การพัฒนาและออกแบบเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนเพื่อประยุกต์ใช้ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวแบบสองมิติของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน

นายสุวิชช์ รอดภัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MULTISTAGE BAYESIAN SAMPLING DESIGN FOR
AN OPTIMAL 2D DNAPL-SOURCE ZONE CHARACTERIZATION WITH BETTER
SPATIAL PATTERN RECOGNITION

Mr. Suwit Rodphai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering
Department of Water Resources Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2008
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาและออกแบบเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนเพื่อประยุกต์ใช้ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวแบบสองมิติของสารปนเปื้อน ประเภท DNAPL ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน
โดย	นายสุวิชช์ รอดภัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วีสกุล)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุวิชช์ รอดภัย : การพัฒนาและออกแบบเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนเพื่อประยุกต์ใช้ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวแบบสองมิติของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน (Development of a Multistage Bayesian Sampling Design for an Optimal 2D DNAPL-Source Zone Characterization with Better Spatial Pattern Recognition) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา, 222 หน้า.

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอเทคนิคการเก็บตัวอย่างเพื่อหาการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ในชั้นน้ำใต้ดิน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคมัลติสเตจเบส์เซียน (Multistage Bayesian) ในการวิเคราะห์ข้อมูลชั้นน้ำใต้ดิน และข้อมูลการปนเปื้อนเมื่อข้อมูลเบื้องต้นมีจำกัด สารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds; VOCs) มีคุณสมบัติเป็น Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPL) ซึ่งสารปนเปื้อนที่พบได้บ่อยในแหล่งน้ำใต้ดินทั่วโลกรวมทั้งในประเทศไทยลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชั้นน้ำที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Aquifer) รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีเฉพาะของ DNAPLส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ณ บริเวณแหล่งกำเนิด (Source Zone) มีความซับซ้อนเป็นอย่างยิ่ง ได้ประยุกต์หลักการธรณีสถิติ และเทคนิคมัลติสเตจเบส์เซียนใช้ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวแบบสองมิติ (2D Site Characterization) บริเวณ Source Zone จากการสำรวจเบื้องต้น เพื่อช่วยให้สามารถวางแผนและออกแบบการกำหนดตำแหน่งสำรวจลำดับต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดความไม่แน่นอนที่จะสำรวจไม่พบการปนเปื้อน ชั้นน้ำใต้ดินถูกจำลองโดยใช้หลักธรณีสถิติและจำลองกระจายตัวของ DNAPL ในชั้นน้ำใต้ดินโดยโปรแกรม UTCHEM ภายใต้การกระจายตัวของคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นน้ำแบบ Sequential Gaussian Simulation (SGS) และ Sequential Indicator Simulation (SIS) ผู้วิจัยได้ออกแบบจำนวนและตำแหน่งของหลุมสำรวจภายใต้เงื่อนไขตัวแปรทางอุทกวิทยา (ชนิดของดินและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน) โดยใช้กระบวนการของมาร์คอฟ (Markov Process) แบบ Discrete-State, Continuous-Space พบว่าเทคนิคมัลติสเตจเบส์เซียนสามารถลดจำนวนหลุมสำรวจ (เทียบกับการเก็บตัวอย่างแบบ Systematic) ได้ 30 % สามารถลดค่าใช้จ่ายสำหรับ Site Characterization รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในกระบวนการตัดสินใจในขั้นตอนการทำ Site Characterization สำหรับพื้นที่ปนเปื้อนอื่น ๆ ได้ต่อไป

ภาควิชา.......วิศวกรรมแหล่งน้ำ............ ลายมือชื่อนิสิต.......สุวิชช์ รอดภัย.......

สาขาวิชา.....วิศวกรรมแหล่งน้ำ............ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.......................

ปีการศึกษา 2551

4970662921 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: GROUNDWATER / DNAPL / UTCHEM / GEOSTATISTICS/ SOURCE ZONE

SUWIT RODPHAI : Development of a Multistage Bayesian Sampling Design for an Optimal 2D DNAPL-Source Zone Characterization with Better Spatial Pattern Recognition

ADVISOR: AKSARA PUTTHIVIDHYA, Ph.D., 222 pp.

This thesis presents a uniquely developed multistage Bayesian sampling technique for soil and groundwater sampling application during the contaminated site characterization process by accounting for the spatial variability in aquifer physical properties that have been illustrated to play a significant role in subsequent dense nonaqueous phase (DNAPL) dissolution and distribution as well as the contaminant aqueous phase transport dynamics. The aquifer geologic conditions were modeled by a set of parameters following a continuous-space and discrete-state Markov process assumptions. The parameter state probabilities were initially based on general geological conditions and further updated by multistage Bayesian process, reflecting the outcomes and reliability of the location- specific, nondeterministic observations provided by exploration observations. The resulting posterior probabilities could further be employed to effectively locate a new borehole location and the process was repeated until the contaminant source zone architecture and distribution profiles could successfully be generated account for the value of information concept. This originally developed sampling technique was illustrated herein to effectively reduce the numbers of boreholes by 30 % comparing to the traditional systematic soil and groundwater sampling technique based on the similar degree of source zone morphology achieved.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department :..Water Resources Engineering.... Student's Signature :...Suwit Rodphai...

Field of Study :...Water Resources Engineering.... Advisor's Signature :..............

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์คำปรึกษาแนะนำ และข้อมูลที่มีประโยชน์จากผู้มีพระคุณดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำอย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาการศึกษา รวมถึงการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วีสกุล ประธาน และคณะกรรมการที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์แหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์และหน่วยปฏิบัติการวิจัยแหล่งน้ำที่ได้เอื้อเฟื้อ สถานที่ บุคลากร เครื่องมือ และอุปกรณ์การศึกษา ขอขอบพระคุณ คุณเกรียงศักดิ์ มานะจิตต์ และ คุณวีระพล เพชรานนท์ ที่ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ Lawrence D. Lemke และ Linda M. Abriola ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพงอินทร์ อินทฤทธิ์ คุณณัฐวุฒิ เหลืองพานิช และคุณสิทธิกร อ่อนฤทธิ์ ที่คอยช่วยเหลือในการทำงาน และขอขอบคุณผู้ที่อยู่เบื้องหลังการจัดทำวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ที่ให้โอกาส และสนับสนุนด้านการศึกษาของข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งการอบรมเลี้ยงดูด้วยความรัก ความอบอุ่น ให้กำลังใจและคำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ เสมอมา

ประโยชน์ และคุณค่าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่านที่ให้คำปรึกษา ความอนุเคราะห์ และกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.4 การศึกษาที่ผ่านมา	5
1.5 แนวทางการศึกษา	13
1.6 พื้นที่ศึกษา	18
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา	21
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองชั้นดิน	21
2.2 ทฤษฎีทางกายภาพและเคมีของสารปนเปื้อนจำพวกสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ	40
2.3 ทฤษฎีสโตแคสติค	46
2.4 ทฤษฎีเบส์	53
บทที่ 3 แบบจำลองคณิตศาสตร์	57
3.1 การจำลองเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์	57
3.1.1 แบบจำลองสโตแคสติคด้วยวิธี SGS (Sequential Gaussian Simulation)	57
3.1.2 แบบจำลองสโตแคสติคด้วยวิธี SIS (Sequential Indicator Simulation)	58

หน้า

3.2 แบบจำลอง UTCHEM …………………………………………………… 62
3.3 แบบจำลองมัลติสเตจเบส์เซียน…………………………………………… 66
3.3.1 ส่วนประกอบของกระบวนการมาร์คอฟ………………………………… 66
3.3.2 เมตริกควรจะเป็น ………………………………………………… 69
3.3.3 อธิบายกระบวนการปรับปรุงโดยหลักการเบส์ ………………………… 70
3.3.4 แบบจำลองการทำนายโอกาสพบการปนเปื้อน ……………………… 72

บทที่ 4 ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์………………………………… 75
4.1 ผลการศึกษาจากการจำลองลักษณะชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์……………………………………………… 75
4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM……………………… 88
4.2.1 ลักษณะการจำลองการกระจายตัวของ PCE…………………………… 89
4.2.2 ลักษณะการจำลองการกระจายตัวของ TCE…………………………… 91
4.2.3 ลักษณะการจำลองการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste)…………………………………………………………… 93
4.3 ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของ PCE……………………………… 95
4.4 ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของ TCE……………………………… 99
4.5 ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste)…………………………………………………………… 103
4.6 ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินโดยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน.. 112
4.6.1 ค่าเริ่มต้นของเบส์เซียนในกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ………………… 112
4.6.2 การวิเคราะห์โดยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน……………………………… 114

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ…………………………………………………… 130
5.1 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของชั้นน้ำใต้ดินและลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน………………………… 130
5.2 การวิเคราะห์ผลของการพัฒนามัลติสเตจเบส์เซียน………………………… 131
5.3 ข้อเสนอแนะ……………………………………………………………… 132

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รายการอ้างอิง.. 134
ภาคผนวก... 141
ภาคผนวก ก ตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา.. 142
ภาคผนวก ข เปรียบเทียบลักษณะของการจำลองทางธรณีสถิติและการจำลอง
การปล่อยสารปนเปื้อน.. 152
ภาคผนวก ค เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน............................ 204

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 222

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ความพรุนของดินแต่ละชนิด..	24
2-2	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในดินแต่ละชนิด..	26
2-3	แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของ DNAPL...	43
3-1	รูปแบบของตัวแปรในแต่ละแบบจำลอง..	62
3-2	ลักษณะคุณสมบัติของ PCE ที่ใช้ในแบบจำลอง UTCHEM..........................	65
4-1	ตัวแปรของแวริโอแกรมสำหรับแบบจำลองธรณีสถิติแบบ SGS ของ f และ d_{10} ...	78
4-2	ตัวแปรของแวริโอแกรมสำหรับแบบจำลองธรณีสถิติแบบ SIS ของ f และ d_{10}	83
4-3	ลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของแบบจำลอง..	84
4-4	ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว..	96
4-5	ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายตัวของสาร TCE ในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว..	100
4-6	ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบการกระจายของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste)..	104
4-7	พารามิเตอร์ทางธรณีและระบุสถานะของตัวแปร..	113
4-8	ความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง..........	113
4-9	ตำแหน่งหลุมและสถานะของหลุมสำรวจ เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1 ที่ตำแหน่ง 5 เมตร..	114
4-10	เมตริกการประมาณค่าความเชื่อมั่นในการสำรวจพบเจอการปนเปื้อน.............	115
4-11	ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 1.5 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตรในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1	118
4-12	ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 6.7 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตรในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1.........................	119
4-13	ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 8 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตร ในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1	120
4-14	การปรับปรุงโอกาสที่เจอสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 เมตร ลึก 1 เมตร แนวแกน x เซตอ้างอิง แบบจำลองที่ 1..	122
4-15	การปรับปรุงโอกาสที่เจอสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 เมตร ลึก 2 เมตร แนวแกน x เซตอ้างอิง แบบจำลองที่ 1..	122

หน้า

4-16 จำนวนตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มของ Daniel.. 127
4-17 จำนวนหลุมสำรวจกับคุณค่าของข้อมูล.. 129

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1-1	ชนิดข้อมูลและแหล่งข้อมูลที่นำเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..	5
1-2	ขั้นตอนการศึกษา……………………………………………………………..	15
1-3	ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)………………………………………………………..	17
1-4	พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งของหลุมเจาะสำรวจ………………………………………..	19
1-5	ตำแหน่งของการเก็บตัวอย่างสารปนเปื้อน…………………………………………..	19
1-6	ฮีสโตแกรมของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้…………………………….	20
2-1	กราฟการกระจายของเม็ดดิน…………………………………………………....	23
2-2	ลักษณะการประเมินค่าของตำแหน่งที่ไม่ทราบค่า………………………………..	31
2-3	ความสัมพันธ์ระหว่างแวริโอแกรมและความแปรปรวนร่วม……………………….	33
2-4	รูปแบบของแวริโอแกรมชนิดต่างๆ……………………………………………….	34
2-5	คุณสมบัติของแวริโอแกรม………………………………………………………..	35
2-6	แวริโอแกรมของจุดและแบบที่มีปริมาตรรองรับ…………………………………...	35
2-7	การประเมินที่ให้ความแปรปรวนแตกต่างกัน………………………………………	38
2-8	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่า ความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล………………………………………	41
2-9	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่า ความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล………………………………………	41
2-10	ลักษณะการเคลื่อนตัวของ DNAPL………………………………………………..	43
2-11	ลักษณะในชั้นของ Vadose Zone………………………………………………..	44
2-12	ลักษณะในชั้นของ Saturated Zone………………………………………………	44
2-13	ลักษณะการรั่วซึมของ DNAPL ในชั้นต่างๆ……………………………………….	45
2-14	ตัวอย่างการประมาณค่าความพรุนที่จุดบนตารางกริดเพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง	48
2-15	ไดอะแกรมแสดงสถานะและความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ……………….	51
2-16	ผลของ Diagrams สำหรับ Two-Stage Decision ด้วยการปรับปรุงผลของความ ไม่แน่นอน……………………………………………………………………...	54
3-1	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงสโตแคสติควิธี SGS โดยใช้โปรแกรม GMS 5.0...	57
3-2	ลักษณะการทำงานของโปรแกรม T-PROG……………………………………….	59
3-3	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง T-PROG……………………………………………	59
3-4	ตารางกริดในแบบจำลอง T-PROG……………………………………………….	60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
3-5	ตำแหน่งค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มของทั้ง d_{10} และความพรุน ……………………...	61
3-6	ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจในพื้นที่ศึกษา…………...………………………….	61
3-7	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM………………………………………..	63
3-8	ขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลอง UTCHEM……………………………………….	64
3-9	การเก็บข้อมูลระยะจมและระยะแผ่ด้านข้างของสารปนเปื้อนหน้าตัดที่ 5 ระนาบ $X - Z$ ……………………………………………………………………..	65
3-10	การทำนายการเปลี่ยนสถานะต่อไปเมื่อให้สถานะที่ทราบค่า……………………..	67
3-11	การปรับปรุงหน้าตัดโดยพื้นฐานของ q Imperfect Observation………………..	73
4-1	Cross-Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน (f) และสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K) สำหรับพื้นที่ศึกษา………………...……………………….	76
4-2	แบบจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่าความพรุนในแนวราบ………………….	77
4-3	แบบจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่าความพรุนในแนวดิ่ง…………………...	77
4-4	แบบจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่า d_{10} ในแนวราบ………………………...	79
4-5	แบบจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่า d_{10} ในแนวดิ่ง……………………….	79
4-6	ฟังก์ชั่นการรวบรวมการแจกแจงของขนาดคละ (CDF) จากข้อมูล 167 ตัวอย่าง..	80
4-7	ค่าเฉลี่ยของขนาดการแจกแจงของ 5 กลุ่มตัวชี้วัดโดยวิธี KMEANS……………..	81
4-8	ฟังก์ชั่นการแจกแจงของการแบ่งกลุ่มของตัวชี้วัด 5 กลุ่มของค่า d_{10} โดยใช้ความถี่ของโอกาสที่เกิดของตัวชี้วัดในแต่ละค่าในตารางที่ 4-2…………………...	81
4-9	ฟังก์ชั่นการแจกแจงของการแบ่งกลุ่มของตัวชี้วัด 5 กลุ่มของค่า f โดยใช้ความถี่ของโอกาสที่เกิดของตัวชี้วัดในแต่ละค่าในตารางที่ 4-2………………………...	82
4-10	การแจกแจงของฟังก์ชั่นความน่าจะเป็น (PDF) ของค่า d_{10} ……………………..	82
4-11	การแจกแจงของฟังก์ชั่นความน่าจะเป็น (PDF) ของค่า f ………………………	83
4-12	ผลของการเปรียบเทียบของแบบจำลองทางธรณีสถิติแบบ 3 มิติ………………….	86
4-13	ผลของการเปรียบเทียบตัวแปรของชั้นน้ำในหน้าตัดที่สนใจเชิง 2 มิติ…………….	86
4-14	ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ในหน้าตัดที่พิจารณาเชิง 2 มิติ…………	87
4-15	ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง………………...	89
4-16	ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1……..………………	89
4-17	ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2…...……………….	90
4-18	ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3……..………………	90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
4-19	ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง........................	91
4-20	ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1..............................	91
4-21	ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2..............................	92
4-22	ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3..............................	93
4-23	ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง..	93
4-24	ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1..	93
4-25	ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2..	94
4-26	ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3..	94
4-27	Box Plot ของระยะการการซึมในแนวดิ่งของ PCE จากการจำลองทางธรณีสถิติทั้ง 4 เซต..	96
4-28	Box Plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบของ PCE จากการจำลองทางธรณีสถิติทั้ง 4 เซต..	97
4-29	ค่าระยะซึมในแนวดิ่งของ PCE จากการจำลอง 4 เซท................................	97
4-30	ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของ PCE ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซทการจำลอง..	98
4-31	การเปรียบเทียบลักษณะการซึมและการกระจายตัวของ PCE ใน Realization แต่ละเซทการจำลองและ Box Plot	99
4-32	Box Plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวดิ่งของ TCE ทั้ง 4 เซต...............	101
4-33	Box Plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบของ TCE ทั้ง 4 เซต...............	101
4-34	ค่าระยะจมในแนวดิ่งของสาร TCE ทั้ง 4 กลุ่มข้อมูล..................................	102
4-35	ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของ TCE ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซทการจำลอง..	102
4-36	Box Plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวดิ่งสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต..	105
4-37	Box Plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบสารปนเปื้อนแบบผสม	

รูปที่		หน้า
	(Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต…………………………………………………………	105
4-38	ค่าระยะจมในแนวดิ่งของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต……..	106
4-39	ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซตการจำลอง…………..	106
4-40	เปรียบเทียบค่าระยะจมในแนวดิ่งของแต่ละสารใน เซตอ้างอิง……………………	108
4-41	เปรียบเทียบค่าระยะจมในแนวดิ่งของแต่ละสารใน เซต 1………………………..	109
4-42	เปรียบเทียบค่าระยะจมในแนวดิ่งของแต่ละสารใน เซต 2………………………..	109
4-43	เปรียบเทียบค่าระยะจมในแนวดิ่งของแต่ละสารใน เซต 3………………………..	110
4-44	เปรียบเทียบระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนที่ทดสอบ………............	110
4-45	เปรียบเทียบค่าระยะแผ่ในแนวราบของแต่ละสารปนเปื้อนที่ทดสอบ……………..	111
4-46	ตำแหน่งของการสำรวจที่ใช้ในแบบจำลองมัลติสเตจเบส์เซียน…………………..	116
4-47	ตัวอย่างตำแหน่งของการสำรวจที่พบเจอการปนเปื้อนของ PCE ในเซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1 ………………………………………………………………	117
4-48	จำลองความน่าจะเป็นโอกาสที่ตรวจพบการปนเปื้อนในเซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1.………………………....…………………………....................	123
4-49	หน้าตัดความน่าจะเป็นที่มีโอกาสเจอสารปนเปื้อนที่ความลึก 1 เมตร ในแนวแกน x ในเซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1…………………………………………………....	124
4-50	หน้าตัดความน่าจะเป็นที่มีโอกาสเจอสารปนเปื้อนที่ความลึก 2 เมตร ในแนวแกน x ในเซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1……………………...……………………..	125

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	เมตริกการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นสำหรับ Discrete- State, Continuous-Space ในกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
c_i	สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลงสำหรับสถานะ i สำหรับกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
$Concentration \ (VF)$	ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ได้จากแบบจำลอง UTCHEM โดย VF คือ Volume Fraction Unit นำมาคูณด้วยความหนาแน่นของสารนั้นจึงจะทราบความเข้มข้นในหน่วย ppm หรือ mg/l
d_{10}	ขนาดของอนุภาคที่ได้จากกราฟ Grain Size Distribution ที่ 10%
H_i	ความต่อเนื่องของสถานะ i สำหรับกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
$Heterogeneous \ Aquifer$	ชั้นน้ำที่มีสภาพไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
I	เมตริกเอกพจน์ขนาด n
$Kriging$	การประมาณค่าที่เหมาะสม โดยพิจารณาถดถอยจากค่าที่อยู่รอบๆจุดที่ต้องการทราบค่า โดยถ่วงน้ำหนักของค่ารอบๆจุดที่นำมาใช้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความแปรปรวนร่วมที่ได้จากสัมพันธ์กับระยะทาง
$L_{ij}(t_b)$	ความเชื่อมั่นของหลุมสำรวจที่สถานะ j ที่ตำแหน่ง t_b เมื่อกำหนดให้ค่าจริงของสถานะที่ตำแหน่ง t_b คือ i
m	จำนวนหลุมสำรวจสำหรับตัวแปรที่สนใจ $X(t)$
$Mixed \ Waste$	สารปนเปื้อนแบบผสมประกอบด้วย Toluene, 2-Chlorotoluene, 1-Bromohexane, 1-Bromoheptane และ TCE
n	จำนวนของสถานะสำหรับตัวแปรที่พิจารณา $X(t)$
$Nonaqueous \ Phase \ Liquid$	สารประกอบคาร์บอนที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ มีตัวย่อคือ NAPL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

P_{ij}	ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะ i ไปเป็นสถานะ j ในกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
PCE	เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)
q	จำนวนหลุมสำรวจ (Nondeterministic Observation, $Y(t_b)$)
Realizations	รูปแบบหลายเหตุการณ์ที่มีโอกาสเป็นไปได้
Reference Set	กลุ่มของแบบจำลองเชิงพื้นที่ที่สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองค่าความพรุน (f) ที่มีสภาพเป็นเนื้อเดียวกันกับแบบจำลองค่า d_{10} ที่สร้างโดยวิธี SGS มีตัวย่อคือ R^a
s_i^*	ข้อจำกัดสถานะความน่าจะเป็นสำหรับสถานะ i ของกระบวนการมาร์คอฟ X
$s_i(t)$	ความน่าจะเป็นสำหรับสถานะ i ที่ตำแหน่ง t ของกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
$s_i'(t)$	ปรับปรุงความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์สำหรับสถานะ i ที่ตำแหน่ง t เมื่อให้ q (Nondeterministic Observation, $Y(t_b)$)
Set 1	กลุ่มของแบบจำลองเชิงพื้นที่ที่สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองค่าความพรุน (f) ที่มีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน กับแบบจำลองค่า d_{10} ที่สร้างโดยวิธี SIS
Set 2	กลุ่มของแบบจำลองเชิงพื้นที่ที่สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองค่าความพรุน (f) ที่สร้างโดยวิธี SGS กับแบบจำลองค่า d_{10} ที่สร้างโดยวิธี SIS
Set 3	กลุ่มของแบบจำลองเชิงพื้นที่ที่สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองค่าความพรุน (f) ที่สร้างโดยวิธี SIS กับแบบจำลองค่า d_{10} ที่ สร้างโดยวิธี SIS
SGS	Sequential Gaussian Simulation เป็นการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยหลักการการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIS	Sequential Indicator Simulation เป็นการสร้างแบบจำลองโดยใช้ตัวบ่งชี้ (Indicator) ในการจัดข้อมูลเป็นกลุ่ม
t	ระยะทางของตำแหน่งตามความยาวของพื้นที่ในแนวแกน x เมื่อวัดจากตำแหน่งเริ่มต้น t_0
t_b, t_r, t_w	ตำแหน่งตามความยาวของพื้นที่ในแนวแกน x ของหลุมสำรวจ q, $Y(t_b)$
TCE	ไตรคลอโรเอทีลีน (Trichloroethylene)
Uniform	สภาพที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งพื้นที่
$v_{ij}(t-t_0)$	ค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ i ที่ ตำแหน่ง t_0 ไปสู่สถานะ j ที่ตำแหน่ง t_r ในกระบวนการมาร์คอฟ $X(t)$
Volatile Organic Compounds	สารอินทรีย์ระเหย มีตัวย่อคือ VOCs
$v'_{ij}(t_r, t_w)$	ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ i ที่ตำแหน่ง t_r ไปสู่สถานะ j ที่ตำแหน่ง t_w เมื่อกำหนดให้ทุกจุดสำรวจเป็น q (Nondeterministic Observation, $Y(t_b)$
x_m	ระยะแผ่กระจายในแนวราบแกน x ของการกระจายตัวของสารปนเปื้อนที่จำลองใน UTCHEM มีหน่วยเป็น เมตร
$X(t)$	พารามิเตอร์ของโอกาสพบเจอการปนเปื้อนเป็นการสุ่มแบบสเกลาร์ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง t
$Y(t_b)$	ตัวแปรสุ่มด้วย m สถานะ เป็นตัวแทนของหลุมสำรวจบนพารามิเตอร์ $X(t)$ ที่ตำแหน่ง t_b
z_m	ระยะซึมในแนวดิ่งในแนวแกน z ของการกระจายตัวของสารปนเปื้อนที่จำลองใน UTCHEM มีหน่วยเป็น เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าทรัพยากรน้ำนับเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของประชากรส่งผลให้อัตราการอุปโภคบริโภคทรัพยากรน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกคนตระหนัก ไม่ว่าจะเป็นด้านการจัดการเกี่ยวกับปริมาณน้ำอย่างเหมาะสมในแต่ละช่วงเวลา การระบายน้ำในช่วงเวลาน้ำหลากและการกักเก็บน้ำให้เพียงพอสำหรับการอุปโภคบริโภคตลอดปี อย่างไรก็ตามในปัจจุบันพบว่าการชลประทานจัดสรรน้ำไปยังผู้บริโภคยังไม่สามารถทำได้ทั่วถึงทั้งประเทศในปัจจุบัน ประกอบกับการขยายตัวของชุมชนเมืองและภาคอุตสาหกรรมของประเทศมีการขยายตัวในอัตราสูง ทำให้มีการใช้น้ำผิวดินในปริมาณที่มากและมีแนวโน้มที่จะขาดแคลนไม่เพียงพอกับความต้องการส่งผลให้มีการนำน้ำใต้ดินมาใช้ทดแทนน้ำผิวดินมากขึ้น จนต้องมีการเข้าควบคุมโดยหน่วยงานของรัฐที่มีหน้าที่รับผิดชอบทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ ซึ่งในด้านการใช้น้ำใต้ดินในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแผ่นดินทรุดและการรุกล้ำของน้ำเค็ม ซึ่งจะพบได้ในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเนื่องจากมีการใช้น้ำใต้ดินในปริมาณที่มากรวมทั้งปัญหาด้านคุณภาพที่ไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ ในการนำน้ำใต้ดินมาใช้อุปโภคบริโภคอย่างไม่สมดุลนอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาแก่ทรัพยากรน้ำใต้ดินเชิงปริมาณแล้ว ยังก่อให้เกิดปัญหาทรัพยากรน้ำใต้ดินเชิงคุณภาพด้วย โดยเฉพาะการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพยากรน้ำใต้ดินทั้งสิ้นเนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี ซึ่งจะทำให้แหล่งน้ำมีคุณภาพไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนั้นศักยภาพของแหล่งน้ำใต้ดินเชิงคุณภาพ จึงมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำใต้ดินไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าศักยภาพน้ำใต้ดินเชิงปริมาณ การปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำผิวดินแล้วปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ การปนเปื้อนที่พบได้บ่อยครั้งในแหล่งน้ำใต้ดินได้แก่ ไตรคลอโรเอทีลีน (Trichloroethylene, TCE) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene, PCE) เบนซีน (Benzene) และสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) สารเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็น Nonaqueous Phase Liquids (NAPL) หมายถึงสารปนเปื้อนที่มีความสามารถละลายในน้ำได้จำกัดและแยกชั้นออกจากน้ำอย่างชัดเจน สารปนเปื้อนเหล่านี้โดยทั่วไปแล้วจะไม่มีอยู่ตามธรรมชาติแต่จะเกิดจากการกระทำของมนุษย์ และในประเทศไทยนั้นพบพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนมากขึ้นโดยเฉพาะในเขตโรงงาน

อุตสาหกรรมที่มีการใช้หรือผลิตปล่อยสารเคมีเหล่านี้ลงไปสู่ชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินของประเทศ ซึ่งจะเกิดขึ้นจากความตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจก็ตามและในปัจจุบันยังพบว่าแหล่งน้ำธรรมชาติมีการปนเปื้อนจากสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็น NAPL ในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้การแก้ปัญหาการปนเปื้อน เพื่อบำบัดและฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินปนเปื้อนนั้นจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก

สถานการณ์การปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินในประเทศไทยได้ทวีความรุนแรงมากขึ้นจะเห็นได้จากหลักฐานการร้องเรียนเกี่ยวกับปัญหาคุณภาพน้ำและการปนเปื้อนด้วยสารเคมี ในพื้นที่จังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่ามีการรั่วไหลของกากสารเคมีที่จัดเก็บไว้บนเนื้อที่ประมาณ 100×200 ตารางเมตร ลงสู่ดินและแหล่งน้ำใต้ดินสาเหตุมาจากการละเลยต่อมาตรฐานระบบการจัดเก็บกากสารเคมีอันตรายจำพวกสารอินทรีย์ระเหย ทำให้สารปนเปื้อนเหล่านี้ซึมผ่านชั้นดินลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน และกระจายตัวอันเป็นผลมาจากแรงดึงดูดของโลกทำให้สารปนเปื้อนตกค้างในชั้นดินและแหล่งน้ำใต้ดินระดับลึก ซึ่งจะยากแก่การบำบัดและฟื้นฟู ขั้นตอนการสำรวจสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำ จะเริ่มจากการสำรวจลักษณะทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา รวมทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของพื้นที่ปนเปื้อนเพื่อจำแนกชนิดและปริมาณและการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด (Source Zone) โดยที่คุณภาพของการสำรวจที่ได้จะขึ้นอยู่กับงบประมาณ และวัตถุประสงค์ของการสำรวจเป็นหลัก ปัญหาสำคัญของการสำรวจการปนเปื้อนของพื้นที่ (Site Characterization) ก็คือการเจาะสำรวจ (Coring) ที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากเนื่องจากการขุดหลุมสำรวจโดยทั่วไปอาจจะไม่พบสารปนเปื้อนในตำแหน่งที่มีการสำรวจ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายโดยเปล่าประโยชน์และท้ายสุดทำให้การคาดการณ์การกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเกิดคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และส่งผลต่อการออกแบบการจัดการสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน เนื่องจากการกระจายตัวของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินมักมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity)สูง นอกจากนี้ข้อมูลเนื้อดินมักมีความแปรปรวนสูงและยังอยู่ในลักษณะตัวแปรสุ่มอีกด้วย (Goovaerts, 1999) ดังนั้นการที่จะทำนายคุณสมบัติของชั้นดิน ณ บริเวณแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาคุณสมบัติจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของชั้นดินก่อน ซึ่งโดยทั่วไปนิยมทำการขุดสำรวจ (Macqueen, 1967) ซึ่งการขุดสำรวจดังกล่าวยังไม่มีการกำหนดจำนวนหลุมสำรวจหรือระยะห่างของหลุมสำรวจ และบริเวณที่สำรวจเพื่อที่จะเป็นตัวแทนของพื้นที่ซึ่งยากต่อการศึกษาและเสียค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีทางธรณีสถิติ (Geostatistics) เข้ามาช่วยในการทำนายการกระจายของชั้นดินและแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน (Source Zone) ของ DNAPL เพราะวิธีการดังกล่าวจะให้ผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยและยังสามารถจำลองสภาพชั้นดินที่มีการกระจายตัว ที่

แตกต่างกัน โดยอาศัยหลักการประมาณชั้นดินด้วยวิธี Sequential Gaussian Simulation (SGS) และ วิธี Sequential Indicator Simulation (SIS) ในวิธี SGS จะใช้สมมติฐานที่ว่า ข้อมูลที่เก็บมาได้นั้นมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และใช้รูปแบบสมการที่สร้างขึ้นมาจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการหาค่าที่เราต้องการเพื่อสร้างแบบจำลองขึ้นมา ส่วนวิธี SIS จะเป็นลักษณะของการจัดการกับข้อมูลโดยใช้ตัวชี้วัด (Indication) ที่สร้างขึ้นมาโดยไม่อิงกับความแปรปรวนแล้วนำค่ามาเทียบกับตัวชุดสมการที่สร้างขึ้นมาเฉพาะเพื่อใช้ในการชี้วัดค่านั้นมาใช้ในการจัดกลุ่มข้อมูล แล้วนำไปคำนวณต่อเพื่อสร้างรูปแบบจำลองที่ต้องการมา จะช่วยให้ค่าที่ประมาณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงจากข้อมูลตัวอย่างที่มีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากวิธีธรณีสถิติ (Geostatistics) ใช้การคำนวณจากตัวอย่างจริงในสนามและการคำนวณมีความซับซ้อนมาก (Goovaerts, 1999) เพราะเป็นการจะประยุกต์ใช้แบบจำลองทางธรณีสถิติ (Geostatistics) ในการพิจารณาความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดิน (Heterogeneous) ซึงสามารถนำมาทำนายค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านเชิงพื้นที่ได้จากข้อมูลหลุมเจาะ (Schad และ Teutsch, 1995) เพื่อทราบผลการกระจายตัวของสารปนเปื้อน เนื่องจากความไม่แน่นอนของการทำนายค่าทางธรณี ภายใต้เงื่อนไขการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบในด้านการสำรวจ เพื่อที่จะหารูปร่างลักษณะของการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ซึ่งได้พัฒนาตามเงื่อนไขความเป็นไปได้โดยใช้หลักการของมัลลติสเตจเบส์เซียนและกระบวนการมาร์คอฟ (Ioannou, 1987) สำหรับใช้ในการทำนายความน่าจะเป็นของลักษณะการกระจายตัวที่แน่นอน และมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบการกระจายตัวที่แท้จริงของสารปนเปื้อน ซึ่งวิธีการนี้สามารถพัฒนาหรือปรับปรุงค่าที่ได้จากหลุมสังเกตที่ได้จากการขุดสำรวจ ประกอบกับวิธีดังกล่าวเหมาะสมกับกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นสาเหตุหลักที่เลือกใช้วิธีการทั้งสองก็คือ สามารถปรับปรุงความไม่แน่นอนที่อาจจะเกิดขึ้นโดยการปรับปรุงค่าที่ได้จากการขุดสำรวจ อย่างไรก็ตามการพัฒนาด้วยหลักการการทำนายนี้สามารถช่วยลดจำนวนหลุมเจาะสำรวจ และจะบ่งบอกถึงจำนวนหลุมเจาะที่น้อยที่สุดในการสำรวจพื้นที่ศึกษารวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นในขั้นตอนการสำรวจ

การศึกษาวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นเพื่อประยุกต์ใช้ในการกำหนดตำแหน่งและจำนวนตำแหน่งสำรวจที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ณ บริเวณแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน (Source Zone)

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาแบบจำลองธรณีสถิติ (Geostatistical Model) เพื่อจำลองสภาพชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) ต่อลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อนประเภท Dense Nonaqueous Phase Liquid (DNAPL) ในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัว ณ บริเวณแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone)

3. พัฒนาเทคนิคการเก็บจำนวนตัวอย่างดิน และน้ำใต้ดินแบบมัลติสเตจเบส์เซียน (Multistage Bayesian Sampling Technique) ในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) ณ บริเวณแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน

4. ทดสอบและประเมินผลเทคนิคการเก็บตัวอย่างดินและน้ำใต้ดินแบบมัลติสเตจเบส์เซียนที่พัฒนาขึ้น ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อน ประเภท DNAPL บริเวณแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) ในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

พิจารณาการกระจายตัวของชั้นดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนธรรมชาติภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และพัฒนาออกแบบเทคนิคการเก็บตัวอย่างโดยใช้วิธีมัลติสเตจเบส์เซียน มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นที่ที่นำดินมาศึกษานำมาจากพื้นที่ศึกษา ในเมือง Oscoda รัฐ Michigan (Lemke et al. 2004, 2005) เนื่องจากมีหลักฐานการปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ด้วยสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยและมีการเก็บข้อมูลดินที่ละเอียดเพียงพอทั้งในระดับภาคสนามและระดับห้องปฏิบัติการ

2.แบบจำลองทางธรณีสถิติ (Geostatistical Model) พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม GMS 5.0 (Groundwater Modeling System) เวอร์ชั่น 5.0 และโปรแกรมย่อย T-PROG เพื่อจำลองสภาพชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินภายใต้อิทธิพลที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) ภายใต้เงื่อนไขกระจายตัวของเม็ดดินและความพรุนแบบ Uniform และ Nonuniform

3.จำลองลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL เมื่อสารปนเปื้อนซึม (Infiltration) จากตำแหน่งปล่อยสารบริเวณผิวดินผ่านชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัวในบริเวณแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) โดยโปรแกรม UTCHEM ซึ่งใช้คุณสมบัติสารปนเปื้อนในรูปที่ 1-1 ภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน (Heterogeneity) ที่มีลักษณะกระจายตัวของเม็ดดินและความพรุนแบบ Uniform และ Nonuniform โดยใช้แบบจำลองทางธรณีสถิติที่พัฒนาขึ้นในข้อ (2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Parameter	Value	Units	Reference
PCE spill volume	0.096	m^3	Lemke et al. 2004
Spill radius (r)	0.797	m	Lemke et al. 2004
Spill depth (h)	8.315	m	Lemke et al. 2004
Average NAPL Saturation (S_o^{Avg})	0.017	—	Lemke et al. 2004
Porosity (n)	0.36	—	Lemke et al. 2004
PCE density (ρ_{PCE})	1.623×10^6	g/m^3	Verschueren 1983
Rate-limited aqueous-phase PCE concentration (C_{aq}^{PCE})	30^a	g/m^3	Abriola et al. 2005
Length of surfactant flush	10	day	Abriola et al. 2005
Bioenhanced dissolution factor	5^a	—	Carr et al. 2000 Cope and Hughes 2001 Yang and McCarty 2002
Apparent PCE concentration during SEAR (C)	5.4×10^3	g/m^3	Ramsburg et al. 2005
Groundwater velocity (V_d)	0.032	m/day	Lemke et al. 2004
Groundwater velocity during SEAR	0.514	m/day	Abriola et al. 2005 Ramsburg et al. 2005
Pore volume	5.9	m^3	Calculated
Pool length (L_p)	1	m	Calculated
Pool depth	0.016	m	Calculated
Number of independent pools	6	—	Calculated
Vertical dispersivity (α_v)	2.3×10^{-4}	m	Johnson and Pankow 1992
Aqueous solubility of PCE	150	g/m^3	Verschueren 1983
Equilibrium solubility of PCE in surfactant solution	$26{,}880^b$	g/m^3	Taylor et al. 2001
PCE bulk aqueous phase diffusion coefficient (D_{aq}^{PCE})	5.7×10^{-5}	m^2/day	Dekker and Abriola 2000

[a]Assumed based upon range of reported values. [b]From reported weight solubilization ratio of 0.672 g of PCE per gram of surfactant (4% Tween 80 solution).

รูปที่ 1-1 ชนิดข้อมูลและแหล่งข้อมูลที่นำมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ที่มา : Lemke and Abriola (2003)

4.พัฒนาเทคนิคการเก็บตัวอย่างดินและสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยใช้ทฤษฎีของธรณีสถิติ (Geostatistics) และหลักการของมัลติสเตจเบส์เซียน (Multistage Bayesian Theory) ภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน (Heterogeneity) ที่มีลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินและความพรุนแบบ Uniform และ Nonuniform

5.ทดสอบและประเมินผลเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียน (Multistage Bayesian) ที่พัฒนาขึ้นในข้อ (4) โดยใช้ลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL ที่พัฒนาในข้อ (3) เปรียบเทียบกับเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบทั่วไป (Systematic Grid Sampling)

1.4 การศึกษาที่ผ่านมา

1.4.1 การศึกษาในประเทศไทย

1.4.1.1 การศึกษาคุณภาพน้ำใต้ดิน

การศึกษาวิจัยด้านคุณภาพน้ำใต้ดินในประเทศไทยได้มีการดำเนินอย่างต่อเนื่องนับแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนิต ธนเสนีวัฒน์ (2540) ได้ศึกษาเชิงปริมาณและคุณภาพของแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและจัดการเกี่ยวกับการใช้น้ำใต้ดินตามวัตถุประสงค์ต่างๆ อย่างเหมาะสม การประมาณค่าเฉลี่ยต่อปีของปริมาณน้ำที่เติมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Average Annual Groundwater Recharge) ในจังหวัดพิษณุโลกใช้วิธีประมาณค่า 3 วิธีด้วยกันคือวิธี สมดุลของน้ำ (Water Balance) วิธีศึกษาการไหลของน้ำใต้ดิน และวิธีพิจารณาแต่ Specific Yield ผลการศึกษาโดยวิธีสมดุลของน้ำจะได้ค่าเฉลี่ยต่อปีของปริมาณน้ำที่เติมให้ชั้นน้ำใต้ดินเท่ากับ 110 มม.ต่อปี ในขณะที่การคำนวณวิธีการไหลของน้ำใต้ดินค่าเท่ากับ 46.08 มม.ต่อปี และจากวิธี Specific Yield มีค่าเท่ากับ 40.43 มม.ต่อปี จากผลลัพธ์ดังกล่าวค่าเฉลี่ยต่อปีของปริมาณน้ำที่เติมสู่ชั้นน้ำใต้ดินในจังหวัดพิษณุโลก มีค่าอยู่ระหว่าง 40-110 มม.ต่อปี ด้านการศึกษาคุณภาพน้ำใต้ดินโดยใช้ข้อมูลบ่อน้ำใต้ดินในจังหวัดพิษณุโลก โดยวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก คลอไรด์ และความกระด้าง ในชั้นน้ำใต้ดิน พบว่าแหล่งน้ำใต้ดินของจังหวัดพิษณุโลกที่ระดับความลึก 15-40 ม.ส่วนใหญ่มีปริมาณเหล็กสูง ปริมาณคลอไรด์และความกระด้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำอุปโภคบริโภค ส่วนในชั้นน้ำใต้ดินที่ความลึก 55-70 ม. พบเหล็กในปริมาณสูงเช่นกัน แต่เฉลี่ยแล้วมีค่าน้อยกว่าในชั้นน้ำใต้ดินระดับตื้นในขณะที่ ปริมาณคลอไรด์และความกระด้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับอุปโภคบริโภคเช่นกัน

สุรสีห์ ศรีวนิชย์ (2542) ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณการไหลของน้ำใต้ดิน การแพร่กระจายของสารมลพิษในชั้นน้ำใต้ดิน และประยุกต์ใช้แบบจำลองกับพื้นที่ฝังกลบขยะมูลฝอย ต. บ้านแห อ.เมือง จ.อ่างทอง โดยใช้วิธี Analytic Element Method สำหรับแบบจำลองการแพร่กระจายของสารมลพิษในชั้นน้ำใต้ดินนั้นใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนท์ (Finite Difference Method) โดยการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองในภาษา Pascal พบว่าการแพร่กระจายของปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการ Oxidize สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (COD) ที่เวลา 1, 5, 10, 30 และ 50 ปี มีความเข้มข้น 10 mg/L ที่ 50 ปี และสามารถแพร่กระจายได้ไกล 62.5 เมตร ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งจะไม่ทำให้แหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียงเกิดความเสียหาย

ฉลอง บัวผัน (2542) โครงการศึกษาวิจัยโลหะหนักในน้ำใต้ดินเนื่องจากการจากกองขยะ ของเทศบาลนครขอนแก่น บริเวณบ้านน้อยขยะเหนือบ้านคำบอน ต. บ้านค้อ อ.เมือง จ.ขอนแก่น ประมาณ 17 กม. มีพื้นที่ประมาณ 100 ไร่ มีการกำจัดขยะด้วยการฝังกลบพร้อมบ่อดักน้ำเสียและบ่อบำบัดน้ำเสีย แหล่งขยะตั้งอยู่บริเวณที่มีชั้นน้ำใต้ดินระดับตื้นเป็นชั้นน้ำเปิด (Unconfined Aquifer) ซึ่งเป็นหินร่วนจำพวกกรวด ทรายปนลูกรัง ลึก 6-8 m. หนาประมาณ 3-5 m. ลึกลงไปเป็นชั้นน้ำปิด (Confined Aquifer) ซึ่งน้ำใต้ดินเกิดอยู่ในรอยแตกรอยแยกหินตะกอน

ชุดภูพานประกอบด้วย หินทรายปนกรวด และหินกรวดมน ความลึก 15-50 m. ความหนาระหว่าง 10-25 ม. น้ำใต้ดินไหลโดยรวมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปสู่ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ มุ่งสู่แม่น้ำพอง ชั้นหินอุ้มน้ำปิดมีค่า Storage Coefficient อยู่ระหว่าง 0.0001592 – 0.00046869 ค่า Transmissivity อยู่ระหว่าง 0.47-2.11 m^2/day ค่า Hydraulic Conductivity อยู่ระหว่าง0.0494 – 0.0937 m/day สามารถสูบน้ำได้ 12.58 ถึง 68.13 m^3/day มีระดับน้ำลดอยู่ระหว่าง 13.05-22.28 m.ในการทดลองได้วิเคราะห์คุณภาพน้ำค่า pH, EC, TDS, Cl และ Ca,Mg,Na,K,HCO_3,SO_4,NO_3,Fe,Mn,Cu,Cd,Pb,Cr,Hg คุณภาพน้ำร้อยละ 70 เป็นน้ำจืด จากการศึกษาพบว่าชั้นน้ำใต้ดินระดับลึก 15-50 เมตร ยังมีคุณภาพดีปราศจากการปนเปื้อนจากโลหะหนัก

วศิน มหัตนิรันดร์กุล (2544) ได้ศึกษาการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนอันเกิดจากการรั่วซึมที่ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินของสารปนเปื้อนประเภท Hydrocarbons, NAPL และ BTEX พบว่าในสถานะของแข็ง (Solid Phase) สามารถลดระดับของไฮโดรคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วได้มากกว่าสถานะที่จับตัวกันเมื่อประเมินค่าด้วยวิธี Risked-Based Corrective Action (RBCA) สามารถชี้นำให้เห็นพื้นที่ของสารปนเปื้อนในในช่วงเวลา 1-3 ปี แล้วทำการเลือกวิธีการบำบัดที่เหมาะสม

ในการศึกษาด้านคุณภาพน้ำใต้ดินในประเทศไทย ยังมีการศึกษาในส่วนของการปนเปื้อนประเภท NAPL อยู่น้อยมากเนื่องจากยังไม่มีความตื่นตัวในด้านการสำรวจและลักษณะการกระจายตัวของการปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด ซึ่งการศึกษาเชิงคุณภาพของน้ำใต้ดินจะเน้นตรงส่วนที่เป็นมาตรฐานที่ในการอุปโภคบริโภค

1.4.1.2 การศึกษาทางด้านธรณีสถิติ

การศึกษาเกี่ยวกับหลักธรณีสถิติในประเทศไทย ได้แก่

วรพจน์ ลาวป้อม (2547) ได้ทำการศึกษาตัวแปรในการประมาณศักยภาพของแหล่งผลิตทางด้านปิโตรเลียมที่สำคัญเช่น ความพรุนของหิน ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งนั้น สามารถประมาณค่าโดยใช้วิธีธรณีสถิติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวแปรนี้มาใช้ในการศึกษาโดยใช้ Stochastic Simulation ในการประมาณค่าความพรุนของหินที่ตำแหน่งต่างๆในพื้นที่ศึกษาหนึ่ง แต่วิธีการประมาณค่านี้จะให้ผลการประมาณค่าออกมาหลายรูปแบบ (Realizations) ที่มีความเป็นไปได้เท่าๆกัน ดังนั้นถ้านำผลการประมาณค่าทั้งหมด (ทุกแบบที่ประมาณค่าได้) มาประมาณศักยภาพของแหล่งผลิต จะเป็นการเสียเวลาและทรัพยากรอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยประมาณค่าของความพรุนของหิน จากข้อมูลความพรุนของหินชุดหนึ่งโดยใช้ Sequential Gaussian Simulation โดยสร้างรูปแบบที่สามารถเป็นไปได้ของความพรุนของ

หินเป็นจำนวน 60 รูปแบบ จากนั้นนำรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาปรับลดความแตกต่าง (Denoising) โดยใช้ Multi - Resolution Wavelet Analysis (Daubechies 4 Wavelet) จากนั้นจะจับคู่รูปแบบที่ถูกปรับลดความแตกต่างแล้วเพื่อหาค่าความเหมือน (Correlation) โดยเกณฑ์การเปรียบเทียบและจัดกลุ่มรูปแบบคือ กำหนดค่าความเหมือนขึ้นมาค่าหนึ่ง (Cut-Off Value) จากการจัดกลุ่มรูปแบบที่มีสมาชิกในกลุ่มมากที่สุดจะเป็นตัวแทนของรูปแบบทั้งหมด เพื่อจะนำไปประเมินศักยภาพของแหล่งผลิตต่อไป

ซึ่งในการศึกษาด้านธรณีสถิติที่พบในประเทศไทย ยังไม่มีการศึกษาที่มากพอในด้านการประยุกต์หลักการในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้เชิงพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติดิน และน้ำใต้ดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นถึงการจำลองแร่หรือน้ำมัน

1.4.2 การศึกษาในต่างประเทศ

1.4.2.1 การศึกษาเกี่ยวกับสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน

มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยผู้ทำการศึกษาได้แก่

Van Geel and Roy (2002) ได้ศึกษาการทดลองลักษณะของ NAPL 2-3 phase ที่มีผลต่อการตกค้างของ NAPLในชั้นน้ำอิ่มตัว (Residual NAPL Saturation) และแบบจำลองในเรื่องของ Pressure–Saturation Relative Permeability ในสถานะที่การตกค้างของ NAPLในชั้นน้ำอิ่มตัว (Residual NAPL Saturation) ซึ่งผลที่ได้บ่งบอกถึงความสำคัญของความสัมพันธ์ความดันกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ซึ่งจะมีผลต่อการซึมของสารปนเปื้อนประเภท NAPL

Bradford et al. (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการละลายและการตกค้าง (Entrapment) ของ DNAPL ใน Porous Media ในรูปแบบความแปรปรวนของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งผลการรั่วซึมและการกระจายตัวของ PCE จะขึ้นอยู่กับ Wettability ซึ่งการกระจายตัวในช่วงแรกจะทำให้การแพร่กระจายตัวเป็นวงกว้างและในชั้นดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้การแพร่กระจายของ PCE มากขึ้น

Lemke et al. (2004) ได้ศึกษาสำรวจถึงผลกระทบของลักษณะชั้นน้ำเพื่อที่จะทำนายการแพร่กระจายของ DNAPL ในชั้นน้ำที่อิ่มตัวแต่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่แตกต่างกัน ผลการทำนายลักษณะจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวแปร $P_c - Sat$ ซึ่งจะควบคุมการทำนายการซึมของสารปนเปื้อน DNAPL ในชั้นน้ำที่อิ่มตัว ผลของการกระจายตัวนี้จะทำให้การออกแบบการบำบัดพื้นที่ของแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) ได้มีประสิทธิภาพและเลือกวิธีบำบัดให้เหมาะสมกับสารปนเปื้อนในพื้นที่

Christ and Abriola (2007) ได้ศึกษาการพัฒนาของ Multiphase ของแบบจำลองที่จะใช้ลดปริมาณของ Chlorinated-DNAPL ณ แหล่งกำเนิด และใช้แบบจำลองใน

การสำรวจ Bioenhanced Dissolution พบว่าการละลายของคลอไรด์ (Chlorinated) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 - 1.9 และแบบจำลองให้ผลของการทำนายการลดลงของสารปนเปื้อนมีค่าใกล้เคียงจากค่าจริงประมาณ 70 %

Brusseau et al. (2006) ได้ศึกษาลักษณะของแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน (Source Zone) และประสิทธิภาพของการวิวัฒนาการของแหล่งกำเนิด NAPL ในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดสอบการบำบัดด้วยวิธี Mass Flux ผลที่ได้สามารถลดความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด (Source Zone) ได้ถึง 90 % และได้ใช้แบบจำลอง Plume-Scale ในการจำลองการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา

Chan and Govindaraju (2006) ได้ศึกษาและพัฒนาการทำนายแบบจำลองที่จะใช้ทำนายการลดลงของการตกค้าง ณ แหล่งกำเนิด NAPL และการประมาณปริมาณสารปนเปื้อนที่ผ่านมาใน Control Plan (CP) ซึ่งจะต้องพิจารณาองค์ประกอบหลายๆด้านซึ่งความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินจะมีผลต่อการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน อย่างไรก็ตามการบำรุงรักษาในสถานที่นี้เหมาะกับการใช้ Mass Flux ในการบำบัดและฟื้นฟู

การศึกษาลักษณะแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนในต่างประเทศ ได้ศึกษากันอย่างแพร่หลายในการที่จะหาลักษณะการกระจายตัวที่แน่ชัดแต่ก็ยังไม่สามารถระบุรูปร่างลักษณะการกระจายได้อย่างแน่ชัด เนื่องจากใช้การประมาณจากการบำบัดและเน้นผลของการเลือกวิธีที่จะบำบัดและฟื้นฟูแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน

1.4.2.2 การศึกษาทางด้านธรณีสถิติ

มีผู้ทำการศึกษาถึงธรณีสถิติมี โดยผู้ทำการศึกษาได้แก่

Macqueen, J.B. (1967) ได้อธิบายกระบวนการแบ่งกลุ่มของประชากรหรือตัวอย่างขนาด N ให้อยู่ในรูป K กลุ่ม ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของความลำเอียงของข้อมูลซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า KMEANS ซึ่งใช้เหตุผลของความสัมพันธ์ของการแบ่งกลุ่มจากความแปรปรวน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งกลุ่มใช้ได้ดีกับจำนวนตัวอย่างเยอะๆ สามารถประยุกต์กับตัวอย่างที่ไม่ใช่เชิงเส้นและแบบไม่มีพารามิเตอร์

Schad and Teutsch (1995) ได้อธิบายถึงวิธีทางธรณีสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวอย่างที่เก็บมาจาก Core Sample กับค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากการกระจายตัวของดิน Grain Size Distribution โดยเปรียบเทียบ 3 วิธี 1.จากการกระจายตัวของเม็ดดินโดยตรง 2.จากการจับเป็นคู่ๆของตำแหน่งที่ใกล้กัน 3. จากการแบ่งกลุ่มเพื่อเป็นตัวแทนของ KMEANS โดยใช้สมการ Kozeny-Carman

Goovearts (1999) ได้ศึกษาโดยใช้ธรณีสถิติ เพื่อประมาณค่าคุณลักษณะ

ทางชีววิทยาทางเคมีและทางกายภาพของดินในพื้นที่ที่ไม่มีการเก็บตัวอย่าง โดยวิธี Kriging Interpolate คุณภาพของแบบจำลองที่ดีต้องมีความถูกต้องและความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์ พบว่า Multi-Gaussian Kriging ให้ผลที่ดีกว่าวิธี Indicator Kriging สำหรับข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแบบจำลองการไหล Sequential Indicator Simulation (SIS) จะให้ผลที่ดีกว่าวิธีของ Sequential Gaussian Simulation (SGS) เนื่องจากพิจารณาผลของความสัมพันธ์ของค่าที่เกิดความผิดพลาด เข้ามาพิจารณาในแบบจำลอง

Goovearts (2000) ได้ศึกษาการประมาณหรือจำลองคุณลักษณะของดินโดยใช้หลักการที่เหมาะสม (Optimization) ซึ่งจะเหมือนกับการกระจายตัวของฮีสโตแกรม และเซมิแวริโอแกรม ซึ่งผลของการทำนายความสัมพันธ์ของพื้นที่กับภูมิภาคในเทอมของค่าเฉลี่ยที่ผิดพลาด (MSE) รวมทั้งตัวแปรต่างๆให้ผลความผิดพลาดที่น้อยกว่าและให้แบบจำลองของแผนที่ศึกษามีความคล้ายคลึงกับพื้นที่ศึกษาจริง ด้วยข้อจำกัดระหว่างพารามิเตอร์ของฮีสโตแกรมและเซมิแวริโอแกรม

Patriarche et al. (2005) ได้ศึกษาเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จากสนาม เปรียบเทียบกับการใช้ธรณีสถิติประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ซึ่งผลชี้ให้เห็นว่าในระดับพื้นที่เล็กการใช้วิธี Kriging มีค่าเฉลี่ยคงที่ ให้ความเหมาะสมที่สุด แต่ในทางกลับกันในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ควรจะให้ Cokriging และจะทำให้ค่าที่เบี่ยงเบนจะสร้างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ให้เกิดรูปแบบที่ไม่เป็นจริง

Goovearts, P. et al. (2005) ได้ศึกษาถึงรูปแบบความแปรปรวนความเข้มข้นของ Arsenic ในน้ำใต้ดินที่ ตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐมิชิแกน โดยการเก็บข้อมูลจากบ่อบาดาลและลักษณะทางเคมีของน้ำใต้ดิน ซึ่งให้ลักษณะการกระจายตัวและค่าผิดพลาดที่เกิดจากการจำลองด้วยวิธี Kriging ประมาณ 5.6 mg/L ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน 10 mg/L ซึ่งค่าที่ได้อาจเกิดจากการที่มีจำนวนตัวอย่างอยู่จำกัดในการทำนายความเข้มข้นในพื้นที่ศึกษา

Kerry and Oliver (2007) ได้ศึกษาการจัดโครงสร้างของดินที่แตกต่างกันโดยใช้ธรณีสถิติ (Geostatistics) และได้ชี้แนะถึงเรื่องการจัดระเบียบการกระจายของโครงสร้างดินให้ถูกที่สุดในเมื่อมีที่สังเกตการณ์จำกัด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของแวริโอแกรมเหมาะสมกับวิธีของ Kriging ซึ่งผลของการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของการเลือกกระบวนการทางธรณีสถิติในการทำนายความไม่แน่นอนที่เกิดจากธรรมชาติ

การศึกษาด้านธรณีสถิติแสดงให้เห็นผลของการใช้ Kriging ในการประมาณพารามิเตอร์ที่ไม่มีการสำรวจได้ผลมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงดังนั้นวิธีธรณีสถิติ จึงเหมาะแก่การ

ทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้ในพื้นที่ศึกษาทั้งวิธี SGS และ SIS ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการจำลองสภาพของแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน

1.4.2.3 การศึกษาทางด้านมัลติสเตจเบส์เซียน

มีผู้ทำการศึกษาด้านมัลติสเตจเบส์เซียนโดยมีผู้ทำการศึกษาได้แก่

Likhitruangsilp and Ioannou (2005) ได้ศึกษาโปรแกรมที่ช่วยในการสำรวจความไม่แน่นอนทางธรณีภายใต้โครงสร้างใต้ดิน การพัฒนาเพื่อหาความเหมาะสมเนื่องจากมีความเสี่ยงหลายๆด้าน เช่น เศรษฐศาสตร์และความเสี่ยง เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้แสดงวิธีการในการสำรวจโครงสร้างภายใต้ชั้นดินโดยใช้วิธีการทำนายของโปรแกรมแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะแสดงเห็นภาพการประยุกต์การสำรวจเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากโครงสร้างใต้ดิน ผลการทดสอบการทำนายทางธรณีวิเคราะห์โดยทฤษฎีของเบส์การวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ได้พัฒนาทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยมีพื้นฐานกับค่าของข้อมูลที่สำรวจ เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากการสำรวจการอธิบายทฤษฎีสามารถประยุกต์ในด้านเศรษฐศาสตร์และนำไปใช้ในการตัดสินใจวางแผนขั้นตอนการสำรวจเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และการวางแผนก่อสร้างอุโมงค์

Harrison (2006) ได้ศึกษาการพัฒนาโปรแกรมเบส์เซียนภายใต้ความไม่แน่นอนโดยใช้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดในแต่ละเหตุการณ์เข้ามาช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งการประเมินในครั้งแรกจะให้ผลที่มีความผิดพลาดมากของค่า BOD หลังจากประยุกต์ใช้โปรแกรมจะให้ผลการกระจายของ BOD เป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) สามารถประมาณได้จากค่ากลาง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากจุดตรวจสอบ (Check Point)

Harrison (2006) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนและเหมือนจริงโดยใช้ Two-Stage Bayesian เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำใน Athabasca River, Alberta ประเทศ Canada ซึ่งเป็นกระบวนการตัดสินใจที่จะได้เห็นภาพของปัญหาอย่างแท้จริง จะให้ผลความเชื่อมั่นประมาณ 50 % ของข้อมูลที่มีอยู่ และจะให้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นเมื่อมีแบบจำลองและข้อมูลที่มากขึ้น

1.4.2.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM

มีผู้ทำการศึกษาด้านการใช้โปแกรม UTCHEM โดยผู้ทำการศึกษาได้แก่

Zaluski, M.H., Consort, J.J. และ Antonioli, S.B. (2003) ได้ศึกษาถึงการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอธิลีนในน้ำใต้ดิน ซึ่งสารไตรคลอโรเอธิลีนเป็นสารจำพวกหนึ่งของสารจำพวกสารอินทรีย์ระเหยด้วยแบบจำลอง UTCHEM โดยการใช้วิธีสูบน้ำ ที่ระดับความลึก 150 ฟุต พื้นที่ศึกษาอยู่ในฟลอริด้า จากการศึกษาพบว่าหากใช้บ่อสูบ 2 จุด ต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ปี จะสามารถเคลื่อนย้ายสารไตรคลอโรเอธิลีนได้ 53 เปอร์เซ็นต์ หากใช้เวลา 27 ปี จะ

สามารถเคลื่อนย้ายสารไตรคลอโรเอธิลีนได้ 77 เปอร์เซ็นต์และหากใช้เวลา 50 ปี จะสามารถเคลื่อนย้ายสารไตรคลอโรเอธิลีนได้ 85 เปอร์เซ็นต์ (18,240 กิโลกรัม) เช่นเดียวกันกับการใช้บ่อสูบเพียง 1 บ่อ เมื่อสูบต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ปี จะสามารถย้ายสารไตรคลอโรเอธิลีน ได้ถึง 92.2 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นสารไตรคลอโรเอธิลีนที่ยังเหลืออยู่ก็ยังมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มถึง 263 เท่า

Schaerlaekens, J. et al. (2006) ได้ศึกษาถึงทางเลือกในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนจำพวก DNAPL ในน้ำใต้ดิน โดยการใช้แบบจำลอง UTCHEM ด้วยวิธีการใช้สารลดแรงตึงผิวในการฟื้นฟูสภาพชั้นน้ำ Surfactant–Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) โดยทางคณะวิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจากภาคสนาม เพื่อนำข้อมูลในสนามที่ได้ นำมาเป็นค่าตัวแปรและนำมาปรับเทียบกับแบบจำลอง UTCHEM เมื่อสอบเทียบได้แล้ว จะแบ่งแนวทางการศึกษาหลายแนวทาง และคิดค่าใช้จ่ายในแต่ละแนวทาง เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาแนวทางเลือกต่อไป

1.4.2.5 กระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ

Chan (1979) ได้ศึกษาการทำนายความน่าจะเป็นทางธรณีเพื่อใช้ในการขุดอุโมงค์โดยใช้หลักการพื้นฐานของกระบวนการมาร์คอฟ จากการแจกแจงความน่าจะเป็นของพารามิเตอร์ต่างๆทางธรณีและการจำแนกคุณลักษณะของพื้นที่ เช่น ชนิดหิน เป็นต้น โดยการออกแบบการทำนายความน่าจะเป็นจะพิจารณาทิศทางตามความยาวของอุโมงค์ โดยก่อนการก่อสร้างอุโมงค์จะต้องพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็น และความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็น ของการทำนายแบบจำลอง ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นพื้นฐานของกระบวนการมาร์คอฟ จากการศึกษานี้ใช้ในการทำนายตำแหน่งต่างๆโดยอาศัยจากข้อมูลที่มีอยู่ก่อนหน้าและจากผู้เชี่ยวชาญในการตัดสินใจ ซึ่งผลที่ได้จะออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็นที่สามารถอธิบายลักษณะทางธรณีตามความยาวของอุโมงค์ และสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบการขุดอุโมงค์และสามารถพัฒนาค่าความเชื่อมั่นในขณะทำการก่อสร้าง

Ioannou (1987) ได้ศึกษาถึงความไม่แน่นอนทางธรณี ที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ที่จะส่งผลต่อการออกแบบและราคาในการขุดสำรวจลักษณะทางธรณี บทความนี้ได้แสดงถึงแบบจำลองความน่าจะเป็นที่ใช้ทำนายลักษณะการขุดอุโมงค์ เพื่อที่จะนำไปพัฒนาและการออกแบบในการตัดสินใจ ภายใต้เงื่อนไขความไม่แน่นอนทางธรณีเช่น ชั้นหินความน่าจะเป็นร่วม เป็นต้น ซึ่งการทำนายให้หลักการของลูกโซ่มาร์คอฟ ภายใต้เงื่อนไข Space-Continuous และ State – Discrete ซึ่งระดับความน่าจะเป็นในแต่ละตัวแปรทางธรณีโดยเริ่มจากพื้นฐานข้อมูลที่มีอยู่ก่อนหน้านี้และพัฒนาความน่าจะเป็นที่ตำแหน่งต่าง ตามโอกาสที่จะเป็นไปได้

โดยมีการสังเกตแบบนันดีเทอร์มินิสติก ซึ่งผลที่ได้จากการปรับปรุงลักษณะของชั้นดินจะนำไปใช้ในการออกแบบการสำรวจและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการก่อสร้างอุโมงค์

1.5 แนวทางการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหย ผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. ศึกษาลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความพรุนและขนาดเม็ดดินโดยแบบจำลองทางธรณีสถิติ (Geostatistical Model) 2. ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุนภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (UTCHEM) 3. จำลองลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนเชิงพื้นที่ด้วยทฤษฎีมัลติสเตจเบส์เซียน โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความพรุนและขนาดเม็ดดิน โดยแบบจำลองทางธรณีสถิติ (Geostatistical Model)

1.5.1.1 ศึกษาข้อมูลดิน กำหนดวิธีการจำแนกดิน ชนิดของดิน ทฤษฎีที่เกี่ยวกับธรณีสถิติ ที่ใช้ศึกษาในแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.5.1.2 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อประยุกต์ใช้องค์ความรู้ต่างๆที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้

1.5.1.3 กำหนดจำนวนข้อมูลเชิงพื้นที่ ที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้า (Input) ที่ใช้ในแบบจำลอง

1.5.1.4 พัฒนาข้อมูลของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจริงโดยใช้แบบจำลองทางธรณีสถิติ (Geostatistical Model)

1.5.1.5 จำลอง Realizations ด้วยวิธีธรณีสถิติ เพื่อจำลองลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน

1.5.2 ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยผ่านตัวกลางรูพรุน ภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (UTCHEM)

1.5.2.1 กำหนดลักษณะขอบเขต เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กำหนดคุณสมบัติต่างๆของสารปนเปื้อน

1.5.2.2 จำลองลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ เพื่อเป็นตัวแทนสารปนเปื้อน DNAPL ในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินจาก Realizations ที่พัฒนาในข้อ (1.5.1.5) โดยใช้โปรแกรม UTCHEM

1.5.3 จำลองการกระจายตัวของสารปนเปื้อนเชิงพื้นที่ด้วยทฤษฎีมัลติสเตจเบส์เซียน

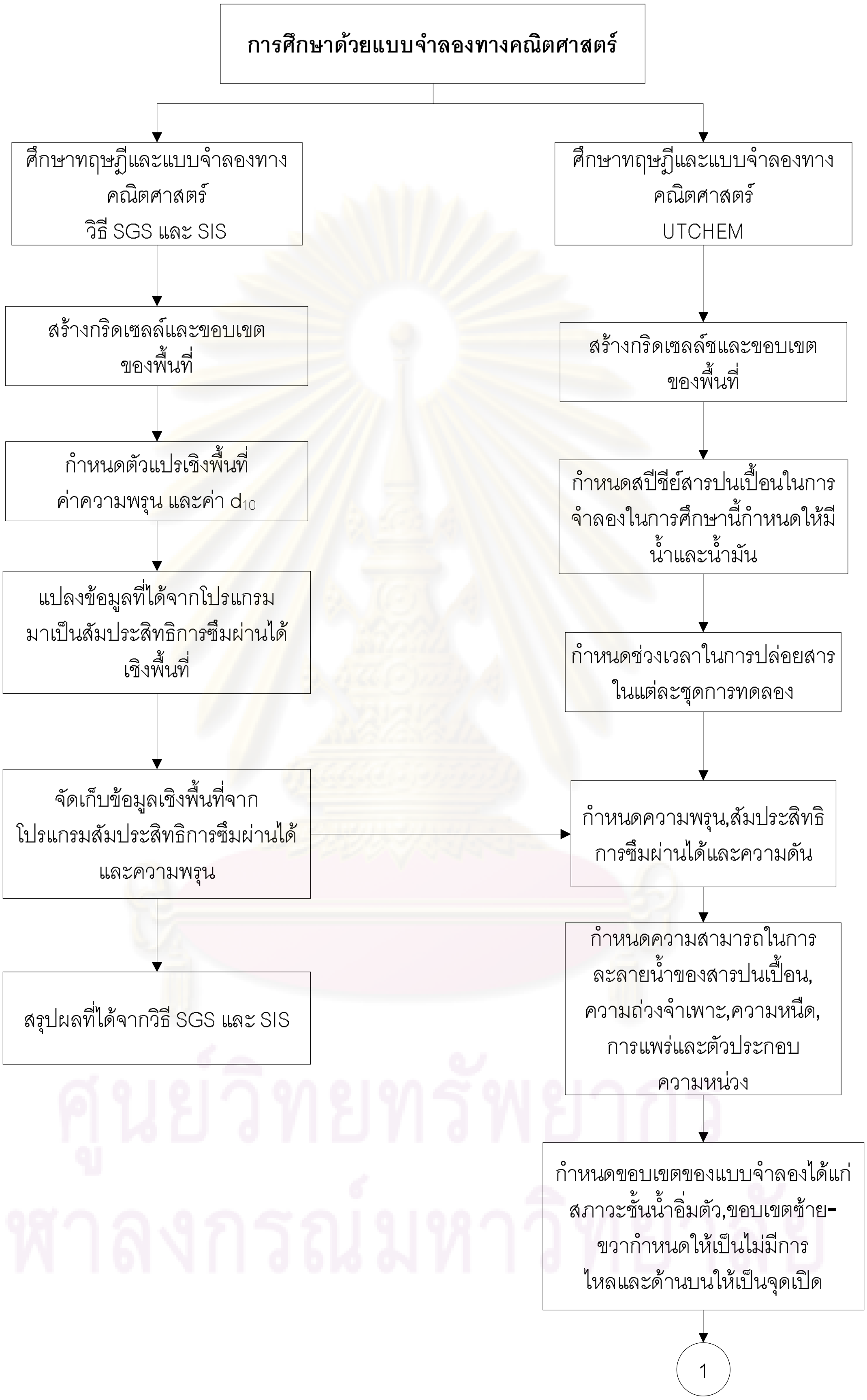
1.5.3.1 พัฒนาทดสอบและประเมินเทคนิคการเก็บตัวอย่าง แบบของมัลติสเตจเบส์เซียน (Multistage Bayesian) ในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินบริเวณแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน (Source Zone)

1.5.3.2 วิเคราะห์ผลการจำลองด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์เทียบกับการพัฒนาการจำลองเชิงพื้นที่

1.5.3.3 สรุปผลการศึกษาและเสนอข้อเสนอแนะ

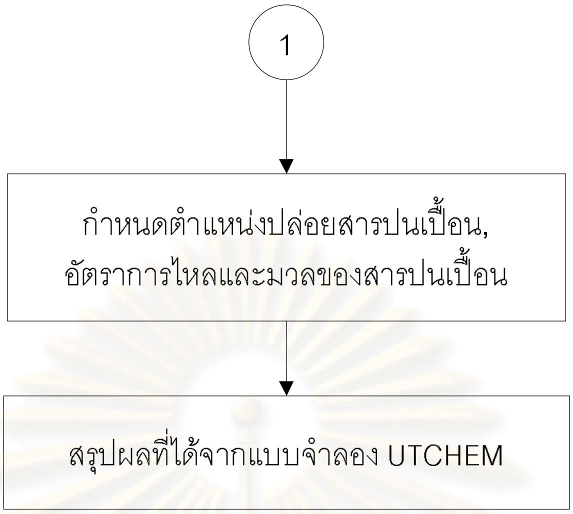
ขั้นตอนการศึกษาเขียนในรูปของผังการทำงานสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K) เชิงพื้นที่และนำไปใช้ต่อในขั้นตอนของการจำลองปล่อยสารปนเปื้อนในโปรแกรม UTCHEM ซึ่งในส่วนของมัลติสเตจเบส์เซียนใช้การกระจายตัวของสารปนเปื้อนในขั้นตอนที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบจำนวนหลุมสำรวจดังรูปที่ 1-2 และ 1-3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



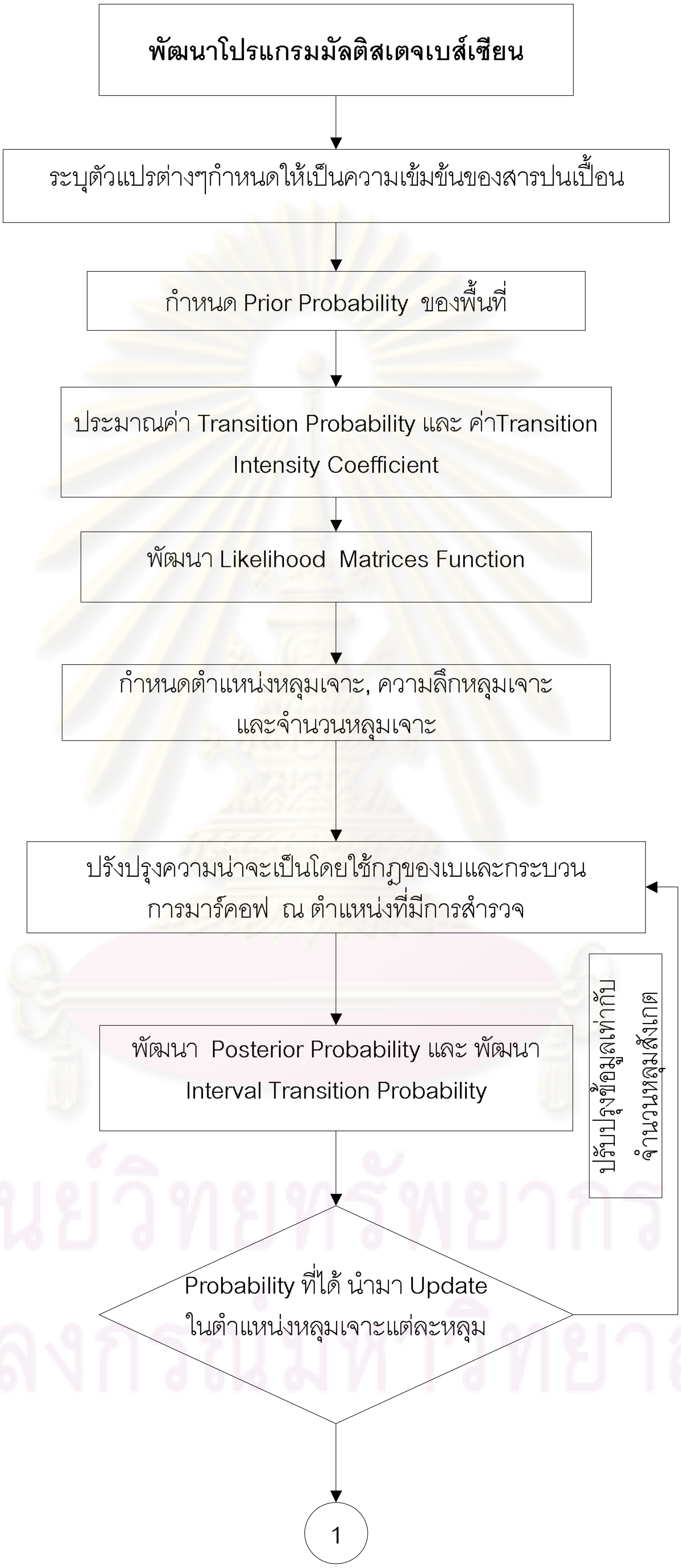
รูปที่ 1-2 ขั้นตอนการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-2 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



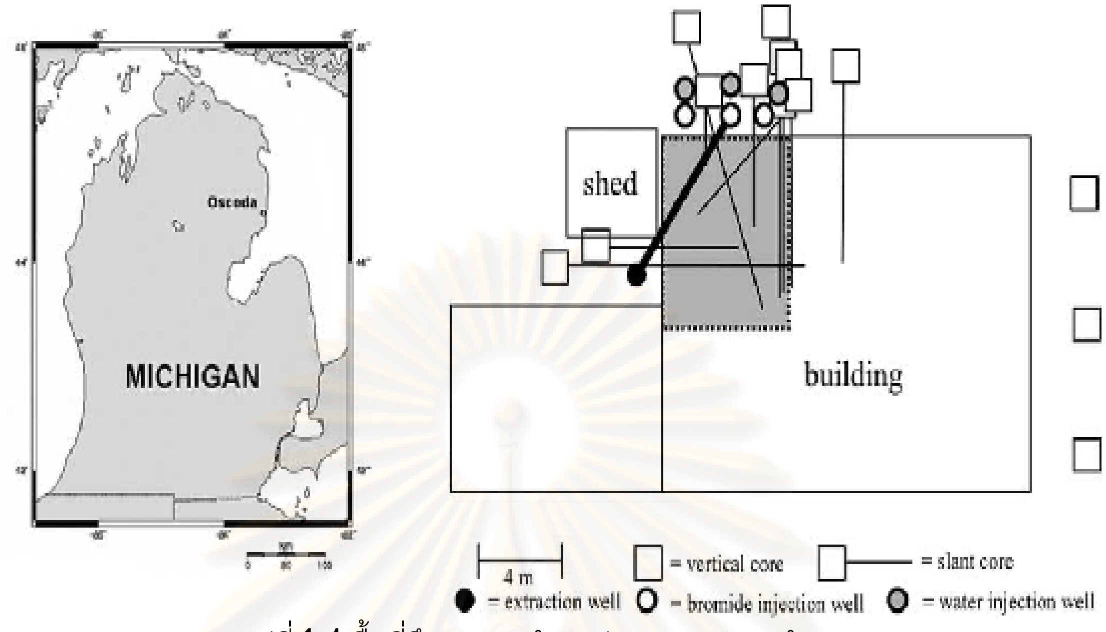
รูปที่ 1-3 ขั้นตอนการศึกษา

รูปที่ 1-3 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

1.6 พื้นที่ศึกษา

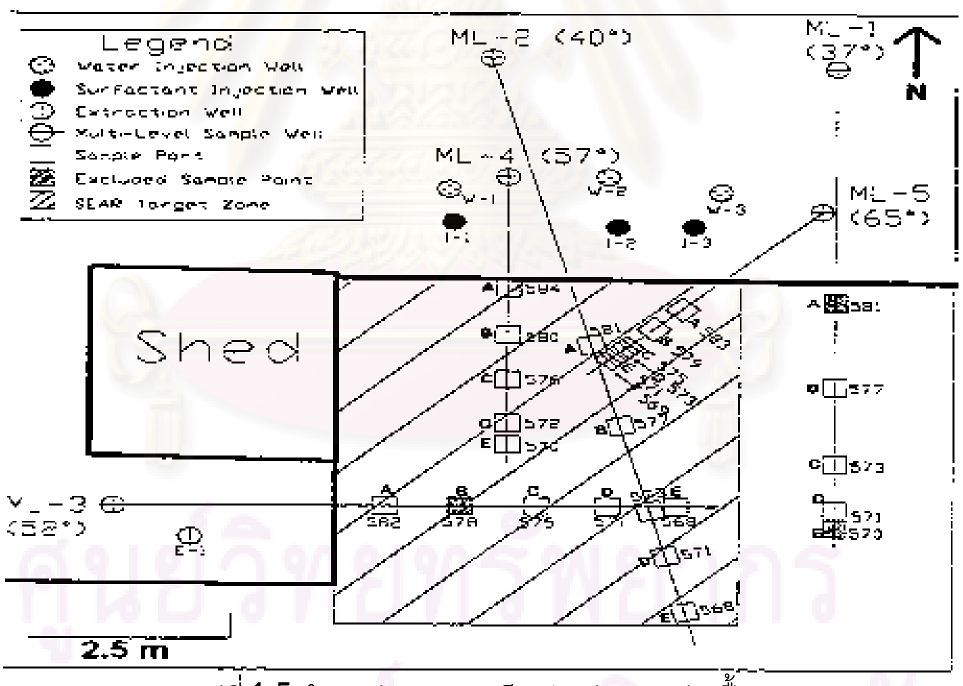
พื้นที่ศึกษาที่นำมาทดสอบลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนตั้งอยู่ที่เมือง คอสโค-`ดาร์ รัฐมิชิแกน ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งลักษณะชั้นน้ำเป็นแบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกันของทรายและวางตัวด้วยชั้นดินเหนียวที่ความลึกประมาณ 8 เมตรและมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 2.30 เมตร ถึง 3 เมตร ข้อมูลชั้นน้ำได้มาจากการสำรวจแล้วเก็บข้อมูลในพื้นที่สงสัยว่าเกิดการรั่วซึมของแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนประเภท Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPL) ซึ่งเกิดจากการรั่วซึมของถังเก็บสารปนเปื้อนรั่วภายใต้อาคารที่ได้ตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนด้วยวิธี Surfactants - Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) (Drummond et al., 2000; Abriola et al., 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-4 พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งของหลุมเจาะสำรวจ

ที่มา : Lemke and Abriola (2003)



รูปที่ 1-5 ตำแหน่งของการเก็บตัวอย่างสารปนเปื้อน

ที่มา : Lemke and Abriola (2003)

การกระจายตัวของเม็ดดินมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 167 ตัวอย่างโดยการเก็บทีละช่วงช่วงละ 15 – 30 เซนติเมตร จากทั้งหมด 12 หลุมที่มีการสำรวจในพื้นที่ (ภาคผนวก ก) (Lemke et. al.,

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2003) ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K) จากค่าการกระจายตัวของเม็ดดินและความพรุนดังสมการที่ 1-1

$$K = \frac{r_w g}{m_w}\left[\frac{d_m{}^2}{180}\frac{f^3}{(1-f)^2}\right] \tag{1-1}$$

K คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) (LT^{--1})

r_w คือความหนาแน่นของน้ำ (Density: MV^{-1})

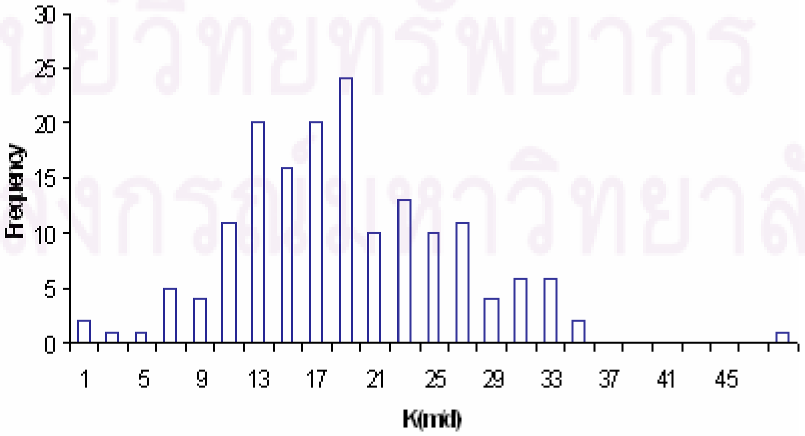
g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force: LT^{-2})

m_w คือความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ $15^{o}\ c$ (Viscosity: cp)

d_m คือขนาดคละเฉลี่ยของตัวกลางรูพรุน (L)

f คือความพรุนของตัวกลางรูพรุน

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนั้นทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ จากตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง โดยกำหนดค่าความพรุนมีค่าเท่ากับ 0.36 และใช้ค่า d_{10} เป็นตัวแทนของ d_m แต่ละตัวอย่าง (ภาคผนวก ก) เนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าจริงในสนาม การกระจายตัวของเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ที่สุด มีขนาด 850 mm ซึ่งจะลดผลของการเกี่ยวกันกับเศษส่วนของตัวแทนเพียง 10 เปอร์เซ็นของตัวอย่าง ถึงแม้ว่าความต่อเนื่องของตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา มีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันจากทรายหยาบจนถึงทรายละเอียด ซึ่งการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าเท่ากับ 16.6 เมตร/วัน มีความแปรปรวนจากการเปลี่ยนเป็นลอกกาลิทึมได้ค่า 0.29 ซึ่งตรงกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Woodbury and Sudicky (1991)



รูปที่ 1-6 ฮีสโตแกรมของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการจำลองชั้นดิน

2.1.1 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)

ในปี ค.ศ.1856 เฮนรี่ ดาร์ซี (Henry Darcy) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านตัวกลางรูพรุน (Porous Media) โดยทำการทดลองในชั้นทราย และได้รายงานผลการศึกษาพบว่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุนจะแปรผันตรงกับความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ปริมาณการไหลของน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic Conductivity, K) ของวัสดุนั้น

$$V = -K\frac{\Delta h}{\Delta l} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่

V คือความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน (LT^{-1})

K คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) (LT^{--1})

Δh คือความแตกต่างของระดับน้ำ หรือ Piezometric Head (L)

Δl คือระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยการไหล (L)

จากสมการของดาร์ซี สามารถพัฒนาเพื่ออธิบายการไหลของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ ผ่านตัวกลางรูพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Porous Media) ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) และเป็นการไหลที่ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropy) ดังสมการพาเชียลดิฟเฟเรนท์ 2-2

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2\text{-}2)$$

K_{XX} , K_{YY} , K_{ZZ} เป็นค่าของ hydraulic conductivity ตามแนวแกน X, Y และ Z ซึ่งถูกสมมุติให้ขนานกับแกนหลักของ Hydraulic Conductivity (LT^{-1})

h คือค่า ระดับความดัน Potentiometric Head, (LT^{-1})

W คือค่า Volumetric Flux ต่อหน่วยปริมาตรทั้งจุดให้น้ำและสูบน้ำ (T^{-1})

S_S คือค่า Specific Storage ของวัสดุรูพรุน (L^{-1})

t คือค่า เวลา (T)

2.1.2 คุณสมบัติของดิน

ในการศึกษาคุณสมบัติของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน รวมถึงการจำแนกลักษณะการกระจายของสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ต้องทราบคุณสมบัติของดิน เนื่องจากคุณสมบัติดินมีผลต่อการซึมและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำบาดาล คุณสมบัติต่างๆของดินประกอบด้วย

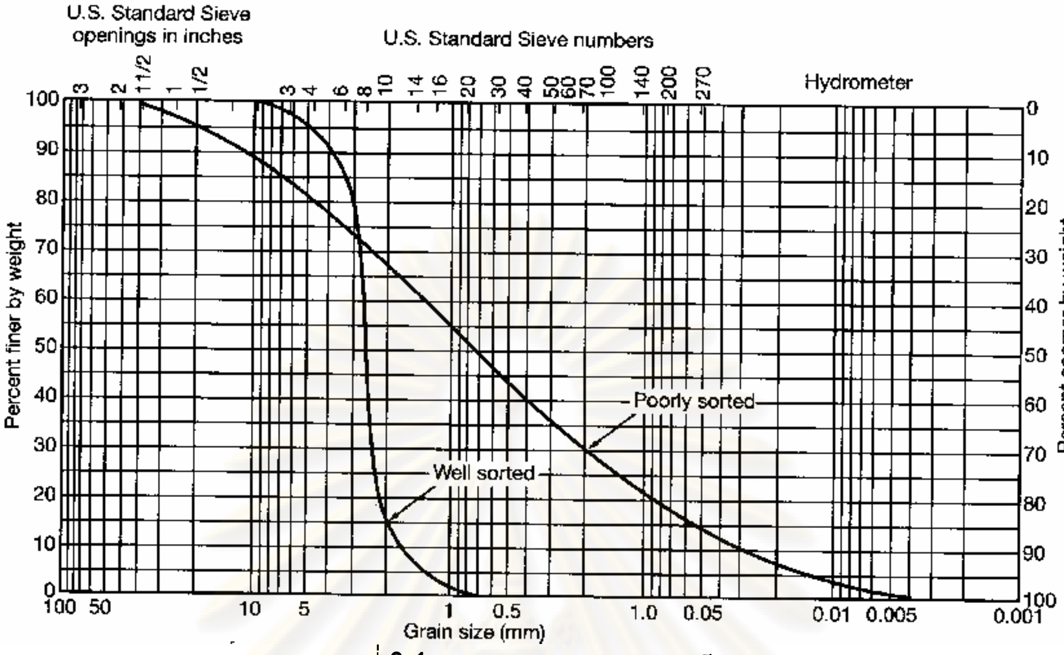
- Grain Size Distribution
- Porosity (f)
- Hydraulic Conductivity (K) และ Permeability (k)
- Air Entry Pressure (P_b)
- Pore Size Distribution (l)

ซึ่งคุณสมบัติของดินเหล่านี้สามารถคำนวณได้จาก Grain Size Distribution ทั้งสิ้นไปโดยการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังจะได้อธิบายต่อไป

2.1.2.1 การกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution)

การกระจายของขนาดเม็ดดินมักแสดงด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดในสเกลลอกการิทึม (Logarithmic Scale) และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่าที่ระบุ (Percent Finer) เรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดเม็ดดิน (Grain Size Distribution Curve) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นตัว S (หรือ S กลับทาง) สั้นเกือบตั้งตรง ถ้ามีขนาดสม่ำเสมอ (Poorly Graded หรือ Well Sorted) ส่วนโค้งที่มีลักษณะเป็นชั้นๆจะเป็นดินที่เรียกว่าขนาดขาดช่วง (Gap Graded) ดังแสดงในรูปที่ 2-1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-1 กราฟการกระจายของเม็ดดิน

ที่มา : U.S. Army Military Soils Engineering (1997)

จากกราฟการกระจายของขนาดเม็ดดินจะให้ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ปริมาณชนิดของดิน
2. ลักษณะการกระจายของเม็ดดิน
3. ขนาดใหญ่ที่สุด ของเม็ดดิน

2.1.2.2 **ความพรุน** (Porosity, f)

ช่องว่างของหินหรือดินในชั้นอุ้มน้ำหลายๆช่องว่างรวมกันอย่างต่อเนื่องจะทำหน้าที่คล้ายท่อเก็บกักและน้ำใต้ดิน โดยปริมาณกักเก็บและการไหลของน้ำใต้ดินจะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่าง รูปร่าง และการกระจายตัวของช่องว่างในชั้นอุ้มน้ำนั้นๆ ความพรุนของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ได้มาจากเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด ถ้าให้ f เป็น Porosity จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2-3 ถึง 2-5

$$n = \frac{V_V}{V_T} \qquad (2\text{-}3)$$

โดยที่

n คือ ความพรุน

V_v คือ ปริมาตรของช่องว่างในตัวกลางรูพรุน

V_T คือ ปริมาตรรวมของตัวกลางรูพรุน

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$n=\frac{V_{void}}{V_{total}}\times 100=(\frac{V_{water}}{V_{water}+V_{soil}})\times 100 \quad \text{Saturated} \quad (2\text{-}4)$$

$$n=\frac{V_{void}}{V_{total}}\times 100=(\frac{V_{water}+V_{air}}{V_{water}+V_{soil}+V_{air}})\times 100 \quad \text{Unsaturated} \quad (2\text{-}5)$$

เมื่อ V_{void} คือ ปริมาตรของน้ำที่ใช้บรรจุเต็มช่องว่างทั้งหมด จนทำให้ดินหรือหินอิ่มตัวด้วยน้ำ

V_{total} คือ ปริมาตรทั้งหมดของหินหรือดินตัวอย่าง

ดินแต่ละประเภทมีค่าความพรุนแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความพรุนของดินแต่ละชนิด

Material	Porosity (%)
SEDIMENTARY	
Gravel, coarse	24 - 36
Gravel, fine	25 - 38
Sand, coarse	31 - 46
Sand, fine	26 - 53
Siltstone	34 - 61
Clay	34 - 60
SEDIMENTARY ROCKS	
Limestone, dolomite	0 - 20
Sandstone	5 - 30
Siltstone	21 - 41
Karst limestone	5 - 50
Shale	0 - 10
CRYSTALLINE ROCKS	
Fractured crystalline rocks	0 - 10
Dense crystalline rocks	0 - 5
Weathered granite	34 - 57
Weathered gabbro	42 - 45
Baslat	3 - 35

ที่มา : Domenico and Schwartz (1990)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity, *K*)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางรูพรุนหรือชั้นให้น้ำซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางรูพรุน เช่น ขนาดของเม็ดดินและจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของตัวกลางรูพรุนนั้นๆ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่นและความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลด้วยเช่นกัน ค่า Hydraulic Conductivity (K) ของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินสามารถหาได้จากการทดลอง โดยการนำตัวอย่างดินดินไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ อีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของชั้นน้ำใต้ดินคือการคำนวณจากสมการของ Kozeny-Carman (K-C) Equation (Bear, 1972) ดังสมการสมการ 2-6

$$K = \frac{r_w g}{m_w}\left[\frac{d_m{}^2}{180}\frac{f^3}{(1-f)^2}\right] \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity) (LT^{--1})

r_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (Density: MV^{-1})

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Acceleration: LT^{-2})

m_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำ (Dynamic Viscosity: cp)

d_m คือ ขนาดคละเฉลี่ยของตัวกลางรูพรุน (L)

f คือ ความพรุนของตัวกลางรูพรุน

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

2.1.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissivity, *T*)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเป็นค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้มากในศาสตร์ด้านน้ำใต้ดิน หมายถึงปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยความกว้างของชั้นหินอุ้มน้ำที่มีค่าความลาดชันชลศาสตร์หนึ่งหน่วยต่อเวลา ดังสมการ 2-7

$$K = \frac{T}{b} \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่

T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Transmissibility: T , L^2T^{-1})

b คือ ความหนาของชั้นน้ำแบบปิด (L)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ในดินแต่ละชนิด

Material	Hydraulic Conductivity (m/s)
SEDIMENTARY	
Gravel	4×10^{-4} - 3×10^{-2}
Coarse sand	9×10^{-7} - 6×10^{-3}
Medium dand	9×10^{-7} - 5×10^{-4}
Fine sand	2×10^{-7} - 2×10^{-4}
Silt, loess	1×10^{-9} - 2×10^{-5}
Till	1×10^{-12} - 2×10^{-6}
Clay	1×10^{-11} - 4.7×10^{-9}
Unweathered marine clay	8×10^{-3} - 2×10^{-9}
SEDIMENTARY ROCKS	
Karst and reef limestone	1×10^{-6} - 2×10^{-2}
Limestone, dolomite	1×10^{-9} - 6×10^{-6}
Sandstone	3×10^{-10} - 6×10^{-6}
Siltstone	1×10^{-11} - 1.4×10^{-8}
Salt	1×10^{-12} - 1×10^{-10}
Anhydrite	4×10^{-13} - 2×10^{-8}
Shale	1×10^{-13} - 2×10^{-9}
CRYSTALLINE ROCKS	
Permeable basalt	4×10^{-7} - 2×10^{-2}
Fractured igneous and metamorphic rock	8×10^{-9} - 3×10^{-4}
Weathered granite	3.3×10^{-6} - 5.2×10^{-5}
Weathered gabbro	5.5×10^{-7} - 3.8×10^{-6}
Basalt	2×10^{-11} - 4.2×10^{-7}
Unfractured igneous and metamorphic rock	3×10^{-14} - 2×10^{-10}

ที่มา : Domenico and Schwartz (1990)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2.5 **ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้** (Permeability, *k*)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คือคุณสมบัติเฉพาะของหินหรือดินที่แสดงถึงความสามารถส่งผ่านของเหลวผ่านวัตถุพรุนนั้นๆ สามารถอธิบายสมการดังนี้

$$k = \frac{mK}{rg} \tag{2-8}$$

โดยที่

k คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability: L^2)

m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของเหลว (Dynamic Viscosity: cp)

r คือ ความหนาแน่นของเหลว (Density: MV^{-1})

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Acceleration: LT^{-2})

K คือ สัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic Conductivity: LT^{-1})

จากสมการ 2-8 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีหน่วยเป็น L^2 ซึ่งในพื้นที่ปกติค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนิยมใช้เป็นหน่วย $(mm)^2$ หรือเท่ากับ $10^{-12}m^2$

2.1.3 **ทฤษฎีธรณีสถิติ** (Geostatistics)

ธรณีสถิติได้เริ่มศึกษาโดย D.G. Krige (1951) และ G.Mahteron (1955) ซึ่งพยายามที่จะปรับปรุงการคำนวณปริมาณสำรองของแร่ทองคำในเหมืองให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ สืบเนื่องจากการคำนวณแบบโพลีกอน (Polygon) มักจะทำให้การประเมินสินแร่ทองคำสูงเกินจริงในบริเวณที่มีความสมบูรณ์ของแร่สูง และให้ค่าต่ำเกินจริงในบริเวณที่มีความสมบูรณ์ของแร่ต่ำ ต่อมาในปี 1971 G. Mahteron ได้พัฒนาวิชาธรณีสถิติต่อเนื่องโดยนำเสนอทฤษฎีตัวแปรภูมิภาค (Theory of Regionalized Variables) ซึ่งเป็นทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงขนาดและตำแหน่งในมิติของข้อมูลตัวอย่างที่เก็บมาด้วย โดยมีสมมุติฐานว่าค่าตัวแปรทางธรณีวิทยาจะถูกกำหนดด้วยตำแหน่งของตัวอย่างและขนาดหรือขอบเขตที่แต่ละตัวอย่างนั้นมีอิทธิพลต่อกัน

ธรณีสถิติอาศัยหลักการที่สังเกตตำแหน่งพื้นที่หรือช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งข้อมูลมี ความสัมพันธ์กันในรูปแบบของความเป็นไปได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายลักษณะความแปรปรวนตามธรรมชาติของข้อมูลในรูปแบบที่มีการกระจายตัวเชิงพื้นที่หรือเวลา โดยเฉพาะสำหรับข้อมูลบางชนิดที่มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งและมีระยะทางมาเกี่ยวข้อง เช่น ระดับความสูง

ชนิดของหิน คุณภาพของอากาศ ดินหรือน้ำ เป็นต้น เมื่อเก็บข้อมูลเหล่านี้มาสรุปภาพรวมเชิงสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์แล้ว อาจจะพบว่าวิธีพื้นฐานทางสถิติซึ่งไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่โดยทั่วไปจะไม่สมบูรณ์เพียงพอที่จะใช้อธิบายลักษณะของข้อมูลได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากข้อสมมุติพื้นฐานทางสถิติที่กำหนดว่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าถูกเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม และมีความเป็นอิสระต่อกัน แต่ทว่าในความเป็นจริงแล้วตัวแปรที่ยกตัวอย่างข้างต้นเกิดขึ้นในธรรมชาติและค่าตัวแปรจะมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กันโดยจะถูกควบคุมด้วยตำแหน่งพิกัด ส่วนให้การใช้ทฤษฎีทางสถิติทั่วไปจะไม่สามารถใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานอย่างเพียงพอ

การประเมินค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุดจะต้องขึ้นอยู่กับจำนวนของค่าที่สังเกต ตำแหน่งของการเก็บตัวอย่าง และการนำทฤษฎีตัวแปรภูมิภาคมาใช้ ทำให้สามารถประเมินระดับความต่อเนื่องของข้อมูลหรือกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ตำแหน่งต่างๆได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่คลอบคลุม ทำโดยวิธีพื้นฐานทางสถิติทั่วไปหรือแม้แต่การใช้วิธีการประมาณค่าแบบเทียบอัตราส่วน (Interpolation) หรือการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend Surface) ก็อาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ไม่มากก็น้อย โดยเฉพาะข้อมูลที่มีจำนวนค่าสังเกตน้อยเกินไปหรือตัวแปรที่มีความซับซ้อนทั้งกายภาพและคุณภาพอันเนื่องมาจากผลมาจากอิทธิพลของธรรมชาติ

การใช้หลักธรณีสถิติจึงมีประโยชน์และมีความสำคัญโดยเฉพาสำหรับระดับความต่อเนื่อง และการกระจายของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งพิกัดของข้อมูลและสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า “แวริโอแกรม” (Variogram) ซึ่งหมายถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีสมมุติฐานเชิงสถิติว่าคู่ของตัวอย่างใดๆ ที่อยู่ห่างเป็นระยะและทิศทางเท่ากันจะมีความแตกต่างของข้อมูลคงที่สม่ำเสมอในขอบเขตที่กำหนด ซึ่งการสำรวจอยู่พื้นฐานของธรณีสถิติ แต่ละตัวแปรจะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบของความไม่แน่นอนและผลกระทบเหล่านี้สามารถปรับปรุงค่าความไม่แน่นอนให้มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถยอมรับได้ โดยมีกฏเกณฑ์ที่นำมาใช้และมีการยอมรับมากที่สุดก็คือ คริกกิ้ง (Kriging) เนื่องจากวิธีทางคริกกิ้งนั้นจะทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่กระจายตัวมากนัก ดังนั้นจึงได้นำวิธีคริกกิ้งมาใช้ในการประมาณในแบบจำลองที่สามารถปรับความสัมพันธ์ร่วมกัน โดยการสร้างแบบจำลองทางธรณีสถิติเพื่อที่จะดูแผนที่ควบคุมความแปรปรวนของจุดต่างๆที่เกิดจากการสังเกตหรือตัวอย่างในภาคสนามจะถูกนำมาใช้กับแบบจำลอง โดยแบบจำลองทางธรณีสถิติจะให้ผลออกมา 2 ลักษณะคือ

1. ลักษณะของแผนที่ที่ได้จากการประมาณหรือการทำนายจะนำไปสู่ขั้นตอนการขุดสำรวจ

2. ตำแหน่งของความถี่ของการกระจายข้อมูลที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยง และกำหนดค่าในแบบจำลองทางด้านเศรษฐศาสตร์

วิธีธรณีสถิติทำให้เกิดกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการหาความไม่แน่นอน เนื่องจากความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลที่มีขอบเขตของค่าที่จะเป็นไปได้ของตัวแปรที่สนใจ นอกจากนี้แบบจำลองทางสถิติมีประโยชน์ที่จะสามารถทำนายความแปรปรวนของข้อมูลในพื้นที่ โดยจะให้ค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดในขอบเขตของการกระจายข้อมูลอย่างชัดเจน

2.1.3.1 **ทฤษฎีตัวแปรภูมิภาค** (Regionalized Variables)

ตัวแปรภูมิภาค (Regionalized Variables) คือตัวแปรที่มีค่าคงที่แน่นอนและมีความสัมพันธ์เชิงตำแหน่ง เช่น ระดับความลึกของน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างของตัวอย่างที่เก็บมาด้วย (G. Mahteron, 1971) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสให้นิยามตัวแปรภูมิภาคว่า “*ฟังก์ชันที่มีความแน่นอน ณ ตำแหน่งใดๆ แต่ค่าจะเปลี่ยนแปลงเมื่อตำแหน่งหรือพื้นที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความต่อเนื่องในรูปแบบที่ชัดเจน และสามารถใช้สถิติหรือคณิตศาสตร์ทั่วไปมาวัดหรืออธิบายความต่อเนื่องได้ เพราะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่มตามธรรมชาติ*”

2.1.3.2 **สมมุติฐานของตัวแปรภูมิภาค**

การศึกษาทางธรณีสถิติ มีสมมุติฐานว่าค่าของตัวแปรภูมิภาคสองตัวใดๆ อยู่ห่างกันเป็นระยะทางและทิศทางที่กำหนด จะมีความแตกต่างคงที่เสมอ (Stationary) หรือมีความแตกต่างกันแบบไม่คงที่ (Intrinsic) เฉพาะในขอบเขตพื้นที่ที่กำหนด แต่เมื่อพื้นที่ที่กำหนดกว้างขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Transition) ทางสถิติ

1. สมมุติฐานแบบค่าคงที่ (Stationary Hypothesis) คือการกำหนดให้ข้อมูลตัวอย่างถูกเก็บมาเป็นแบบสุ่มและเป็นอิสระจากรูปแบบแจกแจงชนิดอื่น เพราะการอธิบายตัวแปรทางสถิติจะต้องกำหนดรูปแบบให้ชัดเจน พร้อมทั้งมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนที่แน่นอน

2. สมมุติฐานแบบไม่คงที่ (Intrinsic Hypothesis) จะเป็นการกำหนดที่ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการแจกแจงของข้อมูล เมื่อมีขนาดของพื้นที่หรือขอบเขตขยายออกไปจากเดิม ดังนั้นข้อมูลตัวอย่างหนึ่งอาจอยู่ในกลุ่มของรูปแบบการแจกแจงได้มากกว่าหนึ่งแบบ ทำให้ค่าคาดหมาย (Expected Value) ของข้อมูลสามารถปรับเปลี่ยนได้เชิงพื้นที่ และเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถใช้ค่าเฉลี่ยในการอธิบายตัวแปรโดยจะใช้ค่าความเบี่ยงเบนหรือค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลได้

3. สมมุติฐานแบบกึ่งคงที่ (Quasi-Stationary) เป็นสมมุติฐานที่นำมาใช้ในธรณีสถิติโดยกำหนดว่าตัวแปรในขอบเขตพื้นที่ที่แน่นอนที่จะมีการกระจายตัวคงที่แบบหนึ่ง

เมื่อขอบเขตหรือพื้นที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าการกระจายตัวเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้ธรณีสถิติสนใจนำค่าความแปรปรวนของตัวแปรมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณมากกว่าค่าเฉลี่ย แต่จะเปลี่ยนรูปแบบจากความแปรปรวนมาเป็นความแตกต่างระหว่างข้อมูลหนึ่งคู่ที่อยู่ห่างกันด้วยระยะทางที่กำหนดให้ ค่าความแตกต่างนี้จะคงที่ที่ระยะห่างหนึ่ง แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถกำหนดฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการที่แน่นอน

2.1.3.3 **การประเมินค่าตัวแปรภูมิภาค**

1. ใช้ตำแหน่งที่อยู่ใกล้ที่สุด (Nearest Point) ในกรณีที่ค่าของข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงมากการใช้ค่าที่อยู่ใกล้ที่สุดจะทำให้การคำนวณสะดวกและรวดเร็วและมีความผิดพลาดน้อย

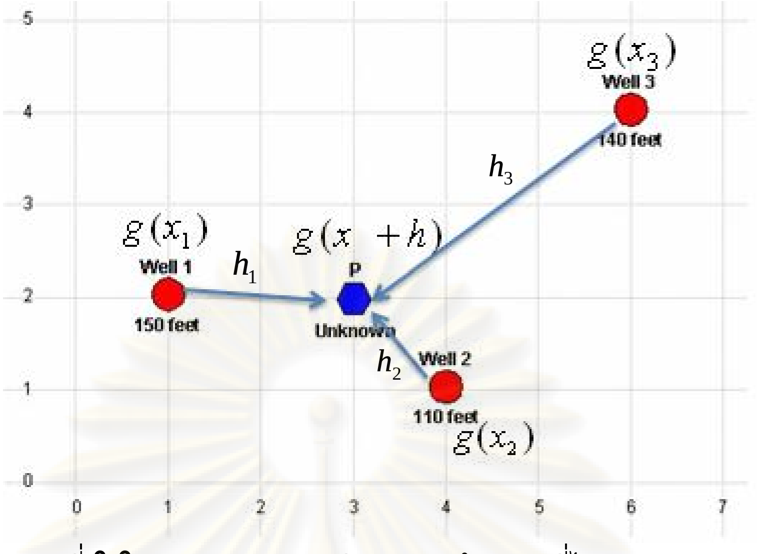
2. การเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Change) ในกรณีที่ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางและทิศทาง การประเมินจะต้องใช้ค่าสังเกตที่อยู่โดยรอบมาเปรียบเทียบ (Interpolate) ซึ่งจะให้อิทธิพลกับข้อมูลตัวอย่างที่อยู่ใกล้และนำค่าจากตำแหน่งอื่นเข้ามาช่วยคำนวณด้วย

3. การคาดคะเนอย่างมีเหตุผล (Best Guess) ตัวแปรที่เกิดขึ้นแบบสุ่มตามธรรมชาติจะมีสภาพแวดล้อมในการกำเนิดที่ซับซ้อน อาจต้องนำประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญมาใช้ในการคาดคะเนอย่างมีเหตุผล และสามารถนำมาใช้ร่วมกับการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความยืดหยุ่นเพียงพอ

2.1.3.4 **แวริโอแกรม** (variogram)

แวริโอแกรม (Variogram) หมายถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลในรูปกราฟฟิกเพื่อความต่อเนื่องของความแปรปรวนของข้อมูลกับระยะทางและทิศทาง ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการ 2-9

$$2g(h) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[g(x) - g(x+h)]^2 \qquad (2\text{-}9)$$



รูปที่ 2-2 ลักษณะการประเมินค่าของตำแหน่งที่ไม่ทราบค่า

ที่มา : Davis (1973)

โดยที่ x = ตำแหน่งใน 3 มิติของข้อมูลตัวแรก

$x+h$ = ตำแหน่งใน 3 มิติของข้อมูลตัวที่ 2 ซึ่งอยู่ห่างออกไปจากข้อมูล x เป็นระยะทางและทิศทางที่กำหนดด้วยเวกเตอร์ h

$g(x)$ = ค่าของตัวแปรที่ตำแหน่ง x (เช่น ค่าระดับน้ำบาดาล)

$g(x+h)$ = ค่าของตัวแปรที่ตำแหน่ง $x+h$

$g(h)$ = ฟังก์ชั่นแวริโอแกรม

n = จำนวนคู่ของ $g(x)$ และ $g(x+h)$ ที่อยู่ห่างกัน h

ดังนั้นแวริโอแกรมจึงหมายถึงค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างคู่ของข้อมูลที่อยู่ห่างกันเป็นเวคเตอร์ h และเมื่อแปรผันเวคเตอร์ไปโดยการเปลี่ยนแปลงระยะและทิศทาง จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $g(h)$ และ h ซึ่งนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ แวริโอแกรมจะมีค่าเป็นบวกเสมอและจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเวคเตอร์ h เป็นศูนย์

2.1.3.5 **ความสัมพันธ์ของแวริโอแกรม** (Variogram) **กับความแปรปรวนร่วม** (Covariance)

เนื่องจากแวริโอแกรมเป็นฟังก์ชันของความแปรปรวนของตัวแปรที่มีค่าเกี่ยวข้องกับตำแหน่งของข้อมูล จึงสามารถอธิบายความสัมพันธ์กันดังนี้

ความแปรปรวนร่วม (Covariance, $C(h)$)

$$C(h) = C[g(x), g(x+h)]$$

$$=\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x)-m_x][g(x+h)-m_{x+h}] \quad (2\text{-}10)$$

โดยที่ m_x คือ ค่าเฉลี่ยของ $g(x)$

m_{x+h} คือ ค่าเฉลี่ยของ $g(x+h)$

เมื่อ n มีจำนวนมากและใช้สมมุติฐานแบบค่าคงที่ (Stationary Hypothesis)

$$m_x \cong m \cong m_{x+h} \quad (2\text{-}11)$$

ถ้ากำหนดให้ $h=0$ จะได้ว่า

$$C(0)=\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x)-m]^2 \quad (2\text{-}12)$$

หรือ

$$C(0)=\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x+h)-m]^2 \quad (2\text{-}13)$$

จากสมการที่ (2-10) และ (2-11) จะได้

$$C(h)=\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x)-m][g(x+h)-m] \quad (2\text{-}14)$$

จาก $g(h)$ และสมการที่ (2-12), (2-13) และ (2-14) แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$2g(h)=\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x)-g(x+h)]^2$$

$$=\frac{1}{n}\sum_{n}\{[g(x)-m]-[g(x+h)-m]\}^2$$

$$=\frac{1}{n}\sum_{n}^{n}[g(x)-m]^2+\frac{1}{n}\sum_{n}[g(x+h)-m]^2$$

$$-\frac{2}{n}\sum_{n}[g(x)-m][g(x+h)-m]$$

$$2g(h)\cong C(0)+C(0)-2C(h)$$

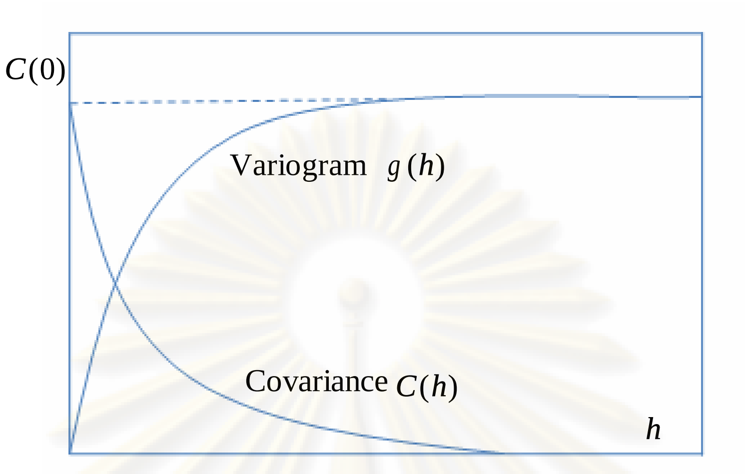
$$g(h)\cong C(0)-C(h) \quad (2\text{-}15)$$

สมการที่ (2-15) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแวริโอแกรมและความแปรปรวนร่วม ซึ่งเรียกว่า "Correlogram"

$$r(h)=\frac{C(h)}{C(0)}=1-\frac{g(h)}{C(0)} \quad (2\text{-}16)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแวริโอแกรม (Variogram) และความแปรปรวนร่วม(Covariance)

2.1.3.6 คุณสมบัติของแวริโอแกรม

จากการคำนวณแวริโอแกรมสามารถสรุปได้ว่าแวริโอแกรมคือค่าคาดหมายหรือ $E(g(x)-g(x-h))^2$ โดยที่ค่า x คือตำแหน่งต่างๆในขอบเขตที่กำหนด และ h เป็นเวคเตอร์ระยะทางที่คงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า h จะได้สมการหรือรูปแบบของแวริโอแกรมต่างๆซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของแวริโอแกรมดังนี้

1. แวริโอแกรมคือฟังก์ชั่นแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัวแปรที่เป็นข้อมูลชุดเดียวกันแต่จำแนกจากกันด้วยตำแหน่งในมิติที่พิจารณา ข้อมูลที่อยู่ใกล้กันจะมีความสัมพันธ์กันมากกว่าข้อมูลที่อยู่ห่างกันออกไป และเมื่ออยู่ห่างกันเกินระยะทางที่เรียกว่า “ระยะอิทธิพล” (Influence Range) จะทำให้ความสัมพันธ์น้อยลงหรือไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

2. ในบริเวณที่ใกล้จุดกำเนิดที่ $h=0$ ถือว่ามีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอของข้อมูลแต่เมื่อ h เข้าใกล้ระยะอิทธิพล (Influence Range) จะเกิดความเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ จนกระทั่งไม่มีความสัมพันธ์ โดยทั่วไปแล้วที่จุดกำเนิดอาจจะไม่มีความต่อเนื่องกันจะทำให้เกิดผลกระทบที่เรียกว่า “Nugget Effect” ซึ่งผลกระทบนี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในส่วนของตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกันหรือความไม่ต่อเนื่องของแวริโอแกรม โดยสาเหตุอาจเกิดจาก

2.1โครงสร้างเล็กๆหรือลักษณะทางธรณีที่มีช่วงสั้นมากกว่าช่วงของตัวอย่าง

2.2ช่วงของโครงสร้างที่สั้นกว่าการปรับแก้ค่าที่น้อยที่สุดของ

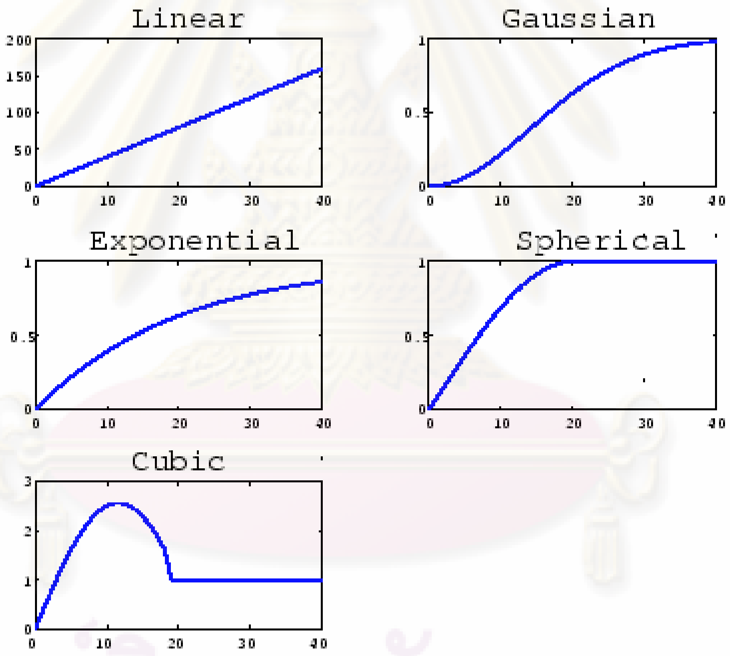
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่าง

2.3 กระบวนการวัดและการเก็บข้อมูลเกิดความผิดพลาด

3. เมื่อระยะ h มากกว่าระยะอิทธิพลแล้วข้อมูลจะไม่มีความสัมพันธ์กัน และถ้าข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ (Stationary) แวริโอแกรมจะมีค่าคงที่ใกล้เคียงกับค่าความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งเรียกว่า "ซิล" (Sill) ในบางกรณีที่แวริโอแกรมใกล้จุดกำเนิดด้วยการที่เพิ่มขึ้นของระดับซึ่งจะเป็นลักษณะฟังก์ชั่นการแปรปรวนของค่าเฉลี่ยโดยรูปแบบหรือแนวโน้มที่เกิดขึ้นนั้นเรียกว่า " Trend" หรือ "Drift" ดังรูปที่ 2-4 และรูปที่ 2-5

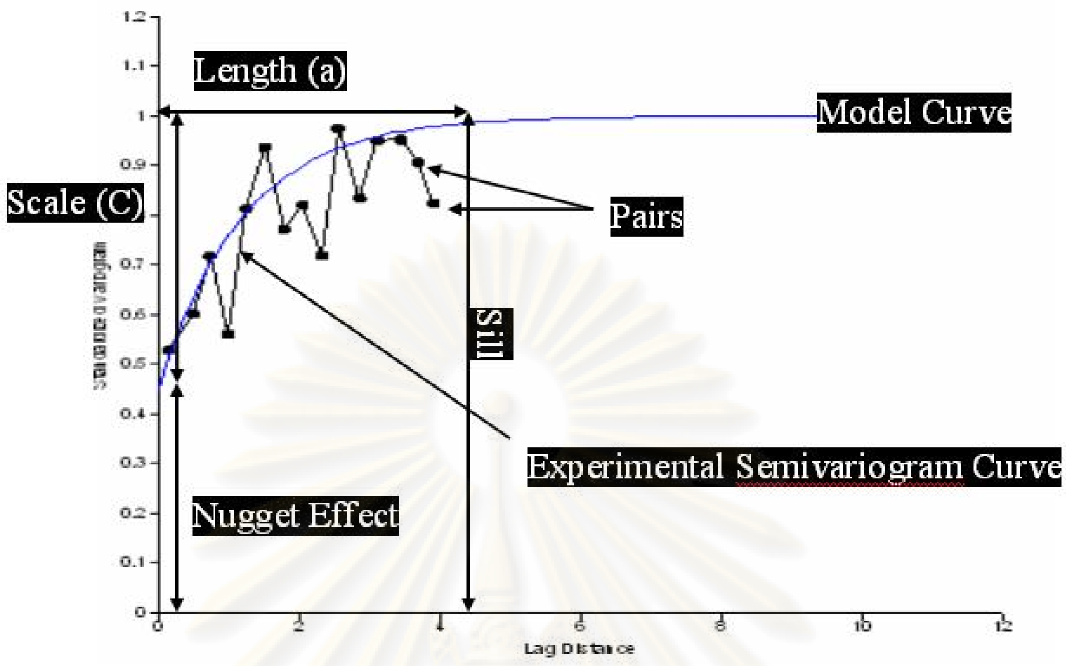
4. ถ้าเวคเตอร์ h ถูกกำหนดในทิศทางคงที่แวริโอแกรมที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในทิศทางนั้นเท่านั้น (Unidirection) แต่ถ้า h เป็นเพียงระยะทางโดยไม่มีทิศทาง จะเรียกว่าแวริโอแกรมรวมทิศ (Omnidirection)



รูปที่ 2 - 4 รูปแบบของแวริโอแกรมชนิดต่างๆ

ที่มา : Chiles and Delfiner,1999

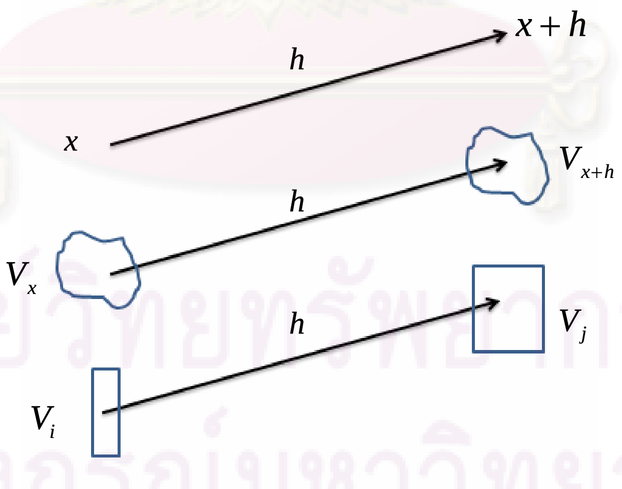
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 - 5 คุณสมบัติของแวริโอแกรม

2.1.3.7 แวริโอแกรมเฉลี่ยของพื้นที่หรือปริมาตร

เนื่องจากการเก็บตัวอย่างในภาคสนามต้องมีปริมาตรรับรองที่ตำแหน่ง x หรือ $x+h$ ดังรูปที่ 2-6 ทำให้การคำนวณได้เป็นแวริโอแกรมที่มีปริมาตรรับรอง (Volume Supported Variogram)



รูปที่ 2 - 6 แวริโอแกรมของจุดและแบบที่มีปริมาตรรองรับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. แวริโอแกรมเฉลี่ยระหว่างปริมาตร

เมื่อต้องการคำนวณแวริโอแกรมเฉลี่ยระหว่างปริมาตร เช่น V_i และ V_j โดยกำหนดให้ h_{ij} คือเวคเตอร์ใดๆ จาก V_i และ V_j จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของแวริโอแกรมจากแต่ละจุดใน V_i ไปยังแต่ละจุดใน V_j ได้จากสมการ 2-17 ดังนี้

$$\bar{g}(v_i,v_j)=\frac{1}{v_i,v_j}\int_{v_i}\int_{v_j} g(h_{ij})dv_i dv_j \qquad (2\text{-}17)$$

2. แวริโอแกรมเฉลี่ยภายในปริมาตร

เมื่อกำหนดให้ h คือเวคเตอร์ระหว่าง 2 จุดใดๆภายในปริมาตร จะคำนวณแวริโอแกรมเฉลี่ยภายในปริมาตรได้จากสมการ 2-18 ดังนี้

$$\bar{g}(v\ ,v\ )=\frac{1}{v^2}\int_{v}\int_{v} g(h\ )dv\ dv \qquad (2\text{-}18)$$

2.1.3.8 **การประเมินค่าตัวแปรโดยวิธีคริกกิ้ง** (Kriging)

2.1.3.8.1 **การประเมินค่าตัวแปรภูมิภาค**

อาศัยหลักการของวิธีการใช้ตำแหน่งที่อยู่ใกล้และเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการประเมินค่าตัวแปรจากค่าสังเกตที่เก็บตัวอย่าง ณ ตำแหน่งต่างๆโดยกำหนดให้

$g(x)$ คือ ค่าของตัวแปรภูมิภาคที่ต้องการทราบ ณ ตำแน่ง x

$g(i)$ คือ ค่าสังเกตที่ทราบค่า ณ ตำแหน่ง i $(i=1$ ถึง $n)$

2.1.3.8.2 **การประเมินจากค่าสังเกตที่อยู่ใกล้ที่สุด** (Nearest Point)

การใช้ค่าสังเกตที่อยู่ใกล้ตำแหน่ง x มากที่สุดเป็นการประเมินของตัวแปร $g(x)$ คือกำหนดให้ $g(x)=g(i)$ โดยที่ j คือจุดสังเกตที่อยู่ใกล้ตำแหน่ง x มากที่สุด

$$g(x)=\sum_{i=1}^{n}[w_i g(i)] \qquad (2\text{-}19)$$

โดยที่ $w_i=1$ ถ้า $i=j$ และ j คือจุดที่อยู่ใกล้ x มากที่สุด

$w_i=0$ ถ้า $i\neq j$

ค่า w_i นี่เรียกว่า “น้ำหนัก” (Weight) ในการนำค่าสังเกตจำนวนจุดที่นำมาใช้โดยจะให้ค่าถ่วงน้ำหนัก 100% กับค่าสังเกตที่อยู่ใกล้ที่สุดแต่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขว่า

$$\sum_{i=1}^{n} w_i=1 \qquad (2\text{-}20)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3.8.3 การประเมินเชิงเส้นที่ไม่เบี่ยงเบนและผิดพลาดน้อยที่สุด (Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)

ในการประเมินตัวแปรภูมิภาคของปริมาตร V ที่ไม่ทราบค่า จากค่าที่สังเกตหรือตัวอย่างที่มีปริมาตร V เท่ากัน n ตัวอย่าง โดยกำหนดให้

$g(v_i)$ = ค่าสังเกตของตัวอย่าง i ที่มีปริมาตร v

$g(V)$ = ค่าจริงของปริมาตร V ที่ไม่ทราบค่า

$g_e(V)$ = ค่าประเมินของปริมาตร V ที่คำนวณจากค่าสังเกต

$$g_e(V) = \sum_{i=1}^{n}[w_i g(v_i)] \tag{2-21}$$

ความแปรปรวนของความผิดพลาดในการประเมินจะคำนวณได้เท่ากับ

$$s_E^2 = E\{g_e(V) - g(V)\}^2 \tag{2-22}$$

เมื่อนำสมการที่ (2-22) ข้างต้นมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแวริโอแกรมจะได้

$$s_E^2 = 2\sum_{i=1}^{n}[w_i \bar{g}(v_i, V)] - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[w_i w_j \bar{g}(v_i, v_j)] - \bar{g}(V, V) \tag{2-23}$$

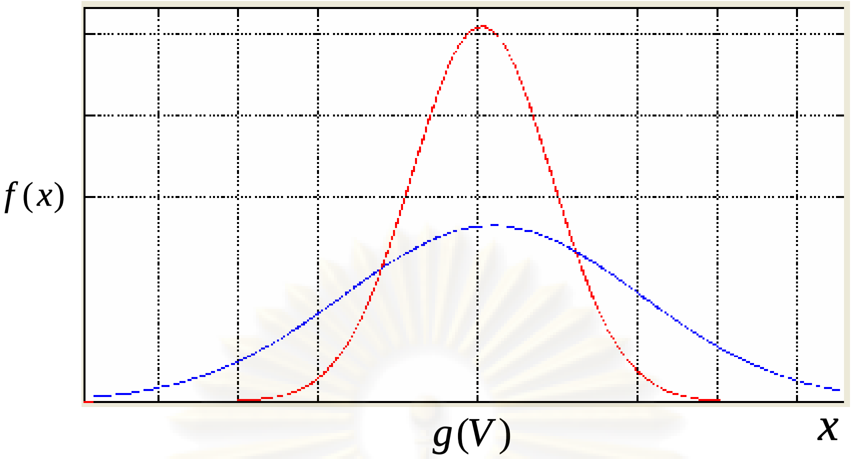
ดังนั้นตัวประเมิน BLUE ที่ต้องการจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

Minimize s_E^2

Subject to $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$

2.1.3.9 วิธีคริกกิ้ง (Kriging)

คริกกิ้ง (Kriging) เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ต้องการประมาณค่าโดยมีพื้นฐานอยู่ที่ความต่อเนื่องของแบบจำลองที่มีรูปแบบความแปรปรวนด้วยการทำนายค่าที่ดีที่สุด โดยการประมาณเชิงเส้นที่ไม่เบี่ยงเบนและให้ค่าความแปรปรวนของการประเมินผิดพลาดน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2-7 แสดงการใช้ตัวประเมินสองตัวที่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เท่ากันแต่ความแปรปรวนของข้อมูลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2-7 การประเมินที่ให้ความแปรปรวนแตกต่างกัน

การประเมินด้วยวิธี Kriging จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของ BLUE เมื่อใช้ตัวคูณลากรองจ์ในการหาค่าตัวแปร ในขั้นตอนแรกจะทำให้ด้านขวาของสมการเงื่อนไขเป็นศูนย์ดังนี้

Subject to $$2(\sum_{i=1}^{n} w_i - 1) = 0 \qquad (2\text{-}24)$$

จากนั้นจะได้ฟังก์ชั่นของลากรองจ์ดังนี้

$$L = s_E^2 - 2l(\sum_{i=1}^{n} w_i - 1) \qquad (2\text{-}25)$$

โดยที่ L เป็นฟังก์ชั่นของตัวแปร $w_1, w_2, \ldots w_n$ และ l เป็นค่าที่ต้องการทราบ เพื่อนำไปประเมินค่าตัวแปร $g_e(V)$ เมื่อสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชั่นลากรองจ์ที่ได้เปรียบเทียบกับตัวแปรและตัว และกำหนดให้ผลลัพธ์เท่ากับศูนย์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จะได้

$$\frac{\partial L}{\partial w_i} = 0 \qquad i = 1,2 \ldots n$$

$$\frac{\partial L}{\partial l} = 0$$

เมื่อแทนค่า L จากสมการที่ (2-25) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial w_i}[s_E^2 - 2l(\sum_{i=1}^{n} w_i - 1)] = 0 \qquad n \text{ สมการ}$$

$$\frac{\partial}{\partial l}[s_E^2 - 2l(\sum_{i=1}^{n} w_i - 1)] = 0 \qquad 1 \text{ สมการ}$$

เมื่อแทนค่า s_E^2 จากสมการที่ (2-25) แล้วค่าอนุพันธ์ จะได้สมการเส้นตรงจำนวน $n+1$ สมการดังนี้

$$2\bar{g}(v_1, V) - 2w_1\bar{g}(v_1, v_1) - 2w_2\bar{g}(v_1, v_2) - \ldots - 2w_a\bar{g}(v_1, v_n) - 2l = 0 \qquad (1)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$2\overline{g}(v_2,V)-2w_1\overline{g}(v_2,v_1)-2w_2\overline{g}(v_2,v_2)-...-2w_a\overline{g}(v_2,v_n)-2l=0 \qquad (2)$$

....

....

$$2\overline{g}(v_n,V)-2w_1\overline{g}(v_n,v_1)-2w_2\overline{g}(v_n,v_2)-...-2w_a\overline{g}(v_n,v_n)-2l=0 \qquad (n)$$

$$-2(\sum_{i=1}^{n} w_i - 1)=0 \qquad (n+1)$$

เมื่อนำมาเขียนใหม่จะได้สมการคริกกิ้ง (Kriging Equations) จำนวน $n+1$ สมการคือ

$$w_1\overline{g}(v_1,v_1)+w_2\overline{g}(v_1,v_2)+...+w_a\overline{g}(v_1,v_n)+l=\overline{g}(v_1,V) \qquad (1)$$

$$w_1\overline{g}(v_2,v_1)+w_2\overline{g}(v_2,v_2)+...+w_a\overline{g}(v_2,v_n)+l=\overline{g}(v_2,V) \qquad (2)$$

....

....

$$w_1\overline{g}(v_n,v_1)+w_2\overline{g}(v_n,v_2)+...+w_a\overline{g}(v_n,v_n)+l=\overline{g}(v_n,V) \qquad (n)$$

$$w_1+w_2+...+w_n=1 \qquad (n+1)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของคริกกิ้งเมทริกซ์ (Kriging Matrix) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \overline{g}(v_1,v_1) & \overline{g}(v_1,v_2) & ... & ... & \overline{g}(v_1,v_n) & 1 \\ \overline{g}(v_2,v_1) & \overline{g}(v_2,v_2) & ... & ... & \overline{g}(v_2,v_n) & 1 \\ ... & ... & ... & ... & ... & . \\ ... & & ... & ... & ... & . \\ \overline{g}(v_n,v_1) & \overline{g}(v_n,v_2) & ... & ... & \overline{g}(v_n,v_n) & 1 \\ 1 & 1 & ... & ... & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ ... \\ .... \\ w_n \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{g}(v_1,V) \\ \overline{g}(v_2,V) \\ ... \\ ... \\ \overline{g}(v_n,V) \\ 1 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสั้นๆได้คือ

$$\sum_{j=1}^{n}[w_i\overline{g}(v_i,v_j)]+l=\overline{g}(v_i,V) \qquad ;\ i=1,2,...,n \qquad (2\text{-}26)$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$$

เมื่อนำ w_1 ไปคูณสมการที่ 1 ของสมการ Kriging และนำ w_2 ไปคูณกับสมการที่ 2 ทำเช่นนี้จนถึง w_n ได้คูณสมการที่ n แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมด n สมการรวมกันจะได้

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[w_iw_j\overline{g}(v_i,v_j)]+l\sum_{i=1}^{n}w_i=\sum_{i=1}^{n}[w_i\overline{g}(v_i,V)]$$

เนื่องจาก $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$ จึงคำนวณค่าตัวคูณลากรองจ์ได้สมการดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$l = \sum_{i=1}^{n}[w_i \bar{g}(v_i, V)] - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[w_i w_j \bar{g}(v_i, v_j)] \qquad (2\text{-}27)$$

เมื่อนำค่าจากสมการที่ 2-27 ไปแทนในสมการที่ 2-25 จะคำนวณความแปรปรวนของการประเมิน s_E^2 ซึ่งเขียนในรูปของ s_K^2 หรือเรียกว่า “ความแปรปรวนคริกกิ้ง” (Kriging Variance) ได้ดังนี้

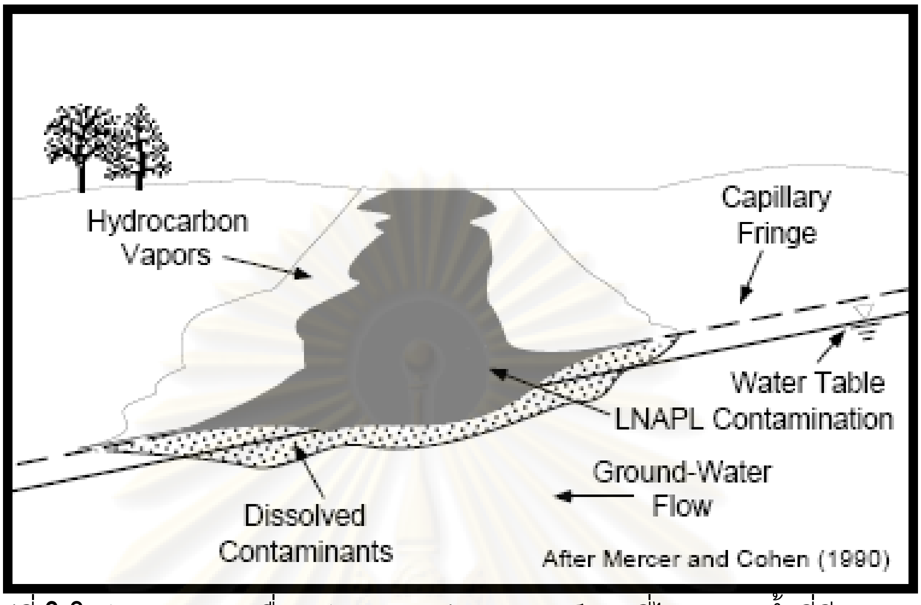
$$s_K^2 \cong \sum_{i=1}^{n}[w_i \bar{g}(v_i, V)] + l - \bar{g}(V, V) \qquad (2\text{-}28)$$

วิธีคริกกิ้งจะต้องมีการถ่วงน้ำหนัก (Weight, w_i) เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณด้วย ซึ่งการถ่วงน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของตัวอย่างที่จุด (Point) หรือว่า Block เก็บรวมกันเป็นข้อมูลซึ่งวิธีคริกกิ้งนี้จะให้ค่าประมาณที่ดีที่สุดโดยไม่เบี่ยงเบน ทำให้มีประโยชน์ในด้านการคำนวณขอบเขตความเชื่อมั่น (Confidence Limit) โดยทั่วไปแล้วคริกกิ้งยังสามารถแบ่งออกเป็นหลายวิธี เช่น Simple Kriging , Ordinary Kriging และ Universal Kriging เป็นต้น

2.2 ทฤษฎีทางกายภาพและเคมีของสารปนเปื้อนจำพวกสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ

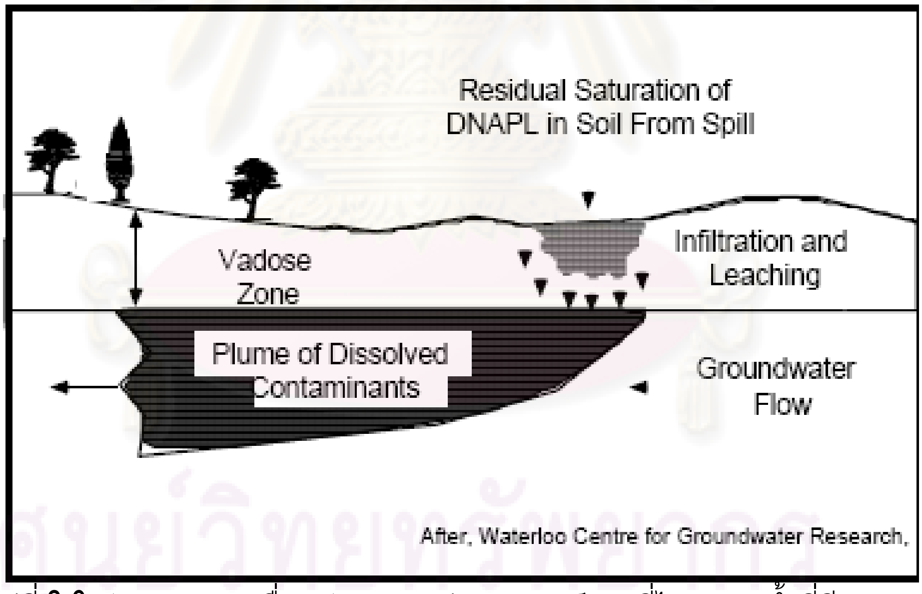
สารอินทรีย์ประเภท Nonaqueous Phase Liquid (NAPL) หมายถึงสารประกอบคาร์บอนที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เป็นสารปนเปื้อนที่พบได้บ่อยครั้งในแหล่งน้ำบาดาลทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย สารอินทรีย์เหล่านี้แบ่งออกได้ 2 จำพวกใหญ่ๆตามความหนาแน่นของตัวสารคือ 1) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquid (LNAPL)) ได้แก่ สารเบนซีน, สารโทลูอีนและสารไซลีนเป็นต้น และ 2) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ (Dense Nonaqueous Phase Liquid (DNAPL)) ได้แก่ สารไตรคลอโรเอธิลีนและสารเตตระคลอโรเอธิลีน

เมื่อสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำเคลื่อนตัวลงสู่ใต้ดินภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) หากสารมีปริมาณไม่มากนักและเคลื่อนตัวผ่านชั้นน้ำไม่อิ่มตัว (Unsaturated Zone) สารไฮโดรคาร์บอนส่วนหนึ่งจะตกค้างในช่องว่างของดินเนื่องมาจากผลของแรงตึงผิว (Capillary Force) หากสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมีปริมาณมากพอจะสามารถเคลื่อนตัวผ่านชั้นน้ำไม่อิ่มตัวลงสู่ชั้นน้ำอิ่มตัว (Saturated Zone) สารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำจะมีการเคลื่อนตัวในแนวราบอันเนื่องมาจากผลของแรงตึงผิวที่บริเวณระดับผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ในทางกลับกันสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำจะเคลื่อนตัวตามแนวดิ่งลงสู่ชั้นน้ำด้านล่างต่อไปและจะหยุดเคลื่อนตัวเมื่อเจอกับชั้นหิน (Bed Rock) หรือชั้นดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-8 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล

ที่มา : Huling and Weaver (1991)



รูปที่ 2-9 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารประกอบคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำในชั้นน้ำบาดาล

ที่มา : Huling and Weaver (1991)

จะกล่าวถึงคำจำกัดความของสารปนเปื้อนที่มีผลต่อแหล่งน้ำทั้งในน้ำใต้ดินและผิวดินแต่ในที่นี้จะเน้นในเรื่องของน้ำใต้ดินเนื่องจากไม่สามารถที่จะตรวจพบได้ง่ายและยากแก่การสำรวจและจะศึกษาการแพร่ของสารปนเปื้อนในลักษณะต่างๆ โดยการเคลื่อนตัวของสารพิษนั้น

จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารปนเปื้อนและคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของชั้นดินและชั้นน้ำด้วย ประเด็นหลักของการพิจารณาคือ แหล่งกำเนิดของสารปนเปื้อนว่ามาจากที่ใด ขอบเขตการปนเปื้อนในชั้นดินมากน้อยเพียงไร รวมทั้งชนิดของสารปนเปื้อน กระบวนการที่ส่งผลต่อการปนเปื้อนของสารพิษในชั้นดินและชั้นน้ำบาดาลประกอบด้วย

- กระบวนการซึม (Infiltration)
- กระบวนการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (Recharge)
- กระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำบาดาล (Migration)
- กระบวนการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นน้ำ (Interaquifer Exchange)

สารละลายอินทรีย์ที่ใช้กันทั่วไปมักเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้อย่างจำกัดในน้ำ จะมีลักษณะใสเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ การเคลื่อนที่ของสารเหล่านี้ในตัวกลางที่มีความพรุนจากผิวดินลงสู่น้ำใต้ดินจะลงสู่ชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) และจะไหลลงสู่ชั้นอิ่มตัวด้วย (Saturated) โดยส่วนใหญ่การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านตัวกลางรูพรุนจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่างๆเช่น ความหนาแน่น, ความหนืด, อัตราการไหลในแนวดิ่งและขึ้นกับคุณสมบัติของสารและตัวกลางที่ไหลผ่าน

สารปนเปื้อนประเภท NAPL สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPL) และ Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPL) สำหรับ DNAPL นั้นหมายถึงสารปนเปื้อนที่จำแนกชั้นจากน้ำบาดาลและมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ มักจะมีแนวโน้มจมลงสู่น้ำในระดับลึก ในขณะที่ LNAPL หมายถึงสารปนเปื้อนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำและมีแนวโน้มลอยตัวอยู่บริเวณผิวน้ำในชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งคุณสมบัติต่างของ NAPL แสดงดังตารางที่ 2-3

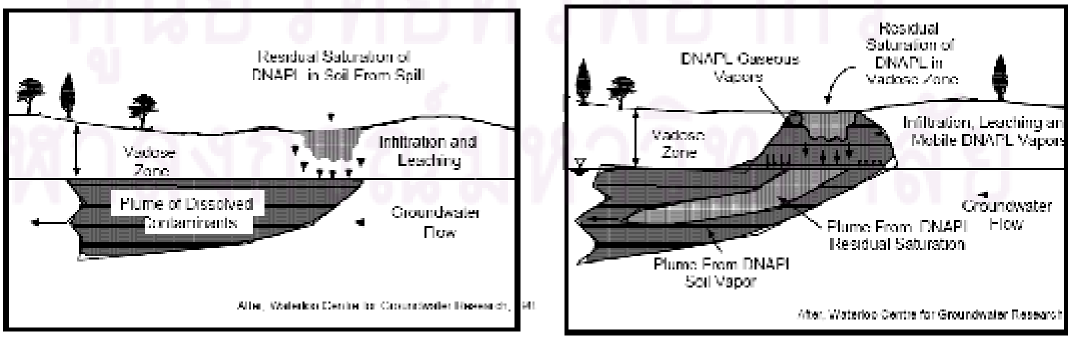
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-3 แสดงคุณสมบัติต่างๆของ DNAPL

Compound	Density [1]	Dynamic[2] Viscosity	Kinematic Viscosity[3]	Water[4] Solub.	Henry's Law Constant[6]	Vapor[6] Pressure
Halogenated Semi-volatiles						
1,4-Dichlorobenzene	1.2475	1.2580	1.008	8. 0 E+01	1.58 E-03	6 E-01
1,2-Dichlorobenzene	1.3060	1.3020	0.997	1. 0 E+02	1.88 E-03	9.6 E-01
Aroclor 1242	1.3850			4.5 E-01	3.4 E-04	4.06 E-04
Aroclor 1260	1.4400			2.7 E-03	3.4 E-04	4.05 E-05
Aroclor 1254	1.5380			1.2 E-02	2.8 E-01	7.71 E-05
Chlordane	1.6	1.1040	0.69	5.6 E-02	2.2 E-04	1 E-05
Dieldrin	1.7500			1.86 E-01	9.7 E-06	1.78 E-07
2,3,4,6-Tetrachlorophenol	1.8390			1. 0 E+03		
Pentachlorophenol	1.9700			1.4 E+01	2.0 E-06	1.1 E-04
Halogenated Volatiles						
Chlorobenzene	1.1060	0.7560	0.683	4.9 E+02	3.46 E-03	8.8 E+00
1,2-Dichloropropane	1.1530	0.8400	0.72	2.7 E+03	3.6 E-03	3.95 E+01
1,1-Dichloroethane	1.1750	0.3770	0.321	5.5 E+03	5.45 E-04	1.82 E+02
1,1-Dichloroethylene	1.2140	0.3300	0.27	4. 0 E+02	1.49 E-03	5 E+02
1,2-Dichloroethane	1.2530	0.8400	0.67	8.69 E+03	1.1 E-03	6.37 E+01
Trans-1,2-Dichloroethylene	1.2570	0.4040	0.321	6.3 E+03	5.32 E-03	2.65 E+02
Cis-1,2-Dichloroethylene	1.2480	0.4670	0.364	3.5 E+03	7.5 E-03	2 E+02
1,1,1-Trichloroethane	1.3250	0.8580	0.647	9.5 E+02	4.08 E-03	1 E+02
Methylene Chloride	1.3250	0.4300	0.324	1.32 E+04	2.57 E-03	3.5 E+02
1,1,2-Trichloroethane	1.4430	0.1190	0.024	4.5 E+03	1.17 E-03	1.88 E+01
Trichloroethylene	1.4620	0.5700	0.390	1. 0 E+03	8.92 E-03	5.87 E+01
Chloroform	1.4850	0.5630	0.379	8.22 E+03	3.75 E-03	1.6 E+02
Carbon Tetrachloride	1.5947	0.9650	0.605	8.0 E+02	2. 0 E-02	9.13 E+01
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1.6	1.7700	1.10	2.9 E+03	5. 0 E-04	4.9 E+00
Tetrachloroethylene	1.6250	0.8900	0.54	1.5 E+02	2.27 E-02	1.4 E+01
Ethylene Dibromide	2.1720	1.6760	0.79	3.4 E+03	3.18 E-04	1.1 E+01
Non-halogenated Semi-volatiles						
2-Methyl Napthalene	1.0058			2.54 E+01	5.06 E-02	6.80 E-02
o-Cresol	1.0273			3.1 E+04	4.7 E-05	2.45 E-01
p-Cresol	1.0347			2.4 E+04	3.5 E-04	1.08 E-01
2,4-Dimethylphenol	1.0360			6.2 E+03	2.5 E-06	9.8 E-02
m-Cresol	1.0380	21. 0	20	2.35 E+04	3.8 E-05	1.53 E-01
Phenol	1.0576		3.87	8.4 E+04	7.8 E-07	5.293E-01
Naphthalene	1.1620			3.1 E+01	1.27 E-03	2.336E-01
Benzo(a)Anthracene	1.1740			1.4 E-02	4.5 E-06	1.10 E-09
Flourene	1.2030			1.9 E+00	7.65 E-05	6.67 E-04
Acenaphthene	1.2250			3.88 E+00	1.2 E-03	2.31 E-02
Anthracene	1.2500			7.5 E-02	3.38 E-05	1.08 E-05
Dibenz(a,h)Anthracene	1.2520			2.5 E-03	7.33 E-08	1 E-10
Fluoranthene	1.2520			2.65 E-01	6.5 E-06	E-02 E-06
Pyrene	1.2710			1.48 E-01	1.2 E-05	6.67 E-06
Chrysene	1.2740			6. 0 E-03	1.05 E-06	6.3 E-09
2,4-Dinitrophenol	1.6800			6. 0 E+03	6.45 E-10	1.49 E-05
Miscellaneous						
Coal Tar	1.028[7]	18.98[7]				
Creosote	1.05	1.08[8]				

[1] g/cc
[2] centipoise (cp), water has a dynamic viscosity of 1 cp at 20°C
[3] centistokes (cs)
[4] mg/l
[5] atm-m³/mol
[6] mm Hg
[7] 45°F (7C)
[8] 15.5°C, varies with creosote mix (82)

ที่มา : Huling and Weaver (1991)

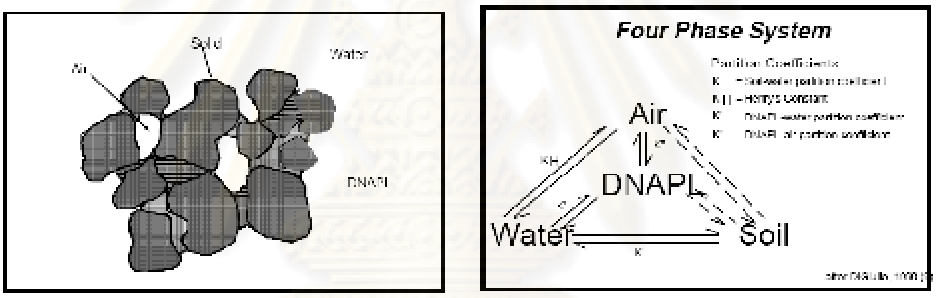


รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของ DNAPL

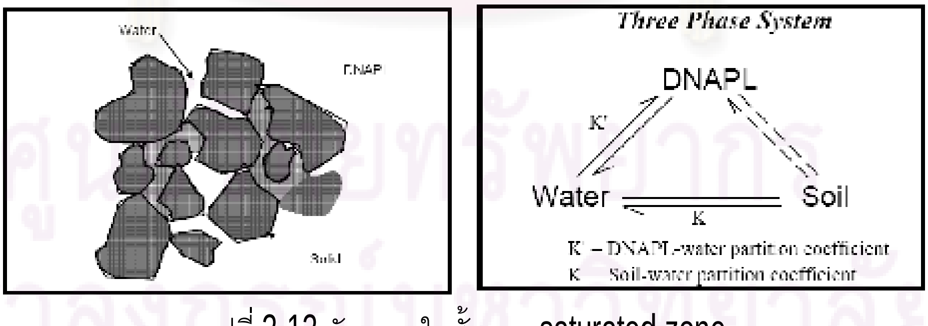
ที่มา : Huling and Weaver (1991)

จากรูปที่ 2-10 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของ DNAPL จะเคลื่อนตัวลงมาในแนวดิ่งตามรูพรุนของดินและจะไหลไปผสมกับน้ำบาดาลในทิศทางการไหล ในส่วนที่ไม่ละลายน้ำก็จะสะสมอยู่ในชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในที่นี่ใช้ชื่อว่า "Vadose Zone" ซึ่งมีความหมายเดียวกับชั้น Unsaturated Zone ในชั้นนี้ DNAPL สามารถยึดติดกับดินที่มีช่องว่างเหลืออยู่ ซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้างอยู่ในชั้นดินและสามารถลงสู่น้ำบาดาลได้โดยการเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำบาดาล ซึ่งโดยทั่วไป DNAPL ในชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Vadose Zone)จะมีอยู่ 4 สถานะแต่ถ้าในชั้นของอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Zone) จะไม่มี Air Phase ซึ่งจะมีดังนี้

1. Air Phase จะแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของเม็ดดิน
2. Solid Phase จะถูกดูดซับในดินหรือในชั้นดินที่มีน้ำ
3. Liquid or Water Phase ส่วนใหญ่จะละลายปนอยู่กับน้ำ
4. Immiscible Phase เป็นส่วนที่ผสมกับน้ำแต่ละลายน้ำได้เพียงบางส่วนโดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ DNPL



รูปที่ 2-11 ลักษณะในชั้นของ vadose zone
ที่มา : Huling and Weaver (1991)

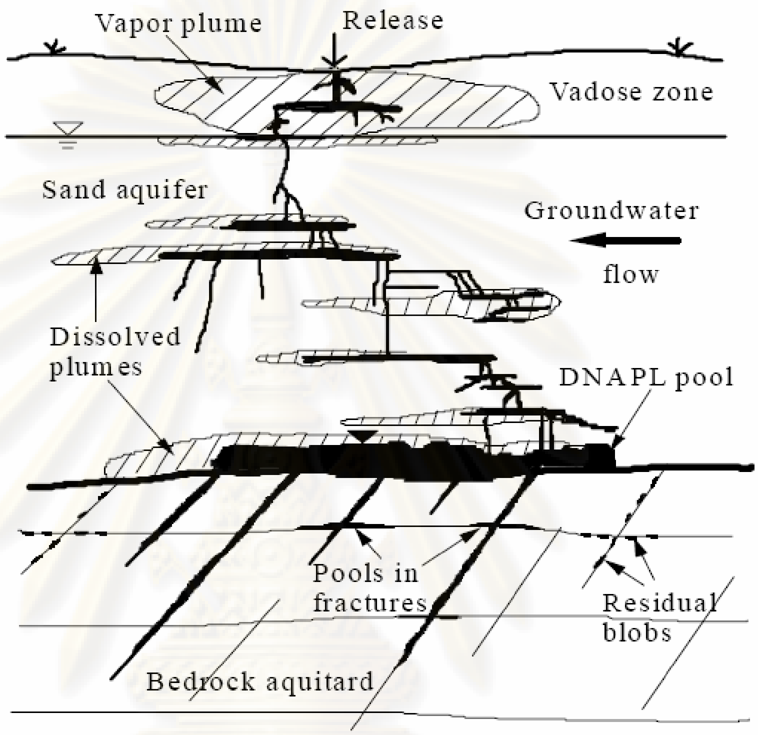


รูปที่ 2-12 ลักษณะในชั้นของ saturated zone
ที่มา : Huling and Weaver (1991)

ในชั้นชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จะต่างกับชั้นชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ตรงที่ไม่มีสถานะของก๊าซ เนื่องจากเต็มไปด้วยน้ำจะทำให้การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนั้นสามารถ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เคลื่อนที่ได้เร็วกว่า ซึ่งในลักษณะการเกิดในแต่ละสถานะนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาและตำแหน่งของลักษณะชั้นดินในแต่ละสถานที่ซึ่งในสถานที่เดียวกันยังสามารถให้ผลที่ออกมาแตกต่างกันได้ ซึ่งจะเกิดความยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ ในแต่ละสถานการณ์เคลื่อนที่นั้นจะมีผลจากคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินเช่นค่า Permeability, Hydraulic Conductivity เป็นต้น



รูปที่ 2-13 ลักษณะการรั่วซึมของ DNAPL ในชั้นต่างๆ
ที่มา : Levy (1995)

จากรูปที่ 2-13 จะแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในที่ต่างๆในชั้นดินทำให้ DNAPL มีการตกค้างอยู่ในดินซึ่งในส่วนที่อยู่ในดินนั้น DNAPL จะแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นดินที่มีความซึมผ่านได้น้อย (Low Permeability) จะยากแก่การบำรุงรักษาเนื่องจากชั้นดินในแต่ละแห่งนั้นมีการกระจายขนาดตัวแปรต่างๆที่แตกต่างกันออกไปเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ซึ่งการกระจายตัวของชั้นดินต่างในภาคสนามก็แตกต่างกัน ยังส่งผลต่อค่าคุณสมบัติของชั้นดินอีกด้วย จะบอกถึงลักษณะชั้นดินแต่ละชั้นจะประกอบด้วยของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ซึ่งทั้ง 3 องค์ประกอบนี้จะรวมอยู่ในชั้นดินเป็นส่วนประกอบของสารเคมีต่างๆ โดยทั้งหมดนี้จะมีการรักษาสมดุลจะมีพลังงานเข้ามาเกี่ยงข้องคือ พลังงานความร้อน (Thermodynamic) และ จลศาสตร์ (Kinetics) แบ่งออกเป็น 4 ลักษณะคือ ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous), ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous), การเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับได้ (Reversible) และ การ

เปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Irreversible) โดยตัวหลักที่สำคัญก็คือกระบวนการความเป็นเนื้อเดียวกัน และ Reversible โดย Heterogeneous จะเกิดขึ้นระหว่างความแตกต่างของชั้นดินในแต่ละสถานะส่วนการเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับได้ จะมีความสำคัญต่อการไหลย้อนกลับของสารปนเปื้อนที่ลงไปในน้ำใต้ดิน ซึ่งในแต่ละสถานะนั้นจะมีการกระจายตัวและการแพร่ผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งในของเหลวมีการส่งผ่านได้ดีที่สุดรองลงมาเป็นก๊าซ และของแข็งตามลำดับ

2.3 **ทฤษฎีสโตแคสติค** (Theory of Stochastic)

2.3.1 **กระบวนการสโตแคสติค** (Stochastic Processes)

การประยุกต์ใช้แบบจำลองสโตแคสติค เชิงพื้นที่เพื่อศึกษาและแก้ปัญหาในศาสตร์ด้านน้ำใต้ดินและการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินได้เพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายในช่วงสามสิบปีที่ผ่านมา และส่วนใหญ่ใช้หลักการจำลองทางธรณีสถิติ โดยพัฒนารูปแบบฟังก์ชั่นของตัวแปรสุ่มเชิงพื้นที่ (Myers, 1997; Goovaerts, 1999) แบบจำลองสโตแคสติคสามารถใช้ทำนายลักษณะความไม่แน่นอนของตัวแปรในแบบจำลองการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แบบสโตแคสติคได้อธิบายข้อจำกัดของตัวแปรภูมิภาคที่มีตำแหน่งของข้อมูล (Olea, 1994) ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้แบบจำลองทางธรณีสถิติในงานทางด้านธรณีวิทยา โดยใช้วิธีคริกกิ้งในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของชั้นน้ำ (K) และระดับน้ำ (Calvete, 1999) เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติทางอุทกวิทยาของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ณ ตำแหน่งไม่มีการเก็บข้อมูล แล้วจึงนำไปสู่การปรับปรุงค่าที่ประมาณได้โดยตัดค่าที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปออกจากการทำนาย อีกนัยหนึ่งของแบบจำลองสโตแคสติคคือการกำหนดให้มีโอกาสเกิดขึ้นเท่าๆกันโดยใช้ข้อมูลจากตำแหน่งที่มีการเก็บตัวอย่างที่แท้จริง เพื่อสร้างรูปแบบ (Realizations) ที่มีโอกาสการเกิดขึ้นได้เท่ากันแต่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป จากโครงสร้างความน่าจะเป็นและการกระจายตัวเชิงพื้นที่ (Srivastava, 1994)

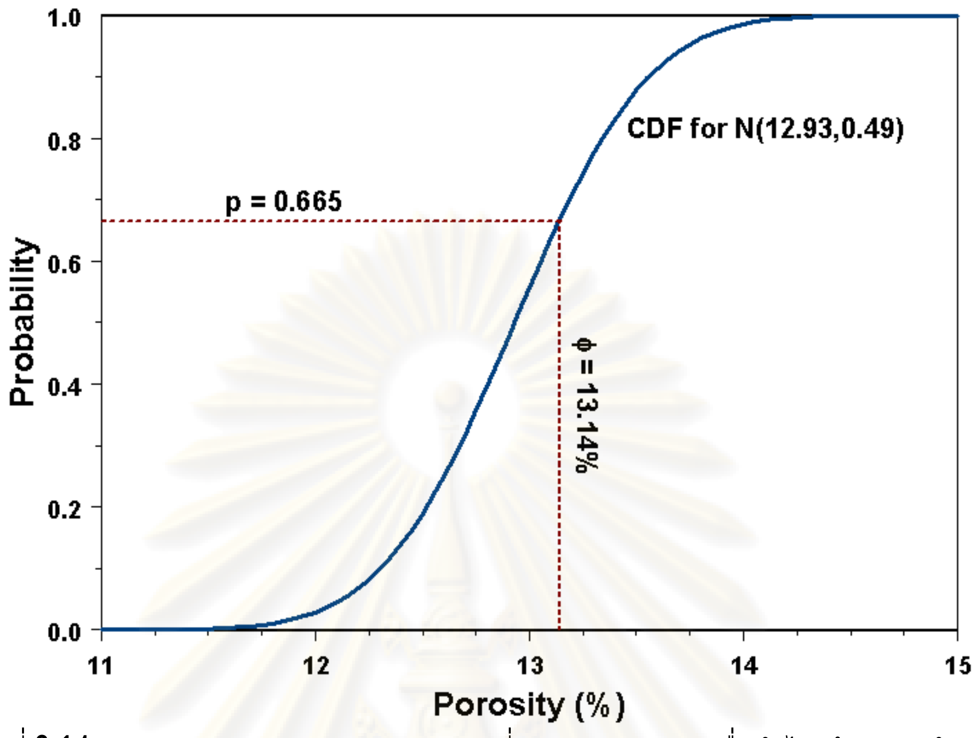
กระบวนการที่ใช้อธิบายลักษณะการกระจายตัวของชั้นน้ำส่วนใหญ่แล้วมีพื้นฐานจากข้อมูล ณ ตำแหน่งที่มีการเก็บข้อมูลภาคสนาม ซึ่งโดยมากจะไม่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำนายข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ไม่มีการสำรวจ โดยทั่วไปการจำลองเชิงสโตแค-สติคสามารถแยกได้ 2 ลักษณะ คือ 1) แบบตัวแปรมีการกระจายตัวแบบ Gaussian (Parametric Gaussian) และ 2) แบบไม่มีตัวแปรที่แน่นอน (Non - Parametric) ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของฟังก์ชั่นการกระจายความน่าจะเป็นของข้อมูลพื้นฐาน

2.3.2 **แบบจำลองเชิงสโตแคสติคที่มีตัวแปรมีการกระจายตัวแบบ** Gaussian (Parametric Gaussian Method)

หมายถึงการจำลองเชิงสโตแคสติคโดยมีรูปแบบการกระจายตัวของตัวแปรพื้นฐานที่แน่นอนทางสถิติ ในทางธรณีสถิติจะเรียกว่า "Sequential Gaussian Simulation" (SGS) ซึ่งจะกำหนดฟังก์ชั่นการกระจายตัวของข้อมูลเป็นรูปแบบการกระจายตัวแบบ Gaussian วิธีการนี้เป็นที่นิยมและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเนื่องจากเป็นการกระจายที่ไม่มีความเบี่ยงเบนของข้อมูล และสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากตัวแปรทางสถิติทั่วไป 2 ค่า คือค่าเฉลี่ย (Mean) และความแปรปรวน (Variance) ค่าความแปรปรวนนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าแวริโอแกรมของธรณีสถิติซึ่ง SGS จะเลือกค่าของตัวแปรโดยกระบวนการสุ่มในลักษณะนี้เช่นกันตามระดับของความน่าจะเป็น ถ้าตัวอย่างข้อมูลที่ได้มาไม่ใช่การกระจายตัวแบบปกติสามารถเปลี่ยนโดยใช้การกระจายปกติแบบล็อค (Deutsch and Journel, 1998) ในกระบวนการจำลองรูปแบบแต่ละกริดจะต้องมีลำดับของการสุ่มโดยใช้กระบวนการคริกกิ้งในการประมาณค่าจากฟังก์ชั่นการรวมการแจกแจงสะสม Cumulative Distribution Function, (CDF) โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ทราบค่าของตำแหน่งที่มีการสำรวจหรือเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างการใช้วิธีแบบหกจุดในการสร้างแบบจำลองของความพรุน (Porosity) โดยวิธีคริกกิ้งข้อมูลจะประมาณได้ค่าเฉลี่ยของข้อมูล = 12.93% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.49% ในกรณีนี้สมมติว่าใช้ค่าความน่าจะเป็นที่ p = 0.665 สำหรับการประมาณค่าของตัวแปรที่จุดนี้ ทำให้ได้ค่าความพรุน = 13.14% จากฟังก์ชันของความน่าจะเป็นแบบโค้งสะสมปกติ (Cumulative Normal Probability Function) แสดงในรูปที่ 2-14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-14 ตัวอย่างการประมาณค่าความพรุนที่จุดบนตารางกริดเพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง
ที่มา : Bohling (2005)

ขั้นตอนพื้นฐานในการจำลองโดยใช้วิธี SGS สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สร้างเส้นทางการสุ่ม (Random Path) ผ่านจุดต่างๆบนตารางกริด

2. กำหนดจุดแรกของเส้นทางสุ่มและใช้คริกกิ้ง ในการประมาณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดนั้นจากค่าข้อมูลโดยรอบๆจุดนั้น

3. เลือกค่าของตัวแปรโดยใช้การสุ่มจากการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-3 จนครบทุกจุด โดยพิจารณาจุดที่สร้างค่าขึ้นมาแล้วและนำค่าที่สุ่มได้แล้วในแต่ละจุดมาใช้ร่วมในการสุ่มด้วย

2.3.3 **แบบจำลองเชิงสโตแคสติคที่ไม่มีตัวแปรที่แน่นอน** (Non – Parametric Method)

หมายถึงแบบจำลองที่ไม่มีรูปแบบการกระจายตัวของตัวแปรทางสถิติที่แน่นอนหรือตายตัว จะไม่มีข้อกำหนดของลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเฉพาะแบบเจาะจง เนื่องจากสามารถใช้รูปแบบในการกระจายตัวเป็นฟังก์ชั่นที่ไม่มีเงื่อนไข เช่นค่าตัวแปรเชิงตัวเลขจากฟังก์ชั่นสุ่ม สามารถประยุกต์ตัวแปรที่มีความต่อเนื่องกันของฟังก์ชั่นสุ่มได้เช่น ชนิดของดิน เป็นต้น สามารถลดความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของค่ามากและค่าน้อย (Goovaerts, 1997) กระบวนการจะ

คล้ายคลึงกับวิธี "Sequential Indicator Simulation " (SIS), Simulate Annealing (Deutsch and Cockerham, 1994; Srivastava, 1994) และ Markov-Base Transition Probability (Dovton,1994;Carle and Fogg, 1996,1997;Carle et al., 1998) ดังนั้นจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงได้เพียงระบุพฤติกรรมการกระจายตัวของข้อมูลที่เรียกว่า "Cumulative Distribution Function" (CDF) แต่จำเป็นต้องระบุตัวแปรทางสถิติเพิ่มเข้าไปในส่วนของแวริโอแกรมในแต่ละการเริ่มต้นหรือแต่ละประเภท สร้างฟังก์ชันความหนาแน่นแบบต่อเนื่องสะสมสำหรับหมวดหมู่ของข้อมูลในทุกกรณี และจัดกลุ่มบนตารางกริดเข้าสู่หมวดหมู่เหล่านั้นโดยการสุ่มเพื่อให้อยู่ในรูปความต่อเนื่อง ตัวบ่งชี้ (Indicator) ที่ใช้ในการจัดหมวดหมู่ข้อมูลอาจจะนำเสนอในรูปแบบดังสมการ 2-29

$$i(u_a;k)=\begin{cases}1 & if \quad facies\ k\ is\ present\ at\ u_a\\ 0 & Otherwise\end{cases} \tag{2-29}$$

สำหรับการศึกษานี้ใช้ตัวบ่งชี้ตัวเดียวในการจัดหมวดหมู่ของลักษณะทั่วไป k ชนิด จากนั้นจะใช้ Indicator Kriging เพื่อสร้างกลุ่มความน่าจะเป็นของลักษณะทั่วไป ทุกจุดบนตารางกริด แล้วจึงสร้าง Cumulative Distribution Function (CDF) จากความน่าจะเป็น แล้วนำมาเลือกหมวดหมู่ของข้อมูลโดยใช้การสุ่มจาก Cumulative Distribution Function (CDF) ที่สร้างขึ้น สำหรับตัวแปรที่มีความต่อเนื่องเช่น การซึมผ่านได้ตัวแปรที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้จะสร้างโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลของกลุ่มที่เป็นค่า (Threshold) z_k แสดงดังสมการ 2-30

$$i(u_a;k)=\begin{cases}1 & if \quad z(u_a \le z_k)\\ 0 & Otherwise\end{cases} \tag{2-30}$$

การระบุค่า (Threshold) อาจจะใช้ค่าของเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 10, 25, 50, 75, 90 ของการกระจายตัวของข้อมูล ตัวอย่างเช่น ใช้ Indicator Kriging โดยใช้ค่าตัวบ่งชี้สำหรับค่าจุดเริ่มต้นของ K^{th} , z_k มีค่าเท่ากับค่าที่ความน่าจะเป็น $P[Z(u)\le z_k]$ ที่ทุกจุดของการประมาณค่า และเนื่องจากค่านี้มาจากความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Probability) จึงไม่จำเป็นต้องมีการรวมค่าเพื่อสร้างผลรวมของฟังก์ชั่นการกระจายตัวของความน่าจะเป็น แม้ว่าจะต้องการความถูกต้องตามความสัมพันธ์ $P[Z(u)\le z_k]\le P[Z(u)\le z_{k+1}]$

2.3.4 **กระบวนการลูกโซ่แบบมาร์คอฟ** (Markov Processes)

ผู้ริเริ่มพัฒนาการใช้ลูกโซ่แบบมาร์คอฟ คือ อังเร เอ มาร์คอฟ (Andrei A. Markov) ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียในปีคริสศักราช 1956 ในระยะแรกแบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟถูกนำไปใช้ในสาขาฟิสิกส์และพยากรณ์อากาศเท่านั้น ต่อมาได้พัฒนานำไปประยุกต์ได้อย่างมีประสิทธิ์ภาพในการแก้ปัญหาศาสตร์ด้านต่างๆอย่างแพร่หลายมากขึ้น

แบบจำลองมาร์คอฟ (Markov Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของตัวแปรในอดีตและปัจจุบัน เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมในอนาคตของตัวแปรนั้น แบบจำลองมาร์คอฟยังได้นำไปประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อช่วยการตัดสินใจทางวิศวกรรมมากมายหลายด้าน เช่น เพื่อศึกษาและคาดหมายพฤติกรรมในแง่การกระจายตัวของชั้นดินและการเปลี่ยนชนิดของดิน ปัจจุบันได้มีการนำแบบจำลองมาร์คอฟมาประยุกต์กับการทำนายลักษณะชั้นหินหรือดินในโครงสร้างธรณีวิทยา จากตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวผลลัพธ์จากตัวแบบมาร์คอฟสามารถให้ข้อมูลเพื่อตัดสินใจ ในรูปแบบของค่าคาดหมายหรือความน่าจะเป็นในอนาคตของคุณสมบัติที่ศึกษา โดยความน่าจะเป็นของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น และค่าความน่าจะเป็นจะต้องมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

แบบจำลองมาร์คอฟ เป็นตัวแบบที่สร้างขึ้นโดยอาศัยธรรมชาติของปรากฏการณ์ซึ่งเรียกว่ากระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟเป็นกระบวนการสโตแคสติกชนิดหนึ่ง ซึ่งก็คือลำดับของเหตุการณ์ และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดแต่ละเหตุการณ์ ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น กล่าวคือ เป็นปรากฏการณ์ของการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ซึ่งมีความจำคือจำเหตุการณ์ ที่เกิดขึ้นก่อนการเกิดเหตุการณ์ต่อไป และเหตุการณ์ก่อนหน้านั้น จะมีผลต่อเหตุการณ์ถัดไป คุณลักษณะเช่นนี้ของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟแตกต่างจากลำดับการเกิดเหตุการณ์ในกรณีที่แต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นตัวแปรที่จะต้องใช้ต้องเป็นตัวแปรเชิงเงื่อนไข (Conditional Probability Model) ซึ่งตัวแปรแบบนี้มักจะเป็นชุดข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มเพียงตัวเดียว ดังนั้นการศึกษาจะมีการกำกับด้วยเวลาหรือพื้นที่ ในกระบวนการสโตแคสติคจะกำหนดให้ $X_n = i$ เป็นกระบวนการที่สถานะ i ที่เวลา n ซึ่งกระบวนการที่สถานะ i ทำให้ทราบความน่าจะเป็น P_{ij} เป็นสถานะต่อไปที่ j คือ

$$
\begin{aligned}
&P\{[X(t_{n+1}) = x_{i+1} | X(t_i) = x_i, X(t_{i-1}) = x_{i-1}, \ldots = x_{i-11}]\} \\
&\qquad = P[X(t_{i+1}) = x_{i+1} | X(t_i) = x_i]
\end{aligned}
\tag{2-31}
$$

สำหรับทุกๆสถานะ $i_0, i_1, \ldots, i_{n-1}, j$ และ $n \geq 1$

ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า สถานะอนาคต X_{n+1} จะขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบัน X_n

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพียงอย่างเดียวและสถานะปัจจุบัน X_n จะขึ้นอยู่กับสถานะในอดีต X_{n-1} เท่านั้น

แบบจำลองมาร์คอฟจะประกอบด้วยพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการทำนายความน่าจะเป็นในสถานะต่อไป ดังนี้

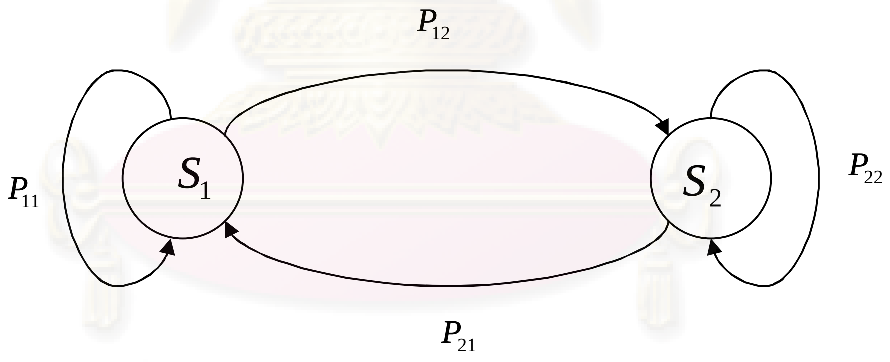
1. สถานะ (State) หมายถึง ตัวแปรสุ่มของค่าที่มีโอกาสเป็นไปได้จากข้อมูลที่มีอยู่เช่น กำหนดให้ตัวแปรมี 2 สถานะ คือการสำรวจเจอสารปนเปื้อนและสำรวจไม่พบสารปนเปื้อน โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในรูปของสถานะ $i = 1,\ 2,...,n$

2. ความน่าจะเป็นทรานสิชั่น (Transition Probability) หมายถึงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง เช่น ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่สำรวจไม่พบการปนเปื้อนไปเป็นสถานะสำรวจพบการปนเปื้อน ตัวแปรที่กำหนดให้ใช้แทนค่าความน่าจะเป็นทรานสิชั่นคือ P_{ij} จะเป็นความน่าจะเป็นเมื่อเปลี่ยนแปลงจากสถานะ i ไปสู่สถานะ j ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_{ij} \geq 0 \qquad i, j \geq 0 \qquad \sum_{j=0}^{\infty} P_{ij} = 1 \qquad i = 0,1...$$

การแสดงความน่าจะเป็นทรานสิชั่นของลูกโซ่มาร์คอฟ กระทำได้ 2 วิธีกล่าวคือ

2.1. การใช้ไดอะแกรมแสดงสถานะ (State Diagram) เช่น ไดอะแกรมแสดงสถานะของลูกโซ่มาร์คอฟสำหรับ 2 สถานะ แสดงดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-15 ไดอะแกรมแสดงสถานะและความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ

จากรูปที่ 2- 15 พบว่ากระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟประกอบด้วย สถานะทั้งสิ้น 2 สถานะ คือ S_1 และ S_2 จากแต่ละสถานะมีลูกศรชี้ไปยังสถานะอื่น และมีค่าความน่าจะเป็นทรานสิชั่นกำกับอยู่ ได้แก่

P_{11} หมายถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ S_1 ไปยังสถานะ S_1 หรืออีกนัยหนึ่งคือยังคงสถานะเดิม

P_{12} หมายถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ S_1 ไปยังสถานะ S_2

P_{21} หมายถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ S_2 ไปยังสถานะ S_1

2.2 การใช้เมตริกซ์ทรานสิชั่น (Transition Matrix) โดยที่เมทริกซ์จะถูกกำหนดความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Condition Probability) ของการอยู่ในสถานะอนาคต เมื่อกำหนดสถานะปัจจุบันมาให้จะมีลักษณะเป็น Square Matrix มิติ n คูณ n

ให้ P เป็นเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นครั้งแรก P_{ij}

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i0} & P_{i1} & P_{i2} & \dots \end{bmatrix} \quad (2\text{-}32)$$

3. Extent Distribution Probability , H_i หมายถึงความน่าจะเป็นบ่งบอกว่าความต่อเนื่องของค่าที่ได้จากการสำรวจในสถานะ i ที่ตำแหน่งที่สนใจ จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นความหนาแน่นการเปลี่ยนแปลง (Transition Intensity Coefficient , c_i) ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้พื้นฐานของกระบวนการมาร์คอฟที่กำหนดให้ PDF และ CDF มีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียน ดังสมการที่ 2-33 และ 2-34 ตามลำดับ

$$f_{Hi}(h) = c_i e^{-c_i h} \quad (2\text{-}33)$$

$$F_{Hi}(h) = 1 - e^{-c_i h} \quad (2\text{-}34)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นการเปลี่ยนแปลง (c_i) จะเป็นส่วนกลับของค่า Extent Distribution Probability (H_i)

แบบจำลองลูกโซ่มาร์คอฟเป็นการศึกษาถึงสถานะปัจจุบัน (State Space) และศึกษาถึงสถานะข้างหน้าที่กำลังจะเป็น (Move) ในขณะที่เริ่มต้นทำการศึกษาโดยสถานะในอนาคตของคุณสมบัติที่สนใจจะขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบันเท่านั้น ในขณะที่อิทธิพลต่างๆ ต่อสถานะปัจจุบันกำหนดให้คงที่ตลอดระยะเวลาศึกษาวิเคราะห์ ส่วนสถานะในอดีตที่ผ่านมาอาจจะเป็นผลสืบเนื่องมากจากปัจจัยที่แตกต่างไปจากสถานะปัจจุบันก็ได้

โดยทั่วไปสามารถจำแนกสถานะได้ 3 ประเภทด้วยกัน ดังนี้

1. สถานะทรานเซียนท์ (Transient State) คือสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

2. สถานะความคงตัว (Steady State) คือสถานะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไปไม่ว่าเวลาจะผ่านไปเท่าไร หรือจะเรียกว่าสภาวะดุลภาพก็ได้

3. สถานะดูดกลืน (Absorbing State) คือสถานะที่ถูกดูดกลืน เมื่อใดที่ลูกโซ่

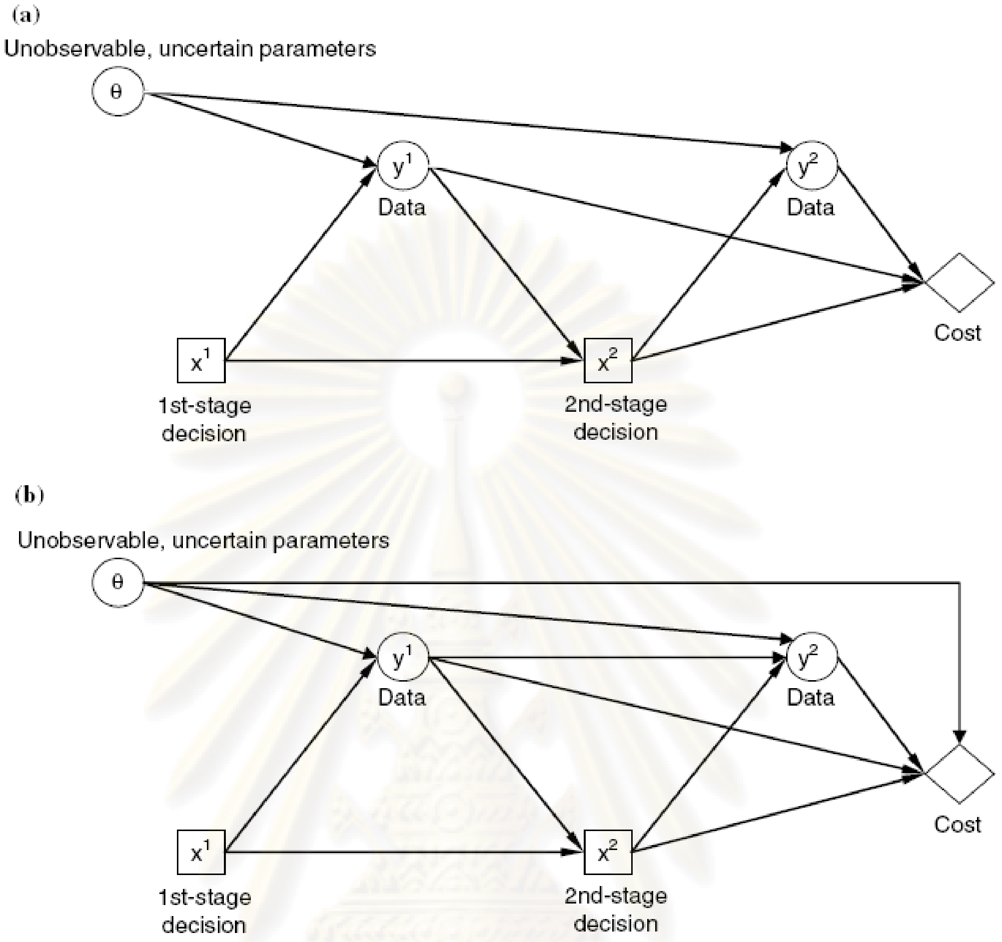
มาร์คอฟเข้าสู่สภาวะดูดกลืนนี้สถานะนี้ ดูดกลืนไว้ และไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นสถานะอื่นได้

2.4 ทฤษฎีเบส์ (Bayesian Theory)

ในปัจจุบันได้มีการเสนอวิธีวิเคราะห์ข้อมูลขึ้นมาใหม่หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ การวิเคราะห์แบบเบส์ (Bayesian Analysis) เข้ามาวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งแนวคิดแบบเบส์ (Bayesian Analysis) จะถือว่าพารามิเตอร์เป็นตัวแปรสุ่มตัวหนึ่งซึ่งมีการแจกแจงมีผลให้อนุมานค่าของพารามิเตอร์ต้องการตัวแบบสุ่มหรือตัวแบบความควรจะเป็น (Likelihood) และการแจกแจงก่อนพารามิเตอร์ (Prior Distribution) จากนั้นนำทั้งสองมาประกอบกันเพื่อหาการแจกแจงของพารามิเตอร์เมื่อกำหนดเงื่อนไขบนข้อมูลที่ถูกสุ่มมาหรือเรียกว่า การแจกแจงหลังพารามิเตอร์ (Posterior Distribution) ซึ่งต่อมามีนักสถิติจำนวนมากสนใจแนวคิดแบบเบส์ เนื่องจากแนวคิดที่ว่า เราทราบข้อมูลในอดีตที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์อยู่บ้าง และนำข้อมูลเหล่านี้มารวมกันเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองปัจจุบัน จะทำให้การอนุมานค่าพารามิเตอร์มีความถูกต้องมากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาแนวคิดแบบเบส์ไปสู่แขนงอื่นๆและในด้านวิศวกรรมมากขึ้น

ระบบกฎเกณฑ์ของโปรแกรมเบส์เซียน เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นที่นำมาประยุกต์กับการบริหารจัดการความเสี่ยงโดยการพัฒนาข้อมูลที่เก็บมาเพื่อช่วยลดความไม่แน่นอน (Uncertainties) ในกระบวนการตัดสินใจ หลักการทำงานจะเกี่ยวข้องกับการรวบรวมข้อมูลของแบบจำลองความน่าจะเป็นในกลุ่มของข้อมูล โดยสุ่มตัวอย่างที่ไม่ทราบค่า เพื่อจะได้ข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่างในตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งข้อมูลในตำแหน่งที่ได้จะมีความไม่แน่นอน (Uncertainties) เข้ามาเกี่ยวข้องในการตัดสินใจที่จะเลือกตำแหน่งการเก็บมูลใหม่ในการสุ่มครั้งต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-16 ผลของ diagrams สำหรับ Two-Stage Decision ด้วยการปรับปรุงผลของความไม่แน่นอน

ที่มา : Kenneth W.Harrison (2006)

จากรูปการวิเคราะห์เบส์เซียนจะพิจารณาการปรับปรุงของข้อมูลที่เกิดขึ้น จากความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ได้ซึ่งจะต้องการคุณภาพของความไม่แน่นอนในแบบจำลองและประมาณค่าที่เกิดจากความไม่แน่นอนที่ได้จากการใส่ข้อมูลเพิ่มเติม ในขอบเขตการทำงานของเบส์เซียนความน่าจะเป็นของตัวแปรที่สนใจจะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของก่อนการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง ซึ่งการพัฒนาความไม่แน่นอนสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีของเบส์ โดยกำหนดเป็น q จะเป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติของตัวแปรที่ได้จากการสุ่ม โดยค่า y จะบอกถึงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจในตำแหน่งที่ x^1 ส่วนค่า $p(q)$ เป็นตัวแทนของความน่าจะเป็นของ q ที่มีอยู่ก่อนหน้าการเก็บข้อมูล y การวิเคราะห์ของเบส์เซียนจะปรับปรุงความน่าจะเป็นที่มีอยู่ก่อน $p(q)$ ใช้ในการแสดงความน่าจะเป็น $p(q|y)$ ซึ่งจะพัฒนาไปตามกฎของเบส์

$$p(q|y) = \frac{p(y|q)\,p(q)}{\int_q p(y|q)\,p(q)dq} \qquad (2\text{-}35)$$

โดย q และ y เป็นเหตุการณ์ ในการวิเคราะห์เบส์เซียน ซึ่ง q คือสมมติฐานของตำแหน่ง i และ y คือข้อมูล ทางด้านซ้ายของสมการ, $p(q|y)$, เป็นค่า Posterior Probability ของสมมติฐานของตำแหน่ง i ซึ่งความน่าจะเป็นตามสมมติฐาน i อยู่บนภายใต้เงื่อนไขข้องมูล y และทางด้านขวาของสมการเป็นผลของค่าความน่าจะเป็นที่เป็นไปได้ (Likelihood Probability) ของข้อมูลจริงที่ได้จากสมมติฐาน , $p(y|q)$, และค่าความน่าจะเป็นก่อนหน้า (Prior Probability) , $p(q)$ การใช้กฎของทฤษฎีความน่าจะเป็นทั้งหมด (Total Probability Theorem) เพื่อที่จะให้ความน่าจะเป็นรวมกันมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งกฎของเบส์เซียน มีความสำคัญในมัลติสเตจเบส์เซียน ซึ่งจะมีกรอบการตัดสินใจ (Decision-Making) ในการนับจำนวนของผลความไม่แน่นอนที่จะแสดงผลออกมาก่อนการตัดสินใจในลำดับขั้นตอนพิจารณาต่อไป จากรูปที่ 2-16 แสดงให้เห็นขั้นตอนในระดับ Two Stage Decision-Making

ในการะบวนความคิดที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นและโอกาสที่จะเกิด จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการวิเคราะห์ทางเบส์เซียนซึ่งความน่าจะเป็น $p(q)$ ที่ต้องการในการวิเคราะห์ในการหาการกระจายของความไม่แน่นอนของผลการจำลอง โดยแบบจำลองจะกำหนดบริเวณใกล้เคียงค่าของ $p(y|q)$ จำเป็นต้องเท่ากับค่าของการทำนายแบบจำลองซึ่งจะพัฒนาเป็นตัวแทนของข้อเท็จจริง ปรากฏเป็นค่าตัวแปรสุ่ม เช่น การเปลี่ยนแปลงของการพบสารปนเปื้อน, การเปลี่ยนแปลงของหลุมเจาะ และตัวอย่างที่เกิดการผิดพลาด เป็นต้น ในการทำนายของแบบจำลองส่วนใหญ่ตัวแปรของการกระจายความน่าจะเป็นบรรยายถึงพฤติกรรมของความไม่แน่นอน และทำนายจะมีแนวโน้มให้ความสำคัญในการจำลองการทำนาย ในทางตรงกันข้ามในการวิเคราะห์ทางเบส์เซียน จะพิจารณาในส่วนพฤติกรรมที่มีความไม่แน่นอน และจะใช้แบบจำลองของพื้นที่ข้างเคียงเป็นหลักในการประเมินความน่าจะเป็นของข้อมูลหรือกลุ่มข้อมูล

การวิเคราะห์ทางเบส์เซียนจะคำนึงความน่าจะเป็นและการทำนายความน่าจะเป็น ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการระบุผลของความน่าจะเป็นทั้งหมด โดยมี $p(q,y)$ กำหนดให้

$$p(q,y) = p(q)\,p(y|q) \qquad (2\text{-}36)$$

ก่อนการทำนายความน่าจะเป็น $p(y)$ เป็นการประเมินด้วยเงื่อนไขของกฎความน่าจะเป็นทั้งหมดและรวมผลของ q

$$p(y) = \int_q p(q,y) = \int p(q)\,p(y|q)dq \qquad (2\text{-}37)$$

ซึ่งความน่าจะเป็นทั้งหมดนี้จะให้ผลของความไม่แน่นอนกลับมาอยู่ในรูปของ q และความไม่แน่นอนที่ใช้ในการทำนายของแบบจำลอง

การวิเคราะห์เบส์เซียนมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาด้านแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะให้สมมติฐานและความน่าจะเป็นก่อนหน้านี้ในสมการข้างต้น เพื่อนำมาปรับปรุงความน่าจะเป็นทางเลือกเมื่อให้ข้อมูลมา ถึงแม้ว่าทฤษฎีนี้มีความน่าสนใจในการวิเคราะห์เบส์เซียนในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม แต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากขาดหลักการที่มีประสิทธิภาพของเบส์เซียนโปรแกรมและขาดประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ การพัฒนาการรวมของความน่าจะเป็นทั้งหมดหรือความต่อเนื่องของการปรังปรุงข้อมูลซึ่งจะมีขนาดการรวบรวมข้อมูลที่ใหญ่

ในปัจจุบันความหลากหลายของวิธีการเบส์เซียนได้เพิ่มมากขึ้น การวิเคราะห์ได้รวบรวมความเป็นไปได้ของปัญหาซึ่งการะบวนการจะซับซ้อนขึ้นเมื่อมีขนาดมากกว่า 20 ตัวแปร ซึ่งการประมาณจะใช้วิธีของลาปราซเข้ามาช่วยในการคำนวณ แต่มีวิธีที่ให้ผลที่ดีกว่าในการประมาณก็คือ Monte Carlo Integration Method จะทำให้ผลของการประมาณค่าของข้อมูลทางสถิติของการเก็บข้อมูลซ้ำๆ เป็นตัวแทนของโอกาสที่จะเกิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหย ณ แหล่งกำเนิดการปนเปื้อนภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินและชั้นน้ำในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสโตแคสติคเป็นเครื่องมือในการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การจำลองเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

3.1.1 แบบจำลองสโตแคสติคด้วยวิธี SGS (Sequential Gaussian Simulation)

การจำลองเชิงสโตแคสติคด้วยวิธี SGS สามารถหาความสัมพันธ์เชิงพื้นที่โดยอาศัยหลักการคริกกิ้งโดยใช้ข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดินในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ค่า d_{10} และ ความพรุน โดยใช้โปรแกรม GMS 5.0 โดยมีขั้นตอนแสดงในดังรูปที่ 3-1

รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเชิงสโตแคสติควิธี SGS โดยใช้โปรแกรม GMS 5.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขการศึกษา (Boundary Conditions) ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงพื้นที่แบบ 3 มิติ โดยสร้างตารางกริดของพื้นที่ขนาด $10m \times 10m \times 8m$ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองในแต่ละเซต มีจำนวน 50 รูปแบบ (Realizations) ที่สามารถเป็นไปได้ในการเกิดเท่าๆกัน ขนาดโดเมนการจำลองมีจำนวนกริด $15 \times 10 \times 80$ จะมีขนาด Dimension ในแต่ละแนวแกนดังนี้

Dimension ในแนวแกน X = 0.667 m.

Dimension ในแนวแกน Y = 1.000 m.

Dimension ในแนวแกน Z = 0.100 m.

2. หาฟังก์ชั่นแวริโอแกรมเพื่อนำไปใช้ในสมการคริกกิ้ง โดยวิธี SGS นั้นจะใช้ตัวแปร 2 ตัวที่ได้จากข้อมูลดินจากตัวอย่างที่เก็บในพื้นที่ศึกษา คือ ค่าเฉลี่ยขนาดเม็ดดิน และค่าความแปรปรวน

3. จำลองรูปแบบโอกาสที่จะเกิดขึ้น 50 รูปแบบโดยใช้หลักการทางธรณีสถิติในการทำนายตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าของ d_{10} และ ความพรุน

4. จำลองค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้จากค่าที่ได้ในข้อ 3 โดยใช้สมการ Kozeny – Carman ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.1.2 แบบจำลองสโตแคสติคด้วยวิธี SIS (Sequential Indicator Simulation)

การจำลองลักษณะการกระจายตัวของดินในพื้นที่ศึกษาสามารถทำนายได้จากวิธีทางสโตแคสติคที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งตัวโปรแกรม GMS 5.0 สามารถจำลองเชิงพื้นที่ได้โดยใช้ฟังก์ชั่น Transition Probability Geostatistical Software (T-PROGS) ซึ่งใช้ภาษา FORTRAN ในการเขียนความน่าจะเป็นทางสถิติโดยใช้หลักการของ Markov Chains โดยใช้ในกระบวนการทางธรณีสถิติ (Geostatistic) ใช้หลักการของ Indicator Kriging มีวิธีการแบบวิธี SIS ในการจำลองรูปแบบความแปรปรวนในลักษณะต่างๆ โดยทั่วไปแล้ว T-PROG นั้นมีขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นดังนี้

1. คำนวณความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูล

2. วิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองโดยวิธีของลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains)

3. กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง

ในแต่ละขั้นตอนนั้นจะสามารถบรรลุเป้าหมายได้ตามคำสั่งต่อไปนี้

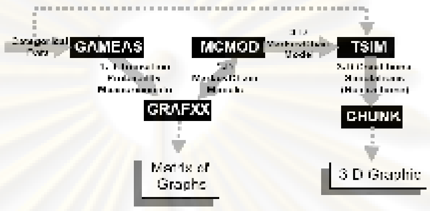
1. GAMEAS เป็นการใส่ค่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ เช่น Transition Probability, Indicator Cross - Variogram เป็นต้น

2. MCMOD เป็นการพัฒนารูปแบบของ 1 มิติและ 3 มิติความแปรปรวนของลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains)

3. TSIM เป็นการวิเคราะห์ในเชิง 3 มิติและเงื่อนไขความสัมพันธ์ของแบบจำลอง

4. GRAFXX เป็นการสร้างตารางเมทริก 1 มิติในทางการไม่เปลี่ยนแปลงทางสถิติ

5. CHUNK เป็นการแสดง 3 มิติที่เป็นตัวแทนในแสดงเงื่อนไขการจำลอง



รูปที่ 3-2 ลักษณะการทำงานของโปรแกรม T-PROG

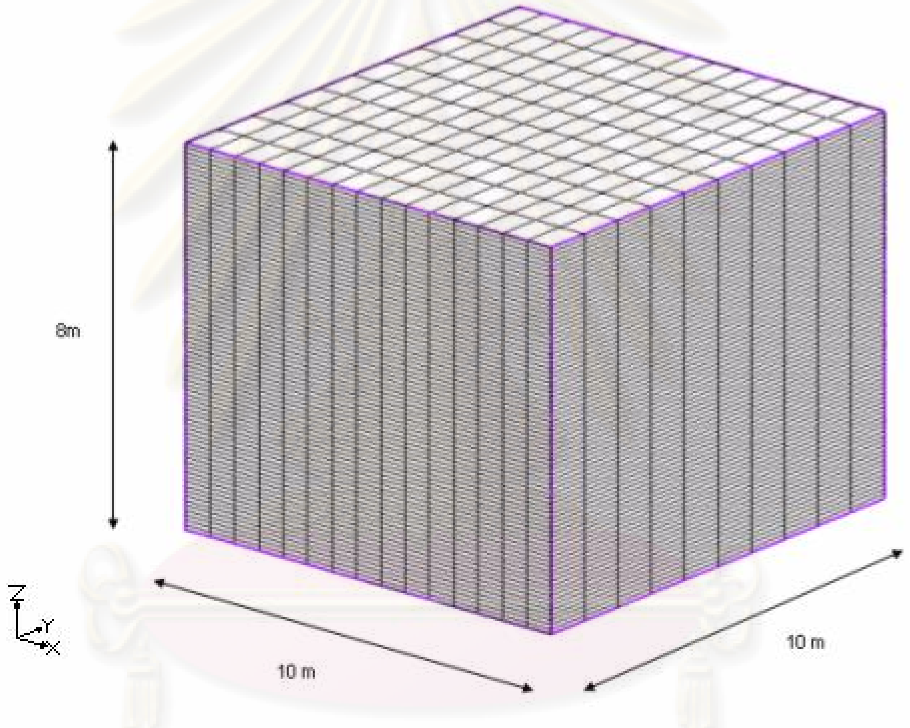
ที่มา : GMS 5.0 tutorial, T_PROG (1999)

3.1.2.1 **ขั้นตอนและข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง** T-PROG

รูปที่ 3-3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง T-PROGS

1. กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขการศึกษา (Boundary Condition) ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงพื้นที่แบบ 3 มิติ โดยสร้างตารางกริดของพื้นที่ขนาด $10m \times 10m \times 8m$ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองในแต่ละเซต มีจำนวน 50 รูปแบบที่สามารถเป็นไปได้โดยโอกาสเกิดเท่าๆกัน ขนาดกริด $15 \times 10 \times 80$ ดังรูปที่ 3-4 ซึ่งในแบบจำลอง จะมีขนาด Dimension ในแต่ละแนวแกน ดังนี้

Dimension ในแนวแกน X = 0.667 m.
Dimension ในแนวแกน Y = 1.000 m.
Dimension ในแนวแกน Z = 0.100 m.



รูปที่ 3-4 ตารางกริดในแบบจำลอง T-PROG

2. กำหนดตัวแปรที่เป็นข้อมูลนำเข้าในโปรแกรม T-PROG เช่นค่าความพรุนและค่า d_{10} แบ่งเป็น 5 กลุ่ม ซึ่งใช้หลักการจัดกลุ่มด้วยวิธี KMEAN เพื่อเป็นการแยกลักษณะการกระจายของเม็ดดินและตำแหน่งหลุมสำรวจในพื้นที่ศึกษาดังรูปที่ 3-5 และ 3-6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Central objects

Class	d10(um)
1	264.100
2	224.500
3	189.800
4	154.600
5	101.900

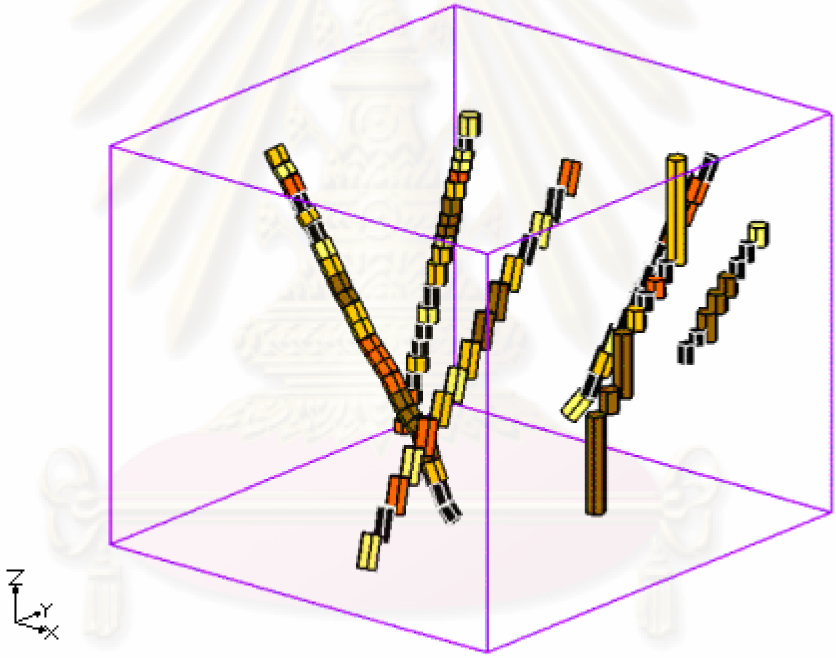
d10

Central objects

Class	Porosity
1	0.380
2	0.369
3	0.359
4	0.347
5	0.318

Porosity

รูปที่ 3-5 ตำแหน่งค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มของทั้ง d_{10} และความพรุน



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งหลุมสำรวจที่ขุดสำรวจในพื้นที่ศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. กำหนดคุณสมบัติในการกระจายของเม็ดดิน โดยการกำหนดคุณสมบัติให้แตกต่างกันในแต่ละเซตเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของดินเชิงพื้นที่ดังตารางที่ 3-1 จำนวนแบบจำลองเชิงพื้นที่ของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้โดยกำหนดความแตกต่างกันในแต่ละเซตใน Reference Set กำหนดให้ค่าความพรุนคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ตามเงื่อนไขของวิธี SGS การที่กำหนดให้รูปแบบนี้เป็น Reference Set เนื่องจากใช้ค่าที่ทดสอบจากสนามและในห้องปฏิบัติการและใช้ข้อมูลจากการกระจายตัวของเม็ดดินในพื้นที่ศึกษา ส่วนในเซตที่ 1 จะแตกต่างกับ Reference Set กันตรงที่การหาค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ด้วยวิธี SIS ส่วนทั้งในเซตที่

1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 กำหนดค่าความพรุนแตกต่างกันในแต่ละวิธี ในการกำหนดเซตของการจำลองค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ทั้ง 4 เซตเนื่องจากข้อมูลภาคสนามยังไม่เป็นตัวแทนเชิงพื้นที่ที่เพียงพอเพราะเป็นข้อมูลแบบจุด (Point Sampling) ซึ่งในแต่ละเซตได้จากผลการศึกษาของ Gooveart (1999) สรุปเกี่ยวกับจำนวนของแบบจำลองที่ควรใช้ เมื่อจำนวนโอกาสที่จะเกิดในแต่ละแบบจำลองจำนวนไม่เกิน 20 Realizations จะได้ข้อมูลที่มีความแปรปรวนของข้อมูลที่สูงและไม่คงที่ แต่ถ้าหากแบบจำลองมากกว่า 20 Realizations ความแปรปรวนของข้อมูลจะเข้าใกล้ค่าคงที่ เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของตัวแปรอิสระจะมีผลต่อจำนวน Realizations จากการทดสอบจำนวน Realizations ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ศึกษานี้คือ 50 Realizations ที่ทำให้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่

ตารางที่ 3-1 รูปแบบของตัวแปรในแต่ละแบบจำลอง

Set	Reference Set	Set 1	Set 2	Set 3
porosity (f)	uniform	uniform	random (SGS)	random (SIS)
hydraulic conductivity	SGS k =f(d_{10})	SIS k = f(d_{10})	SIS k = f(d_{10} , f)	SIS k = f(d_{10} , f)
realizations	50	50	50	50

3.2 แบบจำลอง UTCHEM

แบบจำลอง UTCHEM (A Three - Dimension Chemical Flood Simulator) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารปนเปื้อนและการฟื้นฟูสภาพจากการปกคลุมของน้ำมันในชั้นหินให้น้ำ มีการเริ่มต้นพัฒนาจาก Nelson and Pope (1978) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการฟื้นฟูสภาพของพื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วยน้ำมัน ต่อมา Bhuyan et al. (1990) ได้พัฒนาแบบจำลองซึ่งมีการเพิ่มในส่วนของกระบวนการทางเคมีในสถานะของเหลวและของแข็ง และReservoir Engineering Research Program Center for Petroleum and Geosystem Engineering The University of Texas (2000) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาถึงการแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์ปิโตเลียมในน้ำบาดาล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีชื่อว่า UTCHEM

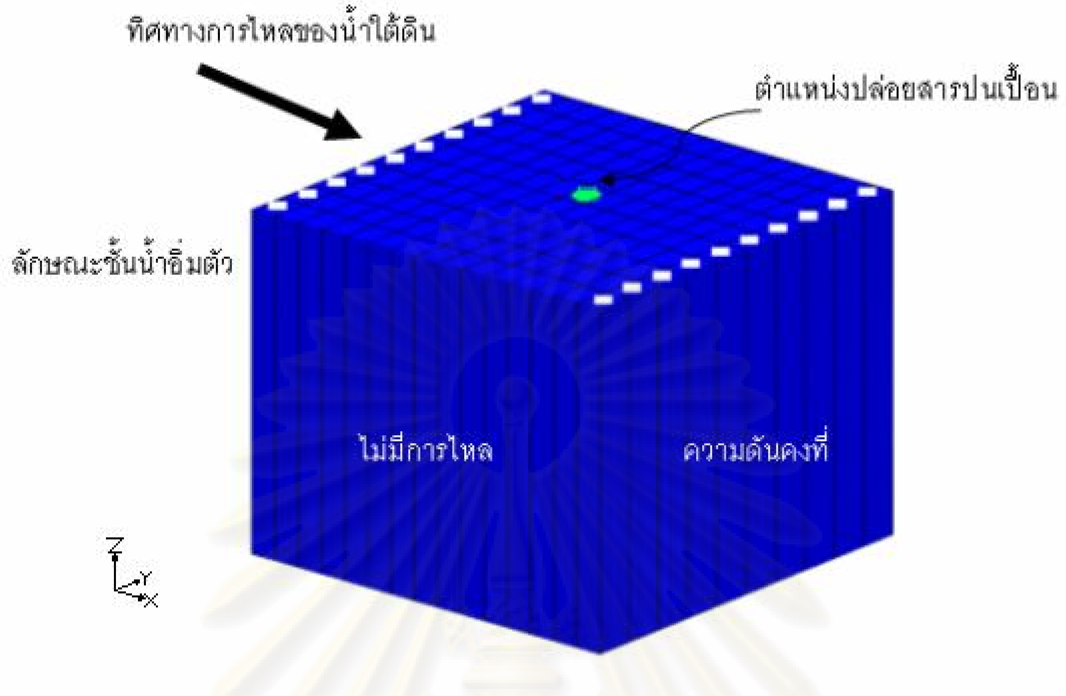
3.2.1 ขั้นตอนและข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM จะแบ่งเป็น 4 ส่วน ในแต่ละขั้นตอนอธิบายดังนี้

รูปที่ 3-7 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง UTCHEM

1. กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขการศึกษา (Boundary Condition) เป็นการกำหนดขอบเขตของการศึกษา ด้วยการสร้างกริดเซลล์ขึ้นในแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับโปรแกรมในส่วนของการจำลองเชิงพื้นที่ รวมทั้งกำหนดสถานะของขอบเขตเช่น ขอบเขตที่ไม่มีการไหล ขอบเขตที่มีการไหลเข้าโดยให้เป็นความดันคงที่ในหน้าตัดการไหล กำหนดชั้นน้ำให้เป็นแบบอิ่มตัวด้วยน้ำ และไม่มีการไหลด้านบนและด้านล่างของแบบจำลองโดยด้านบนของแบบจำลองให้ความดันคงที่ ดังรูปที่ 3-8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-8 ขอบเขตเงื่อนไขของแบบจำลอง UTCHEM

2. กำหนดจุดปล่อยสารปนเปื้อน การจำลองการปล่อย PCE, TCE และ Mixed Waste (เป็นตัวแทนของ DANPL ที่ใช้ในการศึกษา) ได้จำลองโดยใช้โปรแกรม UTCHEM ใน 2 มิติที่มาจากแบบจำลอง 3 มิติทางธรณีสถิติ (ที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้) ในแต่ละรูปแบบกำหนดให้อัตราการปล่อยสารปนเปื้อนมีค่าเท่ากับ 96 ลิตร บนพื้นที่ 0.3 ตารางเมตร โดยปล่อยด้านบนของพื้นที่วันละ 240 มิลลิลิตรต่อวัน ในช่วงเวลา 400 วัน และอีก 330 วันเพื่อให้เกิดการซึมและการตกค้างของ DNAPLในระบบ

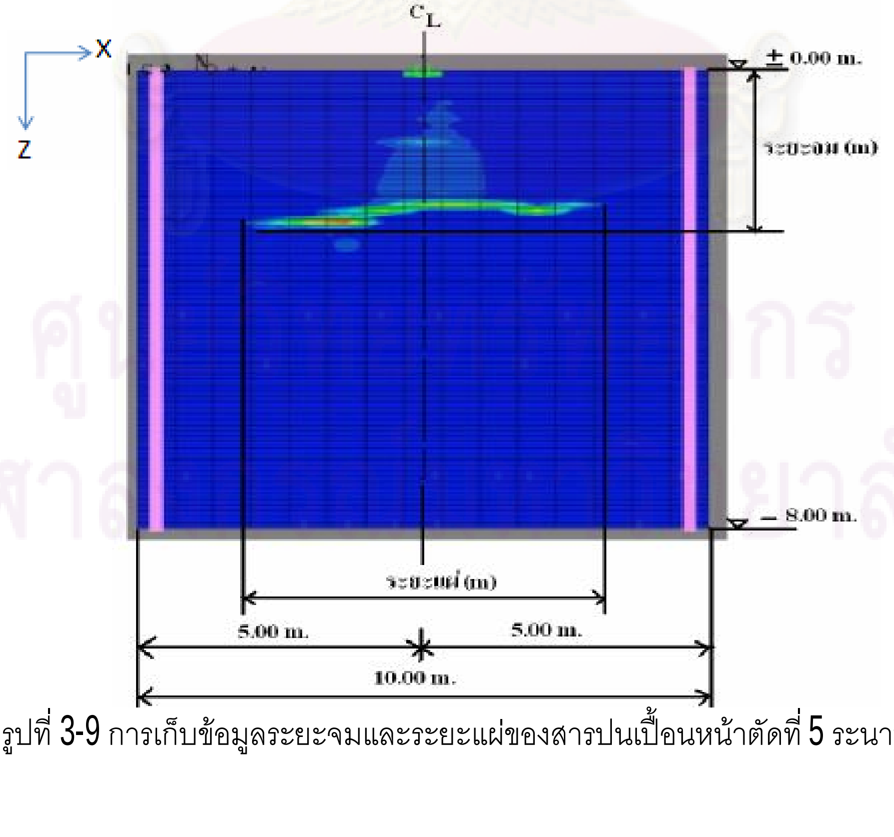
3.คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารปนเปื้อน (Physical Properties) เช่น ความหนืด, ความถ่วงจำเพาะ, การแพร่, ความสามารถในการละลายน้ำ, ตัวประกอบความหน่วง เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจาก Bachman road Oscoda, Michigan (Lemke and Abriola 2003; Lemke et al. 2004, 2005) เนื่องจากมีหลักฐานการปนเปื้อนในชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินด้วยสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ระเหยและมีการเก็บข้อมูลที่ละเอียด ทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการซึ่งลักษณะคุณสมบัติของ DNAPL ที่ใช้ในแบบจำลอง UTCHEM แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ลักษณะคุณสมบัติของ DNAPL ที่ใช้ในแบบจำลอง UTCHEM

	Density (kg/m^3)	Dynamic Viscosity (cp)
Water	0.998	1.00
Trichloroethylene (TCE)	1.462	0.57
Tetrachloroethylene (PCE)	1.623	0.89
Mix Waste	1.386	0.58
Toluene	0.8669	-
2-Chlorotoluene	1.0825	-
1-Bromohexane	1.1744	-
1-Bromoheptane	1.1400	-

4. คุณสมบัติของชั้นน้ำใต้ดิน (Aquifer Characteristics) เช่น ความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ข้อมูลได้มาจากการวิเคราะห์จากโปรแกรม T-PROG และแปลงค่าความพรุนและค่า d_{10} โดยใช้สมการของ $K-C$ ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

5. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม UTCHEM จำนวน Realizations ทั้งหมด 600 กรณี ทั้งหมด 3 สาร สารละ 200 กรณี ผลการจำลองสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในลักษณะการกระจายแนวราบ การซึมแนวดิ่ง และความเข้มข้นกำหนดลักษณะการเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 การเก็บข้อมูลระยะจมและระยะแผ่ของสารปนเปื้อนหน้าตัดที่ 5 ระนาบ $X-Z$

C_L คือเส้นแนวกลางของรูปในหน้าตัด $i = 5$ จากทั้งหมด 10 หน้าตัดของแต่ละ Realizations ที่จะทำการเก็บข้อมูลเนื่องจากหน้าตัดที่ 5 ระนาบ $X - Z$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปล่อยสารปนเปื้อนและพิจาณาหน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลของน้ำใต้ดิน กำหนดให้ผิวบนของแบบจำลองเท่ากับระดับของน้ำใต้ดิน เนื่องจากกำหนดให้เป็นพื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งระยะจากผิวบนของแบบจำลองจนถึงด้านล่างของแบบจำลอง ระยะแผ่ของสารปนเปื้อนทำการเก็บจากความกว้างของช่วงที่มีสารกระจายออกในแนวราบของหน้าตัด(B) ในหน่วยเมตร และ ระยะจมของสาร จะทำการเก็บจากระยะที่สารมีการจมตัวลึกที่สุดที่ปรากฏในหน้าตัดนี้ จากผิวบนของแบบจำลอง (d) ในหน่วยเมตร

3.3 แบบจำลองมัลติสเตจเบส์เซียน

3.3.1 ส่วนประกอบของกระบวนการมาร์คอฟ

3.3.1.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter Estimation)

การหาค่า P_{ij} และ c_i สามารถหาได้โดยตรงหรือคำนวณมาจากค่าทางสถิติจากการลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่มีอยู่ก่อน เช่นในกรณีที่มีแผนที่ธรณีวิทยา ค่า c_i สามารถหาได้จากส่วนกลับของความน่าจะเป็นความต่อเนื่อง (H_i) ในแต่ละสถานะนั้นๆ และค่า P_{ij} สามารถประมาณได้จากการวาดแนวเส้นขนานกับพื้นที่ที่มีการขุดสำรวจ ก็คือระยะห่างระหว่างความเป็นอิสระต่อกันระหว่างจุดทั้งสองที่ใช้พิจารณา Ioannou (1987) โดยสามารถเขียนในรูปแบบสัดส่วนดังนี้

$$P_{ij} = \frac{\text{จำนวนของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะ } i \text{ ไปในสถานะ } j \text{ (พบเจอการปนเปื้อนและไม่พบเจอการปนเปื้อน)}}{\text{จำนวนทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ออกจากสถานะ } i} \tag{3-1}$$

ซึ่งในส่วนนี้จะนำมาใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้นในกระบวนการมาร์คอฟในการหาความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็นเมตริกซ์ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3-2}$$

$$c_i = \begin{bmatrix} 1/H_1 \\ 1/H_2 \end{bmatrix} \tag{3-3}$$

H_1 คือ ระยะทางที่พบเจอการปนเปื้อนในแต่ละความลึก

H_2 คือ ระยะทางที่ไม่พบเจอการปนเปื้อนในแต่ละความลึก

$$A = [a_{ij}] \text{ ซึ่ง } i, j = 1,2,..,n$$

$$\text{โดยที่ } a_{ij} = \begin{bmatrix} -c_i & c_i P_{ij} \\ c_i P_{ij} & -c_i \end{bmatrix}$$

โดยกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟกำหนดให้ขอบเขตเป็นลักษณะเดียวกันด้วยข้อมูลที่มีอยู่ในอดีต ค่า P_{ij} และ c_i เป็นอิสระต่อกันในแต่ละตำแหน่ง t ถ้าในพื้นที่ศึกษามีลักษณะเนื้อเดียวกันในบางพื้นที่จะต้องแยกกรณีในการพิจารณาตัวแปรในแต่ละพื้นที่ ซึ่งการวิเคราะห์พิจารณาในการประยุกต์ของความสัมพันธ์และวิธีนี้สามารถใช้ได้โดยการศึกษาของ Chan (1981)

3.3.1.2 **พื้นฐานของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง** (Basic Multitransition Probability)

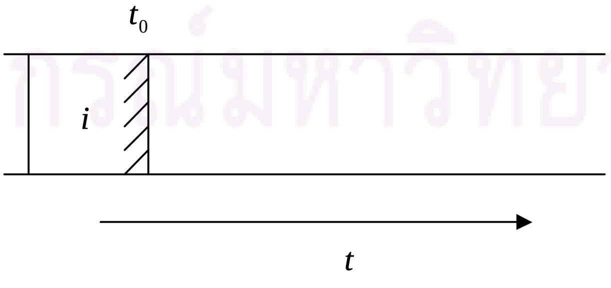
พฤติกรรมความน่าจะเป็นของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ $X(t)$ ที่มีจำนวนการเปลี่ยนแปลงมากสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ของช่วง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็น $V(t_0, t)$ ดังสมการ

$$V(t_0,t) = [v_{ij}(t_0,t)]; V(t_0,t) i, j = 1,2,...,n \qquad (3\text{-}4)$$

ซึ่งค่าช่วงระหว่างการเปลี่ยนแปลงความน่าจะเป็น

$$v_{ij}(t_0,t) = v_{ij}(t - t_0) = P[X(t) = j | X(t_0) = i] \qquad (3\text{-}5)$$

คือความน่าจะเป็นของประบวนการที่จะเกิดในระดับ j ที่ตำแหน่ง t โดยให้ระดับในการเกิด i ที่ตำแหน่งสังเกต $t_0 (t \geq t_0)$ ดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 การทำนายการเปลี่ยนสถานะต่อไปเมื่อให้สถานะที่ทราบค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง $V(u)$ ของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟสามารถหาได้โดยใช้สมการแชพแมนโคลโมโกรอฟ (Chapman - Kolmogorov Equations)

$$\frac{dV(u)}{du} = V(u)A \tag{3-6}$$

ซึ่งในสามารถแก้สมการได้โดยผลเฉลยรูปแบบปิด (Closed form Solution)

$$\begin{aligned} V(u) &= e^{uA} \\ &= I + uA + (1/2!)u^2A^2 + \ldots + (1/m!)u^mA^m + \ldots \end{aligned} \tag{3-7}$$

ซึ่งค่า I คือเมตริกซ์เอกพจน์ขนาด n และ $u = t - t_0$ ซึ่งการกระจายของค่า $V(u)$ สามารถสร้างโดยใช้การแก้ปัญหาโดยระบุตัวแปร A (Cox, 1995) หรือใช้การถ่ายเปลี่ยนของรูปแบบฟังก์ชั่นเอ็กโพเนนเชียน (Howard, 1960;1971)

ความน่าจะเป็นของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ $X(t)$ จะมีโอกาสเกิดในแต่ละสถานะของ j ที่ตำแหน่ง t ซึ่งจะไม่มีผลของระดับที่ i ที่ตำแหน่ง t_0 ที่กำหนดให้จำนวนเวกเตอร์ของแถวของสถานะขอบเขตความน่าจะเป็น (Marginal State Probability) $S(t)$

$$S(t) = [s_j(t)]; \qquad j = 1,2,\ldots,n \tag{3-8}$$

ซึ่ง
$$s_j(t) = P[X(t) = j] \tag{3-9}$$

$$\begin{aligned} S(t) &= S(t_0)V(t_0,t) \\ &= S(t_0)e^{(t-t_0)A} \end{aligned} \tag{3-10}$$

$S(t_0)$ คือสถานะขอบเขตความน่าจะเป็นที่ตำแหน่ง t_0 ในขณะที่ ค่าระหว่าง $t - t_0$ เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความน่าจะเป็น ในสถานะจะไม่ส่งผลต่อความน่าจะเป็นของสถานะในอนาคต ซึ่งถ้า $t - t_0$ มีค่ามากจนนับไม่ได้ จะได้ความน่าจะเป็นของความแน่นอนในสถานะ j ที่ตำแหน่ง t มีข้อกำจัดและเป็นอิสระจากสถานะ i ซึ่งเรียกว่า "เวกเตอร์ข้อจำกัดในระดับความน่าจะเป็น $S*$" สามารถแก้ปัญหาได้โดยถือว่าระบบมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของแบบจำลองสมการเชิงเส้น

$$S*P = 0 \tag{3-11}$$

$$s_1^* + s_2^* + \ldots + s_n^* = 1 \tag{3-12}$$

ลักษณะทางการภาพของ s_n^* จะมีความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ในโอกาสที่จะเกิดในระดับ j

3.3.1.3 **การปรับการทำนายสถานะ** (Updating State Predictions)

ในการประมาณพารามิเตอร์ของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ P_{ij} และ c_i ตำแหน่งที่ใช้ในการสังเกตจะถูกนำมาใช้ในการทำนายตัวแปรทางธรณีในระดับที่สนใจโดยการ

ปรับปรุงค่าสถานะของความน่าจะเป็น $S(t)$ ภายใต้กระบวนการเบส์เซียน ในการประมาณตัวแปรทางธรณีในตำแหน่งที่มีการสังเกตจะให้ผลที่มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นในสถานะนั้นๆ โดยการทำนายความน่าจะเป็นในแต่ละตำแหน่ง จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นระยะทางจากจุดสังเกตและสถานะความน่าจะเป็นในแต่ละตำแหน่ง

ค่าความน่าจะเป็นภายหลัง (Posterior Probability) ของสถานะตัวแปรทางธรณีในแต่ละจุดสังเกตสามารถหาได้โดยใช้กระบวนการดังนี้

1. มาจากข้อกำหนดสมมติฐานของผู้เชียวชาญทางด้านธรณี
2. การปรับปรุงโดยใช้หลักการของเบส์โดยจะขึ้นอยู่กับรูปแบบควรจะเป็น (Reliability) ที่มาจากจุดสังเกต

ซึ่งกระบวนการปรังปรุงค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรทางธรณี ในแต่ละจุดตามระยะทางที่มีการสำรวจซึ่งเป็นกระบวนการพื้นฐานของวิธีของเบส์ สำหรับการหาค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงหลังพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งสำรวจ

3.3.2 เมตริกซ์ควรจะเป็น (The Likelihood (Reliability) Matrix)

ค่าเมตริกซ์ของรูปแบบควรจะเป็นของวิธีการขุดสำรวจสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$L_{jk}(t_b) = P[Y(t_b) = k | X(t_b) = j]; \quad j = 1,2,\ldots,n; k = 1,2,\ldots,m \tag{3-13}$$

ซึ่ง n คือจำนวนระดับที่เป็นไปได้สำหรับตัวแปรแต่ละตัวทางธรณี $X(t_b)$ และ m เป็นจำนวนระดับที่เป็นไปได้สำหรับจุดสังเกต $Y(t_b)$; t_b คือตำแหน่งของจุดสังเกต $Y(t_b)$; $Y(t_b)$ คือค่าสังเกตที่ตำแหน่ง t_b ที่จะอธิบายระดับของตัวแปรทางธรณี $X(t_b)$; $X(t_b)$ คือค่าจริงของระดับตัวแปรทางธรณีที่ตำแหน่ง t_b และค่า $L_{jk}(t_b)$ เป็นค่าของรูปแบบควรจะเป็นของจุดสังเกตในระดับ k ที่ตำแหน่ง t_b โดยกำหนดให้ค่าจริงของตัวแปรที่ระดับนั้นคือ j

โดยทั่วไปแล้วจำนวนจุดสังเกตในระดับ m จะมีจำนวนไม่เท่ากับจำนวนตัวแปรทางธรณีที่ระดับ n ซึ่งอธิบายได้ว่าในกรณีที่ $m \geq n$ จะให้ผลของความถูกต้องของจุดสังเกตมากกว่าในกรณี $m < n$ สำหรับกรณีที่อธิบายข้างต้นค่าเมตริกซ์ควรจะเป็น $L_{jk}(t_b)$ จะไม่มีส่วนร่วมที่ชัดเจนด้วยรูปแบบตัวแปรทางธรณีหรือขั้นตอนการสำรวจ ยังไรก็ตามความแตกต่างของค่าเมตริกซ์ของรูปแบบควรจะเป็นจะต้องระบุทุก ๆ วิธีสำรวจและตัวแปรทางธรณี ค่าเมตริกซ์ของรูปแบบควรจะเป็นส่วนใหญ่จะกำหนดให้เป็นฟังก์ชั่นของตำแหน่ง t_b ซึ่งค่าของรูปแบบควรจะเป็นของวิธีการสังเกตอาจจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขทางธรณีในพื้นที่ศึกษาและไม่เพียงแต่ตัวแปร ที่มีการสังเกตเท่านั้นที่จะมีผลต่อตัวแปรของรูปแบบควรจะเป็นของจุดสังเกตและดัง เช่น ปัญหาของแบบจำลองทั่วไป

3.3.3 อธิบายกระบวนการปรับปรุงโดยหลักการเบส์ (Iterative Bayesian Updating Approach)

ในกระบวนการปรับปรุงค่าที่ได้จากการสังเกตแทนที่จะพิจารณาทุกตำแหน่ง ในแบบจำลอง เพื่อให้มีความสะดวกในการปรับปรุงระดับความน่าจะเป็นในแต่ละตำแหน่งเป็นลำดับแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจำนวนตำแหน่งที่มีการปรับปรุงต้องการผลของแต่ละ q และ $q+1$ ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่มีการสังเกต t_0 (กำหนดให้เป็นหลุมแรกของการสำรวจ) สำหรับขั้นตอนในการหาความน่าจะเป็นที่มีค่าจริงของระดับตัวแปรตำแหน่งที่สนใจหรือในอนาคต t_r คือ $X(t_r)=i$ เมื่อกำหนดให้มีหลุมสังเกต $Y(t_b)=k$ ที่ตำแหน่ง t_b

$$s_i(t_r) = P[X(t_r)=i \mid Y(t_b)=k];\ i=1,2,\ldots,n; r=1,2,\ldots,q \tag{3-14}$$

สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีของเบส์ดังสมการ

$$s_i^{'}(t_r) = \begin{cases} \dfrac{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) v_{ij}(t_r,t_b) s_i(t_r)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)}; & t_r < t_b \\ \dfrac{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) v_{ji}(t_b,t_r) s_j(t_b)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)}; & t_b < t_r \\ \dfrac{L_{ik}(t_b) s_i(t_b)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)}; & t_r = t_b \end{cases} \tag{3-15}$$

ที่มา : Ioannou (1987)

จากสมการข้างต้นอธิบายกระบวนการปรังปรุงระดับความน่าจะเป็น $s_i^{'}(t_r)$ ที่ทุกจุดของตำแหน่งที่มีการสังเกต t_r ซึ่งด้านขวาของสมการกำหนดให้เป็นความน่าจะเป็นการแจกแจงก่อนพารามิเตอร์ที่จะมีการสำรวจ แต่ค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงหลังพารามิเตอร์ที่พิจารณาก่อนหน้านี้ โดยกำหนดให้มีจำนวนจุดสังเกต q ตำแหน่ง ความน่าจะเป็นของระดับที่ทุกจุด q หรือ $q+1$ ตำแหน่งต้องมีการปรับปรุง q ครั้ง ในแต่ละการสังเกต

ส่วนค่า $v_{ij}(t_r, t_b)$ ในทางด้านขวาของสมการต้องมีการปรับปรุงค่าเป็นจำนวนรอบตั้งแต่มีการปรับปรุงค่าระดับความน่าจะเป็นโดยขึ้นอยู่บนพื้นฐานของหลุมที่มีการสังเกตในตำแหน่งต่อไป นอกจากนี้ค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงต้องเขียนในรูป $v_{ij}(t_r, t_b)$ ไปเป็น $v_{ij}(t_b - t_r)$ ซึ่งการเปลี่ยนรูปแบบนี้มีความจำเป็นเพราะว่าค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงหลังพารามิเตอร์จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างตำแหน่งที่มีการสังเกต (เหมือนกันกรณีของวิธีการลูกโซ่มาร์คอฟ) แต่จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดสังเกต

ความน่าจะเป็นที่ค่าจริงของระดับตัวแปรทางธรณีที่จุดสังเกตตำแหน่ง t_w ในระดับ j ที่ให้ค่าระดับที่แท้จริงที่ตำแหน่ง t_r คือ i และระดับ k ที่ถูกสังเกต ณ ตำแหน่ง t_b ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงค่าของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง

$$v'_{ij}(t_r, t_w) = P[X(t_w) = j \mid X(t_r) = i, Y(t_b) = k]; \qquad (3\text{-}16)$$

$$i, j = 1,2,\ldots,n; r, w = 1,2,\ldots,q$$

ในกรณีที่ $t_r < t_w$ สามารถใช้วิธีตรงของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ วิธีทางคณิตศาสตร์ของความน่าจะเป็นสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$v'_{ij}(t_r, t_w) = \begin{cases} v_{ij}(t_r, t_w); & t_b < t_w \\ \dfrac{\sum_{h=1}^{n} L_{hk}(t_b) v_{jh}(t_w, t_b) v_{ij}(t_r, t_w)}{\sum_{h=1}^{n} L_{hk}(t_b) v_{ih}(t_r, t_b)} & t_r < t_w < t_b \end{cases} \qquad (3\text{-}17)$$

ที่มา : Ioannou (1987)

ค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลง $v_{ij}(t_r, t_b)$ ทางด้านขวาของสมการคือค่าก่อนที่มีการสังเกต $Y(t_b)$ และค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงหลังพารามิเตอร์ของตำแหน่งที่มีการพิจารณาแล้วซึ่งจะพิจารณาเป็นรอบการทำซ้ำ โดยที่ขั้นตอนจะเหมือนกับสมการที่ (3-17)

ในกระบวนการปรับปรุงข้อมูลระดับความน่าจะเป็นทุกตำแหน่ง q หรือ $q+1$ โดยเริ่มต้นที่การกำหนดให้ไม่มีตำแหน่งสังเกตที่จะเข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าของ $v_{ij}(t_r, t_b)$ และ $s_i(t_r)$ มาจากการสมมติจากค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงและข้อกำจัดของระดับความน่าจะเป็นมาจากกระบวนการของลูกโซ่มาร์คอฟ หลุมสังเกตจาก q หลุมสามารถกำหนดให้

เพิ่มข้อมูลจากค่าที่ทราบ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นการแจกแจงหลังพารามิเตอร์คือ $v_{ij}^{'}(t_r, t_b)$ และ $s_i^{'}(t_r)$ สามารถหาได้จากสมการที่ (3-15) และ (3-17) ซึ่งผลของ $s_i^{'}(t_r)$ และ $v_{ij}^{'}(t_r, t_b)$ จะกลายเป็นค่าความน่าจะเป็นก่อนการพิจารณาในตำแหน่งสังเกตต่อไปที่มีการสำรวจ และทำซ้ำจนถึง จำนวน q ที่พิจารณา ซึ่งค่าสุดท้ายของ $s_i^{'}(t_r)$ และ $v_{ij}^{'}(t_r, t_b)$ จะเป็นความน่าจะเป็นที่เจอสารปนเปื้อน

3.3.4 แบบจำลองการทำนายโอกาสพบการปนเปื้อน

ในขั้นตอนการนำข้อ (Input) ข้อมูลตามสมการ (3-15) จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ชั้นน้ำเข้าในแบบจำลองทางธรณีของสารปนเปื้อนและจัดให้มีผลลัพธ์ ในขั้นตอนการคำนวณ ที่จะหาลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนที่ได้จากแบบจำลอง โดยข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในแบบจำลองมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่ใช้ในทางธรณีวิทยา ซึ่งการศึกษานี้ กำหนดให้เป็นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนซึ่งกำหนดระดับของตัวแปรคือ เจอสารปนเปื้อน คือค่ามากกว่า 0.0001 VF กับไม่เจอสารปนเปื้อน น้อยกว่า 0.0001 VF ของกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Process) แบบ Continuous – Space, Discrete - State

2. ประมาณค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง P_{ij} และสัมประสิทธิ์ความน่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลง c_i สำหรับในแต่ละตัวแปรที่สถานะความเป็นไปได้ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถหามาได้จาก 3 วิธีการดังนี้ 1) ใช้การประมาณจากผู้เชียวชาญทางด้านธรณีวิทยา 2) ใช้ข้อมูลทางสถิติที่มาจากข้อมูลแผนที่ธรณีเก่า 3) การรวบรวมทั้ง 2 วิธีข้างต้น

3. ระบุจำนวนของจุดที่มีข้อมูล m ตำแหน่ง และค่าเมตริกซ์ควรจะเป็น (Likelihood Matrices) $L_{jk}(j = 1,2,...,n; k = 1,2,...,m)$ รวมด้วยค่าที่ตำแหน่งมีการสังเกตและตัวแปรทางธรณี ซึ่งจำนวนระดับของการสังเกตและค่าความควรจะเป็นของข้อมูลในพื้นที่ศึกษา

4. กำหนดจำนวนที่เป็นตำแหน่งของการสังเกต q ตำแหน่งแต่ละตัวแปรทางธรณี ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับตำแหน่งที่มีการสังเกต t_b และระดับของการสังเกต $Y(t_b) = k_b$ ซึ่งจากข้อมูลที่ใช้ในการทำนายพื้นที่สารปนเปื้อนมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

ค่า P_{ij} และ c_i แต่ละตัวแปรใช้ในการสร้างเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะใช้ในการหาค่า $V(t_0, t)$, ค่า $S(t)$ และ $S*$ ในกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟโดยใช้สมการที่ (3-7), (3-10), (3-11) และ (3-12)

หนึ่งในจำนวนตำแหน่งที่มีการสังเกตทั้งหมด q ซึ่งคือค่า $Y(t_b)$ ได้เพิ่มในตำแหน่งที่มีการสำรวจจริงและปรับปรุงค่าระดับความน่าจะเป็น $s_i^{'}(t_r)$ ทุกๆจุดที่มีการสังเกต ณ ตำแหน่ง t_r และที่ t_0 โดยใช้สมการที่ (3-15) ปรังปรุงค่าความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลง

$v'_{ij}(t_r,t_b)$ ทุกตำแหน่งจากการรวบรวมจุดสังเกต t_r และ t_w โดยหาจากสมการที่ (3-17)

ในขั้นตอนที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ทำซ้ำเป็นลำดับทุกๆ q ที่มีการเพิ่ม หลุมสังเกต ณ ที่ t_r และสำหรับทุกตัวแปรทางธรณี ซึ่งค่าความน่าจะเป็นก่อนหน้านี้ที่ทุกตำแหน่งจะกลายเป็นค่า $V(t_0,t)$ และ $S(t)$ ในขั้นตอนที่ 4.1

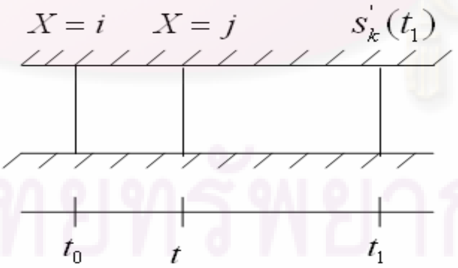
4.3 ใช้สมการที่ (3-13) ในการหาค่าปรับปรุงระดับความน่าจะเป็น $s_j(t\ )$ โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงหลังพารามิเตอร์ โดยจะขึ้นอยู่กับ การปรับปรุงความน่าจะเป็นสถานะ $s'_j(t_r)$ ที่ตำแหน่งสังเกต ซึ่งกลุ่มความน่าจะเป็นหลังตัวแปรพารามิเตอร์ทุกๆจุดตามแนวของการสำรวจจะอยู่ในรูปของความน่าจะเป็นของความเข้มข้นสารปนเปื้อน ของพื้นที่ศึกษา

5. การทำนายความน่าจะเป็นที่จะเจอสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งที่ไม่มีการสำรวจ ซึ่งจำเป็นจะต้องได้ค่าความน่าจะเป็นหลังการแจกแจงจากขั้นตอนที่ 4 เป็นการรวมตำแหน่งที่มีการสังเกตทั้งหมด

$$s'_k(t_r) = P[X(t_r)=k \,|\, \bigcap_{b=1}^{q} Y(t_b)]; \qquad k=1,2,\ldots,n; \quad r=1,2,\ldots,q \tag{3-18}$$

ซึ่งการทำนายตำแหน่งที่ไม่ได้มีการสำรวจนั้นสามารถหาได้จากการปรับปรุงของค่า $v'_{ij}(t_0,t\ )$ โดยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ t ดังสมการที่ 3-19 และรูปที่ 3-11

$$v'_{ij}(t_0,t) = \sum_{k=1}^{n} s'_k(t_1)\frac{v_{ij}(t-t_0)v_{jk}(t_1-t)}{v_{ik}(t_1-t_0)}; \qquad t_0 < t < t_1 \tag{3-19}$$



รูปที่ 3-11 การปรับปรุงหน้าตัดโดยพื้นฐานของ q Imperfect Observation

เมื่อกำหนดให้ความน่าจะเป็น $v'_{ij}(t_0,t)$ เป็นอิสระต่อสถานะ i ดังนั้นจะได้กลุ่มของความน่าจะเป็นดังสมการที่ 3-20

$$s'_j(t) = v'_{ij}(t_0,t); \qquad i,j=1,2,\ldots,n \tag{3-20}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการที่ 3-20 สามารถใช้สร้างความน่าจะเป็นของหน้าตัดในแต่ละพารามิเตอร์โดยใส่ค่าความน่าจะเป็นหลังการแจกแจงของแต่ละสถานะทุกๆตำแหน่งตามแกน x

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

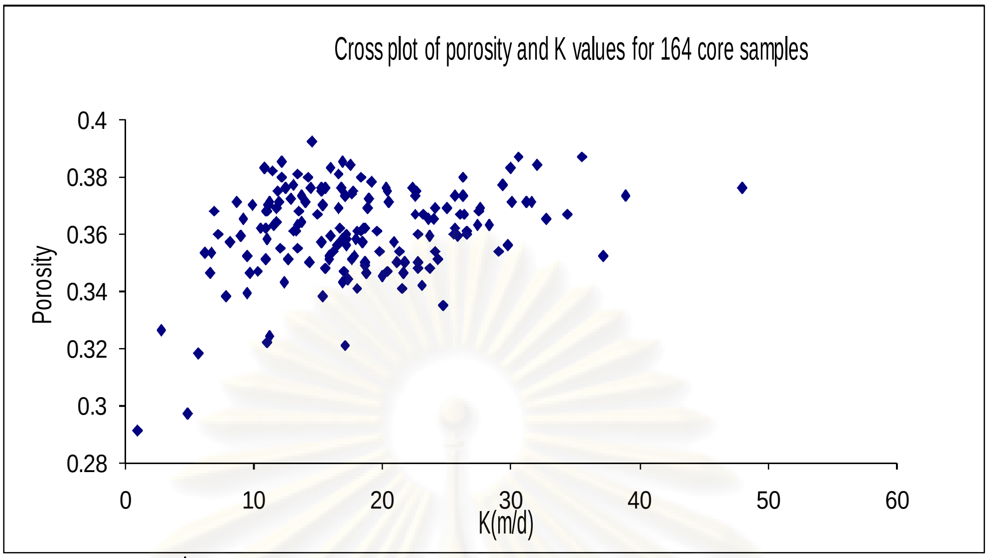
ผลการศึกษา

รายละเอียดผลการศึกษาวิจัยที่จะกล่าวถึงในบทนี้แบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ 1. ผลการศึกษาจากการจำลองลักษณะชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ 2. ผลการศึกษาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ UTCHEM และ 3. ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียน สำหรับจำแนกลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด ซึ่งผลในส่วนที่ 1 จะถูกนำมาเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ในการจำลองปล่อยสารปนเปื้อนในส่วนที่ 2 และในส่วนที่ 3 นั้นจะพิจารณาแยกออกมาโดยนำผลจากส่วนที่ 2 มาตรวจสอบกับการวิเคราะห์ในส่วนที่ 3 ดังอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาจากการจำลองลักษณะชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเชิงพื้นที่ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

สำหรับการจำลองลักษณะชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินใช้ข้อมูลดินจากการเก็บตัวอย่างจริง 2 ชนิด คือ ความพรุนแลข้อมูลขนาดเม็ดดินที่ 10% (d_{10}) เพื่อนำไปใช้จำลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จากการแจกแจงข้อมูลค่าความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านซึ่งทั้ง 2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากค่า R^2 มีค่าต่ำมากเท่ากับ 0.09 ในพื้นที่ศึกษา Bachman Road แสดงดังในรูปที่ 4-1 แสดงว่าค่าความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้สำหรับชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นอิสระต่อกัน อันเป็นเหตุผลให้สามารถใช้ฟังก์ชั่นสุ่มของการแจกแจงข้อมูลและค่าเฉลี่ยได้ ในขั้นตอนต่อมาชี้ให้เห็นถึงพัฒนาการประมาณตัวแปรสุ่ม ณ ตำแหน่ง u (ตำแหน่งค่าเริ่มต้น u) และ $u+h$ (ตำแหน่งสุดท้ายที่ห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นด้วยทิศทาง h) (Goovaerts, 1997) การวิเคราะห์ความแปรปรวนและแบบจำลองทางธรณีสถิติ 3 มิติ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบทดสอบแวริโอแกรมและตำแหน่งข้อมูลทุกตัวที่ใช้ในการเปรียบเทียบทุกๆ จุดในแต่ละโอกาสความเป็นไปได้ทางธรณีสถิติควรจะสูงกว่า 20 จำนวนดังกล่าวไว้ในบทที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-1 Cross-Plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน (f) และสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K) สำหรับพื้นที่ศึกษา

การประมาณค่าความพรุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 วิธี ประกอบด้วย 1) กำหนดให้ความพรุนมีค่าคงที่โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างขนาดเม็ดดินเป็นตัวแทนของดินในพื้นที่ศึกษา 2) ใช้วิธีการจำลองเชิงสถิติ SGS เพื่อสร้างรูปแบบ (Realizations) ที่มีโอกาสเกิดเท่ากันภายใต้เงื่อนไขข้อมูลที่มีอยู่ 164 ตัวอย่างจากข้อมูลภาคสนามและ 3) ใช้วิธีการจำลองเชิงสถิติ SIS โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มและอยู่ในภายใต้เงื่อนไขเดียวกับการจำลองในข้อ (2) การสร้างเซ-มิแวริโอแกรมของความพรุนทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และ 4-3 ผลจากการจำลองเซมิแวริโอแกรมพบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่างเป็นอย่างดีซึ่งพิจาณาเซมิแวริโอแกรมเฉพาะแนวแกน x และแนวแกน z เนื่องจากพิจารณาทิศทางการไหลของน้ำและเลือกหน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหลโดยมีผลของนักเก็ต (Nugget Effect) เท่ากับ 0.45 จากการประมาณด้วยแบบจำลองเอ็กซ์โพเนนเชียลแวริโอแกรม (Exponential Semivariogram Model) ดังสมการ

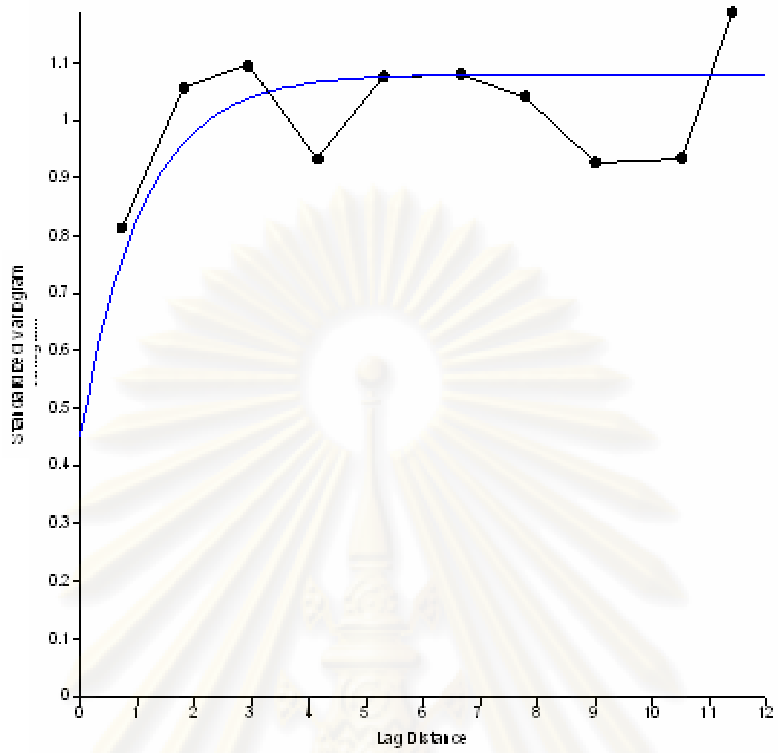
$$g(h) = c\left(1.0 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right)\right) \qquad (4\text{-}1)$$

โดยที่

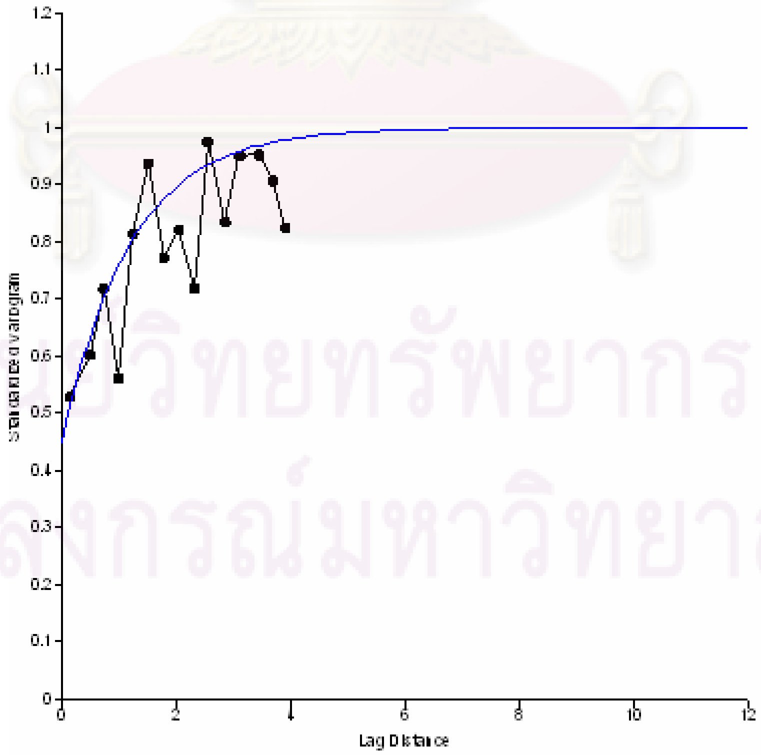
$g(h)$ คือ ค่าเซมิแวริโอแกรมสำหรับระยะทาง h

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน

a คือ ทิศทางที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง



รูปที่ 4-2 ผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่าความพรุนในแนวราบ (x)



รูปที่ 4-3 ผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่าความพรุนในแนวดิ่ง (z)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า d_{10} และค่าความพรุนของเซมิแวริโอแกรม (รูปที่ 4-2 และ 4-3) สนับสนุนแบบจำลองในรูปแบบที่แบ่งออกเป็นชั้นๆที่มีความหลากหลายของตัวแปร ในทิศทางแนวราบและแนวดิ่ง (Kupfersberger และ Dtusch, 1999)

การจำลองทางสโตแคสติคของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ด้วยวิธี SGS โดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง นั่นคือจะถูกแปลงไปเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ด้วยวิธีของ Kozeny-Carman (สมการที่ 2-6) การสร้างค่าเซมิแวริโอแกรมของ d_{10} ดังแสดงในรูปที่ 4-4 และ 4-5 ผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมพบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่างที่ใช้เป็นอย่างดี โดยมีผลของนักเก็ต (Nugget Effect) เท่ากับ 0.35 จากการประมาณด้วยแบบจำลองเซมิแวริโอแกรมทรงกลม (Spherical Semivariogram Model)

$$g(h) = c\left(1.5\left(\frac{h}{a}\right) - 0.5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right) \qquad if \quad h \le a \tag{4-2}$$

$$g(h) = c \qquad if \quad h \ge a \tag{4-3}$$

โดยที่

$g(h)$ คือ ค่าเซมิแวริโอแกรมสำหรับระยะทาง h

c คือ สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน

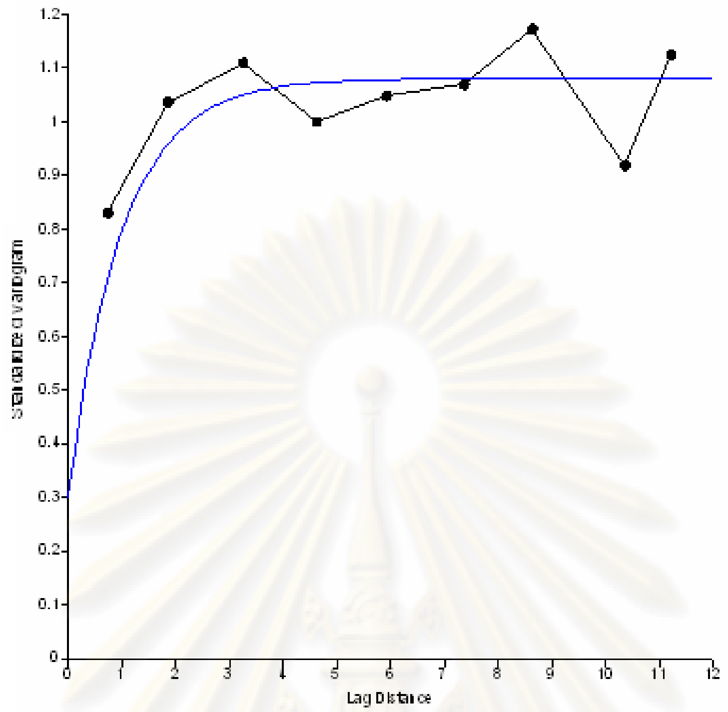
a คือ ทิศทางที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง

ผลของแบบจำลองแวริโอแกรมที่ใช้จำลองทางธรณีสถิติได้แสดงดังตารางที่ 4-1

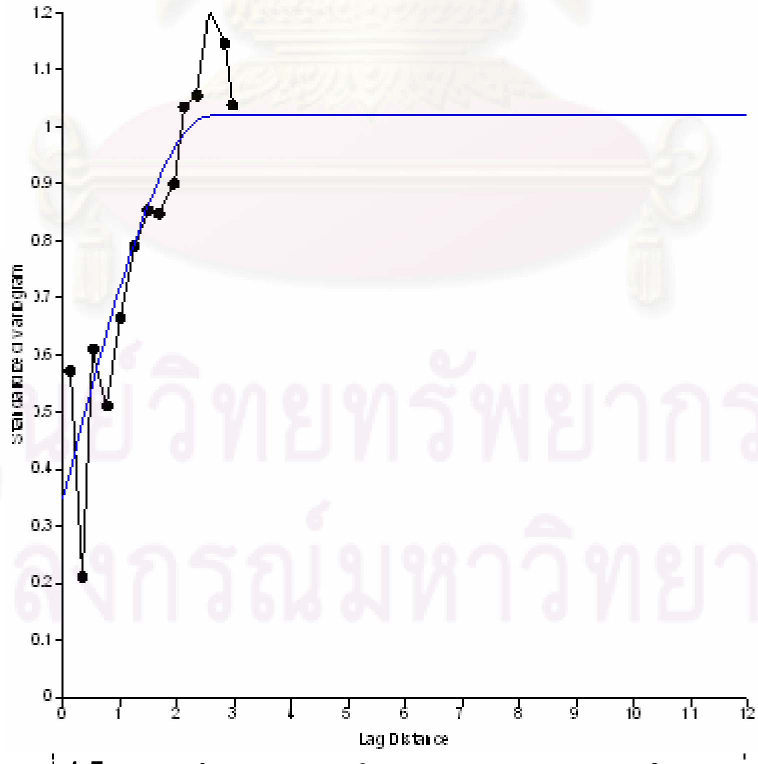
ตารางที่ 4-1 ตัวแปรของแวริโอแกรมสำหรับแบบจำลองธรณีสถิติแบบ SGS ของความพรุน (f) และ d_{10}

Model	Orientation	Nugget	Variance	Range ,m	Integral Scale, m
SGS f	Horizontal	0.45	1.10	5.00	1.67
SGS f	Vertical	0.45	0.96	3.50	1.16
SGS d_{10}	Horizontal	0.35	1.12	6.00	2.00
SGS d_{10}	Vertical	0.35	1.00	2.30	0.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-4 ผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่า d_{10} ในแนวราบ (x)



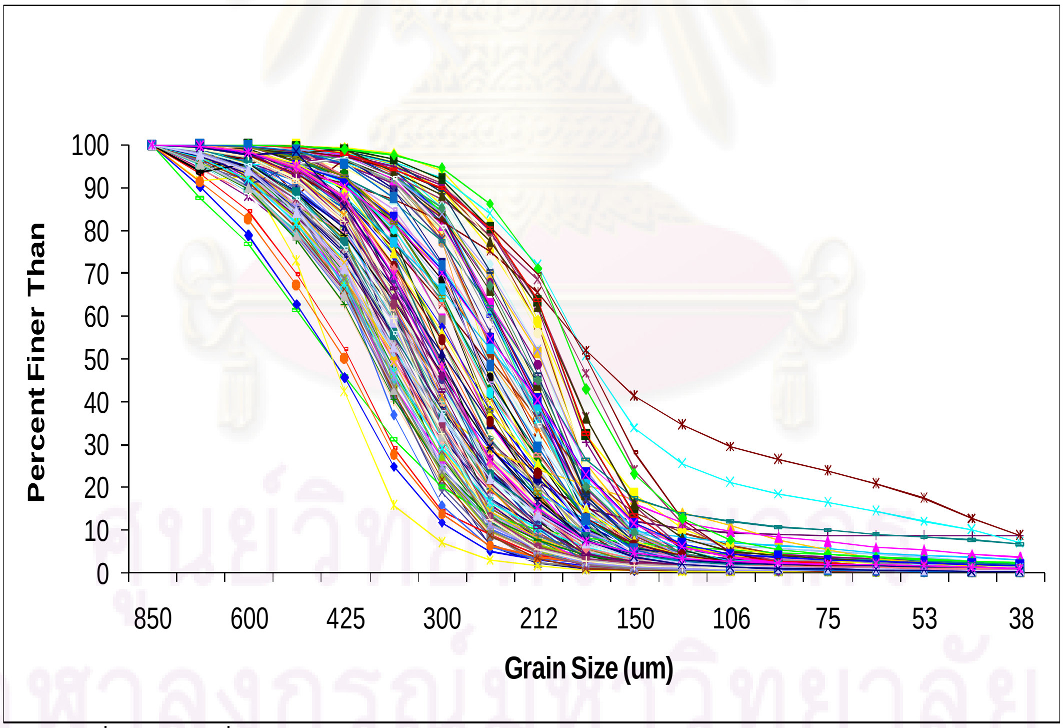
รูปที่ 4-5 ผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมของการวัดค่า d_{10} ในแนวดิ่ง (z)

สำหรับกระบวนการจำลองการกระจายตัวเชิงพื้นที่ ของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) โดยใช้วิธี SIS ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

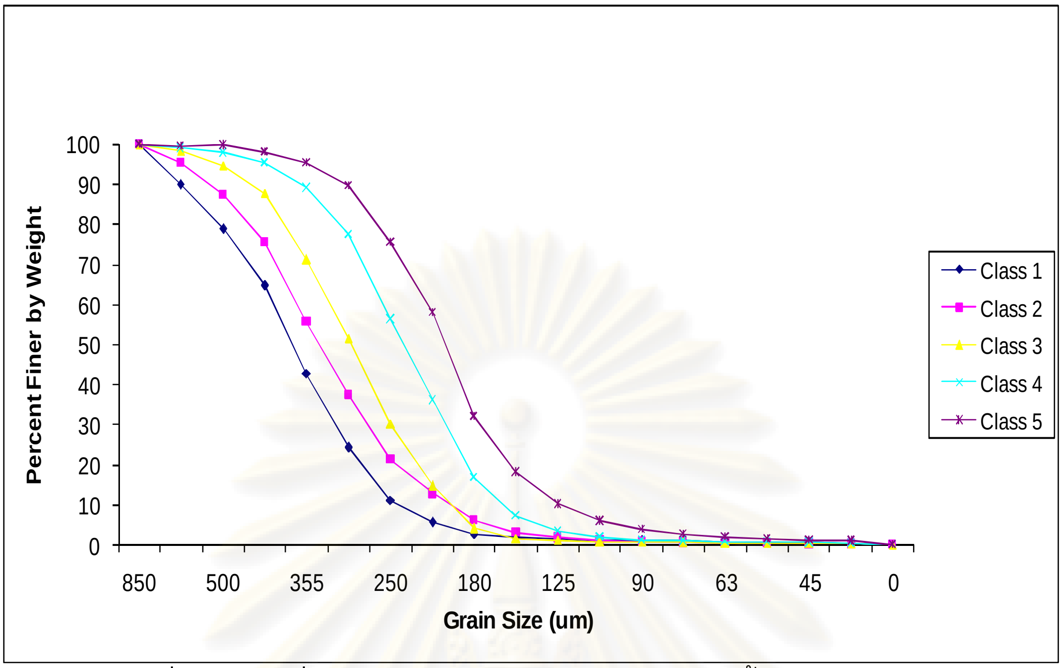
1) จำลองการกระจายเชิงพื้นที่โดยแบ่งขนาดของดินตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาออกเป็น 5 กลุ่ม บนพื้นฐานของค่า d_{10} ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และ 4-7 และค่าความพรุนจากการแจกแจงของขนาดคละโดนใช้วิธีแบ่งกลุ่มของ KMEAN โดยใช้ค่า d_{10} (ดังแสดงในรูปที่ 4-8) และค่าความพรุน (f) (ดังแสดงในรูปที่ 4-9)

2) กำหนดค่าตัวแปรสุ่มของ d_{10} และความพรุนลงในตารางกริดโดยใช้ฮิสโตแกรมของแต่ละตัวชี้วัดของกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4-10 และ รูปที่ 4-11

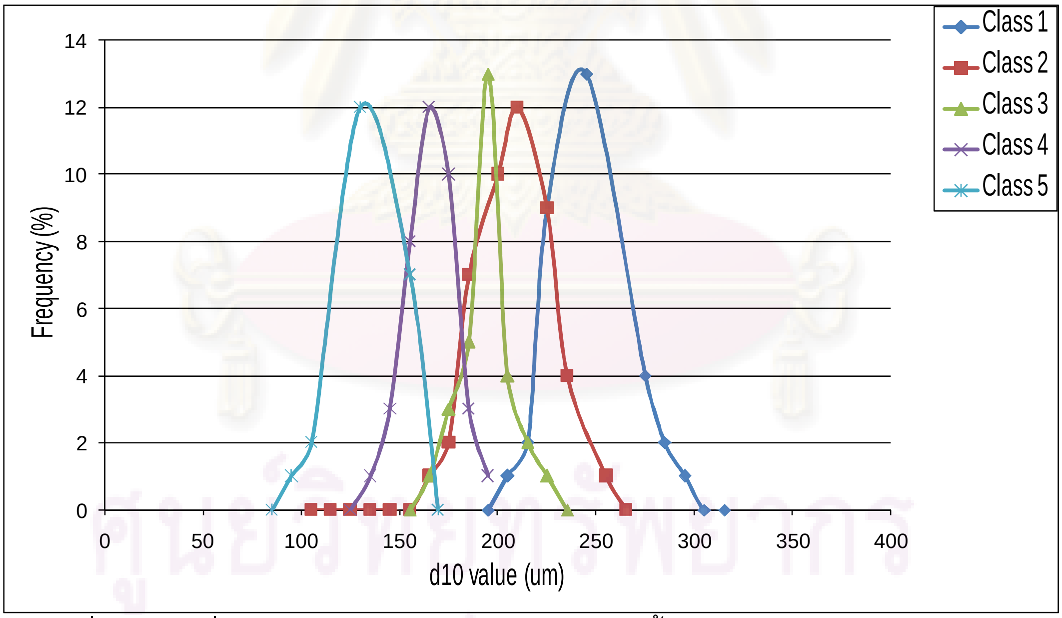
3) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) จากสมการ Kozeny-Carman (สมการที่ 2-6) โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความพรุนตามแต่ละเงื่อนไขของตัวชี้วัดของกลุ่มนั้นๆ



รูปที่ 4-6 ฟังก์ชั่นการรวบรวมการแจกแจงของขนาดคละ (CDF) จากข้อมูล 167 ตัวอย่าง

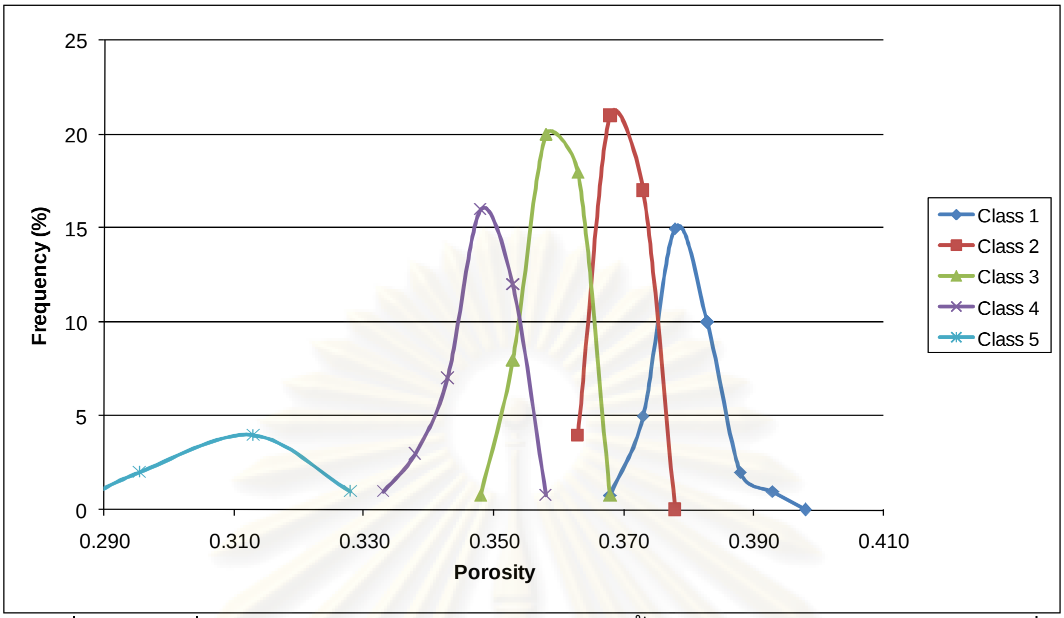


รูปที่ 4-7 ค่าเฉลี่ยของขนาดการแจกแจงของ 5 กลุ่มตัวชี้วัดโดยวิธี KMEANS

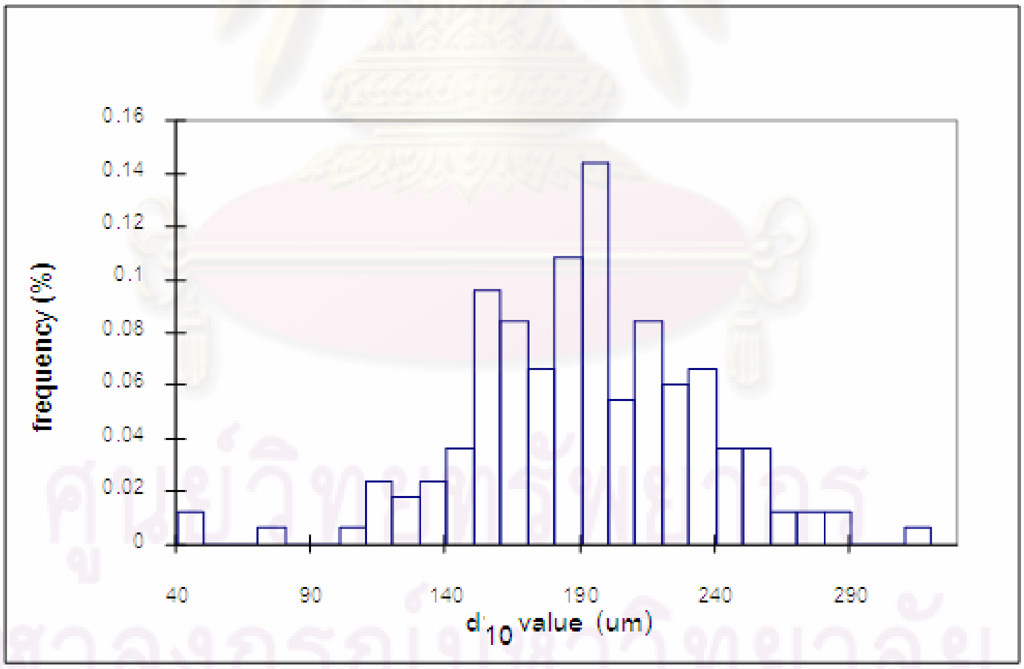


รูปที่ 4-8 ฟังก์ชั่นการแจกแจงของการแบ่งกลุ่มของตัวชี้วัด 5 กลุ่มของค่า d_{10} โดยใช้ความถี่ของโอกาสที่เกิดของตัวชี้วัดในแต่ละค่าในตารางที่ 4-2

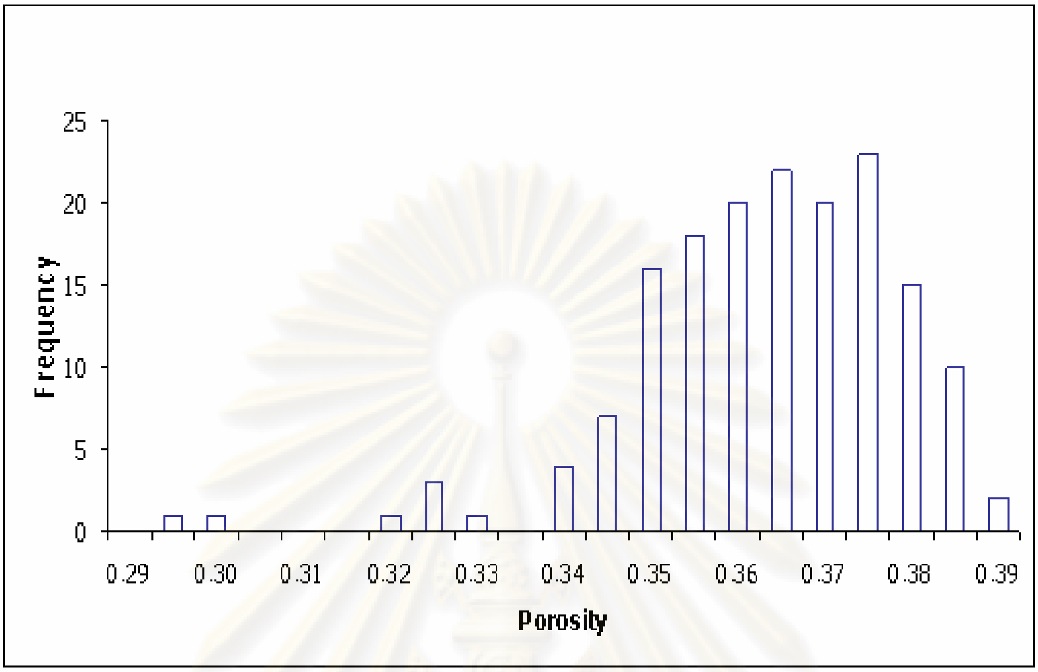
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-9 ฟังก์ชั่นการแจกแจงของการแบ่งกลุ่มของตัวชี้วัด 5 กลุ่มของค่า f โดยใช้ความถี่ของโอกาสที่เกิดของตัวชี้วัดในแต่ละค่าในตารางที่ 4-2



รูปที่ 4-10 การแจกแจงของฟังก์ชั่นความน่าจะเป็น (PDF) ของค่า d_{10}



รูปที่ 4-11 การแจกแจงของฟังก์ชั่นความน่าจะเป็น (PDF) ของค่า f

ตารางที่ 4-2 ตัวแปรของแวริโอแกรมสำหรับแบบจำลองธรณีสถิติแบบ SIS ของ f และ d_{10}

Indicator Class	Orientation	Nugget	Variance	Range , m	Integral Scale, m
1	Horizontal	0.012	1.30	4.70	1.57
1	Vertical	0.012	1.40	2.40	0.80
2	Horizontal	0.000	1.40	7.00	2.33
2	Vertical	0.000	1.20	1.70	0.57
3	Horizontal	0.160	1.68	5.00	1.67
3	Vertical	0.160	1.70	3.00	1.00
4	Horizontal	0.221	1.85	7.50	2.50
4	Vertical	0.221	1.20	3.10	1.03
5	Horizontal	0.124	2.00	6.00	2.00
5	Vertical	0.124	2.40	1.80	0.60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการจำลองเซมิแวริโอแกรมในแต่ละกลุ่ม (class) จากการแบ่งโดยวิธี SIS ผลจากตารางพบว่าการจำลองเซมิแวริโอแกรมโดยวิธี SIS มีความหลากหลายของความต่อเนื่องที่มากกว่าวิธี SGS เนื่องจากผลของนักเก็ตในแต่ละกลุ่ม (Class) สำหรับค่าความพรุนและค่า d_{10} มีค่าน้อยกว่าผลจากการจำลองโดยวิธี SGS ส่งผลให้ผลการจำลองโดยวิธี SIS เกิดความต่อเนื่องของข้อมูลทางกายภาพของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่มากกว่าการจำลองโดยวิธี SGS

นอกจากนี้เมื่อมีการใช้จำนวนเงื่อนไขของข้อมูลน้อยดังแสดงใสตารางที่ 4-2 พบว่าการประมาณค่าโดยวิธี SGS และ SIS ให้ผลคล้ายคลึงกัน แต่ทว่าหากมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของจำนวนข้อมูลที่มากขึ้น การจำลองโดยวิธี SIS จะให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า กล่าวคือวิธี SIS จะเพิ่มความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของข้อมูลค่าที่มากที่สุดและน้อยที่สุด (Goovaerts, 2000) สามารถนำไปจำลองให้เกิดความต่อเนื่องของข้อมูลการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินได้ดีกว่า ในทางกลับกันวิธี SGS มิได้พิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวในสมการ ส่งผลให้ขาดความต่อเนื่องของชุดข้อมูล ในขณะที่ความต่อเนื่องของข้อมูลชั้นน้ำใต้ดินได้แสดงให้เห็นความสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ ของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของช่องว่างและขนาดเม็ดดิน นั่นคือยังคงความต่อเนื่องในชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติในการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) เชิงพื้นที่ได้แสดงในตารางที่ 4-3 จากการวิเคราะห์ทางสถิติว่าการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) โดยวิธี SGS นั้นจะให้ผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 7.31 และการแจกแจงข้อมูลมีการกระจายของข้อมูลมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี SIS ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6.57 และการแปรปรวนของข้อมูลมีการกระจายที่น้อยกว่า ส่วนค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทางสถิติสนับสนุนข้อสรุปเบื้องต้นที่ว่าการจำลองสโตแคสติคโดยวิธี SIS จะให้ความต่อเนื่องของข้อมูลชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาดีกว่าการจำลองสโตแคสติคโดยวิธี SGS

ตารางที่ 4-3 ลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของแบบจำลอง

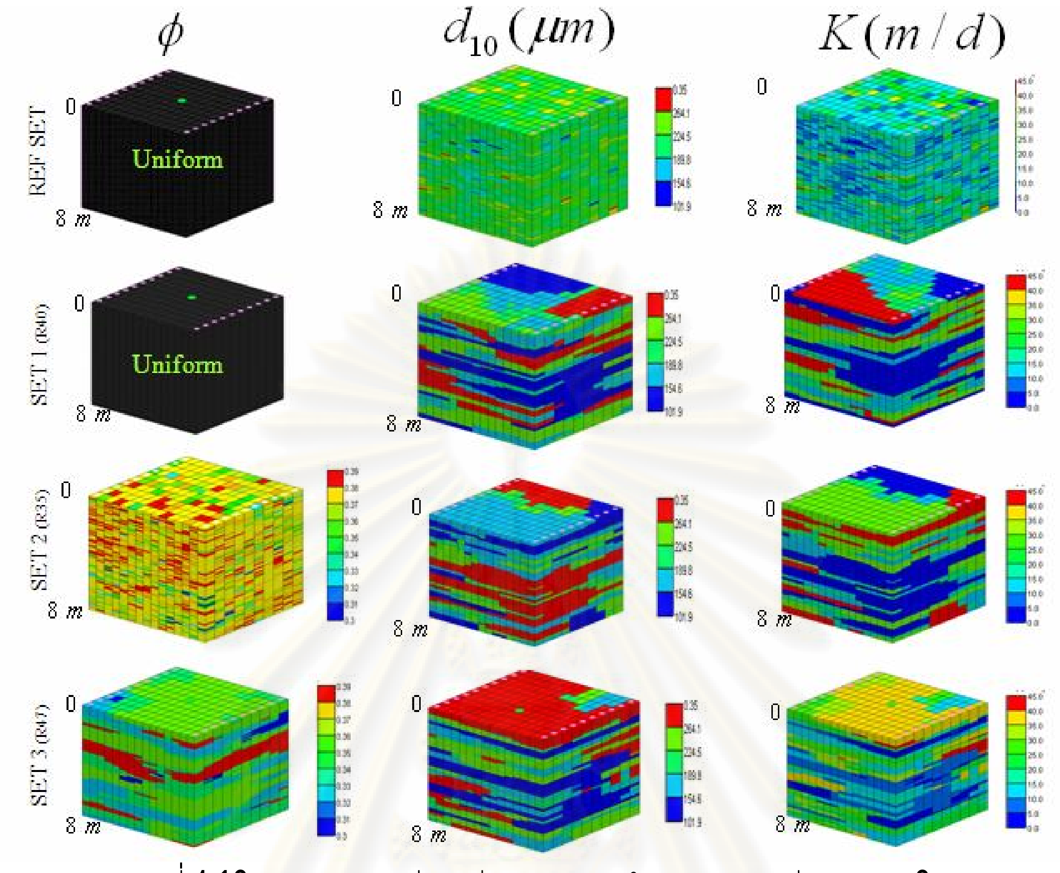
Stochastic	Description	Min/Mean/Max	Std.Dev. K
SGS	Sequential Gaussian Simulation	0.75/17.39/47.62	7.31
SIS	Sequential Indicator Simulation	4.88/17.32/32.81	6.57

ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (K) และค่าความพรุน (f) จากแบบจำลอง SGS และ SIS แสดงในรูปที่ 4-12 และ 4-13 ซึ่งแสดงคุณสมบัติการกระจายตัวของชั้นน้ำใต้ดินทั้งในรูปแบบ 3 มิติ และหน้าตัด 2 มิติที่เป็นตัวแทนหน้าตัดชั้นน้ำใต้ดินสำหรับการจำลองการปล่อยสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินในขั้นตอนต่อไป ในแต่ละเซตของการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และ 4-13 ชี้ให้เห็นว่าการจำลองความพรุนในเซตที่ 2 และ เซตที่ 3 ให้ผลที่แตกต่างกันชัดเจน ความพรุนจากการจำลองโดยวิธี SIS นั้นมีความต่อเนื่องที่และการแจกแจงข้อมูลที่น้อยกว่าวิธีของ SGS อันเนื่องมาจากผลของนักเก็ต (เช่น 0.45 สำหรับวิธี SGS และ 0.012-0.221 ในวิธี SIS)

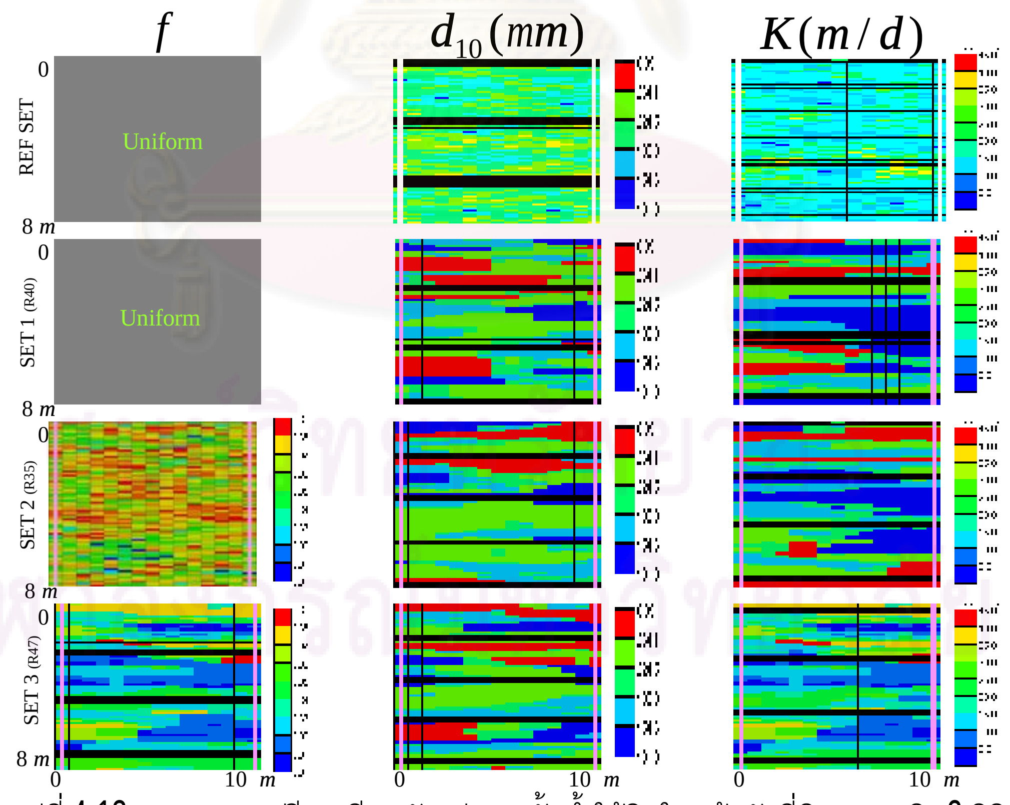
เมื่อพิจารณาการจำลองค่า d_{10} ของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินโดยการแบ่งออกเป็น (Class) ของกลุ่มตัวชี้วัด ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และ 4-13 พบว่ารูปตัดของการกระจายตัวของค่า d_{10} จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้ง เซต1 , เซต 2 และ เซต 3 เนื่องจากทั้ง 3 เซตใช้ในการจำลองโดยใช้วิธี SIS ในขณะที่เซตอ้างอิงใช้จำลองโดยวิธี SGS เมื่อเปรียบเทียบการจำองค่า d_{10} โดยวิธีทางสถิติ SIS ในงานวิจัยนี้กับการศึกษาโดย Lemke et al. (2004) โดยแบ่งแยกตัวชี้วัดออกเป็นทั้งสิ้น 6 กลุ่ม รูปตัดการกระจายของค่า d_{10} จำลองบนพื้นฐานโดยการใช้ตัวชี้วัด 6 กลุ่ม ให้ผลการจำลองออกมาคล้ายคลึงกับการจำลองโดยวิธี SGS แสดงว่าผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่ดำเนินการแบ่งข้อมูลดินจริงออกเป็น 5 กลุ่มให้ผลการจำลองการกระจายตัวของค่า d_{10} โดยวิธี SIS แตกต่างจากการจำลองโดยวิธีเดียวกันบนพื้นฐานการแบ่งข้อมูลดินออกเป็น 6 กลุ่มศึกษาโดย Lemke et al. (2004) การที่ลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินคล้ายกันเนื่องจากมีการแบ่งตัวชี้วัดถึง 6 กลุ่มส่งผลให้เกิดซ้อนทับกันของการกระจายฟังก์ชั่นแจกแจงของค่า d_{10} ทำให้การกระจายตัวของค่า d_{10} เข้าใกล้การแจกแจงข้อมูลแบบ Gaussian มากขึ้น

รูปที่ 4-14 แสดงให้เห็นผลของความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้(K) ในหน้าตัดที่ 5 ระนาบ $X-Z$ ซึ่งเห็นถึงความแตกต่างกันในแต่ละเซตของแบบจำลองที่รูปแบบเดียวกัน (Realizations) เดียวกันจะใช้เป็นตัวแทนเชิงพื้นที่ในขั้นตอนต่อไป

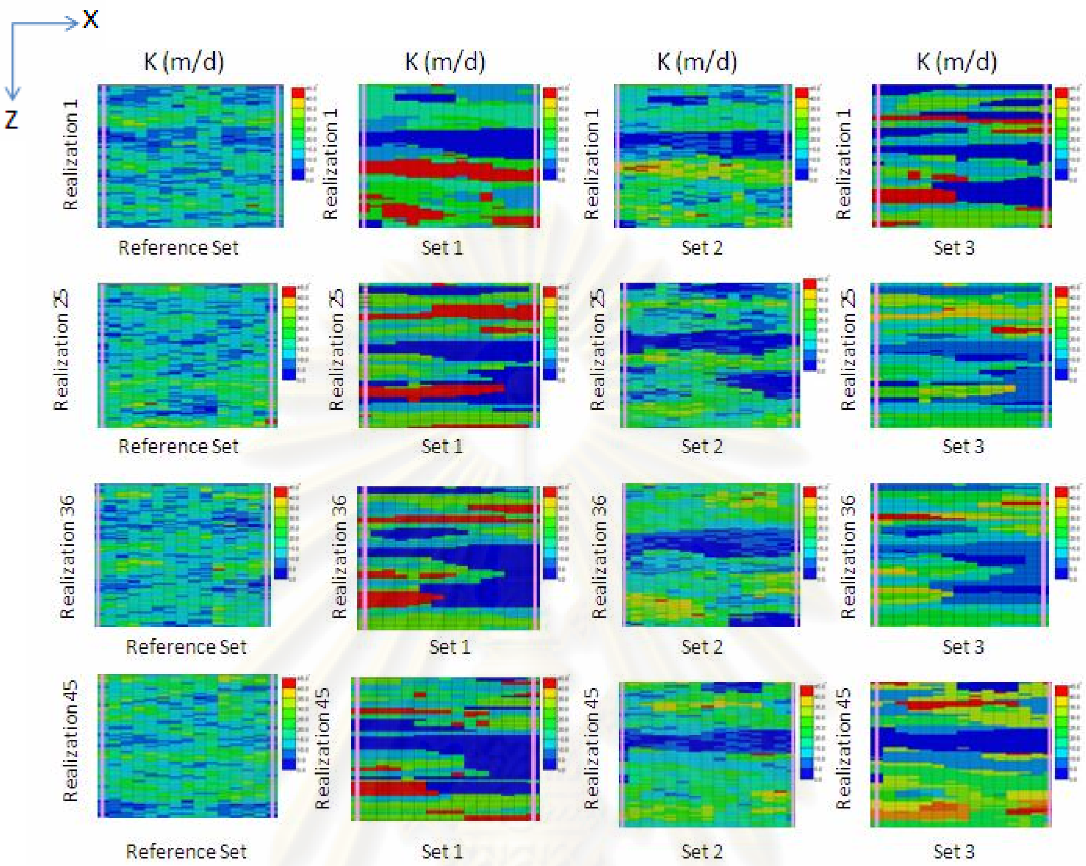
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-12 ผลของการเปรียบเทียบของแบบจำลองทางธรณีสถิติแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4-13 ผลของการเปรียบเทียบตัวแปรของชั้นน้ำใต้ดินในหน้าตัดที่พิจารณาเชิง 2 มิติ



รูปที่ 4-14 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) ในหน้าตัดที่พิจารณาเชิง 2 มิติ

ความแปรปรวนของลักษณะชั้นน้ำใต้ดินที่จำลองโดย 4 วิธีจากแบบจำลองทางธรณีสถิติ พบว่าการจำลองโดยวิธีวิธี SGS จะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) สูงกว่าค่าที่ทำนายได้จากการจำลองโดยวิธี SIS ซึ่งให้รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลที่แคบและน้อยกว่า ส่งผลให้มีสัมพันธ์เชิงพื้นที่สูงกว่าลักษณะชั้นน้ำใต้ดินที่จำลองโดยวิธี SGS สำหรับการเลือกใช้งานนั้นการจำลองลักษณะชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินโดยวิธี SIS มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า แม้ว่าข้อดีของการจำลองทางธรณีสถิติทั้ง 2 วิธีนี้คือให้ผลการกระจายตัวเชิงพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดเท่าๆกันหลายรูปแบบที่สามารถเป็นไปได้ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และช่วยในการตัดสินใจได้หลากหลายเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขความไม่แน่นอนของการกระจายเชิงพื้นที่ของคุณสมบัติชั้นน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการจำลองลักษณะการซึม (Infiltration) และการกระจายตัวของสารปนเปื้อน โดยก่อให้เกิด Pooling Effect หรือการรวมตัวตกค้างของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน แบบจำลองสโตแคสติคเป็นที่นิยมใช้มาก เพราะสามารถทำนายโอกาสที่จะเกิดขึ้นของแต่ละกรณีได้หลากหลายโดยอยู่บนพื้นฐานข้อมูลที่มีอยู่สามารถ

นำไปใช้ร่วมกับระบบการตัดสินใจ โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการประมาณด้วยวิธี SGS จะได้ความถูกต้องและแม่นยำน้อยกว่าการจำลองโดยวิธี SIS ผลลัพธ์จากการจำลองทางสโตแคสติคทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันประมาณ 10 % จากการวิเคราะห์ทางสถิติ

4.2 ผลการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ UTCHEM

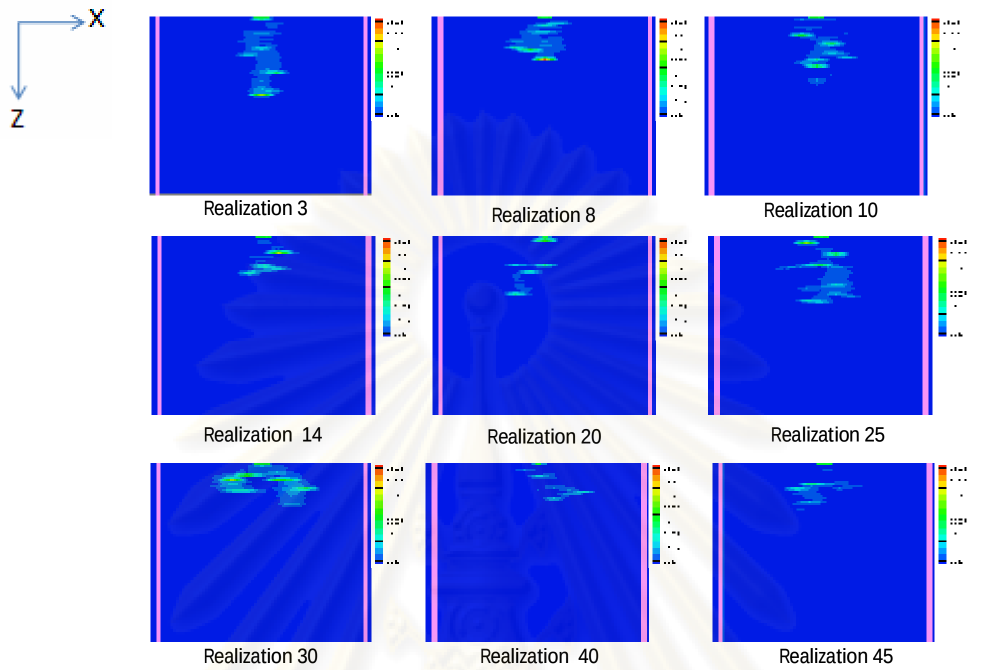
สำหรับผลการกระจายตัวของสารปนเปื้อนที่ทดสอบในชั้นน้ำใต้ดินที่จำลองขึ้นโดยแบบจำลองธรณีสถิติ โดยจะวิเคราะห์ผลการศึกษาบนพื้นฐานของการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในหน้าตัดที่ปล่อยสารปนเปื้อนในระนาบ $x-z$ ผลการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามชนิดของสารปนเปื้อน DNAPL ที่ทดสอบในแต่ละส่วนประกอบด้วยภาพตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ตารางแสดงข้อมูลของระยะการซึมในแนวดิ่งและระยะแผ่ในแนวกว้างของสาร DNAPL ในแต่ละ Realizations

รูปที่ 4-15 ถึง 4-26 แสดงลักษณะการซึมและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL แต่ละชนิดที่ทดสอบในหน้าตัดชั้นน้ำใต้ดินสองมิติที่เป็นตัวแทน การคัดเลือกหน้าตัดที่เป็นตัวแทนเพื่อเปรียบเทียบนั้นจะเลือกจาก Realizations ทั้งหมด 50 หน้าตัดในแต่ละเซต โดยคำนึงถึงหน้าตัดที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสาร DNAPL ในหน้าตัดที่มีค่าใกล้เคียงกัน ผลการจำลองพบว่าในแต่ละ Realizations ภายในการจำลองเซตเดียวกันมีการกระจายตัวของ DNAPL แตกต่างกันอย่างชัดเจน อันเนื่องมากจากผลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินไม่ว่าจะจำลองโดยวิธี SGS หรือ SIS

จากผลการจำลองการซึมและการกระจายตัวของสาร DNAPL ในรูปที่ 4-15 ถึง 4-26 ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาระยะการกระจายตัวของสาร DNAPL ในสองมิติ กล่าวคือการแผ่ขยายในแนวราบ (Lateral Spreading) และระยะซึมในดิ่ง (Vertical Penetration) จากระดับพื้นดิน ซึ่งผลวิเคราะห์ที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบใน 3 ประเด็น คือ 1) เปรียบเทียบผลการกระจายตัวของสาร DNAPL ระหว่าง Realizations ภายในเซตการจำลองเดียวกัน 2) เปรียบเทียบผลการกระจายตัวของ DNAPL ระหว่าง Realizations เดียวกันระหว่างเซตและ 3) เปรียบเทียบพฤติกรรมผลกระจายตัวระหว่างสาร DNAPL 3 ชนิด ข้อมูลที่นำมาพิจารณาผลการกระจายตัวในแนวราบ จะพิจารณาโดยใช้ส่วนที่แผ่ขยายกว้างมากที่สุดในแต่ละ Realizations เพื่อนำมาเป็นตัวแทนข้อมูล วิเคราะห์หาค่าทางสถิติทั้ง ค่าสูงสุด - ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในที่นี้จะไม่นำค่าส่วนที่แผ่น้อยสุดมาพิจารณาเนื่องจากมีผลจากความคลาดเคลื่อนหลายอย่างเข้าเกี่ยวข้องด้วยได้แก่ การที่สารกระจายตัวไปที่หน้าตัดชั้นน้ำใต้ดินหน้าตัดอื่นเป็นต้น

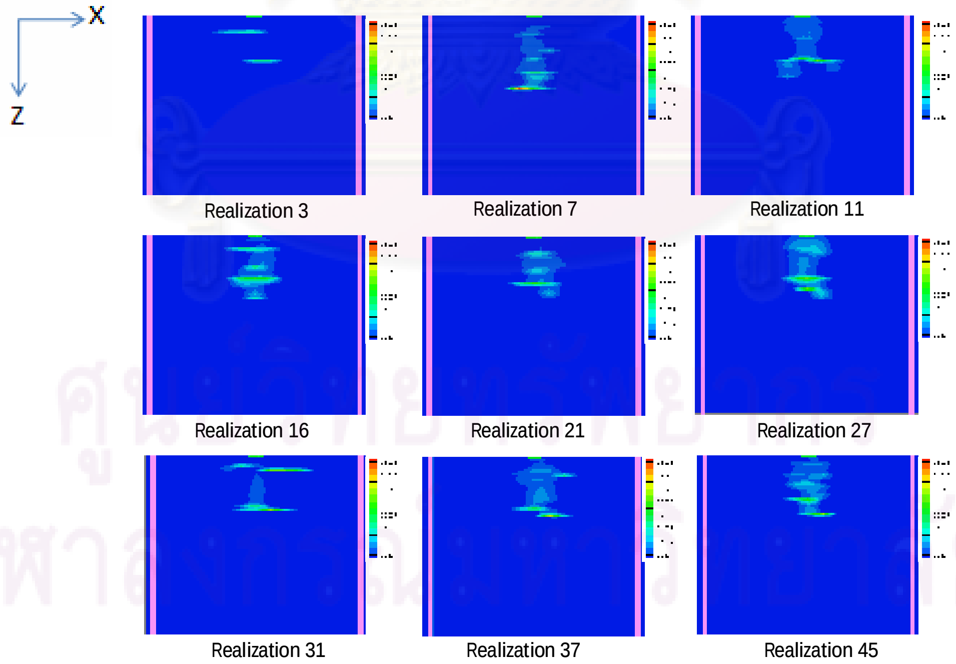
4.2.1 ลักษณะการจำลองกระจายตัวของ PCE

4.2.1.1 การกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง



รูปที่ 4-15 ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง

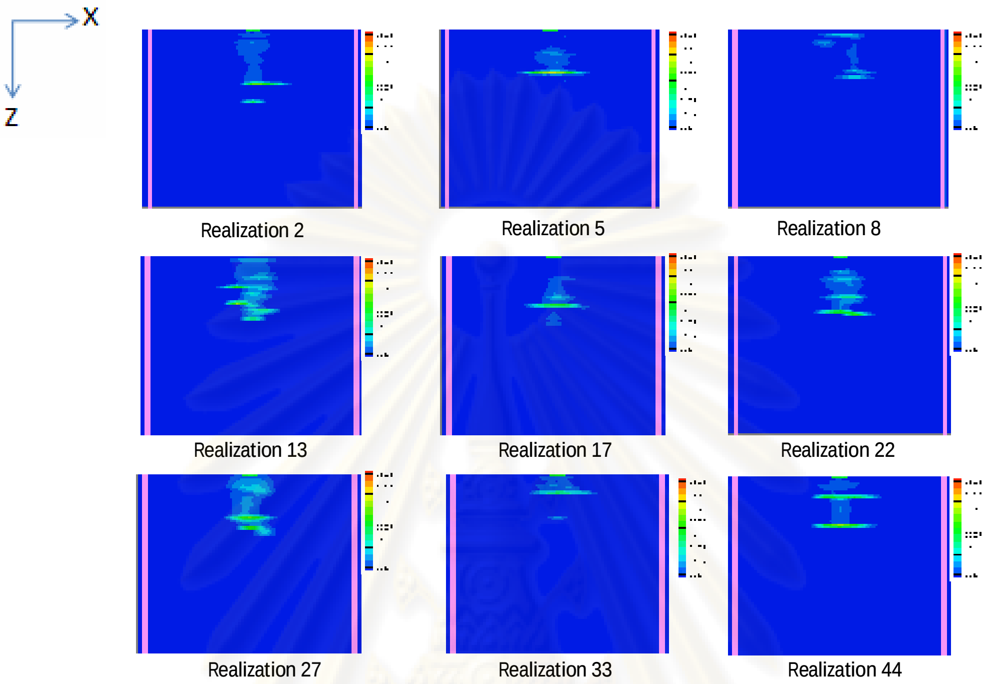
4.2.1.2 การกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1



รูปที่ 4-16 ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1

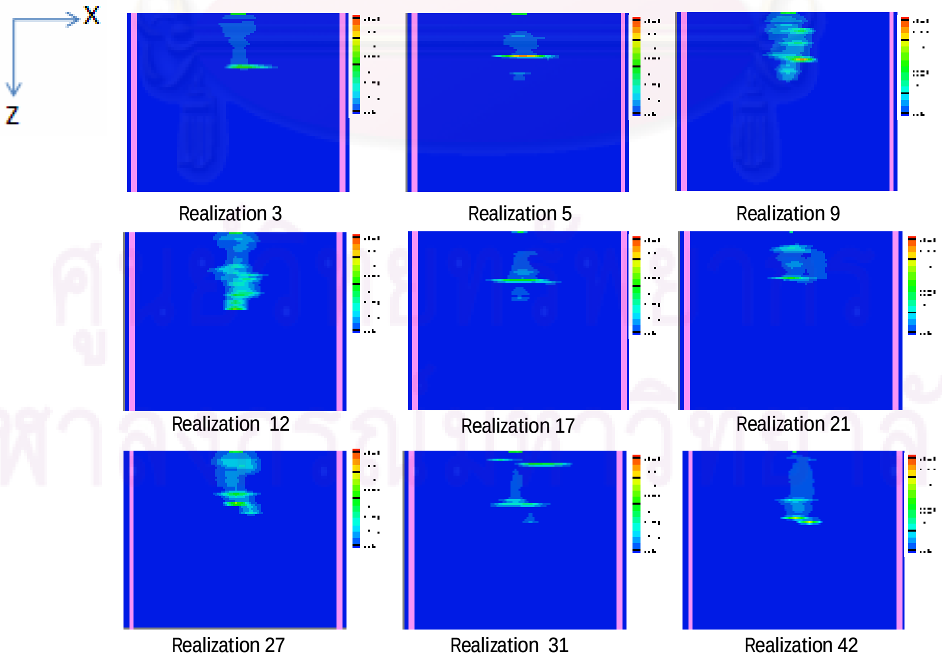
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.1.3 การกระจายตัวของสาร PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2



รูปที่ 4-17 ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2

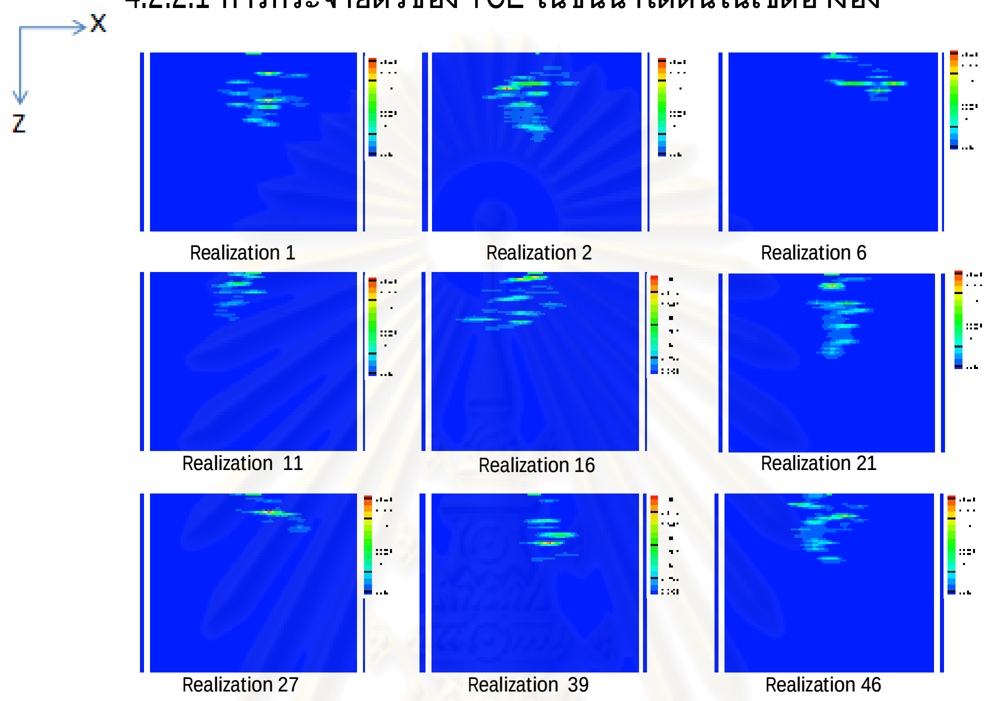
4.2.1.4 การกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3



รูปที่ 4-18 ตัวอย่างการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3

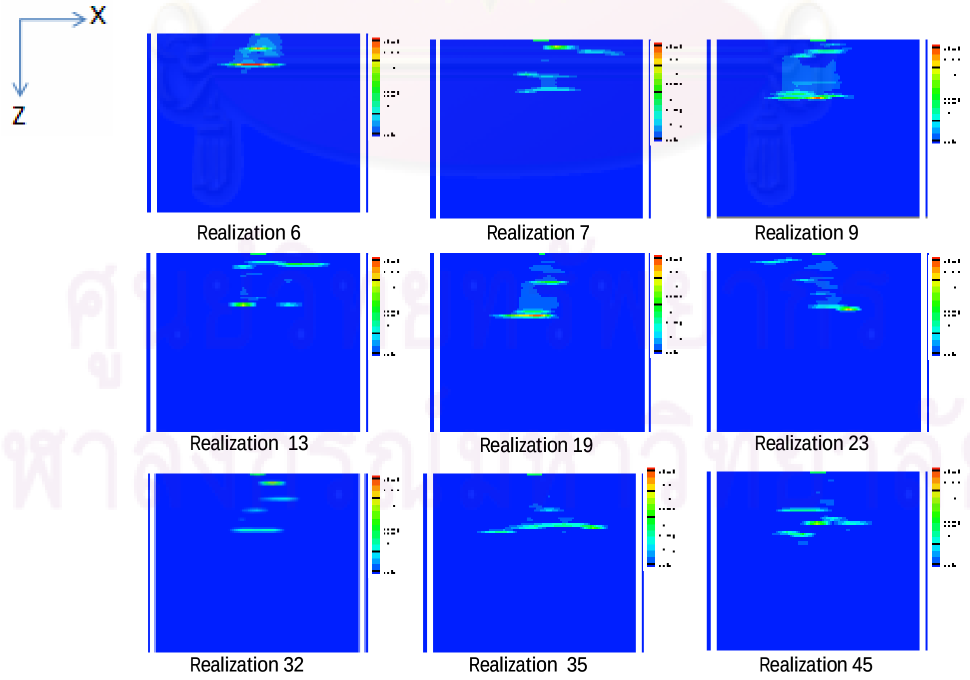
4.2.2 ลักษณะการจำลองกระจายตัวของ TCE

4.2.2.1 การกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง



รูปที่ 4-19 ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง

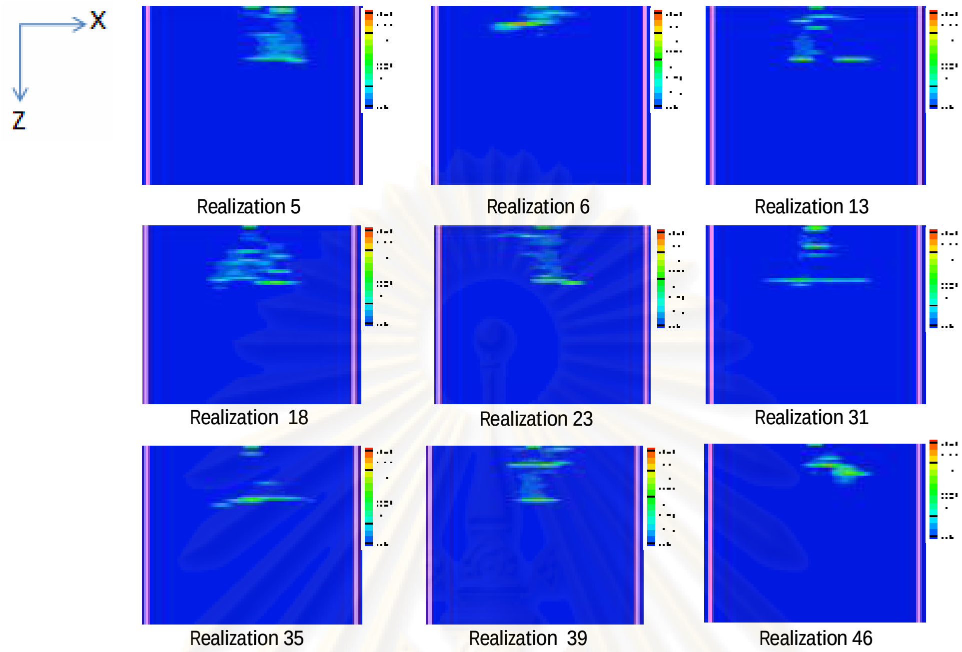
4.2.2.2 การกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1



รูปที่ 4-20 ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1

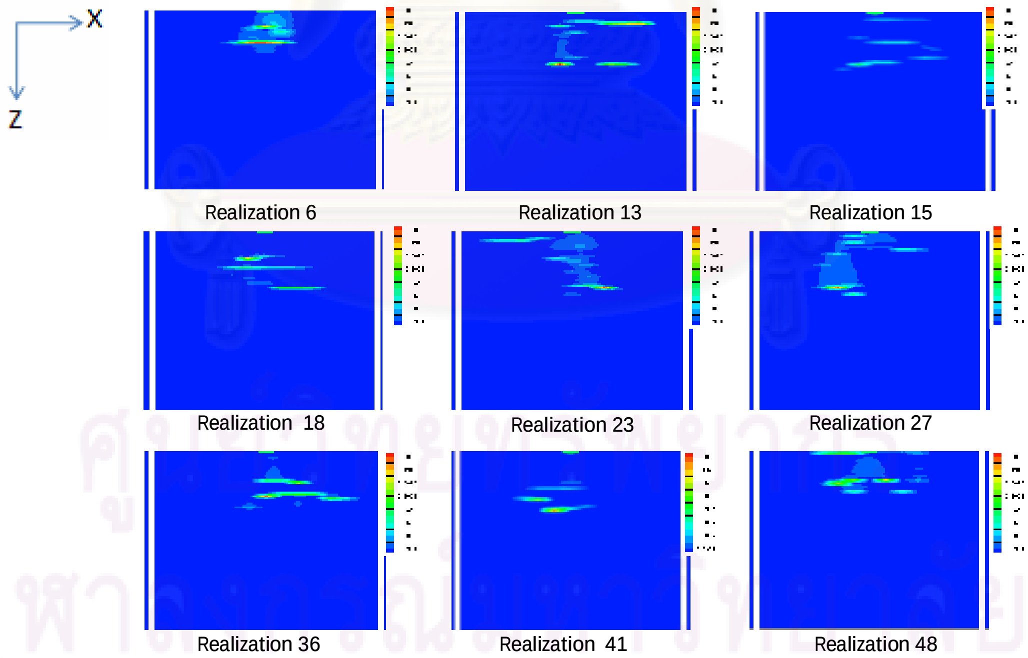
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2.3 การกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2



รูปที่ 4-21 ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2

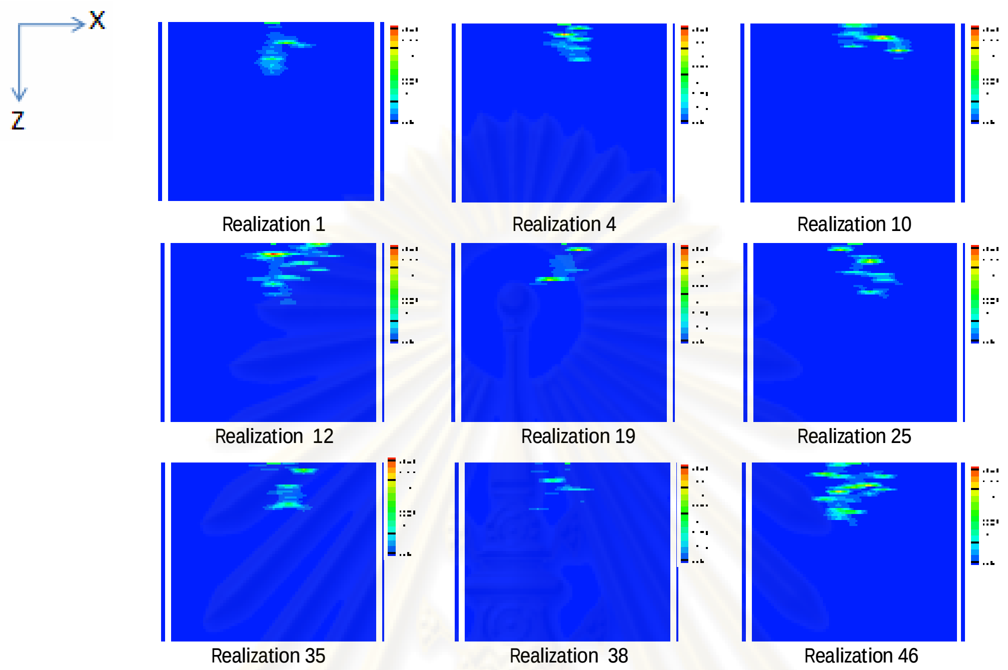
4.2.2.4 การกระจายตัวของสาร TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3



รูปที่4-22 ตัวอย่างการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3

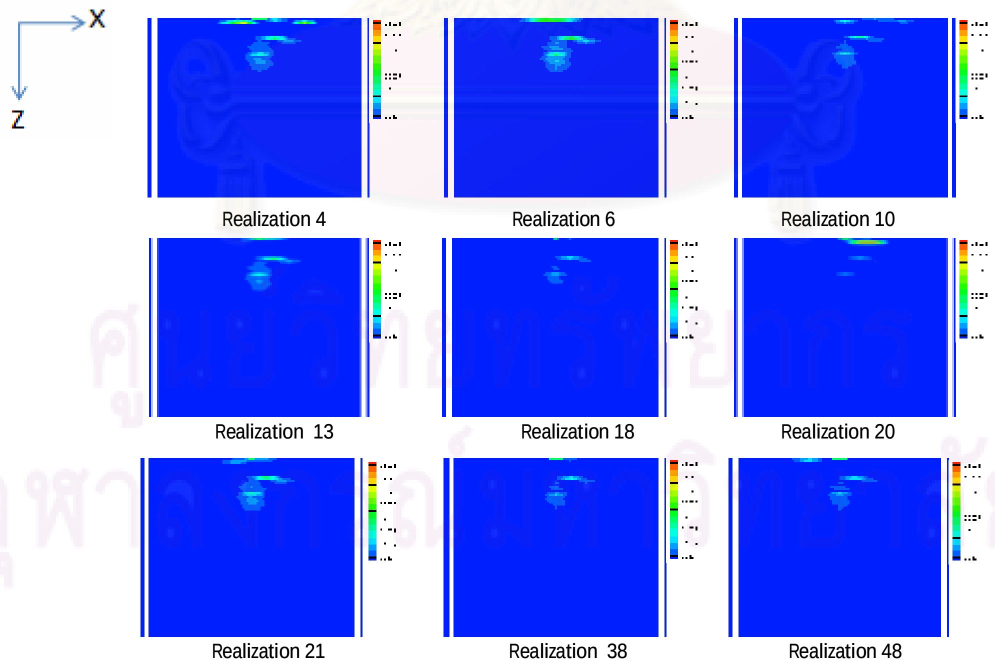
4.2.3 ลักษณะการจำลองกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste)

4.2.3.1 การกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสมในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง



รูปที่4-23 ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซตอ้างอิง

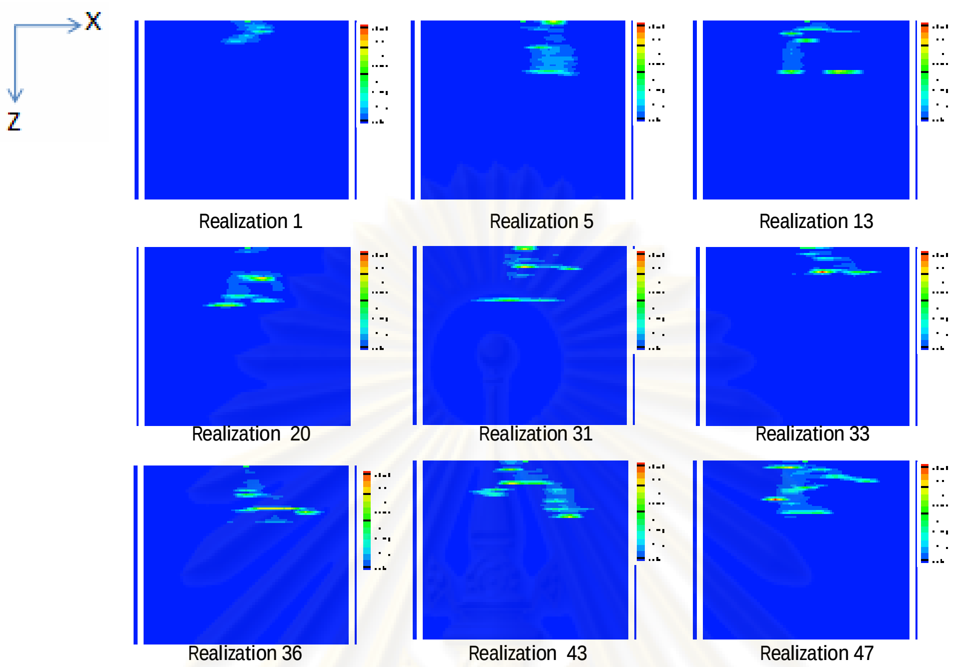
4.2.3.2 การกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสมในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1



รูปที่ 4-24 ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 1

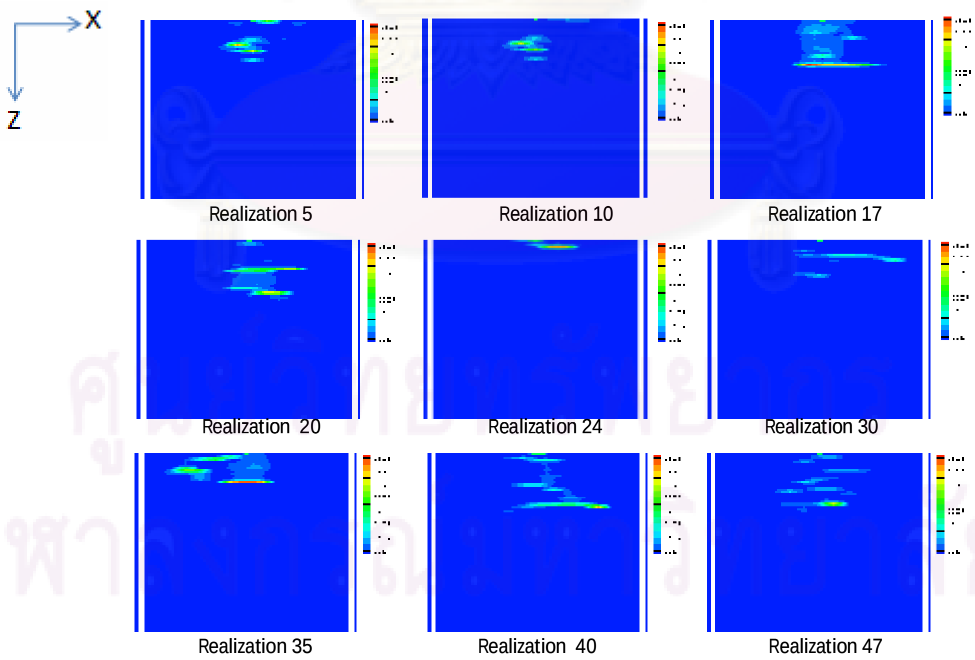
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3.3 การกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสมในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2



รูปที่ 4-25 ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 2

4.2.3.4 การกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสมในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3



รูปที่ 4-26 ตัวอย่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำใต้ดินในเซต 3

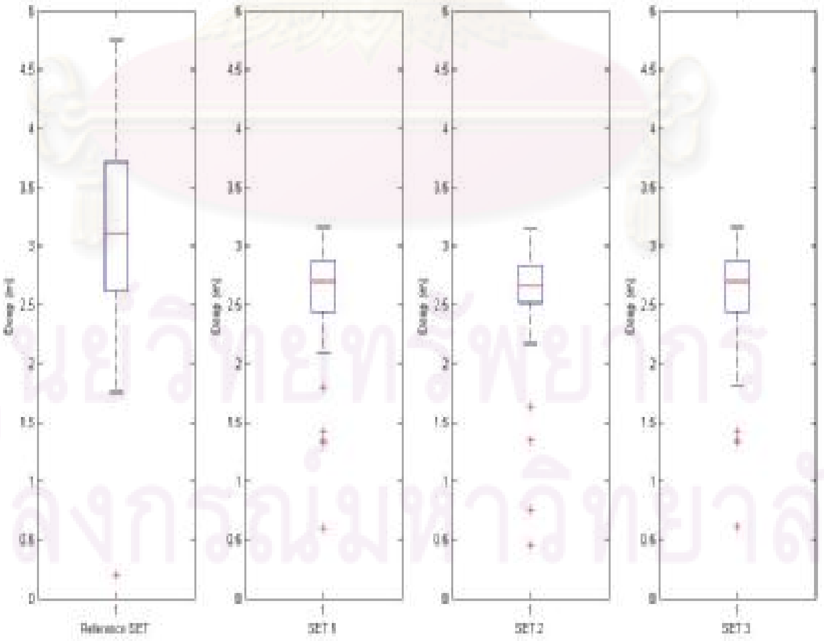
4.3 ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของสาร PCE

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการจำลองพฤติกรรมการซึมและการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำที่อิ่มตัว ทั้งระยะการซึมในแนวดิ่งและการแผ่กระจายในแนวราบรวมทั้งค่าสถิติต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบเชิงกราฟฟิกของข้องมูลทางสถิติของระยะการซึมในแนวดิ่งและการแผ่กระจายในแนวราบของ PCE สามารถแสดงได้ในลักษณะของ Box Plot ดังแสดงในรูปที่ 4-27 และ 4-28 ตามลำดับ แสดงผลจำลองกระจายตัวของ PCE ใน Realizations ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซตในการ ผลการจำลองความเข้มข้นของ PCE จะอยู่ในช่วง 0.0008 ถึง 0.2295 โดยมีค่ามากที่สุดจะอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.23 ผลจากตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าการจำลองโดยใช้วิธี SGS ในเซตอ้างอิงมีความแปรปรวนของค่าความอิ่มตัวของ (PCE Saturation) สูงกว่าการจำลองโดยใช้วิธี SIS ในเซตที่ 1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการกระจายตัวของ PCE ในเซตอ้างอิงโดยจะเพิ่มระยะซึมแนวดิ่ง (z) และลดการแผ่ขยายด้านข้าง (x) ในขณะที่การจำลองในเซตที่ 1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ให้ค่าความเข้มข้นของ PCE น้อยกว่าการจำลองในเซตอ้างอิงเล็กน้อย ส่งผลให้ระยะการซึมในแนวดิ่ง (z) ลดลงและเพิ่มระยะแผ่ของสารปนเปื้อนในแนวราบ (x) มากขึ้น ผลการเปรียบเทียบทางสถิติในตารางที่ 4-4 โดยพิจารณาการจำลองสโตแคสติคทุก Realizations ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 200 Realizations พบว่าระยะการซึมในแนวดิ่งของ PCE จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.35 เมตร และ 4.75 เมตร ในขณะที่ระยะการแผ่กระจายแนวราบอยู่ในช่วง 1.33 เมตร ถึง 6.33 เมตร นอกจากนี้จะสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าความต่อเนื่องของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) ในชั้นน้ำใต้ดินมีผลต่อการจำลองการกระจายตัวของ PCE ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในเซตอ้างอิงพบว่าเกิด pooling effect หรือการขังตัวของสารปนเปื้อน PCE โดยมีสาเหตุมาจากผลของแตกต่างของความดันระหว่างน้ำ-สารปนเปื้อนในช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (Pore Entry Pressure) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) และระดับการอิ่มตัวของสารปนเปื้อน (Saturation)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

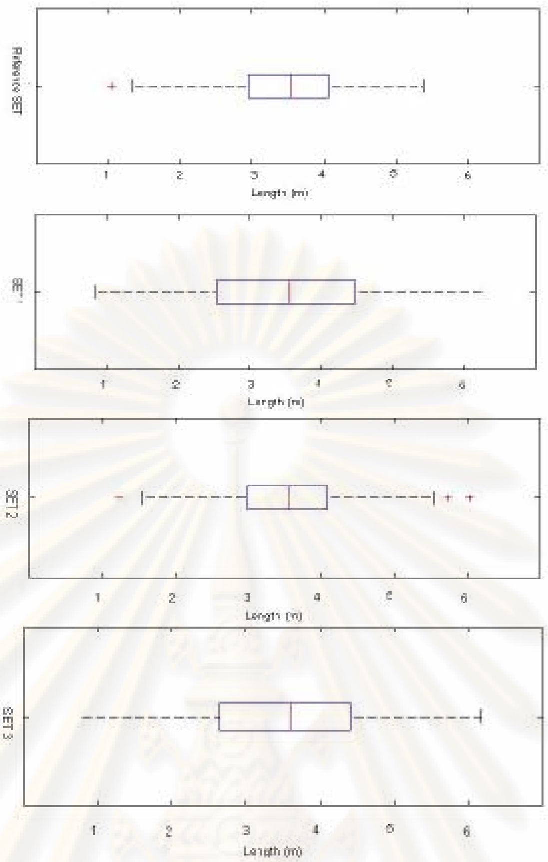
ตารางที่ 4-4 ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว

Property	Set	Min	Mean	Max	Standard
Concentration (VF)	R^a	0.0026	0.0833	0.2295	0.0552
Concentration (VF)	1	0.0013	0.0786	0.2063	0.0474
Concentration (VF)	2	0.0007	0.0658	0.1194	0.0463
Concentration (VF)	3	0.0008	0.0725	0.1567	0.0485
z_m	R^a	0.35	3.17	4.75	0.94
z_m	1	0.65	2.75	3.32	0.85
z_m	2	0.55	2.69	3.35	0.84
z_m	3	0.67	2.72	3.35	0.85
x_m	R^a	1.33	3.42	5.49	0.74
x_m	1	2.33	3.39	6.33	0.77
x_m	2	2.33	3.56	6.03	0.73
x_m	3	2.33	3.48	6.17	0.78

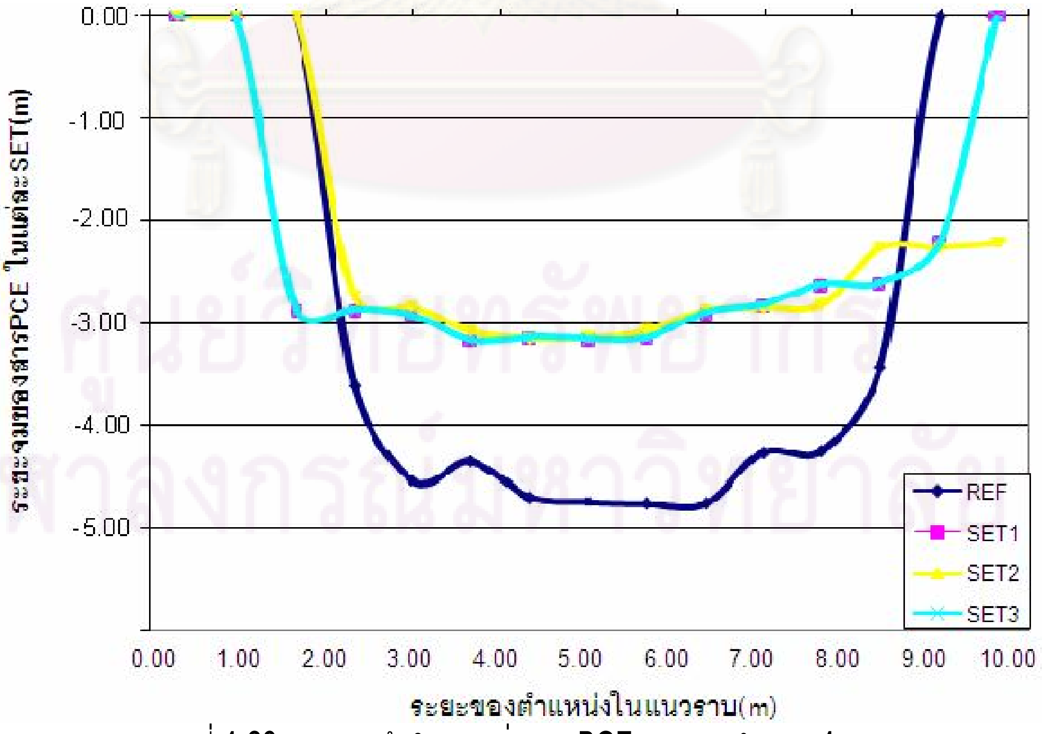


รูปที่ 4-27 Box plot ของระยะการการซึมในแนวดิ่งของ PCE จากการจำลองทางธรณีสถิติทั้ง 4 เซต

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



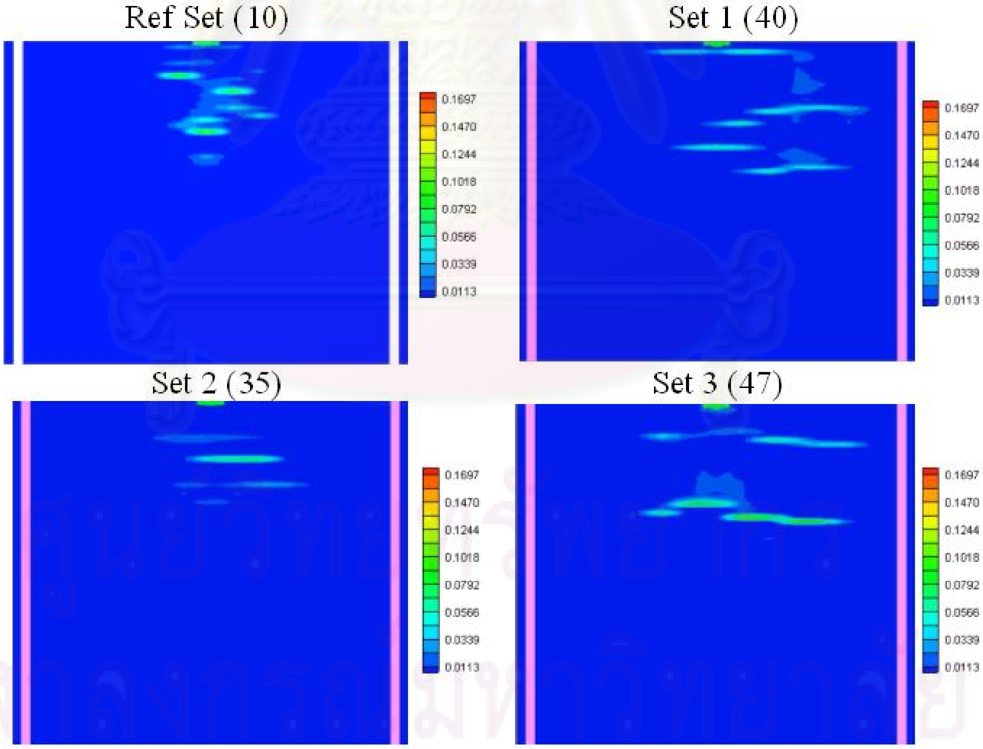
รูปที่ 4-28 Box plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบของ PCE จากการจำลองทางธรณีสถิติทั้ง 4 เซต



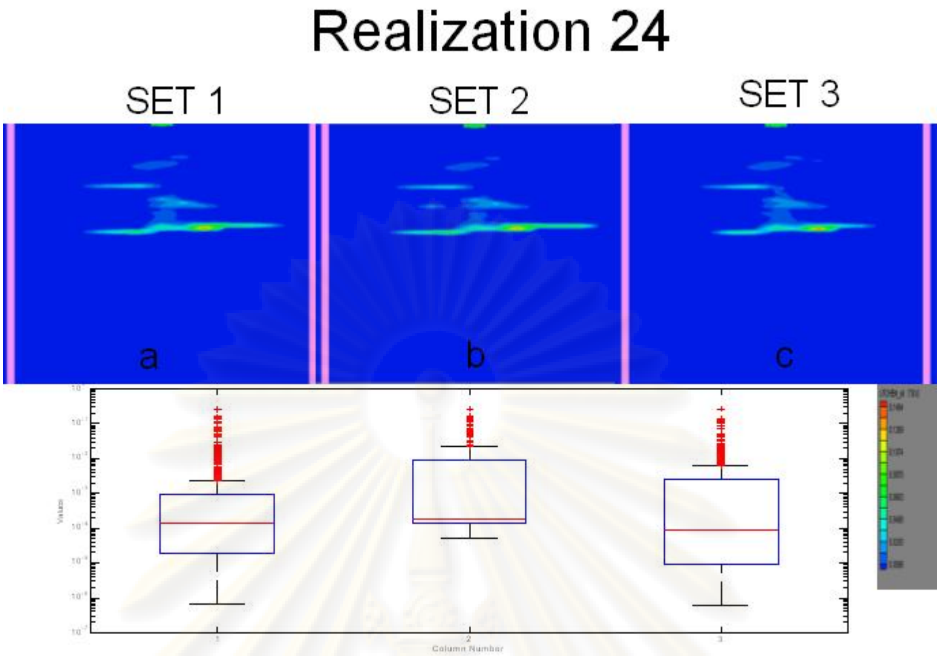
รูปที่ 4-29 ค่าระยะซึมในแนวดิ่งของ PCE จากการจำลอง 4 เซต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจำลองลักษณะชั้นน้ำใต้ดินในเซตที่ 1 เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ผู้วิจัยได้จำลองค่า d_{10} โดยวิธีการจำลองทางธรณีสถิติแบบ SIS และมีการจำลองการกระจายตัวของค่าความพรุนต่างกันไป จากนั้นจึงจำลองลักษณะการกระจายตัวของ PCE ในเซตที่ 1เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงการเปรียบเทียบลักษณะการซึมและการกระจายตัวของ PCE ในรูปที่ 4-31a , 4-31b และ 4-31c ซึ่งเป็นการจำลอง Realizations เดียวกัน จากการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของ PCE ในชั้นน้ำใต้ดินแบบอิ่มตัวเซตที่ 1 เซที่ 2 และเซตที่ 3 พบว่าแม้รูปแบบการกระจายตัวของ PCE ดูคล้ายคลึงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาจากการแสดงผลทางสถิติในรูปแบบ Box plot พบว่าพฤติกรรมทางสถิติของการกระจายตัว PCE ในชั้นน้ำใต้ดินที่เป็นตัวแทนของ Realizations ที่ 24 ของ เซตที่ 1 เซตที่ 2 และเซตที่ 3 นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งการจำลองในเซต 1 และ เซต 3 มีลักษณะการกระจายตัวของ PCE ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติในขณะที่เซตที่ 2 มีลักษณะการกระจายตัวของ PCE ลักษณะเป็นการแจกแจงเบ้ซ้ายซึ่งอาจเกิดจากผลของ Pooling Effect หรือการขังตัวของ PCE ในบางพื้นที่ของหน้าตัดดังนั้นผลของ Pooling Effect หรือการขังตัวของ PCE นั้นมีอิทธิพลจากค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน(K) มากกว่าอิทธิพลจากค่าความพรุน



รูปที่ 4-30 ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของ PCE ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซตการจำลอง



รูปที่ 4-31 การเปรียบเทียบลักษณะการซึมและการกระจายตัวของ PCE ใน Realization แต่ละเซตการจำลองและ Box plot

4.4 ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของ TCE

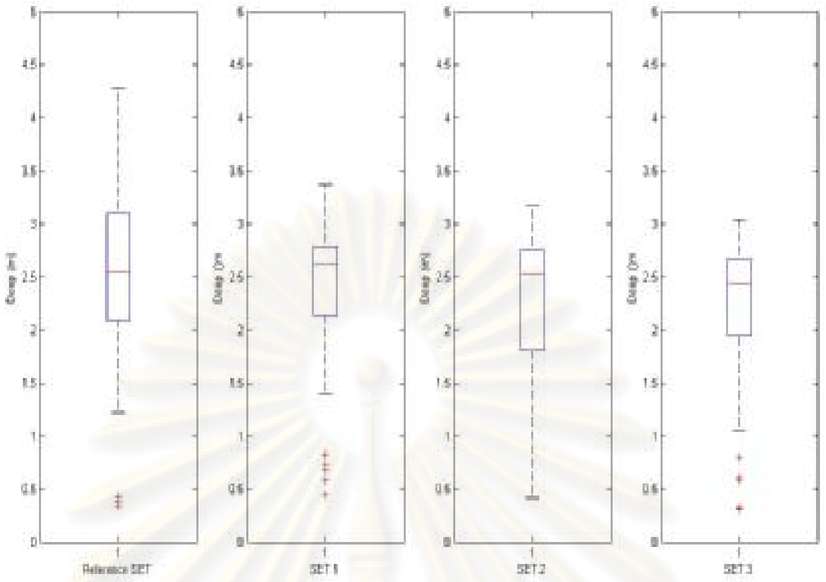
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการจำลองพฤติกรรมการซึมและการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัว ทั้งระยะการซึมในแนวดิ่งและการแผ่กระจายในแนวราบรวมทั้งค่าทางสถิติต่างๆ แสดงในตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบเชิงกราฟฟิกของข้อมูลทางสถิติของระยะการซึมในแนวดิ่งและการแผ่กระจายในแนวราบของ TCE สามารถแสดงได้ในลักษณะของ Box plot ดังแสดงในรูปที่ 4-32 และ 4-33 ตามลำดับ ผลการจำลองใน Realizations ที่เป็นตัวแทนของ TCE โดยมีความเข้มข้นสูงที่สุดจะอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.4182 ในตารางที่ 4-5 การจำลองโดยใช้ SGS มีความแปรปรวนของค่าความอิ่มตัวของ TCE Saturation มากกว่าการจำลองแบบ SIS ในเซตที่ 1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการกระจายตัวของ TCE ในเซตอ้างอิงโดยจะเพิ่มการซึมในแนวดิ่ง (z) และลดการแผ่กระจายด้านข้าง (x) ในขณะที่การจำลองในเซตที่ 1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ทำให้ลักษณะการซึมในแนวดิ่ง (z) มีค่าใกล้เคียงกันทุกเซต ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4-5 โดยพิจารณาการจำลองสโตแคสติคทุก Realizations จำนวนทั้งสิ้น 200 Realizations พบว่าระยะการซึมในแนวดิ่ง TCE จะอยู่ในช่วง 0.29 เมตร และ 4.29 เมตร ในขณะที่การแผ่กระจายแนวราบอยู่ในช่วง 0.64 เมตร ถึง 5.91 เมตร นอกจากนี้จะสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าค่าความความต่อเนื่องของค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่า (K) ในชั้นน้ำใต้ดินมีผลของการกระจายตัวในแนวราบและการซึมในแนวดิ่ง ซึ่งจากการจำลองการกระจายตัวของ TCE จะเกิดการกระจายตัว

แนวราบและการซึมแนวดิ่งต่ำกว่าลักษณะการกระจายตัวในแนวราบและแนวดิ่งของ PCE อันเกิดมากจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารปนเปื้อนประเภท TCE ที่มีลักษณะทางเคมีที่ต่ำกว่าสารปนเปื้อน TCE ในด้านของ Density, Viscosity, Lateral Spreading และ Vertical Penetration

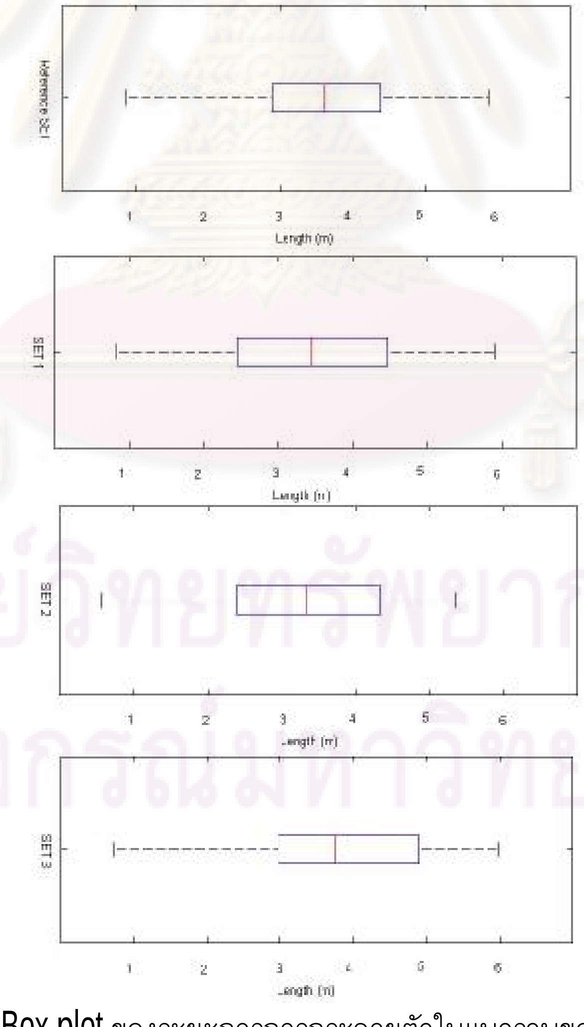
ตารางที่ 4-5 ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการกระจายตัวของ TCE ในชั้นน้ำใต้ดินอิ่มตัว

Property	Set	Min	Mean	Max	Standard
Concentration (VF)	R[a]	0.0007	0.00513	0.41812	0.0196
Concentration (VF)	1	0.0031	0.00639	0.19723	0.0126
Concentration (VF)	2	0.0013	0.00397	0.33882	0.0144
Concentration (VF)	3	0.0011	0.00656	0.40924	0.0154
z_m	R[a]	0.36	2.51	4.29	0.96
z_m	1	0.30	2.61	3.45	0.72
z_m	2	0.46	2.54	3.33	0.84
z_m	3	0.29	2.45	3.03	0.84
x_m	R[a]	0.93	3.48	5.88	1.12
x_m	1	0.91	3.46	5.91	1.31
x_m	2	0.64	3.30	5.34	1.44
x_m	3	0.78	3.70	5.98	1.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

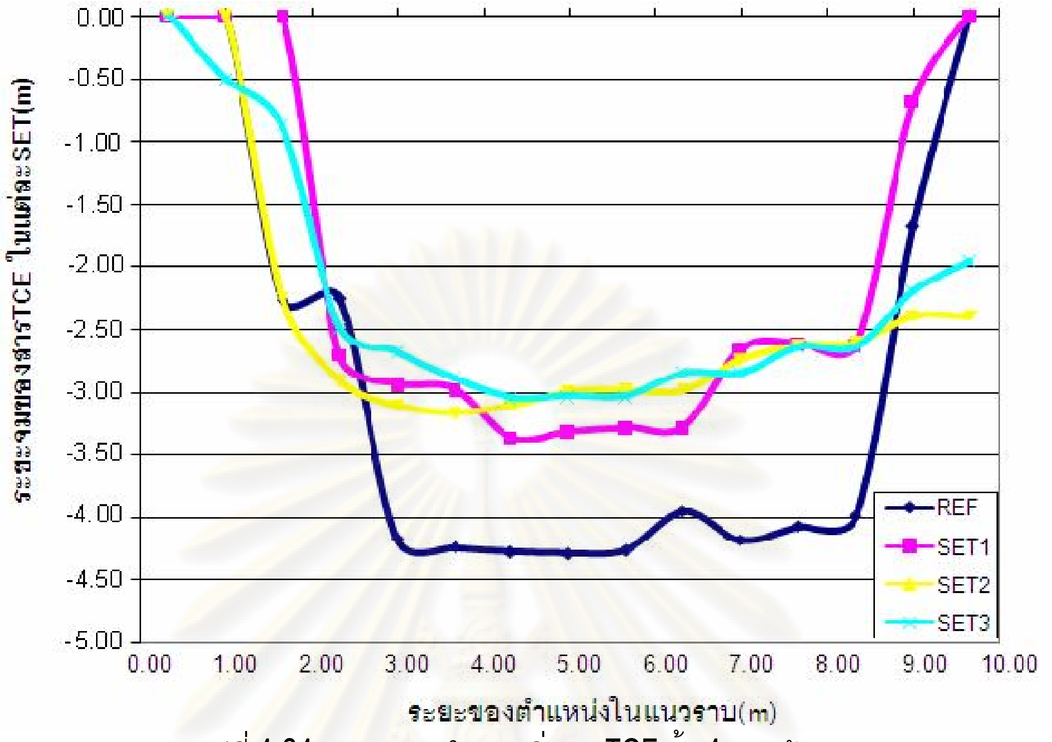


รูปที่ 4-32 Box plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวดิ่งของ TCE ทั้ง 4 เซต

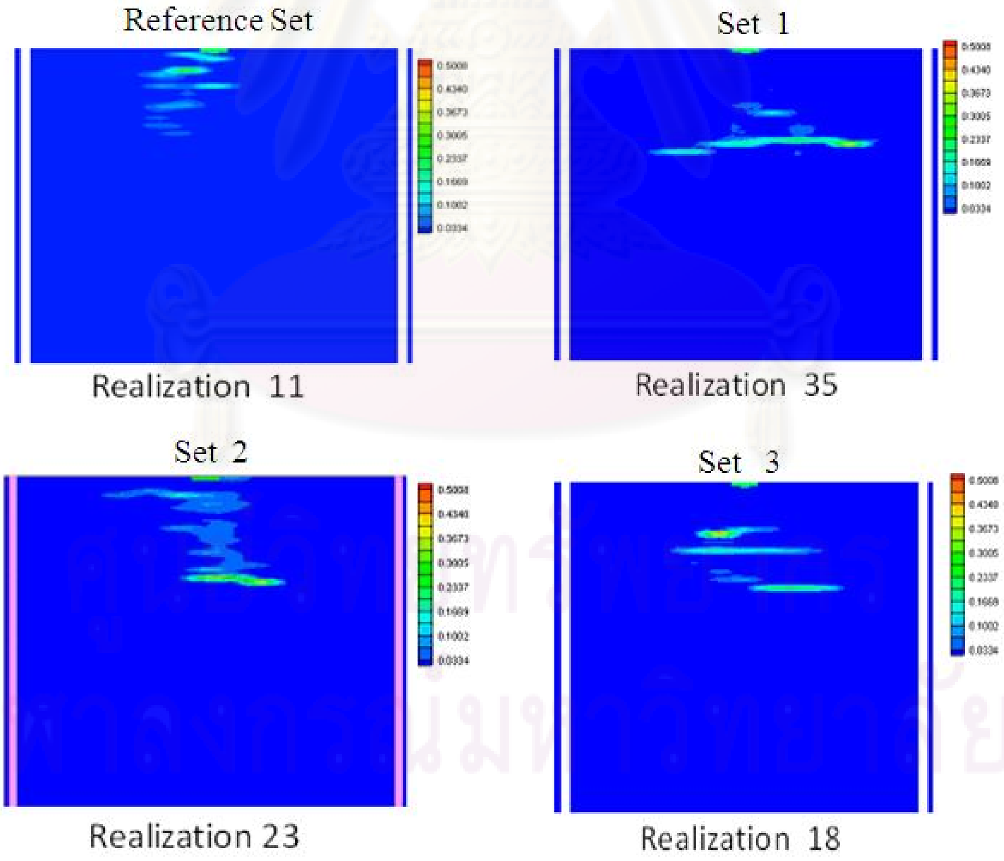


รูปที่ 4-33 Box plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบของ TCE ทั้ง 4 เซต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-34 ค่าระยะจมในแนวดิ่งของTCE ทั้ง 4 กลุ่มข้อมูล



รูปที่ 4-35 ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของ TCE ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซตการจำลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจำลองการกระจายตัวเมื่อพิจาณาลักษณะชั้นน้ำใต้ดินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการกระจายในแนวราบและแนวดิ่งของสารปนเปื้อน TCE มีลักษณะการกระจายที่แตกต่างกัน เนื่องจากผลการจำลองทางธรณีสถิติด้วยวิธี SGS และ SIS ดังแสดงในรูปที่ 4-35 ที่แสดงตัวแทนในแต่ละเซตที่มีความเข้มข้นของ TCE ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแต่ละเซต ซึ่งลักษณะการกระจายมีความแตกต่างกัน

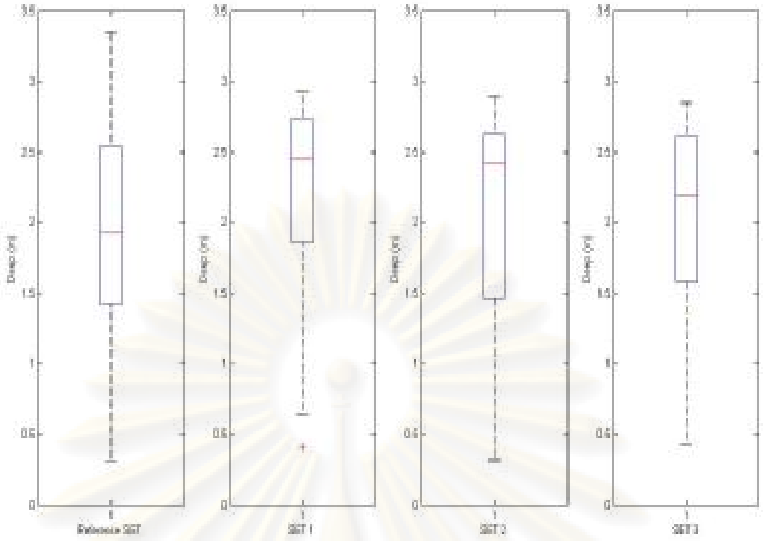
4.5 **ผลการจำลองลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม** (Mixed Waste)

ผลการวิเคราะห์การจำลองการปล่อยสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในชั้นน้ำที่อิ่มตัว ผลการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ในทั้งการซึมในแนวดิ่งและการแผ่กระจายในแนวราบรวมทั้งค่าทางสถิติต่างๆได้แสดงในตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบเชิงกราฟฟิกของข้อมูลทางสถิติของระยะการซึมในแนวดิ่ง และการกระจายในแนวราบของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) สามารถแสดงได้ในลักษณะของ Box Plot ดังแสดงในรูปที่ 4-36 และ 4-37 ตามลำดับ ความเข้มข้นสูงที่สุดจะอยู่ในช่วง 0.005 และ 0.4317 ในตารางที่ 4-6 การจำลองด้วยวิธี SGS ในเซตอ้างอิงมีความแปรปรวนของค่าความอิ่มตัวของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste Saturation) มากกว่าการจำลองแบบ SIS ในเซตที่ 1, เซตที่ 2 และเซตที่ 3 ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อนแบบผสมในเซตอ้างอิงโดยจะเพิ่มขึ้นในแนวดิ่ง (z) และระยะแผ่กระจายแนวราบลดลง (x) ส่วนเซตที่ 1และเซตที่ 2 ทำให้ลักษณะการซึมในแนวดิ่ง (z) มีค่าใกล้เคียงกันทุกเซต ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4-6 จากการจำลองสโตแคสติคทุก Realizations ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 200 Realizations ค่ามากที่สุดของการซึมในแนวดิ่งของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) จะอยู่ในช่วง 0.29 เมตร และ 3.42 เมตร ในขณะที่การแผ่กระจายแนวราบอยู่ในช่วง 0.65 เมตร ถึง 6.41 เมตร นอกจากนี้จะสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าความต่อเนื่องที่ได้จากการจำลองสารปนเปื้อนชนิดผสม (Mixed Waste) จะเกิดการกระจายตัวของแนวราบมากกว่าและการซึมในแนวดิ่งน้อยกว่ากระจายตัวของ PCE และ TCE เนื่องจากสารผสมมีส่วนประกอบของ Light Nonaquoeus Phase Liquid (LNAPL) ได้แก่ Toluene ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า DNAPL จึงทำให้ลักษณะการกระจายตัวแนวราบมีลักษณะการกระจายตัวไปตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินมีลักษณะแผ่ที่สูงกว่าสารปนเปื้อน PCE และ TCE ข้างต้นที่ได้กล่าวมา ซึ่งสารปนเปื้อนแบบผสมจะมีผลของ Interfacial Tension และ ความหนืด (m) เข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากค่าทั้ง 2 มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของสารปนเปื้อนแบบผสม ซึ่งค่า Interfacial Tension เป็นความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนและความหนืดจะส่งผลต่อการซึมในแนวดิ่งให้เกิดปรากฏการณ์ Fingering อันเนื่องจากมาจากความหนาแน่นของสารปนเปื้อนที่แตกต่างกัน

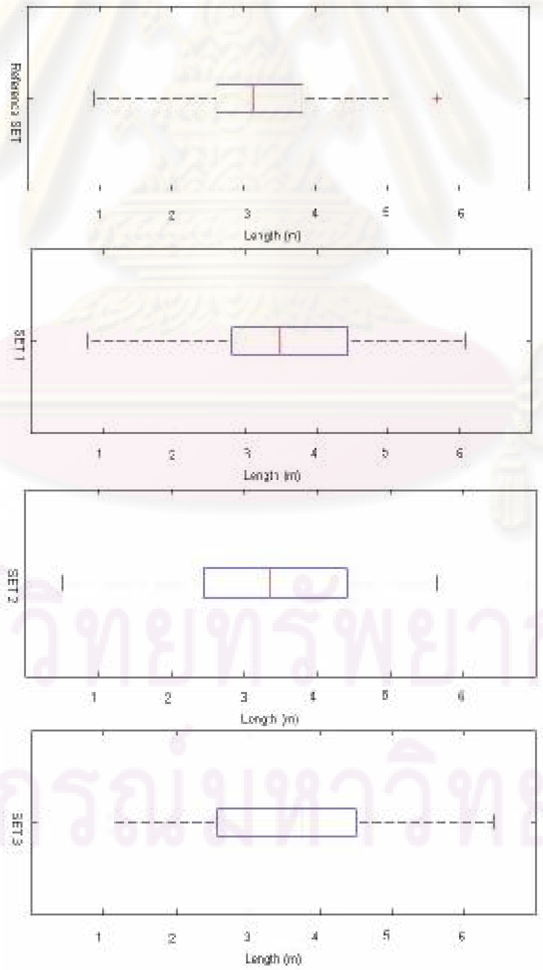
ตารางที่ 4-6 ข้อมูลทางสถิติในการเปรียบเทียบการกระจายของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste)

Property	Set	Min	Mean	Max	Standard
Concentration (VF)	R^a	0.0005	0.00432	0.4282	0.084
Concentration (VF)	1	0.0028	0.00622	0.4317	0.042
Concentration (VF)	2	0.0011	0.00571	0.3420	0.046
Concentration (VF)	3	0.0014	0.00491	0.354	0.044
z_m	R^a	0.30	1.88	3.42	0.82
z_m	1	0.40	2.42	2.92	0.70
z_m	2	0.29	2.35	2.80	0.79
z_m	3	0.45	2.24	2.78	0.73
x_m	R^a	0.93	3.20	5.73	1.13
x_m	1	0.87	3.49	6.07	1.22
x_m	2	0.65	3.33	5.65	1.32
x_m	3	1.30	3.78	6.41	1.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

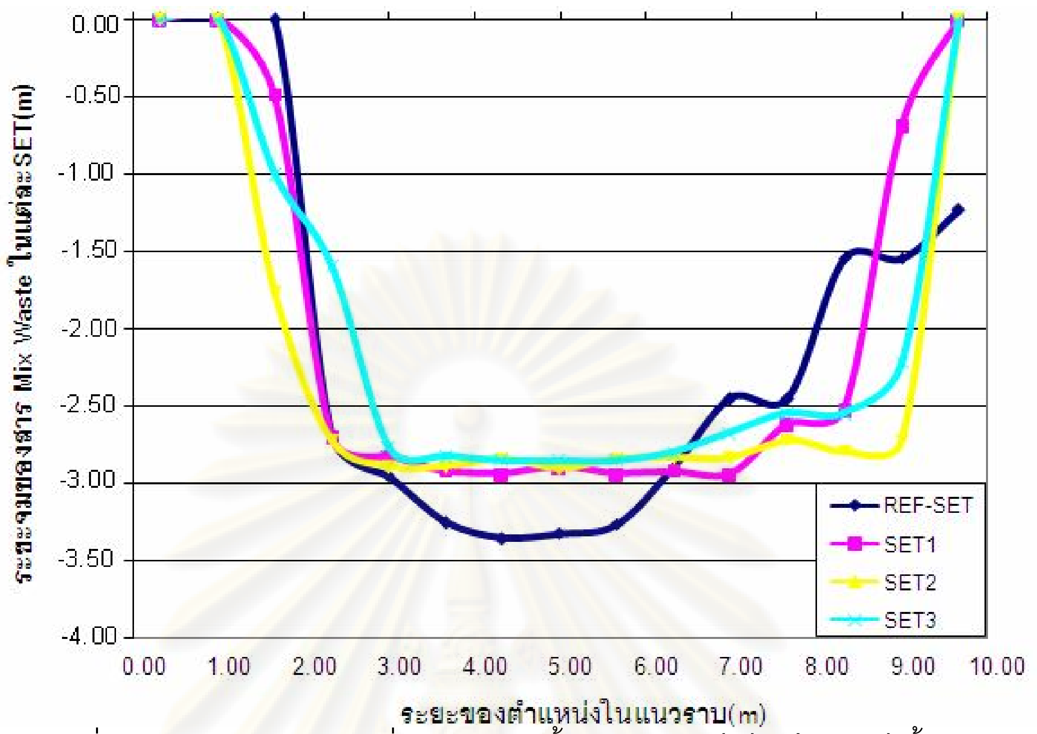


รูปที่ 4-36 Box plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวดิ่งสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต

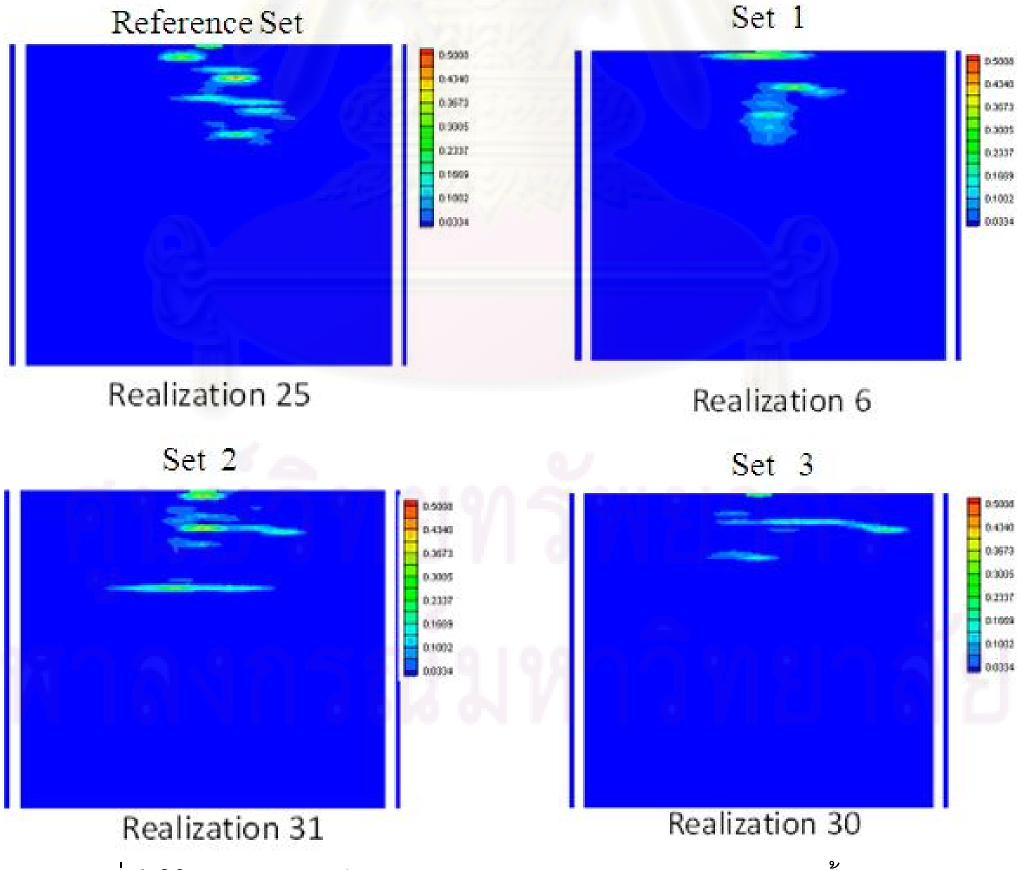


รูปที่ 4-37 Box plot ของระยะการการกระจายตัวในแนวราบสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-38 ค่าระยะจมในแนวดิ่งของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ทั้ง 4 เซต



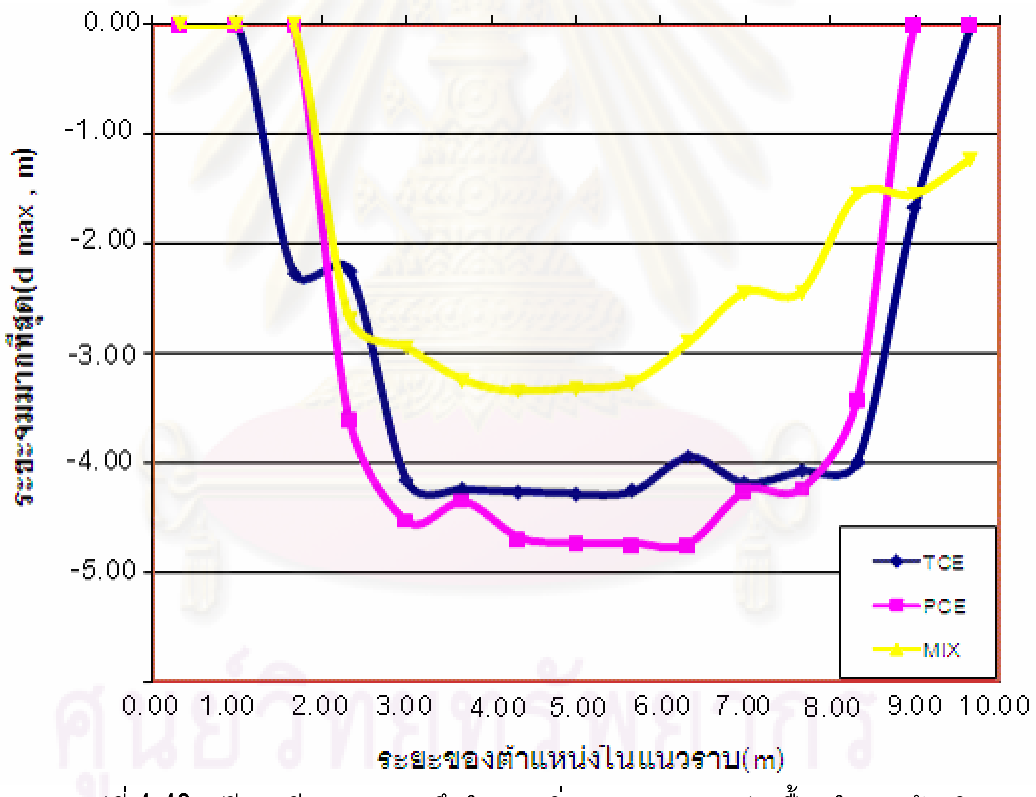
รูปที่ 4-39 ลักษณะการซึมและการกระจายตัวแนวราบของสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) ใน Realization ที่เป็นตัวแทนในแต่ละเซตการจำลอง

จากรูปที่ 4-40 ถึง 4-43 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบสารปนเปื้อนในแต่ละเซต เพื่อจะให้แสดงถึงอิทธิพลของคุณสมบัติสารที่มีผลต่อระยะการซึมในแนวดิ่ง ใช้คุณสมบัติของสารสองอย่าง คือ ความหนาแน่นและความหนืด (Dynamic Viscosity) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลในเซตอ้างอิงเห็นได้ว่าค่าระยะซึมแนวดิ่งของสารปนเปื้อนแบบผสมมีค่าน้อยที่สุด ส่วน PCE ให้ค่าเฉลี่ยระยะจมมากที่สุด ในขณะที่การแผ่ในแนวราบของเซตอ้างอิงค่ามากที่สุดเรียงจากน้อยไปมากคือ PCE, สารปนเปื้อนแบบผสม และ TCE ส่วน PCE ให้ค่าจมเฉลี่ยมากที่สุดเช่นกันเมื่อมาพิจารณาในเซต 1 สารปนเปื้อนแบบผสมให้ค่าระยะการแผ่แนวราบเฉลี่ยและค่าระยะแผ่ในแนวราบสูงสุดเมื่อเทียบกับ TCE และ PCE ตามลำดับ ทางด้านของเซตที่ 2 ค่ามากที่สุดของการกระจายในแนวราบจะเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ คือ TCE, สารปนเปื้อนแบบผสม และสาร PCE ตามลำดับ ค่าระยะซึมแนวดิ่งสูงที่สุดจะเรียงจากน้อยไปมากคือ สารปนเปื้อนแบบผสม, TCE และ PCE เช่นเดียวกับเซต 1 สำหรับเซตสุดท้ายคือเซตที่ 3 จะพบว่าค่าเฉลี่ยและค่ามากที่สุดของระยะซึมในแนวดิ่งสอดคล้องกับในเซตอ้างอิง คือ PCE จะให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็น TCE และที่สุดคือสารปนเปื้อนแบบผสม ส่วนค่าเฉลี่ยในแนวราบเมื่อเรียงจากมากไปน้อยคือ สารปนเปื้อนแบบผสม, PCE และ TCE

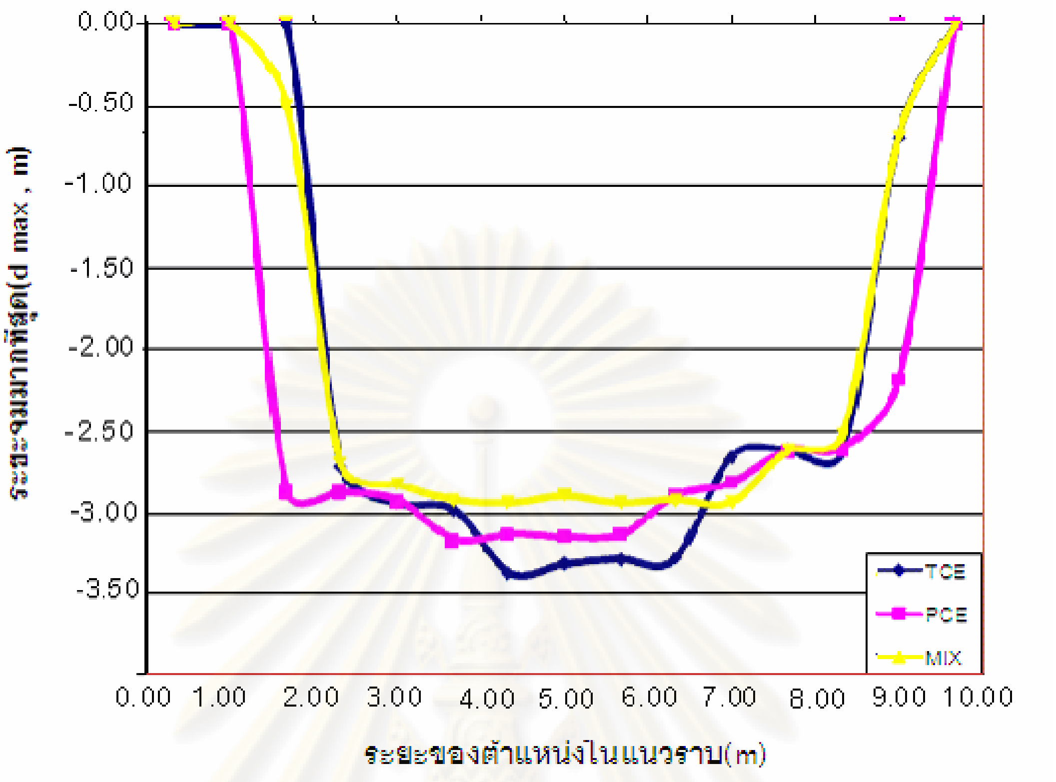
จากรูปที่ 4-44 พบว่า PCE มีแนวโน้มที่จะจมตัวลึกกว่าสารอื่นที่ทดสอบโดยสังเกตได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่สูงกว่า TCE และสารปนเปื้อนแบบผสมในทุกเซต แม้ว่าการจำลองโดยใช้ TCE จะให้ค่าสูงกว่าในบางเซต ส่วนระยะซึมในแนวดิ่งสูงสุดระหว่าง TCE และสารปนเปื้อนแบบผสมไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน จากที่กล่าวมาอาจพอสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นมีผลทำให้การซึมในแนวดิ่ง (Vertical Penetration) ส่งผลต่อการจมลึกกว่า ดังจะสังเกตได้จาก PCE เมื่อเทียบกับ TCE และสารปนเปื้อนแบบผสม (Mixed Waste) รูปที่ 4-45 แสดงระยะแผ่ในแนวราบของสารปนเปื้อนที่ทดสอบแต่ละชนิด พบว่าในทุกเซตระยะแผ่ในแนวราบของสารปนเปื้อนในเซตอ้างอิงมีค่าน้อยกว่าเซตอื่นๆ ยกเว้นการจำลองการกระจายตัวของ TCE พบว่าระยะแผ่ในแนวราบมีค่าใกล้เคียงกันในทุกเซตของการจำลอง

ถึงแม้ว่าทุกแบบจำลองที่ให้ผลของการทำนายลักษณะแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนซึ่งในขั้นตอนที่ใช้ทำการศึกษามีบางส่วนที่อาจทำให้การจำลองไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงอยู่ 2 ประการคือ ประการแรก เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ของความอิ่มตัวคงที่ในพื้นที่อาจจะส่งผลถึงข้อจำกัดในการจำลองการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อน จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Residual Water Saturation (S_{wr}) กับค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ (K) และความสัมพันธ์ระหว่าง Residual Organic Liquid Saturation (S_{or}) กับค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) ซึ่งส่งผลในการจำลองพฤติกรรมของ DANPL ในชั้นน้ำที่อิ่มตัว (Dekker and Abriola, 2000)

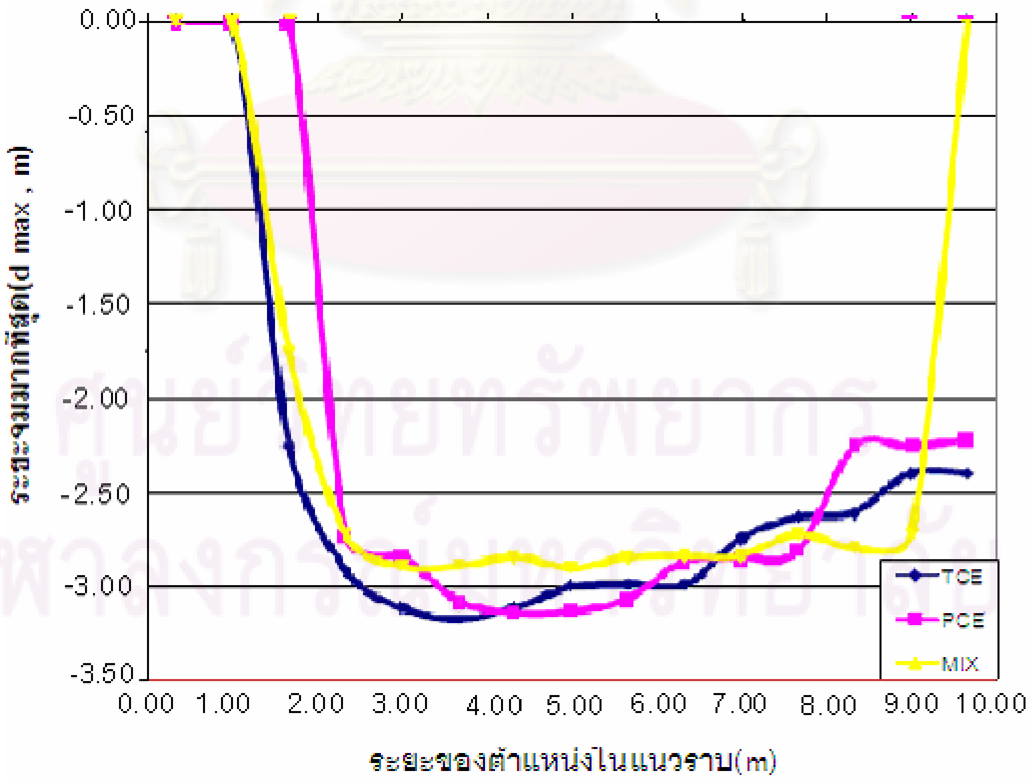
ดังนั้นจะส่งผลต่อการกระจายเชิงพื้นที่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างขนาดคละ l (Pore Size Parameter) และค่า Entry Pressure (P_b) ซึ่งมีความผันแปรในชั้นน้ำ ส่วนค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์ซึมผ่าน (K) มีส่วนสำคัญต่อรูปร่างการกระจายตัวของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิด ประการที่สอง การจำลองลักษณะชั้นน้ำใต้ดินโดยวิธี SIS อาจจะครอบคลุมข้อมูลมากกว่าจากข้อมูลจริงในพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองโดยวิธี SGS (Lemke et al. 2004) เนื่องจากมีการใช้ความผันแปรเชิงพื้นที่โดยการแจกแจงของลักษณะเม็ดดินออกเป็นกลุ่ม (Class) เพื่อเป็นตัวชี้วัดทางธรณีสถิติ การกำหนดค่า P_c-Sat บนพื้นฐานของการกระจายตัวของตัวชี้วัดยังคงให้ผลการจำลองที่มีความต่อเนื่องในแต่ละกลุ่มที่แบ่ง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของวิธี SIS ที่ได้จากการแจกแจงขนาดคละของดินในแต่ละกลุ่ม



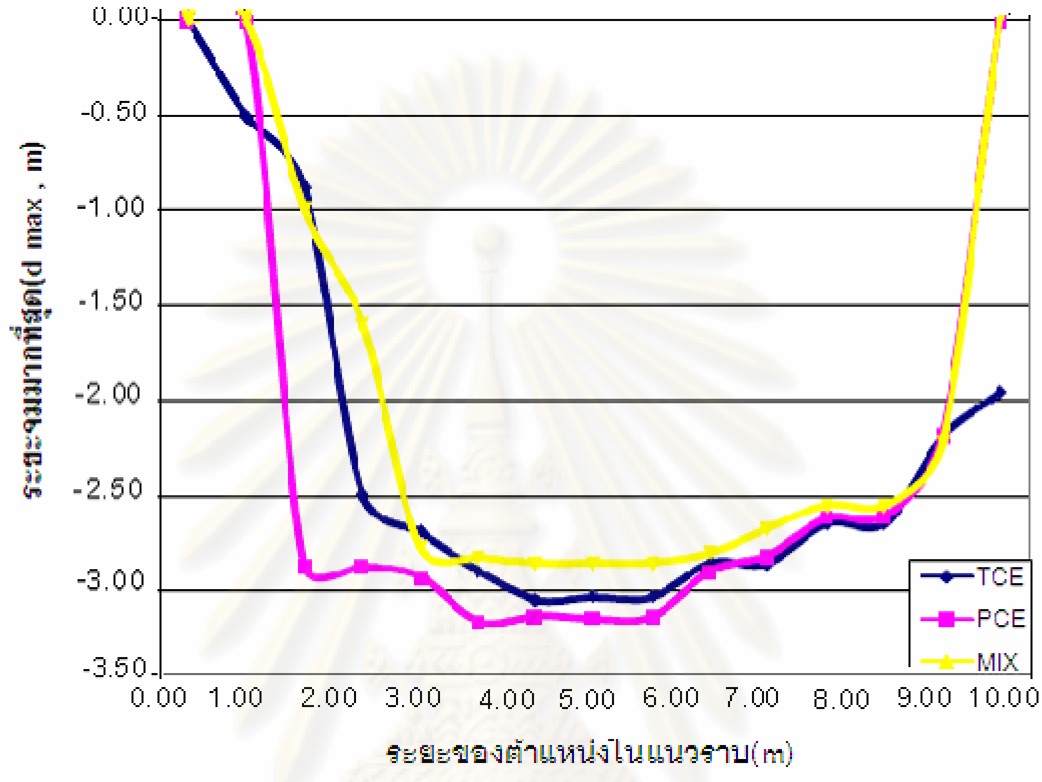
รูปที่ 4-40 เปรียบเทียบค่าระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนในเซตอ้างอิง



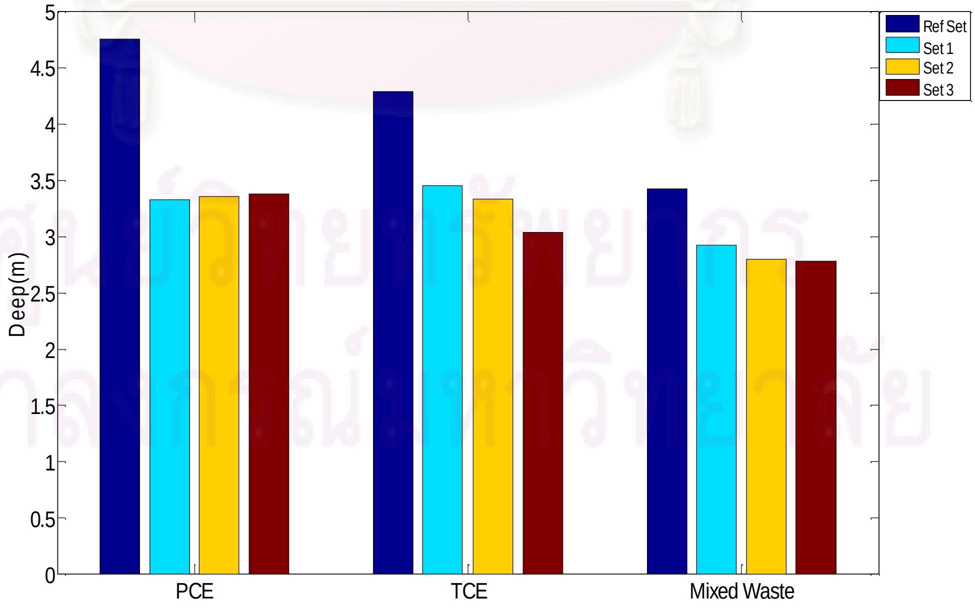
รูปที่ 4-41 เปรียบเทียบค่าระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนในเซต 1



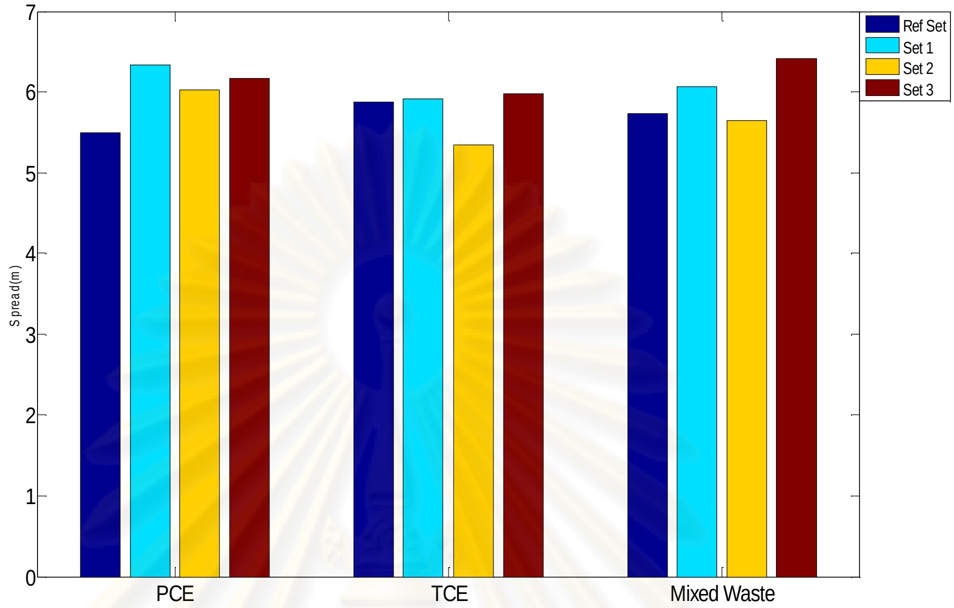
รูปที่ 4-42 เปรียบเทียบค่าระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนในเซต 2



รูปที่ 4-43 เปรียบเทียบค่าระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนในเซต 3



รูปที่ 4-44 เปรียบเทียบระยะซึมในแนวดิ่งของแต่ละสารปนเปื้อนที่ทดสอบ



รูปที่ 4-45 เปรียบเทียบค่าระยะแผ่ในแนวราบของแต่ละสารปนเปื้อนที่ทดสอบ

จากลักษณะการซึมและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน ภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นน้ำใต้ดินพบว่าลักษณะการซึมและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินมีความแตกต่างเชิงพื้นที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงพื้นที่ของคุณสมบัติชั้นดิน ชั้นน้ำใต้ดินดังได้กล่าวแล้วก่อนหน้านี้ ผลของความแตกต่างเชิงพื้นที่ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการซึมและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินและท้ายสุดนี้ยังส่งผลต่อระยะเวลาการละลาย DNAPL ออกจากชั้นน้ำใต้ดินโดยกระบวนการชะละลายตามธรรมชาติ (Natural Dissolution) จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ UTCHEM พบว่าจะต้องใช้เวลาในการชะละลายระหว่าง 42 ถึง 55 ปี (ภาคผนวก ข) อันเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชั้นน้ำใต้ดินซึ่งมีผลต่อแรงยึดระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนและผิวเม็ดดินรวมทั้งพฤติกรรมในการละลายของ DNAPL นับเป็นช่วงระยะเวลาที่นานและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงมาก ดังนั้นในการที่จะจัดการการปนเปื้อนและฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนนั้น จะต้องมีการศึกษาและสำรวจเพื่อวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ บริเวณแหล่งกำเนิดอย่างชัดเจน เพื่อประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกและออกแบบวิธีจัดการสารปนเปื้อนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4.6 ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินโดยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน

แบบจำลองเบส์เซียนที่ใช้ในการศึกษาเป็นกระบวนการอย่างหนึ่งสำหรับพัฒนาและปรับปรุงข้อมูลพื้นฐานความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่อาจเกิดขึ้นในระบบ เพื่อการประมาณค่าที่ดีที่สุด (Best Estimate) ซึ่งการวิเคราะห์เบส์เซียนจะพิจารณาความไม่แน่นอนและพารามิเตอร์ที่สนใจด้วยค่าเฉลี่ย ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้โอกาสการเกิดแบบสมบูรณ์ Expected Value of Perfect Information (EVPI) ของค่าเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเพื่อลดความไม่แน่นอนที่จะเกิดขึ้นในระบบ โดยมีจุดมุ่งหมายในการคาดการณ์โอกาสสำรวจพบเจอ

การปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินของพื้นที่ศึกษา โดยกำหนดให้โอกาสที่สำรวจพบการปนเปื้อนเมื่อมีค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเท่ากับหรือมากกว่า 0.0001 VF (VF = Volume Fraction Unit) เนื่องจากค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงของความสามารถในการละลายที่ 20°C ถ้ามีความเข้มข้นมากกว่านี้ก็ยังคงถือว่ามีการตกค้างอยู่ในชั้นน้ำใต้ดิน

4.6.1 ค่าเริ่มต้นของเบส์เซียนในกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ

ในการระบุความน่าจะเป็นในการปรับปรุงข้อมูลของเบส์เซียน ซึ่งวิธีของเบส์เซียนจะให้ผลของความเชื่อมั่นในการทำนายความน่าจะเป็น ที่จะส่งให้มีความถูกต้องมากขึ้น ผู้วิจัยได้กำหนดค่าเริ่มต้นของกระบวนการเบส์เซียน โดยกำหนดค่าความน่าจะเป็นก่อนการสำรวจที่ตำแหน่งสำรวจแรกที่ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ศึกษาที่ระยะ 5 เมตร โดยให้มีความลึกที่ได้จากข้อมูลทางสถิติในส่วนของการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของสารปนเปื้อน DNAPL ให้เท่ากับ 4 เมตร เนื่องจากผลการจำลองพฤติกรรมการซึมในแนวดิ่งในแบบจำลอง UTCHEM มีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 4 เมตรทุกกรณี การประยุกต์ใช้แบบจำลองความเข้มข้น แสดงให้เห็นภาพของข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองและผลของแบบจำลอง จะได้ออกมาในรูปแบบของลักษณะหน้าตัดของความน่าจะเป็นที่มีโอกาสพบการปนเปื้อน

จากการกำหนดจุดตำแหน่งขุดสำรวจโดยให้ความยาวของพื้นที่เท่ากับ 10 เมตร และแบ่งออกเป็น 15 ช่วงตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนสร้างกริดเซลล์ของ UTCHEM ให้หลุมแรกเป็นตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่ ณ ตำแหน่งที่ 5 เมตร โดยหลุมต่อไปจะสำรวจนั้นไม่มีการขุดจริงจะเป็นลักษณะ Non Deterministic Observation โดยจะกำหนดค่าความน่าจะเป็นมาให้จากกระบวนการปรับปรุงเบส์เซียน จำนวนครั้งที่ใช้ในการปรับปรุงข้อมูลจะเท่ากับจำนวนที่สังเกต (q) จากการศึกษานี้กำหนดให้ตัวแปรทางธรณีมี 1 ตัวแปร คือ การสถานะของการตรวจวัด (X_1) ซึ่งจำนวนของระดับความต่อเนื่องเป็นช่วงๆ (Discrete - State และ Continuous - Space) แสดงในตารางที่ 4-7 และค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลง (c_i) กับค่าความน่าจะ

เป็นการเปลี่ยนแปลง (P_{ij}) ของแต่ละตัวแปรทางธรณี โดยตัวอย่างพารามิเตอร์ค่าเริ่มต้นมาจากข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่และกำหนดให้ในแต่ละความลึก ดังแสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-7 พารามิเตอร์ทางธรณีและระบุสถานะของตัวแปร (N=1)

	State
i	$n_1 = 2$
(1)	(2)
1	เจอสารปนเปื้อน
2	ไม่เจอสารปนเปื้อน

ตารางที่ 4-8 ความน่าจะเป็นระหว่างการเปลี่ยนแปลงและสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลง (ที่ความลึก 0.1 เมตร)

การตรวจวัด(X_2)			
P_{ij}			c_i
i	$j=1$	$j=2$	
1	0	1	0.18656
2	1	0	0.21322

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-9 ตำแหน่งหลุมและสถานะของหลุมสำรวจ เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1 ที่ตำแหน่ง 5 เมตร

Number	Deep (m)	Observed State $Y_1(t_b)$
(1)	(2)	(3)
1	0.30	1
2	0.60	1
3	0.90	1
4	1.20	1
5	1.50	1
6	1.80	1
7	2.10	1
8	2.40	1
9	2.70	1
10	3.00	2
11	3.30	2
12	3.60	2
13	3.90	2
14	4.00	2

4.6.2 **การวิเคราะห์โดยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน**

ในการประมาณค่าความเชื่อมั่นที่ใช้ในการสำรวจนั้นจะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ของโอกาสที่เป็นไปได้ (Likelihood Matrices) $L_{ij}(t_b)$ ในแต่ละตารางกริดโดยกำหนดให้เป็นอิสระ (Independent) ต่อตำแหน่งการสำรวจ ดังแสดงในตารางที่ 4-10 ซึ่งจะบ่งบอกถึง โอกาสในแต่ละกริดเซลล์ที่จะสำรวจพบการปนเปื้อนหรือโอกาสในแต่ละกริดเซลล์ที่สำรวจไม่พบการปนเปื้อน นอกจากนี้การประมาณค่าตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินสามารถประมาณการได้ โดยใช้ความน่าจะเป็นหลังการแจกแจงพารามิเตอร์ $s_i^{'}(t)$ ดังนั้นตอนที่ได้อธิบายในบทที่ 3 เมื่อมีตำแหน่งของการสำรวจตำแหน่งแรกแล้วจะมีการปรับปรุงความน่าจะเป็นในการ

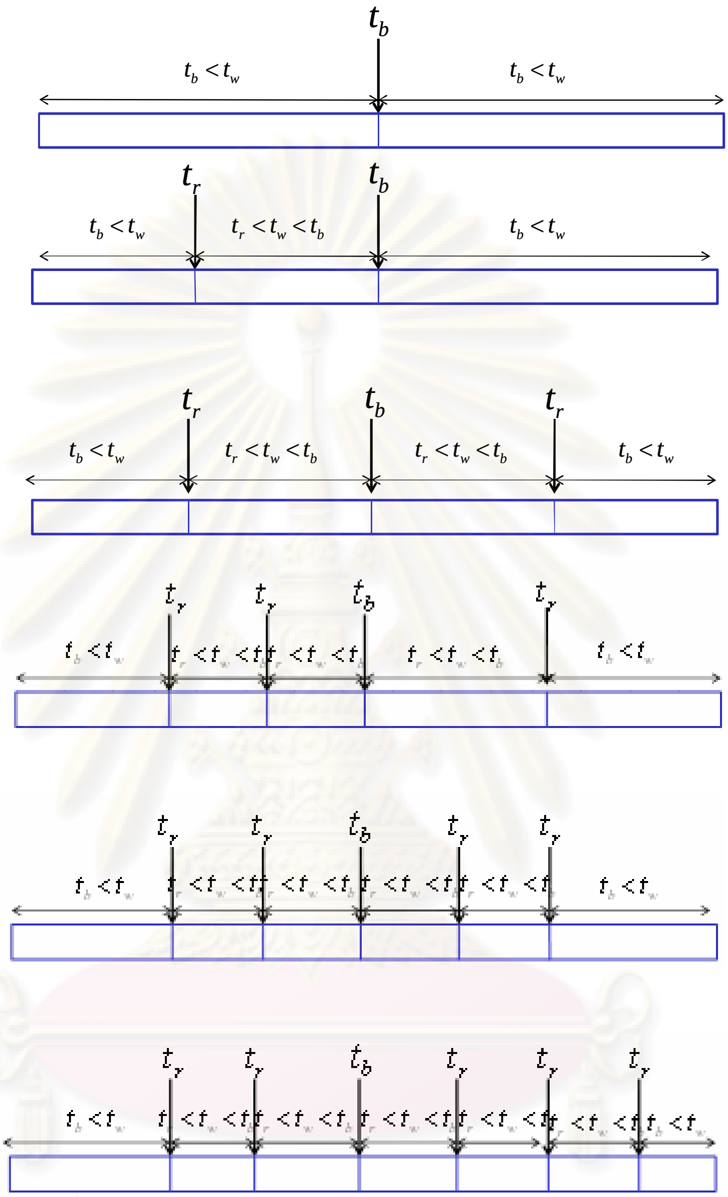
สำรวจการปนเปื้อนในตำแหน่งอื่นๆในแนวแกน x โดยอาศัยหลักการของเบส์ในสมการที่ 3-14 โดยจะค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งสำรวจตามเงื่อนไขของสมการ

ตารางที่ 4-10 เมตริกการประมาณค่าความเชื่อมั่นในการสำรวจพบเจอการปนเปื้อน

$L_{ij} = P[Y_k = j \mid X_k = i]$		
การตรวจวัด (X_1)		
i	$j=1$	$j=2$
1	0.95	0.05
2	0.05	0.95

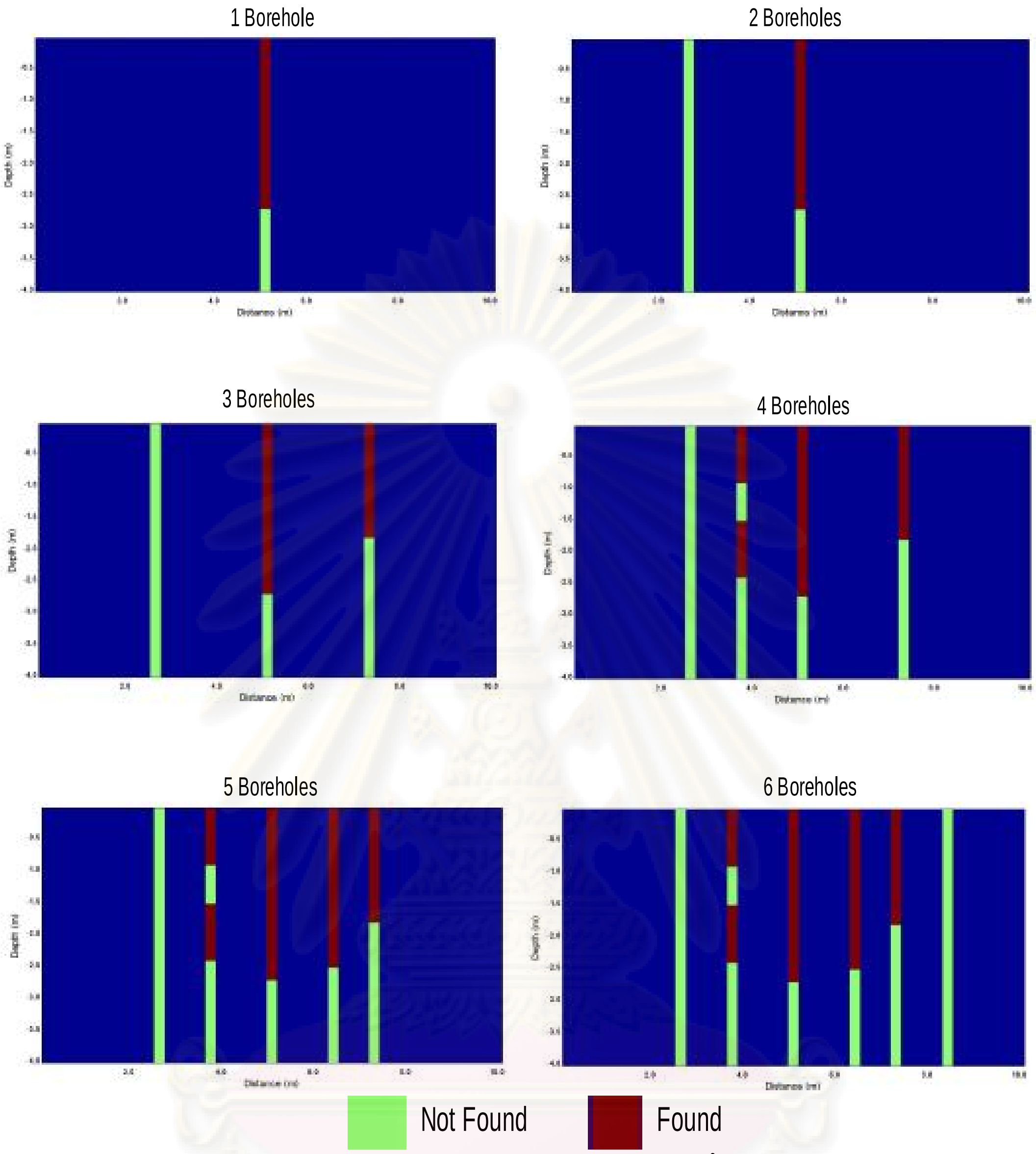
ระดับความน่าจะเป็นในแต่ละตัวแปรทางธรณีสามารถสรุปได้จากผลรวมของความน่าจะเป็นตามเงื่อนไขทางธรณีตามเวกเตอร์ x โดยทั่วไปแล้วระดับของความน่าจะเป็นแต่ละตัวแปรทางธรณี x ที่ไม่มีการสำรวจสามารถคำนวณได้โดยใช้เงื่อนไขของสมการที่ 3-16 ซึ่งผลของการประมาณการแสดงดังรูปที่ 4-46 และ 4-47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-46 ตำแหน่งของการสำรวจที่ใช้ในแบบจำลองมัลติสเตจเบส์เซียน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-47 ตัวอย่างตำแหน่งของการสำรวจที่พบเจอการปนเปื้อนของ PCE ในเซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1

ผลความน่าจะเป็นในการสำรวจการปนเปื้อน ณ ตำแหน่งสำรวจต่างๆ เมื่อมีการปรับปรุงข้อมูลจำนวน 6 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4-11, 4-12 และ 4-13 ส่วนตารางที่ 4-14 และ 4-15 แสดงการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในแนวแกน x ซึ่งความน่าจะเป็นที่แสดงในตารางบ่งบอกถึงโอกาสที่จะพบการปนเปื้อนในพื้นที่กล่าวคือยิ่งความน่าจะเป็นมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีโอกาสพบเจอการปนเปื้อนในทางกลับกันถ้าความน่าจะเป็นเข้าใกล้ 0 หมายความว่า ณ ตำแหน่งนั้นมีโอกาสไม่พบการปนเปื้อน ซึ่งตัวอย่างคำนวณได้แสดงในภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-11 ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 1.5 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตรในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
0.10	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.20	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.30	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.40	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.50	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.60	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
0.70	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
0.80	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
0.90	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.00	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.10	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.20	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.30	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.40	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.50	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.60	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.70	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.80	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
1.90	0.375	0.081	0.045	0.010	0.004	0.002
2.00	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
2.10	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
2.20	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
2.30	0.286	0.116	0.054	0.004	0.001	0.000
2.40	0.167	0.208	0.067	0.004	0.001	0.001
2.50	0.167	0.208	0.067	0.004	0.001	0.001
2.60	0.167	0.208	0.067	0.004	0.001	0.001
2.70	0.167	0.208	0.067	0.004	0.001	0.001
2.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
3.70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 4-12 ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 6.7 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตรในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
0.10	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.20	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.30	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.40	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.50	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.60	0.714	0.714	0.714	0.800	0.806	0.834
0.70	0.714	0.714	0.714	0.800	0.806	0.834
0.80	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
0.90	0.750	0.750	0.750	0.803	0.808	0.832
1.00	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.832
1.10	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.866
1.20	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.866
1.30	0.750	0.750	0.750	0.866	0.873	0.901
1.40	0.750	0.750	0.750	0.866	0.873	0.901
1.50	0.750	0.750	0.750	0.866	0.873	0.901
1.60	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.866
1.70	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.866
1.80	0.750	0.750	0.750	0.835	0.840	0.866
1.90	0.750	0.750	0.750	0.866	0.873	0.901
2.00	0.714	0.714	0.714	0.864	0.871	0.904
2.10	0.714	0.714	0.714	0.864	0.871	0.904
2.20	0.714	0.714	0.714	0.895	0.904	0.939
2.30	0.714	0.714	0.714	0.895	0.904	0.939
2.40	0.667	0.667	0.667	0.891	0.901	0.942
2.50	0.667	0.667	0.667	0.948	0.961	0.972
2.60	0.667	0.667	0.667	0.343	0.343	0.349
2.70	0.667	0.667	0.667	0.343	0.343	0.349
2.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
3.10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 4-13 ความน่าจะเป็นจากการปรับปรุงค่า ณ ตำแหน่ง 8 เมตรในแนวแกน x ความลึก 4 เมตร ในแนวแกน z เซตอ้างอิงแบบจำลองที่ 1

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
0.10	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.20	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.30	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.40	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.50	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.60	0.429	0.407	0.407	0.705	0.799	0.818
0.70	0.429	0.407	0.407	0.705	0.799	0.818
0.80	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
0.90	0.500	0.475	0.475	0.742	0.802	0.855
1.00	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.861
1.10	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.861
1.20	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.861
1.30	0.500	0.475	0.475	0.742	0.866	0.882
1.40	0.500	0.475	0.475	0.742	0.866	0.882
1.50	0.500	0.475	0.475	0.742	0.866	0.882
1.60	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.856
1.70	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.856
1.80	0.500	0.475	0.475	0.742	0.834	0.856
1.90	0.500	0.475	0.475	0.421	0.211	0.353
2.00	0.429	0.407	0.407	0.421	0.211	0.340
2.10	0.429	0.407	0.407	0.421	0.211	0.340
2.20	0.429	0.407	0.407	0.421	0.242	0.384
2.30	0.429	0.407	0.407	0.421	0.242	0.384
2.40	0.333	0.317	0.317	0.321	0.201	0.364

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth	Update 1	Update 2	Update 3	Update 4	Update 5	Update 6
2.50	0.333	0.317	0.317	0.321	0.201	0.444
2.60	0.333	0.317	0.317	0.321	0.201	0.485
2.70	0.333	0.317	0.317	0.321	0.201	0.485
2.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-14 การปรับปรุงโอกาสที่เจอสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 เมตร ลึก 1 เมตร ในแนวแกน x เซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1

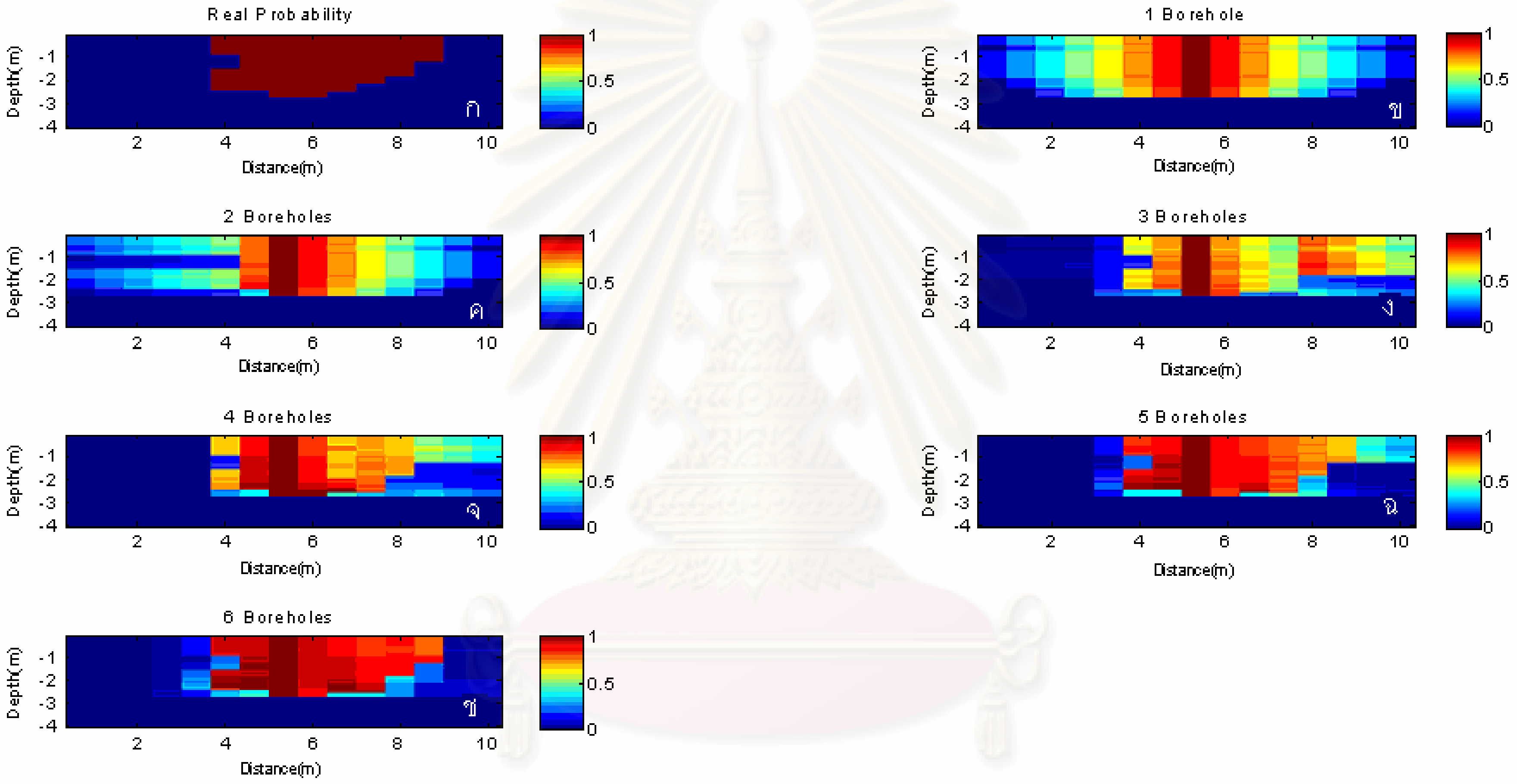
	0.0-0.6	0.6-1.2	1.2-1.8	1.8-2.4	2.4-3.0	3.0-3.6	3.6-4.2	4.2-4.8	4.8-5.4	5.4-6.0	6.0-6.6	6.6-7.2	7.2-7.8	7.8-8.4	8.4-10
1 หลุม	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	0.999	0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125
2 หลุม	0.041	0.055	0.069	0.083	0.096	0.110	0.781	0.999	0.875	0.750	0.625	0.500	0.375	0.250	0.125
3 หลุม	0.019	0.022	0.026	0.030	0.114	0.137	0.743	0.999	0.743	0.637	0.531	0.828	0.724	0.621	0.517
4 หลุม	0.003	0.003	0.004	0.084	0.154	0.145	0.894	0.999	0.849	0.673	0.743	0.691	0.508	0.444	0.381
5 หลุม	0.002	0.002	0.002	0.002	0.030	0.188	0.917	0.999	0.875	0.849	0.795	0.749	0.708	0.443	0.354
6 หลุม	0.001	0.002	0.002	0.025	0.042	0.200	0.943	0.999	0.910	0.901	0.849	0.832	0.853	0.024	0.024

ตารางที่ 4-15 การปรับปรุงโอกาสที่เจอสารปนเปื้อน ณ ตำแหน่งที่ 5 เมตร ลึก 2 เมตร ในแนวแกน x เซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1

	0.0-0.6	0.6-1.2	1.2-1.8	1.8-2.4	2.4-3.0	3.0-3.6	3.6-4.2	4.2-4.8	4.8-5.4	5.4-6.0	6.0-6.6	6.6-7.2	7.2-7.8	7.8-8.4	8.4-10
1 หลุม	0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857	0.999	0.857	0.714	0.571	0.429	0.286	0.143	0.000
2 หลุม	0.138	0.207	0.276	0.344	0.413	0.482	0.827	0.999	0.857	0.714	0.571	0.429	0.286	0.143	0.000
3 หลุม	0.006	0.008	0.009	0.011	0.123	0.630	0.756	0.999	0.756	0.630	0.504	0.198	0.170	0.141	0.113
4 หลุม	0.003	0.003	0.004	0.054	0.154	0.696	0.928	0.999	0.882	0.834	0.756	0.172	0.155	0.133	0.111
5 หลุม	0.000	0.000	0.000	0.000	0.171	0.929	0.952	0.999	0.857	0.882	0.793	0.296	0.226	0.048	0.019
6 หลุม	0.000	0.000	0.000	0.027	0.238	0.961	0.979	0.999	0.891	0.940	0.882	0.340	0.045	0.026	0.048

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

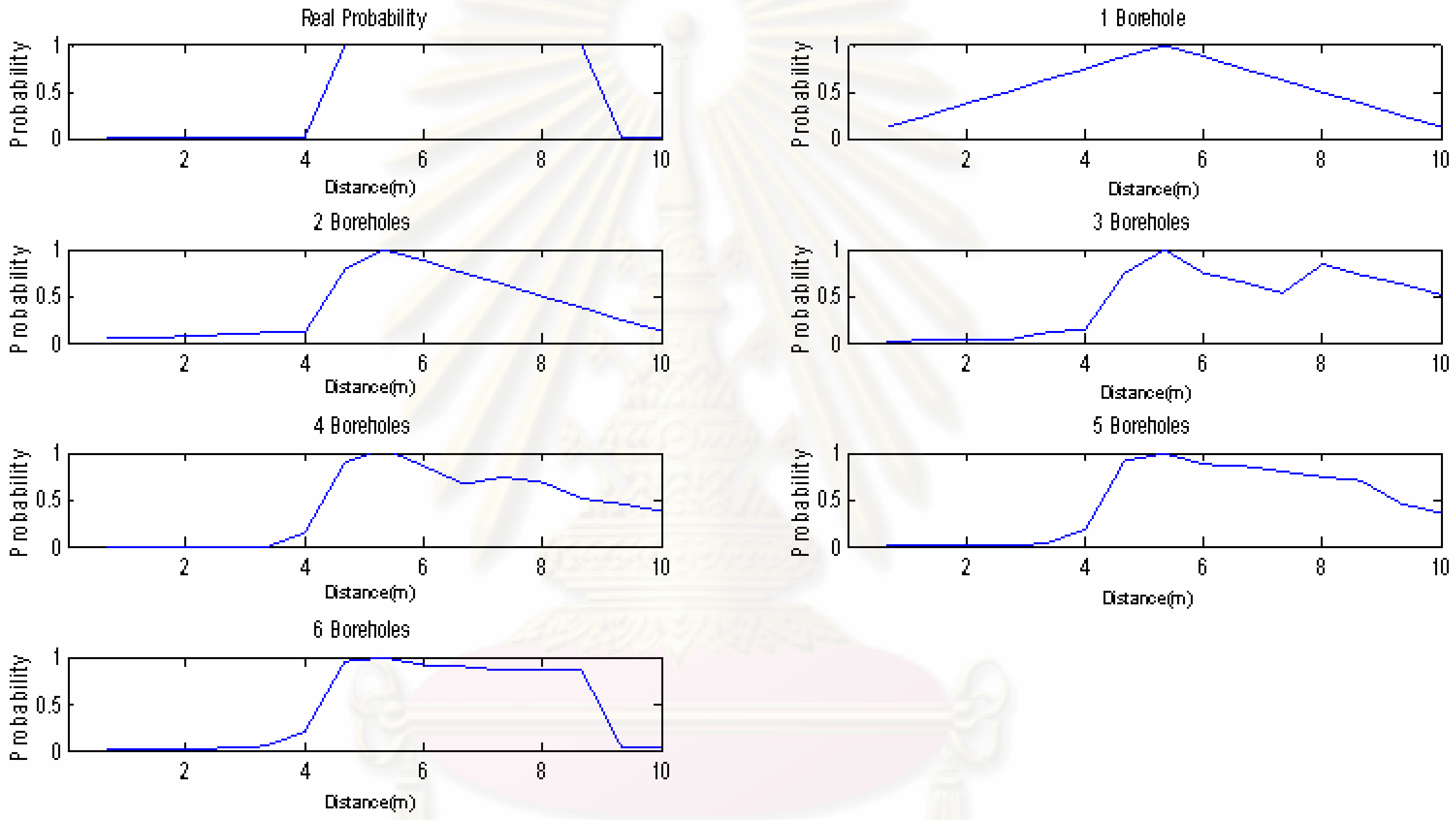
122



รูปที่ 4-48 แบบจำลองความน่าจะเป็นโอกาสที่ตรวจพบการปนเปื้อน เซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1

123

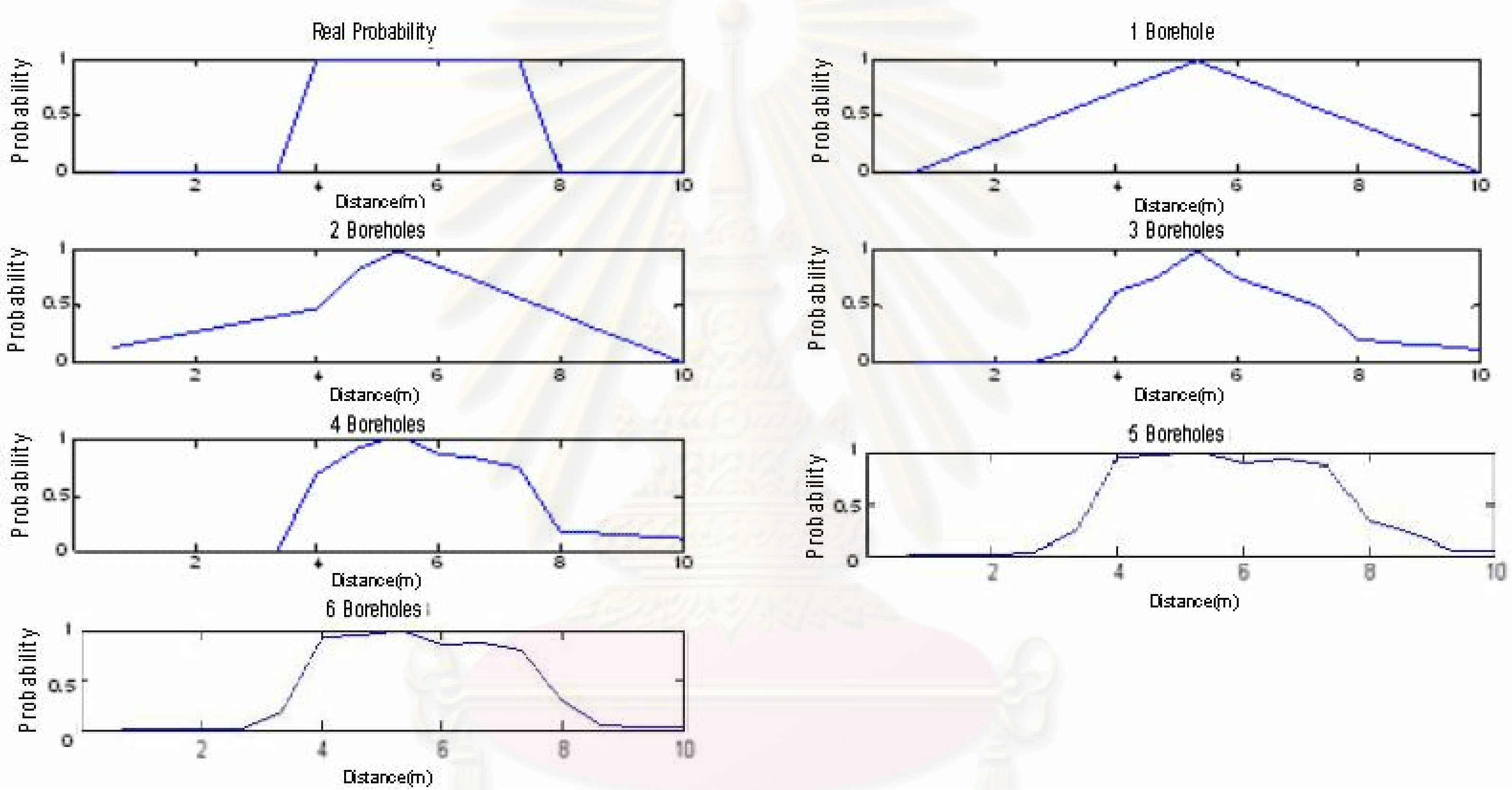
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-49 หน้าตัดความน่าจะเป็นที่มีโอกาสเจอสารปนเปื้อนที่ความลึก 1 เมตร ในแนวแกน x เซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

124



รูปที่ 4-50 หน้าตัดความน่าจะเป็นที่มีโอกาสเจอสารปนเปื้อนที่ความลึก 2 เมตร ในแนวแกน x เซทอ้างอิง แบบจำลองที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

125

จากรูปที่ 4-48ก แสดงแผนที่การกระจายตัวของความเป็นไปได้จริงในการตรวจพบการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา เมื่อเริ่มกำหนดตำแหน่งสำรวจแรก ณ กึ่งกลางพื้นที่ศึกษาเพื่อปรับปรุงข้อมูลและแผนที่การกระจายตัวของความเป็นไปได้ในการตรวจพบการปนเปื้อน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ศึกษาจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-48ข ผลการจำลองพบว่าเมื่อมีตำแหน่งสำรวจเพียง 1 ตำแหน่งไม่สามารถทำนายความเป็นไปได้ในการตรวจพบการปนเปื้อนได้อย่างแม่นยำเมื่อเทียบกับแผนที่การกระจายตัวจริงที่แสดงในรูปที่ 4-48ก เนื่องจากเกิดความน่าจะเป็นแบบสมมาตรในแต่ละชั้นของพื้นที่ศึกษาจะขึ้นอยู่กับค่า P_{ij} และ c_i ของแต่ละระดับความลึก กำหนดตำแหน่งสำรวจอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง และทำการปรับปรุงข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีเบส์เซียนและมาร์คอฟจะสามารถระบุความน่าจะเป็นในพื้นที่ศึกษาได้ ดังรูปที่ 4-48ค (2 ตำแหน่ง) และ 4-48ง (3 ตำแหน่ง) พบว่ารูปร่างลักษณะการกระจายตัวของความเป็นไปได้ในการตรวจพบการปนเปื้อนเริ่มมีรูปร่างมากขึ้น แต่ยังไม่สามารถระบุโอกาสที่จะตรวจพบการปนเปื้อนได้อย่างแน่นอนเนื่องจากความน่าการตรวจพบที่จำลองได้จะเป็นยังมีค่าต่ำถึงปานกลางกล่าวคืออยู่ในช่วง 0.4-0.7 รูปที่ 4-48จ และ 4-48ฉ แสดงผลการจำลองเมื่อมีการเพิ่มตำแหน่งสำรวจตำแหน่งที่ 4 และ 5 มากขึ้นตรงด้านเหนือน้ำ (ซ้ายมือ) และท้ายน้ำ(ขวามือ) พบว่าได้รูปแบบการกระจายตัวของโอกาสที่จะตรวจพบการปนเปื้อนที่มีรูปร่างชัดเจน หลังจากมีการปรับปรุงข้อมูล 5 ครั้ง เป็นที่น่าสังเกตว่าลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นในการตรวจพบการปนเปื้อนที่จำลองขึ้นสำหรับด้านท้ายน้ำยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่เมื่อเทียบกับการทำนายด้วยกระบวนการมาร์คอฟถึงแม้ว่าจะใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้ว ดังรูปที่ 4-48ฉ ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มตำแหน่งเจาะสำรวจ 1 ตำแหน่ง เพื่อลดความไม่แน่นอนที่จะเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวผลการจำลองความน่าจะเป็นแสดงในรูปที่ 4-48ช แม้ว่ารูปร่างของแหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) จะมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากแล้วแต่เมื่อเปรียบเทียบกริดต่อกริดนั้นพบว่าจะยังคงมีความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่ตรวจพบการปนเปื้อน ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 4-50 ณ ตำแหน่งระยะ 8.04 เมตรตามแนวแกน x ความลึก 2 เมตรจากผิวดิน พบว่าในแบบจำลองให้ความน่าจะเป็นที่จะตรวจพบการปนเปื้อนเพียง 0.293 แต่เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของความน่าจะเป็นในการตรวจพบการปนเปื้อนจริงในรูปที่4-48a พบว่า ณ ตำแหน่งนั้นมีความน่าจะเป็นในการตรวจพบการปนเปื้อนเท่ากับ 1.0 สาเหตุของความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการทำนายค่าความน่าจะเป็น ณ ตำแหน่งที่ 6.5 เมตร พบการปนเปื้อนในขณะที่ตำแหน่งที่ 9.0 เมตร ไม่พบการปนเปื้อนที่ระดับความลึกเดียวกัน กระบวนการทำนายของมาร์คอฟจะใช้ข้อมูล ณ ตำแหน่งปัจจุบันในการทำนายความน่าจะเป็นจึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำนายขึ้น ซึ่งผลในรูปที่ 4-49 และ 4-50 แสดงความน่าจะเป็นที่มีโอกาสตรวจพบการปนเปื้อนในแต่ละความลึกตามระยะทางแกน x

การพัฒนาเทคนิคการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดินแบบมัลติสเตจเบส์เซียน สามารถช่วยลดจำนวนตำแหน่งเจาะสำรวจเพื่อจำแนกลักษณะการปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิดการปนเปื้อน (Source Zone) ซึ่งประสิทธิภาพของเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการเก็บตัวอย่างแบบสุ่มในพื้นที่จากสมการของ Daniel (1992) ดังสมการที่ 4-4 ดังนี้

$$P_D = 1-(1-\frac{A_T}{A_S})^N \quad (4\text{-}4)$$

P_D คือ ความน่าจะเป็นของการสุ่มที่จะเจอการปนเปื้อน

A_T คือ พื้นที่สนใจ

A_S คือ พื้นที่ทั้งหมด

N คือ จำนวนหลุมสำรวจเพื่อตรวจสอบการปนเปื้อน

ตารางที่ 4-16 จำนวนตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มของ Daniel (1992)

ความน่าจะเป็นที่จะเจอสารปนเปื้อน (1)	จำนวนหลุมที่ต้องการขุดสำรวจ $A_S / A_T = 6$ (2)	จำนวนหลุมที่ต้องการขุดสำรวจ $A_S / A_T = 10$ (3)	จำนวนหลุมที่ต้องการขุดสำรวจ $A_S / A_T = 100$ (4)
98%	20	38	390
95%	15	22	230
80%	9	19	174
75%	7	17	138
50%	4	7	70
35%	2	4	36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากวิธีของ Daniel (1992) ใช้พื้นฐานของลักษณะพื้นที่ ทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ข้อมูลการปนเปื้อนในอดีตและแผนที่ทางธรณีซึ่งเป็นการยากที่จะสามารถระบุตำแหน่งลักษณะการกระจายตัวของการปนเปื้อนด้วยข้อจำกัดของพื้นที่การปนเปื้อน (A_T) และพื้นที่ศึกษา (A_S)

และความน่าจะเป็นของการตรวจพบ (P_D) ซึ่งวิธีของ Daniel (1992) จะพิจาณาตรงค่าขนาดของพื้นที่ สามารถดูได้จากความน่าจะเป็นในการตรวจพบการปนเปื้อนที่ได้ต่ำมากและก็ยังไม่สามารถทำนายลักษณะรูปร่างอย่างชัดเจน ตารางที่ 4-16 แสดงความแตกต่างของขนาดพื้นที่ (A_S / A_T) และความน่าจะเป็นในการตรวจพบ ซึ่งในการคำนวณของ Daniel (1992) เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนในขนาดพื้นที่เท่ากันเมื่อพิจารณา $A_S / A_T = 6$ นั้นพบว่าจำนวนหลุมสำรวจใช้ถึง 9 ตำแหน่งสำรวจที่ความน่าจะเป็น 0.8 และเป็นการสุ่ม ส่วนเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนใช้เพียง 6 ตำแหน่งซึ่งจำนวนตำแหน่งที่ได้มานั้นจะเป็นตัวกำหนดจำนวนหลุมสำรวจในพื้นที่ศึกษาขนาดเท่ากันว่าควรจะไม่เกิน 9 หลุมสำรวจในวิธีของ Daniel และไม่เกิน 6 หลุมสำรวจในเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียน

จากการเปรียบเทียบการขุดสำรวจอีกวิธีก็คือแบบเป็นระบบ (Systematic) จากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 4-4 พบว่าการกระจายตัวด้านข้างที่มากที่สุดจะอยู่ในช่วง 1.33 - 6.17 เมตร ดังนั้นการสำรวจแบบเป็นระบบจะขุดระยะระหว่างกริดทั้งหมดที่ใช้คือจำนวน 9 หลุมซึ่งนำมาจากการแบ่งพื้นที่ศึกษาเป็นกริดเท่าๆกันและให้ระยะทางสำรวจห่างเป็นระยะคงที่ 50 เซนติเมตรและขนาดหลุมสำรวจ 6 นิ้ว เมื่อกำหนดความลึกของการสำรวจในแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการพัฒนาเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนแล้ว จำนวนตำแหน่งการสำรวจที่ใช้คือ 6 ตำแหน่งที่ระดับความลึก 4 เมตร เพราะฉะนั้นสามารถลดจำนวนตำแหน่งในการสำรวจลงได้ 3 ตำแหน่ง หรือ 33.33 % ในระหว่างขั้นตอนการจำแนกลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด (Site Characterization)หมายความว่าสามารถประหยัดต้นทุนการสำรวจพื้นที่ปนเปื้อนลงได้ และสามารถอธิบายรูปร่างลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด ได้อย่างถูกต้องแน่นอนมากขึ้นอันจะเป็นประโยชน์ต่อการเลือกเทคนิคจัดการฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินปนเปื้อนในลำดับต่อไป

จากการปรังปรุงความน่าจะเป็นโดยหลักการมัลติสเตจเบส์เซียน หลังจากปรังปรุงจำนวนครั้งที่มากขึ้นค่าความน่าจะเป็นจะเข้าใกล้ 1 แต่ในเกณฑ์ทั่วไปความน่าจะเป็นมีค่ามากกว่า 0.8 ถือว่ามีโอกาสเกิดขึ้นมากในการเจอสารปนเปื้อน ดังนั้นจึงหยุดที่จำนวนหลุมสังเกตมี 6 หลุม เนื่องจากถ้าหากเพิ่มหลุมสำรวจมากกว่านี้ความน่าจะเป็นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่อเทียบกับความถูกต้องแล้ว 6 หลุมก็สามารถเป็นตัวแทนของความน่าจะเป็นในพื้นที่ศึกษา การกำหนดจำนวนหลุมนั้นจะพิจารณาทางด้านราคา (Cost) และคุณค่าของข้อมูล (Value of Information) พิจารณาได้จากตารางที่ 4-17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าหากเพิ่มจำนวนหลุมที่ 7 เข้าไปแล้วความผิดพลาดของความน่าจะเป็นลดลงจาก 8.12% ไป 5.98% และจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสำรวจเพิ่มอีก 1 หลุม (6,000 $) เมื่อเทียบกันแล้วไม่คุ้มค่าแก่การลงทุนที่จะขุดเพิ่มในหลุมที่ 7

ตารางที่ 4-17 จำนวนหลุมสำรวจกับคุณค่าของข้อมูล

จำนวนหลุมที่ต้องการขุดสำรวจ	ราคาการสำรวจทั้งหมด* ($)	ความผิดพลาดจากการประมาณ (error)
1	12,500	66.65%
2	18,000	45.36%
3	24,000	29.11%
4	30,000	22.43%
5	35,000	15.94%
6	40,000	8.12%
7	46,000	5.98%

ที่มา : Kram et al. (2002)

*หมายเหตุ พิจารณาราคาด้านการสำรวจและตรวจสอบสารปนเปื้อนพร้อมทั้งจัดทำรายงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดจากวิทยานิพนธ์ โดยเริ่มตั้งแต่ตัวแปรใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น และการประยุกต์ใช้มัลติสเตจเบส์เซียนเทคนิคในการออกแบบตำแหน่งสำรวจการปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด (Source Zone) รวมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาที่จะมีเพิ่มเติมในอนาคต

5.1 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของชั้นน้ำใต้ดินและลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ภายใต้อิทธิพลของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

ในการศึกษานี้ได้มีการจำลองเชิงสโตแคสติค เพื่อจำลองการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) เชิงพื้นที่โดยใช้การจำลอง 4 รูปแบบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมและลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อน DNAPL ในชั้นน้ำที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาศัยข้อได้เปรียบของแบบจำลองเชิงสโตแคสติคที่สามารถจำลองลักษณะชั้นน้ำที่มีโอกาสเกิดเท่าๆกันได้หลายรูปแบบ ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมการซึมและการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของ DNAPL ที่ใช้ทดสอบ พิจารณาโดยใช้เซตของรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) และความพรุน (f) พบว่าการจำลองโดยวิธี SIS ในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ให้ผลการกระจายตัวความเข้มข้นของ DNAPL แบบต่อเนื่องชัดเจนมากกว่า ในขณะที่ผลการจำลองจากชุดการทดลองที่ 1 ให้ผลแตกต่างจากผลของชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อันเนื่องมาจากวิธีจำลองความพรุนที่แตกต่างกัน แม้ว่าทั้ง 3 ชุดการทดลองจะใช้การจำลองการกระจายตัวของ d_{10} โดยวิธีเดียวกัน นอกจากนี้ผลการจำลองโดยวิธี SIS จะให้การกระจายตัวของ DNAPL ในลักษณะที่แผ่ออกในแนวราบและเกิด Pooling Effect มากกว่าการซึมลงในแนวดิ่ง

กล่าวโดนสรุปคือผลการจำลองการกระจายตัวของ DNAPL จากชุดการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ 1) การจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินโดยวิธี SIS มีการแบ่งกลุ่มตามลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินจริงซึ่งภายในกลุ่ม (Class) ของดินจะสามารถกำหนดรูปแบบการกระจายตัวที่แตกต่างกันได้ ส่งผลให้ได้ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากขึ้น 2) ค่าความพรุน (f) ที่ใช้ในการจำลองโดยวิธี SIS พบว่ามีข้อจำกัดเนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึม

ผ่าน (K) $(R^2 < 0.25)$ส่งผลโดยตรงต่อการตกค้างของ DNAPL ในขณะที่การจำลองโดยวิธี SGS ไม่ต้องอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) จากการจำลองโดยวิธี SGS ไม่สอดคล้องกับข้อมูลของดินจริง

ผลจากแบบจำลองเชิงสโตแคสติคซึ่งมีได้มากกว่า 1 รูปแบบขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความแปรปรวนของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (K) เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระจายตัวของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน ซึ่งข้อมูลลักษณะการกระจายตัวและปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมีความสำคัญต่อลักษณะการกระจายของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิด เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดรักษาและฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน ซึ่งรูปแบบการกระจายตัวของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิดจากการจำลองโดยใช้แบบจำลองเชิงสโตแคสติคในรูปแบบความเป็นไปได้หลากหลายรูปแบบที่แสดงในการศึกษานี้เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจเพื่อจัดการฟื้นฟูและบำบัดแหล่งน้ำใต้ดินอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.2 การวิเคราะห์ผลของการพัฒนาการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียน

กระบวนการมัลติสเตจเบส์เซียนเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอน ซึ่งจะพิจารณากระบวนการปรับปรุงข้อมูลในขั้นตอนการตัดสินใจโดยใช้แบบจำลองแบบสโตแคสติค แบบต่อเนื่องย้อนกลับไม่ได้ ดังนั้นเบส์เซียนจะปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ไม่มีการเก็บข้อมูลโดยอาศัยพื้นฐานข้อมูลเดิมและปรับปรุงความไม่แน่นอนจากข้อมูลใหม่ที่มีการสำรวจเพิ่มเติม ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นการจำลองโอกาสตรวจพบการปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน ด้วยวิธีการของมัลติสเตจเบส์เซียนและกระบวนการลูกโซ่มาร์คอฟ โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานเดิม หลักการทำนายข้อมูลที่ตำแหน่งไม่มีการสำรวจจะอาศัยหลักการของความน่าจะเป็นระหว่างของการเปลี่ยนแปลง (Interval Transition Probability) หลักการของความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง (Transition Probability) และ สัมประสิทธิ์หนาแน่นของการเปลี่ยนแปลง (Coefficient Intension Transition) เป็นพื้นฐานจากข้อมูลที่มีอยู่ (ถ้ามีจำนวนมากพอ) และจากการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ จากนั้นจึงพัฒนาหรือปรับปรุงสถานะโดยอาศัยหลักการมัลติสเตจเบส์เซียนโดยเพิ่มตำแหน่งการสำรวจ ซึ่งส่งผลต่อการทำนายความน่าจะเป็นการตรวจพบการปนเปื้อน ประสิทธิภาพของการเก็บตัวอย่างมัลติสเตจเบส์เซียนในการจำแนกลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิดจะช่วยลดความไม่แน่นอนจากการสำรวจการปนเปื้อน และลดจำนวนตำแหน่งสำรวจที่ต้องใช้ทำนายลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ณ แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน

การพัฒนาเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนและกระบวนการมาร์คอฟ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อให้เป็นระเบียบแบบแผนและให้เกิดความตื่นตัวทางด้านการสำรวจแหล่งกำเนิด ของสารปนเปื้อนด้วยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน 2) พิจารณาปัจจัยทางธรณีที่มีผลต่อการกระจายตัวของสารปนเปื้อนจากข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ ซึ่งแบบจำลองโอกาสการตรวจพบการปนเปื้อนให้ผลในระดับที่น่าพอใจ ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปแบบของความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่ในหน้าตัดชั้นน้ำใต้ดิน 2 มิติ จากผลการพัฒนามัลติสเตจเบส์เซียนดังกล่าวสามารถลดจำนวนตำแหน่งสำรวจได้ 33.33 % เมื่อเทียบกับวิธีสำรวจของ Daniel (1992) และแบบระบบ (Systematic) สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่นๆได้ภายใต้ข้อจำกัดและเงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน นอกจากนี้การปรับปรุงข้อมูลสามารถอธิบายได้ง่ายด้วยพื้นฐานจากข้อมูลที่มีอยู่ให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อให้ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจและออกแบบตำแหน่งหลุมสำรวจในพื้นที่ ซึ่งล้วนส่งผลต่อด้านค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการสำรวจพื้นที่ศึกษาของโครงการซึ่งมีความสำคัญต่อการวางแผนการบำบัดและฟื้นฟูแหล่งน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากความไม่แน่นอนทางธรณีมีความสำคัญต่อการกระจายตัวของสารปนเปื้อนมีพารามิเตอร์มาเกี่ยวข้องมาก และหลักการสำรวจแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนภายใต้เงื่อนไขทางธรณีของพื้นที่ศึกษา ซึ่งส่วนใหญ่จะไม่มีความรู้เกี่ยวกับลักษณะทางธรณีและลักษณะการกระจายตัวของสารปนเปื้อน เพื่อที่จะกำหนดตำแหน่งในการสำรวจเพื่อที่จะลดผลของความไม่แน่นอน จากตำแหน่งของหลุมสำรวจ

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้พบประเด็นที่น่าสนใจ แนวทางการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขดังนี้

1. การจำลองการปล่อยสารปนเปื้อนด้วยแบบจำลองด้วยวิธี SIS จะให้ผลของการกระจายตัวของค่า d_{10} ที่มีความต่อเนื่อง หากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน(K) บางพื้นที่บริเวณด้านบนของชั้นน้ำมีค่าต่ำมากจะส่งผลต่อการจำลองการปล่อยสารปนเปื้อนทำให้เกิด Pooling Effect ขึ้นบริเวณด้านบนของชั้นน้ำใต้ดินในหน้าตัดที่สนใจ

2. แบบจำลอง UTCHEM สามารถจำลองพฤติกรรมและลักษณะการกระจายตัวของ DNAPL ได้ดี เพียงแต่ในรูปแบบจำลองบางรูปมวลสารปนเปื้อนไหลออกสู่หน้าตัดอื่นที่ไม่ได้พิจารณาส่งผลให้ไม่มีการคงที่ของความเข้มข้นในหน้าตัดที่พิจาณาค่าความเข้มข้นของ DNAPL รวมทั้งการซึมในแนวดิ่ง และการแผ่กระจายด้านข้างมีความผิดพลาด

3. เนื่องจากการศึกษานี้มุ่งเน้นพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมของการซึมและการกระจายตัว DNAPL ในชั้นน้ำอิ่มตัวจึงมีการกำหนดพารามิเตอร์บางตัวแปรเป็นค่าคงที่ เช่น Residual

Water Saturation, Entry Pressure เป็นต้น จึงทำให้พฤติกรรมของการซึมและการกระจายตัวของ DNAPL จากการจำลองอาจแตกต่างจากพื้นที่ปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจริงได้

4. การพัฒนาเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบมัลติสเตจเบส์เซียนมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากมีการพิจารณาความสัมพันธ์ในแนวราบ (x) เท่านั้น แต่ไม่ได้พิจารณาความสัมพันธ์ในแนวดิ่ง (z)

5. ผลลัพธ์จากการประมาณโดยเทคนิคมัลติสเตจเบส์เซียนจะอยู่ในรูปของความน่าจะเป็นของโอกาสที่จะตรวจพบการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา โดยถ้าหากมีการแบ่งสถานะ (State) ให้ละเอียดมากขึ้นเช่น แบ่งเป็นช่วงของความเข้มข้นในการตรวจพบ DNAPL จะส่งผลให้สถานะเข้าใกล้สถานะแบบต่อเนื่อง (State - Continuous) จะส่งผลของการทำนายรูปร่างลักษณะที่สามารถระบุโอกาสเจอสารปนเปื้อนและสามารถระบุความเข้มข้นได้แน่นอนมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นแนวทางวิจัยที่สามารถพัฒนาต่อไปในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2543. มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ฉลอง บัวผัน. 2538. น้ำบาดาล. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ธนัชพร อยู่ยั่งยืน. 2547. พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซเนตในชั้นน้ำใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธนิต ธนเสนีวัฒน์. 2540. ปริมาณและคุณภาพแหล่งน้ำใต้ดินในจังหวัดพิษณุโลก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พันธุ์ลพ หัตถโกศล. 2540. ธรณีสถิติ.เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,

วรพจน์ ลาวป้อม. 2547. การจัดกลุ่มการกระจายตัวของคุณสมบัติของแหล่งกักเก็บที่ได้จากการทำธรณีสถิติโดยใช้เวฟเลตแบบมัลติเรโซลูชันในการวิเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาธรณี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วศิน มหัตนิรันดร์กุล. 2544. Bioremediation of Hydrocarbon in Contaminated Site. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วัฒนา ธรรมมงคล, วินิตช่อวิเชียร. 2520. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธิ์พานิชย์,

สถาพร คูวิจิตรจารุ. 2541. ทดลองปฐพีกลศาสตร์.พิมพ์ครั้งที่ 1. รุ่งแสงการพิมพ์ : สำนักพิมพ์ไลบรารี่ไนน์.

สุรสีห์ ศรีวนิชย์. 2542. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณการไหลของน้ำใต้ดินและการแพร่กระจายของสารมลพิษในชั้นน้ำใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Adeian, F.M.S. and W.D. Edwards. 1950. Some Theory of Sampling. 2nd Edtion. Wiley Publications in Statistic. John Wiley & Sons

Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York : Elsevier Sci,

Benjamin, J.R. and C.C. Allin. 1970. Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers. United States : McGraw Hill ,

Bernardo, J.M. 1994. Bayesian Theory. 2nd Edtion. New York : John Wiley & Sons,

Bhuyan, D., G.A. Pope and L.W. Lake. 1990. Mathematical Modeling of High-pH Chemical Flooding. Journal of Petroleum Science and Engineering (102) : 194-209.

Bohling, G. 2005. Kriging (Overheads). Kansas Geological Survey : Kansas University.

Bolstad, W.M. 1999. Introduction to Bayesian Statistics. 2nd Edtion. United States of America : John Wiley & Sons,

Bradford, S.A., L.M. Abriola and K.M. Rathfelder. 1998. Advances in Water Resources. Flow and Entrapment of Dense Nonaqueous Phase Liquids in Physically and Chemically Heterogeneous Aquifer Formations, (22): 117-132.

Bradford, S.A., K.M. Rathfelder, J. Lang and L.M. Abriola. 2003. Journal of Contaminant Hydrology. Entrapment and Dissolution of DNAPLs in Heterogeneous Porous Media, 67(1-4) : 133– 157.

Brusseau, M.L. and N.T. Nelson. 2007. Journal of Contaminant Hydrology. Source-Zone Characterization of A Chlorinated-solvent Contaminated Superfund Site in Tucson, (90) : 21–40.

Calvete, F.J.S. 1997. Applications of Geostatistics in Subsurface Hydrology, in Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach.Cambridge,U.K. : Ca,bridge University Press

Carle, S.F. and G.E. Fogg. 1996. Journal of Mathematical Geology. Transition Probability - Based Indicator Geostatistics. (28) : 453-476.

Carle, S.F. et al. 1998. Conditional Simulation of Hydrofacies Architecture: A Transition Probability/Markov Approach, in Hydrogeology Model of Sedimentary Aquifer. Society for Sedimentary Geology : Tulsa

Chan, M.H.C. 1979. A Geologic Prediction and Updating Model in Tunneling. Master of

Science Civil Engineering Massachusetts Institutd of Technology.

Chan, T.P. and R.S. Govindaraju. 2006. Journal of Contaminant Hydrology. A Stochastic-Advective Transport Model for NAPL Dissolution and Degradation in Non-Uniform Flows in Porous Media, (87) : 253–276.

Chiles, J.-P. and P. Delfiner 1999. Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty. New York : John Wiley & Sons

Christ, J.A. and L.M. Abriola. 2007. Advances in Water Resources. Modeling Metabolic Reductive Dechlorination in Dense Non-Aqueous Phase Liquid Source-Zones, (30) : 1547–1561.

Cox, D.R., and H.D. Miller. 1965. The Theory of Stochastic Process. London, U.K. : Methuem and co.,Ltd.

Daniel, D.E. 1992. Environmental Geotechnology. Overview of Geoenvironmental Principles Applied to Remediation of Contaminated Waste Disposal Sites, 311-330. Rotterdam,Netherlands : Balkema AA,

Davis, J.C. 1973. Statistics and Data Analysis in Geology. New York : John Wiley & Sons

Dekker, T.J. and L.M. Abriola. 2000. Jounal of Contaminant Hydrology. The Influence of Field Scale Heterogeneity on the Infiltration and Entrapment of Dense Nonaqueous Phase Liquids in Saturated Formations, (42) : 187-218.

Deutsch, C.V., and A.G. Journel. 1998. Geostatistical Software Library and User's Guide. 2nd Edtion. New York : Oxford University Press,

Domenico, P. A. and W. Schwartz. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. Singapore : John Wiley & Sons,

Doveton, J.H. 1994. Theory and Applications of Vertical Variability Measures from Markov Chain Analysis, in Stochastic Modeling and Geostatistics. American Association of Petroleum Geologists : Tulsa

Drummond, C.D.,L.D. Lemke, K.M. Rathfelder, E.J. Hahn and L.M. Abriola. 2000. Simulation of Surfactant-Enhanced PCE Recovery at a Pilot Test Field Site. In: Wickramanayake, G.B., A.R. Gavaskar, and N. Gupta (eds) Treating Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPLs): Remediation of Chlorinated and

Recalcitrant Compounds, 77-84. Battelle Press, Columbus.

Duan, Q. et al. 2007. Advances in Water Resources. Multi-Model Ensemble Hydrologic Prediction using Bayesian Model Averaging, (30) : 1371–1386.

Environmental Modeling Research Laboratory (EMRL). 2003. GMS 5.0 Tutorials Volume 1 . Brigham Young University.

Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation.United States of America : Oxford University Press

Goovaerts, P. 1999. Stochastic Environmental Research Risk Assessment. Impact of the Simulation Algorithm, Magnitude of Ergodic Fluctuations and Number of Realizations on the Spaces of Uncertainty of Flow Properties, (13) : 161-182.

Goovaerts, P. 2000. Journal of Geology. Estimation or Simulation of Soil Properties An Optimization Problem with Conflicting Criteria, (97) :165–186.

Goovaerts, P. et al. 2005. Water Resources Research. Geostatistical Modeling of the Spatial Variability of Arsenic in Groundwater of Southeast Michigan, (41) : W07013.

Goovaerts, P. 2006. Journal of Geology. Geostatistical Modelling of Uncertainty in Soil Science, (103) : 326 -335.

Harrison, K.W. 2006a. Advances in Water Resource. Two-Stage Decision-Marking Under Uncertainty and Stochasticity, (30) : 641 -664.

Harrison, K.W. 2006b. Advances in Water Resource. Test Application of Bayesian Programming Adaptive Water Quality Managment under Uncertainty, (30) : 606 - 622.

Howard, R.A. 1960. Dynamic Programming and Markov Process. Massachusetts : MIT Press,Cambridge

Howard, R.A. 1971. Dynamic Programming and Markov Process Volume: 2 Markov Model. New York : John Wiley & Son

Huling, S.G. and J.W. Weaver. 1991. Dense Nonaqueous Phase Liquids. Oklahoma : EPA.

Ioannou, P.G. 1987. Journal of Construction Engineering and Management. Geologic Prediction Model for Tunneling, (113) : 569-590.

Ioannou, P.G. 1988. Journal of Construction Engineering and Management. Geologic Exploration and Risk Reduction on Underground Construction, (114) : 532-547 .

Jury, W.A., W.R. Gradner and W.H. Gradner. 1994. Soil Physics. 5th Edtion. United States of America : John Wiley & Sons

Kerry, R. and M.A. Oliver. 2007. Journal of Geology. The Analysis of Ranked Observations od Soil Structure using Indicator Geostatistics, (140) : 397-416.

Kram, M.L. et al. 2002. National Ground Water Association. DNAPL Characterization Methods and Approaches, Part 2: Cost Comparisons, 46-61.

Krige, D.G. 1951. Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problem on Witwatersrand. Master of Science Faculty of Science University of the Witwatersrand.

Kupfersberger, H., and C.V. Deutsch. 1999. AAPG BULL. Methodology for Intergrating Analog Geologic Data in 3-D Variogram Modeling, (83) : 1262-1278.

Likhitruangsilp, V. and P.G. Ioannou. 2005. Construction Reseach Congress. Economic Assessment of Site Exploration Programs using Stochastic Dynamic Programming, (183) : 57-64

Lemke, L.D. and L.M. Abriola 2003. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. Predicting DNAPL Entrapment and Recovery: the Influence of Hydraulic Property Correlation, (17) : 408–418.

Lemke, L.D., L.M. Abriola and P.Goovaerts. 2004. Water Resources Research. Dense Nonaqueous Phase Liquid (DNAPL) source zone characterization Influence of Hydraulic Property Correlation on Predictions of DNAPL Infiltration and Entrapment, (40) : W01511.

Lemke, L.D. et al. 2005. Environmenta Science & Technology. Pilot-Scale Demonstration of Surfactant-Enhanced PCE Solubilization at the Bachman Road Site. 1. Site Characterization and Test Design, (39) : 1778-1790.

Levy, L.C. 1995. Experimental and Theoretical Modeling of DNAPL Transport in Vertical Fractured media. Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering Massachusetts Institute of Technology.

Macqueen, J.B. 1967. Western Management Science Institute. Some Method for

Classification and Analysis of Multivariate Observations, 281-297.
Matheron, G. 1955. Annales des Mines. Application des Methodes statistiques a l'estimation des gisements, 50-75.
Matheron, G. 1971. The Theory of Regionalized Variables and its Applications. France : Fontainbleau, Ecole de Mines,
Myers, J.C. 1997. Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty for Enviromental Sampling and Mapping. New York : Van Nostrand Reinhold,
Michanel, E.H. 2001. Geostatistics and Petroleum Geology. 2nd Edtion. London : Kluwer Academic Publishers
Nelson, R.C. and G.A. Pope. 1978. Journal of Petroleum Science and Engineering. Phase Relationships in Chemical Flooding (18) : 325-338.
Olea, R.A. 1994. American Association of Petroleum Geologists. Fundamentals of Semivariogram Estimation, Modeling, and Usage, in Stochastic Modeling and Geostatistics: 27-35.
Patriarche, D. 2005. Journal of Mathematical Geology. Estimating Regional Hydraulic Conductivity Fields—A Comparative Study of Geostatistical Methods, (37) : 587-613.
Reseel, J.B. and J.S. Ginn. 1997. Soil Vadose Zone and Ground-Water. 2nd Edtion. New York : Lewis Publishers
Reservouir Engineering Research Program Center of Petroleum and Geosystems Engineering The University of Texas. 2000. UTCHEM-9.0. The University of Texas.
Sale, T.C. and D.B. McWhorter. 2001. Water Resources Research. Steady State Mass Tranfer from Single-Component Dense Nonaquenous Phase Liquid in Uniform Flow Fields, (37) : 393-404.
Schad, H. and G. Teutsch. 1993. Theory and Applications, Geostatistical Analysis of Hydraulic Conductivity Related Data Based on Core Samples from a Heterogeneous Fluvial Aquifer, 205-212.
Schaerlaeken, J. 2006. Environmental Science & Technology. Multi-Objective Optimization of the Setup of a Surfactant-Enhanced DNAPL Remediation 39,(7) :

2327-2333.

Srivastava, R.M. 1994. American Association of Petroleum Geology. An Overview of Stochastic Methods for Reservoir Characterization, in Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies, 1-16. Tulsa, Oklahoma.

The Interstate Technology & Regulatory Council Dense Nonaqueous-Phase Liquids Team. 2004. Strategies for Monitoring the Performance of DNAPL Source Zone Remedies. Washington, D.C.

U.S. Army Military Soils Engineering. 1997. Field Manual . Soil Formation and Characteristics, 5-410. United States of America.

U.S. EPA/National Service Center for Environmental Publications (NSCEP). 2004. Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations. United States of America : EPA.

Van Geel, P.J. and S.D. Roy. 2002. Journal of Contaminant Hydrology. A Proposed Model to Include A Residual NAPL Saturation in A Hhysteretic Capillary Pressure – Saturation Relationship, (58) : 79–110.

Webster, R. and M.A. Oliver. 2001. Geostatistics for Environmental Scientists. New York : John Wiley & Sons

Woodbury, A.D. and E.A. Sudicky. 1991. Water Resources Research. The Geostatistical Characterization of the Borden Aquifer, (27) : 533–546.

Zaluski, M.H., J.J Consort and S.B. Antonioli. 2003. Using the UTCHEM Model for Simulating DNAPL Removal by Extraction Well. MSE Technology Applications 33-40.

Zheng, C. and J.J. Jiao. 1998. Journal of Environmental Engineering. Numerical Simulation of Tracer Test in Heterogeneous Aquifer, 510-516.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษา
Oscoda Michigan

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ขุดดินตัวอย่าง 38 มิลลิเมตร โดยการเก็บตัวอย่างจะออกเป็นช่วงช่วงละ 30 เซนติเมตร แต่ความยาวของท่อเก็บขนาด 61 เซนติเมตร โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่ปี 1997,1998 และ 1999 ซึ่งบางหลุมมีการชำรุดเสียหายแต่สามารถกู้คืนมาได้เพียง 76% ซึ่งมาจากข้อมูลบ่อแนวดิ่งที่ไม่ได้มีการจดบันทึก และมาอบที่อุณหภูมิ 105 c แต่ในการแบ่งแค่เพียง 15 เซนติเมตร ก็สามารถเห็นความแตกต่างของเนื้อดินได้อย่างชัดเจน ซึ่งตัวอย่างการกระจายตัวของเม็ดดิน ส่วนใหญ่จะเป็นทราย เนื่องจากกรวดจะให้ผลที่ออกมาไม่ตรงในเรื่องของ water retention เพราะกรวดสามารถดูดซับน้ำบางส่วนในเศษเล็กเศษน้อยได้ ซึ่งจะมีผลต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ส่วนในการทดลองมาใช้ควรจะมีกรวดที่ต่ำๆจึงจะสามารถใช้ในการคำนวณอย่างถูกต้อง ดังนั้น การกระจายตัวของเม็ดดิน จึงเอากรวดออกให้เหลือแต่ทราย ซึ่งจากตัวอย่างที่ยังไม่มีการคัดแยกกรวดออกจึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดมากกว่า 20 % แต่ถ้าใช้ทรายค่าผิดพลาดประมาณ 13% จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้

ความพรุนวัดมาจากการเปรียบเทียบน้ำหนักที่แตกต่างกันของแห้งกับเปียก ในการทดสอบตัวอย่าง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ที่ได้จากการทดลองของ 10 ตัวอย่างโดยใช้ขนาดตัวอย่าง 30.5 เซนติเมตร ขนาด 172 cc ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ที่ได้มาแบ่ง 5 กลุ่ม อันเพื่อประโยชน์ในการใช้วิธี SIS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก -1 ตัวอย่างของตำแหน่งที่สำรวจ และเงื่อนไขของแบบจำลองธรณีสถิติ ค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้ประมาณโดยใช้สมการของ Kozeny-Carman (สมการที่ 2-6) ด้วยตัวแทนของการกระจายตัวเม็ดดิน d_{10} และกำหนดให้ความพรุนมีค่าคงที่เท่ากับ 0.36

Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
1	10069701	714.85	553.95	583.46	262.2	0.384	32.07	2
2	10069701	714.85	553.95	582.34	189.6	0.385	16.91	3
3	10069701	714.85	553.95	581.09	187.7	0.381	16.57	4
4	10069701	714.85	553.95	580.21	236.3	0.38	26.25	2
5	10069701	714.85	553.95	579.71	199.4	0.35	18.69	1
6	10069701	714.85	553.95	579.21	180.9	0.37	15.39	4
7	10069701	714.85	553.95	578.71	165.7	0.372	12.91	4
8	10069701	714.85	553.95	578.21	156.5	0.382	11.51	4
9	10069701	714.85	553.95	577.71	175.5	0.376	14.49	4
10	10069701	714.85	553.95	577.21	153.3	0.368	11.05	5
11	10069701	714.85	553.95	576.71	180.2	0.376	15.27	4
12	10069701	714.85	553.95	576.21	161.1	0.385	12.21	4
13	10069701	714.85	553.95	575.71	153.5	0.322	11.08	4
14	10069701	714.85	553.95	575.21	153	0.351	11.01	4
15	10069701	714.85	553.95	574.71	227.7	0.351	24.39	1
16	10069701	714.85	553.95	574.21	253.2	0.371	30.15	1
17	10069701	714.85	553.95	573.71	248.6	0.354	29.06	1
18	10069701	714.85	553.95	573.21	226.7	0.354	24.16	1
19	10069701	714.85	553.95	572.71	194.6	0.352	17.82	2
20	10069701	714.85	553.95	572.21	142.5	0.352	9.56	5
21	10069701	714.85	553.95	571.71	153.1	0.358	11.02	4
22	10069701	714.85	553.95	571.21	160	0.371	12.04	4
23	10069701	714.85	553.95	570.71	201	0.372	19.01	3
24	10069701	714.85	553.95	570.21	157.2	0.363	11.62	4
25	10069701	714.85	553.95	569.71	191.3	0.36	17.21	3
26	10069701	714.85	553.95	569.21	189.8	0.358	16.93	3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
27	10069701	714.85	553.95	568.71	219.2	0.373	22.59	2
28	10069701	714.85	553.95	568.21	184.6	0.359	16.03	2
29	10069701	714.85	553.95	567.56	129.3	0.338	7.86	4
31	10079701	714.85	539.34	583.26	234.6	0.359	25.87	3
32	10079701	714.85	539.34	582.26	264.1	0.365	32.79	1
33	10079701	714.85	539.34	581.51	193.2	0.384	17.55	3
34	10079701	714.85	539.34	580.76	200	0.346	18.81	2
35	10079701	714.85	539.34	580.01	222.3	0.367	23.23	1
36	10079701	714.85	539.34	579.01	176.2	0.392	14.61	4
37	10079701	714.85	539.34	578.01	161.2	0.38	12.23	4
38	10079701	714.85	539.34	577.26	154.6	0.371	11.24	5
39	10079701	714.85	539.34	576.51	169.1	0.381	13.45	4
40	10079701	714.85	539.34	578.01	166.8	0.377	13.08	4
41	10079701	714.85	539.34	577.26	168.2	0.361	13.31	4
42	10079701	714.85	539.34	574.26	237.8	0.361	26.59	1
43	10079701	714.85	539.34	576.51	221.5	0.342	23.07	2
44	10079701	714.85	539.34	575.76	241.4	0.363	27.4	1
45	10079701	714.85	539.34	572.01	214.6	0.346	21.65	2
46	10079701	714.85	539.34	575.01	236.8	0.367	26.37	1
47	10079701	714.85	539.34	570.76	226.6	0.369	24.16	1
48	10079701	714.85	539.34	570.26	183.6	0.352	15.86	3
49	10079701	714.85	539.34	569.76	223.9	0.365	23.58	2
50	10079701	714.85	539.34	569.26	215.1	0.35	21.76	2
51	10079701	714.85	539.34	568.76	220.1	0.36	22.78	2
52	10079701	714.85	539.34	568.26	195.7	0.361	18.02	3
53	10079701	714.85	539.34	567.76	118.7	0.346	6.63	3
54	10079701	714.85	539.34	567.26	205.5	0.354	19.85	2
58	10079702	715.06	523.98	583.4	236.4	0.373	26.28	2
59	10079702	715.06	523.98	582.4	202.1	0.378	19.21	2

Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
60	10079702	715.06	523.98	581.4	189.3	0.376	16.85	4
61	10079702	715.06	523.98	580.4	226.1	0.365	24.05	1
62	10079702	715.06	523.98	579.4	184.2	0.383	15.96	3
63	10079702	715.06	523.98	578.4	169.9	0.368	13.58	4
64	10079702	715.06	523.98	577.4	154.3	0.37	11.19	5
65	10079702	715.06	523.98	576.4	163.1	0.376	12.52	4
66	10079702	715.06	523.98	575.4	168.7	0.363	13.38	4
67	10079702	715.06	523.98	574.4	174.7	0.35	14.35	2
68	10079702	715.06	523.98	573.4	154.5	0.324	11.23	2
69	10079702	715.06	523.98	572.4	199.4	0.349	18.7	2
70	10079702	715.06	523.98	571.4	214.3	0.341	21.61	2
71	10079702	715.06	523.98	570.4	182.3	0.348	15.63	3
72	10079702	715.06	523.98	569.65	212.1	0.35	21.16	2
73	10079702	715.06	523.98	569.15	220.2	0.348	22.8	1
74	10079702	715.06	523.98	568.65	235.6	0.367	26.11	1
75	10079702	715.06	523.98	568.15	233.6	0.362	25.67	2
76	10079702	715.06	523.98	567.65	185.9	0.354	16.25	2
77	10079702	715.06	523.98	567.15	183.7	0.351	15.87	2
78	10079702	715.06	523.98	566.65	251.6	0.356	29.78	1
79	10079702	715.06	523.98	566.15	101.9	0.297	4.89	2
82	4149801	645.07	544.35	583.48	194.3	0.375	17.76	4
83	4149801	646.27	544.35	582.73	197.9	0.38	18.41	3
84	4149801	647.07	544.35	582.23	257.8	0.371	31.25	1
85	4149801	648.27	544.35	581.48	182.1	0.376	15.6	2
86	4149801	649.47	544.35	580.73	172.9	0.371	14.07	4
87	4149801	650.27	544.35	580.23	208.3	0.375	20.41	2
88	4149801	651.47	544.35	579.48	204.1	0.361	19.59	3
89	4149801	652.67	544.35	578.73	159.2	0.375	11.92	4
90	4149801	653.87	544.35	577.98	152.9	0.362	10.99	5

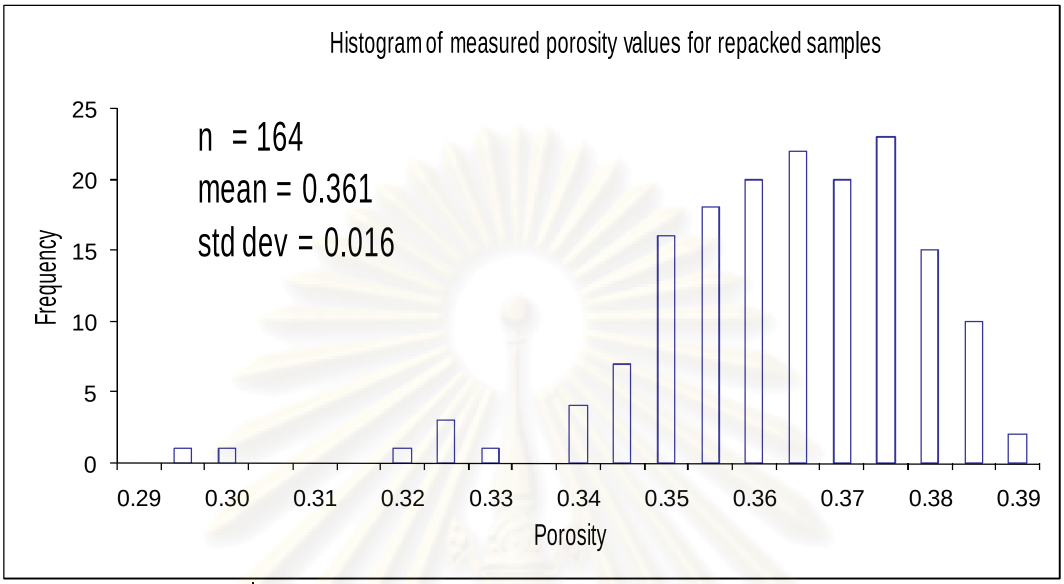
Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
91	4149801	655.07	544.35	577.23	136	0.371	8.7	5
92	4149801	655.87	544.35	576.73	158.4	0.364	11.8	4
93	4149801	657.07	544.35	575.98	178.4	0.367	14.97	4
94	4149801	658.27	544.35	575.23	281.3	0.352	37.2	1
95	4149801	659.07	544.35	574.73	259.3	0.371	31.62	1
96	4149801	659.87	544.35	574.23	213.2	0.354	21.37	1
97	4149801	660.67	544.35	573.73	287.7	0.373	38.93	1
98	4149801	661.88	544.35	572.98	124.3	0.36	7.27	5
99	4149801	663.08	544.35	572.23	110.6	0.318	5.75	5
100	4149801	663.88	544.35	571.73	45.6	0.291	0.98	5
101	4149801	664.36	544.35	571.43	40.5	-	0.77	5
102	4149801	666.84	544.35	569.98	169.1	0.355	13.44	4
103	4149801	668.28	544.35	568.98	208.4	0.347	20.42	2
104	4149801	669.88	544.35	567.98	220.1	0.35	22.78	2
105	4149801	670.92	544.35	567.33	195.8	0.341	18.02	3
106	4159801	667.98	558.83	581.51	219.8	0.375	22.67	3
107	4159801	667.98	558.2	580.76	231	0.369	25.09	2
108	4159801	667.98	557.36	579.76	252.5	0.383	29.99	2
109	4159801	667.98	556.73	579.01	152.1	0.383	10.88	5
110	4159801	667.98	555.05	577.01	121.7	0.368	6.96	5
111	4159801	667.98	554.43	576.26	149.4	0.362	10.5	5
112	4159801	667.98	553.8	575.51	189.5	0.343	16.89	2
113	4159801	667.98	553.38	575.01	192.3	0.344	17.39	2
114	4159801	667.98	552.96	574.51	164.7	0.351	12.76	4
115	5069801	655.51	560.15	581.61	211.5	-	21.04	3
116	5069801	655.51	559.89	580.68	200.4	0.369	18.89	2
117	5069801	655.51	559.63	580.11	174.7	-	14.35	3
118	5069801	655.51	559.46	579.61	193.8	0.374	17.66	3
119	5069801	655.51	559.29	579.11	319.5	0.376	48	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

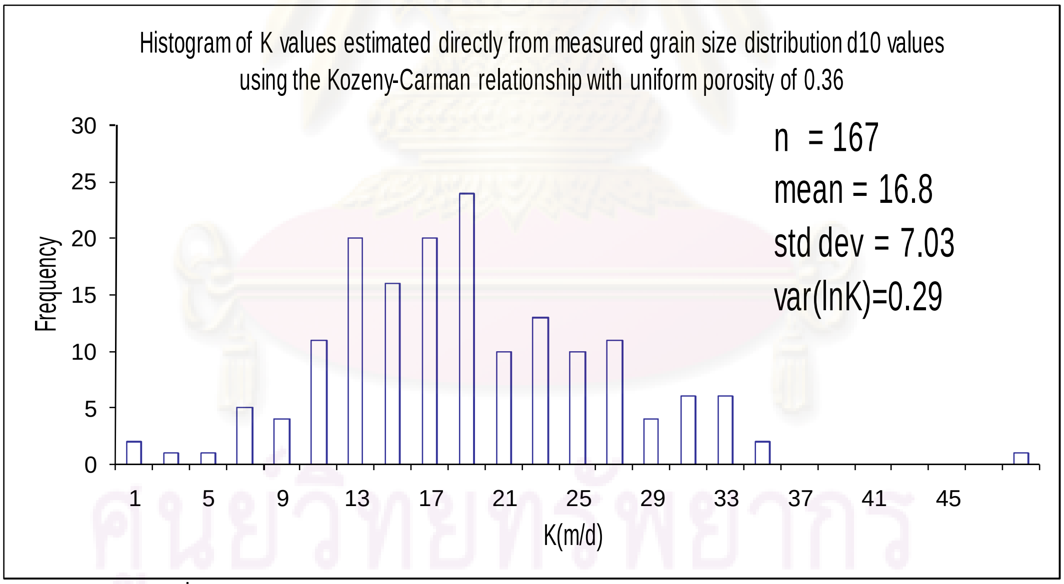
Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
120	5069801	655.51	559.12	578.61	180.5	0.375	15.32	4
121	5069801	655.51	558.86	577.86	144.9	0.37	9.88	5
122	5069801	655.51	558.6	577.11	119.5	0.353	6.72	5
123	5069801	655.51	558.43	576.61	77.1	0.326	2.8	5
124	5069801	655.51	558.26	576.11	180.3	0.357	15.29	3
125	5069801	655.51	558.08	575.61	148.1	0.347	10.32	4
126	5069801	655.51	557.83	574.86	160.6	0.355	12.13	4
127	5069801	655.51	557.48	573.86	190.7	0.321	17.1	2
128	5069801	655.51	557.14	572.86	191.5	0.358	17.25	3
129	5069801	655.51	556.88	572.11	198.9	0.362	18.61	2
130	5069801	655.51	556.62	571.36	187.6	0.356	16.54	2
131	5069801	655.51	556.36	570.61	180.9	0.338	15.38	4
132	5069801	655.51	556.1	569.86	206.1	0.345	19.98	2
133	5069801	655.51	555.85	569.11	270.8	0.367	34.47	1
134	5069801	655.51	555.59	568.36	224.8	0.348	23.76	1
135	5069801	655.51	555.33	567.61	233.1	0.36	25.56	1
136	5069801	655.51	555.14	567.06	224.5	0.359	23.7	1
137	5079802	678.39	558.62	581.11	219.1	0.367	22.57	2
138	5079802	678.39	557.99	580.36	275	0.387	35.55	1
139	5079802	678.39	557.57	579.86	218.2	0.376	22.38	2
140	5079802	678.39	557.15	579.36	174.2	0.38	14.28	4
141	5079802	678.39	556.52	578.61	158.3	0.369	11.79	5
142	5079802	678.39	555.68	577.61	152.4	0.368	10.92	5
143	5079802	678.39	554.84	576.61	139.6	0.365	9.17	5
144	5079802	678.39	554.21	575.86	131.9	0.357	8.18	5
145	5079803	667.75	559.85	581.41	255	0.387	30.57	1
146	5079803	667.75	559.68	580.76	241.9	0.368	27.52	2
147	5079803	667.75	559.41	579.76	207.7	0.376	20.3	3
148	5079803	667.75	559.21	579.01	187.8	0.369	16.59	2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample Number	Core Number	East (X,ft)	North (Y,ft)	Elevation (Z,ft)	d_{10} (um)	Porosity	K (m/d)	Indicater Class
149	5079803	667.75	559.08	578.51	170.7	0.364	13.7	4
150	5079803	667.75	558.88	577.76	138.7	0.359	9.05	5
151	5079803	667.75	558.61	576.76	115.3	0.353	6.26	5
152	5079803	667.75	558.34	575.76	141.9	0.339	9.47	4
153	5079803	667.75	558.08	574.76	162.2	0.343	12.37	3
154	5079803	667.75	557.87	574.01	144.2	0.346	9.77	4
155	5079803	667.75	557.67	573.26	210.8	0.357	20.9	1
156	5079803	667.75	557.4	572.26	167	0.361	13.12	3
157	5079803	667.75	557.13	571.26	229.6	0.335	24.78	1
158	5079803	667.75	556.87	570.26	193.6	0.351	17.63	2
159	5079803	667.75	556.6	569.26	190.9	0.373	17.14	3
160	5079803	667.75	556.37	568.41	199.5	0.362	18.71	3
161	5039901	660.87	554.6	569.48	190.5	0.347	17.07	2
162	5049902	668.71	543.15	568.98	242.3	0.369	27.6	1
163	5049902	661.88	540.1	567.23	250	0.377	29.39	1
164	5049902	662.06	539.34	566.63	245.3	0.363	28.31	1
165	5059901	657.13	545.08	569.33	233.7	0.373	25.69	2
166	5059901	657.75	545.08	568.54	237.8	0.36	26.6	2
167	5079801	663.97	552.39	570.65	198.4	0.357	18.5	2
168	5079801	663.97	551.14	568.48	209.1	0.371	20.56	2
169	3159901	665.66	546.07	571.39	197.6	0.361	18.37	3
170	3159901	665.66	545.3	570.75	170.7	0.373	13.7	4
171	3159901	665.66	543.77	569.47	195.2	0.358	17.93	2
172	3159901	665.66	543	568.82	188.8	0.362	16.77	3
173	3159901	665.66	539.55	565.93	191.3	0.356	17.21	3



รูปที่ ก – 1 แสดงการกระจายตัวของตัวอย่างค่าความพรุน



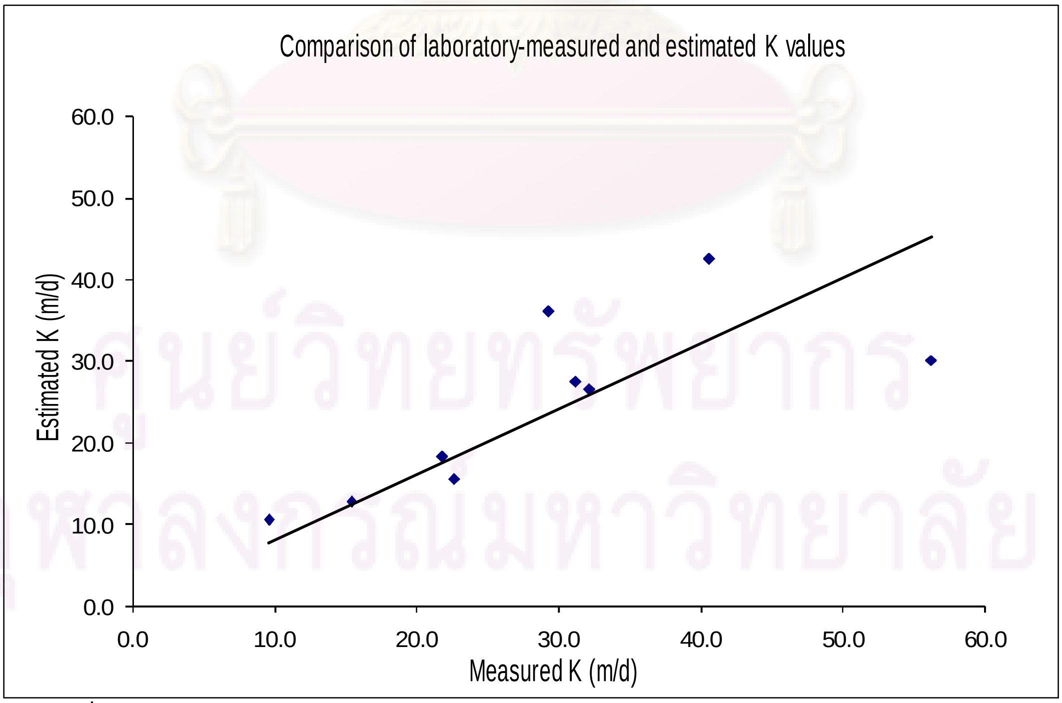
รูปที่ ก – 2 แสดงการกระจายตัวของตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก – 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้จากห้องปฏิบัติการและจากากรประมาณด้วยสมการ Kozeny – Carman (สมการที่ 2-6) ด้วยตัวแทนการกระจายตัวของเม็ดดิน d_{10} และกำหนดให้ความพรุนมีค่าคงที่เท่ากับ 0.36

Sample number	indicator class	Measured K(m/d)	Estimated K(m/d)
17+18	1	56.29	30.05
35	1	32.16	26.49
61	1	31.25	27.43
62	3	21.83	18.20
63	4	22.70	15.49
64	5	15.44	12.77
94	1	40.60	42.43
95	1	29.35	36.07
143	5	9.64	10.46

ที่มา : Lemke and Abriola (2003)

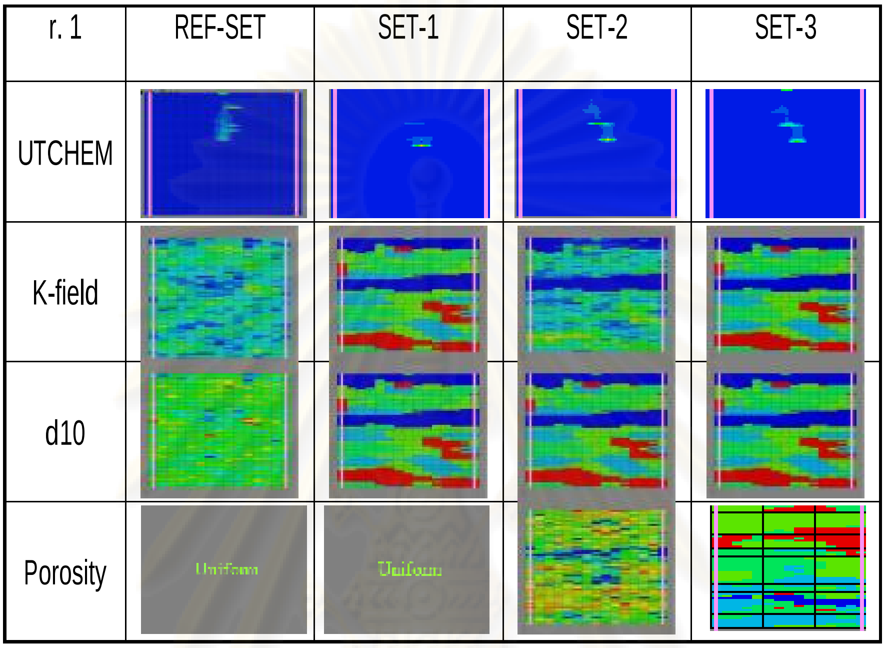


รูปที่ ก – 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ซึมผ่านได้จากการทดลองและจากการประมาณด้วยสมการ Kozeny-Carman

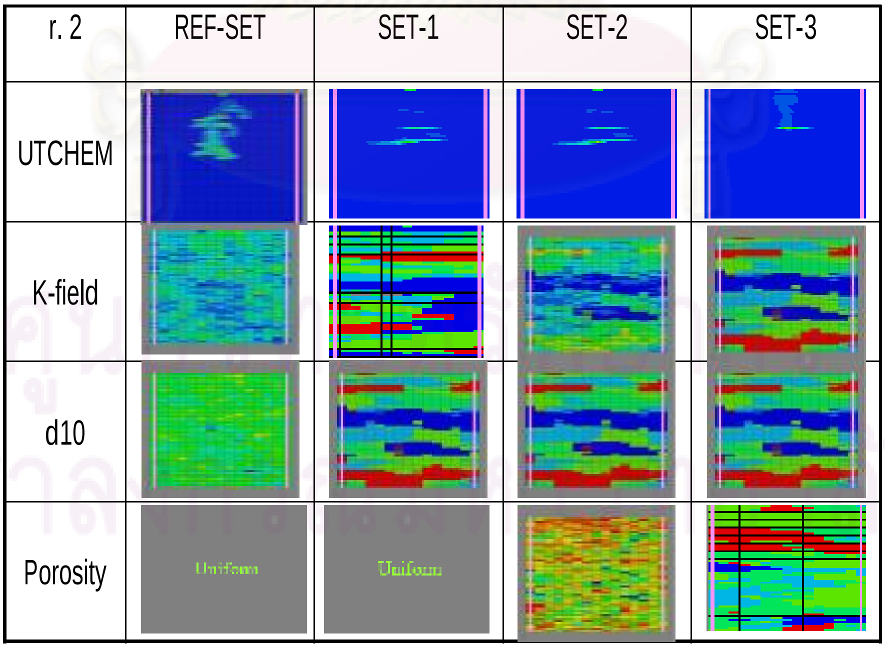
ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

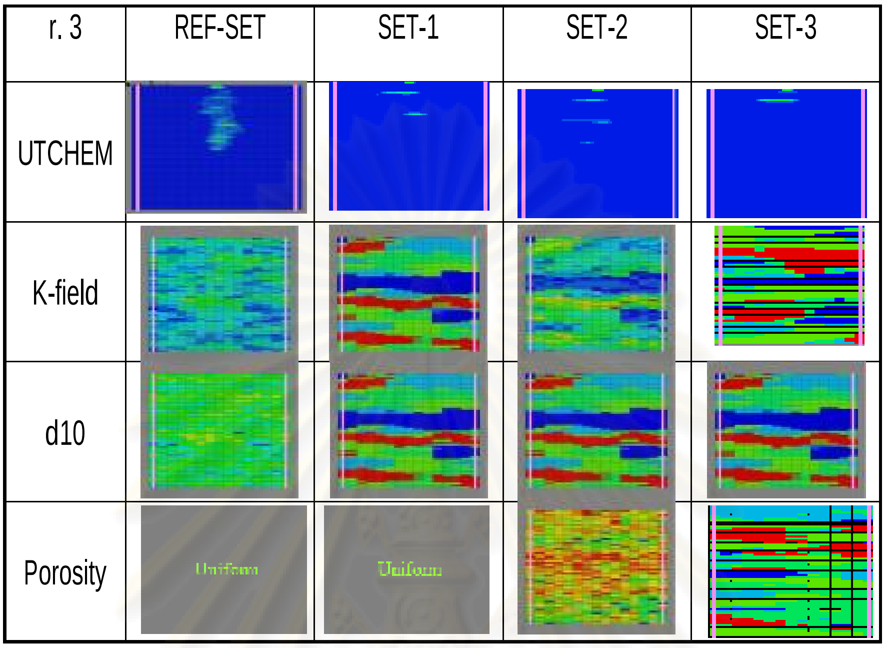
เปรียบเทียบลักษณะของการจำลองทางธรณีสถิติและการจำลองการปล่อยสารปนเปื้อน



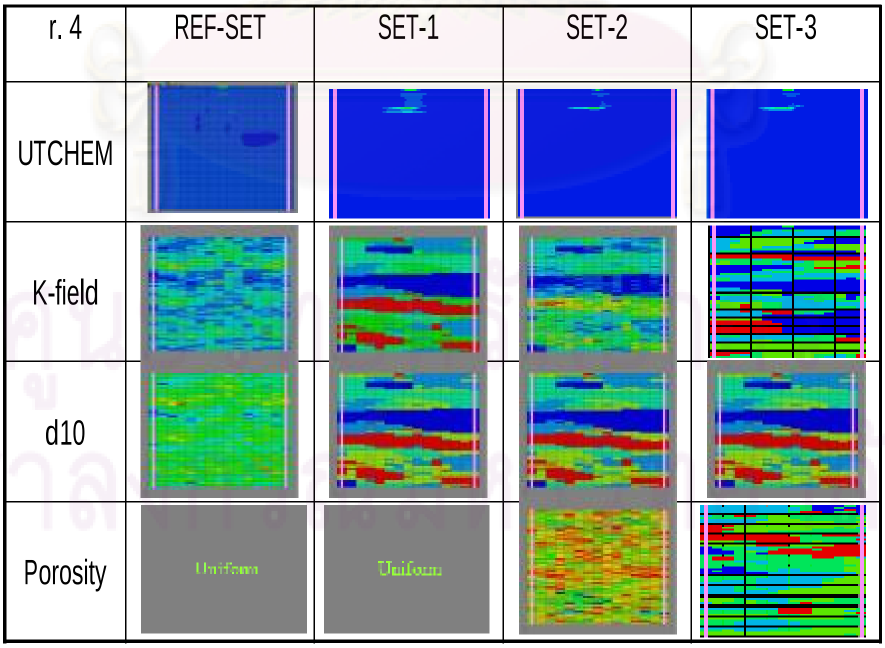
รูปที่ ข – 1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 1



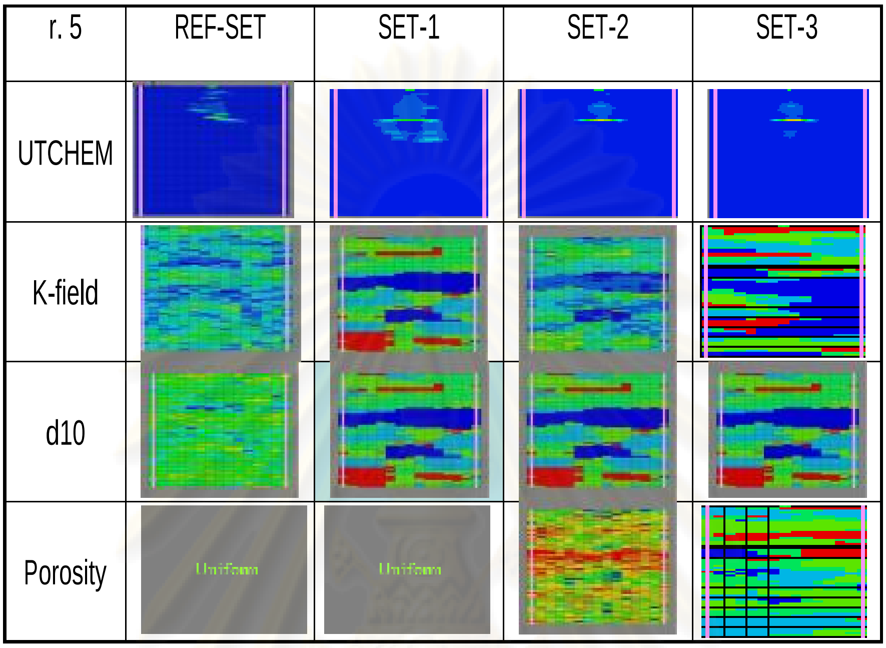
รูปที่ ข – 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 2



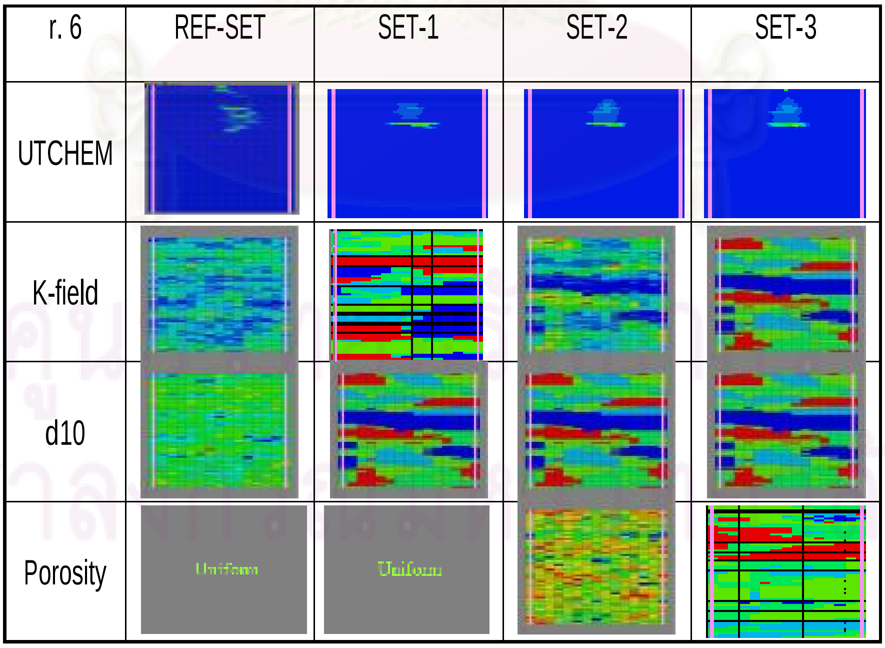
รูปที่ ข – 3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 3



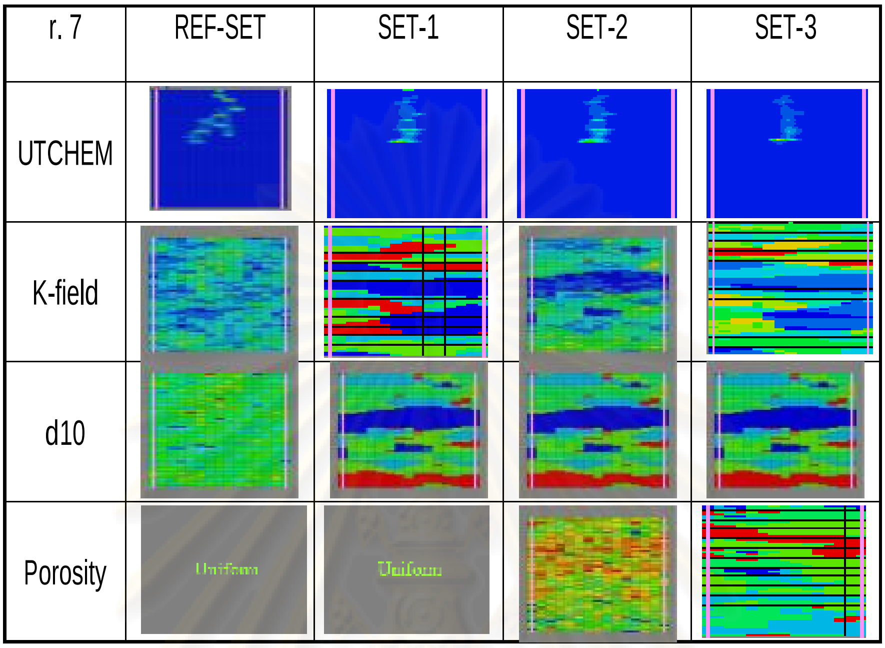
รูปที่ ข – 4 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 4



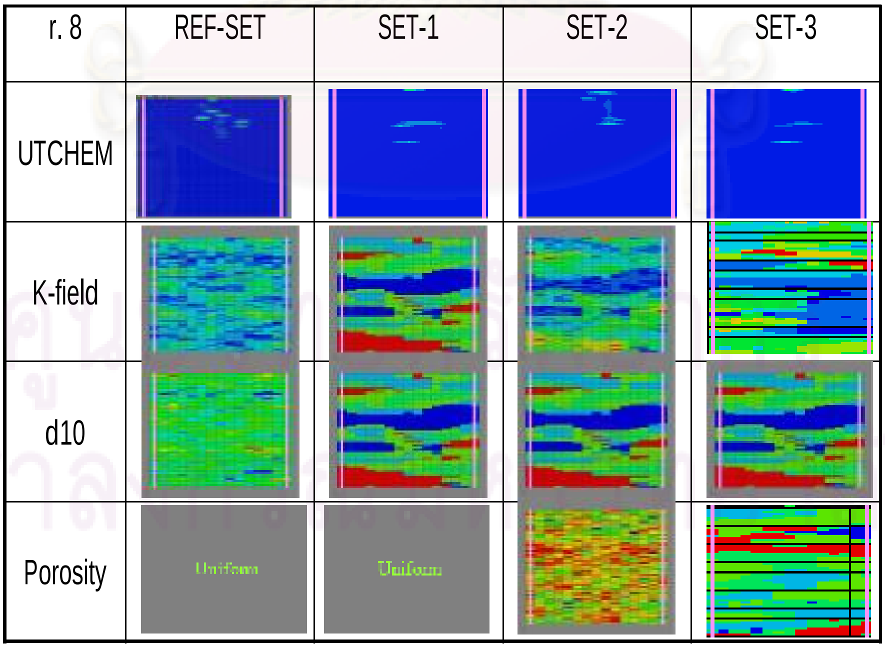
รูปที่ ข – 5 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 5



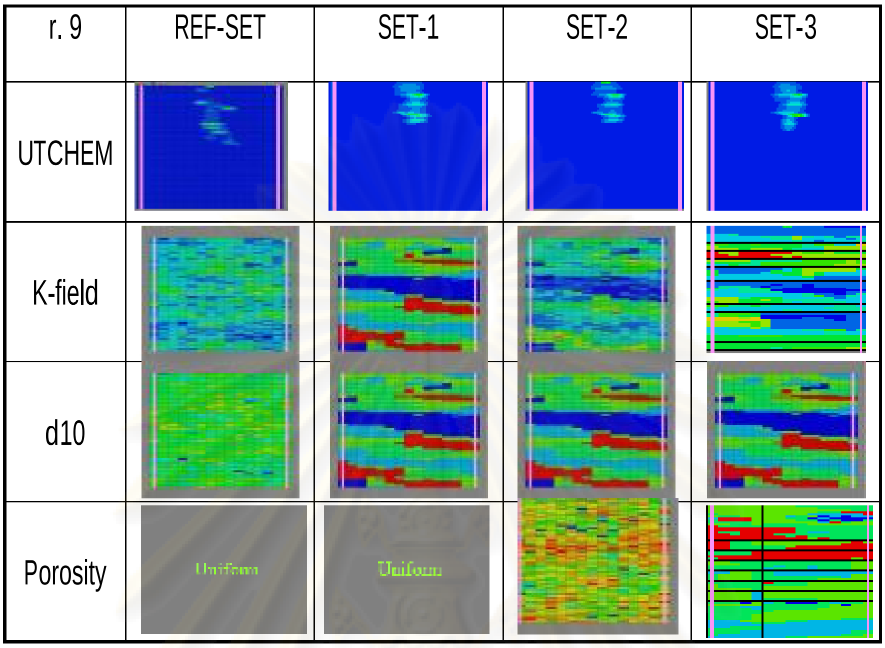
รูปที่ ข – 6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 6



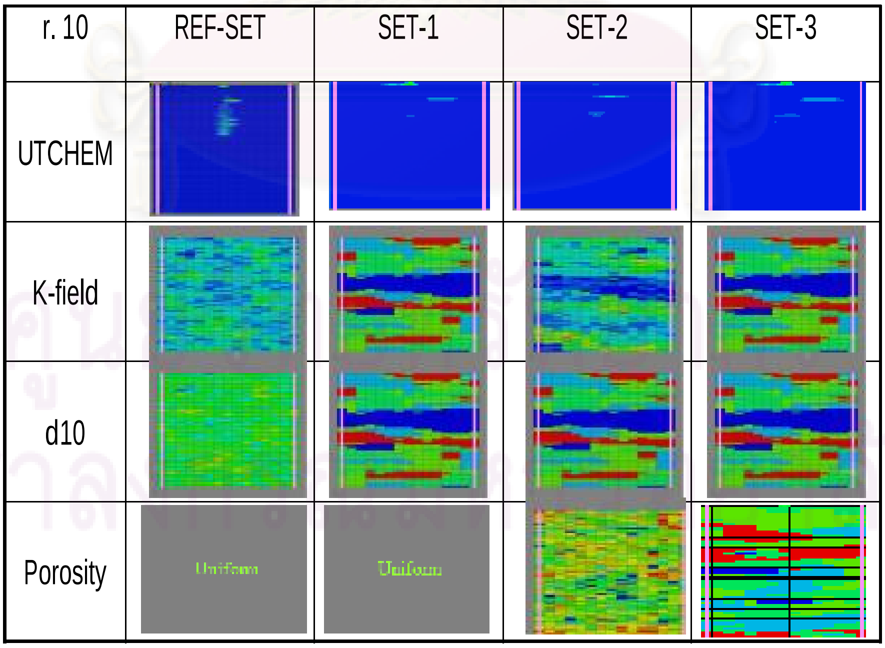
รูปที่ ข – 7 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 7



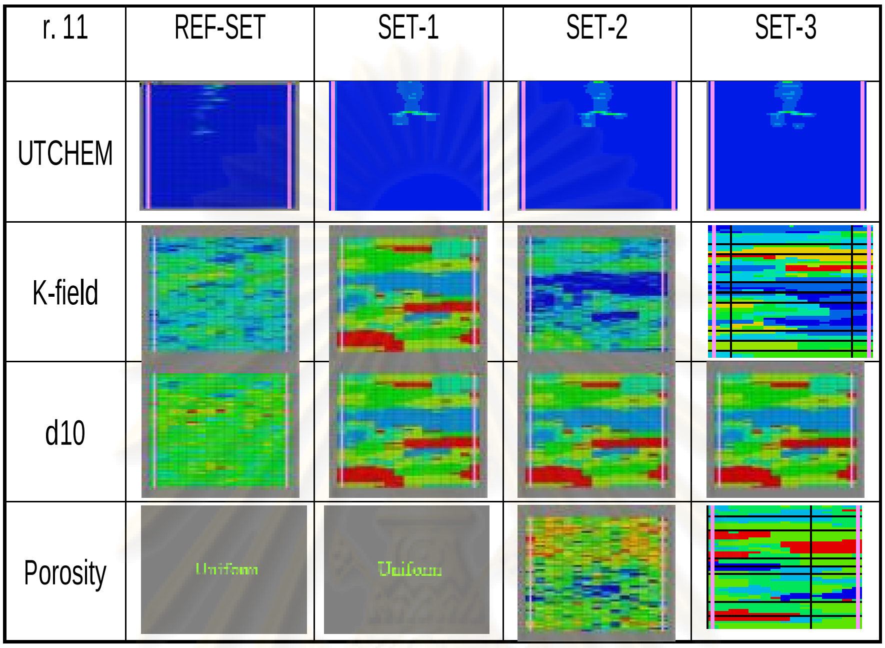
รูปที่ ข – 8 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 8



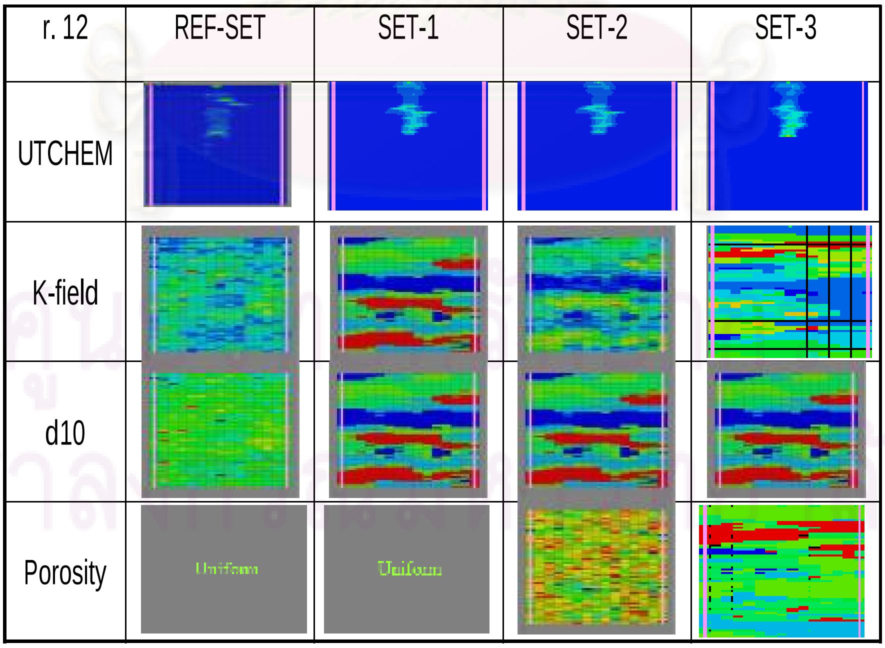
รูปที่ ข – 9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 9



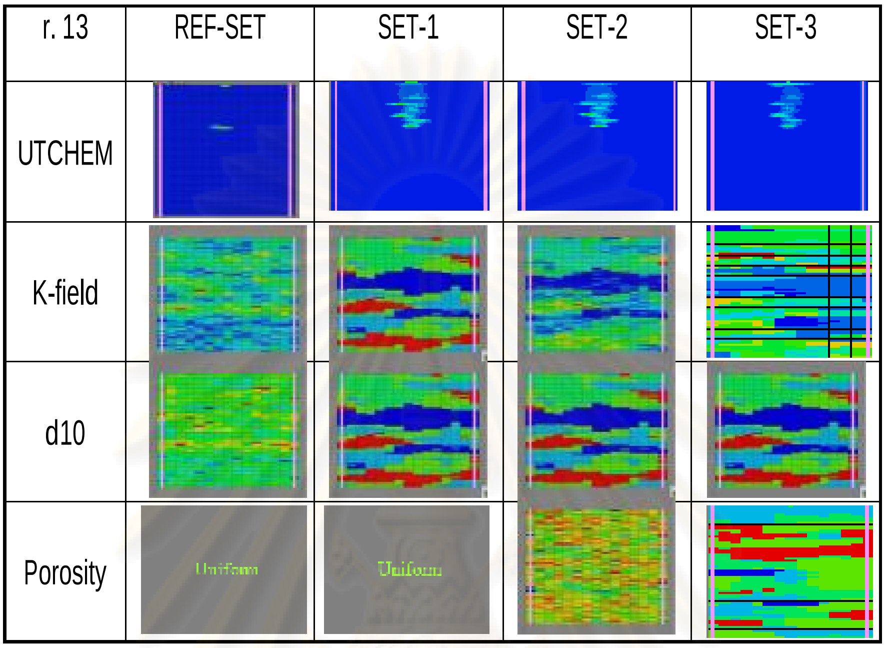
รูปที่ ข – 10 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 10



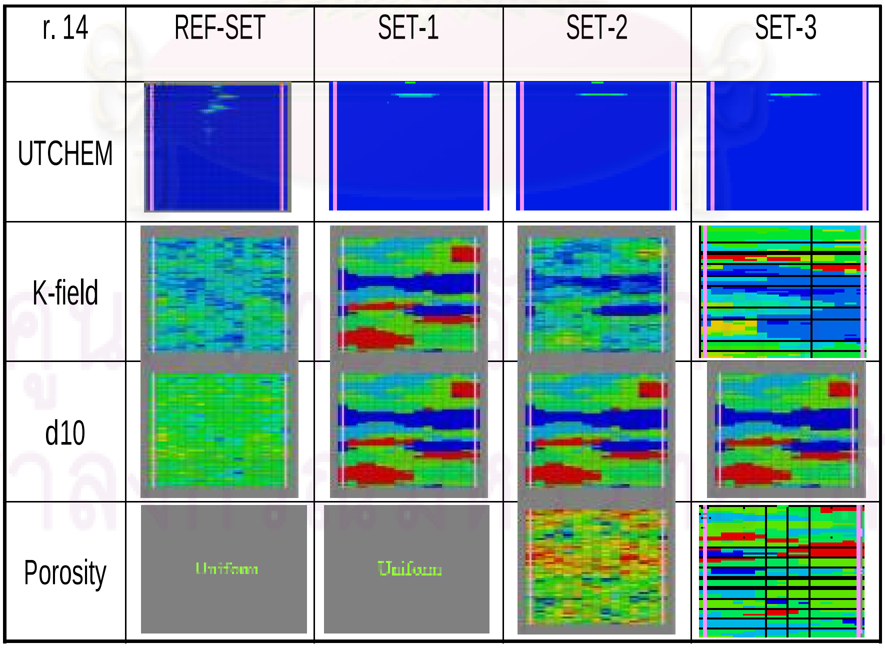
รูปที่ ข – 11 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 2



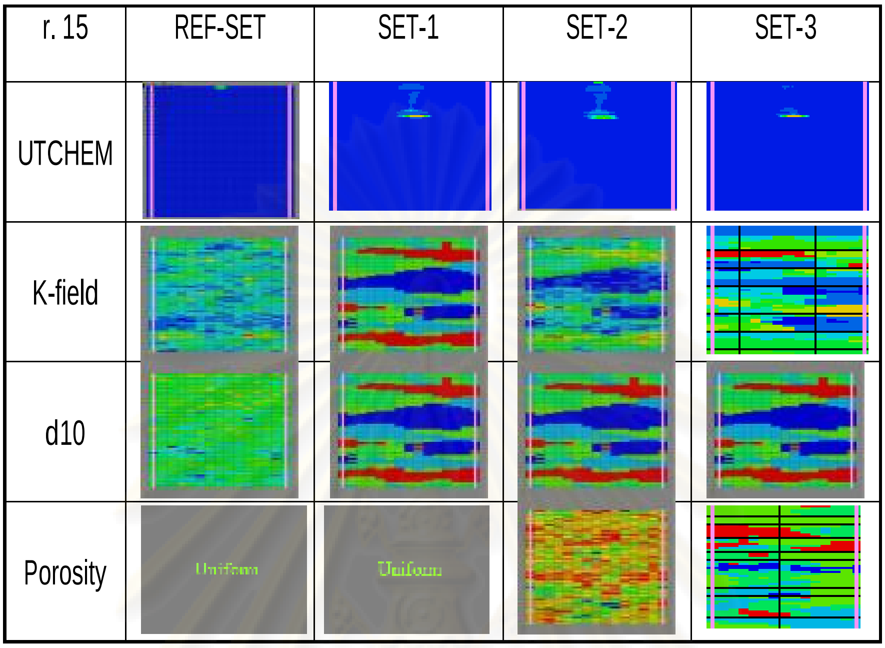
รูปที่ ข – 12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 12



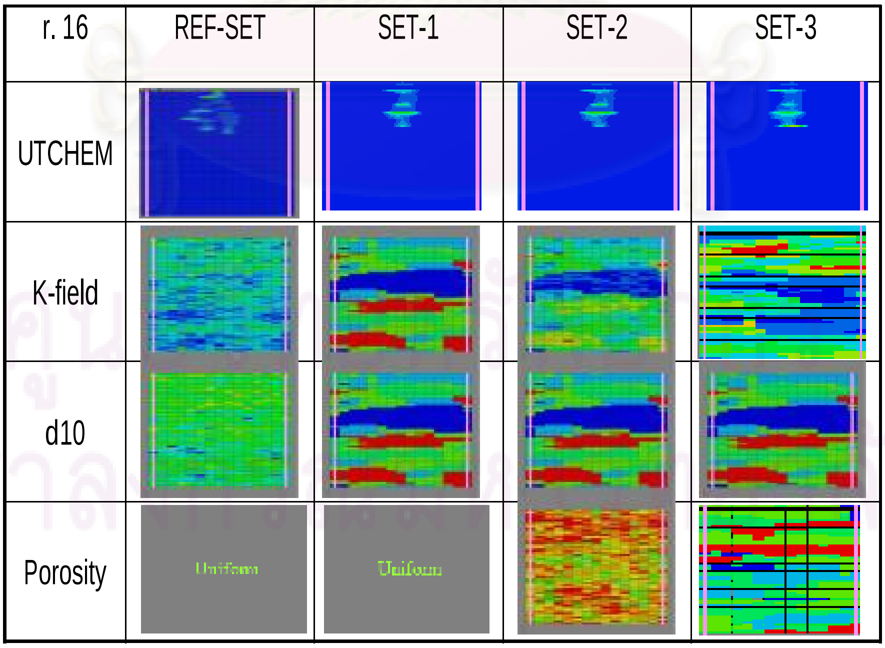
รูปที่ ข – 13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 13



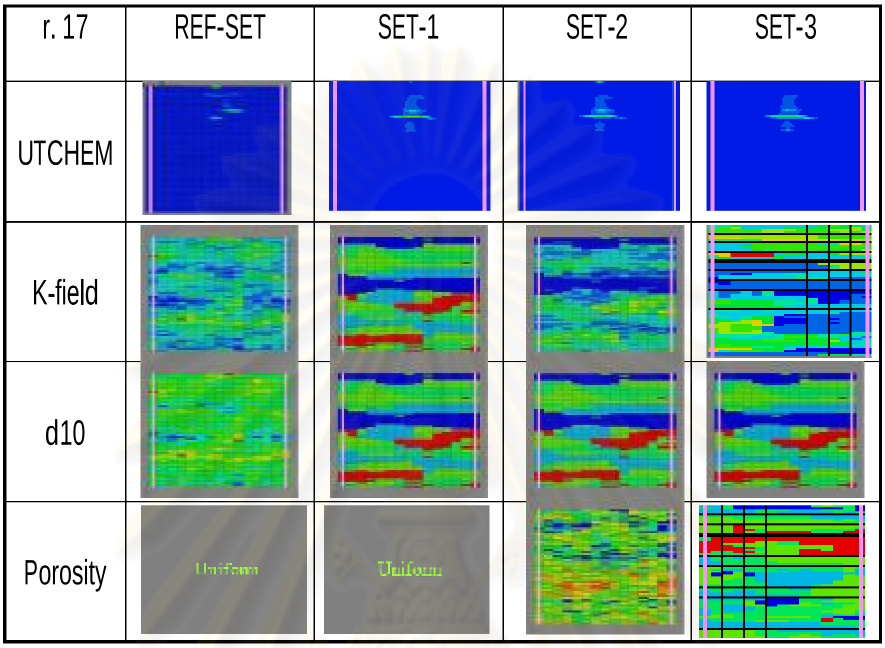
รูปที่ ข – 14 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 14



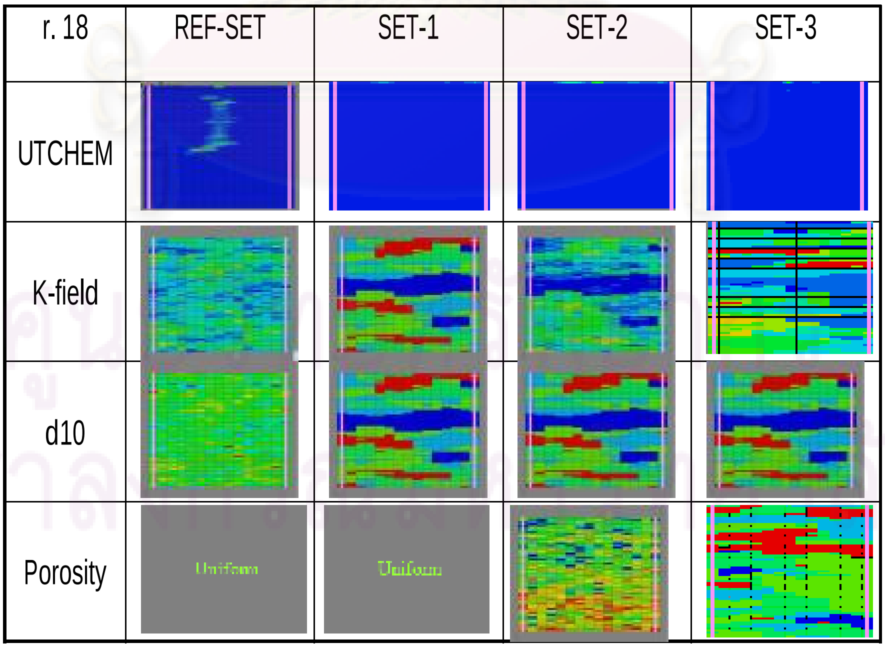
รูปที่ ข – 15 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 15



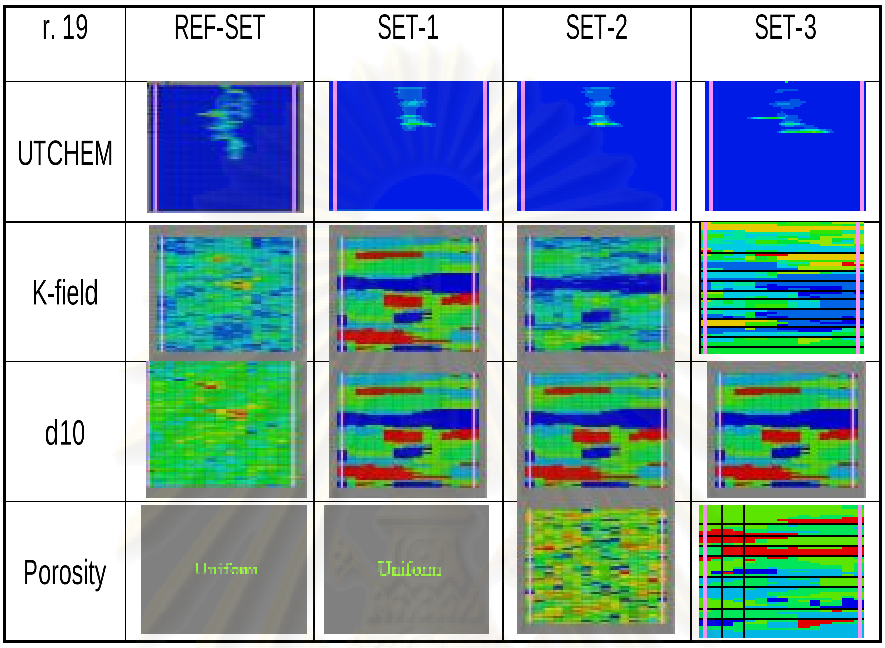
รูปที่ ข – 16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 16



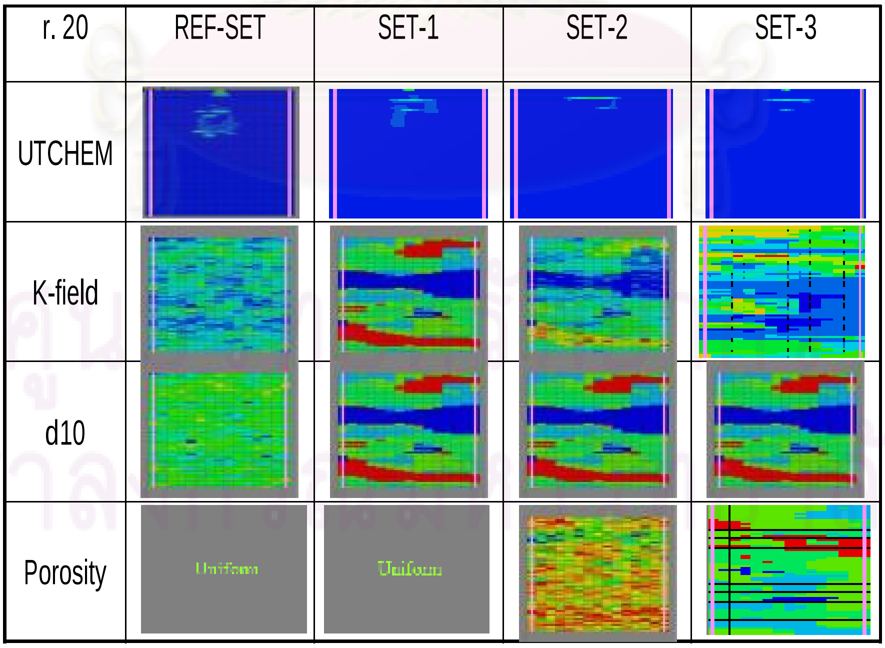
รูปที่ ข – 17 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 17



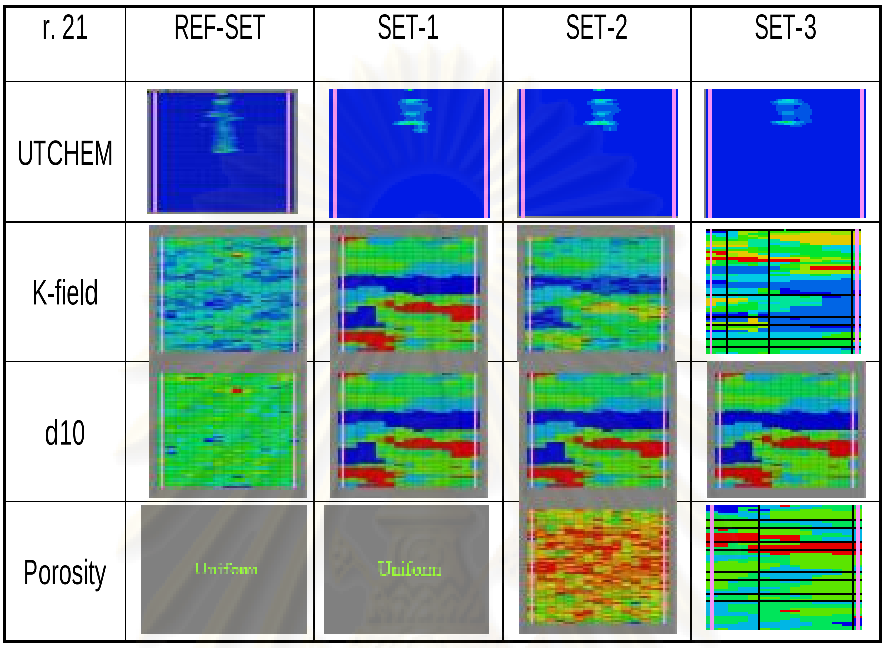
รูปที่ ข – 18 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 18



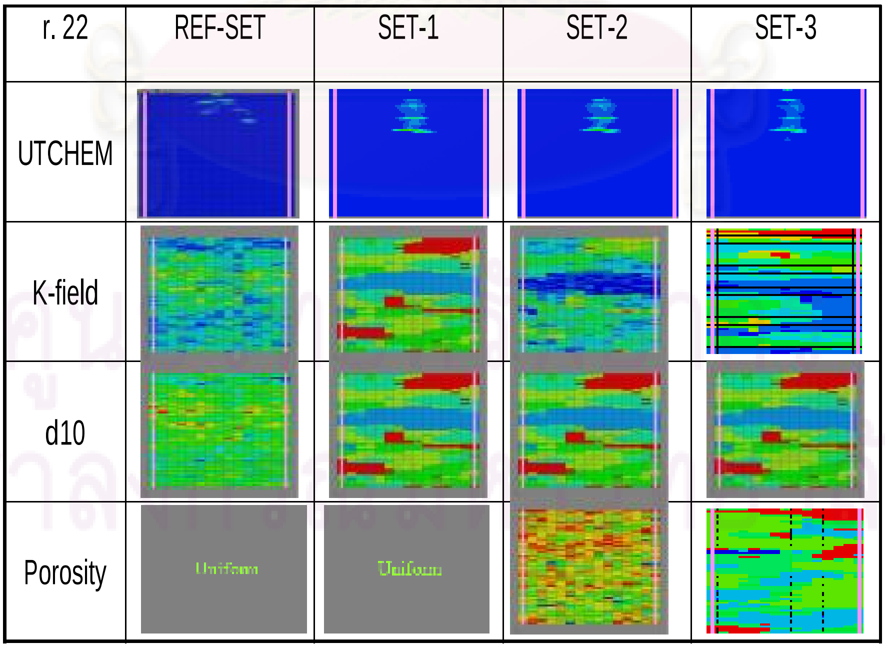
รูปที่ ข – 19 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 19



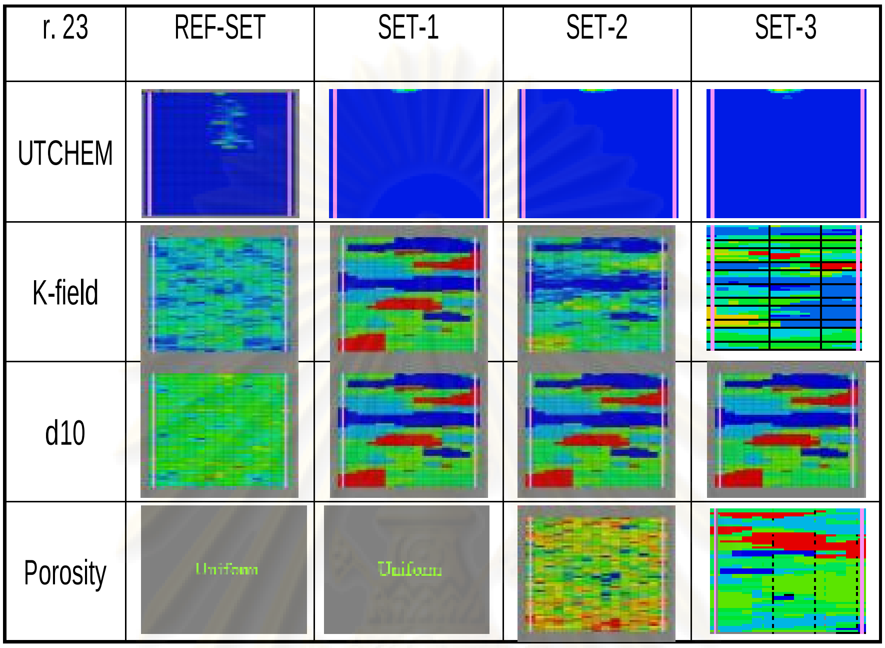
รูปที่ ข – 20 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 20



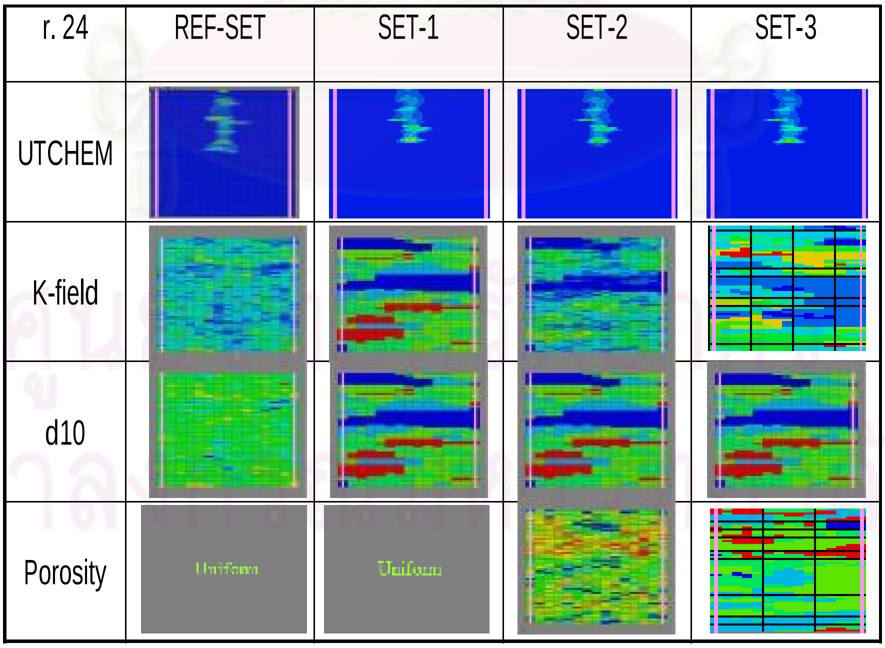
รูปที่ ข – 21 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 21



รูปที่ ข – 22 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 22

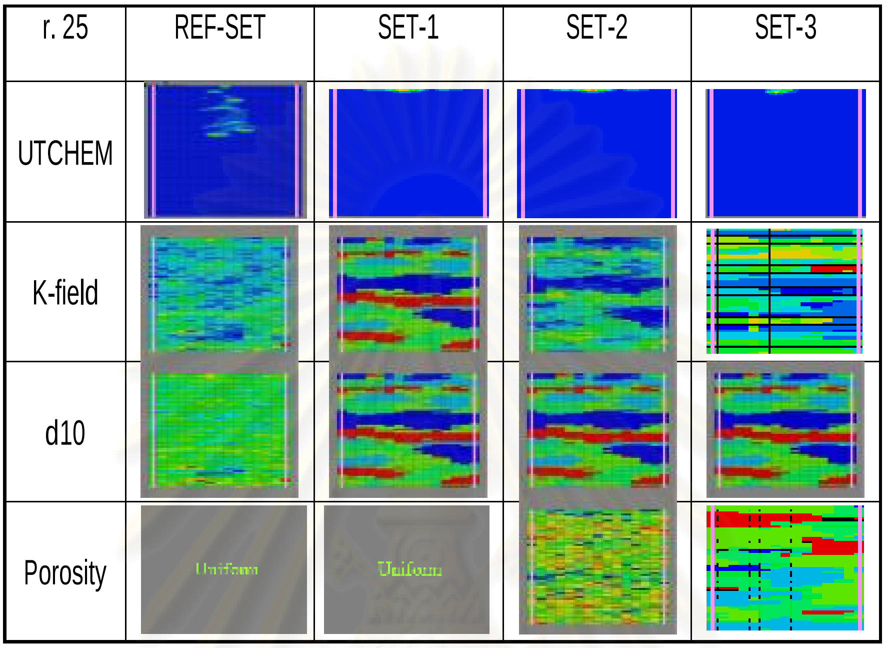


รูปที่ ข – 23 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 23

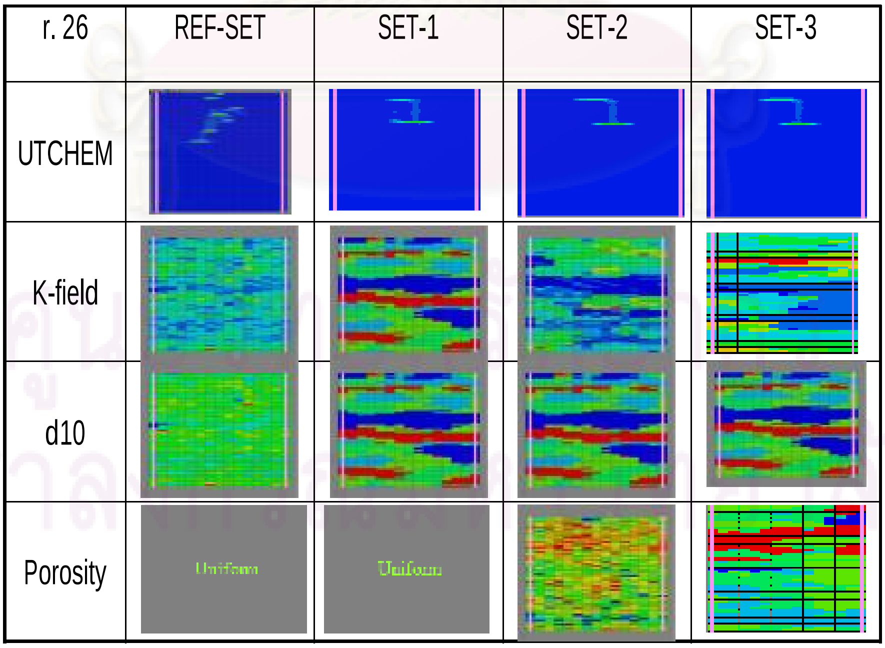


รูปที่ ข – 24 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 24

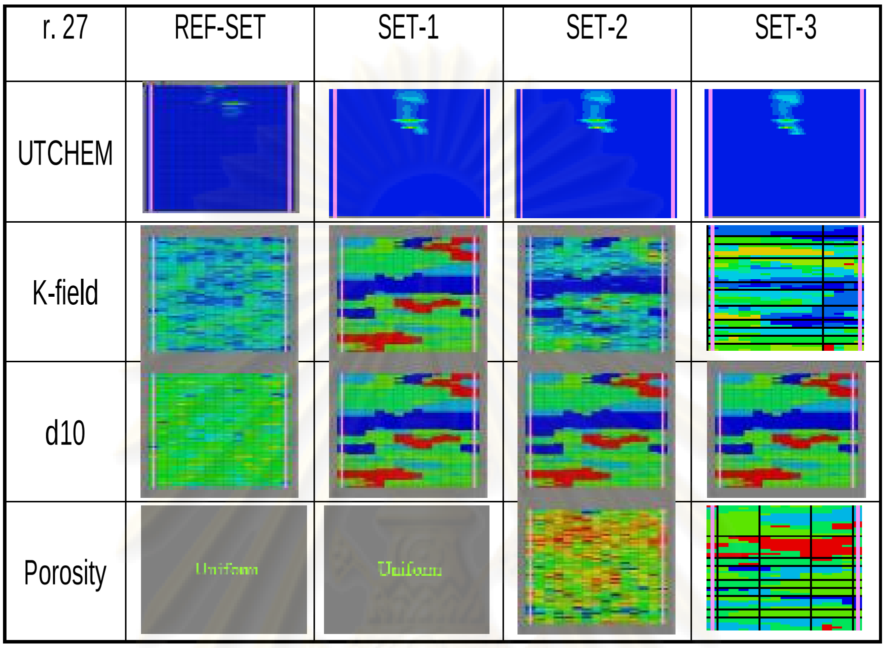
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



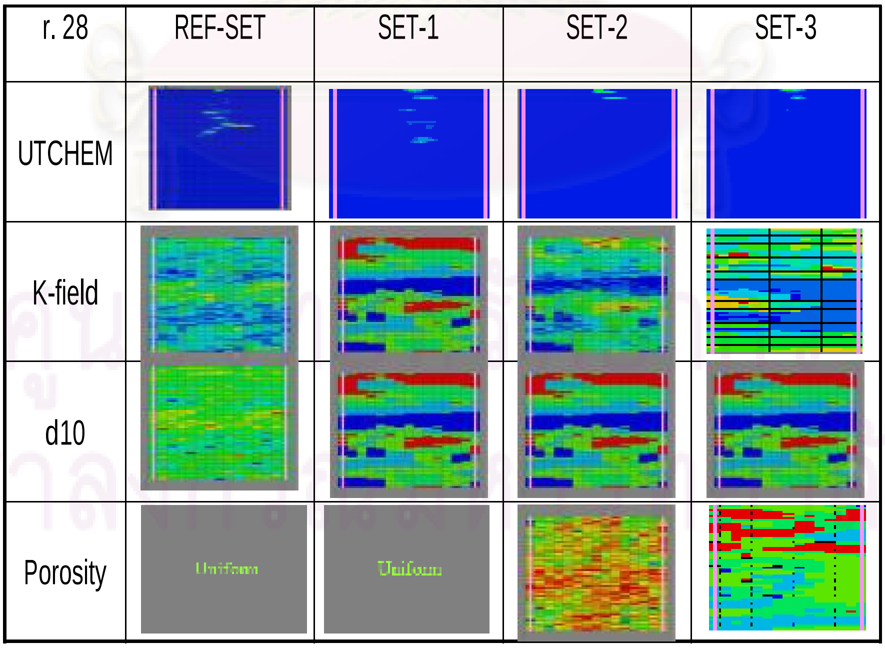
รูปที่ ข – 25 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 25



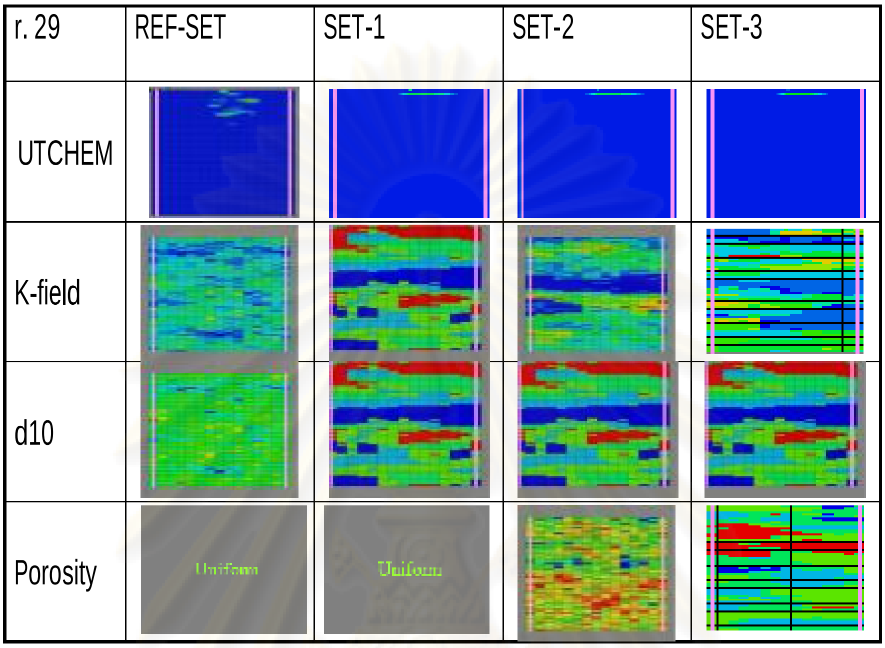
รูปที่ ข – 26 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 26



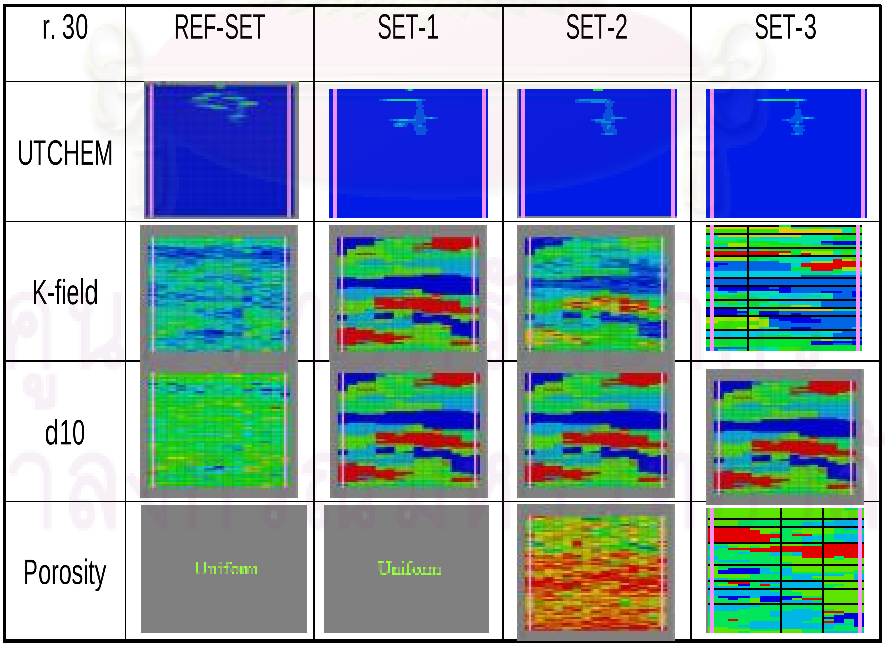
รูปที่ ข – 27 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 27



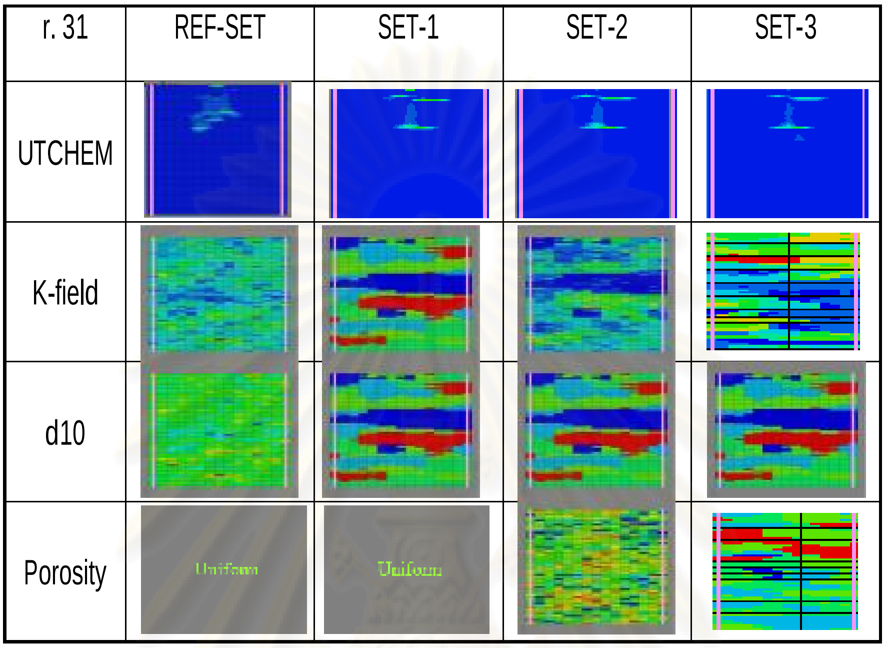
รูปที่ ข – 28 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 28



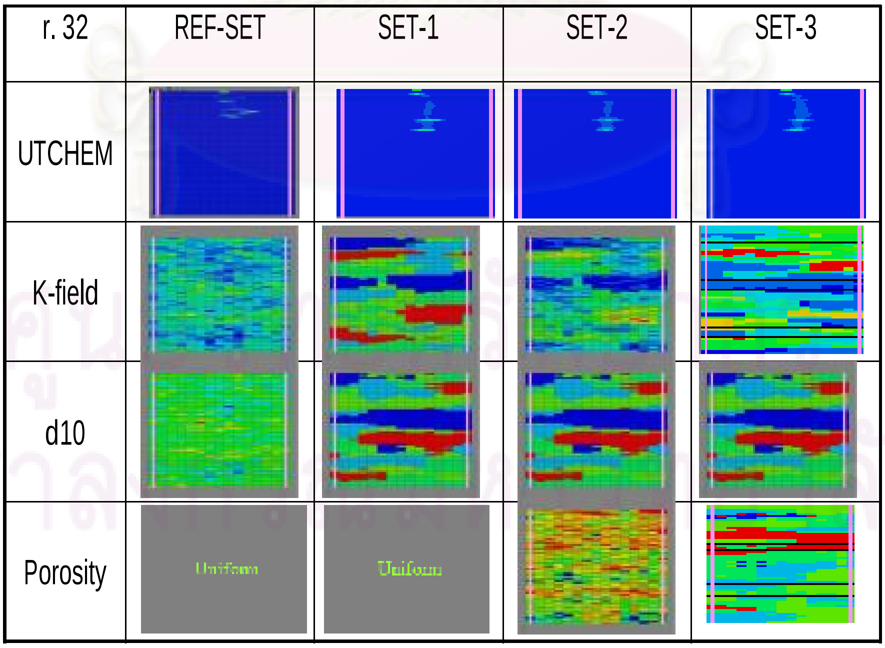
รูปที่ ข – 29 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 29



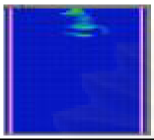
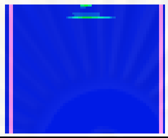
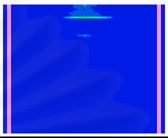
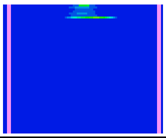
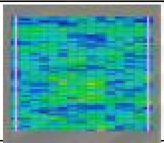
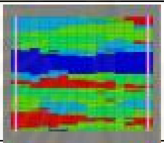
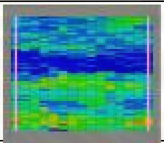
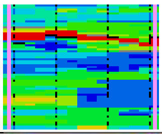
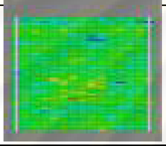
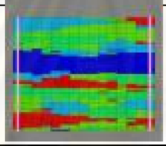
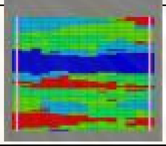
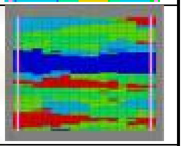
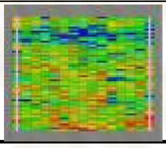
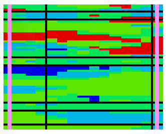
รูปที่ ข – 30 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 30



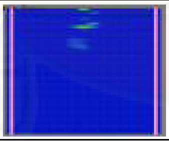
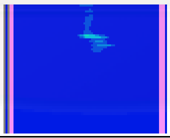
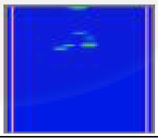
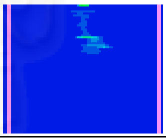
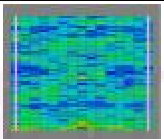
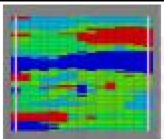
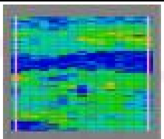
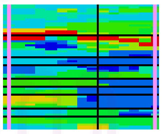
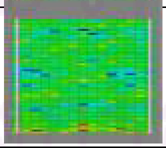
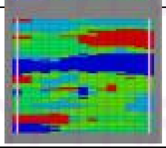
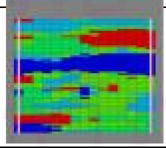
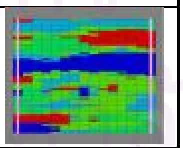
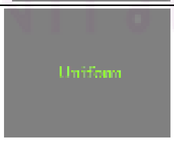
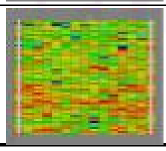
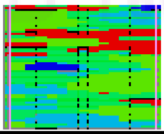
รูปที่ ข – 31 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 31



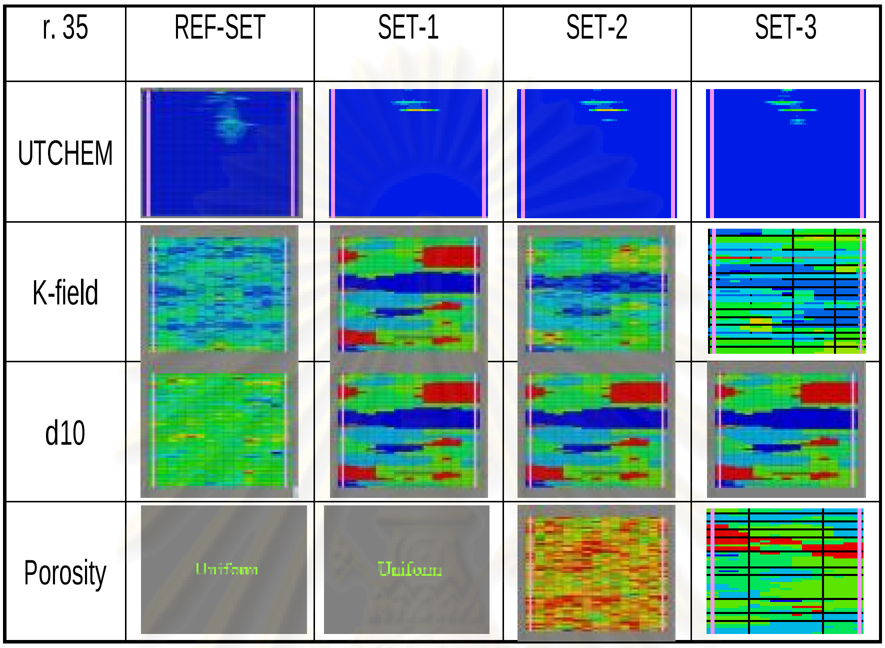
รูปที่ ข – 32 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 32

ร. 33	REF-SET	SET-1	SET-2	SET-3
UTCHEM				
K-field				
d10				
Porosity				

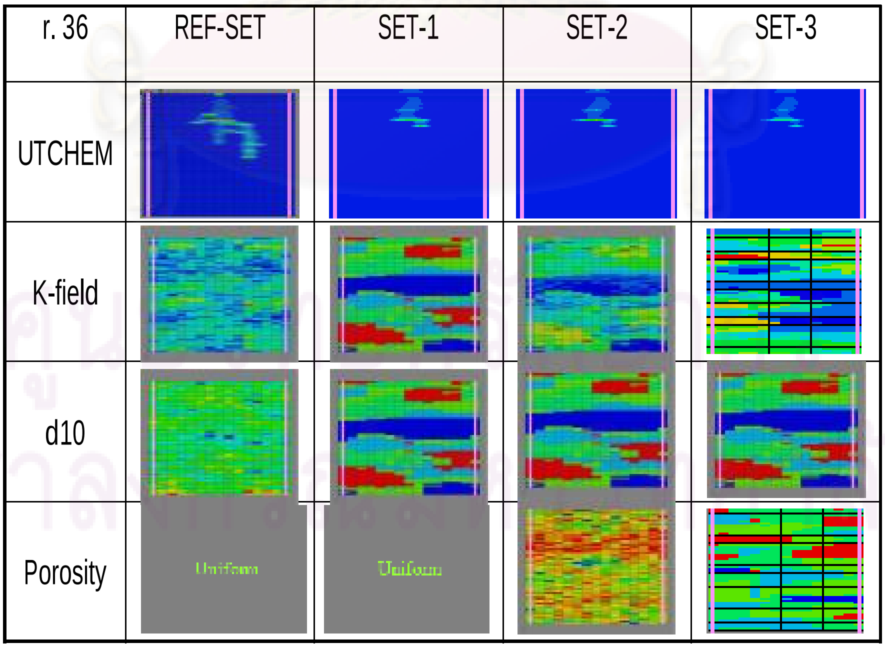
รูปที่ ข – 33 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 33

ร. 34	REF-SET	SET-1	SET-2	SET-3
UTCHEM				
K-field				
d10				
Porosity				

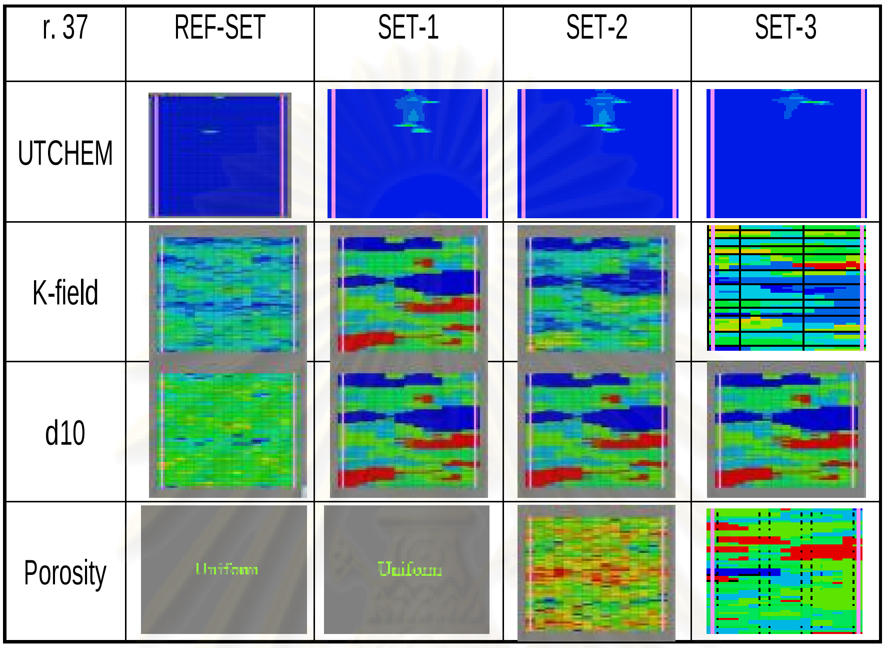
รูปที่ ข – 34 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 34



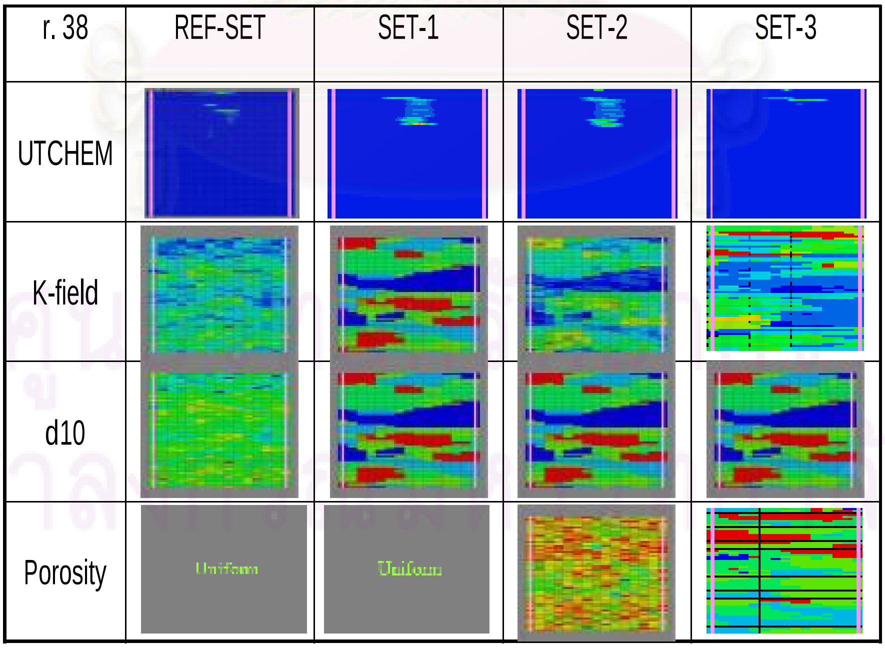
รูปที่ ข – 35 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 35



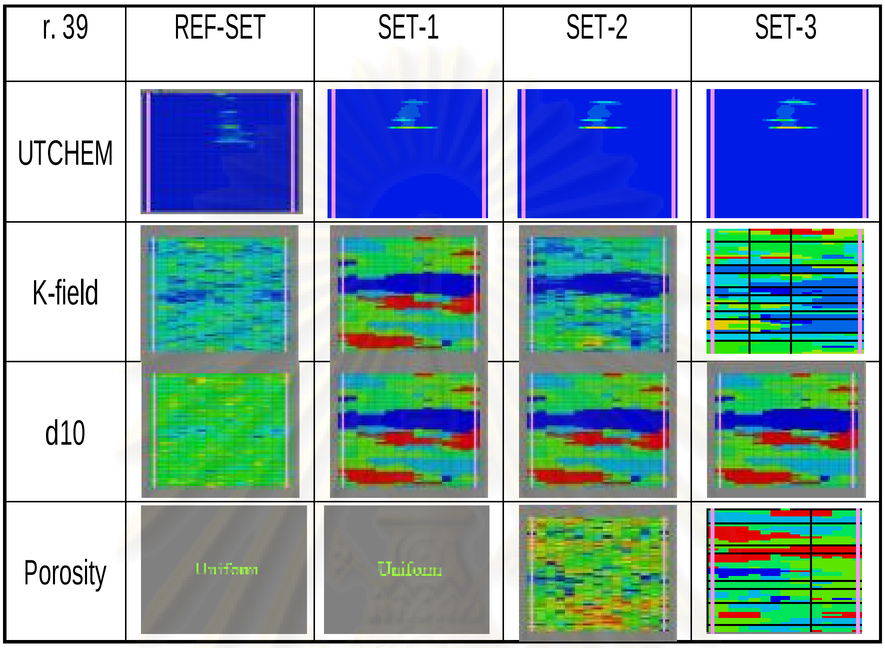
รูปที่ ข – 36 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 36



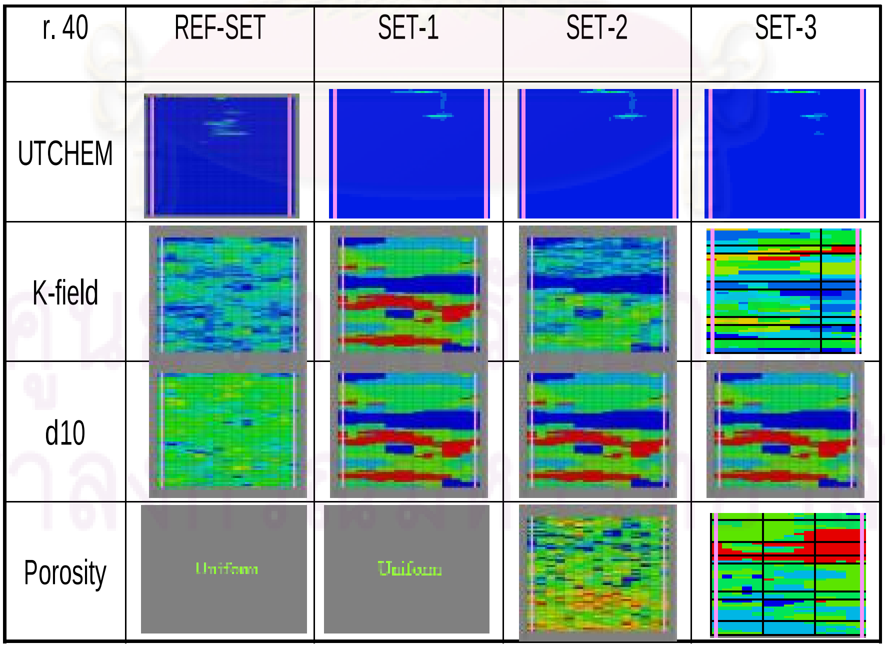
รูปที่ ข – 37 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 37



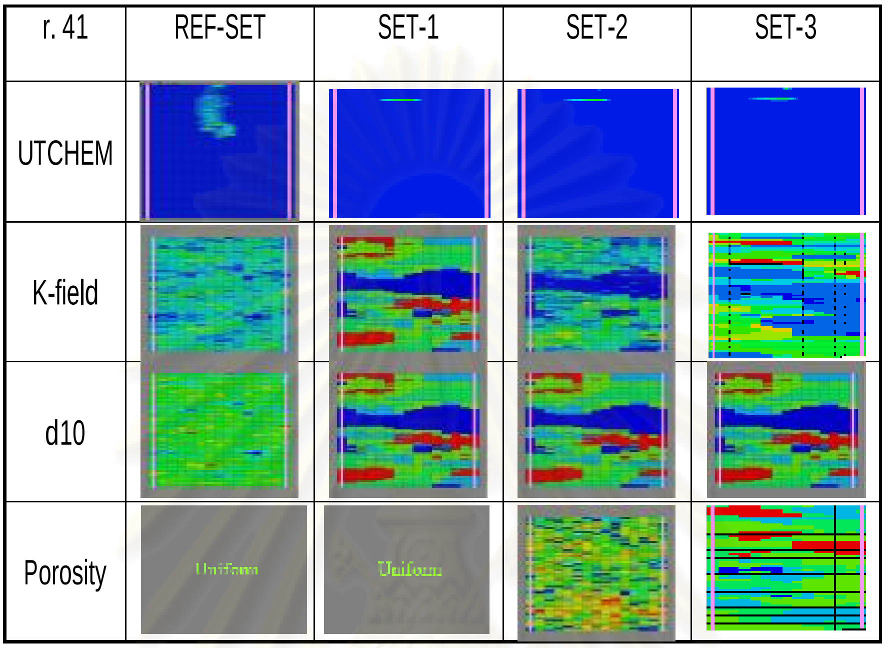
รูปที่ ข – 38 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 38



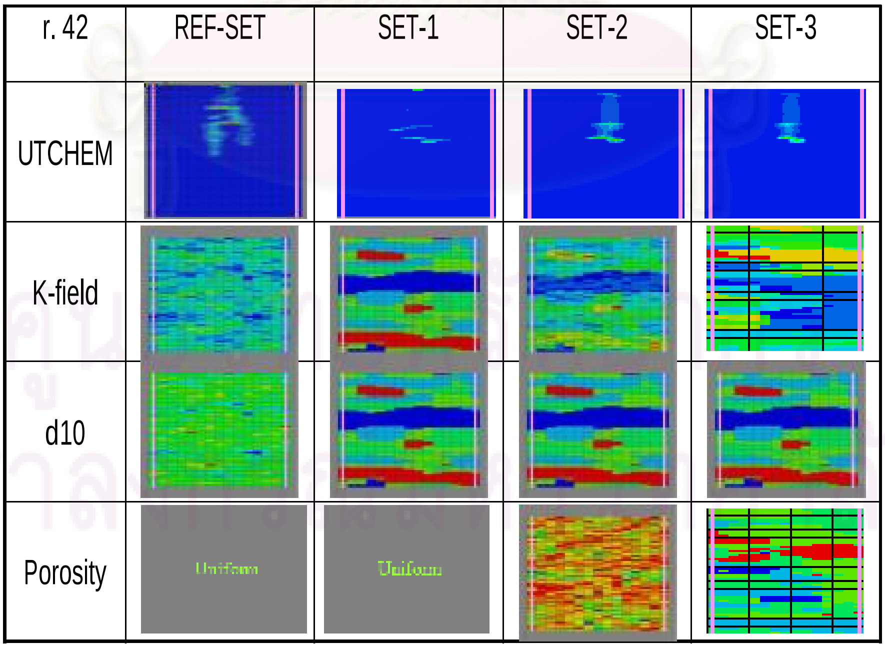
รูปที่ ข – 39 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 39



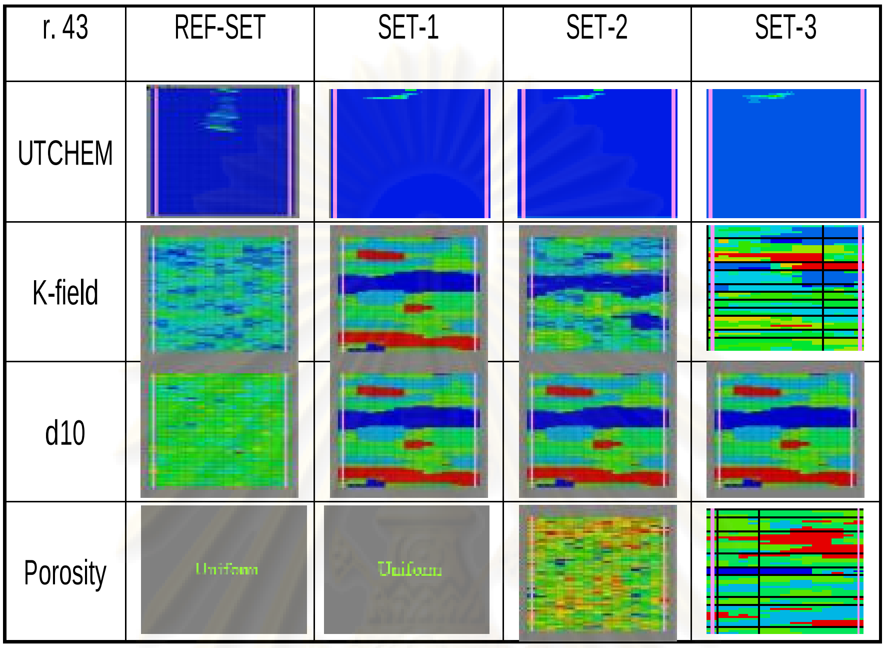
รูปที่ ข – 40 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 40



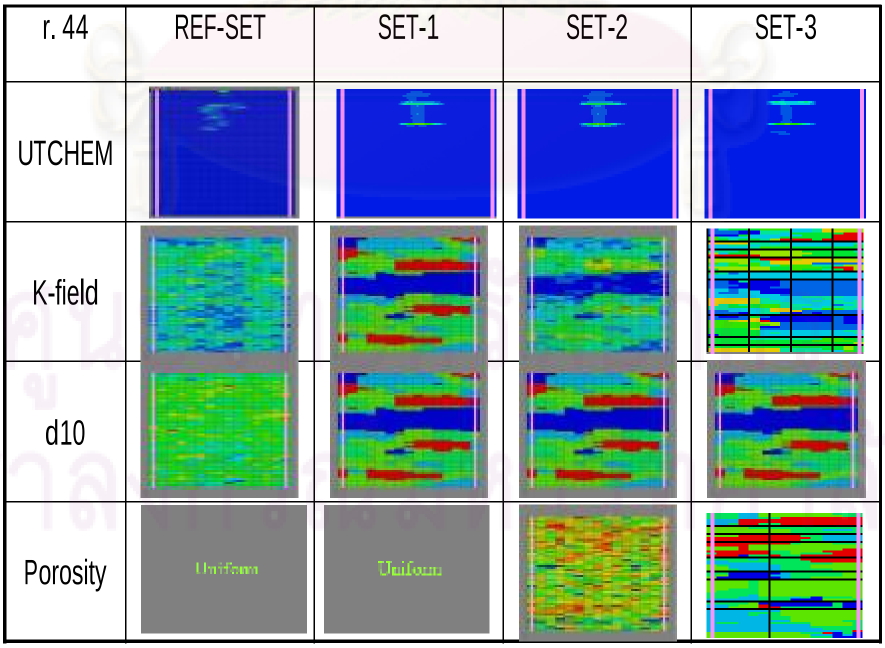
รูปที่ ข – 41 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 41



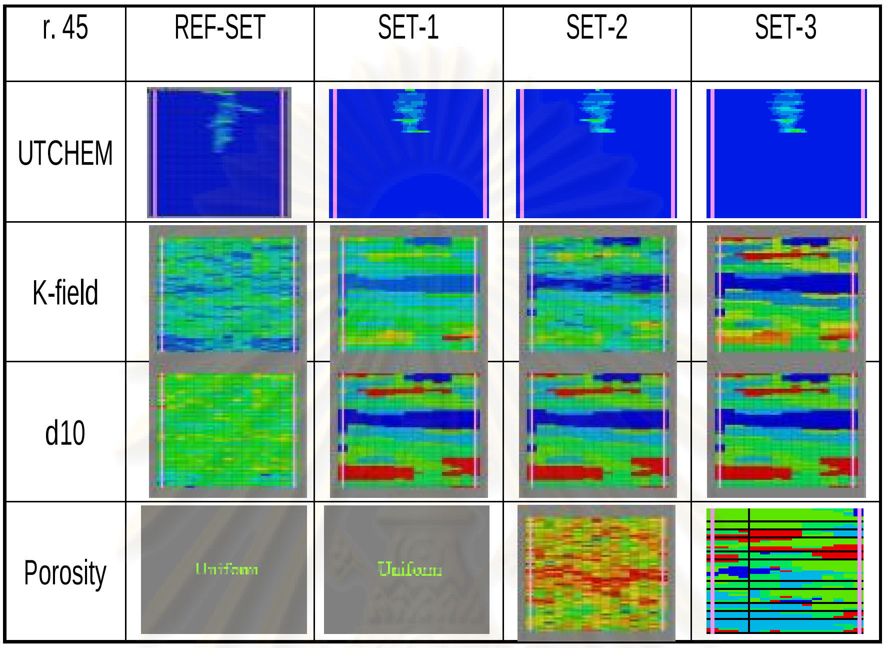
รูปที่ ข – 42 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 42



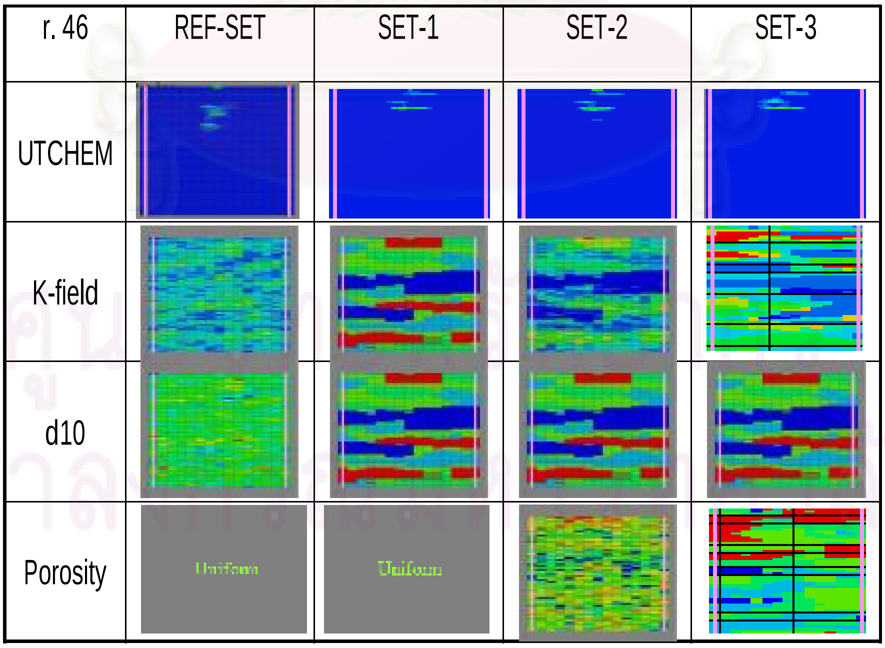
รูปที่ ข – 43 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 43



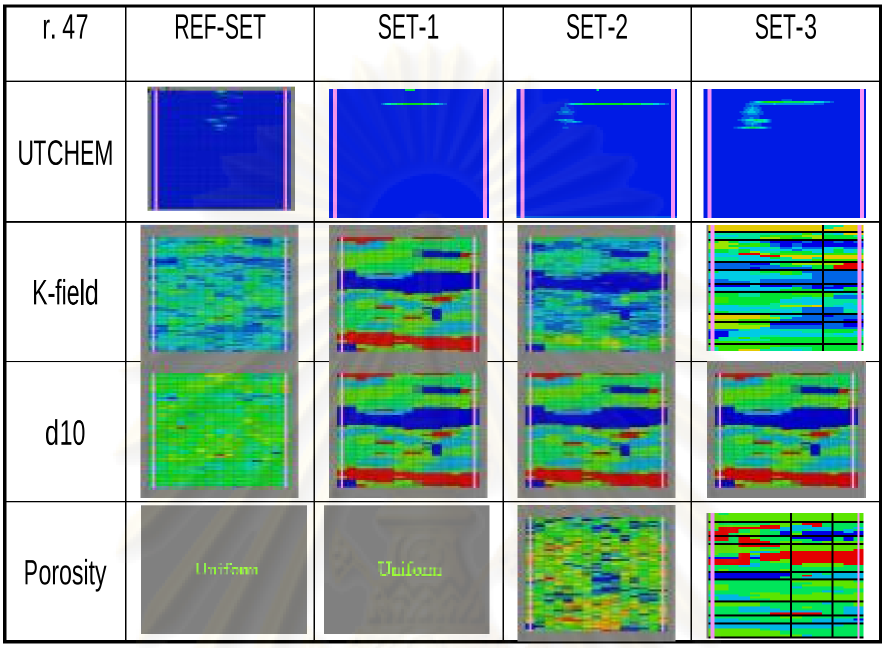
รูปที่ ข – 44 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 44



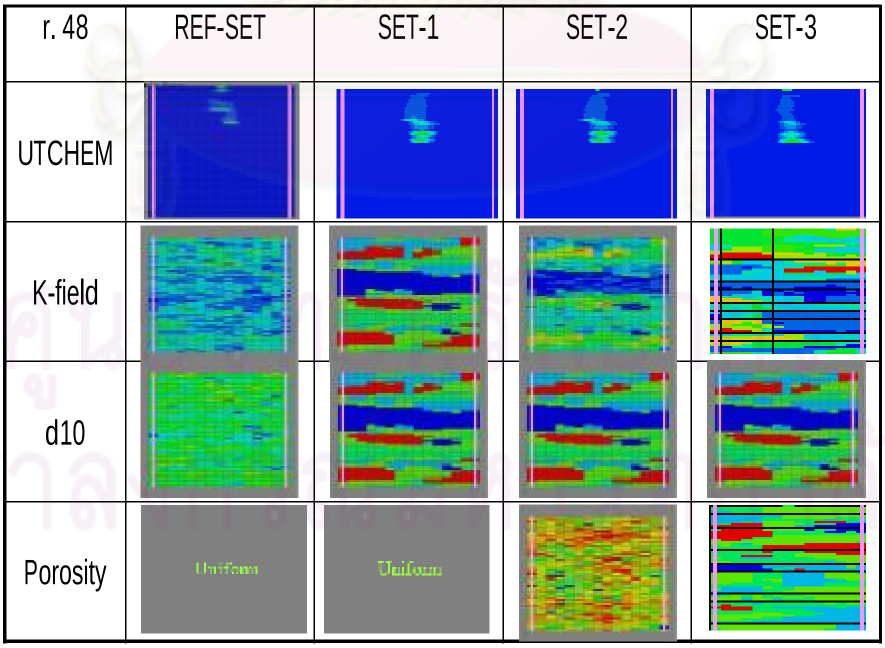
รูปที่ ข – 44 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 44



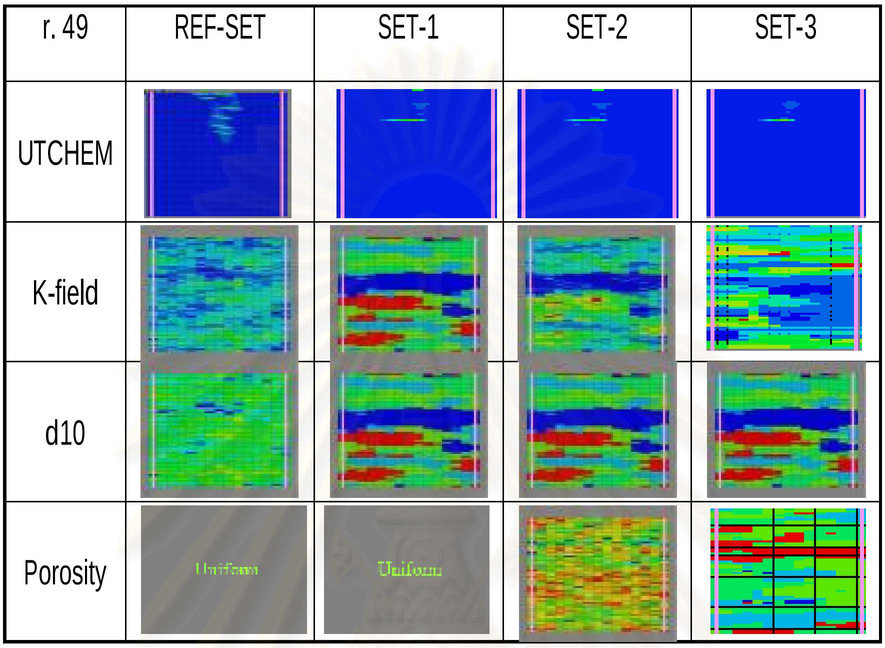
รูปที่ ข – 46 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 46



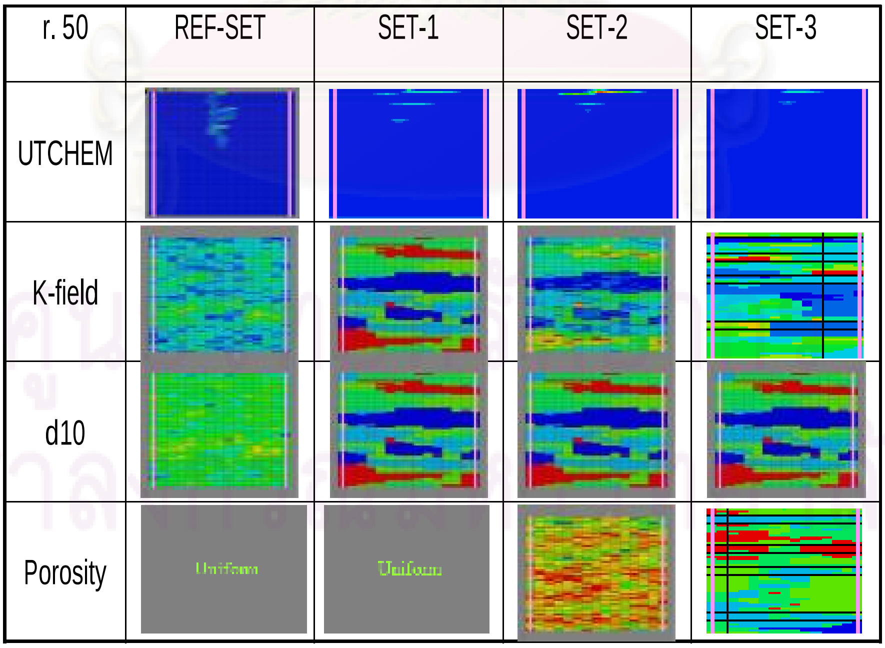
รูปที่ ข – 47 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 47



รูปที่ ข – 48 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 48



รูปที่ ข – 49 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 49



รูปที่ ข – 50 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของชั้นดินและการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในรูปแบบการจำลองที่ 50

ตารางที่ ข-1 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซตอ้างอิง

	SPREAD					
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	4.32	6.31	5.00	0.68	1.31	1.99
Realization 2	2.66	6.94	5.00	2.34	1.94	4.28
Realization 3	3.76	6.66	5.00	1.24	1.66	2.90
Realization 4	4.60	5.93	5.00	0.40	0.93	1.33
Realization 5	3.19	7.30	5.00	1.81	2.30	4.11
Realization 6	4.43	7.94	5.00	0.57	2.94	3.51
Realization 7	2.17	6.94	5.00	2.83	1.94	4.77
Realization 8	3.72	7.55	5.00	1.28	2.55	3.83
Realization 9	3.76	7.19	5.00	1.24	2.19	3.43
Realization 10	3.69	6.98	5.00	1.31	1.98	3.29
Realization 11	3.06	5.60	5.00	1.94	0.60	2.54
Realization 12	3.84	7.40	5.00	1.16	2.40	3.56
Realization 13	3.74	5.64	5.00	1.26	0.64	1.90
Realization 14	3.76	6.72	5.00	1.24	1.72	2.96
Realization 15	4.48	5.53	5.00	0.52	0.53	1.05
Realization 16	2.43	6.51	5.00	2.57	1.51	4.08
Realization 17	4.02	7.09	5.00	0.98	2.09	3.07
Realization 18	2.66	6.42	5.00	2.34	1.42	3.76
Realization 19	3.01	7.15	5.00	1.99	2.15	4.14
Realization 20	3.02	6.45	5.00	1.98	1.45	3.43
Realization 21	3.41	6.74	5.00	1.59	1.74	3.33
Realization 22	3.49	7.58	5.00	1.51	2.58	4.09
Realization 23	4.11	7.40	5.00	0.89	2.40	3.29
Realization 24	3.35	7.20	5.00	1.65	2.20	3.85
Realization 25	3.16	7.06	5.00	1.84	2.06	3.90
Realization 26	2.50	7.11	5.00	2.50	2.11	4.61
Realization 27	3.37	6.97	5.00	1.63	1.97	3.60
Realization 28	3.35	7.61	5.00	1.65	2.61	4.26
Realization 29	3.76	7.61	5.00	1.24	2.61	3.85
Realization 30	2.77	7.62	5.00	2.23	2.62	4.85
Realization 31	2.89	6.79	5.00	2.11	1.79	3.90
Realization 32	4.12	7.65	5.00	0.88	2.65	3.53
Realization 33	3.77	7.32	5.00	1.23	2.32	3.55
Realization 34	3.86	6.14	5.00	1.14	1.14	2.28
Realization 35	3.31	7.48	5.00	1.69	2.48	4.17
Realization 36	2.80	8.19	5.00	2.20	3.19	5.39
Realization 37	3.65	4.99	5.00	1.35	-	1.34
Realization 38	3.33	6.41	5.00	1.67	1.41	3.08
Realization 39	4.36	7.40	5.00	0.64	2.40	3.04
Realization 40	2.91	6.98	5.00	2.09	1.98	4.07
Realization 41	3.33	6.35	5.00	1.67	1.35	3.02
Realization 42	3.40	7.06	5.00	1.60	2.06	3.66
Realization 43	3.34	6.24	5.00	1.66	1.24	2.90
Realization 44	3.09	6.80	5.00	1.91	1.80	3.71
Realization 45	3.69	8.49	5.00	1.31	3.49	4.80
Realization 46	3.73	6.76	5.00	1.27	1.76	3.03
Realization 47	3.80	6.74	5.00	1.20	1.74	2.94
Realization 48	3.79	6.34	5.00	1.21	1.34	2.55
Realization 49	3.03	6.92	5.00	1.97	1.92	3.89
Realization 50	3.69	6.21	5.00	1.31	1.21	2.52
			MAX	2.83	3.49	5.49
			MIN	0.40	0.53	1.33
			MEAN	1.53	1.93	3.42
			SD	0.55	0.64	0.74

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต1

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.76	5.26	5.00	1.24	0.26	1.50
Realization 2	2.09	7.57	5.00	2.91	2.57	5.48
Realization 3	3.79	6.32	5.00	1.21	1.32	2.53
Realization 4	3.45	5.45	5.00	1.55	0.45	2.00
Realization 5	1.89	8.18	5.00	3.11	3.18	6.29
Realization 6	3.18	6.24	5.00	1.82	1.24	3.06
Realization 7	-	-	-	-	-	-
Realization 8	2.56	6.34	5.00	2.44	1.34	3.78
Realization 9	3.72	8.08	5.00	1.28	3.08	4.36
Realization 10	2.75	7.98	5.00	2.25	2.98	5.23
Realization 11	-	-	-	-	-	-
Realization 12	3.45	9.09	5.00	1.55	4.09	5.64
Realization 13	3.65	8.08	5.00	1.35	3.08	4.43
Realization 14	4.05	6.60	5.00	0.95	1.60	2.55
Realization 15	2.61	6.13	5.00	2.39	1.13	3.52
Realization 16	4.57	6.03	5.00	0.43	1.03	1.46
Realization 17	4.02	6.98	5.00	0.98	1.98	2.96
Realization 18	3.17	7.59	5.00	1.83	2.59	4.42
Realization 19	4.33	5.63	5.00	0.67	0.63	1.30
Realization 20	3.12	7.22	5.00	1.88	2.22	4.10
Realization 21	4.19	5.06	5.00	0.81	0.06	0.87
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	2.50	7.08	5.00	2.50	2.08	4.58
Realization 24	-	-	-	-	-	-
Realization 25	3.08	4.26	5.00	1.92	-	1.18
Realization 26	3.69	6.95	5.00	1.31	1.95	3.26
Realization 27	3.01	6.14	5.00	1.99	1.14	3.13
Realization 28	3.95	6.07	5.00	1.05	1.07	2.12
Realization 29	4.05	6.76	5.00	0.95	1.76	2.71
Realization 30	2.42	7.79	5.00	2.58	2.79	5.37
Realization 31	2.49	7.97	5.00	2.51	2.97	5.48
Realization 32	3.73	6.87	5.00	1.27	1.87	3.14
Realization 33	4.48	7.50	5.00	0.52	2.50	3.02
Realization 34	3.88	7.44	5.00	1.12	2.44	3.56
Realization 35	3.01	7.91	5.00	1.99	2.91	4.90
Realization 36	2.48	7.33	5.00	2.52	2.33	4.85
Realization 37	3.01	6.84	5.00	1.99	1.84	3.83
Realization 38	-	-	-	-	-	-
Realization 39	3.77	7.38	5.00	1.23	2.38	3.61
Realization 40	2.98	6.24	5.00	2.02	1.24	3.26
Realization 41	3.19	6.16	5.00	1.81	1.16	2.97
Realization 42	2.53	6.95	5.00	2.47	1.95	4.42
Realization 43	2.48	7.66	5.00	2.52	2.66	5.18
Realization 44	5.00	6.28	5.00		1.28	1.28
Realization 45	2.46	7.30	5.00	2.54	2.30	4.84
Realization 46	4.23	5.99	5.00	0.77	0.99	1.76
Realization 47	2.53	6.70	5.00	2.47	1.70	4.17
Realization 48	2.52	6.95	5.00	2.48	1.95	4.43
Realization 49	5.86	6.70	5.00		1.70	0.84
Realization 50	3.84	7.40	5.00	1.16	2.40	3.56
			MAX	3.11	4.09	6.33
			MIN	0.43	0.06	0.84
			MEAN	1.73	1.91	3.39
			SD	0.71	0.87	0.74

ตารางที่ ข-3 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต2

	SPREAD					
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.62	6.28	5.00	1.38	1.28	2.66
Realization 2	2.47	8.01	5.00	2.53	3.01	5.54
Realization 3	3.69	5.24	5.00	1.31	0.24	1.55
Realization 4	3.62	5.83	5.00	1.38	0.83	2.21
Realization 5	3.78	7.83	5.00	1.22	2.83	4.05
Realization 6	3.60	6.90	5.00	1.40	1.90	3.30
Realization 7	3.48	7.94	5.00	1.52	2.94	4.46
Realization 8	3.86	7.58	5.00	1.14	2.58	3.72
Realization 9	4.17	7.12	5.00	0.83	2.12	2.95
Realization 10	3.10	8.23	5.00	1.90	3.23	5.13
Realization 11	0.79	6.82	5.00	4.21	1.82	6.03
Realization 12	3.83	9.57	5.00	1.17	4.57	5.74
Realization 13	3.35	7.25	5.00	1.65	2.25	3.90
Realization 14	3.74	7.82	5.00	1.26	2.82	4.08
Realization 15	2.76	5.97	5.00	2.24	0.97	3.21
Realization 16	-	-	-	-	-	-
Realization 17	3.70	7.32	5.00	1.30	2.32	3.62
Realization 18	3.40	7.14	5.00	1.60	2.14	3.74
Realization 19	3.86	6.59	5.00	1.14	1.59	2.73
Realization 20	3.01	6.98	5.00	1.99	1.98	3.97
Realization 21	2.36	5.90	5.00	2.64	0.90	3.54
Realization 22	2.80	4.59	5.00	2.20		1.79
Realization 23	3.22	7.31	5.00	1.78	2.31	4.09
Realization 24	3.80	6.91	5.00	1.20	1.91	3.11
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.99	4.97	5.00	2.01		1.98
Realization 28	3.49	6.33	5.00	1.51	1.33	2.84
Realization 29	3.24	6.80	5.00	1.76	1.80	3.56
Realization 30	3.12	7.42	5.00	1.88	2.42	4.30
Realization 31	3.01	6.23	5.00	1.99	1.23	3.22
Realization 32	3.75	6.85	5.00	1.25	1.85	3.10
Realization 33	2.96	6.89	5.00	2.04	1.89	3.93
Realization 34	3.09	6.36	5.00	1.91	1.36	3.27
Realization 35	3.31	7.02	5.00	1.69	2.02	3.71
Realization 36	3.16	7.52	5.00	1.84	2.52	4.36
Realization 37	3.07	6.63	5.00	1.93	1.63	3.56
Realization 38	3.36	6.97	5.00	1.64	1.97	3.61
Realization 39	3.72	7.26	5.00	1.28	2.26	3.54
Realization 40	3.01	6.18	5.00	1.99	1.18	3.17
Realization 41	3.02	6.17	5.00	1.98	1.17	3.15
Realization 42	2.73	6.81	5.00	2.27	1.81	4.08
Realization 43	2.44	7.60	5.00	2.56	2.60	5.16
Realization 44	3.69	6.09	5.00	1.31	1.09	2.40
Realization 45	2.43	6.19	5.00	2.57	1.19	3.76
Realization 46	4.38	5.61	5.00	0.62	0.61	1.23
Realization 47	2.44	7.44	5.00	2.56	2.44	5.00
Realization 48	2.57	7.03	5.00	2.43	2.03	4.46
Realization 49	5.76	8.16	5.00	-	3.16	2.40
Realization 50	5.13	7.76	5.00	-	2.76	2.63
			MAX	4.21	4.57	6.03
			MEAN	1.78	1.97	3.56
			MIN	0.62	0.24	2.33
			SD	0.62	0.81	0.73

ตารางที่ ข-4 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต 3

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	2.66	6.19	5.00	2.34	1.19	3.53
Realization 2	2.41	7.52	5.00	2.59	2.52	5.11
Realization 3	3.37	6.84	5.00	1.63	1.84	3.47
Realization 4	3.66	5.61	5.00	1.34	0.61	1.95
Realization 5	3.49	8.12	5.00	1.51	3.12	4.63
Realization 6	3.14	6.20	5.00	1.86	1.20	3.06
Realization 7	3.76	8.63	5.00	1.24	3.63	4.87
Realization 8	5.10	6.90	5.00	-	1.90	1.80
Realization 9	2.45	6.39	5.00	2.55	1.39	3.94
Realization 10	3.44	8.07	5.00	1.56	3.07	4.63
Realization 11	-	-	-	-	-	-
Realization 12	4.76	8.96	5.00	0.24	3.96	4.20
Realization 13	3.49	8.21	5.00	1.51	3.21	4.72
Realization 14	3.35	6.97	5.00	1.65	1.97	3.62
Realization 15	3.31	7.58	5.00	1.69	2.58	4.27
Realization 16	-	-	-	-	-	-
Realization 17	3.38	7.97	5.00	1.62	2.97	4.59
Realization 18	3.54	6.66	5.00	1.46	1.66	3.12
Realization 19	3.09	6.20	5.00	1.91	1.20	3.11
Realization 20	3.63	4.58	5.00	1.37		0.95
Realization 21	3.33	6.56	5.00	1.67	1.56	3.23
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	1.81	6.91	5.00	3.19	1.91	5.10
Realization 24	3.97	5.81	5.00	1.03	0.81	1.84
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.96	6.41	5.00	2.04	1.41	3.45
Realization 28	3.41	5.60	5.00	1.59	0.60	2.19
Realization 29	4.48	6.84	5.00	0.52	1.84	2.36
Realization 30	2.43	8.60	5.00	2.57	3.60	6.17
Realization 31	3.08	8.54	5.00	1.92	3.54	5.46
Realization 32	3.80	6.81	5.00	1.20	1.81	3.01
Realization 33	5.54	9.31	5.00	-	4.31	3.77
Realization 34	3.83	7.51	5.00	1.17	2.51	3.68
Realization 35	2.46	8.26	5.00	2.54	3.26	5.80
Realization 36	-	-	-	-	-	-
Realization 37	3.05	6.63	5.00	1.95	1.63	3.58
Realization 38	1.90	6.24	5.00	3.10	1.24	4.34
Realization 39	4.04	6.90	5.00	0.96	1.90	2.86
Realization 40	4.96	6.14	5.00	0.04	1.14	1.18
Realization 41	2.73	6.07	5.00	2.27	1.07	3.34
Realization 42	4.43	6.84	5.00	0.57	1.84	2.41
Realization 43	3.87	6.06	5.00	1.13	1.06	2.19
Realization 44	3.73	4.93	5.00	1.27	-	1.20
Realization 45	3.01	6.67	5.00	1.99	1.67	3.66
Realization 46	4.61	5.35	5.00	0.39	0.35	0.74
Realization 47	3.19	7.02	5.00	1.81	2.02	3.83
Realization 48	2.52	6.70	5.00	2.48	1.70	4.18
Realization 49	3.33	6.95	5.00	1.67	1.95	3.62
Realization 50	3.77	8.25	5.00	1.23	3.25	4.48
			MAX	3.19	4.31	6.17
			MIN	0.04	0.35	2.33
			MEAN	1.63	2.05	3.48
			SD	0.71	0.99	0.78

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซตอ้างอิง

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.34	7.47	5.00	1.66	2.47	4.13
Realization 2	2.50	6.84	5.00	2.50	1.84	4.34
Realization 3	3.87	6.87	5.00	1.13	1.87	3.00
Realization 4	4.18	6.23	5.00	0.82	1.23	2.05
Realization 5	3.12	7.51	5.00	1.88	2.51	4.39
Realization 6	4.39	8.24	5.00	0.61	3.24	3.85
Realization 7	3.10	6.95	5.00	1.90	1.95	3.85
Realization 8	3.34	7.86	5.00	1.66	2.86	4.52
Realization 9	3.62	8.25	5.00	1.38	3.25	4.63
Realization 10	3.70	8.14	5.00	1.30	3.14	4.44
Realization 11	3.07	5.59	5.00	1.93	0.59	2.52
Realization 12	3.08	6.92	5.00	1.92	1.92	3.84
Realization 13	2.92	7.34	5.00	2.08	2.34	4.42
Realization 14	4.71	6.23	5.00	0.29	1.23	1.52
Realization 15	3.88	6.32	5.00	1.12	1.32	2.44
Realization 16	1.49	6.30	5.00	3.51	1.30	4.81
Realization 17	4.14	7.65	5.00	0.86	2.65	3.51
Realization 18	3.09	6.56	5.00	1.91	1.56	3.47
Realization 19	2.91	7.29	5.00	2.09	2.29	4.38
Realization 20	3.10	6.52	5.00	1.90	1.52	3.42
Realization 21	3.88	6.87	5.00	1.12	1.87	2.99
Realization 22	3.52	7.44	5.00	1.48	2.44	3.92
Realization 23	4.39	7.55	5.00	0.61	2.55	3.16
Realization 24	3.45	7.61	5.00	1.55	2.61	4.16
Realization 25	3.20	7.52	5.00	1.80	2.52	4.32
Realization 26	2.85	6.92	5.00	2.15	1.92	4.07
Realization 27	3.87	7.52	5.00	1.13	2.52	3.65
Realization 28	3.08	7.55	5.00	1.92	2.55	4.47
Realization 29	5.04	6.24	5.00	-	1.24	1.20
Realization 30	4.12	6.92	5.00	0.88	1.92	2.80
Realization 31	1.88	6.84	5.00	3.12	1.84	4.96
Realization 32	4.04	6.90	5.00	0.96	1.90	2.86
Realization 33	5.21	6.07	5.00	-	1.07	0.86
Realization 34	3.76	6.70	5.00	1.24	1.70	2.94
Realization 35	4.12	7.50	5.00	0.88	2.50	3.38
Realization 36	2.38	8.26	5.00	2.62	3.26	5.88
Realization 37	3.84	8.25	5.00	1.16	3.25	4.41
Realization 38	3.30	6.74	5.00	1.70	1.74	3.44
Realization 39	4.39	6.95	5.00	0.61	1.95	2.56
Realization 40	3.76	6.62	5.00	1.24	1.62	2.86
Realization 41	3.69	8.82	5.00	1.31	3.82	5.13
Realization 42	3.15	6.13	5.00	1.85	1.13	2.98
Realization 43	3.68	4.94	5.00	1.32	-	1.26
Realization 44	3.27	6.26	5.00	1.73	1.26	2.99
Realization 45	3.76	7.87	5.00	1.24	2.87	4.11
Realization 46	3.08	6.69	5.00	1.92	1.69	3.61
Realization 47	-	-	-	-	-	-
Realization 48	4.18	6.60	5.00	0.82	1.60	2.42
Realization 49	-	-	-	-	-	-
Realization 50	-	-	-	-	-	-
			MAX	3.51	3.82	5.88
			MIN	0.29	0.59	0.93
			MEAN	1.48	2.08	3.48
			SD	0.71	0.78	1.12

ตารางที่ ข-6 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต 1

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	4.37	5.64	5.00	0.63	0.64	1.27
Realization 2	2.13	7.52	5.00	2.87	2.52	5.39
Realization 3	3.79	5.78	5.00	1.21	0.78	1.99
Realization 4	4.30	5.12	5.00	0.70	0.12	0.82
Realization 5	3.08	8.62	5.00	1.92	3.62	5.54
Realization 6	3.20	6.24	5.00	1.80	1.24	3.04
Realization 7	3.70	8.75	5.00	1.30	3.75	5.05
Realization 8	5.43	7.23	5.00	-	2.23	1.80
Realization 9	2.57	6.62	5.00	2.43	1.62	4.05
Realization 10	-	-	-	-	-	-
Realization 11	3.37	7.44	5.00	1.63	2.44	4.07
Realization 12	3.73	6.85	5.00	1.27	1.85	3.12
Realization 13	3.66	8.14	5.00	1.34	3.14	4.48
Realization 14	3.97	6.90	5.00	1.03	1.90	2.93
Realization 15	3.48	7.50	5.00	1.52	2.50	4.02
Realization 16	5.03	6.26	5.00		1.26	1.23
Realization 17	-	-	-	-	-	-
Realization 18	3.15	7.61	5.00	1.85	2.61	4.46
Realization 19	2.64	6.23	5.00	2.36	1.23	3.59
Realization 20	3.26	6.72	5.00	1.74	1.72	3.46
Realization 21	-	-	-	-	-	-
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	1.96	6.91	5.00	3.04	1.91	4.95
Realization 24	3.76	7.04	5.00	1.24	2.04	3.28
Realization 25	3.66	5.45	5.00	1.34	0.45	1.79
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	3.01	6.92	5.00	1.99	1.92	3.91
Realization 28	3.27	6.52	5.00	1.73	1.52	3.25
Realization 29	4.48	6.88	5.00	0.52	1.88	2.40
Realization 30	-	-	-	-	-	-
Realization 31	3.05	8.54	5.00	1.95	3.54	5.49
Realization 32	3.80	6.83	5.00	1.20	1.83	3.03
Realization 33	4.82	7.87	5.00	0.18	2.87	3.05
Realization 34	3.79	7.48	5.00	1.21	2.48	3.69
Realization 35	2.46	8.37	5.00	2.54	3.37	5.91
Realization 36	4.44	7.11	5.00	0.56	2.11	2.67
Realization 37	2.87	6.72	5.00	2.13	1.72	3.85
Realization 38	2.10	6.77	5.00	2.90	1.77	4.67
Realization 39	-	-	-	-	-	-
Realization 40	2.95	6.20	5.00	2.05	1.20	3.25
Realization 41	3.55	5.92	5.00	1.45	0.92	2.37
Realization 42	4.26	6.85	5.00	0.74	1.85	2.59
Realization 43	2.31	7.61	5.00	2.69	2.61	5.30
Realization 44	3.90	6.05	5.00	1.10	1.05	2.15
Realization 45	3.01	7.54	5.00	1.99	2.54	4.53
Realization 46	4.26	5.57	5.00	0.74	0.57	1.31
Realization 47	2.99	6.97	5.00	2.01	1.97	3.98
Realization 48	2.64	6.87	5.00	2.36	1.87	4.23
Realization 49	3.03	4.24	5.00	1.97	-	1.21
Realization 50	3.72	8.56	5.00	1.28	3.56	4.84
			MAX	3.04	3.75	5.91
			MIN	0.18	0.12	0.91
			MEAN	1.58	2.01	3.46
			SD	0.72	0.91	1.31

ตารางที่ ข-7 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต 2

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	-	-	-	-	-	-
Realization 2	1.80	6.76	5.00	3.20	1.76	4.96
Realization 3	3.37	5.91	5.00	1.63	0.91	2.54
Realization 4	4.18	4.75	5.00	0.82	-	0.57
Realization 5	4.47	7.52	5.00	0.53	2.52	3.05
Realization 6	2.67	6.75	5.00	2.33	1.75	4.08
Realization 7	5.05	6.28	5.00		1.28	1.23
Realization 8	-	-	-	-	-	-
Realization 9	4.61	6.10	5.00	0.39	1.10	1.49
Realization 10	3.72	4.93	5.00	1.28	-	1.21
Realization 11	1.78	6.81	5.00	3.22	1.81	5.03
Realization 12	4.23	9.50	5.00	0.77	4.50	5.27
Realization 13	3.68	7.59	5.00	1.32	2.59	3.91
Realization 14	3.60	8.00	5.00	1.40	3.00	4.40
Realization 15	4.00	6.77	5.00	1.00	1.77	2.77
Realization 16	4.74	5.62	5.00	0.26	0.62	0.88
Realization 17	3.75	8.43	5.00	1.25	3.43	4.68
Realization 18	3.10	7.42	5.00	1.90	2.42	4.32
Realization 19	3.56	6.18	5.00	1.44	1.18	2.62
Realization 20	2.63	6.08	5.00	2.37	1.08	3.45
Realization 21	-	-	-	-	-	-
Realization 22	2.37	6.11	5.00	2.63	1.11	3.74
Realization 23	3.72	6.94	5.00	1.28	1.94	3.22
Realization 24	3.19	5.20	5.00	1.81	0.20	2.01
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	4.00	6.20	5.00	1.00	1.20	2.20
Realization 28	3.95	6.63	5.00	1.05	1.63	2.68
Realization 29	5.00	6.71	5.00		1.71	1.71
Realization 30	2.54	7.54	5.00	2.46	2.54	5.00
Realization 31	3.90	6.71	5.00	1.10	1.71	2.81
Realization 32	3.09	8.07	5.00	1.91	3.07	4.98
Realization 33	3.90	6.14	5.00	1.10	1.14	2.24
Realization 34	3.90	6.14	5.00	1.10	1.14	2.24
Realization 35	3.08	7.93	5.00	1.92	2.93	4.85
Realization 36	4.46	8.26	5.00	0.54	3.26	3.80
Realization 37	3.03	6.90	5.00	1.97	1.90	3.87
Realization 38	2.53	6.92	5.00	2.47	1.92	4.39
Realization 39	3.64	6.81	5.00	1.36	1.81	3.17
Realization 40	2.50	6.67	5.00	2.50	1.67	4.17
Realization 41	1.80	6.16	5.00	3.20	1.16	4.36
Realization 42	-	-	-	-	-	-
Realization 43	2.25	7.59	5.00	2.75	2.59	5.34
Realization 44	3.21	5.37	5.00	1.79	0.37	2.16
Realization 45	2.47	6.17	5.00	2.53	1.17	3.70
Realization 46	4.38	7.59	5.00	0.62	2.59	3.21
Realization 47	3.39	6.92	5.00	1.61	1.92	3.53
Realization 48	2.86	6.90	5.00	2.14	1.90	4.04
Realization 49	3.79	6.53	5.00	1.21	1.53	2.74
Realization 50	4.39	6.96	5.00	0.61	1.96	2.57
			MAX	3.22	4.50	5.33
			MEAN	1.61	1.85	3.30
			MIN	0.26	0.20	0.64
			SD	0.80	0.87	1.44

ตารางที่ ข-8 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต 3

	SPREAD					
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	5.70	7.09	5.00	-	2.09	1.39
Realization 2	2.35	7.52	5.00	2.65	2.52	5.17
Realization 3	3.54	6.51	5.00	1.46	1.51	2.97
Realization 4	3.59	5.11	5.00	1.41	0.11	1.52
Realization 5	3.20	8.56	5.00	1.80	3.56	5.36
Realization 6	3.13	6.30	5.00	1.87	1.30	3.17
Realization 7	3.66	9.04	5.00	1.34	4.04	5.38
Realization 8	-	-	-	-	-	-
Realization 9	2.46	6.88	5.00	2.54	1.88	4.42
Realization 10	3.87	7.30	5.00	1.13	2.30	3.43
Realization 11	-	-	-	-	-	-
Realization 12	3.40	6.45	5.00	1.60	1.45	3.05
Realization 13	3.70	8.25	5.00	1.30	3.25	4.55
Realization 14	-	-	-	-	-	-
Realization 15	3.27	8.03	5.00	1.73	3.03	4.76
Realization 16	4.96	5.68	5.00	0.04	0.68	0.72
Realization 17	3.97	7.61	5.00	1.03	2.61	3.64
Realization 18	3.05	7.61	5.00	1.95	2.61	4.56
Realization 19	-	-	-	-	-	-
Realization 20	3.87	7.50	5.00	1.13	2.50	3.63
Realization 21	-	-	-	-	-	-
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	1.11	7.09	5.00	3.89	2.09	5.98
Realization 24	-	-	-	-	-	-
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.59	7.48	5.00	2.41	2.48	4.89
Realization 28	3.12	6.87	5.00	1.88	1.87	3.75
Realization 29	-	-	-	-	-	-
Realization 30	3.63	6.03	5.00	1.37	1.03	2.40
Realization 31	3.90	6.49	5.00	1.10	1.49	2.59
Realization 32	3.47	6.76	5.00	1.53	1.76	3.29
Realization 33	5.00	10.00	5.00	-	5.00	5.00
Realization 34	3.73	4.93	5.00	1.27	-	1.20
Realization 35	2.94	8.32	5.00	2.06	3.32	5.38
Realization 36	3.72	8.85	5.00	1.28	3.85	5.13
Realization 37	3.03	7.52	5.00	1.97	2.52	4.49
Realization 38	1.75	6.28	5.00	3.25	1.28	4.53
Realization 39	3.51	7.38	5.00	1.49	2.38	3.87
Realization 40	-	-	-	-	-	-
Realization 41	2.62	6.10	5.00	2.38	1.10	3.48
Realization 42	3.35	7.09	5.00	1.65	2.09	3.74
Realization 43	4.16	7.06	5.00	0.84	2.06	2.90
Realization 44	3.72	6.19	5.00	1.28	1.19	2.47
Realization 45	3.24	7.43	5.00	1.76	2.43	4.19
Realization 46	4.30	6.87	5.00	0.70	1.87	2.57
Realization 47	3.34	6.62	5.00	1.66	1.62	3.28
Realization 48	2.42	7.55	5.00	2.58	2.55	5.13
Realization 49	-	-	-	-	-	-
Realization 50	3.73	8.63	5.00	1.27	3.63	4.90
			MAX	3.89	5.00	5.98
			MIN	0.04	0.11	0.78
			MEAN	1.58	2.16	3.70
			SD	0.84	1.20	1.32

ตารางที่ ข-9 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารผสม เซตอ้างอิง

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	4.23	7.01	5.00	0.77	2.01	2.78
Realization 2	3.44	6.49	5.00	1.56	1.49	3.05
Realization 3	2.51	3.58	5.00	2.49	-	1.07
Realization 4	3.98	6.37	5.00	1.02	1.37	2.39
Realization 5	3.63	6.47	5.00	1.37	1.47	2.84
Realization 6	4.40	8.29	5.00	0.60	3.29	3.89
Realization 7	3.76	6.94	5.00	1.24	1.94	3.18
Realization 8	-	-	-	-	-	-
Realization 9	3.13	5.89	5.00	1.87	0.89	2.76
Realization 10	3.99	7.65	5.00	1.01	2.65	3.66
Realization 11	2.43	5.19	5.00	2.57	0.19	2.76
Realization 12	3.51	8.14	5.00	1.49	3.14	4.63
Realization 13	2.46	7.48	5.00	2.54	2.48	5.02
Realization 14	4.38	6.98	5.00	0.62	1.98	2.60
Realization 15	4.71	6.29	5.00	0.29	1.29	1.58
Realization 16	3.01	7.24	5.00	1.99	2.24	4.23
Realization 17	4.11	7.67	5.00	0.89	2.67	3.56
Realization 18	3.71	6.56	5.00	1.29	1.56	2.85
Realization 19	3.47	6.27	5.00	1.53	1.27	2.80
Realization 20	3.16	5.98	5.00	1.84	0.98	2.82
Realization 21	3.75	6.85	5.00	1.25	1.85	3.10
Realization 22	3.32	7.49	5.00	1.68	2.49	4.17
Realization 23	4.49	6.90	5.00	0.51	1.90	2.41
Realization 24	3.80	7.63	5.00	1.20	2.63	3.83
Realization 25	3.72	7.17	5.00	1.28	2.17	3.45
Realization 26	2.27	10.00	5.00	2.73	5.00	7.73
Realization 27	3.88	7.54	5.00	1.12	2.54	3.66
Realization 28	3.18	6.80	5.00	1.82	1.80	3.62
Realization 29	-	-	-	-	-	-
Realization 30	5.16	7.57	5.00		2.57	2.41
Realization 31	2.50	6.33	5.00	2.50	1.33	3.83
Realization 32	4.20	7.55	5.00	0.80	2.55	3.35
Realization 33	4.38	5.61	5.00	0.62	0.61	1.23
Realization 34	4.60	5.51	5.00	0.40	0.51	0.91
Realization 35	3.92	6.97	5.00	1.08	1.97	3.05
Realization 36	3.48	6.13	5.00	1.52	1.13	2.65
Realization 37	5.00	6.28	5.00	-	1.28	1.28
Realization 38	3.24	6.41	5.00	1.76	1.41	3.17
Realization 39	4.34	6.30	5.00	0.66	1.30	1.96
Realization 40	3.75	6.75	5.00	1.25	1.75	3.00
Realization 41	3.74	9.45	5.00	1.26	4.45	5.71
Realization 42	3.00	6.28	5.00	2.00	1.28	3.28
Realization 43	3.15	7.60	5.00	1.85	2.60	4.45
Realization 44	2.96	6.23	5.00	2.04	1.23	3.27
Realization 45	3.69	7.58	5.00	1.31	2.58	3.89
Realization 46	2.83	6.90	5.00	2.17	1.90	4.07
Realization 47	3.18	6.90	5.00	1.82	1.90	3.72
Realization 48	4.09	6.62	5.00	0.91	1.62	2.53
Realization 49	4.41	5.58	5.00	0.59	0.58	1.17
Realization 50	3.03	7.08	5.00	1.97	2.08	4.05
			MAX	2.73	5.00	5.73
			MEAN	1.41	1.91	3.20
			MIN	0.29	0.19	0.93
			SD	0.63	0.92	1.13

ตารางที่ ข-10 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารผสม เซต 1

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.71	6.11	5.00	1.29	1.11	2.40
Realization 2	-	-	-	-	-	-
Realization 3	3.57	5.64	5.00	1.43	0.64	2.07
Realization 4	3.36	7.42	5.00	1.64	2.42	4.06
Realization 5	3.77	5.69	5.00	1.23	0.69	1.92
Realization 6	3.17	6.24	5.00	1.83	1.24	3.07
Realization 7	3.71	8.84	5.00	1.29	3.84	5.13
Realization 8	5.41	7.24	5.00	-	2.24	1.83
Realization 9	2.59	6.49	5.00	2.41	1.49	3.90
Realization 10	3.33	8.13	5.00	1.67	3.13	4.80
Realization 11	-	-	-	-	-	-
Realization 12	3.41	6.86	5.00	1.59	1.86	3.45
Realization 13	3.50	8.24	5.00	1.50	3.24	4.74
Realization 14	3.90	6.97	5.00	1.10	1.97	3.07
Realization 15	3.10	7.89	5.00	1.90	2.89	4.79
Realization 16	4.96	5.76	5.00	0.04	0.76	0.80
Realization 17	3.73	8.11	5.00	1.27	3.11	4.38
Realization 18	3.50	6.45	5.00	1.50	1.45	2.95
Realization 19	3.58	6.81	5.00	1.42	1.81	3.23
Realization 20	3.77	7.44	5.00	1.23	2.44	3.67
Realization 21	2.47	6.88	5.00	2.53	1.88	4.41
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	1.76	6.97	5.00	3.24	1.97	5.21
Realization 24	-	-	-	-	-	-
Realization 25	3.44	5.51	5.00	1.56	0.51	2.07
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.78	6.91	5.00	2.22	1.91	4.13
Realization 28	3.83	6.88	5.00	1.17	1.88	3.05
Realization 29	5.57	6.97	5.00		1.97	1.40
Realization 30	3.32	7.82	5.00	1.68	2.82	4.50
Realization 31	4.09	7.95	5.00	0.91	2.95	3.86
Realization 32	3.74	6.88	5.00	1.26	1.88	3.14
Realization 33	-	-	-	-	-	-
Realization 34	3.71	7.19	5.00	1.29	2.19	3.48
Realization 35	2.52	8.59	5.00	2.48	3.59	6.07
Realization 36	4.33	7.78	5.00	0.67	2.78	3.45
Realization 37	3.14	4.85	5.00	1.86	-	1.71
Realization 38	1.95	6.26	5.00	3.05	1.26	4.31
Realization 39	3.73	7.47	5.00	1.27	2.47	3.74
Realization 40	3.04	6.21	5.00	1.96	1.21	3.17
Realization 41	2.68	6.11	5.00	2.32	1.11	3.43
Realization 42	4.36	5.72	5.00	0.64	0.72	1.36
Realization 43	-	-	-	-	-	-
Realization 44	4.05	6.26	5.00	0.95	1.26	2.21
Realization 45	3.26	7.32	5.00	1.74	2.32	4.06
Realization 46	-	-	-	-	-	-
Realization 47	-	-	-	-	-	-
Realization 48	2.50	7.28	5.00	2.50	2.28	4.78
Realization 49	2.36	6.99	5.00	2.64	1.99	4.63
Realization 50	3.79	8.62	5.00	1.21	3.62	4.83
			MAX	3.24	3.84	6.07
			MIN	0.04	0.51	0.87
			MEAN	1.63	2.02	3.49
			SD	0.67	0.88	1.22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-11 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารผสม เซต 2

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.78	6.23	5.00	1.22	1.23	2.45
Realization 2	2.35	3.64	5.00	2.65	-	1.29
Realization 3	3.30	5.85	5.00	1.70	0.85	2.55
Realization 4	3.43	6.35	5.00	1.57	1.35	2.92
Realization 5	4.87	7.49	5.00	0.13	2.49	2.62
Realization 6	1.79	6.93	5.00	3.21	1.93	5.14
Realization 7	5.01	6.74	5.00	-	1.74	1.73
Realization 8	-	-	-	-	-	-
Realization 9	-	-	-	-	-	-
Realization 10	3.34	4.91	5.00	1.66	-	1.57
Realization 11	2.35	3.64	5.00	2.65	-	1.29
Realization 12	4.26	9.55	5.00	0.74	4.55	5.29
Realization 13	3.68	7.58	5.00	1.32	2.58	3.90
Realization 14	3.46	7.59	5.00	1.54	2.59	4.13
Realization 15	3.00	7.69	5.00	2.00	2.69	4.69
Realization 16	-	-	-	-	-	-
Realization 17	3.68	8.87	5.00	1.32	3.87	5.19
Realization 18	2.91	7.24	5.00	2.09	2.24	4.33
Realization 19	3.83	6.35	5.00	1.17	1.35	2.52
Realization 20	3.01	6.76	5.00	1.99	1.76	3.75
Realization 21	2.46	6.76	5.00	2.54	1.76	4.30
Realization 22	3.85	6.98	5.00	1.15	1.98	3.13
Realization 23	3.77	6.25	5.00	1.23	1.25	2.48
Realization 24	3.18	7.62	5.00	1.82	2.62	4.44
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.49	6.79	5.00	2.51	1.79	4.30
Realization 28	3.79	6.27	5.00	1.21	1.27	2.48
Realization 29	3.75	5.85	5.00	1.25	0.85	2.10
Realization 30	3.75	8.78	5.00	1.25	3.78	5.03
Realization 31	2.57	7.55	5.00	2.43	2.55	4.98
Realization 32	3.80	6.85	5.00	1.20	1.85	3.05
Realization 33	4.15	8.21	5.00	0.85	3.21	4.06
Realization 34	3.83	5.72	5.00	1.17	0.72	1.89
Realization 35	5.70	6.94	5.00	-	1.94	1.24
Realization 36	4.13	8.53	5.00	0.87	3.53	4.40
Realization 37	3.03	6.89	5.00	1.97	1.89	3.86
Realization 38	2.15	6.98	5.00	2.85	1.98	4.83
Realization 39	3.80	6.91	5.00	1.20	1.91	3.11
Realization 40	2.87	7.04	5.00	2.13	2.04	4.17
Realization 41	2.09	6.50	5.00	2.91	1.50	4.41
Realization 42	5.19	5.84	5.00	-	0.84	0.65
Realization 43	2.47	8.12	5.00	2.53	3.12	5.65
Realization 44	3.82	6.09	5.00	1.18	1.09	2.27
Realization 45	3.03	6.37	5.00	1.97	1.37	3.34
Realization 46	4.00	7.63	5.00	1.00	2.63	3.63
Realization 47	3.03	8.28	5.00	1.97	3.28	5.25
Realization 48	4.00	4.50	5.00	1.00	-	0.50
Realization 49	3.78	6.16	5.00	1.22	1.16	2.38
Realization 50	4.49	7.08	5.00	0.51	2.08	2.59
			MAX	3.21	4.55	5.65
			MEAN	1.64	2.08	3.33
			MIN	0.13	0.72	0.65
			SD	0.71	0.91	1.32

ตารางที่ ข-12 สรุปค่าระยะแผ่แนวราบมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารผสม เซต 3

SPREAD						
	X1	X2	Xcen	L1	L2	B
Realization 1	3.74	6.30	5.00	1.26	1.30	2.56
Realization 2	5.10	6.21	5.00		1.21	1.11
Realization 3	3.47	6.11	5.00	1.53	1.11	2.64
Realization 4	-	-	-	-	-	-
Realization 5	3.34	7.30	5.00	1.66	2.30	3.96
Realization 6	3.49	6.31	5.00	1.51	1.31	2.82
Realization 7	3.94	8.92	5.00	1.06	3.92	4.98
Realization 8	-	-	-	-	-	-
Realization 9	3.02	6.56	5.00	1.98	1.56	3.54
Realization 10	3.24	8.24	5.00	1.76	3.24	5.00
Realization 11	-	-	-	-	-	-
Realization 12	3.01	9.42	5.00	1.99	4.42	6.41
Realization 13	3.70	5.66	5.00	1.30	0.66	1.96
Realization 14	3.37	7.27	5.00	1.63	2.27	3.90
Realization 15	5.01	6.30	5.00	-	1.30	1.29
Realization 16	-	-	-	-	-	-
Realization 17	3.68	7.89	5.00	1.32	2.89	4.21
Realization 18	2.60	6.37	5.00	2.40	1.37	3.77
Realization 19	3.72	7.87	5.00	1.28	2.87	4.15
Realization 20	3.77	7.58	5.00	1.23	2.58	3.81
Realization 21	3.80	6.44	5.00	1.20	1.44	2.64
Realization 22	-	-	-	-	-	-
Realization 23	-	-	-	-	-	-
Realization 24	3.81	6.91	5.00	1.19	1.91	3.10
Realization 25	-	-	-	-	-	-
Realization 26	-	-	-	-	-	-
Realization 27	2.29	7.23	5.00	2.71	2.23	4.94
Realization 28	4.64	7.02	5.00	0.36	2.02	2.38
Realization 29	4.41	6.87	5.00	0.59	1.87	2.46
Realization 30	3.61	8.89	5.00	1.39	3.89	5.28
Realization 31	3.81	8.67	5.00	1.19	3.67	4.86
Realization 32	3.35	6.81	5.00	1.65	1.81	3.46
Realization 33	5.39	7.61	5.00	-	2.61	2.22
Realization 34	-	-	-	-	-	-
Realization 35	3.49	8.24	5.00	1.51	3.24	4.75
Realization 36	4.34	8.21	5.00	0.66	3.21	3.87
Realization 37	-	-	-	-	-	-
Realization 38	3.74	7.55	5.00	1.26	2.55	3.81
Realization 39	3.05	5.81	5.00	1.95	0.81	2.76
Realization 40	1.35	6.26	5.00	3.65	1.26	4.91
Realization 41	3.54	5.79	5.00	1.46	0.79	2.25
Realization 42	3.94	6.84	5.00	1.06	1.84	2.90
Realization 43	-	-	-	-	-	-
Realization 44	4.09	5.84	5.00	0.91	0.84	1.75
Realization 45	3.66	4.93	5.00	-	-	1.27
Realization 46	3.83	7.57	5.00	1.17	2.57	3.74
Realization 47	3.01	7.29	5.00	1.99	2.29	4.28
Realization 48	2.29	8.24	5.00	2.71	3.24	5.95
Realization 49	3.02	6.85	5.00	1.98	1.85	3.83
Realization 50	4.02	8.60	5.00	0.98	3.60	4.58
			MAX	3.65	4.42	6.41
			MIN	0.36	0.66	1.30
			MEAN	1.53	2.25	3.78
			SD	0.65	1.01	1.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-13 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซตอ้างอิง

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1							3.13	3.13	3.14	2.50					
Realization 2					3.95	3.98	4.12	4.13	4.06	3.98	1.51				
Realization 3						1.75	4.19	4.16	4.16	3.42					
Realization 4					3.02	3.02	1.69	3.00	3.00	2.68	2.68	2.08	2.08		
Realization 5					1.50	1.58	2.06	2.18	2.21	2.24	2.35				
Realization 6							1.36	2.95	2.95	2.96	2.74	2.50			
Realization 7				3.60	3.69	3.64	3.59	3.11	3.14	3.16	1.39				
Realization 8						1.40	1.47	2.30	2.65	2.63	1.93	1.89			
Realization 9							3.52	3.58	3.81	3.87	3.94				
Realization 10						1.08	3.49	3.55	3.51	2.93	2.04				
Realization 11					3.81	3.24	3.17	3.11	1.04						
Realization 12						4.05	4.64	4.08	3.58	2.21	1.43	1.40			
Realization 13						2.68	2.74	2.74	2.74						
Realization 14						1.78	3.69	2.99	1.59	1.48					
Realization 15								0.20							
Realization 16				1.78	1.89	2.54	2.56	2.70	2.71	2.70					
Realization 17							2.12	2.12	2.14	1.68	1.72				
Realization 18					4.54	4.33	4.69	4.24	3.90	3.88					
Realization 19					1.96	3.51	3.49	4.73	4.75	4.75	3.90				
Realization 20					2.75	2.99	3.00	2.99	2.81	2.78					
Realization 21						2.28	4.06	4.05	4.05	3.95					
Realization 22						1.34	1.40	1.27	1.11	1.90	1.89	1.92			
Realization 23							3.32	3.64	3.64	3.64	3.71				
Realization 24						3.85	3.84	3.97	4.01	3.98	2.08				
Realization 25						3.13	3.13	3.14	3.06	2.84	2.84				
Realization 26				3.30	3.31	3.34	3.30	3.28	1.97	1.92	1.51				
Realization 27						1.16	1.13	2.00	2.04	2.01	1.22				
Realization 28						3.18	3.00	3.00	2.74	2.54	2.54	2.53			
Realization 29						1.01	1.64	2.24	2.25	1.53	1.59	0.80			
Realization 30					1.29	1.32	1.40	1.44	2.19	2.38	1.99	1.22			
Realization 31					2.89	2.89	2.93	2.68	2.22	2.04	1.99				
Realization 32							1.58	1.71	1.75	1.71	1.48	1.41			
Realization 33						0.38	1.72	1.85	1.85	1.80	1.61				
Realization 34						2.42	2.58	2.61	2.57	1.19					
Realization 35						1.20	2.88	3.38	3.41	3.41	2.47	2.19			
Realization 36					1.94	1.96	3.27	3.28	3.28	4.23	4.26	4.24	3.42		
Realization 37						2.45	2.45	2.45							
Realization 38						0.90	2.92	1.50	2.10	1.78					
Realization 39							3.30	3.32	3.32	3.38	3.70				
Realization 40					2.98	3.07	3.07	2.58	2.58	2.53	2.53				
Realization 41						2.72	3.21	3.21	3.21	3.03					
Realization 42						4.36	4.38	4.33	3.66	3.67	3.63				
Realization 43						2.53	2.60	2.67	2.74	2.68					
Realization 44					2.47	2.52	2.53	2.50	2.21	1.20	1.08				
Realization 45						2.28	3.95	3.95	3.90	3.20	1.30	1.34	1.33		
Realization 46						2.58	2.84	2.77	2.45	1.37					
Realization 47						2.08	2.61	2.74	2.57	1.93					
Realization 48						1.48	1.53	2.36	2.38	2.36					
Realization 49					0.06	0.41	2.79	2.89	3.30	2.88	1.09				
Realization 50						2.81	3.53	3.62	3.55	1.69					
MAX	0	0	0	3.603	4.537	4.356	4.69	4.732	4.746	4.746	4.258	4.244	3.421	0	0
MEAN	0	0	0	2.891667	2.627313	2.409548	2.889612	2.9282	2.874188	2.665087	2.262161	1.960333	2.277333	0	0
STD	0	0	0	0.978313	1.152001	1.049042	0.920349	0.886985	0.825412	0.888357	0.93217	0.89459	1.059591	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

190

ตารางที่ ข-14 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต1

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.33	1.16	1.16							
Realization 2				0.31	0.34	1.94	1.94	2.47	2.24	0.23	0.24	0.20			
Realization 3							2.22	2.26	2.24	2.21					
Realization 4						1.34	1.12	1.11	0.56						
Realization 5			2.86	2.75	2.72	3.16	2.74	2.50	2.45	2.53	2.53	2.53	2.38		
Realization 6						1.53	1.80	1.53	1.50	1.50					
Realization 7															
Realization 8					2.68	2.74	2.70	2.72	2.72	2.60					
Realization 9						0.35	2.57	2.58	2.57	2.57	2.61	2.58			
Realization 10					2.50	2.50	2.46	2.39	2.87	2.33	2.26	0.58			
Realization 11															
Realization 12						1.58	1.76	1.83	2.06	2.58	2.60	2.61	2.60	2.18	
Realization 13						2.43	2.43	2.45	2.36	2.39	2.39	0.56			
Realization 14							2.79	2.78		2.58					
Realization 15					2.58	2.61	2.57	2.42	2.29	2.28					
Realization 16								2.28	2.28						
Realization 17							2.10	2.10	2.10	2.10	2.06				
Realization 18						2.89	2.92	2.89	2.78	2.64	2.64	2.60			
Realization 19							3.13	3.14	3.13						
Realization 20					2.67	2.70	2.70	2.67	2.54	2.53	2.53				
Realization 21							2.79	2.79							
Realization 22															
Realization 23					0.49	0.47	2.50	2.54	2.70	2.74	2.71	0.00			
Realization 24															
Realization 25					1.40	1.41	1.39								
Realization 26						2.65	2.67	2.65	2.82	2.82	2.81				
Realization 27					2.79	2.96	2.95	2.93	2.65	0.77					
Realization 28							2.88	2.18	2.19						
Realization 29							2.91	2.91	2.91	2.25	2.18				
Realization 30				2.79	2.82	2.78	2.74	2.75	2.70	2.58	0.79	0.84			
Realization 31				2.46	2.52	2.89	2.54	2.99	2.46	2.46	2.46				
Realization 32						2.57	2.60	2.60	2.60	2.58	1.18				
Realization 33							2.26	2.78	2.72	2.86	2.54				
Realization 34							2.47	2.54	2.52	2.54	2.39				
Realization 35					2.67	2.70	2.47	2.47	2.40	2.36	2.36	2.49			
Realization 36				2.57	2.61	2.60	2.58	2.57	2.60	2.58	1.99				
Realization 37					0.40	0.44	2.36	2.46	2.50	2.49	2.47				
Realization 38															
Realization 39						2.42	2.52	2.53	2.54	2.52	2.38				
Realization 40					2.84	2.85	2.84	2.85	2.82	2.67					
Realization 41					2.88	2.88	2.85	2.78	2.57	2.46					
Realization 42					1.67	2.19	2.08	1.61	1.47	1.41	1.37				
Realization 43				2.37	2.71	2.72	2.67	1.13	2.64	2.64	2.64	2.60			
Realization 44								2.95	2.89	2.89					
Realization 45				2.86	2.92	2.93	2.93	2.89	2.67	2.67	2.67				
Realization 46							2.75	2.78	2.77						
Realization 47				2.84	2.91	2.92	2.91	2.89	2.67	2.39					
Realization 48				2.36	2.42	2.43	2.42	2.38	2.39	1.94	1.90				
Realization 49									0.59	0.60					
Realization 50						2.39	2.40	2.42	2.40	2.43	2.38				
MAX	0	0	2.862	2.863	2.919	3.156	3.128	3.142	3.128	2.891	2.808	2.612	2.598	2.18	0
MEAN	0	0	2.862	2.368444	2.263333	2.259366	2.466214	2.457186	2.411334	2.29	2.1945	1.598818	2.4865	2.18	0
STD	0	0	0	0.796307	0.861592	0.786094	0.466389	0.499658	0.533826	0.615683	0.630259	1.133856	0.157685	0	0

191

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-15 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต2

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						2.82	2.85	2.86	2.87	2.83					
Realization 2				0.33	0.72	1.87	1.11	2.55	2.75	2.87	2.85	2.81			
Realization 3						2.13	2.15	2.14	2.17						
Realization 4						0.61	2.60	2.65	2.63						
Realization 5						0.33	2.44	2.46	2.44	2.52	2.56	2.51			
Realization 6					1.54	1.55	1.56	1.54	2.54	2.55	2.54				
Realization 7						2.51	2.45	2.41	2.34	2.37	2.33				
Realization 8						0.32	0.60	0.45	0.56	0.73	0.75	0.74			
Realization 9							2.72	2.76	2.72	2.75	2.72				
Realization 10					0.38	0.79	2.53	2.55	2.54	2.13	2.14	2.14	2.12		
Realization 11															
Realization 12						0.33	1.76	2.22	2.60	2.63	2.63	2.24	2.25	2.25	2.21
Realization 13						2.42	2.45	2.44	2.43	2.45	2.44				
Realization 14						1.65	2.83	2.89	2.85	2.64	2.63	1.75			
Realization 15					2.60	2.63	2.58	2.41	2.31						
Realization 16															
Realization 17						1.04	2.10	2.15	2.84	2.84	2.83				
Realization 18						2.51		2.58	2.62	2.63	2.51				
Realization 19						1.34	2.87	2.82	2.16	1.41					
Realization 20					2.73	2.77	2.76	2.76	2.74	2.58	2.55				
Realization 21				2.72	2.75	2.85	2.85	2.87	2.84						
Realization 22					2.53	2.56	2.53		2.82						
Realization 23					0.31	0.59	0.55	2.55	2.63	2.67	2.71				
Realization 24						0.01	0.01		0.45	0.45	0.40				
Realization 25															
Realization 26															
Realization 27					2.65	2.67	2.67	0.63							
Realization 28						2.90	2.82	2.79							
Realization 29					2.17	3.08	3.14	3.13	3.06	2.71	2.68				
Realization 30					2.72	2.74	2.74	3.00	2.76	1.52	0.82	0.78			
Realization 31					2.83	2.83	2.83	2.83	2.12	2.72					
Realization 32						2.63	2.63	2.63	2.52	1.25	1.22				
Realization 33						1.35	1.35	2.32	2.32	2.12	2.13	1.86			
Realization 34					2.75	2.75	2.75	2.52	2.55	2.55					
Realization 35						2.61	2.64	2.64	2.64	2.41	2.41				
Realization 36					2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.03	2.03	2.03			
Realization 37					0.43	0.43	0.43		2.43	2.12					
Realization 38						2.75	2.75	2.75	2.83	2.83	2.83				
Realization 39						2.52	2.55	2.55	2.55	2.52	2.20				
Realization 40					2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	2.18	2.71				
Realization 41					2.74	2.74	2.65	2.65	2.65	2.41					
Realization 42					1.63	1.63	1.63	1.63	1.50	1.45	1.40				
Realization 43				1.50	2.09	2.09	2.09	1.13	2.63	2.63	2.63	2.63			
Realization 44				1.50		2.74	2.74	2.74	2.63	2.63					
Realization 45					2.30	2.30	2.30	2.30	2.70	2.19					
Realization 46							1.35	1.35	1.35						
Realization 47				2.60	2.60	2.90	2.90	2.90	2.73	2.44	0.18				
Realization 48				2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	1.19	1.19				
Realization 49									0.26	2.82	2.85	0.90	0.59		
Realization 50								2.37	2.37	2.37		2.37			
MAX	0	0	0	2.724	2.834	3.075	3.14	3.129	3.064	2.867	2.845	2.812	2.253	2.253	2.21
MEAN	0	0	0	1.84	2.098364	2.022524	2.254698	2.394857	2.388727	2.266526	2.133517	1.896917	1.654667	2.253	2.21
STD	0	0	0	0.914872	0.865557	0.920611	0.76222	0.5951	0.626601	0.605215	0.793795	0.724546	0.925216	0	0

192

ตารางที่ ข-16 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร PCE เซต3

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.33	1.16	1.16							
Realization 2				0.31	0.34	1.94	1.94	2.47	2.24	0.23	0.24	0.20			
Realization 3							2.22	2.26	2.24	2.21					
Realization 4						1.34	1.12	1.11	0.56						
Realization 5			2.86	2.75	2.72	3.16	2.74	2.50	2.45	2.53	2.53	2.53	2.38		
Realization 6						1.53	1.80	1.53	1.50	1.50					
Realization 7															
Realization 8					2.68	2.74	2.70	2.72	2.72	2.60					
Realization 9						0.35	2.57	2.58	2.57	2.57	2.61	2.58			
Realization 10					2.50	2.50	2.46	2.39	2.87	2.33	2.26	0.58			
Realization 11															
Realization 12						1.58	1.76	1.83	2.06	2.58	2.60	2.61	2.60	2.18	
Realization 13						2.43	2.43	2.45	2.36	2.39	2.39	0.56			
Realization 14							2.79	2.78		2.58					
Realization 15					2.58	2.61	2.57	2.42	2.29	2.28					
Realization 16								2.28	2.28						
Realization 17							2.10	2.10	2.10	2.10	2.06				
Realization 18						2.89	2.92	2.89	2.78	2.64	2.64	2.60			
Realization 19							3.13	3.14	3.13						
Realization 20					2.67	2.70	2.70	2.67	2.54	2.53	2.53				
Realization 21							2.79	2.79							
Realization 22															
Realization 23					0.49	0.47	2.50	2.54	2.70	2.74	2.71				
Realization 24															
Realization 25					1.40	1.41	1.39								
Realization 26						2.65	2.67	2.65	2.82	2.82	2.81				
Realization 27					2.79	2.96	2.95	2.93	2.65	0.77					
Realization 28							2.88	2.18	2.19						
Realization 29							2.91	2.91	2.91	2.25	2.18				
Realization 30				2.79	2.82	2.78	2.74	2.75	2.70	2.58	0.79	0.84			
Realization 31				2.46	2.52	2.89	2.54	2.99	2.46	2.46	2.46				
Realization 32						2.57	2.60	2.60	2.60	2.58	1.18				
Realization 33							2.26	2.78	2.72	2.86	2.54				
Realization 34							2.47	2.54	2.52	2.54	2.39				
Realization 35					2.67	2.70	2.47	2.47	2.40	2.36	2.36	2.49			
Realization 36				2.57	2.61	2.60	2.58	2.57	2.60	2.58	1.99				
Realization 37					0.40	0.44	2.36	2.46	2.50	2.49	2.47				
Realization 38															
Realization 39						2.42	2.52	2.53	2.54	2.52	2.38				
Realization 40					2.84	2.85	2.84	2.85	2.82	2.67					
Realization 41					2.88	2.88	2.85	2.78	2.57	2.46					
Realization 42					1.67	2.19	2.08	1.61	1.47	1.41	1.37				
Realization 43				2.37	2.71	2.72	2.67	1.13	2.64	2.64	2.64	2.60			
Realization 44								2.95	2.89	2.89					
Realization 45				2.86	2.92	2.93	2.93	2.89	2.67	2.67	2.67				
Realization 46							2.75	2.78	2.77						
Realization 47				2.84	2.91	2.92	2.91	2.89	2.67	2.39					
Realization 48				2.36	2.42	2.43	2.42	2.38	2.39	1.94	1.90				
Realization 49									0.59	0.60					
Realization 50						2.39	2.40	2.42	2.40	2.43	2.38				
MAX	0	0	2.862	2.863	2.919	3.156	3.128	3.142	3.128	2.891	2.808	2.612	2.598	2.18	0
MEAN	0	0	2.862	2.368444	2.263333	2.259366	2.466214	2.457186	2.411334	2.29	2.1945	1.7587	2.4865	2.18	0
STD	0	0	0	0.796307	0.861592	0.786094	0.466389	0.499658	0.533826	0.615683	0.630259	1.056433	0.157685	0	0

193

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-17 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซตอ้างอิง

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						2.39	3.11	3.32	3.35	3.34	2.47	2.40			
Realization 2				2.10	2.12	3.39	3.63	3.99	3.64	1.51	1.51				
Realization 3						1.79	1.79	1.80	2.25	1.72	1.68				
Realization 4							0.65	1.68	1.68	1.68					
Realization 5					1.48	1.61	2.07	2.10	2.11	1.80	0.63	0.60			
Realization 6							0.28	1.54	1.54	2.17	2.26	2.19	1.55		
Realization 7					2.10	2.17	2.11	2.60	2.63	2.57	1.34				
Realization 8						1.39	1.40	2.55	1.57	1.83	1.73	1.73			
Realization 9						1.13	2.78	2.77	3.11	3.95	4.04	4.04	3.99		
Realization 10						0.95	2.32	2.74	2.78	2.71	2.18	2.19	1.72		
Realization 11					1.99	2.21	2.21	1.46	1.00						
Realization 12					1.65	3.60	3.41	3.41	2.91	1.68	1.30				
Realization 13					0.69	2.24	2.54	2.54	2.54	2.49	1.08				
Realization 14								1.44	1.05	1.05					
Realization 15						0.90	4.27	4.29	4.26	2.10					
Realization 16			2.26	2.25	2.58	2.60	2.47	2.35	1.71	1.60					
Realization 17							0.67	1.58	1.61	2.08	2.08	2.08			
Realization 18					4.17	4.24	4.23	4.19	3.88	3.27					
Realization 19					2.57	2.61	2.61	2.43	3.77	3.80	3.77				
Realization 20					1.39	2.71	2.38	2.65	2.29	0.69					
Realization 21						1.40	3.77	3.85	3.77	3.18	1.66				
Realization 22						0.70	0.65	0.62	1.06	1.23	1.23	1.20			
Realization 23							3.35	3.60	3.62	3.67	3.80	3.63			
Realization 24						1.89	2.77	2.81	2.75	2.70	2.17	2.17			
Realization 25					0.79	0.81	3.00	3.02	2.71	2.79	2.79	2.75			
Realization 26					2.71	3.00	2.81	2.65	1.66	1.61	1.09				
Realization 27							0.88	1.27	1.29	1.71	1.75	1.72			
Realization 28					1.89	3.07	2.95	2.95	2.54	2.54	2.56	2.54			
Realization 29								0.31	0.34	0.34					
Realization 30							0.10	0.21	0.38	0.35	0.28				
Realization 31			2.00	2.17	2.06	2.11	2.21	2.24	2.24	2.10	1.79				
Realization 32							0.72	1.19	1.22	1.18	0.67				
Realization 33								1.78	1.82	1.79					
Realization 34						2.17	2.21	2.19	2.14	2.11	2.07	1.19			
Realization 35							2.45	2.57	2.47	2.22	2.26	2.19			
Realization 36				1.92	1.93	1.93	2.00	1.85	2.01	3.91	4.19	4.08	3.48		
Realization 37						2.39	2.45	2.45	2.46	2.38	2.22	1.13	1.13		
Realization 38						2.24	2.21	1.34	1.36	1.33	1.30				
Realization 39							2.29	3.10	3.05	2.81	2.79				
Realization 40						1.78	2.18	2.11	1.90	1.65					
Realization 41						2.26	2.32	2.28	2.06	2.00	2.31	2.29	2.28	1.68	
Realization 42					1.50	2.39	2.49	2.65	2.67	2.64					
Realization 43						1.75	1.76	1.75							
Realization 44					2.28	2.54	2.54	2.54	1.92	1.93					
Realization 45					0.30	0.34	0.40	0.40	0.38	0.42	0.41	0.38	0.17		
Realization 46					0.60	2.61	3.17	3.20	3.17	1.30	1.26				
Realization 47															
Realization 48							1.48	1.92	1.94	1.90					
Realization 49															
Realization 50															
MAX	0.00	0.00	2.26	2.25	4.17	4.24	4.27	4.29	4.26	3.95	4.19	4.08	3.99	1.68	0.00
MEAN	0	0	2.1315	2.10675	1.830632	2.097088	2.228864	2.303404	2.230152	2.0846	1.960333	2.133105	2.047	1.678	0
STD	0	0	0.187383	0.142495	0.898857	0.852948	1.016585	0.963973	0.95632	0.900958	0.989867	1.021694	1.328841	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

194

ตารางที่ ข-18 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต1

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.246	1.301	1.385	1.274	1.274					
Realization 2				0.297	0.283	1.26	1.901	1.274	0.897	0.214	0.228	0.186			
Realization 3						0.465	2.208	2.222	2.222						
Realization 4							0.576	0.576							
Realization 5					2.598	2.612	2.598	2.501	2.445	2.557	2.557	2.557	2.459		
Realization 6					1.497	1.552	1.803	1.692	1.552	1.483					
Realization 7						2.431	2.417	2.389	2.333	2.333	2.292	0.66	0.688	0.688	
Realization 8									0.409	0.409	0.674				
Realization 9				2.696	2.738	2.766	2.724	2.738	2.724	2.71					
Realization 10															
Realization 11						2.389	3.087	3.31	3.282	3.28	2.431	2.375			
Realization 12						0.311	0.758	1.901	1.957	1.873	1.692				
Realization 13						2.445	2.445	2.445	2.361	2.417	2.389	0.646	0.59		
Realization 14							2.794	2.78	2.598	2.626	2.584				
Realization 15						2.445	2.78	2.417	2.361	2.319	2.138	2.096			
Realization 16								2.347	2.347	2.347					
Realization 17															
Realization 18					2.473	2.947	2.933	2.933	2.766	2.64	2.626	2.612			
Realization 19					2.933	2.933	2.933	2.933	2.975	1.399					
Realization 20						2.724	2.724	2.668	2.543	2.543					
Realization 21															
Realization 22															
Realization 23				0.506	0.562	1.287	2.501	2.515	2.64	2.64	2.654				
Realization 24						0.06	0.311	0.451	0.451	0.451	0.576				
Realization 25						0.799	0.827	0.827	0.283						
Relization26															
Realization 27					2.64	2.975	2.933	2.947	0.897	0.939	0.897				
Realization 28					2.891	2.933	2.919	2.877	2.18	2.166					
Realization 29							2.11	2.264	2.236	2.236	2.208				
Realization 30															
Realization 31					2.501	2.557	2.529	2.529	2.501	2.501	2.473	1.343	2.361		
Realization 32						2.598	2.654	2.654	2.654	2.598	1.162				
Realization 33								2.166	0.395	1.162	0.255	0.269			
Realization 34						0.074	0.102	2.487	2.473	2.501	2.431				
Realization 35				2.71	2.738	2.738	2.696	2.543	2.515	2.752	2.529	2.543	2.557		
Realization 36							2.11	2.124	2.082	1.971	1.985				
Realization 37					0.883	0.451	2.375	2.515	2.515	2.515	2.459				
Realization 38				0.953	0.423	2.738	2.752	2.738	2.626	2.403	2.403				
Realization 39															
Realization 40					2.835	2.863	2.863	2.863	2.835	2.696					
Realization 41						2.696	2.752	2.724	2.515						
Realization 42							0.395	0.437	0.437	0.437	0.381				
Realization 43				1.511	2.612	2.598	2.584	1.678	2.626	2.682	2.64	2.612			
Realization 44						2.543	2.598	2.584	2.64	2.598					
Realization 45					2.905	2.919	3.365	2.933	2.431	2.3	2.417	2.389			
Realization 46							2.933	2.961	2.919						
Realization 47					2.891	2.933	2.933	2.891	2.696	2.417					
Realization 48					2.375	2.445	2.417	2.375	1.943	1.943	1.887				
Realization 49					0.702	0.73	0.716								
Realization 50						2.389	2.445	2.919	2.961	2.947	2.445	2.445	2.626		
MAX	0	0	0	2.71	2.933	2.975	3.365	3.31	3.282	3.28	2.654	2.612	2.626	0.688	0
MEAN	0	0	0	1.4455	2.077895	2.054471	2.22005	2.305195	2.134073	2.088622	1.904185	1.748692	1.880167	0.688	0
STD	0	0	0	1.059365	0.983022	0.975009	0.878261	0.721412	0.820899	0.784327	0.835983	0.973819	0.966065	0	0

195

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-19 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต2

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1							1.06								
Realization 2															
Realization 3						0.53	2.83	2.83	2.83						
Realization 4							0.589	0.589							
Realization 5							2.41	2.44	2.44	2.53	2.53	2.53			
Realization 6					1.2	1.2	1	1.377	0.9	0.5	0.4				
Realization 7								0.61	0.61	0.61					
Realization 8															
Realization 9							0.57	1.07							
Realization 10				1.69	1.69	2.33	2.33	1.95	2.33	2.308	2.308	1.17	2.253	2.253	
Realization 11															
Realization 12							0.315	1.74	2.6	2.6	2.6	2.232	2.232	2.232	2.232
Realization 13						2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44			
Realization 14						1.66	2.82	2.82	2.82	2.648	2.648	1.89	1.89		
Realization 15							1.56	1.82	1.82	1.82	0.6				
Realization 16							2.3	2.3	2.3						
Realization 17						1	2	2	2	2	2	0.9	1.2		
Realization 18					2.55	2.886	2.55	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63			
Realization 19						1.37	1.33	1.399	1.399	1.394					
Realization 20					3.11	3.17	3.11	3	2.51	2.483					
Realization 21				2.87	3.02	2.83	2.83	2.83	2.83	1.69					
Realization 22				2.87	3.02	2.83	2.83	2.83	2.83	1.69					
Realization 23				0.53	0.53	1.33	2.527	2.527	2.626	2.626	2.626				
Realization 24						0.12	0.12	0.41	0.41	0.41	0.41				
Realization 25															
Realization 26															
Realization 27					0.5	0.5	0.611	0.567							
Realization 28							2.779	2.779	2.21	2.21					
Realization 29						2.89	2.89	2.89	2.21	2.21					
Realization 30									1.235	1.235	1.235	1.186			
Realization 31				2.5	2.5	2.724	2.724	2.724	2.5	2.5	2.5	2.5			
Realization 32						2.593	2.593	2.593	2.593	1.2	1.2	0			
Realization 33					1.126	1.279	1.706	2.089	1.71	1.257	1.257	1.257	1.257		
Realization 34						0.06	0.71	0.71	0.71	0.71					
Realization 35					2.72	2.72	2.72	2.516	2.516	2.4	2.4	2.483			
Realization 36							2.09	2.09	2.604	2.604	2.604	2.21	2.21		
Realization 37					0.447	0.447	0.447	2.505	2.505	2.505	2.2				
Realization 38						2.746	2.746	2.746	2.429	2.429	2.429				
Realization 39						1.06	2.54	2.54	2.54	0.8					
Realization 40				2.21	2.823	2.823	2.823	2.823	2.823	2.713					
Realization 41			2.253	2.308	2.308	2.308	2.2	1.784	1.784	0.9					
Realization 42															
Realization 43					1.542	1.542	1.542	1.4	1.15	2.604	2.604	2.604	2.604		
Realization 44					2.691	2.724	2.724	2.724	2.67	2.67					
Realization 45				2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.43	2.2					
Realization 46							1.009	1.394	1.779	1.795	1.795	1.41			
Realization 47						1.794	2.691	2.89	2.987	2.987	2.746				
Realization 48					2.133	2.264	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1				
Realization 49						0.56	0.65	2.49	0.65	0.56					
Realization 50							2.396	2.396	2.4	2.56	2.396	2.396	2.396	2.396	2.396
MAX	0	0	2.253	2.91	3.11	3.17	3.11	3	2.987	2.987	2.746	2.63	2.604	2.396	2.396
MEAN	0	0	2.253	2.236	2.045556	1.859355	1.955286	2.101714	2.0965	1.908632	1.98575	1.864875	2.00525	2.293667	2.314
STD	0	0	0	0.805543	0.938533	0.976547	0.913755	0.77781	0.728648	0.776776	0.777051	0.781275	0.519271	0.089243	0.115966

196

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-20 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสาร TCE เซต3

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1									2.849	2.849	2.849				
Realization 2				0.269	0.283	0.311	0.297	0.186	0.214	0.186	0.186	0.186			
Realization 3						0.465	2.18	2.794	2.208	2.78					
Realization 4						0.311	0.604	0.576							
Realization 5					2.529	2.571	2.571	2.529	2.473	2.515	2.543	2.515	2.389		
Realization 6					1.511	1.566	1.901	1.915	1.887	1.511					
Realization 7						1.636	1.692	1.706	1.706	1.678	1.678	0.758	0.758	0.688	
Realization 8															
Realization 9				2.487	2.682	2.682	2.682	2.501	2.459	2.11					
Realization 10						0.353	0.395	0.395	2.082	2.11	2.598				
Realization 11															
Realization 12						0.283	1.943	1.929	1.929	1.65					
Realization 13						2.431	2.431	2.431	2.403	2.445	2.445	2.389	0.604		
Realization 14															
Realization 15						2.612	2.598	2.389	2.319	2.292	2.11	2.096			
Realization 16								2.278	2.278						
Realization 17							2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11			
Realization 18					1.692	1.957	2.375	2.584	2.64	2.64	2.64	2.584			
Realization 19															
Realization 20						2.292	2.292	2.543	2.571	2.571	2.571	2.403			
Realization 21															
Realization 22															
Realization 23		0.506	0.534	0.534	0.53	1.287	2.905	2.891	2.877	2.64	2.682				
Realization 24															
Realization 25															
Realization 26															
Realization 27					2.626	2.891	2.891	2.863	0.897	0.911	0.911				
Realization 28					0.855	1.385	1.511	1.539	1.497	1.315	0.785				
Realization 29															
Realization 30							2.515	2.529	2.529	0.995					
Realization 31						0.59	0.604	1.036	1.036	1.05					
Realization 32						2.877	2.598	2.598	2.612	2.598	1.162				
Realization 33									1.803	1.817	1.817	1.748	1.887	1.971	1.957
Realization 34						0.325	0.325	0.325							
Realization 35					2.682	2.696	2.487	2.487	2.431	2.389	2.654	2.64	2.64		
Realization 36						2.571	2.571	2.571	2.096	2.445	2.194	2.264	2.236	2.194	
Realization 37					0.423	0.451	2.389	2.487	2.529	2.529	2.529	2.515			
Realization 38			0.883	2.236	1.734	1.413	1.455	1.441	1.455	1.399					
Realization 39						1.287	1.999	1.873	1.817	0.883	0.869				
Realization 40															
Realization 41					2.25	2.738	2.752	2.696	2.584						
Realization 42						0.283	0.576	0.325	0.437	0.451	0.451				
Realization 43							1.078	1.106	1.552	2.292	2.292				
Realization 44						2.598	2.668	2.64	2.654	2.571					
Realization 45						2.375	2.417	2.431	2.389	2.389	2.375				
Realization 46							3.045	3.031	3.031	2.375	2.375				
Realization 47						0.576	0.785	0.799	0.758	0.562					
Realization 48				0.214	1.608	1.901	1.929	1.887	1.915	1.957	1.901	1.385			
Realization 49															
Realization 50						2.375	2.431	2.375	2.431	2.431	2.431	2.375	1.692		
MAX	0	0.506	0.883	2.487	2.682	2.891	3.045	3.031	3.031	2.849	2.849	2.64	2.64	2.194	1.957
MEAN	0	0.506	0.7085	1.148	1.646538	1.615774	1.942914	1.966556	2.0405	1.924882	1.96632	1.997714	1.743714	1.617667	1.957
STD	0	0	0.24678	1.117884	0.890021	0.972635	0.841693	0.841298	0.687817	0.742197	0.77851	0.739089	0.791186	0.812799	0

197

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-21 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารปนเปื้อนแบบผสม เซตอ้างอิง

	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1							2.4	2.4	2.4	1.213	1.16				
Realization 2						1.509	1.936	1.936	1.936	0.928					
Realization 3				2.691	2.954	2.954									
Realization 4							1.093	1.739	1.739	1.739					
Realization 5						0.86	1.16	1.19	1.16	0.556					
Realization 6							1.388	1.52	1.52	1.52	1.651	1.662			
Realization 7						0.337	0.677	0.72	0.753	0.753	0.523				
Realization 8															
Realization 9						2.878	2.987	3.042	3.02	2.899					
Realization 10							1.147	1.147	1.147	1.334	1.673	1.334			
Realization 11				0.698	1.607	1.607	1.607	1.476	1.005						
Realization 12					1.706	2.418	2.768	2.823	2.823	1.684	1.334				
Realization 13				0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	2.52	2.576	0.183				
Realization 14							0.67	0.96	0.827	0.827	0.827				
Realization 15								0.34	0.34	0.24					
Realization 16					1.858	1.858	1.858	1.318	1.498	1.498	1.498				
Realization 17							0.6	0.685	1	1.64	1.64	1.64			
Realization 18						1.4	3.352	3.324	3.267	2.17					
Realization 19						1.905	1.905	1.735	1.735	1.271					
Realization 20					1.4	1.4	2.321	2.321	2.321						
Realization 21						1.4	2.51	2.55	2.51	2.44	1.725				
Realization 22						3.05	3.05	0.65	1.15	1.25	1.45				
Realization 23							1.65	1.95	1.95	1.95	0.85				
Realization 24						1.85	1.85	1.85	2.05	2.25	2.25	2.25			
Realization 25						0.45	1.45	2.45	2.32	2.55	1.95				
Realization 26				1.45	2.544	2.544	2.544	1.856	1.856	1.56	1.932	1.25	1.233	1.233	1.233
Realization 27							0.89	0.89	1.072	1.599	1.599	1.599			
Realization 28					1.89	2.91	2.91	2.91	2.91	1.61	1.61				
Realization 29															
Realization 30								0.804	0.804	1.244	1.244	1.23			
Realization 31				0.75	2.04	2.04	2.25	2.25	2.25	1.61					
Realization 32							0.75	0.75	1.2	1.437	1.437	1.437			
Realization 33							0.455	0.455	1.28						
Realization 34							1.19	1.19	1.19						
Realization 35						0.17	2	2.168	2.114	2.179	2				
Realization 36						1.341	1.4	1.4	1.3	1.3					
Realization 37								0.342	0.342	0.342					
Realization 38					2.18	2.18	2.18	1.319	1.803	1.48					
Realization 39							1.406	1.406	1.406	1.406					
Realization 40						1.85	1.95	1.95	1.95	1.609	1.083				
Realization 41						1.771	2.028	2.028	2.028	1.35	1.45	1.55	1.55	1.55	
Realization 42					1.13	1.65	1.85	2.05	1.35	1.25					
Realization 43					2.9	3.25	3.05	2.85	2.35	2.447	2.447	2.447			
Realization 44					2.35	2.55	2.55	2.55	1.9	1.9					
Realization 45						1.05	1.05	1.05	1.15	1.65	1.75	1.65			
Realization 46					1.78	2.619	2.619	2.9	2.319	1.53	1.319				
Realization 47					1.394	1.566	1.566	1.566	1.39	1.147	1.147				
Realization 48							1.115	1.115	1.115	1.072					
Realization 49							0.299	0.299	0.299						
Realization 50					0.137	0.462	1.554	1.554	1.554	1.029	0.857				
MAX	0	0	0	2.691	2.954	3.25	3.352	3.324	3.267	2.899	2.447	2.447	1.55	1.55	1.233
MEAN	0	0	0	1.1818	1.761875	1.746742	1.734205	1.619106	1.657936	1.524738	1.429222	1.640818	1.3915	1.3915	1.233
STD	0	0	0	0.937127	0.876276	0.868529	0.807324	0.817961	0.71434	0.586579	0.507534	0.385843	0.224153	0.224153	0

198

ตารางที่ ข-22 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารปนเปื้อนแบบผสม เซต1

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.04	1.06	1.06	1.06	1.04					
Realization 2															
Realization 3						0.60	0.65	0.65	0.59						
Realization 4						2.52	2.53	2.52	2.42	2.50	2.53	2.47			
Realization 5						0.49	1.11	2.25	1.09						
Realization 6					1.50	1.54	1.54	1.54	1.54	1.51					
Realization 7						1.64	1.76	1.76	1.78	1.75	1.69	0.69	0.70	0.69	
Realization 8									0.41	0.38	0.70				
Realization 9				2.47	2.56	2.68	2.72	2.70	2.67	2.58					
Realization 10						0.42	2.49	2.54	2.50	2.64	2.63	2.61			
Realization 11						0.48	0.59	1.78	1.89	1.89	1.69				
Realization 12															
Realization 13						2.46	2.46	2.46	2.43	2.43	2.43	0.63	0.60		
Realization 14						2.79	2.79	2.81	2.93	2.92	2.93				
Realization 15					1.18	2.45	2.45	2.45	2.32	2.29	2.12	2.07			
Realization 16								2.28	2.28						
Realization 17						2.29	2.29	2.15	2.14	2.14	2.14	2.14	2.12		
Realization 18						1.69	1.69	1.69	1.69	1.69					
Realization 19						2.89	2.86	2.86	2.75	1.41	0.98				
Realization 20						2.38	2.35	2.53	2.56	2.56	2.53	1.40			
Realization 21				2.63	2.71	2.78	2.82	2.82	2.78	1.73	1.68				
Realization 22															
Realization 23			0.49	0.48	0.52	1.29	2.71	2.71	2.65	2.65	2.64				
Realization 24															
Realization 25						0.79	0.81	0.77							
Realization 26															
Realization 27					2.64	2.92	2.93	2.89	0.90	0.90	0.90				
Realization 28						2.86	2.89	2.89	2.21	0.79	0.80				
Realization 29									2.43	2.43	2.40				
Realization 30						2.71	2.71	2.71	1.85	1.00	0.81	0.90			
Realization 31							2.47	2.47	1.02	1.00	1.08	1.27			
Realization 32						2.58	2.61	2.61	2.61	2.58	1.19				
Realization 33															
Realization 34						0.06	0.09	2.49	2.52	2.49	2.38				
Realization 35				2.70	2.68	2.72	2.70	2.54	2.47	2.43	2.52	2.52	2.52		
Realization 36							2.11	2.29	2.39	2.04	2.04	1.90			
Realization 37					0.41	0.40	0.38	0.40							
Realization 38				1.08	0.90	1.41	1.46	1.46	2.00	1.40					
Realization 39						0.90	1.96	2.00	0.95	0.93	0.90				
Realization 40					2.82	2.84	2.85	2.85	2.82	2.70					
Realization 41					2.18	2.74	2.75	2.74	2.57	2.50					
Realization 42							0.91	0.91	0.91						
Realization 43															
Realization 44							1.08	2.84	2.84	2.79					
Realization 45						2.91	2.91	2.89	2.65	2.68	2.68				
Realization 46															
Realization 47															
Realization 48				1.59	1.89	1.90	2.36	1.92	1.55	1.41	0.19				
Realization 49				0.70	0.74	0.74	0.73		0.81	0.84	0.83				
Realization 50							2.38	2.42	2.45	2.42	2.45	2.42	1.62		
MAX	0	0	0.493	2.696	2.822	2.919	2.933	2.891	2.933	2.919	2.933	2.612	2.515	0.688	0
MEAN	0	0	0.493	1.664	1.747769	1.845303	1.998711	2.200632	2.010923	1.926629	1.771963	1.751075	1.5134	0.688	0
STD	0	0	0	0.941888	0.91427	0.959975	0.859674	0.695193	0.730509	0.726307	0.802754	0.740096	0.847527	0	0

199

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-23 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารปนเปื้อนแบบผสม เซต2

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.093	1.126	1.126	0.994	0.633					
Realization 2				0.315	0.315	0.315									
Realization 3						0.512	2.79	2.79	2.79						
Realization 4						0.885	0.885	0.885	0.611						
Realization 5							0.085	2.44	2.44	2.527	2.527	2.527			
Realization 6			1.761	1.761	1.761	1.531	1.531	1.826	1.629	1.629	1.629				
Realization 7								0.961	1.038	1.104	1.027				
Realization 8															
Realization 9															
Realization 10						1.09	0.84	0.84							
Realization 11					2.75	2.75	2.75	2.75	2.54	2.54	2.54				
Realization 12							1.71	1.71	2.12	2.12	2.22	2.72	2.79	2.72	
Realization 13						2.4531	2.4531	2.4531	2.429	2.429	2.429	2.429			
Realization 14						1.585	2.615	2.615	2.615	2.615	2.615	2.615			
Realization 15					1.213	2.44	2.44	2.44	2.352	2.352	0.611	0.611			
Realization 16															
Realization 17						1.03	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	1.492	1.492	1.492	
Realization 18					2.54	2.54	2.54	2.62	2.62	2.62	2.134				
Realization 19						1.3	1.3	1.5	1.5	1.5					
Realization 20					2.72	2.72	2.72	2.72	2.53	2.53	2.53				
Realization 21				2.72	2.24	2.72	2.72	2.72	2.213	1.729	1.729				
Realization 22						2.35	2.35	2.35	1.86	1.627	1.537				
Realization 23						0.5	1.402	1.853	1.616	0.759					
Realization 24					0.218	0.218		0.748	0.748	0.748	0.748	0.748			
Realization 25															
Realization 26															
Realization 27				1.66	2.66	2.66	2.66	0.65	0.962	0.962	0.962				
Realization 28						2.225	2.225	2.225	2.225	2.225					
Realization 29						1.2	2.27	2.4	2.4						
Realization 30						1.72	1.72	1.72	1.289	0.838	1.154	1.03	1.03	1.03	
Realization 31				2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	1.13			
Realization 32						2.619	2.619	2.619	2.619	1.199	1.199				
Realization 33							1.28	1.28	1.24	1.24	1.492	1.492	1.221		
Realization 34									2.833	2.833	2.833				
Realization 35							0.06	0.06	0.5	0.5					
Realization 36							2.574	2.123	2.63	2.63	2.63	2.258	2.258		
Realization 37					2.24	2.24	2.24	2.54	2.54	2.54	2.54				
Realization 38				0.9	0.9	1.6	2	2.42	2.42	2.42	2.42				
Realization 39						0.88	1.266	1.266	1.266	1.25	1.207				
Realization 40					2.225	2.247	2.845	2.845	2.845	2.585	0.3				
Realization 41				2.3	2.3	2.3	2.3	1.72	1.72	0.9					
Realization 42								0.365	0.365						
Realization 43				1.45	1.65	1.65	1.65	1.13	2.6	2.65	2.65	2.65	2.27		
Realization 44						2.6	2.6	2.6	2.6	2.6					
Realization 45					2.89	2.89	2.507	2.9	2.382	2.281					
Realization 46							1	2.62	2.62	2.43	1.65	1.7			
Realization 47					1.83	2.484	2.574	2.484	2.484	2.041	2.041	2.041			
Realization 48							1.368		1.379						
Realization 49						0.511	0.511	0.7	0.511	0.511					
Realization 50							1.424	1.5	1.548	1.99	1.413				
MAX	0	0	1.761	2.72	2.89	2.89	2.845	2.9	2.845	2.833	2.833	2.72	2.79	2.72	0
MEAN	0	0	1.761	1.69825	1.937176	1.77465	1.913753	1.907479	1.935419	1.860184	1.840241	1.817357	1.8435	1.747333	0
STD	0	0	0	0.813706	0.831864	0.835733	0.777626	0.792061	0.746965	0.74802	0.719975	0.743323	0.696048	0.873454	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

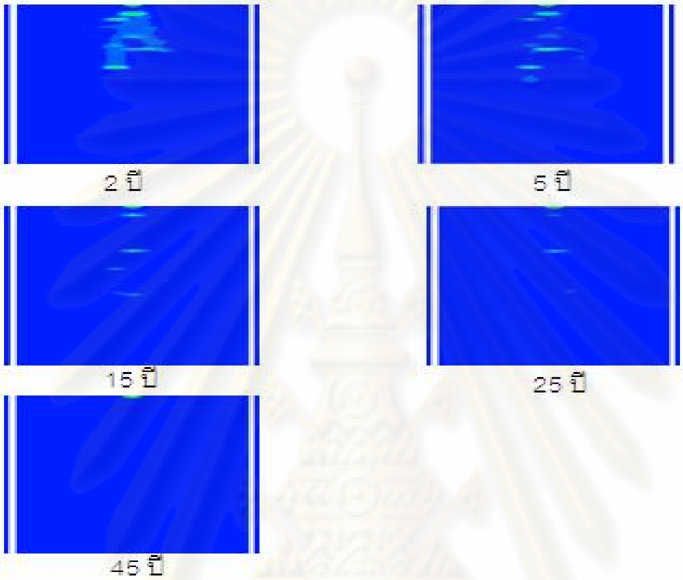
ตารางที่ ข-24 สรุปค่าระยะจมในแนวดิ่งมากที่สุด ในแต่ละ realization ของสารปนเปื้อนแบบผสม เซต3

ตำแหน่งความลึก(m)	0-0.67	0.67-1.33	1.33-2	2-2.67	2.67-3.33	3.33-4	4-4.66	4.66-5.33	5.33-6	6-6.66	6.66-7.33	7.33-8	8-8.66	8.66-9.33	9.33-10
Realization 1						1.00	1.05	1.05	1.02	0.98					
Realization 2								0.38	0.44	0.38					
Realization 3						1.08	2.20	2.18	2.18	2.15					
Realization 4															
Realization 5						1.61	2.50	2.43	2.43	2.43	2.50				
Realization 6						1.51	1.54	1.54	1.53	1.01					
Realization 7						1.64	1.76	1.76	1.53	1.75	1.69	0.69	0.70	0.69	
Realization 8															
Realization 9					2.53	2.53	2.65	2.68	2.70	2.33					
Realization 10						0.41	0.44	2.14	2.14	2.14	2.14	2.11	2.08		
Realization 11															
Realization 12					0.31	0.31	1.73	1.73	2.56	2.60	2.24	2.25	2.24	2.22	
Realization 13						0.93	0.93	0.91	0.91						
Realization 14						2.82	2.84	2.84	2.81	2.64	2.64				
Realization 15								1.53	1.53	1.53					
Realization 16															
Realization 17						2.29	2.29	2.15	2.14	2.14	2.14	2.14			
Realization 18					1.69	1.69	2.21	1.69	1.69	1.69					
Realization 19						1.48	1.48	1.47	1.43	1.40	1.04	1.01			
Realization 20						2.29	2.35	2.60	2.70	2.79	2.67	1.41			
Realization 21						2.58	2.58	2.18	1.69	1.68					
Realization 22															
Realization 23															
Realization 24							0.07	0.38	0.44	0.44	0.40				
Realization 25															
Realization 26															
Realization 27				1.59	2.77	2.79	2.79	0.79	0.90	0.92	0.90				
Realization 28								1.93	1.86	0.81	0.81				
Realization 29							2.08	2.19	2.25	2.25	2.18				
Realization 30						1.69	1.71	1.71	1.66	0.80	0.90	0.98	1.02	0.98	
Realization 31						0.58	0.98	1.01	1.01	1.09	1.26	1.34	2.00		
Realization 32						2.61	2.61	2.61	2.61	1.20	1.20				
Realization 33									1.83	1.85	1.83	1.85			
Realization 34															
Realization 35						2.71	2.46	2.47	2.45	2.46	2.54	2.54	2.54		
Realization 36							2.15	2.15	2.15	2.04	2.19	2.19	2.19		
Realization 37															
Realization 38						1.34	1.80	1.85	1.79	1.22	1.20	0.90			
Realization 39					2.60	2.60	2.60	2.79	2.75						
Realization 40			1.00	1.27	1.27	1.40	1.44	1.44	1.44	1.41					
Realization 41						1.94	1.94	1.92	1.89						
Realization 42							0.41	0.44	0.40	0.45	0.40				
Realization 43															
Realization 44							2.58	2.58	2.58						
Realization 45						2.64	2.64	2.64							
Realization 46						2.61	2.85	2.85	2.85	2.42	2.40	1.27			
Realization 47					2.39	2.39	2.68	2.43	2.43	2.43	0.88				
Realization 48				0.20	1.76	1.76	1.78	1.69	1.94	1.94	1.94	1.93			
Realization 49					0.53	0.53	0.53	0.53	0.86	0.86	0.81				
Realization 50							2.39	2.39	1.40	1.40	1.40	1.40	1.65		
MAX	0	0	0.995	1.594	2.766	2.822	2.849	2.849	2.849	2.794	2.668	2.543	2.543	2.222	0
MEAN	0	0	0.995	1.022667	1.761667	1.785483	1.915971	1.843447	1.812684	1.636	1.61224	1.600867	1.803625	1.297	0
STD	0	0	0	0.730195	0.904486	0.78673	0.776067	0.732137	0.707642	0.703873	0.731586	0.578698	0.63788	0.814359	0

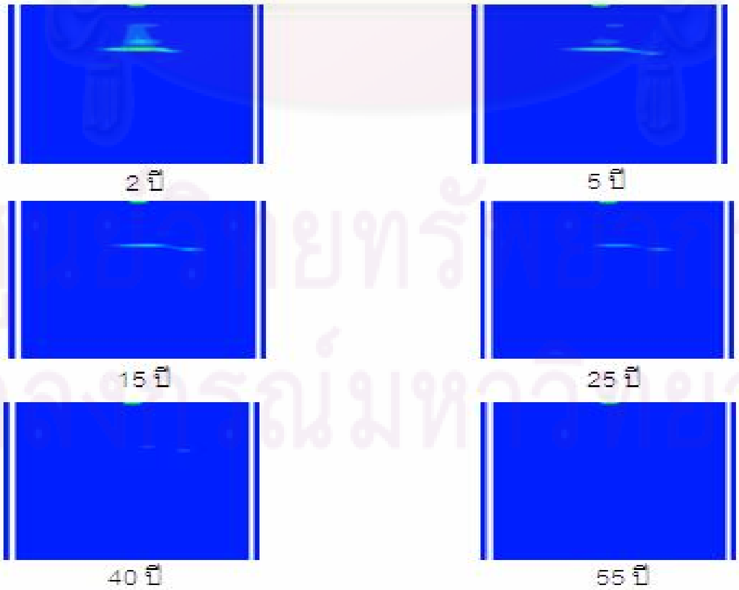
201

ระยะเวลาการละลายของสารปนเปื้อนประเภท DNAPL ตามธรรมชาติ

โดยอ้างอิงอัตราการไหลของน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.032 เมตร/วัน จากการศึกษาพบว่าการละลายตามธรรมชาติจะอยู่ในช่วง 42-55 ปี

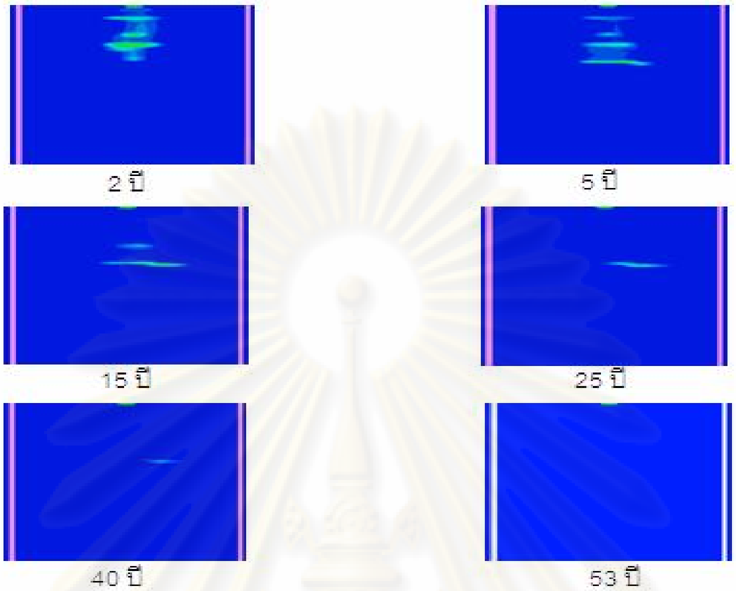


รูปที่ ข-51 ช่วงเวลาการละลายของ DNAPL ในเซตอ้างอิง

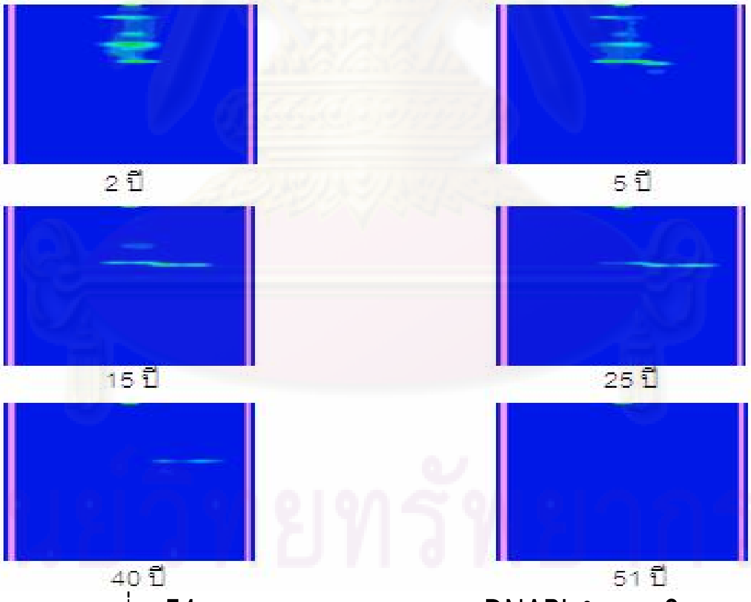


รูปที่ ข-52 ช่วงเวลาการละลายของ DNAPL ในเซต 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-53 ช่วงเวลาการละลายของ DNAPL ในเซต 2



รูปที่ ข-54 ช่วงเวลาการละลายของ DNAPL ในเซต 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปรียบเทียบผลการจำลองด้วยวิธีมัลติสเตจเบส์เซียน

ตัวอย่างการคำนวณ ณ ตำแหน่ง 6.7 เมตร ที่ความลึก 1 เมตร

พิจารณา ณ ตำแหน่ง 6.7 เมตร เมื่อมีหลุมสำรวจจำนวน 6 หลุม เนื่องจากจำนวนหลุมสำรวจ 3 หลุมแรกอยู่ทางด้านที่ $t_b < t_r$ ดังนั้นสถานะที่ใช้ในการทำนายตำแหน่ง t_r ยังคงขึ้นอยู่กับค่า t_b

ในกรณี $t_b < t_r$

$$s_i^{'}(t_r) = \frac{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) v_{ij}(t_r, t_b) s_i(t_r)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)} \qquad (ค - 1)$$

$$s_1^1(t_{6.7}) = \frac{0.95 \times 0.75 \times 0.99 + 0.05 \times 0.286 \times 0.01}{0.95 \times 0.99 + 0.05 \times 0.05} = 0.75$$

จะได้ว่า $s_1^1(t_{6.7}) = s_1^2(t_{6.7}) = s_1^3(t_{6.7}) = 0.75$

ในการปรับปรุงหลุมสำรวจที่ 4 กำหนดให้

ในกรณี $t_b = t_r$

$$s_i^{'}(t_r) = \frac{L_{ik}(t_b) s_i(t_b)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)} \qquad (ค - 2)$$

$$s_1^4(t_{6.7}) = \frac{0.95 \times 0.75}{0.95 \times 0.893 + 0.05 \times 0.107} = 0.834$$

ในการปรับปรุงหลุมสำรวจที่ 5 และ 6 กำหนดให้

ในกรณี $t_b < t_r$

$$s_i^{'}(t_r) = \frac{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) v_{ji}(t_b, t_r) s_j(t_b)}{\sum_{j=1}^{n} L_{jk}(t_b) s_j(t_b)} \qquad (ค - 3)$$

$$s_1^5(t_{6.7}) = \frac{0.95 \times 0.840 \times 0.834 + 0.05 \times 0.160 \times 0.834}{0.95 \times 0.834 + 0.05 \times 0.166} = 0.840$$

$$s_1^6(t_{6.7}) = \frac{0.95 \times 0.832 \times 0.84 + 0.05 \times 0.168 \times 0.84}{0.95 \times 0.84 + 0.05 \times 0.16} = 0.832$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการทำนายความน่าจะเป็นที่ไม่มีการสำรวจนั้นสามารถใช้สมการที่ 3-19 ซึ่งในการคำนวณนี้จะทำนายความน่าจะเป็นที่ตำแหน่ง 6 เมตรหลังจากมีการปรับปรุงความน่าจะเป็นครั้งที่ 6 จะได้ความน่าจะเป็นภายหลังที่ตำแหน่ง 6.7 ที่ความลึก 1 เมตรเท่ากับ 0.832 จากสมการที่ 3-19 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$v_{11}^{'}(t_0,t) = s_1^{'}(t_1)\frac{v_{11}(t-t_0)v_{11}(t_1-t)}{v_{11}(t_1-t_0)} + s_2^{'}(t_1)\frac{v_{11}(t-t_0)v_{12}(t_1-t)}{v_{12}(t_1-t_0)} \quad (ค - 4)$$

$$v_{ij}(t-t_0) = \begin{bmatrix} 0.875 & 0.125 \\ 0.144 & 0.8568 \end{bmatrix} \quad (ค - 5)$$

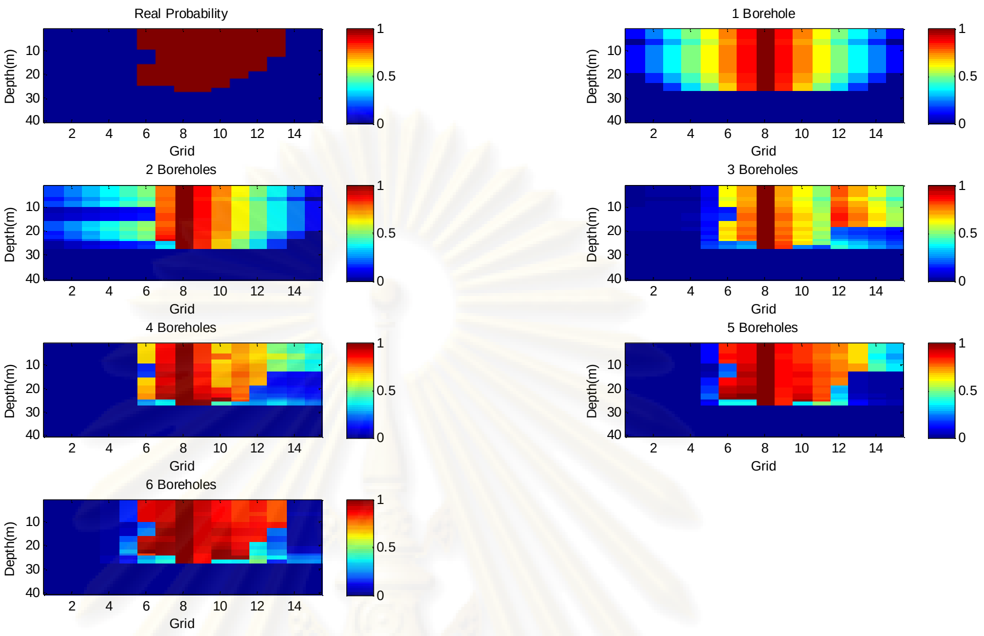
$$v_{jk}(t_1-t) = \begin{bmatrix} 0.875 & 0.125 \\ 0.144 & 0.856 \end{bmatrix} \quad (ค - 6)$$

$$v_{ik}(t_1-t_0) = \begin{bmatrix} 0.752 & 0.248 \\ 0.340 & 0.660 \end{bmatrix} \quad (ค - 7)$$

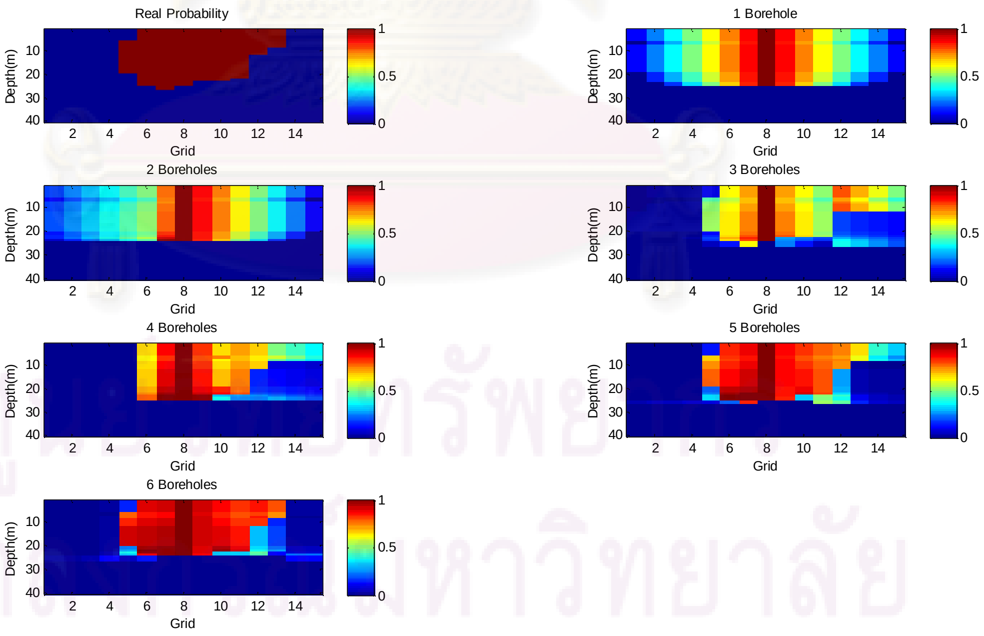
เมื่อนำ (ค-5), (ค-6) และ (ค-7) มาแทนในสมการ (ค-4)

$$v_{11}^{'}(t_0,t) = 0.832\frac{(0.875\times 0.875)}{0.752} + 0.168\frac{(0.875\times 0.125)}{0.34}$$

$v_{11}^{'}(t_0,t) = s_j^{'}(6.00) = 0.901$ หมายความว่าที่ตำแหน่ง 6 เมตรมีโอกาสพบเจอการปนเปื้อนเมื่อมีการปรับปรุงด้วยเบส์เซียนจำนวน6 ครั้ง

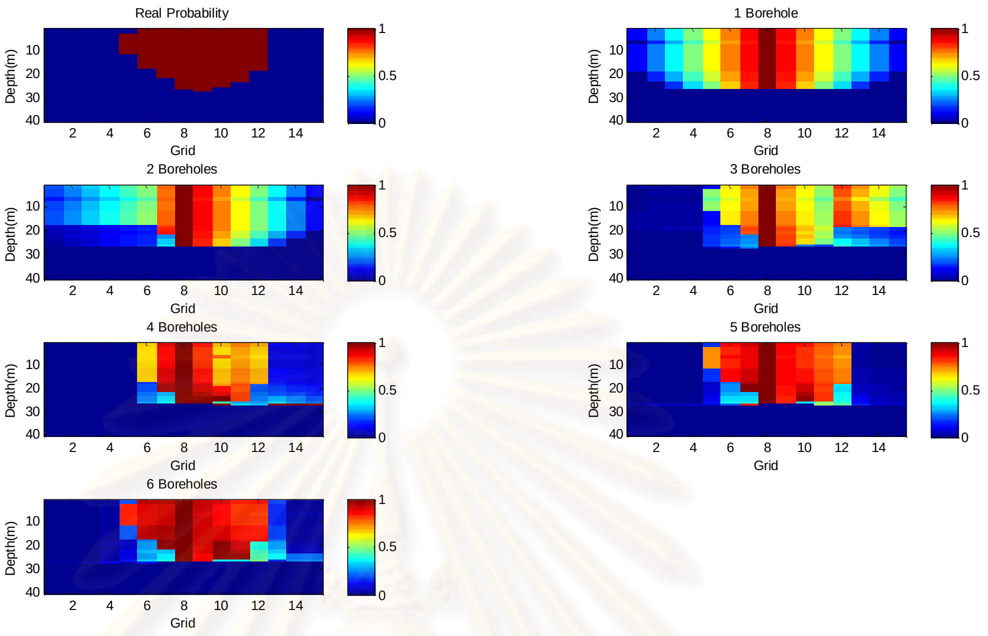


รูปที่ ค-1 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 1

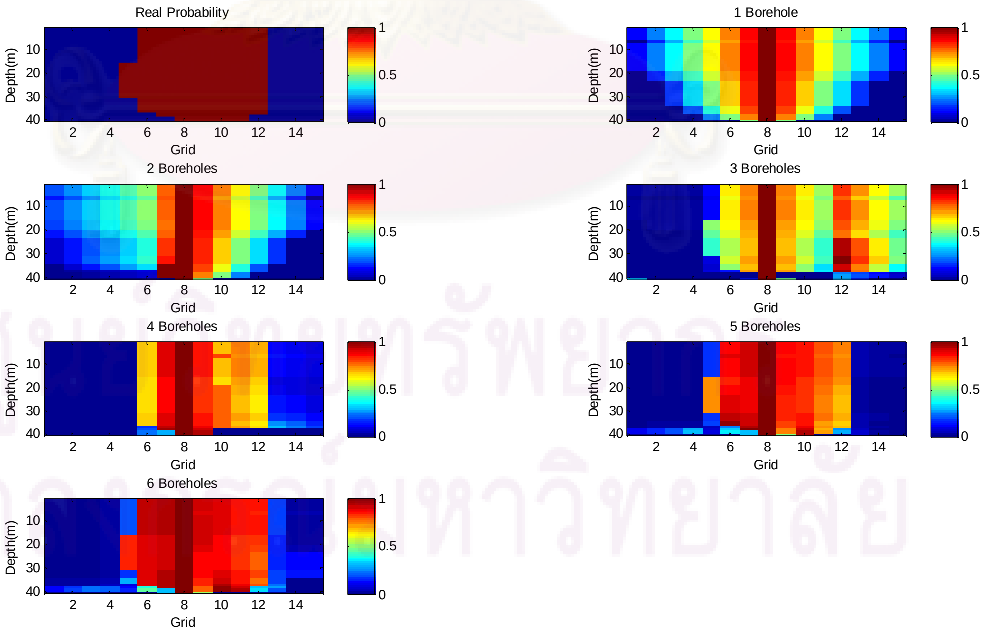


รูปที่ ค-2 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

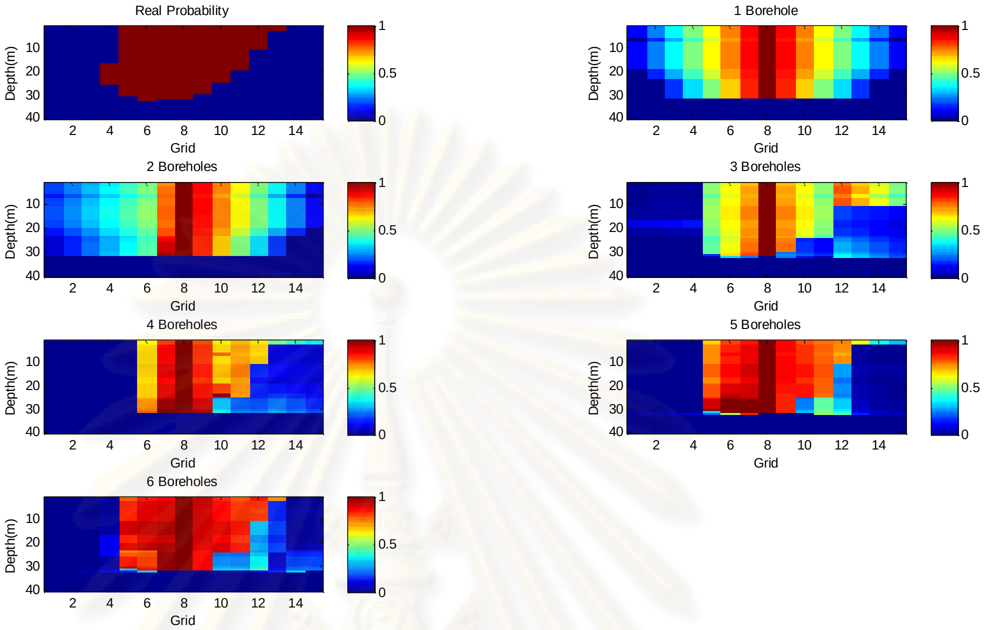


รูปที่ ค-3 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 8

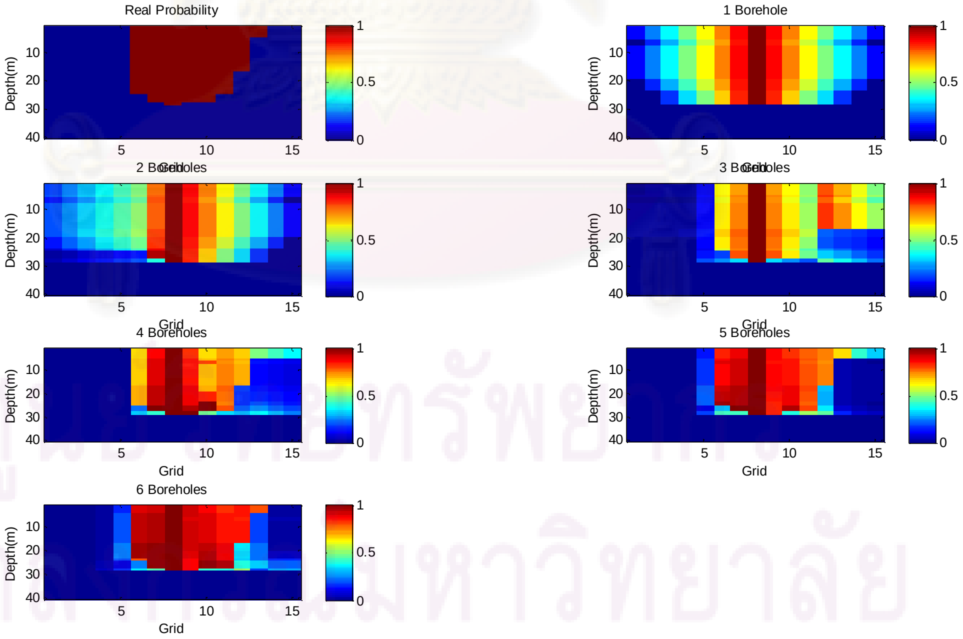


รูปที่ ค-4 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

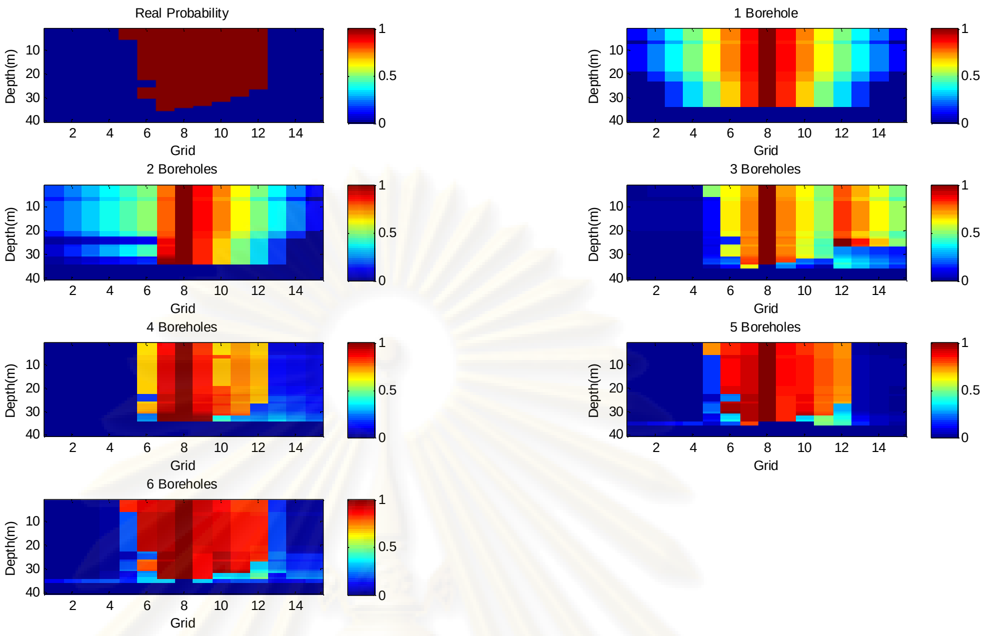


รูปที่ ค-5 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 31

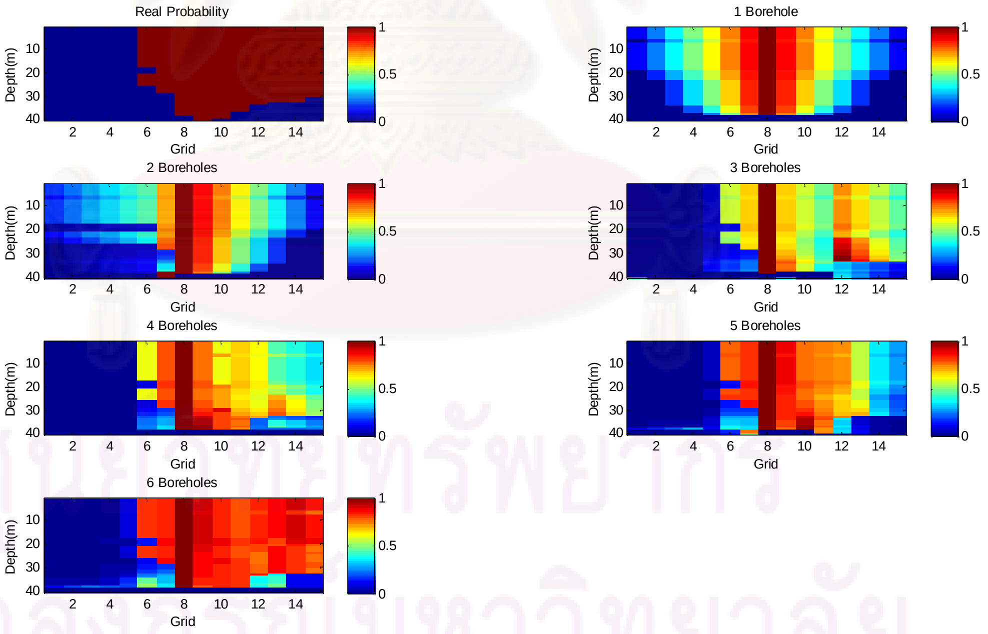


รูปที่ ค-6 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

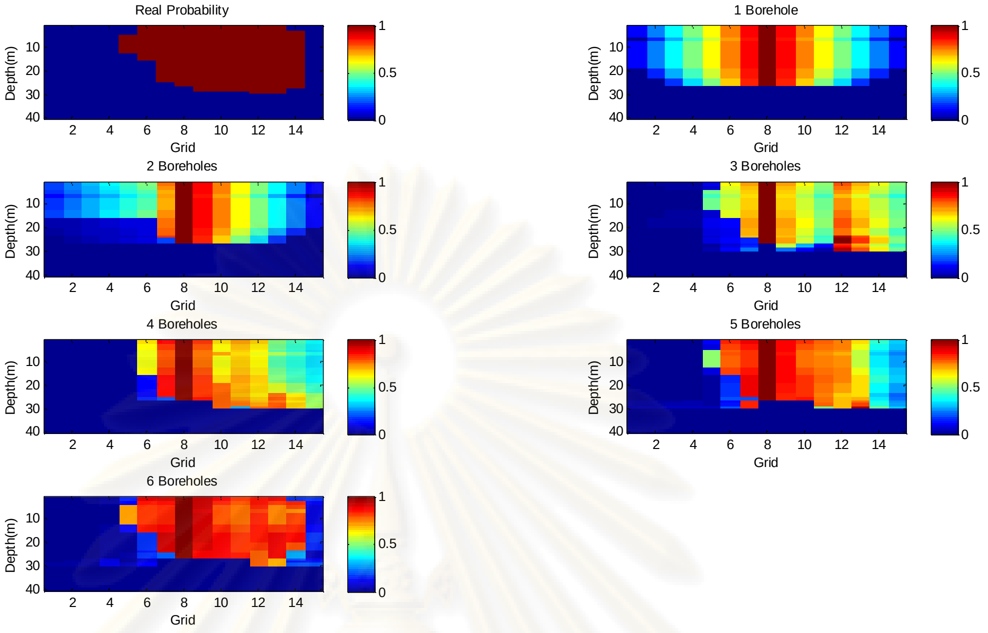


รูปที่ ค-7 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Reference Set รูปแบบที่ 50

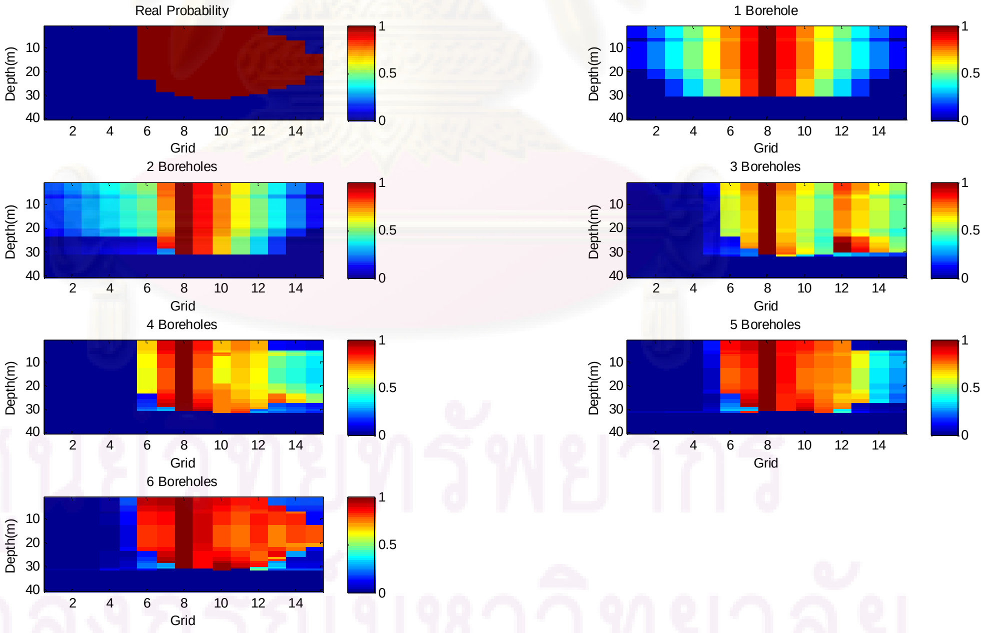


รูปที่ ค-8 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

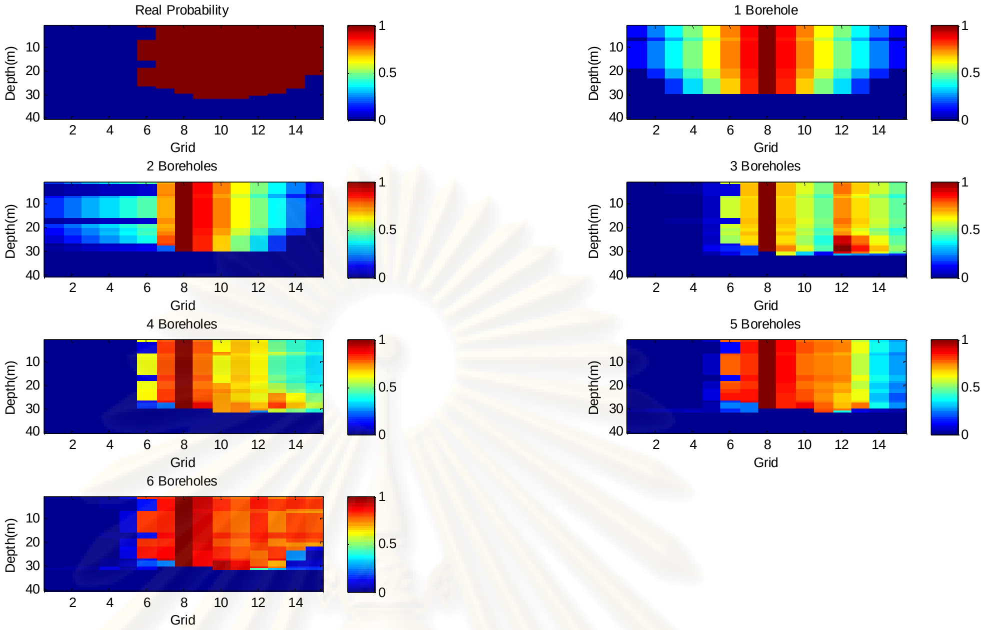


รูปที่ ค-9 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 3

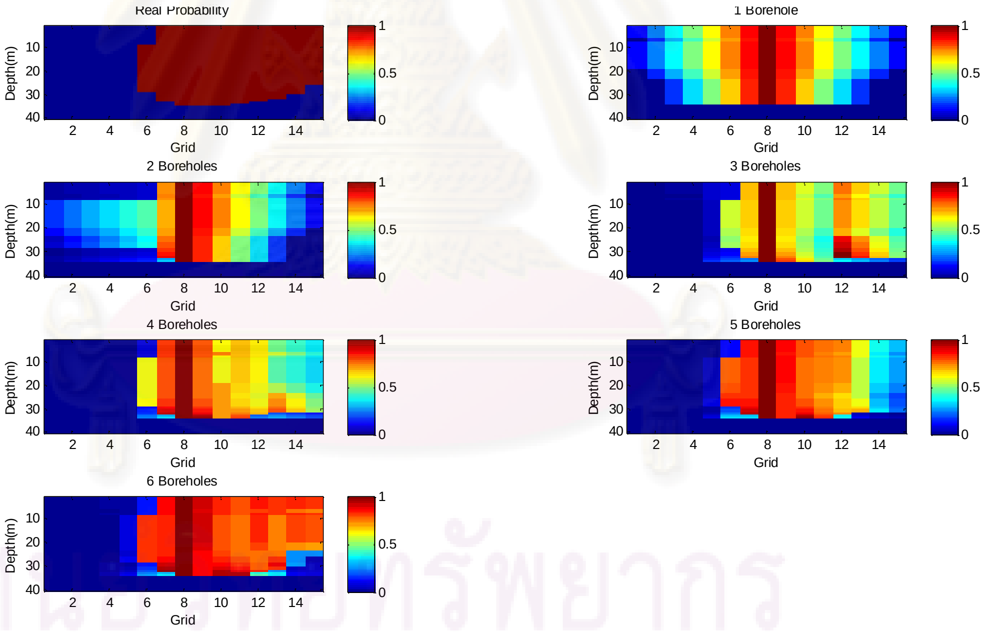


รูปที่ ค-10 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

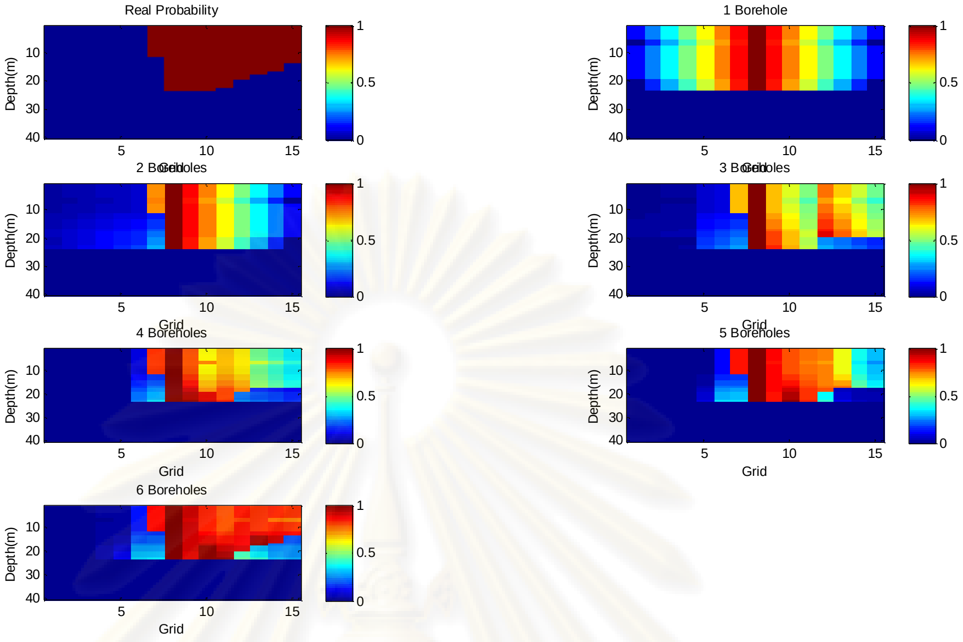


รูปที่ ค-11 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 21

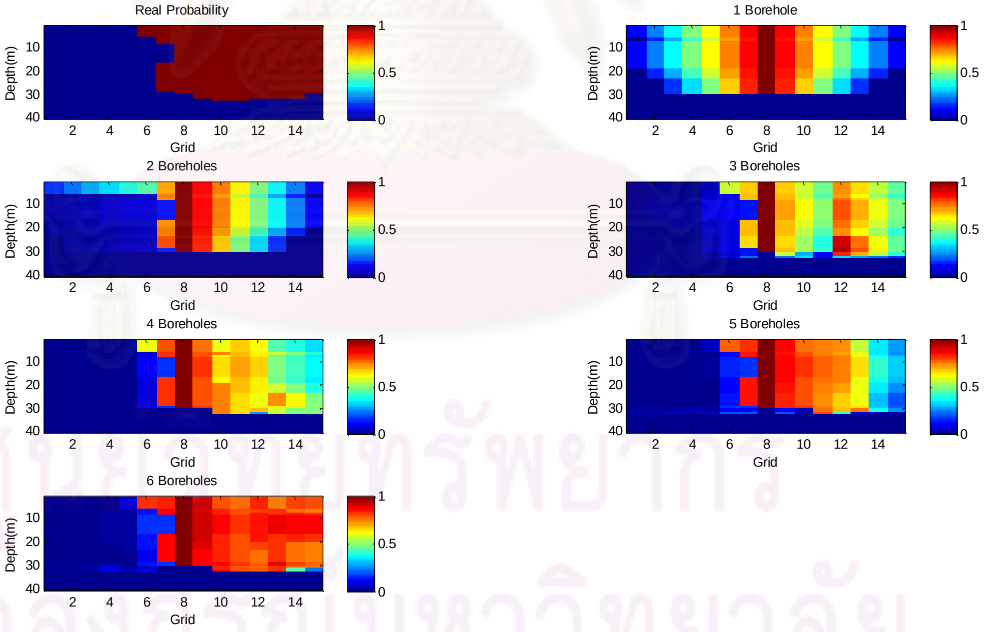


รูปที่ ค-12 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

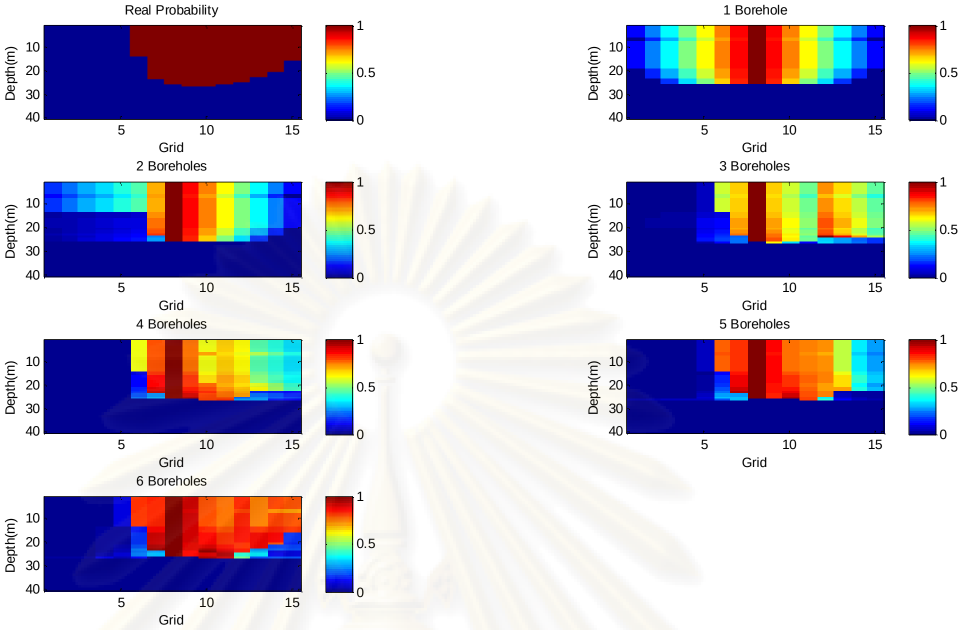


รูปที่ ค-13 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 28

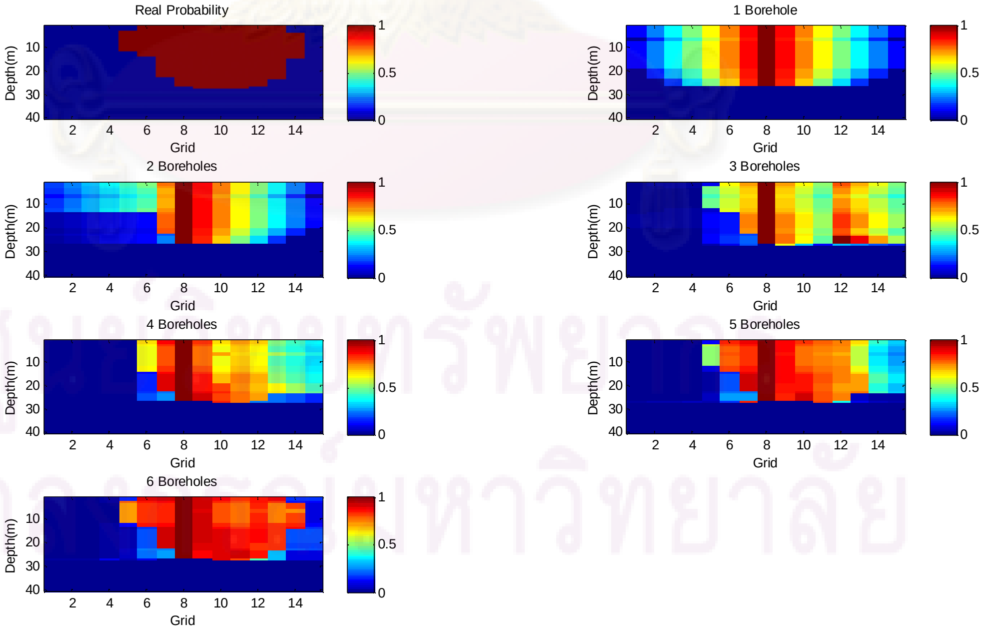


รูปที่ ค-14 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

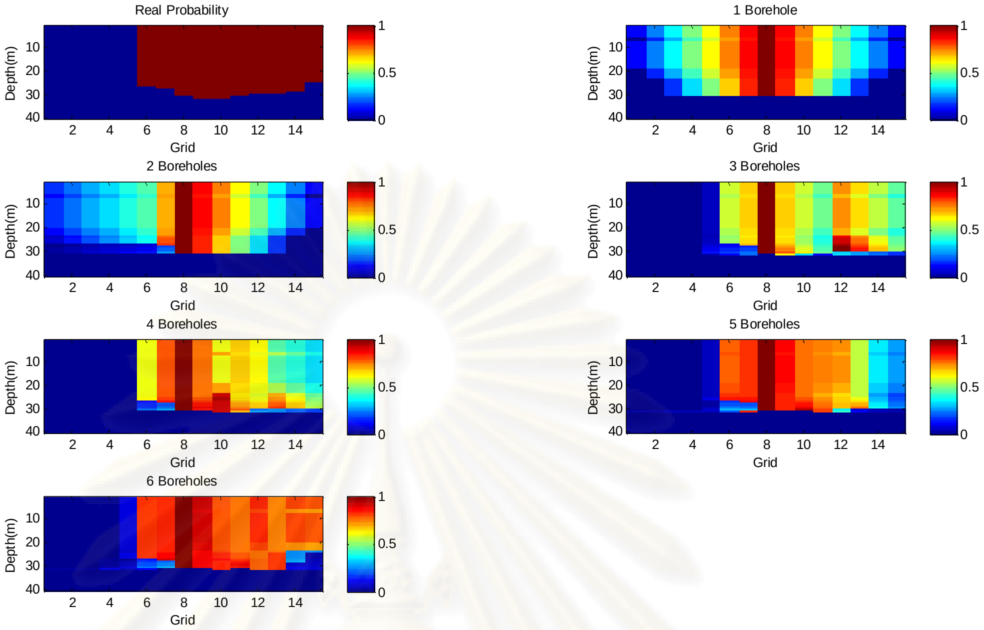


รูปที่ ค-15 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 1 รูปแบบที่ 35

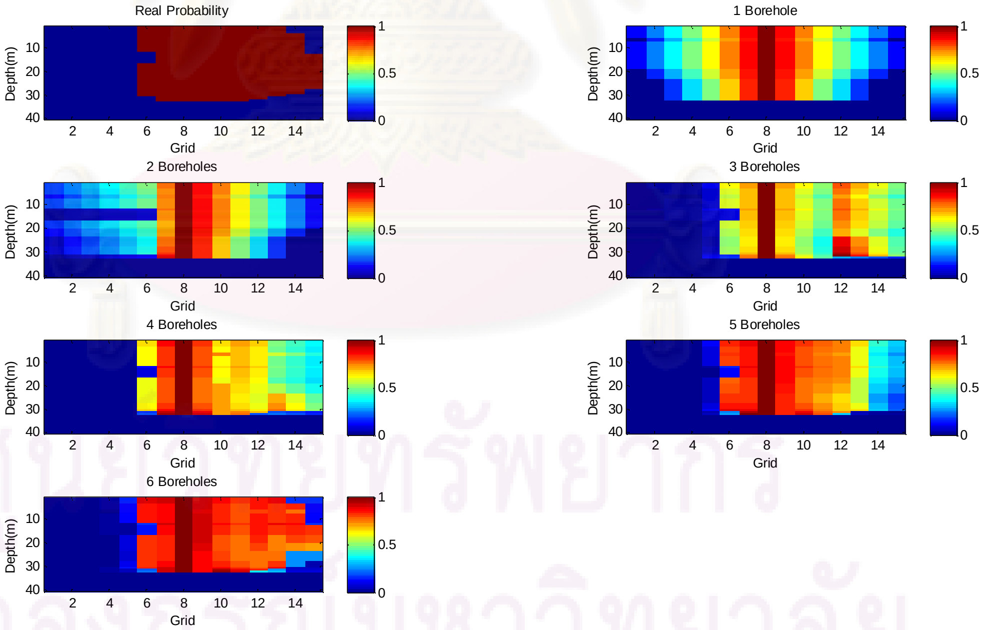


รูปที่ ค-16 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

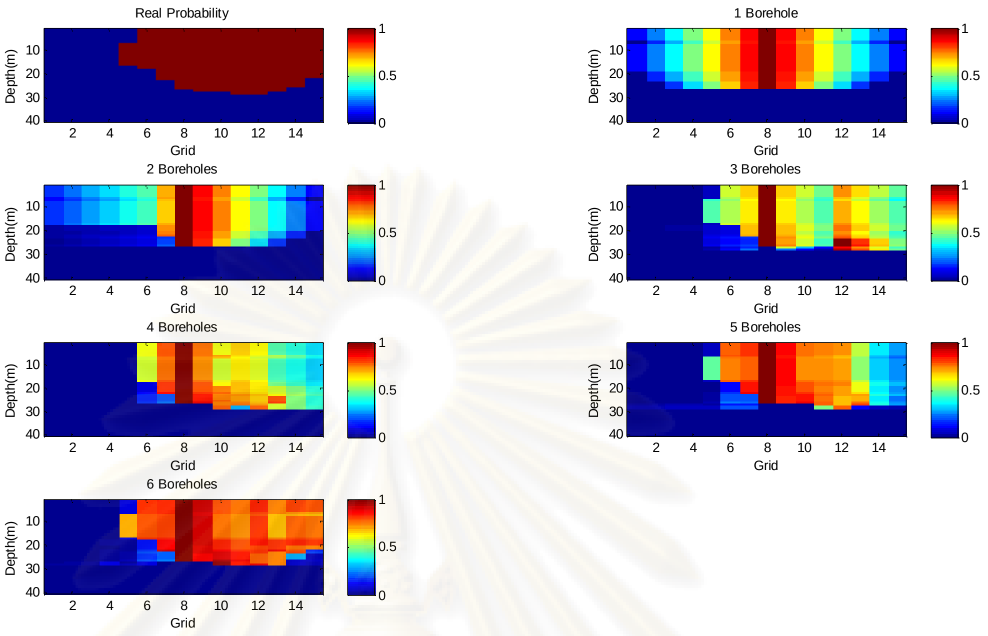


รูปที่ ค-17 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 6

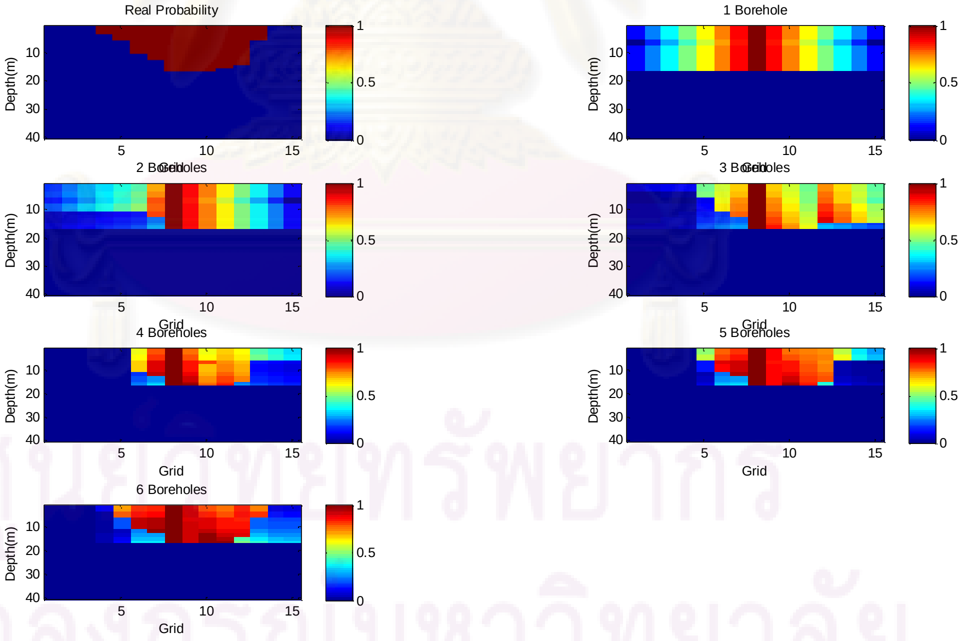


รูปที่ ค-18 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

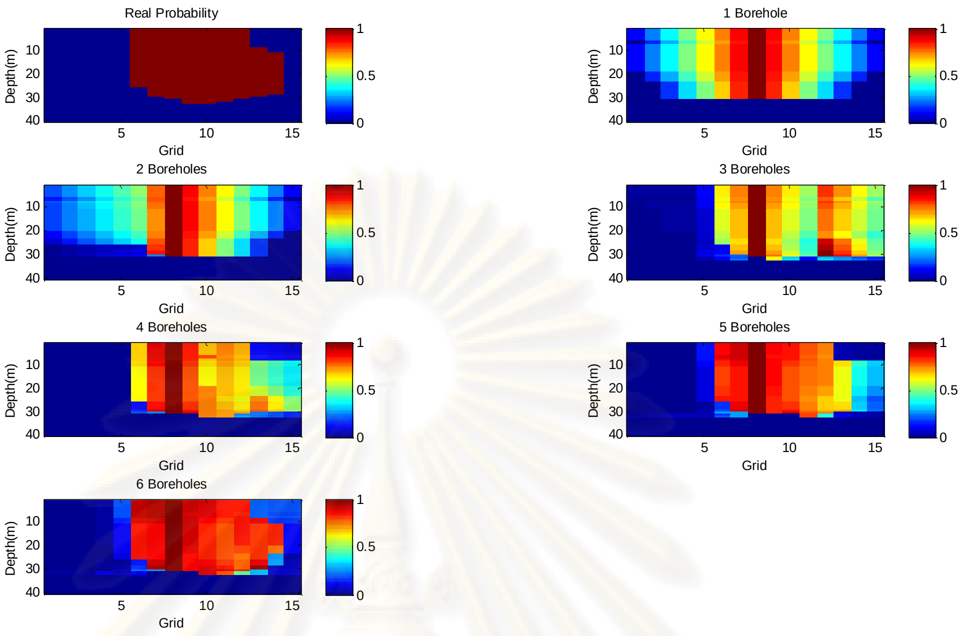


รูปที่ ค-19 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 14

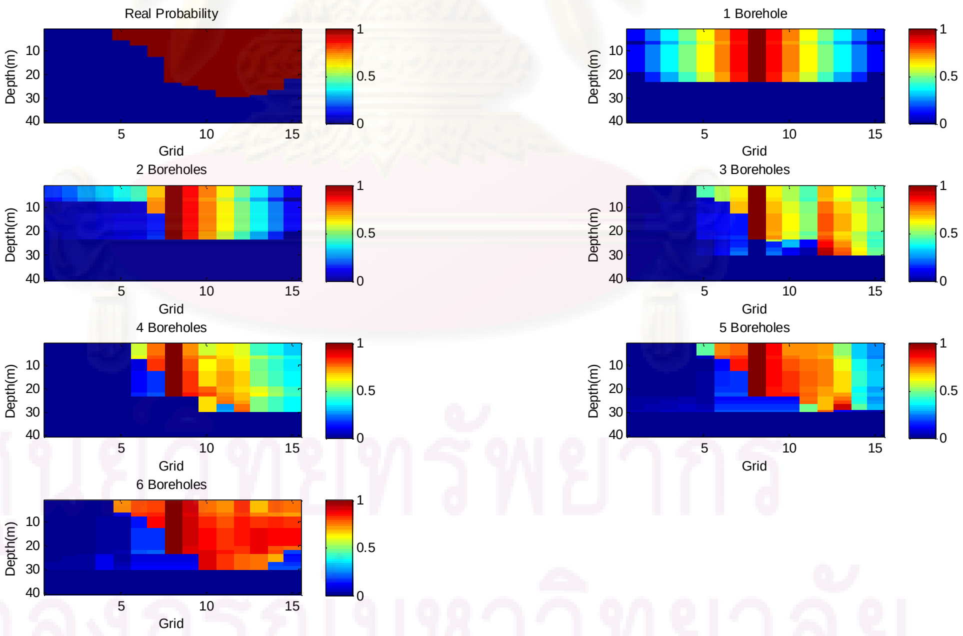


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค-20 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 18

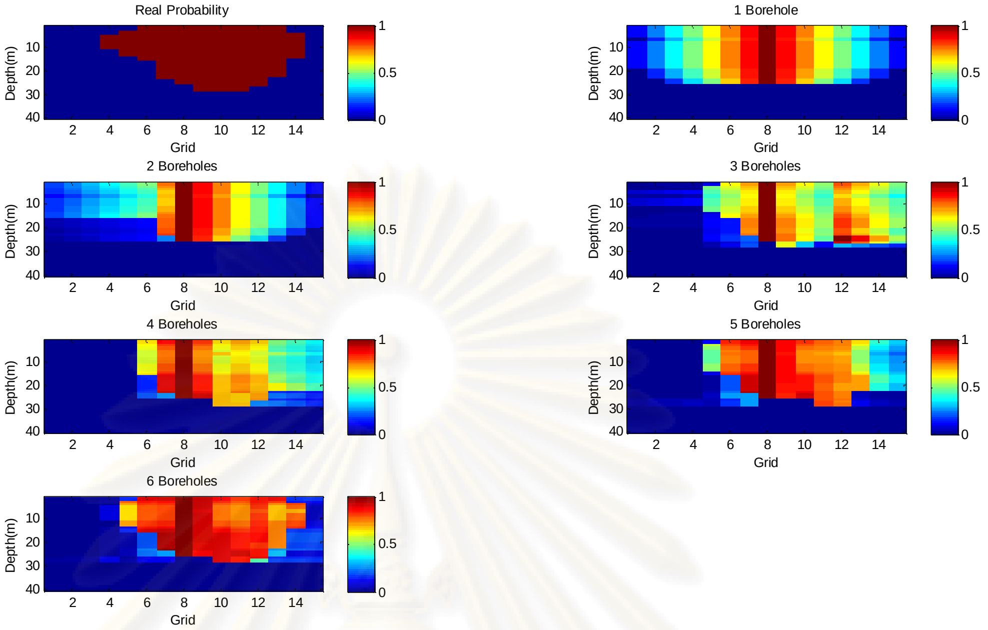


รูปที่ ค-21 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 27

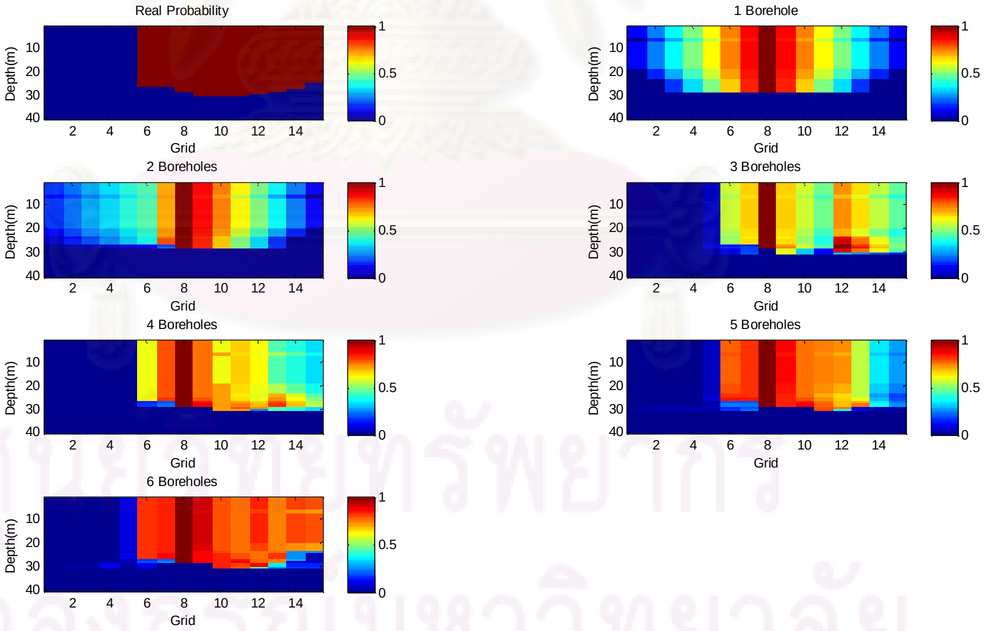


รูปที่ ค-22 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 2 รูปแบบที่ 40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

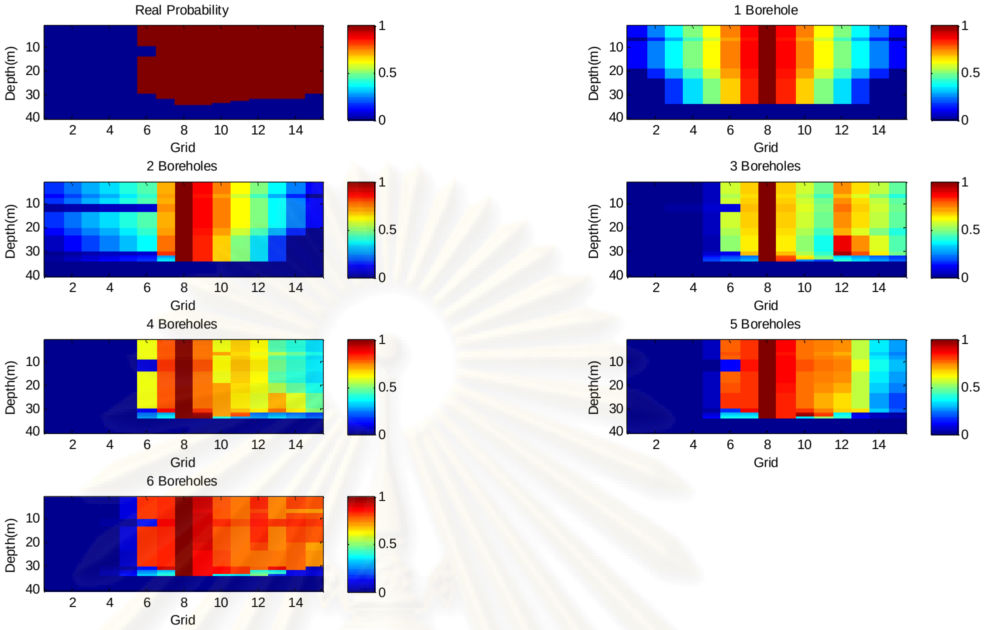


รูปที่ ค-23 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 3

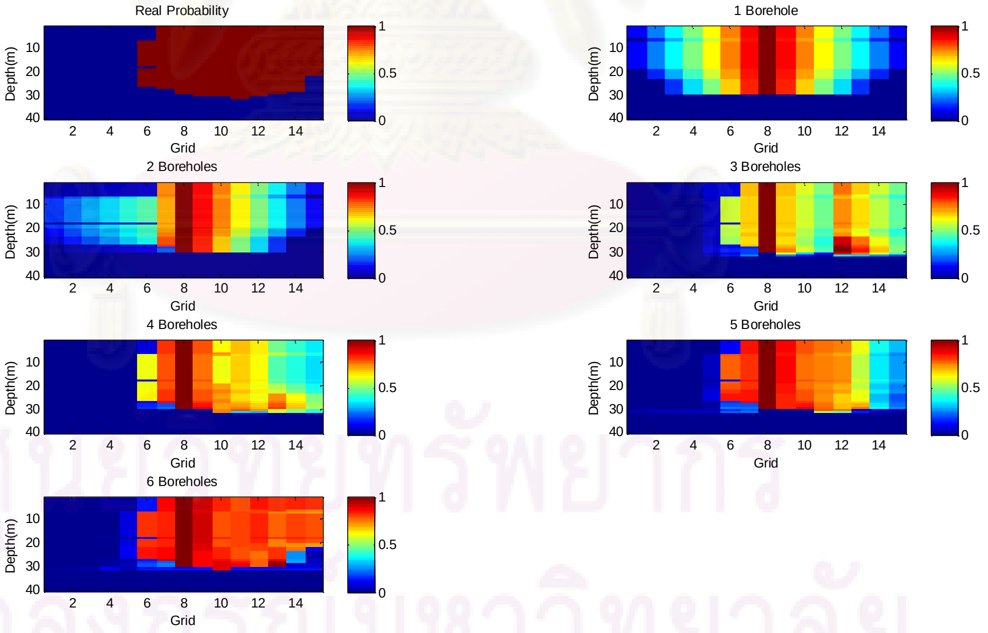


รูปที่ ค-24 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

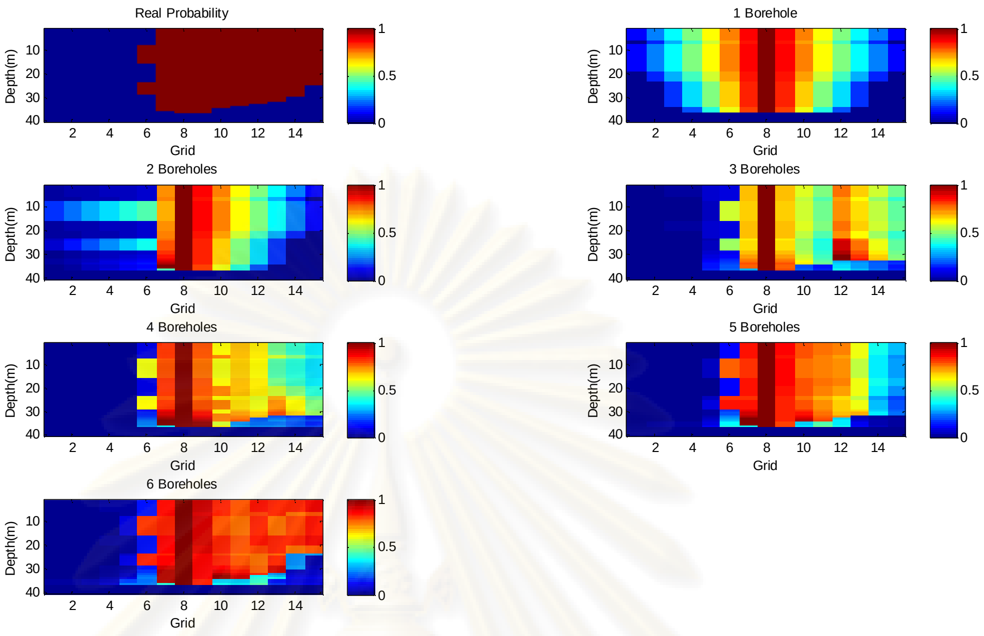


รูปที่ ค-25 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 16

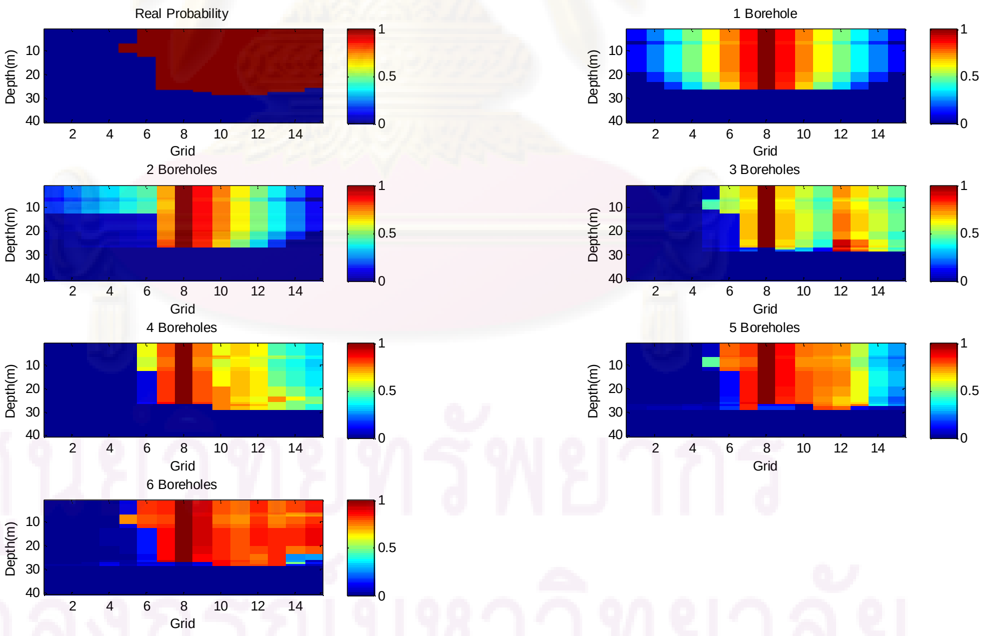


รูปที่ ค-26 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

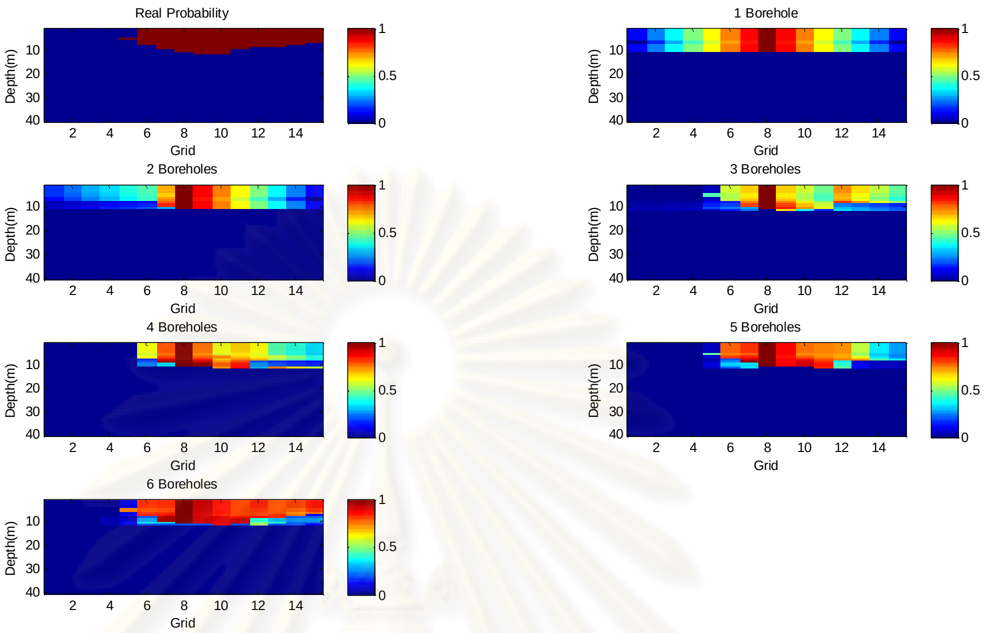


รูปที่ ค-27 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 22

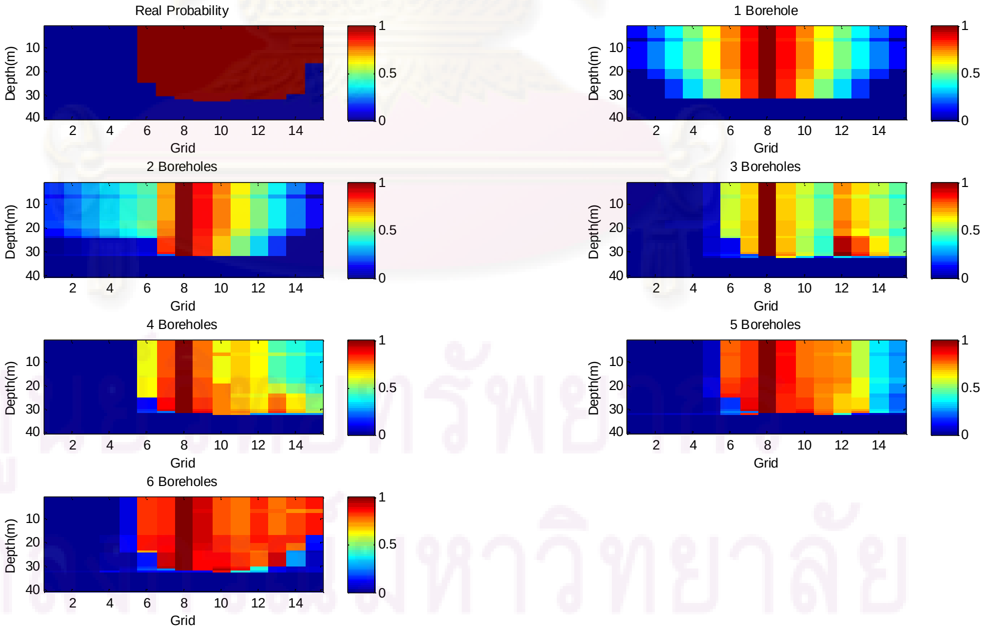


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค-28 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 26



รูปที่ ค-29 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 29



รูปที่ ค-30 ผลของการปรับปรุงความน่าจะเป็นของ Set 3 รูปแบบที่ 45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายสุวิชช์ รอดภัย

เกิด 6 ตุลาคม พ.ศ.2526

สถานที่เกิด จ.ปราจีนบุรี

การศึกษา

พ.ศ.2549 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2552 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)
สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ

ชื่อบทความ Use of Geostatistical Models in DNAPL Source Zone Architecture and Dissolution Profiles Assessment in Spatially Variable Aquifer……………………………...
ชื่อวารสาร…International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management.
ฉบับที่ …-…… ปีที่ตีพิมพ์ …2552……. หน้า …50…ประเทศ …ไทย………………

ชื่อบทความ Geostatistical Analysis For Optimal Design of A Rain Gauge Network and Spatial Interpolation of Precipitation Mapping from Collocated Elevation and Humidity data……………………………………………………………………………………..
ชื่อวารสาร………… Asians Civil Engineering Conference…………………………………..
ฉบับที่ ……-…… ปีที่ตีพิมพ์ …2551……. หน้า ……54……….. ประเทศ …ไทย……………

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย