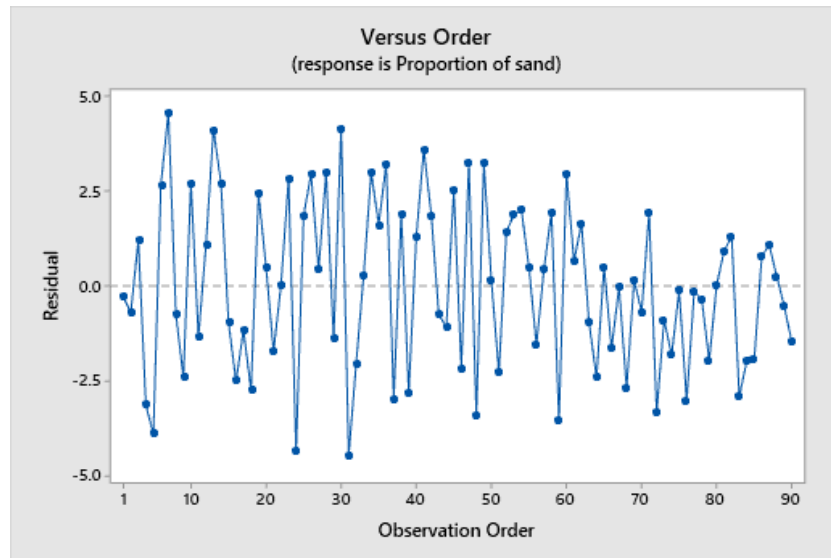
การตรวจสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติของแบบจำลองจะพิจารณากราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง พบว่าความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างจากน้อยไปมากมีการกระจายตัวอยู่ในรัศมีของเส้นตรงและมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังภาพที่ 6.11 จึงอนุมานได้ว่าส่วนตกค้างของสัดส่วนทรายที่ได้จากแบบจำลองมีการกระจายตัวแบบปกติ



ภาพที่ 6.11 กราฟแจกแจงความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง

### 6.5.2 สมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

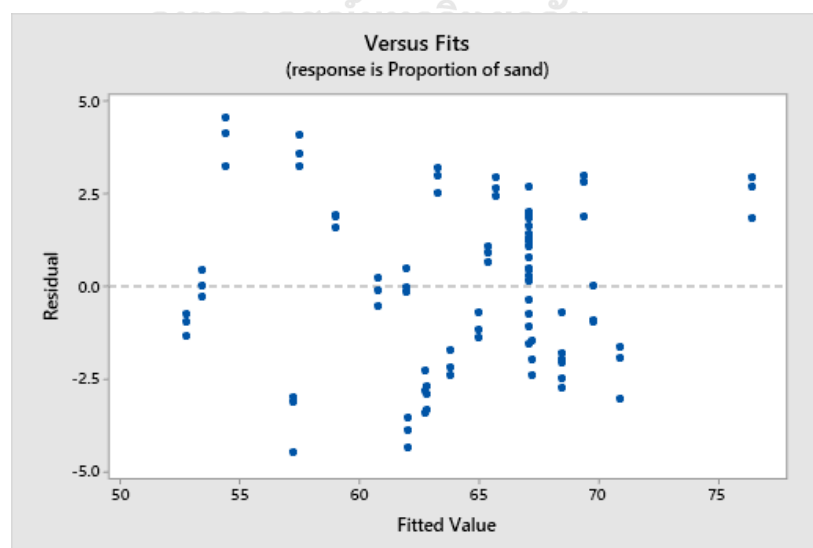
การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระจะพิจารณาจากกราฟส่วนตกค้างที่เรียงตามลำดับของการทดลองซึ่งพล็อตได้จากโปรแกรม Minitab พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางที่แน่นอน ดังภาพที่ 6.12 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างของสัดส่วนของทรายที่พยากรณ์ได้จากแบบจำลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 6.12 กราฟความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างและลำดับการเก็บข้อมูล

### 6.5.3 สมมติฐานของความแปรปรวน (Variance)

การตรวจสอบความแปรปรวนของแบบจำลองจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์สัดส่วนของทรายที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งพล็อตมาจากโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบแนวแกน 0 และไม่มีรูปแบบที่เป็นกรวยปากปิดหรือกรวยปากเปิด ดังภาพที่ 6.13 แสดงว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่าค่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่



ภาพที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์

## 6.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

แบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับพยากรณ์สัดส่วนของทราย สมการที่ 6.1 เป็นสมการโพลิโนเมียล (Polynomials) ที่จะถูกนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากเห็นว่าปัจจัยที่นำมาใช้ในการทดลองมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของทรายในลักษณะกำลังสอง (Second order) ซึ่งหลังจากนำสมการข้างต้นไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุดด้วยโปรแกรม Minitab แล้วพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้แก่ อัตราป้อนวัตถุดิบที่ระดับ -1 (ระดับต่ำ) แรงบดอัดที่ระดับ -0.6364 ความเร็วในการหมุนของโต๊ะที่ระดับ -1 (ระดับต่ำ) และอัตราลมดูดที่ระดับ 0.9192 และด้วยเงื่อนไขนี้จะทำให้ได้สัดส่วนของทรายเท่ากับ 76.79% โดยที่วิธีการนี้มีความพึงพอใจรวม 90.72% ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ดังภาพที่ 6.14 และภาพที่ 6.15 ซึ่งความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่ออัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรง เนื่องจากการเพิ่มอัตราป้อนเข้าของหินปูนมากกว่า 130 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณของทรายที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย ดังนั้นจึงทำให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลง

ในช่วงแรกของกราฟเมื่อแรงดันการบดเพิ่มขึ้นหินปูนเริ่มมีการแตกตัวจนกระทั่งได้ขนาดตามความต้องการ (0.1-0.6 มม.) ในตำแหน่งที่ได้สัดส่วนของทรายสูงสุด หลังจากนั้นการเพิ่มแรงดันบดอัดทำให้อนุภาคของหินปูนมีความละเอียดมากเกินไป ส่งผลให้สัดส่วนของทรายมีค่าลดลง

การที่ความเร็วโต๊ะหมุนมากขึ้นสัดส่วนของทรายจะลดลงเนื่องจากหินปูนถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ทำให้กระจายตัวออกผ่านการบดของล้อบดอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถบดหินปูนได้ตามขนาดที่ต้องการ

การที่อัตราลมดูดภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นโอกาสที่ทรายจะถูกนำพาขึ้นสู่อุปกรณ์คัดแยกขนาดก็มากขึ้นด้วยจึงทำให้ได้สัดส่วนของทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความสามารถในการบดเริ่มคงที่ สัดส่วนของทรายที่ได้จะเริ่มคงที่ด้วยเช่นกัน

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Proportion of sand	Maximum	51.4	79.3846		1	1

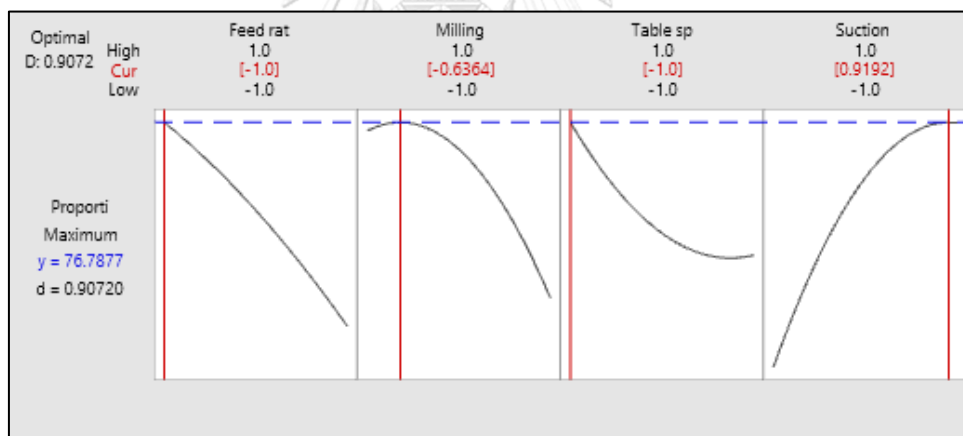
  

Solution						
Solution	Feed rate	Milling pressure	Table speed	Suction rate	Proportion of sand Fit	Composite Desirability
1	-1	-0.636364	-1	0.919192	76.7877	0.907202

Multiple Response Prediction					
Variable	Setting				
Feed rate	-1				
Milling pressure	-0.636364				
Table speed	-1				
Suction rate	0.919192				
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI	
Proportion of sand	76.79	1.07	(74.66, 78.91)	(71.51, 82.06)	

ภาพที่ 6.14 เงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด



ภาพที่ 6.15 กราฟค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด

การนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab ไปตรวจสอบโดยการแทนค่าระดับของปัจจัยของอัตราป้อนวัตถุดิบ แรงบดอัด ความเร็วในการหมุนของโต๊ะ และอัตราการดูด ลงไปแทนในสมการถดถอย ดังนี้

$$Y = 67.022 - 4.461(-1) - 1.284(-0.6364) - 0.643(-1) + 3.220(0.9192) - 3.193(-0.6364)^2 + 1.854(-1)^2 - 3.277(0.9192)^2 + 0.884(-0.6364)(-1)$$



$$\begin{aligned}
 & - 1.857(-0.6364)(0.9192) - 1.495(-1)(0.9192) \\
 & = 76.72 \%
 \end{aligned}$$

จากการแทนค่าในสมการเพื่อพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่าสัดส่วนของทรายที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 76.72% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Minitab

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์การพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายพบว่าช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval, CI) ที่ 95% และช่วงการพยากรณ์ (Predict interval, PI) ที่ 95% พบว่าการบดหินปูนผสมด้วยหม้อบดวัตถุบดชนิดล้อยอดแนวตั้งภายใต้เงื่อนไขข้างต้น มั่นใจได้ 95% ว่าค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายจะอยู่ในช่วง 74.66% ไปจนถึง 78.91% และสัดส่วนของทรายที่ผลิตได้จริงจะอยู่ในช่วง 71.51% ไปจนถึง 82.06% ดังภาพที่ 6.14

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab จะอยู่ในรูปของระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ที่มีค่าตั้งแต่ -1 ไปจนถึง 1 ดังนั้นต้องนำมาแปลงเป็นค่าพารามิเตอร์จริงในกระบวนการบดหินปูนผสมด้วยหม้อบดวัตถุบดชนิดล้อยอดแนวตั้ง ดังตารางที่ 4.5 โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด ก็คือ อัตราป้อนเข้า 130 ตัน/ชั่วโมง แรงดันการบด 103 บาร์ ความเร็วโต๊ะหมุน 9.5 รอบต่อนาที และอัตราการดูด 37,838 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 6.4 ตารางเปรียบเทียบค่าจริงของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

สัญลักษณ์ (Symbol)	ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	ค่าจริง (Actual)	หน่วย
A	อัตราป้อนเข้า (Feed rate)	-1	130	ตัน/ชั่วโมง
B	แรงดันการบด (Milling pressure)	-0.6364	103	บาร์
C	ความเร็วโต๊ะหมุน (Table speed)	-1	9.5	รอบ/นาที
D	อัตราการดูด (Suction rate)	0.9192	37,838	ลบ.ม./ชั่วโมง

## 6.7 สรุประยะปรับปรุงกระบวนการ

จากการนำปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายในกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งมาทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าสัดส่วนของทรายมากที่สุด ประกอบไปด้วย อัตราป้อนเข้า (Feed rate) แรงดันบดอัด (Milling pressure) ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating table speed) และอัตราการดูด (Suction rate) โดยใช้หลักการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design) ซึ่งเลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design, CCD) พบว่าอัตราป้อนเข้าไม่มีอิทธิพลร่วมกับปัจจัยอื่นๆ และเมื่ออัตราป้อนเข้าเพิ่มขึ้นสัดส่วนของทรายจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่แรงดันอัดบด ความเร็วโต๊ะหมุน และอัตราการดูดมีอิทธิพลร่วมกัน (Interaction) และอิทธิพลกำลังสองที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญด้วย

ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าที่อัตราป้อนเข้า 130 ตัน/ชั่วโมง แรงดันบดอัด 103 บาร์ ความเร็วโต๊ะหมุน 9.5 รอบ/นาที และอัตราการดูด 37,838 ลบ.ม./ชั่วโมง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด 76.79% โดยมีค่าผลรวมความพึงพอใจ (Composite desirability) อยู่ที่ 90.72%

## บทที่ 7

### ระยะติดตามและควบคุมผล (Control phase)

ในส่วนนี้จะเป็นการนำผลการทดลองในบทที่ 4 มาใช้ตั้งค่าที่กระบวนการบัดหินปูนผสมด้วยหม้อบดวัตถุบดชนิดล้อยอดแนวตั้งของโรงงานการศึกษา เพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้ง และสรุปผลการดำเนินงานของงานวิจัย

#### 7.1 ตรวจสอบและยืนยันผลการทดลอง

จากระยะการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ 6 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุดก็คือ อัตราป้อนเข้า 130 ตันต่อชั่วโมง แรงดันการบด 103 บาร์ ความเร็วโต๊ะหมุน 9.5 รอบต่อนาที และอัตราการดูด 37,838 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาปรับใช้จริงในกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง

สัญลักษณ์ (Symbol)	ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	ค่าจริง (Actual)	หน่วย
A	อัตราป้อนเข้า (Feed rate)	-1	130	ตัน/ชั่วโมง
B	แรงดันการบด (Milling pressure)	-0.6364	103	บาร์
C	ความเร็วโต๊ะหมุน (Table speed)	-1	9.5	รอบ/นาที
D	อัตราการดูด (Suction rate)	1	38,000	ลบ.ม./ชั่วโมง

แต่สำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์จริงในกระบวนการลดขนาดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งของโรงงานการศึกษาไม่สามารถควบคุมให้อัตราการดูดมีค่า 37,838 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงได้ ดังนั้นจึงกำหนดค่าเป็น 38,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าระดับสูงของปัจจัย ดังตารางที่ 7.1 และนำไปพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าได้สัดส่วนของทราย 76.77% ดังภาพที่ 7.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมที่พยากรณ์โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Prediction			
Fit	SE Fit	95% Lower Confidence Bound	95% Lower Prediction Bound
76.7650	1.11020	74.9160	72.3261

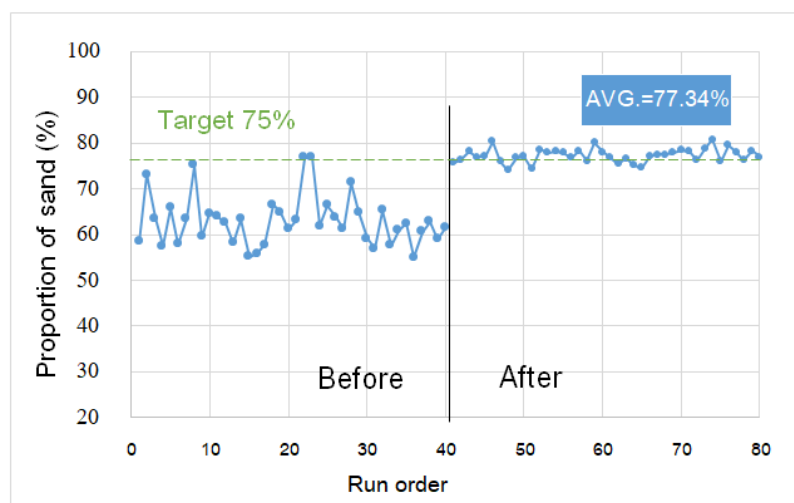
ภาพที่ 7.1 ค่าพยากรณ์สัดส่วนของทรายที่กำหนดพารามิเตอร์จริงที่สามารถเป็นไปได้

นำค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.1 ไปทำการทดลองผลิตจริงในกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง และบันทึกผลของค่าสัดส่วนทรายต่อเนื่องกันทุกชั่วโมง เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมง (5 กะการทำงาน) ดังตารางที่ 7.2 จากผลการเก็บข้อมูลสัดส่วนของทรายหลังปรับตั้งค่าพารามิเตอร์พบว่าสัดส่วนของทรายอยู่ในช่วง 74.08 เปอร์เซ็นต์ถึง 80.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าพยากรณ์ (Prediction interval) ของแบบจำลอง ภาพที่ 4.21 โดยสัดส่วนของทรายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.34 เปอร์เซ็นต์ และความแปรปรวนเท่ากับ 2.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายเกินกว่าค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้

ตารางที่ 7.2 ตารางเก็บค่าสัดส่วนของทรายหลังตั้งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อยืนยันผลการทดลอง

สัดส่วนของทรายหลังการปรับปรุง									
ลำดับ	ทราย (%)	ลำดับ	ทราย (%)	ลำดับ	ทราย (%)	ลำดับ	ทราย (%)	ลำดับ	ทราย (%)
1	75.75	9	76.83	17	78.33	25	74.67	33	78.83
2	76.50	10	77.17	18	76.17	26	77.08	34	80.83
3	78.25	11	74.42	19	80.17	27	77.58	35	76.08
4	77.00	12	78.67	20	78.08	28	77.50	36	79.67
5	77.17	13	78.00	21	76.92	29	78.00	37	78.08
6	80.42	14	78.17	22	75.50	30	78.50	38	76.25
7	76.08	15	78.00	23	76.75	31	78.25	39	78.42
8	74.08	16	76.92	24	75.25	32	76.25	40	77.00

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนการปรับปรุงพบว่าค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายหลังการปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้นมา 14.43 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 7.2 นอกจากนี้ความแปรปรวนของสัดส่วนทรายยังมีค่าลดลงจาก 29.54 เหลือเพียง 2.32



ภาพที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบสัดส่วนของทรายก่อนและหลังการปรับปรุง

## 7.2 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังปรับปรุง

กำหนดมาตรฐานการทำงานให้กับพนักงานควบคุมเครื่องจักร เพื่อให้ทุกคนสามารถควบคุมกระบวนการให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยจัดทำเอกสารวิธีปฏิบัติงาน (Work instruction, WI) และฝึกอบรมให้กับพนักงานทุกคน เพื่อใช้ในการควบคุมการผลิต

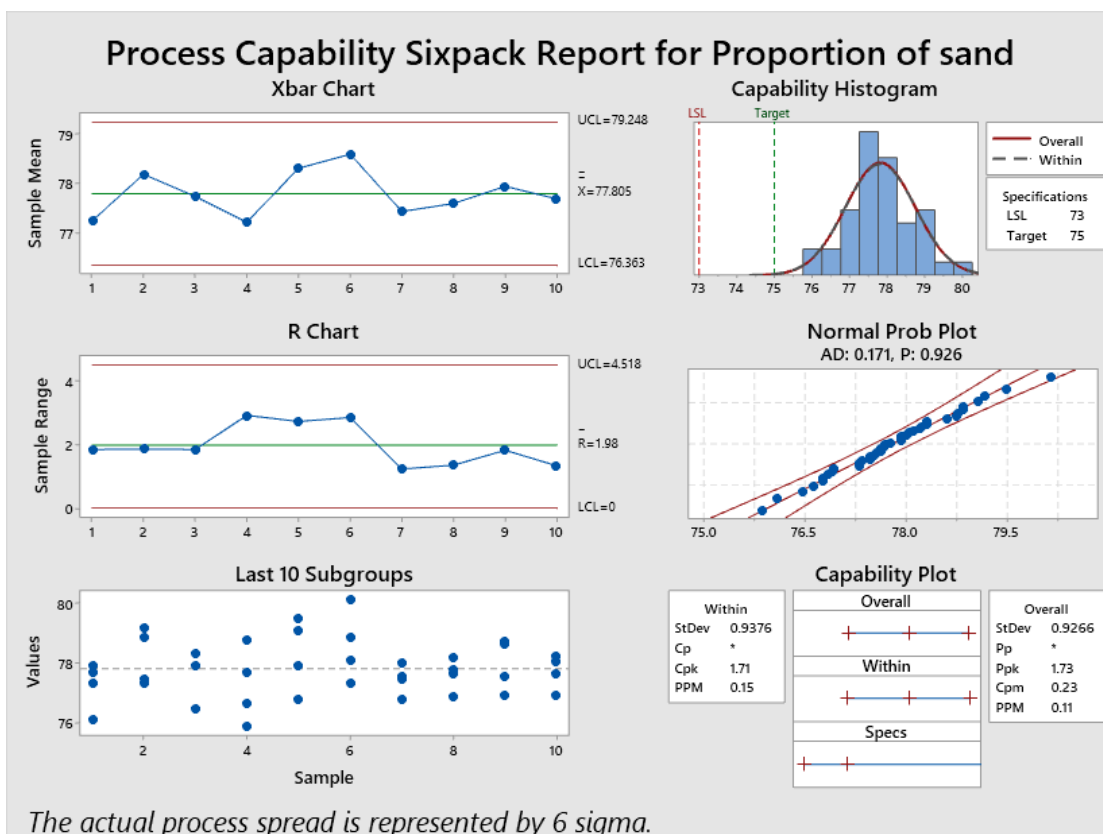
ให้พนักงานวัดค่าสัดส่วนของทรายที่ได้ต่อชั่วโมงเมื่อเริ่มดำเนินการผลิต โดยให้แต่ละคนบันทึกค่าสัดส่วนของทรายต่อชั่วโมงคนละ 10 ครั้งในเวลาการทำงานของตัวเอง ดังนั้นจะได้ค่าสัดส่วนของทรายทั้งหมดจำนวน 40 การทดลอง ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ตารางค่าสัดส่วนของทรายเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis) หลังการปรับปรุง

การทดลอง ที่	พนักงาน	สัดส่วนทราย (%)	การทดลอง ที่	พนักงาน	สัดส่วนทราย (%)
1	1	77.67	21	3	80.15
2	1	77.92	22	3	78.10
3	1	77.34	23	3	78.85
4	1	76.08	24	3	77.30
5	1	77.46	25	3	77.46
6	1	79.17	26	3	76.77
7	1	77.31	27	3	78.00
8	1	78.85	28	3	77.56
9	1	76.46	29	3	76.85
10	1	77.92	30	3	77.62
11	2	78.31	31	4	78.20
12	2	78.31	32	4	77.77
13	2	78.77	33	4	76.92
14	2	76.62	34	4	78.62
15	2	75.85	35	4	77.53
16	2	77.69	36	4	78.75
17	2	79.50	37	4	78.23
18	2	77.92	38	4	78.05
19	2	76.77	39	4	77.62
20	2	79.08	40	4	76.90

เมื่อนำค่าสัดส่วนของทรายต่อชั่วโมงที่ได้จากการผลิตหลังปรับปรุงกระบวนการแล้วจำนวน 40 ครั้ง ไปวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis) โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนทรายที่ได้มีค่าเท่ากับ 77.81% และมีพิสัย (Rang) เท่ากับ 1.98% ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าขอบเขตควบคุมด้านบน (Upper control limit) และค่าขอบเขตควบคุมด้านล่าง (Lower control limit) ดังภาพที่ 7.3 นอกจากนี้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.71 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้านเดียว 1.25 ซึ่งการที่ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากหลังการปรับปรุงสัดส่วนของทรายที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ที่ 75% ซึ่งแตกต่างจากค่าก่อนการปรับปรุงที่มีค่าน้อยกว่าเป้าหมายค่อนข้างมาก โดยค่าเป้าหมายนี้ถูกกำหนดมาจากประสิทธิภาพ 80% ของเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งกับวัตถุดิบหินปูนที่มีส่วนผสมของผงละเอียดอยู่แล้ว 6.48% ในหัวข้อที่ 4.14 นอกจากนี้ความแปรผันของกระบวนการมีค่าลดลงจาก 3.55 เหลือเพียง 0.94

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความพอเพียง (Adequacy) ของแบบจำลองนี้ด้วยการทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากกราฟความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) พบว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่า P-value เท่ากับ 0.926 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลชุดนี้มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distributor) เป็นไปตามสมมติฐาน



ภาพที่ 7.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis, PCA)

### 7.3 ติดตามผลหลังการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงกระบวนการเสร็จแล้วจำเป็นต้องมีการติดตามและควบคุมผลการนำมาดำเนินงานเพื่อให้มั่นใจว่ากระบวนการยังมีความสามารถเป็นไปตามที่ได้ปรับปรุง ดังนั้นจึงนำแผนภูมิควบคุมมาใช้เพื่อติดตามผลของการดำเนินงานของกระบวนการ โดยมีการกำหนดให้ทำงานดังนี้

7.3.1 ให้พนักงานตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการให้เป็นไปตามเอกสารวิธีปฏิบัติงาน (Work instruction, WI)

7.3.2 บันทึกค่าสัดส่วนของทรายต่อชั่วโมงในทุก 2 ชั่วโมง โดยให้เปรียบเทียบปริมาณของทรายที่ได้กับอัตราการป้อนเข้าหินปูน ตลอดการทำงาน 1 วันของพนักงาน (8 ชั่วโมง) ซึ่งภายใน 1 วัน จะมีเวลาการทำงาน 3 ช่วงเวลา (Shift)

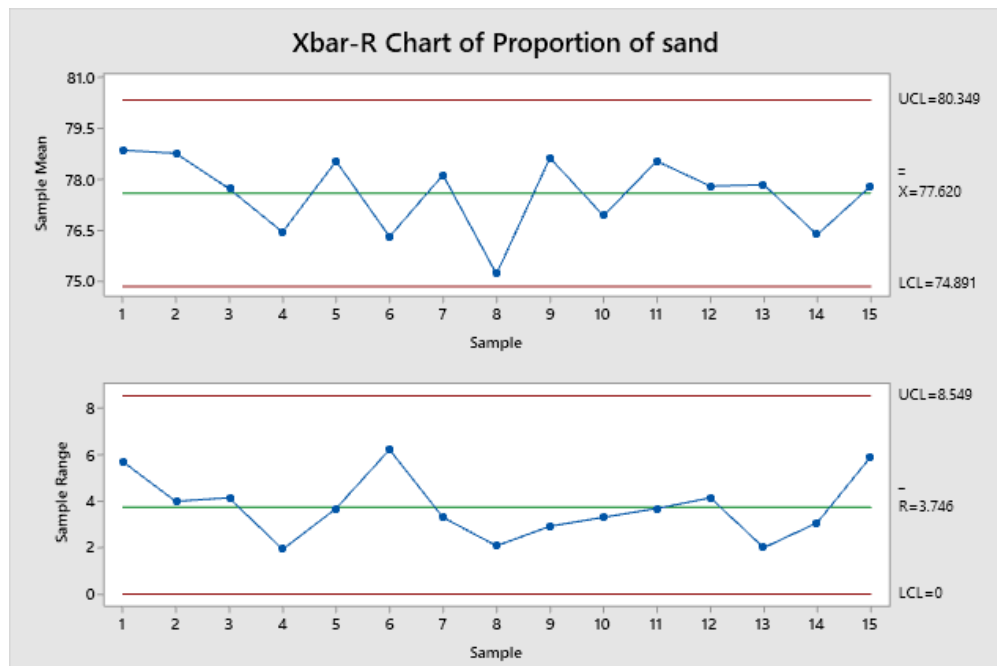
7.3.3 นำผลการบันทึกค่าสัดส่วนของทรายในเวลา 5 วันมาพล็อตเป็นแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย (Xbar-R Chart)



ตารางที่ 7.4 ผลผลิตของสัดส่วนทราย หลังปรับปรุงกระบวนการ (หน่วยเป็น %)

ช่วงเวลา ทำงาน	ครั้งที่				ค่าเฉลี่ย (Mean)	พิสัย (Range)
	1	2	3	4		
1	77.79	77.92	77.04	82.77	78.88	5.73
2	76.31	79.69	80.31	78.85	78.79	4.00
3	79.46	77.92	75.31	78.31	77.75	4.15
4	75.77	76.62	75.85	77.69	76.48	1.92
5	80.46	77.92	76.77	79.08	78.56	3.69
6	75.15	74.08	75.85	80.31	76.35	6.23
7	77.77	76.77	78.00	80.08	78.15	3.31
8	74.85	76.62	74.54	75.00	75.25	2.08
9	76.92	78.62	79.23	79.85	78.65	2.92
10	78.23	77.08	77.62	74.92	76.96	3.31
11	79.00	76.08	79.38	79.77	78.56	3.69
12	75.92	76.69	78.62	80.08	77.83	4.15
13	78.85	78.31	76.85	77.46	77.87	2.00
14	77.92	76.08	76.77	74.85	76.40	3.08
15	76.54	81.46	77.77	75.54	77.83	5.92

วิเคราะห์แผนภูมิควบคุมค่าสัดส่วนของทรายที่ได้จากกระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งในระยะเวลา 5 วัน โดยนำค่าที่บันทึกในตารางที่ 7.4 ไปพล็อตแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย (Xbar-R Chart) ด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนทรายมีค่าเท่ากับ 77.62% ดังภาพที่ 7.4 ซึ่งยังอยู่ในขอบเขตควบคุมด้านบน (Upper control limit) และขอบเขตควบคุมด้านล่าง (Lower control limit) ในขณะที่พิสัยเฉลี่ยของชุดข้อมูลกลุ่มตัวอย่างสัดส่วนของทรายมีค่าเท่ากับ 3.75% ซึ่งก็ยังคงอยู่ในขอบเขตควบคุมด้านบน (Upper control limit) และขอบเขตควบคุมด้านล่าง (Lower control limit) เช่นกัน



ภาพที่ 7.4 แผนภาพติดตามและควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัยของสัดส่วนทราย



## บทที่ 8

### สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการบดหินปูนเพื่อผลิตทรายให้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนมอร์ต้า (Mortar process) ของโรงงานกรณีศึกษา เนื่องจากต้องการลดปริมาณของเสีย (ฝุ่นละเอียด) เกิดขึ้นจากกระบวนการและเพิ่มปริมาณของสัดส่วนทราย (ปริมาณทรายต่ออัตราป้อนเข้าหินปูน) โดยนำเอาหลักการของ DMAIC มาประยุกต์ใช้เป็นขั้นตอนของการดำเนินงาน ซึ่งเริ่มจากระยะนิยามปัญหา (Define) ระยะการวัด (Measurement) ระยะวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis) ระยะปรับปรุงกระบวนการ (Improvement) และระยะติดตามและควบคุม (Control) ตามลำดับ

#### 8.1 ระยะนิยามปัญหา

ในกระบวนการบดหินปูนมีสัดส่วนของเสีย (ฝุ่นละเอียด) เกิดขึ้นเฉลี่ย 38% ทำให้จำเป็นต้องมีการขนถ่ายฝุ่นละเอียดไปกำจัดที่อื่น เพื่อป้องกันไม่ให้เป็นพื้นที่จัดเก็บของเสียเต็มและทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้นทุนในการผลิตมากขึ้นและเกิดมลภาวะทางอากาศจากกระบวนการขนถ่ายของเสียที่เป็นฝุ่นละเอียดอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการบดหินปูนให้ได้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายเพิ่มขึ้นเป็น 75% ซึ่งจะทำให้สัดส่วนของเสียลดลงเหลือ 25% และลดความแปรผัน (Variation) ของกระบวนการ ซึ่งหลังจากปรับปรุงกระบวนการนี้จะทำให้ดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) มีค่ามากกว่า 1.25 ซึ่งเป็นเกณฑ์ยอมรับได้ด้านเดียว

#### 8.2 ระยะการวัด

ในการวิเคราะห์ระบบการวัดนี้จะพิจารณาความผิดพลาดที่เกิดจากความผันแปรของตำแหน่ง (Location variation) และความผันแปรของความกว้าง (Width variation) โดยใช้พนักงานที่ทำหน้าที่ในการวัดค่าสัดส่วนของทรายจำนวน 4 คน

จากการศึกษากระบวนการบดหินปูนด้วยเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้งที่มีสัดส่วนของทราย (Proportion of sand) เป็นตัวแปรตอบสนอง พบว่าเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณของทรายได้แก่ เครื่อง

ซึ่งน้ำหนักแบบสายพาน (Belt weigher) และมีการสอบเทียบ (Calibration) กับตู่มน้ำหนักมาตรฐาน โดยหน่วยงานซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องมือวัด เพราะฉะนั้นจึงมั่นใจได้ว่ากระบวนการวัดนี้มีความผิดพลาดที่เกิดจากความผันแปรของตำแหน่ง (Location Variation) มีค่าน้อยมาก

จากการวิเคราะห์ความผันแปรของระบบการวัดด้วยวิธี Gage R&R พบว่าเครื่องมือวัดมีความสามารถในการแยกแยะค่าสัดส่วนของทรายในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน ในขณะที่การวัดค่าสัดส่วนของทรายในสภาวะการทำงานเดียวกันของพนักงานทั้ง 4 คนมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างพนักงานและสภาวะการทำงาน ซึ่งความแปรผันทั้งหมดในกระบวนการส่วนใหญ่มาจากความแปรผันของระบบ 99.97% ส่วนความผันแปรจากระบบการวัดเพียงแค่ 0.03% ซึ่งเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) คิดเป็น 5.02% น้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 10% เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และความสามารถในการทำเหมือน (Reproducibility)

นอกจากนี้การวัดความสามารถของกระบวนการพบว่าปัจจุบันกระบวนการบดหินปูนมีดัชนีความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) อยู่ที่ -1.83 เนื่องจากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายที่วัดได้ 64.18% ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย 75% ค่อนข้างมาก และในกระบวนการยังมีความแปรผันสูง ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงกระบวนการให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายเข้าใกล้ค่าเป้าหมายและความแปรปรวนลดลง

### 8.3 ระยะเวลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการระดมสมองของผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการบดหินปูนเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาด้วยเทคนิค Why-Why Analysis พบว่าสาเหตุทำให้ได้สัดส่วนของทรายน้อยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สาเหตุจากความบกพร่องของกระบวนการ และสาเหตุจากการปรับตั้งสภาวะการทำงาน ส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดความแปรผันในกระบวนการมาจากการขาดมาตรฐานการทำงานที่ชัดเจนเนื่องจากยังไม่ทราบสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

การแก้ปัญหาของสาเหตุที่มาจากความบกพร่องในกระบวนการจะมีมาตรการจัดทำเอกสารรายการตรวจเช็คเครื่องจักร (Check sheet) และควบคุมให้มีการตรวจเช็คเป็นประจำทุกวัน ส่วนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการปรับตั้งค่าสภาวะการทำงานจะนำมาเป็นปัจจัยในการทดลองเพื่อวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราป้อนเข้า (Feed rate) แรงดันอัดบด (Milling pressure) ความเร็วโต๊ะหมุน (Rotating table speed) และอัตราการดูด (Suction rate)

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดกรองปัจจัยด้วยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล พบว่าอัตราป้อนเข้า แรงดันอัดบด อัตราลมดูด มีผลกระทบหลัก (Main effect) ต่อสัดส่วนของทราย อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในขณะที่ความเร็วโต๊ะหมุนมีผลกระทบร่วมกัน (Interaction) กับปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลจากความโค้ง (Curvature) ส่งผลต่อสัดส่วนของทรายด้วยเช่นกัน

#### 8.4 ระเบียบปรังกระบวนการ

จากการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการบดหินปูน โดยใช้หลักการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ด้วยวิธีออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design, CCD) พบว่าพารามิเตอร์ ทำให้ได้สมการที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าสัดส่วนของทรายดังสมการที่ 8.1

$$Y = 67.022 - 4.461A - 1.284B - 0.643C + 3.220D - 3.193B^2 \quad (8.1) \\ + 1.854C^2 - 3.277D^2 + 0.884BC - 1.857BD - 1.495CD$$

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุดได้แก่ อัตราป้อนเข้า (A) 130 ตัน/ชั่วโมง แรงดันบดอัด (B) 103 บาร์ ความเร็วโต๊ะหมุน (C) 9.5 รอบต่อนาที และอัตราลมดูด 37,838 ลบ.ม./ชั่วโมง ดังตารางที่ 8.1 ซึ่งจะทำให้ได้สัดส่วนของทราย 76.79% และมีค่าความพึงพอใจ (Composite desirability) อยู่ที่ 90.72%

ตารางที่ 8.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้สัดส่วนของทรายมากที่สุด

สัญลักษณ์ (Symbol)	ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	ค่าจริง (Actual)	หน่วย
A	อัตราป้อนเข้า (Feed rate)	-1	130	ตัน/ชั่วโมง
B	แรงดันการบด (Milling pressure)	-0.6364	103	บาร์
C	ความเร็วโต๊ะหมุน (Table speed)	-1	9.5	รอบ/นาที
D	อัตราลมดูด (Suction rate)	0.9192	37,838	ลบ.ม./ชั่วโมง

### 8.5 ระยะติดตามและควบคุม

หลังจากได้ทำการปรับปรุงกระบวนการแล้วได้จัดทำวิธีปฏิบัติงาน (Work instruction) และจัดอบรมให้กับพนักงาน โดยควบคุมให้มีการตรวจเช็คเครื่องจักรและกำหนดมาตรฐานการเดินเครื่องจักรให้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน และทำการทดลองวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังได้รับการปรับปรุง เพื่อยืนยันผลการทดลองว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

ผลการทดลองวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis) พบว่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ( $C_{pk}$ ) ของกระบวนการมีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.83 เป็น 1.71 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ยอมรับได้ด้านเดียว และค่าเฉลี่ยของสัดส่วนทรายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 64.18% มาเป็น 77.81% ซึ่งเกินค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ที่ 75% นอกจากนี้ความผันแปรของกระบวนการยังมีค่าลดลง ซึ่งสามารถดูได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของกระบวนการ ซึ่งมีค่าลดลงจาก 3.55 เหลือเพียง 0.94

จากการติดตามผลการดำเนินการผลิตจริงด้วยแผนภูมิควบคุม (Xbar-R Chart) ของพนักงานทั้ง 4 คน โดยใช้มาตรฐานการทำงานแบบเดียวกัน เป็นระยะเวลา 5 วัน พบว่าสัดส่วนของทรายยังที่เฉลี่ยและพิสัยอยู่ในช่วงที่สามารถควบคุมได้

### 8.6 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

จากการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องบดชนิดลูกกลิ้งแนวตั้ง (Vertical Roller Mill) พบว่าเครื่องบดชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้ในการบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูงเพียงขนาดเดียวเท่านั้น แต่ในกรณีนี้ทางโรงงานกรณีศึกษานำมาดัดแปลงเพื่อบดหินปูนให้ได้ทรายซึ่งมีขนาดตามที่ต้องการ ดังนั้นปรับตั้งค่าการทำงานของเครื่องบดจึงไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มความสามารถ และไม่มีรูปแบบหรือวิธีการทำงานที่ชัดเจน นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ยังเป็นการศึกษาและทดลองในกระบวนการผลิตจริงของโรงงานกรณีศึกษาจึงไม่สามารถกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองได้อย่างอิสระ เพราะจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นและไม่สามารถผลิตปูนได้ตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงพยายามเลือกปัจจัยให้ครอบคลุมกับผลกระทบของตัวแปรตอบสนองมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

วัตถุดิบหินปูนที่นำมาใช้เป็นของเสียจากเหมืองที่ถูกนำมาสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value added) โดยการลดขนาดให้เป็นทรายเพื่อส่งให้กระบวนการผลิตปูนมอร์ต้า และงานวิจัยฉบับนี้จะช่วย

วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สัดส่วนของทรายซึ่งเป็นผลผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่ม และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลดขนาดหินปูนนี้อีกด้วย ในอนาคตถ้าความต้องการปูนมอร์ต้าของลูกค้าเพิ่มมากขึ้น และมีความจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการนี้ซึ่งจะทำให้สัดส่วนของทรายที่ได้ต่ออัตราการป้อนเข้าหินปูนมีค่าน้อยลง และสัดส่วนของฝุ่นละเอียดมากขึ้น ทางโรงงานกรณีศึกษาอาจจะต้องพิจารณาสร้างระบบลำเลียงที่เป็นระบบปิดแทนการใช้รถบรรทุกลำเลียงของเสียที่มีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียดนี้ เพื่อลดต้นทุนจากการลำเลียงของเสียโดยรถบรรทุกซึ่งเป็นต้นทุนผันแปร (Variable cost) ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยลดมลภาวะทางอากาศจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นละเอียดนี้อีกด้วย



### บรรณานุกรม

1. Mahasandana. *Scale of cement industry*. 2018 [cited 2021 4 January]; Available from: <http://thaicma.or.th/cms/scale-of-industry/scale-of-industry/>.
2. Samchenko, S., O. Larsen, and A. Gurkin, *The effect of dispersion of limestone on the properties of cement mortar*. Materials Today: Proceedings, 2019. **19**: p. 2068-2071.
3. Montgomery, D., *Design and analysis of experiments*. 8<sup>th</sup> ed. 2013, United States: John Wiley & Sons, Inc.
4. Altun, D., et al., *Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant*. International Journal of Mineral Processing, 2015. **136**: p. 32-36.
5. Jensen, L.R.D., et al., *Influence of quartz particles on wear in vertical roller mills. Part I: Quartz concentration*. Minerals Engineering, 2010. **23**(5): p. 390-398.
6. ThyssenKrupp, *Roller Mill & Separator for Roller Mill*, B.U.R. Technologies, Editor. 2014: Germany.
7. Altun, D., et al., *Operational parameters affecting the vertical roller mill performance*. Minerals Engineering, 2017. **103-104**: p. 67-71.
8. Fujita, K. and T. Saito, *Unstable vibration of roller mills*. Journal of Sound and Vibration, 2006. **297**(1): p. 329-350.
9. Li, H., et al., *Performance of the static air classifier in a Vertical Spindle Mill*. Fuel, 2016. **177**: p. 8-14.
10. Reichert, M., et al., *Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill*. Minerals Engineering, 2015. **73**: p. 109-115.
11. Siriswasdi, O., *Study on appropriate method of teflon production by design of experiment technique*, in *Industrial Engineering*. 2008, Chulalongkorn University.
12. Phongsitthisak, M., *Study of appropriate parameters of ultrasonic welding machine for surgical gown manufacturing*, in *Industrial Engineering*. 2006, Chulalongkorn University.
13. Aleksandrovic, S. and M. Jovic, *Testing and calibration of continuously operating belt weighers*. Przegląd Elektrotechniczny, 2011. **87**: p. 276-279.



14. Jensen, L.R.D., et al., *Analysis of limestone micromechanical properties by optical microscopy*. Engineering Geology, 2010. **110**(3): p. 43-50.
15. Pareek, P. and V.S. Sankhla, *Review on vertical roller mill in cement industry & its performance parameters*. Materials Today: Proceedings, 2021. **44**: p. 4621-4627.
16. Ghalandari, V., et al., *A case study on energy and exergy analyses for an industrial-scale vertical roller mill assisted grinding in cement plant*. Advanced Powder Technology, 2021. **32**(2): p. 480-491.
17. Xie, W.-n., et al., *Simulation study of the energy-size reduction of MPS vertical spindle pulverizer*. Fuel, 2015. **139**: p. 180-189.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปรัชญ์พล พวงศิริ
วัน เดือน ปี เกิด	25 พฤษภาคม 2536
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศบ.)
ที่อยู่ปัจจุบัน	12/14 ถ.อ่างทอง-สิงห์บุรี ต.ตลาดหลวง อ.เมืองอ่างทอง จ.อ่างทอง 14000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY