



การประเมินในระดับห้องปฏิบัติการของการปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโรเอทิลีน

โดยใช้จีโอพอลิเมอร์



ทศพล กล้านาค

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

การประเมินในระดับห้องปฏิบัติการของการปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโรเอทีลิน
โดยใช้จีโอพอลิเมอร์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การประเมินในระดับห้องปฏิบัติการของการปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโร
เอทิลีนโดยใช้จีโอพอลิเมอร์"

ของ ทศพล กล้านาค

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจรีย์ ทองสนิท)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ดร.สุภาวรรณ ศรีรัตนา)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประเมินในระดับห้องปฏิบัติการของการปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโรเอทิลีนโดยใช้จีโอพอลิเมอร์
ผู้วิจัย	ทศพล กล้านาค
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
คำสำคัญ	จีโอพอลิเมอร์, ผงอลูมิเนียมออกไซด์และซิลิคอลออกไซด์, การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง(แบบในที่), การให้ความร้อน(แบบในที่)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้จีโอพอลิเมอร์ ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) เพื่อปรับเสถียรน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนตัวทำละลายอุตสาหกรรม โดยสังเคราะห์ผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็งแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาสารละลาย $NaOH$ และ Na_2SiO_3 ในอัตราส่วน 1:2 เพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่พร้อมใช้งานกับแบบจำลองน้ำใต้ดิน โดยแบบจำลองน้ำใต้ดินจะมีการใช้ทราย 3 ชนิด คือ ทรายหยาบ (1.0-2.0 mm), ทรายปานกลาง (1.19-0.59 mm) และทรายละเอียด (0.3-0.6 mm) โดยมีอัตราการไหลของน้ำในแบบจำลองเท่ากับ 0.19 เซนติเมตรต่ออนาทีซึ่งทดลองการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองในบริเวณที่ต้องการและทำให้แข็งตัวโดยใช้ความร้อนจากท่อน้ำภายในแบบจำลอง โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมงซึ่งความร้อนภายในถูกตรวจสอบด้วยกล้องอินฟราเรด เมื่อจีโอพอลิเมอร์แข็งตัว สังเกตทิศทางการไหลในแบบจำลอง ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นในบริเวณที่ฉีดจีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกักเก็บสารพิษที่มีการปนเปื้อนในชั้นดิน จีโอพอลิเมอร์ที่ถูกฉีดเข้าไปภายในแบบจำลองสามารถเพิ่มความหนาแน่นในบริเวณพื้นที่ที่มีการซึมผ่านได้ง่ายของน้ำ เช่นเพิ่มความหนาแน่นในชั้นทรายหยาบ ทำให้น้ำที่ไหลผ่านในบริเวณที่มีการปนเปื้อนน้ำเปลี่ยนทิศทางการไหลไปในทิศที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าและไม่ผ่านบริเวณที่มีการปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) จากการเก็บตัวอย่างเพื่อหาประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของจีโอพอลิเมอร์ด้วยการเก็บตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) พบว่าประสิทธิภาพของการฉีดจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกปรับเสถียรและทำก้อนแข็งช่วยลดการปนเปื้อนที่ออกมาจากแบบจำลองจากค่าสูงสุด คือ 5.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 71 เปอร์เซ็นต์ของค่าการปนเปื้อน

Title	LABORATORY ASSESSMENT OF IN SITU STABILIZATION OF TETRACHLOROETHENE (PCE) SOURCE ZONE USING GEOPOLYMER
Author	Thotsaphon Klamnak
Advisor	Assistant Professor Tanapon Phenrat, Ph.D.
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Environmental Engineering, Naresuan University, 2022
Keywords	Geopolymer, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ crystalline powder, In Situ Stabilization, In Situ Heat-Solidification

ABSTRACT

Source zone of chlorinated organic solvents, especially as dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) is a long-term source of groundwater contamination. Source zone isolation is an alternative to rapidly decrease the toxic flux. This research proposes an innovative in situ source zone isolation by using geopolymer solidified in situ. Conceptually, geopolymer slurry is injected to encapsulate DNAPL source zone. Then, hot water circulation is performed to solidify the encapsulated geopolymer slurry, decreasing the permeability of porous media surrounding the DNAPL source zone. This will decrease the groundwater flux into and out of the DNAPL source zone, which immediately stops the release of toxic contaminants from the source zone. To obtain geopolymer, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ crystalline powder was synthesized by calcine solid-state reaction at 700°C for 2 hours. $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ crystalline powder was mixed with NaOH and Na_2SiO_3 solution catalysts at 1:2 ratio to obtain ready-to-use geopolymers for groundwater models. A 2-dimensional flow cell was used as a model for subsurface contaminated with tetrachloroethene (PCE) source zone. Three types of sand: coarse sand (1.0-2.0 mm), medium sand (1.19-0.59 mm) and fine sand (0.3-0.6 mm) were packed in the 2-D flow cell with the PCE source zone in the course lense. The water flow rate in the model is 0.19 centimeters per minute. The geopolymer slurry was injected into the model at the DNAPL source location and solidified by using heat from the water pipes inside the

model (heated at 70°C for 8 hours, where the internal heat was examined with an infrared camera). When the geopolymer was hardened, we observed the flow diversion from the DNAPL source due to the increased density and decreased permeability of geopolymer-modified sand in the flow cell. PCE flux was substantially declined. Injection geopolymer-modified into source zone increased density of coarse sand and changed the flow diversion. PCE flux decreased from the direction of water flow. The result found PCE flux reduce form 5.92 mg/l to 1.72 mg/l. The performance of the geopolymer reduced PCE for 71% of concentration.



ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รศ.ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นทีปรึกษา รวมถึงโอกาสและประสบการณ์ต่างๆ พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วยประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิรพงษ์ จิตเสงี่ยม รวมถึงกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาจารย์ ทองสนิท และ ดร.สุภาวรรณ ศรีรัตน ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ อีกทั้ง ศาสตราจารย์ ธีระชัย บงการณ ผู้ช่วยให้คำแนะนำเพิ่มเติม จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า อีกทั้งอาจารย์ทุกท่าน รวมถึงพี่ น้องและเพื่อนๆ ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนจนการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน สำหรับทุกท่านที่มีส่วนในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งที่กล่าวมาแล้ว และยังไม่ได้กล่าวนามมาข้างต้น คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย ถ้ามีสิ่งที่ขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใดก็ขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ทศพล กล้านาค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
ประกาศคุุณูปการ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย.....	9
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds: VOCs) (3).....	10
2.2 สมบัติของสารไตรคลอโรเอทีลีน (TCE) และการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม (7).....	19
2.3 เทคโนโลยีควบคุมและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	24
2.4 จีโอพอลิเมอร์.....	34
2.5 กระบวนการเตรียมแบบปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction).....	44
2.6 กระบวนการบดย่อย ผสมด้วยลูกบอล (Ball-milling).....	45
2.7 การแคลไซน์ (calcination).....	46

2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)	47
2.9 ทบทวนวรรณกรรม.....	50
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	62
3.1 ปฏิบัติการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์.....	62
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร.....	62
3.3 วิธีการเตรียมสาร.....	63
3.4 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)	65
3.5 การออกแบบและสร้างแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	66
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	69
4.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์.....	70
4.2 การให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลอง.....	75
4.3 การศึกษารูปแบบการไหลของน้ำในแบบจำลอง.....	87
4.4 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	96
4.5 การฉีดสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกข้อมลเข้าสู่แบบจำลอง.....	109
4.6 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองเพื่อลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย.....	118
4.7 ลักษณะจีโอพอลิเมอร์หลังจากให้ความร้อนภายในแบบจำลอง.....	155
บทที่ 5 บทสรุป.....	161
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	161
5.2 อภิปรายผล.....	162
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	163
บรรณานุกรม.....	164

อภิธานศัพท์..... 168

ภาคผนวก..... 170

ประวัติผู้วิจัย 177



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 คุณสมบัติของสารเตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene, PCE).....	2
ตาราง 2 คุณสมบัติของเบนซีน (2).....	3
ตาราง 3 คุณสมบัติดีเซล (2).....	5
ตาราง 4 ตัวอย่างของ halogenated hydrocarbons ที่พบได้ในสิ่งแวดล้อม (3).....	12
ตาราง 5 สมบัติของสาร TCE (7).....	19
ตาราง 6 ตัวแปรที่มีผลต่อการแบ่งวัฏภาคและการเคลื่อนที่ของ DNAPL (8).....	21
ตาราง 7 รายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (5).....	30
ตาราง 8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (6).....	31
ตาราง 9 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว.....	42
ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบโดย XRF (19).....	55
ตาราง 11 ค่าความเป็นผลึกของผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	73
ตาราง 12 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	74
ตาราง 13 ทดลองการให้ความร้อนตู้กระจกเปล่า.....	75
ตาราง 14 ทดลองการให้ความแบบจำลองชั้นดินและน้ำใต้ดินโดยใช้น้ำร้อน 80 °C น้ำร้อนไหลผ่าน 70 มิลลิลิตรต่อนาที.....	79
ตาราง 15 การทดลองการเดินน้ำสีเพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงในแบบจำลอง.....	87
ตาราง 16 การทดลองการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	96
ตาราง 17 การทดลองการฉีดสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) และเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง.....	109

ตาราง 18 การฉีดจีโอพอลิเมอร์แล้วให้ความร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	118
ตาราง 19 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำภายในแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งตัว ในพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยครั้งที่ 1	123
ตาราง 20 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำภายในแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งตัว ในพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยครั้งที่ 2	136
ตาราง 21 เก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวล้อมรอบ พื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย.....	144
ตาราง 22 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง.....	155
ตาราง 23 การวัดค่าการดูดกลืนแสงครั้งที่ 1	171
ตาราง 24 การวัดค่าการดูดกลืนแสงครั้งที่ 2	172
ตาราง 25 การวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยมีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองครั้งที่ 1	173
ตาราง 26 การวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองครั้งที่ 2	174
ตาราง 27 การเก็บค่าการไหลของน้ำที่ผ่านการปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE)	175

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 กระบวนการเกิด Photochemical Oxidants (3)	16
ภาพ 2 การปนเปื้อนของสาร TCE ใน 4 ภูมิภาคในชั้นดิน คือ สารที่ไม่รวมกับน้ำ (NAPL) 20	
ภาพ 3 การรั่วไหลของ DNAPL จากผิวดินและไหลลงสู่สะสมในท้องน้ำใต้ดิน (8).....	21
ภาพ 4 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate (11).....	36
ภาพ 5 การเกิดปฏิกิริยาของ Aluminate (11).....	36
ภาพ 6 โครงสร้างของสารจีโอพอลิเมอร์หรือพอลิเอทิลีน.....	37
ภาพ 7 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเอทิลีน (11)	38
ภาพ 8 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซี (11).....	38
ภาพ 9 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซี.....	39
ภาพ 10 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง	40
ภาพ 11 แผนภูมิการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (13).....	42
ภาพ 12 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้งาน (ก) เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นสนามบิน (ข) จีโอพอลิ เมอร์พูน และ (ค) ผนังจีโอพอลิเมอร์ (14).....	43
ภาพ 13 ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ระหว่าง (ก) ผลึกเดี่ยว และ (ข) อนุภาคผงที่ผสมกันอยู่ (15).....	45
ภาพ 14 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling) 46	
ภาพ 15 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ (16).....	49
ภาพ 16 ค่ายุบตัวสัมพัทธ์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ (17).....	51
ภาพ 17 ค่ายุบตัวสัมพัทธ์ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและเถ้ากลายเป็น 0.5 (17).....	51

ภาพ 18 ความแข็งแรงทางแรงกดที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ (17).....	52
ภาพ 19 ความแข็งแรงทางแรงกดที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและแก้วกลบเป็น 0.5 (17).....	52
ภาพ 20 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ (a) ไม่แคลไซน์ และ (b) แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C (18).....	53
ภาพ 21 โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ที่กักร้อนด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (a) ดินขาวธรรมชาติ และ (b) ผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C (18).....	54
ภาพ 22 สเปกตรัม FT-IR (a) ดินขาว เปรียบเทียบกับสเปกตรัม FT-IR ของผงผลึกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 °C: (b) S9-65°; (c) S13-65°; (d) S13-T _a ; (e) S18-65° และ (f) S27-65°.....	56
ภาพ 23 สเปกตรัม ^{29}Si MAS NMR ของ (a) ดินขาว และตัวอย่างที่เตรียมจากวิธีโซลเจล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 °C : (b) S9-65°; (c) S13-65°; (d) S13-T _a ; (e) S18-65° และ (f) S27-65° (19).....	56
ภาพ 24 สเปกตรัม ^{29}Si MAS NMR ของ (a) ดินขาว และตัวอย่างที่เตรียมจากวิธีโซลเจล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C: (b) S9-65°; (c) S13-65°; (d) S13-T _a ; (e) S18-65° และ (f) S27-65° (19).....	57
ภาพ 25 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ และผงผลึกแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ (20).....	58
ภาพ 26 (a) แบบจำลอง 2 มิติ ขนาด 18 cm x 30 cm 2.5 cm กับชั้นทรายแต่ละขนาด (b) ทิศทางการไหลของ NZVI ซึ่งกำหนดโดยแบบจำลอง COMSOL particle tracking (21).....	59
ภาพ 27 แสดงการเคลื่อนที่ของสารติดตาม fresh MRNIP3 ที่ 3 g/L และ 6 g/L, washed MRNIP2 ที่ 6 g/L, oxidized MRNIP2 ที่ 6 g/L, washed PSS-RNIP ที่ 6 g/L และสารติดตามหลังจากการสะสมของ washed PSS-RNIP (21).....	60
ภาพ 28 แบบจำลองการไหลต่อเนื่องแบบ 2 มิติ (22).....	61

ภาพ 29 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	64
ภาพ 30 แผนผังขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	65
ภาพ 31 แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์.....	65
ภาพ 32 ภาพแบบจำลอง 3 มิติ ของแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	66
ภาพ 33 ภาพแบบจำลอง 2 มิติ ของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ขณะสร้างชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	67
ภาพ 34 ภาพแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	68
ภาพ 35 ภาพแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ขณะสร้างชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน.....	68
ภาพ 36 จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ถูกแคลไซน์.....	70
ภาพ 37 จีโอพอลิเมอร์ที่ถูกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C.....	70
ภาพ 38 จีโอพอลิเมอร์ที่ผสมในตัวเร่งปฏิกิริยา.....	71
ภาพ 39 จีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการทำก้อนแข็ง.....	71
ภาพ 40 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600-1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	72
ภาพ 41 การไหลของน้ำผ่านแบบจำลอง.....	95
ภาพ 42 การไหลของน้ำเมื่อฉีดจีโอพอลิเมอร์.....	107
ภาพ 43 เปรียบเทียบการไหลของน้ำในแบบจำลอง ระหว่างฉีดจีโอพอลิเมอร์และไม่ฉีดจีโอพอลิเมอร์.....	108
ภาพ 44 การเปรียบเทียบการเก็บค่าการไหลของน้ำผ่านจีโอพอลิเมอร์ในพื้นที่ปนเปื้อน.....	154

อักษรย่อ

°C	=	Degree Celsius
g	=	Gram
mg	=	Milligrams
ml	=	Milliliters
l	=	liters
min	=	minutes
T	=	Temperature
t	=	Time
M	=	Molar
s	=	Second
hr.	=	Hour
ppm	=	Parts Per Million
cm ²	=	Cubic centimeter
m ²	=	Cubic meter
mol	=	Mole



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมถือเป็นปัญหาที่สำคัญระดับโลกในปัจจุบัน ซึ่งต้นกำเนิดของปัญหาเกิดจากสาเหตุหลายประการ โดยส่วนใหญ่เกิดจากฝีมือมนุษย์อันเนื่องมาจากจำนวนประชากรที่มากขึ้น ความต้องการพื้นฐาน และความต้องการความสะดวกสบายในด้านต่างๆ เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม ทั้งมลพิษอากาศ และทางน้ำ จึงทำให้ทั่วโลกต่างตระหนัก และให้ความสำคัญถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

ปัญหาสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่กำลังเป็นปัญหาอยู่ขณะนี้ คือ ปัญหามลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มนุษย์กลับมาให้ความสนใจกับปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกครั้ง แต่ยังมีอีกหนึ่งปัญหาที่ถูกละเลยและมองข้าม นั่นคือปัญหามลพิษของดินและน้ำใต้ดิน อันเนื่องมาจากการพัฒนากระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม การลักลอบปล่อยน้ำเสียหรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การรั่วไหลของสารเคมีหรือสารพิษลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินจากสารเคมีรูปแบบต่างๆ โดยปัญหานี้เป็นปัญหาที่เรามองไม่เห็นด้วยตาเปล่าและไม่รู้ว่ามีสารรั่วไหลหรือปนเปื้อนไปตามพื้นที่ใดบ้าง จนกว่าการปนเปื้อนนั้นจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพคนในสังคม จากสาเหตุดังกล่าวทางภาครัฐจึงได้ออกกฎหมายเพื่อควบคุมการปล่อยสารเคมีหรือสารพิษปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินภาคอุตสาหกรรม ออกกฎโดยกระทรวงอุตสาหกรรมควบคุมการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินภายในบริเวณโรงงาน พ.ศ. 2559 ว่าด้วยเรื่อง การกำหนดเกณฑ์ การปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน การตรวจสอบคุณภาพดินและน้ำใต้ดิน แจกข้อมูล และรายงาน เสนอมาตรการใน การควบคุม และการลดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน เพื่อทำการเฝ้าระวังคุณภาพของดินและน้ำใต้ดิน

ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกทำการทดสอบสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนอยู่ในดินและน้ำใต้ดินโดยยกตัวอย่างสารขึ้นมาดังนี้




ตาราง 1 คุณสมบัติของสารเตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene, PCE)

ชื่อเรียกอื่น ๆ (Synonyms)	- เปอร์คลอโรอีทีน (Perchloroethene) - เปอร์คลอโรเอทิลีน (perchloroethylene) - เพอร์ (perc) - พีซีอี (PCE) - คาร์บอนไดคลอไรด์ (carbon dichloride) - คาร์โบเนียมไดคลอราทัม (carboneum dichloratum)
สูตรเคมี	C_2Cl_4
มวลโมลาร์	165.82 g/mol
จุดหลอมเหลว	-19 °C (-2 °F; 254 K)
รูปร่าง	ของเหลวใสไม่มีสี
กลิ่น	เข้มข้นและหวานคล้ายคลอโรฟอร์ม
จุดเดือด	121.1 °C (250.0 °F; 394.2 K)
จุดวาบไฟ	ไม่ติดไฟ
ความหนาแน่น	1.622 g/cm ³
ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ 25 °C	0.15 g/L
ความดันไอ ที่ 20 °	14 mmHg
ความหนืด ที่ 25 °C	0.89 cP
ความไวต่อแม่เหล็ก	-81.6·10 ⁻⁶ cm ³ /mol
รูปสัญลักษณ์	

ที่มา : <https://en.wikipedia.org/wiki/Tetrachloroethylene>

ตาราง 2 คุณสมบัติของเบนซีน (2)

ชื่อเรียกอื่น (Synonyms)	การจำแนกประเภทสารเคมี (Chemical Classification)
<ul style="list-style-type: none"> - ฟีนิลไฮไดรด์ (Phenyl hydride) - โคลแนฟทา (Coal naphtha) - เบนโซล (Benzol) - เบนโซลีน (Benzolene) - ไบคาร์บูเรตของไฮโดรเจน (Bicarburet of hydrogen) - น้ำมันของคาร์บอน (Carbon oil) - แร่แนฟทา (Mineral naphtha) - มอเตอร์เบนโซล (Motor benzal) - ไนเตรชันเบนซีน (Nitration benzene) - ไพโรเบนโซล (Pyrobenzol) - ไฮโคลเฮกซะไตรอิน (Cyclohexatriene) <p>CAS Number: 71-43-2 EC Number (EINECS): 200-753-7 พิกัดอัตราศุลกากร: 2707.100 004 2707.500 101 2902.200 006</p> <p>การบ่งบอกประเภทการขนส่ง UN Number: 114 UN Class: 3 RG Guide: 130</p>	<p>ตามข้อกำหนด EU</p> <p>ไวไฟสูง E: R11</p> <p>เป็นสารก่อมะเร็ง T: R45 (Carcinogenicity Category 1)</p> <p>เป็นสารก่อกลายพันธุ์ T, R46 (Mutagenicity Category 2)</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างรุนแรงเมื่อได้รับสัมผัสเป็นเวลานาน T: R48 / 23/24/25</p> <p>เป็นอันตราย Xn: R65</p> <p>ระคายเคือง XI: R38 / 38</p> <p>ข้อความบอกความเสี่ยง (R-phrases)</p> <p>R45 อาจเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็ง</p> <p>R46 อาจเป็นสาเหตุทำลายยีนที่ใช้ในการถ่ายทอดทางกรรมพันธุ์</p> <p>R11 ไวไฟสูง</p> <p>R36 / 38 ระคายเคืองต่อตามระคายเคืองต่อผิวหนัง</p> <p>R48 / 23/24/25 เป็นพิษเป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างรุนแรงเมื่อได้รับสัมผัสเป็นเวลานานทางการหายใจ เมื่อสัมผัสกับผิวหนังและกลืนกิน R65 อาจเป็นสาเหตุของการทำลายปอดถ้ากลืนกิน</p> <p>ข้อความบอกมาตรการความปลอดภัย (S-phrases)</p> <p>S53 หลีกเลี่ยงการได้รับสัมผัส</p> <p>S45 ในกรณีเกิดอุบัติเหตุหรือไม่สบายให้พบแพทย์ทันที (พร้อมแสดงฉลาก)</p>

ชื่อเรียกอื่น (Synonyms)	การจำแนกประเภทสารเคมี (Chemical Classification)
	สัญลักษณ์และการชี้บ่งความเป็นอันตราย  F ไวไฟสูง T เป็นพิษ
	ตามข้อกำหนด NFPA 
	ตามข้อกำหนด UNTDG 
	ตามข้อกำหนด GHS  อันตราย

ตาราง 3 คุณสมบัติดีเซล (2)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	บี 20			
๑	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ ๑๕.๖/ ๑๕.๖ (Specific gravity at 15.6/15.6)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	๐.๘๑ ๐.๘๗	๐.๘๑ ๐.๘๗	- ๐.๙๒๐	ASTM D ๑๒๙๘
๒	จำนวนซีเทน (Cetane number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculated cetane index)		ไม่ต่ำกว่า	๕๐	๕๐	๔๕	ASTM D ๖๑๓ ASTM D ๙๗๖ ASTM D ๔๔๕
๓	ความหนืด (Viscosity)	เซนติสโตกส์ cSt					
	๓.๑ ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส หรือ (at 40 °C)	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	๑.๘ ๔.๑	๑.๘ ๔.๑	- ๘.๐	
	๓.๒ ณ อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส (at 50 °C)	องศาเซลเซียส	ไม่สูงกว่า	-	-	๖.๐	
๔	จุดไหลเท (Pour point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่สูงกว่า	๑๐	๑๐	๑๖	ASTM D ๙๗
๕	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดย น้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๕	๐.๐๐๕	๑.๕	ASTM D ๒๖๒๒
๖	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	-	ASTM D ๒๒๗๔
๗	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน (Oxidation stability)	กรัม/ลูกบาศก์ เมตร g/m ³ ชั่วโมง Hours	ไม่สูงกว่า	๒๕	๒๕	-	EN ๑๕๗๕๑
			ไม่ต่ำกว่า	๓๕	๓๕	-	ASTM D ๔๕๓๐
๘	กากถ่าน จากร้อยละ ๑๐ ของส่วนที่เหลือ จากการกลั่น (Carbon residue on 10% Distillation residue)	ร้อยละโดย น้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า				
๙	น้ำและตะกอน (Water and sediment)	ร้อยละโดย ปริมาตร % vol.	ไม่สูงกว่า	-	-	๐.๓	ASTM D ๒๗๐๙
๑๐	น้ำ (Water)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๓๐๐	๓๐๐	-	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๑	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๔	๒๔	-	EN ๑๒๖๖๒

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	บี ๒๐			
๑๓	จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่า	๕๒	๕๒	๕๒	ASTM D ๙๓
๑๔	การกลั่น (Distillation)	องศาเซลเซียส °C					ASTM D ๘๖
	อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละเก้าสิบ (90% Recovered)	ไม่สูงกว่า	๓๕๗	๓๕๗	-		
๑๕	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon)	ร้อยละโดย น้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๑๑	๑๑	-	IP ๓๙๑
๑๖	สี (Color) ๑๖.๑ ชนิดของสี (Hue) ๑๖.๒ ความเข้มของสี (Intensity)		ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	เหลือง - ๔.๐	แดง เทียบเท่าสี มาตรฐาน	น้ำตาล ๔.๕ ๗.๕	(๑) น้ำมัน ดีเซล หมุนเร็ว ธรรมดา และน้ำมัน ดีเซลหมุน ช้าให้ เปรียบเทียบ ความ เข้มของสี ตาม มาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ (๒) น้ำมัน ดีเซล หมุนเร็ว บน ๒๐ ให้ เปรียบ เทียบความ เข้มของสี กับน้ำมัน มาตรฐาน ที่เตรียม ขึ้นใหม่ โดยใช้สี ละลายใน น้ำมันก่อน การย้อมสี ให้มี ปริมาณ เท่ากับที่ กำหนด

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ	
			หมุนเร็ว		หมุนช้า		
			ธรรมดา	ปี ๒๐			
๑๗	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ ของกรดไขมัน (Methyl ester of fatty acids)	ร้อยละโดย ปริมาตร % vol.	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๖.๖ ๗	๑๙ ๒๐	- -	แล้วนำมา บรรจุ แยกกันใน ภาชนะที่ ใช้ในการ วัดสีตาม วิธีทดสอบ ASTM D ๑๕๐๐ แล้วตรวจ พินิจด้วย สายตา หรือตาม มาตรฐาน ASTM D ๒๓๙๒ EN ๑๔๐๗๘
๑๘	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (Lubricity wear scar)	ไมโครเมตร µm	ไม่สูงกว่า	๔๖๐	๔๖๐	-	CEC F - ๐๖ - ๙๖
๑๙	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives, if any)				ให้เป็นไป ตามที่ ได้รับ ความ เห็นชอบ จากอธิบดี กรมธุรกิจ พลังงาน		

จากคุณสมบัติของสารดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสารทั้ง 3 ชนิดล้วนมีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ ถ้าหากสารเกิดการรั่วไหลลงดินจากถังเก็บคลังวัตถุดิบ หรือจากโรงกำจัดของเสียที่มีสารอินทรีย์ระเหยปนเปื้อน ส่วนหนึ่งจะระเหยออกไป อีกส่วนจะไหลลงสู่หน้าใต้ดินและเกิดการแพร่กระจาย หากมีการรั่วไหลในปริมาณมาก จะทำให้แหล่งน้ำเป็นพิษ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล ทำให้มีช่วงชีวิตที่สั้นลงซึ่งเป็นสาเหตุให้ความอุดมสมบูรณ์ของธรรมชาติลดลง

ดังนั้นการควบคุมการปนเปื้อนของสารในดินและน้ำใต้ดินจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมการปนเปื้อนของสารในดินและน้ำใต้ดินมีหลากหลายรูปแบบ โดยนวัตกรรมจีโอพอลิเมอร์เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่แพร่หลายในต่างประเทศถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเรื่อง

ของการก่อสร้างแทนปูนซีเมนต์ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ควบคุมการปนเปื้อนของสารในดินและน้ำใต้ดินได้อีกด้วย แต่สำหรับประเทศไทย จีโอโพลิเมอร์ยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ และยังไม่มีการใช้งานอุตสาหกรรมนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากยังอยู่ในช่วงการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในอนาคต จึงทำให้ยังไม่เป็นที่นิยมนั่นเอง

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน โดยการกระตุ้นด้วยด่างและบ่มด้วยความร้อน พบว่าคุณสมบัติเด่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีหลายประการ ได้แก่ ค่ากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ ทนไฟ ทนทานต่อสภาวะการแข็งและการละลายของน้ำสลับกัน ทนทานต่อการสัมผัสสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของสารละลายกรด เป็นต้น (Duxson et al., 2007) โดยในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานน้อย จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ทางผู้วิจัยจึงได้สังเกตเห็นว่าจีโอโพลิเมอร์ถือเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงสูงหลังจากโดนความร้อน ซึ่งประโยชน์ของจีโอโพลิเมอร์ที่แท้จริง นั่นคือ การทำให้จีโอโพลิเมอร์กระจายไปในชั้นดินที่มีการปนเปื้อน โดยให้จีโอโพลิเมอร์ขณะที่ส่งผ่านชั้นดินนั้น จะมีคุณสมบัติเป็นน้ำกระจายไปตามชั้นดินที่มีการปนเปื้อน เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้จีโอโพลิเมอร์แข็งตัวและจับสารพิษไว้ในตัวของจีโอโพลิเมอร์ วิธีการนี้เรียกว่าวิธี “การทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง” (Stabilization and Solidification) ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์โดยการสังเคราะห์ขึ้น เพื่อนำไปควบคุม การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยในดิน และน้ำใต้ดินในแหล่งอุตสาหกรรม เพื่อแก้ปัญหาการปนเปื้อนชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินด้วยวิธีการทำเสถียร และการทำก้อนแข็ง

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

- 1) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์ในการฉีดเข้าสู่พื้นที่ภายในแบบจำลอง
- 2) เพื่อนำจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตได้ไปผ่านกระบวนการการปรับเสถียรแบบในที่ (In Situ STABILIZATION AND SOLIDIFICATION) ด้วยการให้ความร้อนแบบในพื้นที่ ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในแบบจำลอง
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้จีโอโพลิเมอร์ปรับเสถียรแบบในที่การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยภายในแบบจำลอง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาและวิเคราะห์วิธีการทำจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้ได้สัดส่วนและคุณภาพของจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในชั้นดินและน้ำใต้ดิน มีการสร้างแบบจำลองชั้นดินและน้ำใต้ดินเพื่อทดสอบคุณภาพของจีโอพอลิเมอร์ในขณะที่ทำปฏิกิริยากับสารและดินในชั้นดินและน้ำใต้ดิน หลังจากทดสอบการทำงานของจีโอพอลิเมอร์ เมื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์แล้วจะทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากแบบจำลองมาตรวจหาของสารพิษและเปรียบเทียบผล เพื่อเป็นการยืนยันผลของวิธีการ การทำเสถียรและการทำก้อนแข็งว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดในการทดลอง

1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

1. ทราบถึงสัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน
2. ทราบถึงการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ไปใช้ในกระบวนการ การทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification) หลังจากการให้ความร้อนแบบในที่
3. ทราบถึงการลดลงของการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย ที่ปนเปื้อนกระจายตัวออกไปจากแหล่งปนเปื้อนของแบบจำลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำและดำเนินการในครั้งนี้ได้มีการศึกษาข้อมูลและนำข้อมูลมาอ้างอิงถึงการทำงานโดยมีการศึกษาแต่ละหัวข้อดังนี้

2.1 สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds: VOCs) (3)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

สารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds : VOCs) ซึ่งมีอันตรายต่อมนุษย์และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่อชั้นโอโซนของโลก เมื่อโอโซน (O_3) อยู่ในบรรยากาศชั้นสูงโอโซนทำหน้าที่กรองแสงอุลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตไม่ให้เกิดสู่พื้นโลก แต่เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นใกล้โลกกลับเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต กล่าวคือ O_3 สามารถทำให้เกิดอันตรายเฉียบพลันต่อสุขภาพ ทำให้เจ็บไข้ ไม่สบาย เกิดอาการเจ็บคอ หายใจไม่สะดวก เกิดการระคายเคืองต่อสายตา แก้วตา จมูก คอ ทรวงอก หรือมีอาการไอ ปวดศีรษะ เป็นต้น ถ้าได้รับเป็นเวลานานเนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลาย อย่างถาวรและมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ นอกจากนี้โอโซนยังเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุด เป็นตัวพอกสี และทำให้ผลผลิตทางการเกษตรตกต่ำอีกด้วย สารประกอบอินทรีย์ระเหยจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ฟลูออไรด์, คลอไรด์, โบรไมด์, ซัลเฟอร์ หรือไนโตรเจน ประกอบกันเป็นพวกอะลิฟาติก (Aliphatic) หรืออะโรมาติก (Aromatic) รวมถึงกลุ่มคาร์บอนิล (อัลดีไฮด์ คีโตน) และกลุ่มอัลกอฮอล์ ความดันไอมากกว่า 0.14 มม.ปรอท ที่ 25 °C โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม ระเหยกลายเป็นไอหรือก๊าซได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี สารประกอบอินทรีย์ระเหย หรือ VOCs ในบรรยากาศ จัดเป็นอากาศพิษ (Toxic Air) จึงต้องมีการควบคุม ดูแลอย่างเคร่งครัดเมื่อมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับ VOCs ตัวอย่างของตัวทำละลายที่จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยเช่น เบนซิน ไซลีน โทลูอิน สไตรีน พอร์มัลดีไฮด์ คลอโรเอทิลีน Rubber Solvent และ White Spirit เป็นต้น ในกระบวนการผลิตตัวทำละลายดังกล่าว ส่วนใหญ่เป็นระบบปิดทั้งหมด กล่าวคือ เป็น

หอกลับ การส่งสารละลายและวัตถุผ่านในแต่ละขั้นตอน ใช้ระบบท่อและวาล์วทั้งหมด ในขั้นตอนการผลิตจึงไม่มีไอระเหย ของ VOCs ที่ก่อให้เกิดอันตรายเล็ดลอดออกสู่อากาศได้

สรุปอย่างง่ายได้ว่าสารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ในชีวิตประจำวันเราได้รับ VOCs จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน, ควันบุหรี่, น้ำยาฟอกสี, สารตัวทำละลายในพิมพ์, จากตู้ฟ้นสีรถยนต์, โรงงานอุตสาหกรรม, น้ำยาซักแห้ง, น้ำยาสำหรับย้อมผมและน้ำยาดัดผม, สารฆ่าแมลง, สารที่เกิดจากเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร สารอินทรีย์ ไอระเหยที่สะสมไว้มากนานๆ จะมีผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

2.1.2 ประเภทของ VOCs

2.1.2.1 แบ่งออกตามลักษณะของโมเลกุล เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ประกอบด้วย aliphatic hydrocarbons (เช่น fuel oils, ก๊าซโซลีน (gasoline), hexane, industrial solvents ในอุตสาหกรรม, alcohols, aldehydes, ketone, hexane) และกลุ่มสาร aromatic hydrocarbons (เช่น สารตัวทำละลาย - toluene, benzene, ethylbenzene, xylenes, styrene, phenol) สาร VOCs กลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ของขยะ พลาสติก วัสดุ สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ เป็นต้น มีผลเสียต่อสุขภาพ ดังนี้ พนักงานดับเพลิง คนงานเผาขยะ คนเผาถ่าน มักป่วยด้วยโรคทางเดินลมหายใจบ่อย เพราะได้รับ VOCs ประมาณ 144 ชนิด ได้รับเป็นประจำจากควันไฟและเชื้อเพลิงในรูปของ benzene, toluene, naphthalene propene และ 1,3-butadiene, styrene และ alkyl-substituted benzene compounds อื่นๆ xylenes, 1-butene/2-methylpropene, propane, 2-methylbutane, ethylbenzene , naphthalene , isopropyl benzene รวมกันในปริมาณสูงถึง 76.8 เปอร์เซ็นต์ ของ VOCs ทั้งหมดที่วัดได้

2) chlorinated VOCs หรือ halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สาร chlorinated VOCs นี้มีความเป็นพิษมากกว่าและเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มแรก (non-chlorinated VOCs) เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทานมาก ยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ ทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือโดยทางวิธีเคมีทั่วไปมีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก รบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม หรือยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้

ตาราง 4 ตัวอย่างของ halogenated hydrocarbons ที่พบได้ในสิ่งแวดล้อม (3)

1,1,1,2-Tetrachloroethane	Bromofor	Glycerol trichlorohydrin
1,1,1-Trichloroethane	Bromomethane	Hexachlorobutadiene
1,1,2,2-Tetrachloroethane	Carbon tetrachloride	Hexachlorocyclopentadiene
1,1,2-Tetrachloroethane	Chlorodibromomethane	Hexachloroethane
1,1-Dichloroethane	Chloroethane	Methylene chloride
1,1-Dichloroethylene	Chloroform	Neoprene
1,2,2-Trifluoroethane (Freon 113)	Chloromethane	Pentachloroethane
1,2-Dichloroethane	Chloropropane	Perchloroethylene
1,2-Dichloropropane	Cis-1,2-dichloroethylene	Propylene dichloride
1,2-Trans-dichloroethylene	Cis-1,3-dichloropropene	Trichlorotrifluoroethane
1,3-cis-dichlor-1-propene	Dibromchloropropane	Monochlorobenzene
1,3-trans- dichlorpropene	Dibromomethane	Tetrachloroethylene (Perchloroethylene) (PCE)
1-chloro-2-propene	Dichlorobromomethane	Trichloroethylene (TCE)
2-butylene dichloride	Dichloromethane (DCM)	Vinyl chloride
Acetylene tetrachloride	Ethylene dibromide	Vinyl trichloride
Bromodichloromethane	Fluorotrichloromethane (Freon 11)	Vinylidene chlorid

2.1.2.2 แบ่งตามลักษณะของโครงสร้าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) กลุ่มอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbons) หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นสายโซ่ปิด อาจจะต่อกันเป็นสายยาวไม่มีกิ่ง เรียกว่า

โซ่ตรง หรือต่อกับคาร์บอนในสายยาว เรียกว่า โซ่กิ่ง แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามชนิดของพันธะ เช่น สารเฮกเซน (Hexane)

2) กลุ่มอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ซึ่งส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ เช่น สารเบนซีน (Benzene) สารโทลูอีน (Toluene) และสารไซลีน (Xylenes)

3) กลุ่มออกซิเจน (Oxygenated) หมายถึง สารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารอะซิโตน (Acetone) และสารคีโตน (Ketones) จากการพิจารณาอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการระบายสาร VOCs (ตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง กำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปใน เวลา 24 ชั่วโมง) พบว่าส่วนใหญ่มาจากการใช้วัตถุดิบ สารเคมีภัณฑ์ที่นำมาใช้ในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต กระบวนการกักเก็บ ขนย้าย และการจัดการสารเคมีที่ไม่เหมาะสมและสามารถกำหนดประเภทอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการระบายสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ 12 ประเภท ดังนี้

- 1) อุตสาหกรรมประเภทอู่ซ่อมรถยนต์ ฟันสีรถยนต์
- 2) อุตสาหกรรมประเภทเฟอร์นิเจอร์ไม้ และทำเครื่องไม้
- 3) อุตสาหกรรมประเภทพลาสติก
- 4) อุตสาหกรรมประเภทเบญจรงค์ และเซรามิก
- 5) อุตสาหกรรมประเภทฟอกย้อมและฟอกสีและสิ่งทอ
- 6) อุตสาหกรรมประเภทสิ่งพิมพ์
- 7) อุตสาหกรรมประเภทผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 8) อุตสาหกรรมประเภทล้างทำความสะอาดโลหะ เครื่องจักร
- 9) อุตสาหกรรมประเภทบรรจุตัวทำละลาย และเคมีภัณฑ์
- 10) อุตสาหกรรม ประเภทผลิตปุ๋ย / ยาฆ่าแมลง / ยากำจัดศัตรูพืช
- 11) อุตสาหกรรมประเภทบำบัดคัดแยกกากของเสีย
- 12) อุตสาหกรรมประเภทซักรีด

2.1.3 ผลกระทบที่เกิดจาก VOCs

ปัจจุบันสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย; VOCs เป็นสารที่ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ซึ่งการใช้สาร VOCs อย่างกว้างขวางนี้ส่งผลให้ในแต่ละปีมีการปล่อยสาร VOCs ออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณค่อนข้างสูง โดยสารดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งของมลภาวะด้านต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น มลภาวะทางน้ำ มลภาวะทางดิน มลภาวะทางอากาศรวมทั้ง

มลภาวะอากาศภายในอาคาร ทั้งนี้สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เมื่อระเหยออกสู่บรรยากาศซึ่งจะสร้างปัญหาแก่ชุมชนบริเวณรอบๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษ กลิ่นและอาจก่อให้เกิดหมอกที่เกิดจากสารเคมีและยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในด้านสุขภาพ คือ เป็นสารก่อมะเร็ง ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น

สาร VOCs ในบรรยากาศเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งเกิดจากการปลดปล่อยออกมาจากการประกอบกิจการของภาคอุตสาหกรรมการผลิต ตัวทำละลายที่มีสาร VOCs เป็นองค์ประกอบการขนถ่ายและการจัดเก็บ การขับชี่ยานพาหนะ แหล่งกำเนิดที่สำคัญของสาร VOCs คือ รถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม และแหล่งกำจัดขยะสาร VOCs จึงมีมากตามเมืองใหญ่ๆ ตัวอย่างเช่น เบนซีน ไซลีน โทลูอิน สไตรีน พอร์มัลดีไฮด์ เปอร์คลอโรเอทิลีน เป็นต้น สาร VOCs ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นอุตสาหกรรมสี ยาง ทินเนอร์ แลคเกอร์ น้ำยาทาเนื้อไม้ กาว Aerosol Sprays Air Refresher น้ำยาดับกลิ่น สารทำความสะอาด และน้ำยาซักแห้ง เป็นต้น เนื่องจากสาร VOCs มีคุณสมบัติระเหยกลายเป็นก๊าซหรือไอได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง จึงนิยมนำไปใช้เป็นส่วนประกอบเคลือบผิวและเมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มักเกิดปัญหาร้องเรียนเรื่องกลิ่น ซึ่งเป็นปัญหามลพิษที่เกิดการร้องเรียนสูงสุด โดยมีผลกระทบต่ออารมณ์ และจิตใจของมนุษย์ในชีวิตประจำวันเราได้รับสาร VOCs จากผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สีทาบ้าน ควันบุหรี่ น้ำยาฟอกสี สารตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ จากอุปกรณ์รถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรม น้ำยาซักแห้ง น้ำยาสำหรับย้อมผมและน้ำยาดัดผม สารฆ่าแมลง น้ำมันเชื้อเพลิง สารที่เกิดจากการเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร สารอินทรีย์ ไอร์ระเหยที่สะสมไว้มากนานๆ จะมีผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ นอกจากนี้สาร VOCs ยังกระจายอยู่ทั่วไปในบรรยากาศ และมีผลต่อชั้นโอโซนที่อยู่ใกล้โลก

2.1.3.1 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

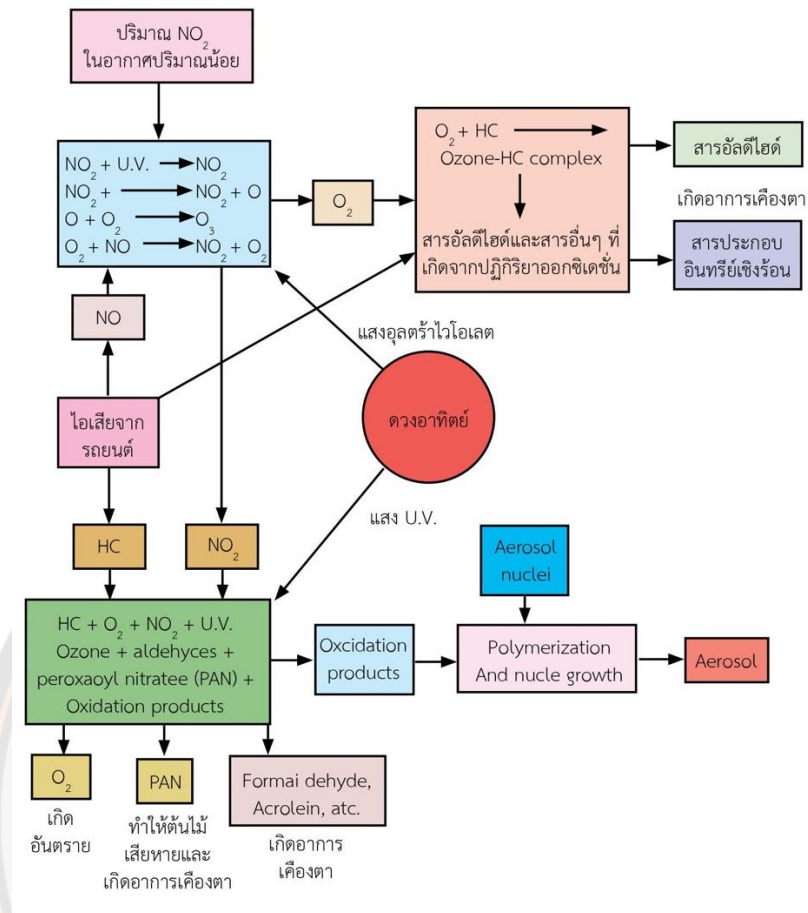
เนื่องจากสาร VOCs เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีจำนวนมากกว่าร้อยละหนึ่งและมีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลกระทบด้านคุณภาพอากาศ

ผลกระทบของสาร VOCs ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ การแพร่กระจายของ VOCs ที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพอากาศ โดยการปนเปื้อนของสาร VOCs ในอากาศนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์แล้ว สาร VOCs ยังเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีการดูดซับพลังงานแสง ก่อให้เกิดสภาพที่เรียกว่า หมอกผสมควัน (Photochemical Smog) เนื่องจากการรวมตัวของสาร VOCs กับออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เกิดเป็นสารออกซิแดนท์ เช่น Aldehyde, Hydrogen peroxide, Peroxyl Acetyl Nitrate (PAN) กรดอินทรีย์และอนินทรีย์ รวมทั้งอนุภาคขนาดเล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ยิ่งโอโซนซึ่งเป็นสารที่มีความเข้มข้นและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ นอกจากนี้หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้การใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำเสียไป

สาร VOCs ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา Photochemical Oxidants จะทำปฏิกิริยากับ NOx ทำให้เกิดก๊าซโอโซนและสารอื่นซึ่งเป็นสารมลพิษทางอากาศทุติยภูมิ กล่าวคือ โอโซนในบรรยากาศชั้นใกล้โลกเกิดจากปฏิกิริยา Photochemical Oxidants ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาของ VOCs ไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละออง และออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่ง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยโอโซนที่อยู่ในบรรยากาศชั้นสูงจะทำหน้าที่กรองแสงอุลตราไวโอเลตคลื่นสั้นที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตไม่ให้เกิดสู่พื้นโลก แต่เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นใกล้โลกกลับเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ทำให้เจ็บไข้ไม่สบาย เกิดอาการเจ็บคอ หายใจไม่สะดวก ถ้าได้รับเป็นเวลานาน เนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลายอย่างถาวร และมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ นอกจากนี้โอโซนยังเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุด เป็นตัวพอกสี และยังมีผลทำให้ผลผลิตทางการเกษตรตกต่ำลงอีกด้วย โอโซนจึงเป็นสารมลพิษทุติยภูมิในบรรยากาศใกล้โลกที่ยากต่อการควบคุมโดยตรง เนื่องจากไม่ได้เกิดจากการปล่อยสู่บรรยากาศ แต่เกิดจากกระบวนการ Photochemical ซึ่งมี VOCs เป็นตัวการสำคัญ สภาวะอากาศเป็นพิษหรือสมอก (Smog) ซึ่งเป็นคำผสมระหว่าง Smoke และ Fog หมายถึง สภาวะคล้ายหมอกควันในอากาศเนื่องจากมีก๊าซพิษหลายชนิดที่เกิดสะสมกันในอากาศ เป็นปัญหาที่พบในเมืองอุตสาหกรรม สารมลพิษหลัก ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นละออง โอโซน ไนโตรเจนออกไซด์ Smog มี 2 ชนิด คือ Smog ที่เกิดในฤดูหนาว มีละอองน้ำเป็นองค์ประกอบ และ Photochemical Smog ที่เกิดในฤดูร้อนซึ่งมีแสงแดดเป็นตัวเร่ง (3)



ภาพ 1 กระบวนการเกิด Photochemical Oxidants (3)

2) ผลกระทบด้านคุณภาพน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

เมื่อสาร VOCs ถูกปล่อยทิ้งหรือเกิดการรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำผิวดินหรืออาจเกิดจากน้ำฝนชะละลาย สาร VOCs ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสาร VOCs ในแหล่งน้ำผิวดิน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้น ซึ่งพืชและสัตว์น้ำไม่สามารถอยู่ได้ ส่งผลให้ความสมบูรณ์ของระบบนิเวศในแหล่งน้ำลดลง บางกรณีมีการเคลื่อนย้ายสาร VOCs ผ่านชั้นดินปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดินทำให้น้ำใต้ดินมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค

ปัญหาการปนเปื้อนสาร VOCs ในน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะสาร VOCs ประเภทสารที่แยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (Nonaqueous Phase Liquids หรือ NAPLs) ซึ่งเป็นสารที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมาก เนื่องจากสาร NAPLs มักจะอยู่บนผิวน้ำ ถ้าไหลผ่านบ่อน้ำตื้นจะเห็นได้ชัดเจน ส่วนใหญ่ได้แก่ สารในกลุ่มที่มีองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ น้ำมันเชื้อเพลิงที่เก็บไว้ในสถานีบริการน้ำมันต่างๆ มักเก็บไว้ภายในถังเก็บใต้ดิน ซึ่งถัง

น้ำมันส่วนมากทำด้วยเหล็ก ประกอบกับน้ำมันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีฤทธิ์กัดกร่อน จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ถังเหล็กดังกล่าวจะเกิดการผุกร่อน ทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำมันจากถังเก็บใต้ดินลงสู่ดินและซึมลงสู่น้ำใต้ดิน รวมทั้งอาจเกิดการรั่วไหลบริเวณท่อและข้อต่อต่างๆ ด้วย นอกจากนี้บริเวณหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีระบบป้องกันน้ำชะมูลฝอยซึมไหลออกที่ไม่มีประสิทธิภาพสาร NAPLs อาจรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้เช่นกัน สาร NAPLs นี้มีความหนืดต่ำมักเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระนาบลงสู่ดินและก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินในชั้นดินอุ้มน้ำ (Water Saturated Zone) โดยจะอยู่ในลักษณะของบ่อที่แยกตัวจากน้ำใต้ดิน (NAPLs pools) หรือของเหลวที่แทรกตัวระหว่างเม็ดดิน (NAPLs Blobs or Ganglia) เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีอัตราการระเหยต่ำ จึงทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเป็นเวลานานนับสิบถึงร้อยปี ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพในระยะยาว ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ เช่น เบนซีน โทลูอิน และไซลีน เป็นต้น เนื่องจากสารเหล่านี้มักมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำมักจะลอยอยู่ส่วนบนของชั้นน้ำใต้ดินและหากน้ำใต้ดินมีการไหลก็จะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง

นอกจากนี้สาร VOCs ประเภทสารพวกแยกตัวจากน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ (Dense Nonaqueous Phase Liquids: DNAPLs) โดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ มีความหนืดน้อย มีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้สามารถเคลื่อนตัวลงสู่น้ำใต้ดินได้ง่ายกว่าน้ำ ระเหยง่ายเหมือนแก๊ส ทำให้สามารถเคลื่อนตัวไปในโซนไม่อิ่มตัว หรือชั้นบรรยากาศได้ สารกลุ่มนี้บางชนิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไตรคลอโรเอเทธิลีน เตตระคลอโรเอเทธิลีน 1,1,1 - ไตรคลอโรอีเทน เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำเข้ามาใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลายไขมันจากผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้ดี สารกลุ่ม DNAPLs จะมีความสามารถในการละลายสมบูรณ์และความสามารถในการย่อยสลายต่ำ ทำให้สามารถอยู่ในน้ำใต้ดินและก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้เป็นเวลานาน แต่ถึงแม้การละลายในน้ำใต้ดินเพียงเล็กน้อยก็เป็นปริมาณมากที่จะทำให้เกิดอันตรายและเกิดความเป็นพิษได้

3) ผลกระทบด้านคุณภาพดิน

เมื่อสาร VOCs ถูกปล่อยทิ้งหรือรั่วไหลลงดินจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินและจะเกิดการดูดซับและสะสมไว้ในดิน นอกจากนี้เมื่อฝนตกจะชะละลายสาร VOCs ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศลงสู่ดิน ทำให้ดินปนเปื้อน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของดิน นอกจากนี้สารเคมีในกลุ่มยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืชบางชนิดมีความคงทนในดิน เพราะแทรกอยู่ในตะกอนหรือดินเหนียวได้ดี ทำให้แบคทีเรียย่อยสลายได้ยาก เช่น ยาปราบวัชพืชบางชนิด ยาฆ่าแมลงประเภทดีดีที และดีลตริน เป็นต้น

4) ผลกระทบต่อพืชและระบบนิเวศน์

สาร VOCs อาจทำให้การเจริญเติบโตของพืชชะงัก ทำลายคลอโรฟิลล์และการสังเคราะห์แสง มักจะแคระแกร็นมีการเจริญเติบโตช้าหรืออาจตายได้ นอกจากนี้สาร VOCs ยังมีส่วนในการทำให้ระบบนิเวศในธรรมชาติ เสียสมดุล โดยเมื่อฝนตกจะชะละลายสาร VOCs ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษขึ้น พืชและสัตว์ไม่สามารถอยู่ได้ การเจริญเติบโตของพืชลดลง ป่าไม้ไม่เจริญงอกงามความสมบูรณ์ของระบบนิเวศป่าลดลง

2.1.3.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ

สาร VOCs สามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้ 3 ทางคือ การหายใจเข้าทางปอด การกินหรือกลืนเข้าทางปาก และการสัมผัสทางผิวหนัง ซึ่งเมื่อได้รับเข้าไปในร่างกายแล้วจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แตกต่างกันไปตามชนิดของ VOCs ซึ่งกรมควบคุมมลพิษได้ออกประกาศเรื่องกำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 19 ชนิด ดังนี้

- 1) อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde)
- 2) อะครอลีน (Acrolein)
- 3) อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile)
- 4) เบนซีน (Benzene)
- 5) เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride)
- 6) 1,3 - บิวทาไดอีน (1,3 - Butadiene)
- 7) โบรโมมีเทน (Bromomethane)
- 8) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)
- 9) คลอโรฟอร์ม (Chloroform)
- 10) 1,2 - ไดโบรโมอีเทน (1,2 - Dibromoethane)
- 11) 1,4 - ไดคลอโรเบนซีน (1,4 - Dichlorobenzene)
- 12) 1,2 - ไดคลอโรอีเทน (1,2 - Dichloroethane)
- 13) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)
- 14) 1,2 - ไดคลอโรโพรเพน (1,2 - Di chloropropane)
- 15) 1,4 - ไดออกเซน (1,4 - Dioxane)
- 16) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)
- 17) 1,1,2,2 - เตตระคลอโรอีเทน (1,1,2,2 - Tetrachloroethane)
- 18) ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)
- 19) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)

2.2 สมบัติของสารไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) และการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม (7)

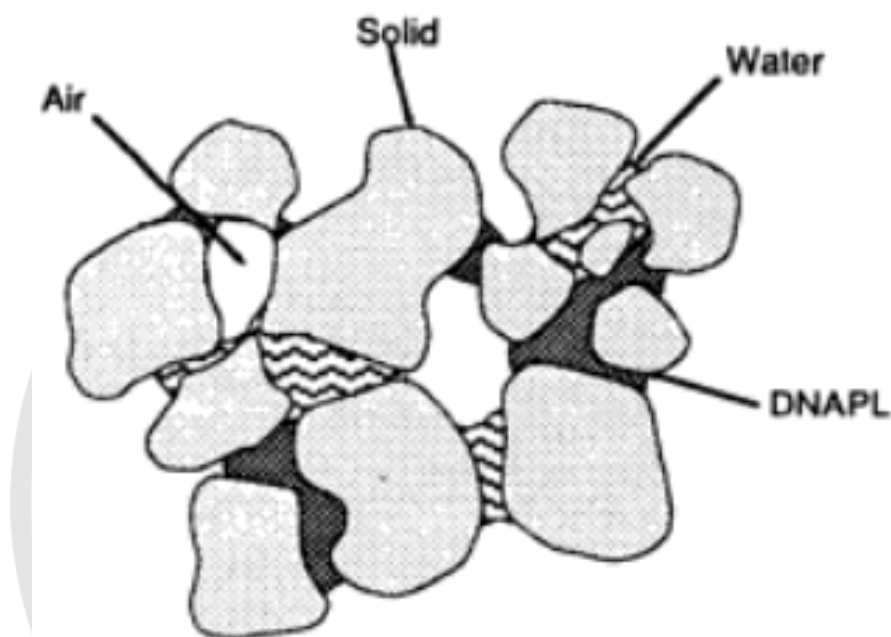
สารไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) เป็นสารประเภทสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) และประเภทสารที่หนาแน่นกว่าน้ำและไม่รวมตัวกับน้ำ (DNAPL) มีคุณสมบัติเด่นที่ระเหยง่ายและละลายน้ำต่ำ (ตาราง 5)

ตาราง 5 สมบัติของสาร TCE (7)

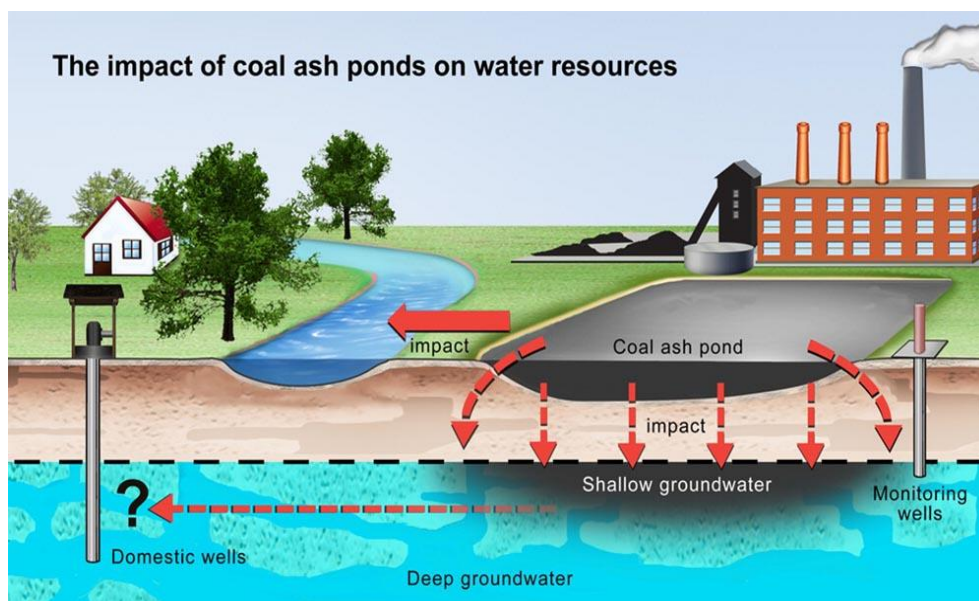
สมบัติ	ค่า
Molecular weight	131.39 g/mol
Bolling point	87.2°C
Melting point	-84.7°C
Density	1.4642 g/ml at 20°C
Solubility	1,280 mg/L water at 25°C
Vapor pressure	69.8 mmHg at 25°C
Vapor density	4.53 (air=1)
Henry's law constant	9.85×10^{-3} atm-cu m/mol
Octanol/ water partition coefficient	log Know=2.61
Air concentration conversion	1 ppb=5.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

เมื่อสารประเภท DNAPL รั่วไหลลงสู่ลงสู่ดิน (ที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำ) จะกระจายตัวอยู่ใน 4 ภูมิภาค คือ สารที่ไม่รวมกับน้ำ (NAPL) สารที่ละลายในน้ำ สารที่ดูดซับในดิน และสารที่ระเหยอยู่ในรูปไอ สัดส่วนการกระจายตัวในแต่ละเฟสจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสัดส่วนของสารในสภาวะสมดุล (ภาพที่ 2) แต่ในน้ำใต้ดินจะไม่เกิดส่วนที่เป็นช่องว่างของอากาศจึงไม่มีส่วนที่เป็นไอทำให้เหลือแค่ 3 ภูมิภาค เมื่อสาร DNAPL อยู่ในชั้นดินหรือน้ำใต้ดินสาร DNAPL จะไหลตามแรงโน้มถ่วงเป็นหลัก ระหว่างการเคลื่อนที่นั้นจะได้รับอิทธิพลต่อแรง Capillary Barrier ในดิน ซึ่งมีผลทำให้หน่วงการเคลื่อนที่ในทิศทางตามแรงโน้มถ่วงทำให้เคลื่อนที่ช้าลงและกระจายออกในแนวราบหลายทิศทางทำให้เกิดการกระจายเป็นวงกว้าง เมื่อสาร DNAPL เมื่อสารเคลื่อนผ่านในชั้นดินจะเหลือ DNAPL ตกค้างอยู่ในดิน ซึ่งถูกดูดซับในเม็ดดินและอยู่ในช่องว่างของดินอีกด้วย ในระหว่าง การเคลื่อนที่ของสาร DNAPL และ DNAPL ที่ตกค้างเมื่อก่อน DNAPL เคลื่อนที่ผ่านในชั้นดิน ไม่อิมตัวด้วยน้ำสารจะระเหย

เป็นไอในช่องว่างในดิน แต่ในชั้นน้ำใต้ดินสารจะละลายน้ำออกไปเรื่อยๆ เป็นลักษณะของ Dissolve Plume ให้สารกระจายไปกับน้ำใต้ดิน ซึ่ง DNAPL ตกค้าง จะสามารถชะละลายสารออกไปได้อีกเป็น เวลานับสิบปีแม้กลุ่มสารหลักไม่ได้อยู่แล้ว จนเมื่อ DNAPL ไหลลงไปจนถึงชั้นหินที่ไม่สามารถ เคลื่อนผ่านได้ดังเช่นในชั้นล่างของน้ำใต้ดิน DNAPL จะสะสมในชั้นล่างนี้และสามารถชะละลายไปกับ น้ำใต้ดินได้อีกซึ่งจะต้องใช้เวลานานกว่า DNAPL ที่ตกค้างหลายเท่า



ภาพ 2 การปนเปื้อนของสาร TCE ใน 4 วัฏภาคในชั้นดิน คือ สารที่ไม่รวมกับน้ำ (NAPL) สารละลายน้ำ สารที่ดูดซับในดิน และสารระเหยอยู่ในรูปไอ (8)



ภาพ 3 การรั่วไหลของ DNAPL จากผิวดินและไหลลงใต้ดินไปสะสมในท้องน้ำใต้ดิน (8)

ที่มา : A Duke University team examined how and whether coal ash contaminants from impoundment ponds can migrate into surrounding water sources. Visual: Duke University/J. of Environmental Science and Technology

สมบัติของ DNAPL หลายอย่างส่งผลต่อการแบ่งวัฏภาคและการเคลื่อนที่ (Fate and transport) รวมถึงดินและน้ำใต้ดินอีกด้วย ซึ่งเรียบเรียงไว้ในตาราง 6

ตาราง 6 ตัวแปรที่มีผลต่อการแบ่งวัฏภาคและการเคลื่อนที่ของ DNAPL (8)

ตัวแปร	ความหมาย	ผลต่อ Fate & Transport	สิ่งที่มีผลต่อให้ตัวแปรเปลี่ยนแปลง
Density	มวลต่อปริมาตรของสาร (อาจใช้ Specific Weight และ Specific Gravity เทียบแทนได้)	สาร DNAPL จะมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ เมื่อสารไหลลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน สารจะจมสู่ใต้ชั้นน้ำ	อุณหภูมิ และความดัน
Viscosity	ความสามารถในการต้านทานการไหล จากแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุล	ส่งผลต่อ Hydraulic Conductivity ทำให้มีผลต่อความเร็ว และความ	อุณหภูมิ และ ความดัน

ตัวแปร	ความหมาย	ผลต่อ Fate & Transport	สิ่งที่มีผลต่อให้ตัวแปรเปลี่ยนแปลง
	ของสาร	ยากง่ายของสารในการไหลซึมผ่านดิน	
Solubility	ความสามารถการละลายของสารในสภาวะสมดุล	เป็นตัวกำหนดจำนวนสารจะละลายที่จะแพร่กระจายออกจากสารในรูป DNAPL	อุณหภูมิ ความดัน PH และแร่ธาตุในน้ำ (นอกจากนี้การชะละลายในพื้นที่อาจเกี่ยวข้องกับความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินและผิวสัมผัสของ DNAPL กับน้ำด้วย)
Vapor Pressure	ส่วนของความดันที่เกิดจากแรงที่ผิวโมเลกุลของเหลวที่จะแยกเป็นอิสระออกมาเป็นไอ	ชี้วัดว่าสารสามารถระเหยจากรูป DNAPL ได้ยากหรือง่าย	อุณหภูมิ และความดันภายนอก
Volatility	ความสามารถในการเปลี่ยน Fate ของสารในรูปสารละลายน้ำไปเป็นก๊าซ ซึ่งกำหนดโดยค่า Henry Constant	แสดงว่าสารสามารถระเหยจากที่ละลายน้ำได้ยากหรือง่าย ซึ่งสารในรูปที่ DNAPL ที่อยู่ในน้ำนั้น จะไม่สามารถระเหยได้โดยตรงต้องละลายน้ำก่อน แม้สารมีความดันไอสูงแต่อัตราการระเหยก็จะต่ำตามอัตราการละลาย	อุณหภูมิ ความดัน และคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ เช่น ความเร็วการไหล ความปั่นป่วนของน้ำ เป็นต้น
Interfacial Tension	คือผลต่างระหว่างแรงของพื้นที่ผิวของเหลวสองชนิดที่สัมผัสกัน เกิดเป็นพลังงาน (จะน้อยกว่าแรงตึงผิวเพราะเกิดการหักล้างของแรงสองด้าน)	มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสาร ซึ่งสัมพันธ์กับ Wettability Interfacial Tension มีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ Viscous Fingering คือเมื่อสารที่มีความหนืดน้อยไหลผ่านสารที่มีความหนืดมากจะแยกตัวให้สารผ่านขึ้นลงตามความหนาแน่น	อุณหภูมิ และความดัน

ตัวแปร	ความหมาย	ผลต่อ Fate & Transport	สิ่งที่มีผลต่อให้ตัวแปรเปลี่ยนแปลง
Wettability	ความสัมพันธ์ของของไหลชนิดหนึ่ง ต่อผิวของสารหนึ่ง โดยจะเป็นค่าเฉพาะของสารแต่ละชนิด	โดยทั่วไป Wettability ต่ออนุภาคดินของ น้ำ > สารอินทรีย์ > อากาศ ซึ่งสิ่งที่มี Wettability มากกว่าจะเกาะติดที่ผิวของดินก่อนเป็นชั้นแรก และของเหลวที่มีค่าน้อยกว่าจะอยู่ในชั้นถัดไป แสดงให้เห็นว่าเมื่อสาร DNAPL ไหลผ่านส่วนที่มีน้ำสาร จะไม่ได้สัมผัสผิวดินโดยตรงแต่สัมผัสในรูปสารละลายน้ำแทน	Interfacial Tension เพราะมุมของ Wettability นั้นเกิดจากแรง และประจุในดินก็มีผลด้วยเช่นกัน
Capillary Force and Pressure	แรงในการดูดติดผิว โดยของเหลว คือแวนโน้มที่ของเหลวที่มี Wettability มากกว่า จะแทนที่สาร ที่มี Wettability น้อยกว่า ในช่องว่างขนาดเล็ก	เมื่อขนาดรูพรุนของดินน้อย จะทำให้แรง Capillary ที่เกิดต่อของเหลวมากขึ้น ทำให้หน่วงการเคลื่อนที่ของ DNAPL ให้เคลื่อนที่ผ่านได้ช้าลงหรือผ่านไม่ได้เลย เนื่องจากค่าแรงดันของ DNAPL น้อยกว่าแรง Capillary ส่วนที่จะไหลผ่าน DNAPL จะเลือกเคลื่อนผ่านส่วนที่เคลื่อนที่ง่ายกว่า คือมีแรง Capillary ต่ำน้อยกว่า	ขนาดรูพรุนของดิน ความอึดตัวของน้ำ โดยน้ำในดินทำให้รูพรุนของดินเล็กลง และคุณสมบัติของของเหลว Interfacial Tension และ Wettability
Soil Gradient	คือลักษณะการเรียงตัวของดินที่มีสามารถต้านเคลื่อนที่ผ่านต่างกัน	ทำให้ DNAPL เคลื่อนที่ไปในทางที่เคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าตามการลักษณะการกระจายตัวของดิน	
Ground Water Flow	ความเร็วการไหลของน้ำใต้ดิน	ถ้าความเร็วมากกว่าแรง Capillary ก็จะทำให้	

ตัวแปร	ความหมาย	ผลต่อ Fate & Transport	สิ่งที่มีผลต่อให้ตัวแปรเปลี่ยนแปลง
		DNAPL เคลื่อนที่ไปตามทิศทางการไหลและมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ Plume สารปนเปื้อน	
Relative Permeability	ค่าคงที่ความสามารถในการซึมผ่าน ซึ่งสัมพันธ์กับของเหลวสองชนิดที่ไหลผ่าน ตัวกลางพร้อมกัน	เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงการเคลื่อนที่ของ DNAPL ในน้ำใต้ดิน ซึ่งถ้ามี DNAPL สัดส่วนมากกว่าในรูพรุนของดิน DNAPL จะเกิดการไหลเข้าไปในทางที่ผ่านได้ง่ายก่อนน้ำทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านออกไปได้ ทำให้ DNAPL มีการเคลื่อนที่แต่น้ำไม่เคลื่อนที่ ซึ่งจะกลับกันหากน้ำมีปริมาณมากกว่า แต่ถ้า DNAPL และน้ำมีพอๆกัน น้ำและ DNAPL จะเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกันแต่อาจไปคนละช่องว่างกัน	

2.3 เทคโนโลยีควบคุมและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

การควบคุมและการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายอาจจำเป็นต้องใช้เทคนิคเฉพาะบางอย่างในการควบคุมปัญหาซึ่งเทคนิคในการควบคุมและกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้น ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง สามารถจำแนกได้ 2 กลุ่ม ใหญ่ๆ คือ

2.3.1 การปรับปรุงกระบวนการผลิตและอุปกรณ์

เทคนิคในการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่าย แบบนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกระทำได้โดย

1) เปลี่ยนแปลงชนิดของสารตั้งต้น เพื่อเป็นการลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายตั้งแต่ต้น ก่อนที่จะผ่านส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตโดยการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในระดับน้อยหรือไม่มีสารประกอบดังกล่าว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารตั้งต้นนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม

2) เปลี่ยนแปลงสภาวะในการดำเนินการผลิต เพื่อลดการเกิดหรือการระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาวะในการดำเนินการผลิตนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตที่ทางผู้ประกอบการสามารถยอมรับได้โดยอาจเลือกการจัดให้มีระบบการระบายอากาศภายในที่ดี (Ventilation) เช่น การเปิดประตู - หน้าต่างทางระบายอากาศ หรือการใช้พัดลม เป็นต้นหรือเลือกวิธีการควบคุมสภาวะอากาศ (Climate Control) ทั้งอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีผลต่อการระเหย หรือรั่วไหลของสารระเหยอินทรีย์ง่าย (VOCs) โดยตรง

3) ปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อลดโอกาสในการรั่วไหลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น กำหนดให้มีฝาปิดสำหรับภาชนะที่มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีการตรวจสอบหรือการซ่อมบำรุงแก้ไขท่อที่เป็นทางเดินของสารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นต้น

4) เลือกสถานที่ตั้งโรงงานหรือสถานประกอบการที่มีแนวโน้มจะเกิดกลิ่นรบกวนให้ห่างไกลจากพื้นที่ชุมชน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหตุรำคาญ

5) การจัดการระบบการเก็บสารเคมี หรือสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นโดยต้องมีการควบคุมปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการประกอบกิจการให้เพียงพอเหมาะสมไม่ควรทำการสะสมในปริมาณที่มากเกินไป และควรมีการปิดผนึกภาชนะบรรจุสารให้มิดชิดหลังจากการใช้งานแล้ว เนื่องจากสารเคมีในงานอุตสาหกรรมบางชนิดจะสามารถระเหยได้แม้ในอุณหภูมิปกติ ซึ่งผู้ประกอบการต้องมีความตระหนักถึงอันตรายจากการรั่วไหลของสารเคมีดังกล่าว

2.3.2 ระบบการเผาทำลาย (Incineration)

การเผาไหม้ (Incineration) เป็นขบวนการที่มักจะใช้ในการควบคุมการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) จากขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมสารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถถูกออกซิไดซ์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) ถ้าอุณหภูมิสูงพอ และมีเวลาในการเผาไหม้นานพอ การเผาไหม้ยังสามารถใช้ในการกำจัดกลิ่นหรือสารเป็นพิษได้อีกด้วย ระบบออกซิเดชันมีทั้งหมด 3 แบบดังนี้

1) ระบบออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Oxidation Process) เป็นการกำจัดกลิ่น โดยอากาศเสียที่มีสารก่อให้เกิดกลิ่นจะถูกทำให้ร้อนด้วยอุณหภูมิ 250 - 300 °C และจะถูกปล่อยเข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Bed) ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นจะอยู่ภายใต้สภาวะที่ถูกออกซิเดชันบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะถูกละลายหรือไม่มีกลิ่นเลย ข้อดีของระบบนี้

คือ เสียค่าใช้จ่ายสำหรับเชื้อเพลิงน้อยเนื่องจากการเผาไหม้สารจะใช้อุณหภูมิต่ำ สามารถกำจัดก๊าซที่เป็นอันตรายในความเข้มข้นต่ำได้ดี และการติดตั้งระบบใช้พื้นที่น้อย ง่ายต่อการบำรุงรักษา ส่วนข้อจำกัด คือ ไม่สามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นจำพวกอนินทรีย์ที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานต่ำ หากพบสารจำพวกโลหะหนักปนอยู่ และผลของการใช้ระบบนี้อาจก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้

2) ระบบออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozone-Oxidation Process) โดยโอโซนจะมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong Oxidizing) เมื่อโอโซนถูกส่งผ่านเข้าสู่อากาศเสียที่มีสารก่อให้เกิดกลิ่น จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ อากาศเสียจึงมีกลิ่นจางลง ข้อดีของระบบนี้ คือ การทำงานของระบบไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด - ด่างของอากาศที่เข้าสู่ระบบทำให้ง่ายในการดำเนินการและการซ่อมแซม บำรุงรักษา รวมทั้งสามารถใช้งานร่วมกับวิธีการกำจัดกลิ่นแบบอื่นๆ ได้ ส่วนข้อจำกัด คือ อาจต้องใช้อุปกรณ์กำจัดโอโซนส่วนที่เหลือ การใช้โอโซนต้องมีการปรับให้มีปริมาณที่เหมาะสม

3) ระบบกำจัดกลิ่นด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หรือที่เรียกว่าระบบตัวกรองชีวภาพ ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ทั่วโลก หลักการคืออาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการนี้ถูกนำไปใช้ในการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย จนกระทั่งการใช้เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วย สำหรับตัวกรองชีวภาพจะประกอบด้วย ตัวกลางที่มีรูพรุน ซึ่งอาจเป็นวัสดุที่เป็นสารประเภทอินทรีย์ ได้แก่ ดิน เปลือกไม้ กากตะกอน น้ำเสีย ขยะอินทรีย์ เป็นต้น โดยจุลินทรีย์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารปนเปื้อนให้กลายเป็นสารประกอบขนาดเล็ก ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพสามารถใช้ในการบำบัดสารได้หลายประเภท ได้แก่

1) สารประเภท Aliphatic Hydrocarbon ได้แก่ Hexane

2) สารประเภท Aromatic Hydrocarbon ได้แก่ Benzene Toluene Ethylbenzene Xylene และ Styrene

3) สารประกอบที่มีออกซิเจน ได้แก่

- กลุ่ม Alcohol เช่น Methanol Ethanol และ Propanol เป็นต้น
- กลุ่ม Aldehyde เช่น Formaldehyde Acetaldehyde และ Methyl Isobutyl Ketone เป็นต้น

- กลุ่ม Ketones เช่น Acetone และ Methyl Ethyl Ketone เป็นต้น

4) สารประกอบที่มีซัลเฟอร์ ได้แก่ Hydrogen Sulfide และ Methyl Mercaptan เป็นต้น

5) สารประกอบที่มีไนโตรเจน ได้แก่ Ammonia และ Amides เป็นต้น สำหรับข้อดีของระบบนี้ คือ ไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นเทคโนโลยีที่ไม่เป็นอันตรายและไม่ก่อให้เกิดมลพิษข้างเคียงอื่นๆ

และมีค่าใช้จ่ายในการทำงานของระบบต่ำ แต่ข้อจำกัด คือ ระบบค่อนข้างอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสารปนเปื้อน หากมีสารพิษเข้ามาในระบบมาก ระบบอาจล้มเหลวได้ และใช้ระยะเวลาในช่วงแรกก่อนที่จะมีการจำกัดกลิ่นนานกว่าระบบอื่น เนื่องจากต้องรอจนมีปริมาณของจุลินทรีย์อย่างเพียงพอ

2.3.3 ระบบการดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมหรือการดูดกลืนเป็นกระบวนการถ่ายเทมวล ซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่เป็นก๊าซออกจากกระแสดูดอากาศโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพก๊าซไปยังสภาพของเหลวได้ เนื่องจาก ทั้ง 2 เฟสนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration Gradient) ที่ผิวของเหลวและก๊าซเป็นแรงดัน (Deriving Force) ให้เกิดการถ่ายเทมวล นอกจากนี้แล้วพื้นที่ผิวสัมผัสสูง การปั่นป่วน (Turbulent) และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงจะช่วยเร่งการเกิดกระบวนการ ในแง่มลพิษทางอากาศ การดูดซึมเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ

2.3.3.1 ชนิดของเครื่องดูดซึม

ในการดูดซึมต้องการให้ก๊าซและของเหลวมีการสัมผัสกันมาก โดยให้ความดันลดมีค่าน้อย โดยปกติจะมีวิธีการทำให้ของเหลวแตกย่อยเป็นหยดเล็กๆ หรือฟิล์มบางๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวของเหลวที่สุดคือ Packed Tower, Plate Tower, Spray Tower เป็นต้น

2.3.3.2 หลักการของการดูดซึม

กระบวนการดูดซึมก๊าซที่เป็นสารมลพิษ โดยใช้กระแสของของเหลวค่อนข้างจะซับซ้อน กระบวนการ การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นจากกลไก 2 อย่างคือ ก๊าซจะถ่ายเทจากกระแสก๊าซไปยังผิวร่วมของก๊าซและของเหลว โดยมีการเคลื่อนไหวแบบปั่นป่วน (Turbulent) ที่ใกล้ๆ ผิวร่วมนั่นเอง กระบวนการไหลมีการเคลื่อนไหวแบบลามินาร์ และสารมลพิษจะต้องผ่านเข้าไป โดยกลไกเรียกว่า Molecular Diffusion ส่วนด้านของเหลวเองผิวร่วมจะมีกระบวนการกลับกัน หลังจากทีสารมลพิษได้เคลื่อนเข้าสู่กระแสของเหลว ก็จะมี Turbulent หรือ Eddy Diffusion เกิดขึ้นและนำสารนั้นเข้าสู่ Main Body ของของเหลวต่อไป

2.3.4 ระบบการดูดซับ (Adsorption)

มลพิษที่เป็นก๊าซอาจถูกแยกออกได้โดยการให้ดูดซับติดกับผิวของของแข็ง การดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านในของตัวดูดซับด้วยแรงดึงดูดที่เรียกว่า วาน เดอร์ วาลส์ (Van der Waals' Force) ที่ผิวระหว่างก๊าซกับของแข็งทุกชนิดจะมีแรงดึงดูดนี้เกิดขึ้นแต่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประเภทและลักษณะของก๊าซและของแข็งดูดซับนั้น ในส่วนของการควบคุมมลพิษทางอากาศกระบวนการดูดซับไม่ใช่เป็นกระบวนการควบคุมขั้นสุดท้าย กล่าวคือ ก๊าซมลพิษเพียงแต่ถูกเก็บไว้บนผิวของแข็งดูดซับเท่านั้น หลังจากทีของแข็งดูดซับอิ่มตัวด้วยโมเลกุลของก๊าซแล้ว จะต้องทำการขับโมเลกุลของก๊าซนั้นออกหรือทิ้งของแข็งดูดซับนั้นไป เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับไว้มีความเข้มข้นสูงมาจึงอาจทำ

การขับและนำโมเลกุลของก๊าซนั้นกลับคืนมาได้ง่ายกว่า และเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าก่อนให้ดำเนินกระบวนการดูดซับ โดยทั่วไปแล้ววัตถุประสงค์การใช้กระบวนการดูดซับคือ เพื่อให้ทำให้อากาศบริสุทธิ์ และเพื่อการนำตัวทำละลาย (Solvent) ที่ออกไปกับกระแสก๊าซที่กลับคืนมาใช้ใหม่ โดยมีข้อแตกต่างว่าในกระบวนการดูดซับเพื่อให้อากาศบริสุทธิ์นั้นความเข้มข้นของก๊าซมลพิษจะต่ำมาก กล่าวคือน้อยกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน แต่ก่อให้เกิดกลิ่นรุนแรงมาก หรือเป็นพิษอย่างแรง ส่วนใหญ่แล้วระบบดูดซับที่ใช้เพื่อทำให้อากาศบริสุทธิ์จะเป็นระบบดูดซับที่ชั้นของตัวดูดซับไม่สูงและเป็นระบบขนาดเล็กๆ และเมื่อชั้นของตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยโมเลกุลของก๊าซมลพิษแล้วก็จะใช้วิธีทิ้งไปแล้วเปลี่ยนของใหม่เข้าแทนที่ แต่ในกระบวนการเพื่อนำตัวทำละลายกลับคืนมาต้องใช้ระบบดูดซับที่มีขนาดใหญ่กว่ามากเพื่อควบคุมการระเหยของสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน

2.3.4.1 กระบวนการดูดซับประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

- 1) ขั้นตอนของการฟุ้งของโมเลกุลของก๊าซจากเนื้อก๊าซไปยังผิวนอกของของแข็งดูดซับ
- 2) ขั้นตอนของการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของก๊าซจากผิวนอกของของแข็งดูดซับซึ่งมีพื้นที่ผิวก่อนข้างน้อยไปยังช่องว่างภายในแต่ละอนุภาคของของแข็งดูดซับที่ซึ่งจะเกิดการดูดซับขึ้นเพราะว่ามีพื้นที่ผิวเพื่อการดูดซับมาก
- 3) ขั้นตอนของการที่โมเลกุลของก๊าซถูกดูดติดกับของของแข็งดูดซับ

2.3.4.2 สารดูดซับ (Adsorbent Materials)

สารดูดซับต่างๆ มีลักษณะประจำตัวตามธรรมชาติทางเคมี ปริมาณของพื้นที่ผิว ลักษณะการกระจายของขนาด รูพรุน และขนาดของอนุภาคในการดูดซับทางกายภาพลักษณะที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างตัวดูดซับชนิดต่างๆ คือ ขั้วที่ผิวของสารดูดซับนั้น จะเป็นตัวกำหนดชนิดของไอระเหย ซึ่งตัวดูดซับเฉพาะชนิดหนึ่งๆ ชอบที่จะจับไว้มากที่สุด ในบรรดาสารดูดซับข้างต้น แอ็คทีเวตเตดคาร์บอนเป็นสารดูดซับหลักของชนิดที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงมาก สารดูดซับที่มีขั้วเหมาะที่จะใช้เพื่อการดูดซับไอน้ำที่อาจมีอยู่ในกระแสก๊าซ เนื่องจากว่ามีไอน้ำอยู่ในกระแสก๊าซด้วย ดังนั้น การใช้สารดูดซับชนิดที่มีขั้ว จึงทำให้เกิดข้อจำกัดอย่างมากสำหรับระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

2.3.4.3 ตัวอย่างสารดูดซับที่นิยมใช้

- 1) ผงถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดักจับไอระเหยสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นได้เป็นอย่างดี และมีราคาถูก ผงถ่านกัมมันต์ เตรียมขึ้นได้จากสารหลายชนิด เช่น ไม้ ถ่านหิน มะพร้าว เปลือกของลูกนัท และผลิตภัณฑ์พวกปิโตรเลียม เป็นต้น กระบวนการ Activation เกิดขึ้นใน 2 ขั้นตอนโดยในขั้นตอนแรกเป็นก๊าซคาร์บอนเฮกซันแก่สารป้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับทำให้สารร้อนขึ้น ถึงอุณหภูมิที่สูงเพียงพอ (600 °C) เพื่อไล่สารระเหยได้ออกให้หมด เหลือเพียงแต่องค์ประกอบคาร์บอนเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่

ผิวให้แก่คาร์บอนจากขั้นตอนที่หนึ่ง ในขั้นตอนที่สองให้คาร์บอนนั้นได้รับการ Activation โดยการพ่นไอน้ำ อากาศ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิซึ่งสูงขึ้น ก๊าซเหล่านี้จะเข้ากัดกร่อนคาร์บอน และเพิ่มโครงสร้างของรูพรุนขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ และชนิดของสารป้อนมีผลอย่างมากต่อคุณภาพ

2) ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลทำมาจากโซเดียมซิลิกา เมื่อผสมกับกรดกำมะถันจะได้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตคล้ายเจล จากนั้นทำให้แห้งและอบโดยขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเจล ทำให้สามารถผลิตเกรดต่างๆ กัน ซึ่งมี Activity ต่างกันได้โดยปกติแล้วจะใช้ซิลิกาเจลเพื่อกำจัดไอน้ำออกจากกระแสก๊าซทิ้ง แต่จะไม่มีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 260 °C

3) โมเลกุลลาร์ซีฟ

โมเลกุลลาร์ซีฟเป็นสารดูดซับที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ฉะนั้นจึงมีรูพรุนกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางหนึ่งๆ สามารถใช้โมเลกุลลาร์ซีฟเพื่อกำจัดหรือแยกก๊าซที่มีขนาดและรูปร่างแบบโมเลกุลออก ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการกลั่นน้ำมันบางครั้งจะใช้โมเลกุลลาร์ซีฟ เพื่อแยกสารพาราฟินชนิดที่มีโซ่ตรงออกจากสารประกอบที่เป็นกิ่งและที่เป็นไซคลิก แต่การใช้ประโยชน์หลักของโมเลกุลลาร์ซีฟ คือ เพื่อกำจัดไอน้ำออกจากกระแสก๊าซ

4) อลูมินัมออกไซด์ (แอคทิเวตเตดอลูมินา)

เตรียมขึ้นจากอลูมินา หรือบอไซด์ ที่ได้รับการแอคทิเวชัน โดยการทำให้ร้อนขึ้นในบรรยากาศของ ก๊าซเฉื่อย เพื่อให้เกิดเป็นเม็ดอลูมินัมออกไซด์พรุน โดยปกติแล้วจะไม่ใช้อลูมินัมออกไซด์ในงานด้านการควบคุมมลพิษทางอากาศ แต่จะใช้เพื่อทำให้ก๊าซแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความดันสูงและจะใช้เป็นสารรองรับในปฏิกิริยา ใช้ตัวช่วยปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น การให้อลูมินาดูดซึมแพลทินัม หรือแพลเลเดียมเพื่อใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ตัวช่วยปฏิกิริยา

2.3.5 การทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์ (4) การทำเสถียรและการทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตราย โดยการทำให้เสถียรจะมีการใส่สารเคมีหรือวัสดุอื่นๆ ผสมกับของเสียอันตราย เพื่อไม่ให้สารอันตรายกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดความเป็นพิษของของเสียอันตราย ส่วนการทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการทำให้ของเสียแข็งตัว คือการทำให้ของเสียถูกเปลี่ยนสภาพทางกายภาพ

2.3.5.1 หลักการ

การทำเสถียรและการทำก้อนแข็งจะช่วยป้องกันการเกิดการชะของเสีย ซึ่งต่อไปนี้เป็นข้อดีของการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง

- 1) ช่วยป้องกันการละลายของสารปนเปื้อนออกมา
- 2) ช่วยลดขนาดพื้นที่ผิวของของเสีย

3) ช่วยเสริมสภาพของของเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วทางด้านกายภาพ ให้อยู่ในสภาพที่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม

2.3.5.2 การทำเสถียร (stabilization)

การทำเสถียร เป็นกระบวนการที่มีการใส่วัสดุหรือสารเพิ่มเติมที่ใช้ลดความอันตรายของของเสีย ทำให้ลดอัตราการเคลื่อนที่ออกของสารปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม และช่วยลดระดับความเป็นพิษ เปรียบเสมือนเป็นกระบวนการบำบัดของเสีย แต่ลักษณะทางกายภาพอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.3.5.3 การทำก้อนแข็ง (Solidification)

การทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการที่มีการใส่สารที่ก่อให้เกิดวัสดุแข็งตัวผสมกับของเสียอันตราย ทำให้ได้ของแข็งที่มีความแข็งแรง รับแรงกดได้มากขึ้น และช่วยลดความสามารถของการซึมผ่านได้ วัสดุก่อให้เกิดการแข็งตัวได้แก่ ปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ของเสียอันตรายมีเสถียรภาพดีขึ้น

2.3.5.4 กลไกของระบบ

กลไกของระบบการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลให้ของเสียอันตรายถูกปกปิดหรือถูกยึดเกาะติดจนแน่น ไม่สามารถหลุดออกมาได้ ซึ่ง Lagrega และคณะ (5) ได้แสดงรายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนไว้ในตาราง 7

ตาราง 7 รายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (5)

กลไกการจับยึด	รายละเอียด
1) Macroencapsulation	เป็นวิธีทางกายภาพ ซึ่งเป็นลักษณะของรูภายในที่ไม่ต่อเนื่องจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อิสระ
2) Microencapsulation	เป็นวิธีทางกายภาพ ซึ่งของเสียจะถูกจับภายในโครงสร้างของผลึก โดยจะจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนมาก
3) Absorption	เป็นวิธีทางเคมีซึ่งใช้ในการปรับปรุงให้ส่วนของลักษณะของก้อน เพื่อให้สะดวกต่อการเป็นก้อน กระบวนการแรกของวิธีนี้คือ การดูดซับของเหลวที่อยู่ในรูปของเสีย
4) Adsorption	เป็นวิธีการทางเคมี เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวและยังเป็นวิธีการทำให้เกิดการจับตัวกันซึ่งอาจจะหมายรวมถึง พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์ วาล์ว มักจะเกิดเมื่อวัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสานของของเสีย
5) Precipitation	เป็นวิธีการทางเคมีเพื่อทำให้เสถียรมากขึ้นโดยเป็นวิธีที่ใช้กับของเสียประเภทอนินทรีย์ สารที่เป็นตัวก่อให้เกิดผลึก ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอเนต และฟอสเฟต

กลไกการจับยึด	รายละเอียด
6) Detaxification	เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการทำให้เสถียร เป็นการเปลี่ยนทางเคมีเพื่อให้เกิดในรูปอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีความเป็นพิษเลย

2.3.5.5 สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binding Agents)

วิธีการทำให้เสถียรและการทำก้อนแข็ง เป็นวิธีที่อาศัยการเติมสารทำให้เสถียรหรือสารทำให้อ่อนแข็งซึ่งมีใช้กันหลายชนิด พบได้ทั่วไปเช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว เป็นต้น แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่านั้น

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วินิต ช่อวิเชียร (6) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หิน กรวด ทรายและน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะแข็งแรงทนทานคล้ายหิน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 1,400-1,500 °C วัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน เหล็ก และอลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนที่พอเหมาะเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ

เมื่อเผาวัตถุดิบปูนซีเมนต์ ออกไซด์ของแคลเซียม ซิลิกอน เหล็ก และอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ดังตาราง 8

ตาราง 8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (6)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- 1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้เร็ว ให้กำลังสูง เกิดความร้อนมาก
- 2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูง เกิดความร้อนน้อย
- 3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับได้เร็ว เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมน้ำ ให้ความร้อนสูงโดยจะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่มีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต
- 4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

2) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.15) และ ASTM แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC)

สำหรับใช้ทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใด ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าปกติและสำหรับใช้ในงานก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรงหรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง

มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อยกว่าประเภทที่ 1 โดยจะต้องไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใด ที่เกิดความร้อน มีความทนซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์แข็งเร็วหรือซูปเปอร์ซีเมนต์

สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการบดละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเปลี่ยนสัดส่วนโดยเพิ่มปริมาณส่วนผสมของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตรแคลเซียมอลูมิเนตมากขึ้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ

ผลิตขึ้นโดยใช้ไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อย แต่ใช้ไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เนื่องจากใช้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำขณะแข็งตัว

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง

เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง เพราะมีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตน้อยมาก ปกติไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ให้ตีไม่ควรเกิน 4 เปอร์เซ็นต์สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง

3) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ โดยสารประกอบดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากัน และเปลี่ยนเป็นวัสดุประสาน ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวมๆ ว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ประกอบไปด้วยแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (C-S-H) 50-90 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) 20-25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก และมีขนาดเล็กโดยมีการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นขึ้น เมื่อผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกผสมกับน้ำเกิดเป็นไฮเดรตคอมพาวนด์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกมาจากแคลเซียมซิลิเกต ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) แล้วเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จนกว่าสารละลายนั้นจะอิ่มตัวไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือจนกว่าสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

1) แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) มีสูตรเคมีดังนี้ ซึ่งจัดเป็นวัสดุ $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ประสาน

2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, C-H) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

4) การทดสอบหลังผ่านการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง

ในการทดสอบวัสดุใหม่ที่ได้ทำการทำเสถียรและการทำก้อนแข็งแล้ว เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งแรง ความทนทาน ความสามารถต้านทานการชะละลายออกมาและอื่นๆ ทั้งการวัดเชิงกายภาพ และเชิงเคมี โดยทำการทดสอบดังนี้

1) การทดสอบหาค่าความสามารถในการรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength)

2) การทดสอบหาค่าความหนาแน่น

3) การทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด

โดยในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (2540) กำหนดเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ได้แล้วที่ผ่านการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งไว้ดังนี้

- 1) สามารถรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1633 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรหรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secure Landfill) ได้อย่างปลอดภัย
- 2) มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
- 3) มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายเจือปนในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) โดยตะกั่วไม่เกิน 5 มก./ล. และเบนซีนไม่เกิน 0.5 มก./ล. เป็นไปตามเกณฑ์การสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช่แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และการทำเสถียรอย่างสมบูรณ์ก่อนนำไปฝังกลบ

2.4 จีโอพอลิเมอร์

2.4.1 ความหมายของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิเซียเลต (polysialate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (9) โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ 4



โดย M คือธาตุอัลคาไลน์

- คือการยึดเกาะพันธะ

x คือจำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n คือจำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization

w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ $(\text{AlO}_4)^5-$ และ $(\text{SiO}_4)^4-$ โดยมีโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na^+) หรือโพแทสเซียม (K^+) ในการทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ $(\text{AlO}_4)^5-$ การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องเผาที่อุณหภูมิ

สูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลง ซึ่งการใช้พลังงานที่ลดลงจะนำไปสู่การลดผลกระทบต่อโลกร้อนอีกด้วย

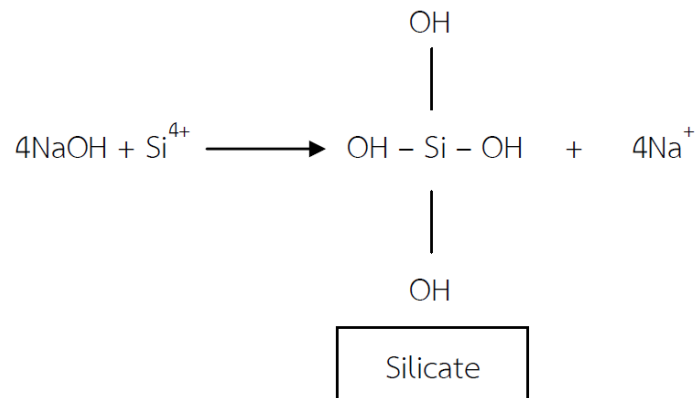
จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์

2.4.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

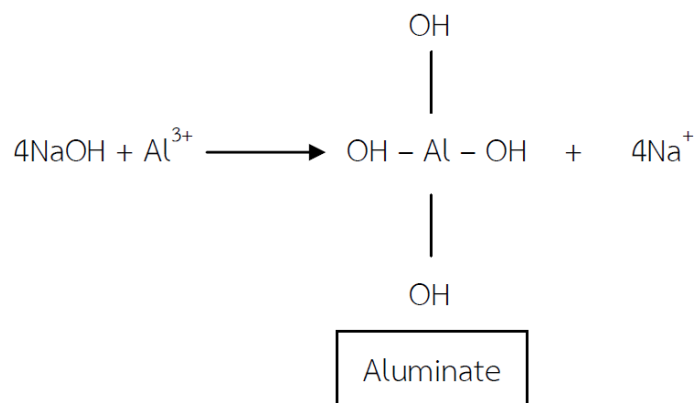
สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) สารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติ และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี โดยปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (10) คือ

2.4.2.1 การชะละลาย (dissolution)

เกิดเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก ได้เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้าของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ ในลักษณะของเจล (10) การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate และ Aluminate ดังแสดงในภาพ 4 และ 5 (11) ตามลำดับ

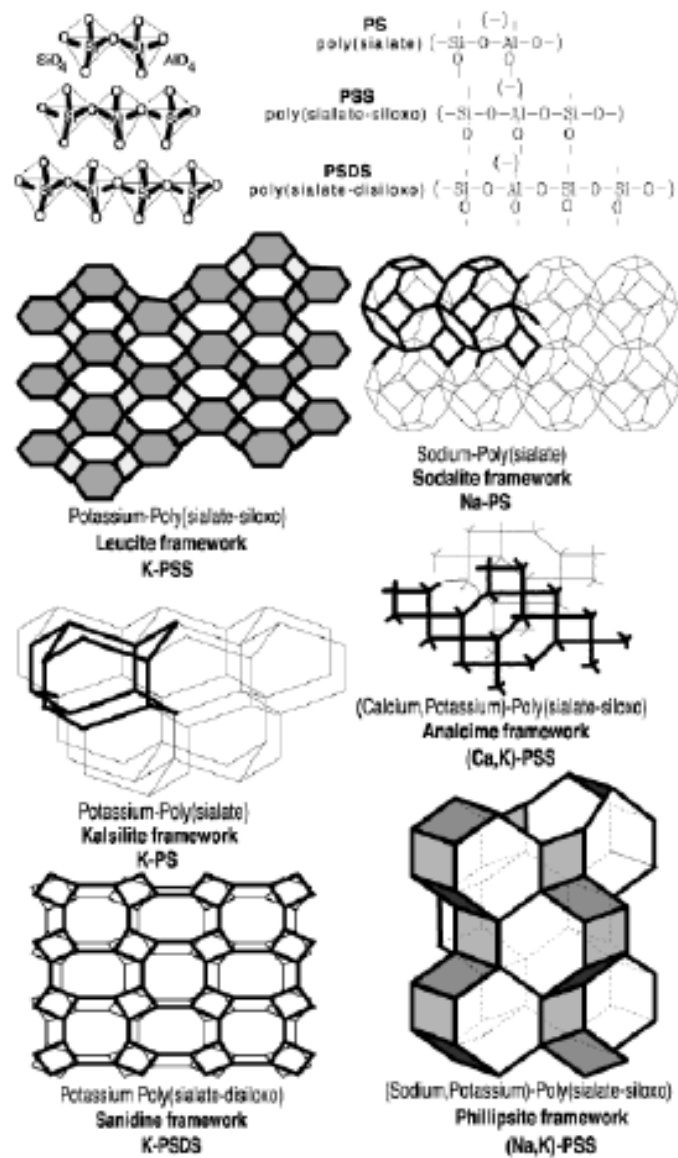


ภาพ 4 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Silicate (11)

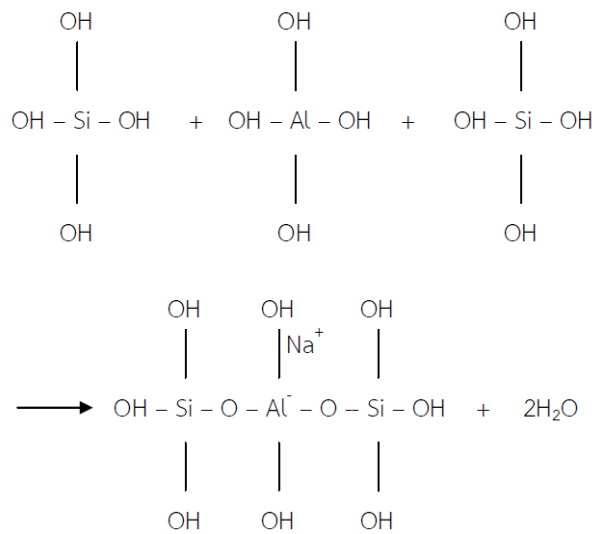


ภาพ 5 การเกิดปฏิกิริยาของ Aluminate (11)

2.4.2.2 การทำปฏิกิริยาควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ดังแสดงในภาพ 6 ซึ่งได้แก่ พอลิเซียเลต (polysialate, PS) , พอลิเซียเลตไฮลอกโซ (polysialatesiloxo, PSS) และพอลิเซียเลต-ไดไฮลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับการเกิดปฏิกิริยาเคมี (11) ดังแสดงในภาพ 7

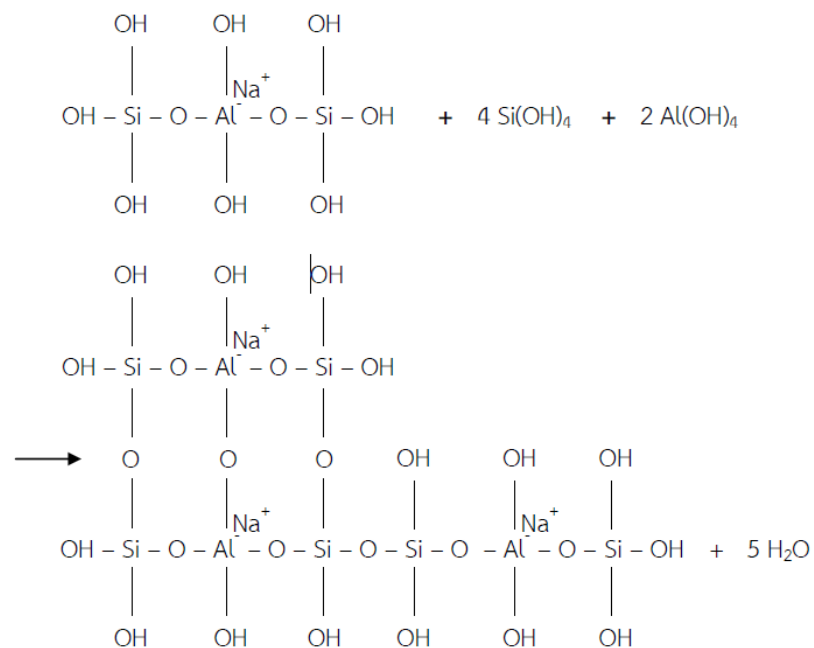


ภาพ 6 โครงสร้างของสารซีโอพอลิเมอร์หรือพอลิเซียมเลต

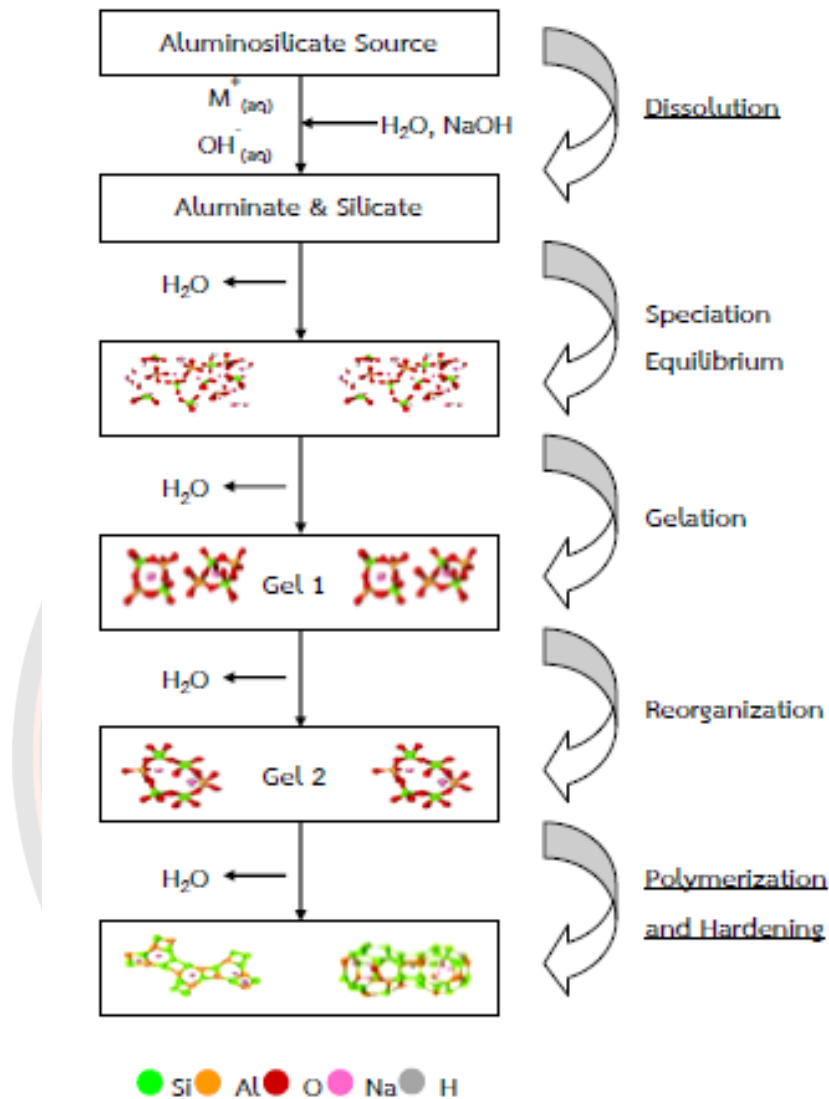


ภาพ 7 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต (11)

จากนั้นจะทำปฏิกิริยาถูกลูโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ (12) การเกิดปฏิกิริยาเคมี (11) ดังแสดงในภาพ 8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซีซิลิเกต ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพ 8 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไฮดรอกซีซิลิเกต (11)



ภาพ 9 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ภายหลังจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะได้ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นอสัณฐานซึ่งโดยทั่วไปของแข็งแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึก (crystalline solid) เป็นของแข็งที่มีพื้นผิวที่ทำมุมกันด้วยค่าที่แน่นอน ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงเป็นระเบียบของอนุภาคของของแข็ง ผลึกที่มีขนาดใหญ่เมื่อทำให้เล็กลงก็ยังคงรักษาลักษณะรูปผลึกเดิมอยู่ สารบางอย่างอาจมีรูปผลึกได้หลายแบบซึ่งเราจะเรียกว่าปรากฏการณ์อัญรูป (polymorphism) เช่น เพชร แกรไฟต์ สารบางชนิดอาจจะมีรูปร่างผลึกที่

เหมือนกันได้ ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ภาวะรูปร่างเหมือน (isomorphism) เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพลีเอทิลีนคลอไรด์ เป็นต้น นอกจากนี้ ผลึกยังมีสมบัติที่เรียกว่า anisotropy อันได้แก่ความแข็งแรงทนทานทางกล ดัชนีหักเห และการนำไฟฟ้าถ้าวัดในทิศทางที่ต่างกันค่าที่ได้จะไม่เท่ากัน

คุณสมบัติของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึก

1) อนุภาคเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบแบบแผนทางเรขาคณิตเป็นสามมิติ เรียกว่า Crystal lattice

2) ผิวหน้าเรียบ มุมระหว่างผิวหน้ามีค่าแน่นอน

3) มีจุดหลอมเหลวแน่นอน

4) มีสมบัติไม่เหมือนกันทุกทิศทาง

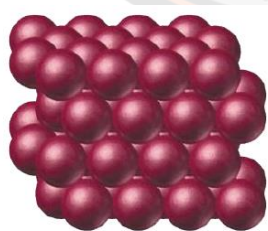
ของแข็งอสัณฐาน (amorphous solid) เป็นของแข็งที่อนุภาคอยู่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนเช่น แก้ว พอลิเมอร์ ยางธรรมชาติ ฯลฯ มีสมบัติทั่วไป คล้ายผลึกแตกต่างกันที่ไม่มีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน ดังนั้นจึงมีสมบัติที่เรียกว่า isotropy คือ ค่าดัชนีหักเห การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติอื่นๆ จะเหมือนกันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ของแข็งอสัณฐานจะมีจุดหลอมเหลวไม่เด่นชัด เมื่อได้รับความร้อนจะค่อยๆ อ่อนตัวจนกระทั่งไหลได้ อุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวจึงอยู่ในช่วงที่ยาวต่างจากผลึกซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัดและอุณหภูมิที่ของแข็งชนิดนี้หลอมตัวอยู่ในช่วงที่แคบ

1) อนุภาคเรียงตัวโดยไม่มีระเบียบแบบแผน

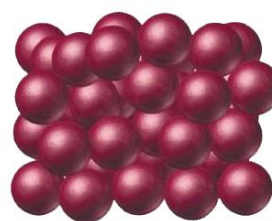
2) ผิวหน้าไม่เรียบและมุมต่างๆ กัน

3) ช่วงวงการหลอมเหลวกว้าง

4) มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง



(ก) crystalline solid



(ข) amorphous solid

ภาพ 10 ลักษณะโครงสร้างผลึกของของแข็ง

2.4.2.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

1) สารปอซโซลลาน (pozzolanic) ตั้งต้นคือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าขานอ้อย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปอซโซลลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินไดอะตอมลำปาง (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น (12)

2) อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้คือ สารละลายเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอพอลิเมอร์คุณภาพดีกว่า แต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่สูง หาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลว ไม่มีสี

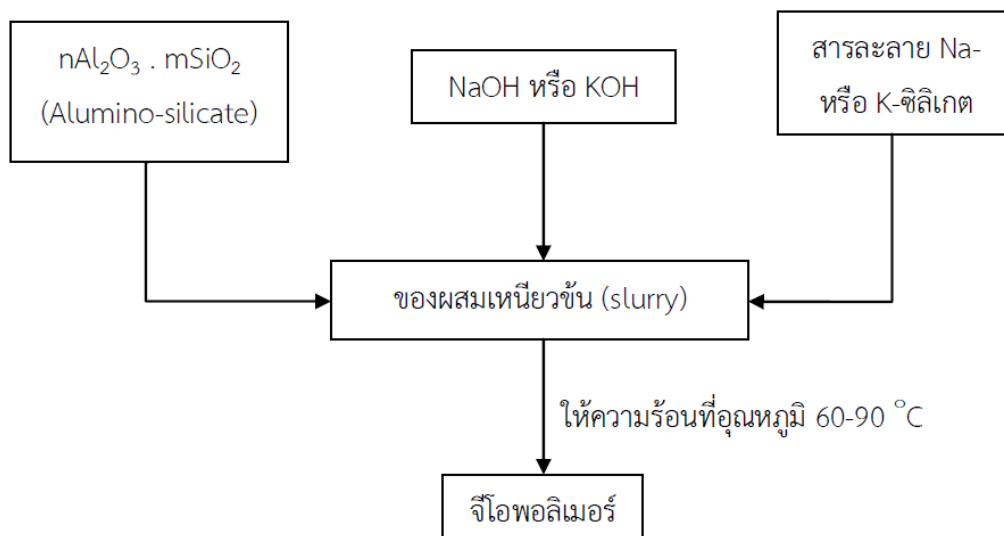
2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือ เป็นเกร็ด ลักษณะทั่วไปเป็นของแข็ง สีขาวสะอาด ซึ่งสามารถนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

3) สารประกอบซิลิเกต สารประกอบซิลิเกตที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีฟ้าเข้ม โซเดียม ซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามากออกเป็น 3 ชนิด ดังตาราง 9

ตาราง 9 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1:2.17	1:2.34 ถึง 1:2.58	1:3.18 ถึง 1:3.59
เหล็ก ไม่เกินร้อยละ	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ไม่เกินร้อยละ	0.21	0.21	0.21

4) น้ำสารจีโอพอลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกลั่น โดยแผนผังการผลิตจีโอพอลิเมอร์แสดงดังภาพที่ 11



ภาพ 11 แผนภูมิการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (13)

2.4.3 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งาน

จีโอพอลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ตั้งแต่การค้นพบจีโอพอลิเมอร์เป็นครั้งแรกเมื่อปี 1976 ได้มีการพัฒนาและถูกนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมแล้วในประเทศแถบยุโรป และสหรัฐอเมริกาซึ่งนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้หลายด้าน ได้แก่ จีโอพอลิเมอร์โฟมใช้เป็นฉนวนความร้อน จีโอพอลิเมอร์ซีเมนต์ใช้ในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอแทนปูนซีเมนต์ จีโอพอลิเมอร์เซรามิก

ใช้ทำกระเบื้องเนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ผสม (geopolymer composite) ใช้เป็นเนื้อเมทริกซ์ของเส้นใยเสริมแรง

สำหรับวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทย ยังไม่ได้นำเอาเทคโนโลยีจีโอพอลิเมอร์มาใช้งาน เนื่องจากความรู้ในด้านจีโอพอลิเมอร์ยังไม่แพร่หลาย หากมีการเผยแพร่องค์ความรู้และการประยุกต์ใช้อย่างจริงจังจากนักวิชาการที่มีประสบการณ์การวิจัย จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติ เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและการผลิตจีโอพอลิเมอร์ใช้พลังงานในการเผาไหม้น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ (14)

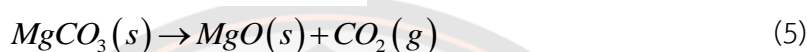


ภาพ 12 การนำจีโอพอลิเมอร์ไปใช้งาน

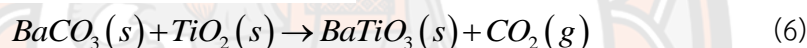
(ก) เป็นวัสดุซ่อมแซมพื้นสนามบิน (ข) จีโอพอลิเมอร์พูน และ (ค) ผนังจีโอพอลิเมอร์ (14)

2.5 กระบวนการเตรียมแบบปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction)

วิธีการนี้ อาศัยการเกิดปฏิกิริยาที่มีการสลายตัวทำปฏิกิริยา ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ด้วยความร้อน แล้วได้เป็นของแข็งชนิดใหม่กับแก๊ส ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมผลึกของสารประกอบออกไซด์อย่างง่าย ต่างๆ ที่มีการใช้สารคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ไนไตรท์ ซัลไฟด์ แอซิเตท ออกซาเลต แอลคอกไซด์ และเกลือของโลหะ (metal salts) ต่างๆ ดังเช่น ตัวอย่างการเตรียมผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ โดยอาศัยการสลายตัวด้วยความร้อนของแมกนีเซียมคาร์บอเนต พร้อมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นตามสมการที่ 5



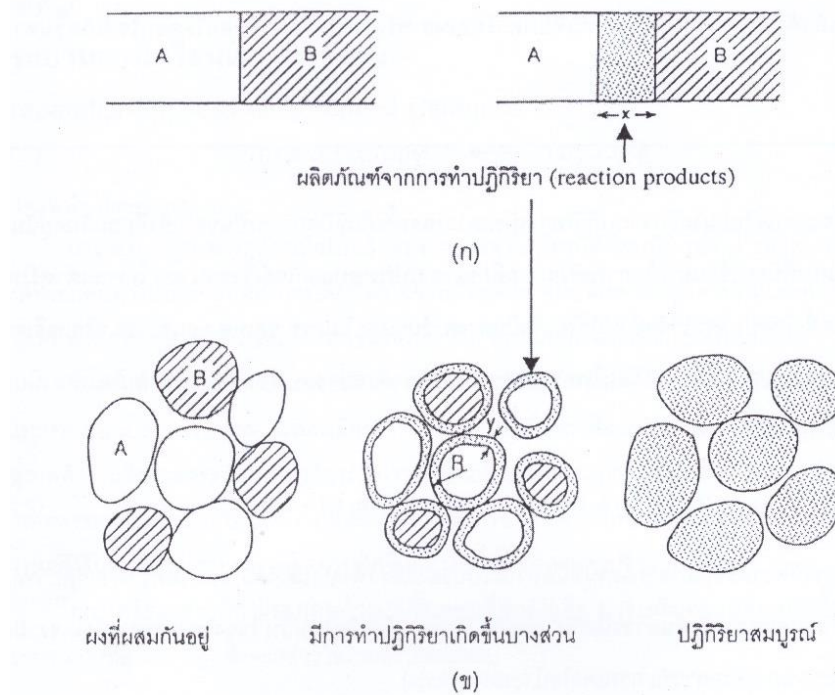
ส่วนการเตรียมผลึกจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ผสมกันอยู่นั้นก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ที่นิยมใช้กันมากในการเตรียมผลึกของสารประกอบออกไซด์เชิงซ้อน เช่น ไททานेट เฟอร์ไรต์ และซิลิเกต ซึ่งโดยปกติจะใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่เป็นสารคาร์บอเนต ไนเตรท ซัลเฟต ออกซาเลต หรือแอซิเตท ดังตัวอย่างของการเตรียมแบเรียมไททานेटจากปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนตกับไทเทเนียมออกไซด์ตามสมการที่ 6



การให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งเพื่อทำให้เกิดการสลายตัวหรือเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่นั้นในวงวิชาการทางด้านเซรามิกจะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่าการแคลไซน์ (calcinations)

โดยปกติการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาคผงของสารตั้งต้นที่ผสมกันจะมีความหลากหลายของปฏิกิริยามากกว่าในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายที่เป็นผลึกเดี่ยวอย่างมากโดยสามารถแสดงปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างผลึกเดี่ยวได้ด้วยภาพ 13(ก) จากหนังสือเรื่องไททานิคและระหว่างอนุภาคผงที่ผสมกันอยู่ด้วยภาพ 13(ข)

มีปัจจัยสำคัญอยู่หลายประการที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็งระหว่างอนุภาคผงของตัวทำปฏิกิริยาอาทิเช่น ธรรมชาติทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาและสารที่เกิดขึ้นใหม่ขนาดของอนุภาค ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความแตกต่างของขนาดอนุภาคในผงผสม ความเป็นเนื้อเดียวกันของผงผสม สภาวะของบรรยากาศ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

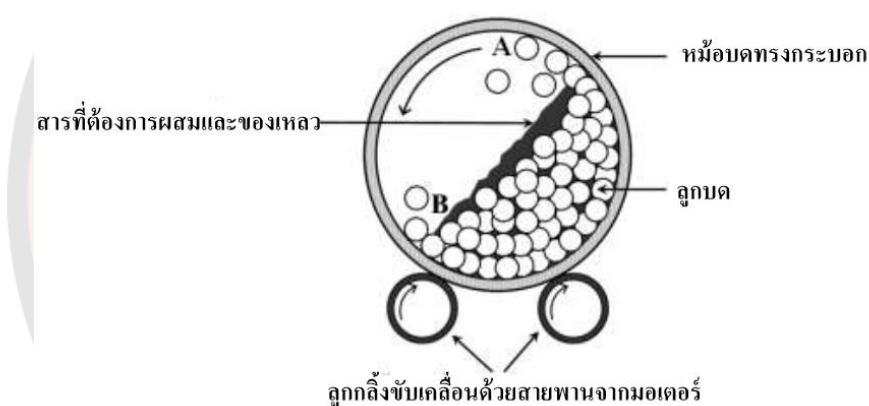


ภาพ 13 ลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
(Solid state reaction) ระหว่าง (ก) ผล็กเดี่ยว และ (ข) อนุภาคผงที่ผสมกันอยู่ (15)

2.6 กระบวนการบดย่อย ผสมด้วยลูกบอล (Ball-milling)

กระบวนการเตรียมผงให้มีขนาดเล็กด้วยการทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออกโดยอาศัยแรงกล เรียกว่า การบด (Comminution) ซึ่งได้แก่ การบดหยาบ (Crushing) การบดละเอียด (Grinding) และการบดย่อย (Milling) กระบวนการเหล่านี้ได้รับความนิยมสูง ในการนำมาใช้เพื่อลดค่าขนาดอนุภาคผงเฉลี่ย ใช้ทำลายอนุภาคผงที่มีรูพรุน หรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ข้างในให้แตกออก ช่วยปรับพฤติกรรมการแจกแจงอนุภาคด้วยการลดขนาดของอนุภาคที่โตที่สุดลง ทำให้จำนวนของอนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ช่วยปรับปรุงรูปร่างของอนุภาค ช่วยแยกกลุ่มก้อนหรือกระจุกอนุภาคออกจากกัน และนอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผสมอนุภาคผงต่างชนิดกันให้เกิดการผสมผสานเข้าไปพร้อมๆ กับการลดขนาดของอนุภาคกระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball-milling) ก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในปัจจุบันซึ่งเป็นกระบวนการบดย่อยผสมอนุภาคโดยอาศัยการหมุนหม้อบด ซึ่งเป็นแท่งกลวงทรงกระบอกมีฝาเปิด-ปิดอยู่ปลายด้านหนึ่ง ดังภาพ 14 สำหรับหม้อบดในระดับห้องปฏิบัติการมักทำด้วยพลาสติก ที่สามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนมาจากการบดย่อยได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ในหม้อบดจะมีการใส่สารที่จะทำการบดผสมพร้อมลูกบอลบด (Grinding

media) และสารที่ช่วยในการหล่อลื่น ลงไปในปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของหม้อบด โดยจะต้องพยายามปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในหม้อบด ให้ระบบทั้งชุดสามารถเกิดพฤติกรรมการบดย่อย กล่าวคือ ลักษณะของลูกบดจะต้องเคลื่อนที่ในลักษณะคล้ายกับตัวอักษร D โดยมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ขึ้นไปจนถึงตำแหน่ง A แล้วตกลงมากระแทกกับวัสดุด้านล่าง จากนั้นมีการหมุนเบียดเสียดกัน และมีการเลื่อนไหลเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ทำให้อนุภาคของสารมีขนาดลดลง เนื่องจากการกระแทกของลูกบด ถูกขัดระหว่างหม้อบด และลูกบดกับผนังหม้อบดในขณะที่พฤติกรรมเหล่านี้สามารถช่วยให้อนุภาคมีขนาดลดลง การเกิดสิ่งเจือปนก็อาจมีขึ้นในขั้นตอนเหล่านี้เช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนของลูกบด หรือผนังของหม้อบดที่สึกกร่อนหลุดปะปนออกมาด้วย ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันได้ โดยการเลือกใช้ลูกบดที่มีคุณภาพสูง และหม้อบดที่สามารถกำจัดออกได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น หม้อบดพลาสติก เป็นต้น



ภาพ 14 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling)

2.7 การแคลไซน์ (calcination)

การแคลไซน์เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ เกิดมีอันตรกิริยาต่อกัน โดยอาศัยกลไกการแพร่ระหว่างกันของพวกไอออน จึงเป็นวิธีการช่วยลดขอบเขตของการแพร่ที่จะต้องทำให้เกิดขึ้นในช่วงของขั้นตอนการซินเตอร์ลง เพื่อให้ได้การเป็นตัววัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงอาจจะพิจารณาการแคลไซน์ว่าเป็นเพียงส่วนหนึ่งของขั้นตอนในการผสมสารก็ยิ่งได้ ซึ่งเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์นั้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมพฤติกรรมการหดตัวของวัสดุในช่วงการซินเตอร์ เฟสสุดท้ายที่เราต้องการนั้นอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในตอนนี้ แต่เกรเดียนต์ทางเคมีที่ยังคงหลงเหลืออยู่ภายในสารก็อาจจะไปช่วยเสริมกระบวนการซินเตอร์ได้ใน

ภายหลัง สิ่งที่สำคัญก็คือว่าการแคลไซน์นั้นควรจะให้ผลผลิตที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามที่ต้องการให้มากที่สุด การแคลไซน์สามารถทำได้โดยการใส่อนุภาคผงที่ผ่านกระบวนการผสมสารมาแล้วลงในถ้วยหรือเบ้า (crucible) สำหรับเผาสารที่เป็นชุด ๆ หรือในการเผาแบบต่อเนื่อง ซึ่งถ้วยเผาสารที่นำมาใช้ก็ควรจะมีฝาปิดด้วยเพราะถ้าหากว่าสารที่จะเผานั้นมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถเกิดการระเหยได้ง่าย อย่างเช่น ในกรณีที่มีตะกั่วออกไซด์รวมอยู่ด้วย พื้นผิวของถ้วยเผาสารที่มีการสัมผัสกับอนุภาคผง โดยตรงจะต้องไม่เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกัน เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการปนเปื้อนและเพื่อจะนำถ้วยเผาสารกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

เนื่องจากว่าอนุภาคผงเป็นวัสดุที่มีสภาพนำความร้อนต่ำดังนั้นอุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอเพียงพอก็มักจะอยู่แถวๆบริเวณที่ลึกลงไปจากผิวหน้าของอนุภาคผงเพียงไม่กี่เซนติเมตรเท่านั้น ถ้าหากว่ามีการใช้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นเวลานาน (เช่นปรกติที่ใช้กัน)เพียง1หรือ2ชั่วโมงนอกจากนี้ กระบวนการแคลไซน์ยังสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการใส่เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) ซึ่งประกอบด้วยท่อปลายปิดที่มีการหมุนตัวอย่างช้าๆ ไปรอบๆ แกนหมุนที่มีการวางตัวอยู่ในแนวนอน เริ่มจากการใส่ผงลงมาจากทางด้านบนของท่อจนมาโผล่ที่ด้านล่างในสถานะต่างๆ ตามที่ต้องการโดยปรกติแล้ว เตาเผาแบบนี้จะใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของน้ำมันหรือแก๊สเป็นหลัก

เนื่องจากว่าผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมักจะมีการยึดเกาะกันของอนุภาคอยู่ในรูปของก้อนหยาบ จึงต้องนำมาทำการบดย่อยให้เป็นผงละเอียด หรือทำเป็นน้ำสลิบที่มีความเหมาะสมสำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไปอีกทีหนึ่ง โดยจะต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของปัญหาการปนเปื้อนด้วย โดยปรกติการลดขนาดของอนุภาคในช่วงเริ่มต้นเพื่อเตรียมอนุภาคผงให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบดย่อยในขั้นตอนต่อไปนั้น สามารถจะทำได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่หลากหลายชนิด อาทิเช่น เครื่องบดหยาบแบบฟันฉลาม (jaw-crusher) สามารถจะทำให้ก้อนวัสดุที่มีขนาดในระดับเซนติเมตรลดลงมาอยู่ในระดับมิลลิเมตรได้ ในขณะที่การบดย่อยด้วยค้อน (hammer-mill) ซึ่งประกอบด้วยการหมุนของแกนที่มีหนามเหล็กยื่นออกไปรอบทิศทางตีไปยังวัสดุที่ใส่เข้ามา สามารถทำให้ได้อนุภาคผงที่มีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากวิธีการใช้เครื่องบดหยาบแบบฟันฉลาม

2.8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลาย (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับวิชายาระบบโครงสร้างผลึก รังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอำนาจการทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 – 100 อังสตรอม การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร

นั่นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวล้วนเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งหลักการดังกล่าวเหล่านี้เราจึงสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารได้ดังนี้ (16)

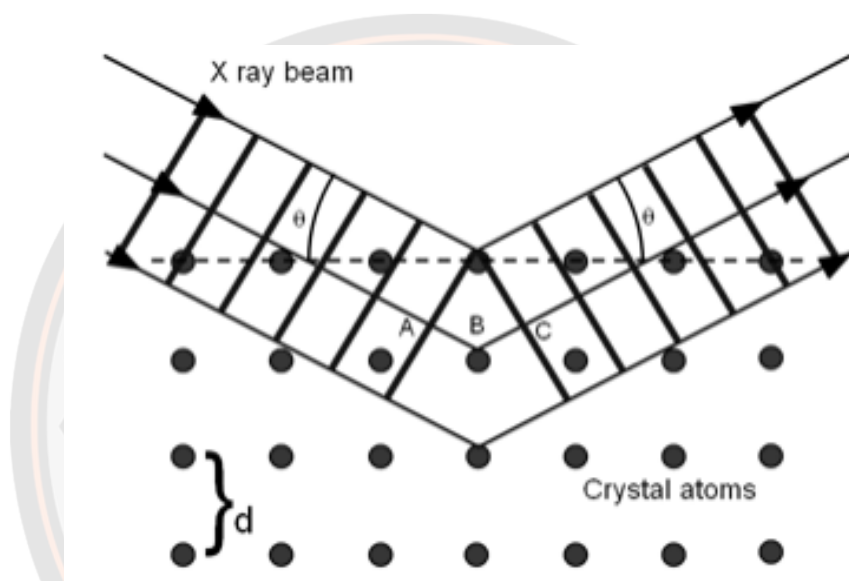
- 1) ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสารทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ
- 2) ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี
- 3) ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์มีทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของนิวเคลียสธาตุกัมมันตรังสีและที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้นด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งชนอะตอม ทำให้เกิดอันตรกิริยา ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรต่าง ๆ ของอะตอมมีค่าสูงขึ้นเกิดภาวะเข้าสู่ปกติ โดยมวลของอะตอมไม่เปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกิน ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมาในลักษณะพัลส์ (Pulse) จากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับการกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า “รังสีเอกซ์” ซึ่งแบ่งได้ 2 ชนิด ตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอน คือ

- 1) รังสีเอกซ์เฉพาะตัว มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดียว (monochromatic X-ray) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอน ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุชนิดอื่น ๆ หรือโฟตอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม แล้วถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชั้นในวงโคจรได้รับพลังงานเพิ่มสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นวงโคจร ทำให้หลุดจากวงโคจรเกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรชั้นใน ทำให้อะตอมอยู่ในภาวะที่ถูกกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานลงสู่ภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรในชั้นถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรชั้นในด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอกซ์ แล้วเข้ามาแทนที่ช่องว่างของวงโคจรชั้นใน พลังงานส่วนเกินนี้จะมีค่าเท่ากับความต่างระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะวงโคจรของอิเล็กตรอน และชนิดของธาตุนั้น ๆ จึงมีพลังงานเฉพาะค่า

- 2) รังสีแบบต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงสูงสุด ปรากฏการณ์ของการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่สนามคูลอมบ์ (Coulomb field) บริเวณใกล้นิวเคลียส ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตบริเวณดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ก่อนที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้นิวเคลียสที่เกิดจากประจุของอะตอม อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วน อันเนื่องจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน ดังนั้นพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จึงมีค่ากระจายต่อเนื่องจากพลังงานต่ำสุดถึงสูงสุดของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ถ้าอิเล็กตรอนปฐมภูมิมี

พลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมหลุดออกได้ก็จะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะค่าปะปนซ้อนอยู่กับสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องด้วยเสมอ การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาที่ความยาวคลื่นใด ๆ ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่คายออกมา ซึ่งความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดเกิดจากการที่อิเล็กตรอนคายพลังงานที่ได้รับมาทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดโดยไม่ขึ้นกับชนิดของเป้าหมายที่ใช้เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนจะกระเจิงและส่วนที่เหลือก็จะผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอมดังภาพที่ 15



ภาพ 15 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ (16)

ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆ กันลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน สิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการ คือ

- 1) รังสีที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- 2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เมื่อปี ค.ศ. 1912 แบรกก์ได้ยิงลำรังสีเอกซ์แคบ ๆ กระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนและการกระเจิงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับอะตอม O, P และ R ถ้า

$$SQ + QT = n\lambda \quad (7)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเต็ม รังสีที่กระเจิงจะอยู่ในเฟสที่ OCD ผลึกก็จะทำหน้าที่สะท้อนรังสีเอกซ์ จะเห็นว่า

$$SQ = QT = d \sin \theta \quad (8)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก เขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (9)$$

เรียกสมการนี้ว่า สมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ซึ่งมีประโยชน์มาก สำหรับการศึกษามีโครงสร้างเป็นระเบียบ เช่น สารที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) และผลึกเชิงซ้อน (polycrystalline) เพราะในสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเรียงตัวของอะตอมเป็นลักษณะเฉพาะ เมื่อเราทราบถึงค่ามุมที่เกิดการเลี้ยวเบนไปของรังสีเอกซ์เมื่อชนกับอะตอมของสาร เราจะทราบถึงระยะห่างระหว่างแต่ละอะตอมของสารนั้นๆ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาชนิดของสาร (qualitative analysis) รวมไปถึงสมบัติทางกายภาพของสารนั้น ๆ อีกด้วยการคำนวณหาค่าคงที่แลตทิซ c , a และค่าอัตราส่วน c/a สามารถกระทำได้โดยอาศัยข้อมูลจากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน และจากสมการ (10)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (10)$$

ในระบบเทตระโกนัลนั้นค่าแลตทิซ a มีค่าเท่ากับแลตทิซ b แต่ไม่เท่ากับแลตทิซ c ($a = b \neq c$) ดังนั้น จากสมการ 10 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (11)$$

หรือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = (h^2 + k^2) + \frac{l^2}{(c/a)^2} \quad (12)$$

สำหรับเลตไททาเนตสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วน c/a ได้โดยนำค่า d -spacing d_{002} และ d_{200} มาคำนวณตามสมการ (13)

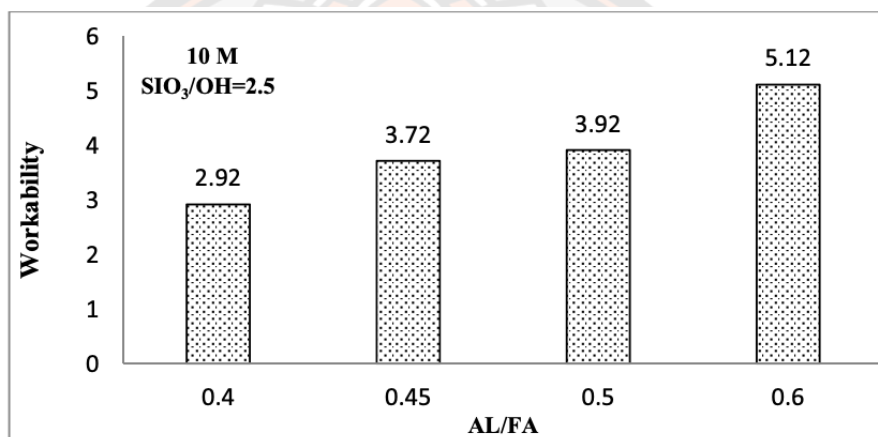
$$c/a = \frac{d_{002}}{d_{200}} \quad (13)$$

2.9 ทบทวนวรรณกรรม

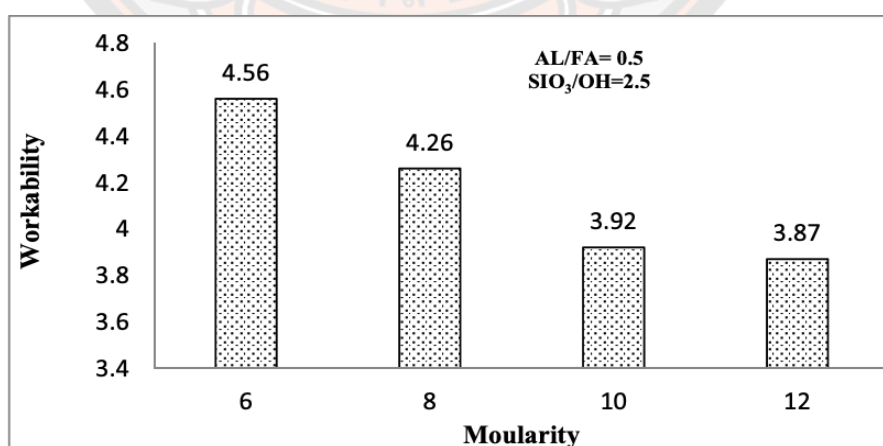
2.9.1 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากแก้วกลบ โดย S A Arafa et al. (17) ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแก้วกลบและสารกระตุ้น (alkaline liquid) และปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีผลต่อความแข็งแรงทางแรงกดและความสามารถในการทำงานได้ โดยอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและแก้วกลบเป็น 0.4, 0.45, 0.5 และ 0.6 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 6, 8 10 และ 12 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างระหว่างโซเดียม

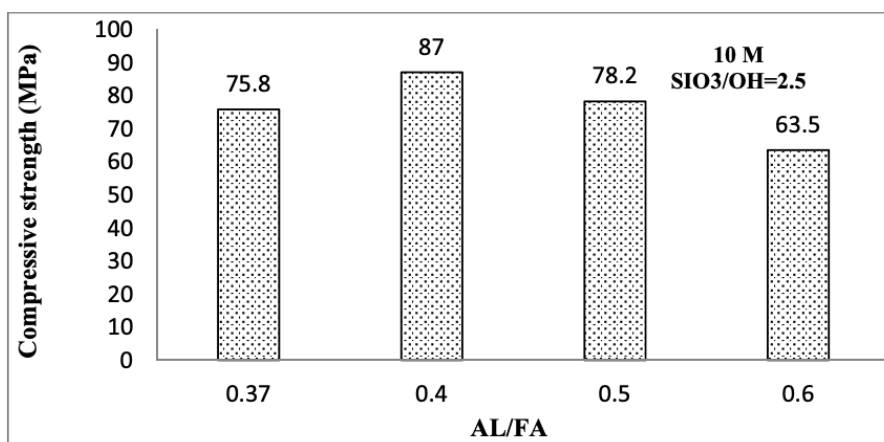
ซิลิกาและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นค่าคงที่เท่ากับ 2.5 เตรียมด้วยวิธี Ordinary Portland Cement (OPC) แบบดั้งเดิม พบว่าความแข็งแรงทางแรงกดและความสามารถในการทำงานได้เป็น 78.2.MPa และ 3.92 ตามลำดับ ซึ่งได้รับจากตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและเถ้าแกลบเป็น 0.5 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ แสดงดังภาพ 16, 17, 18 และ 19 ความแข็งแรงทางแรงกดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงทางแรงกดลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นแต่ค่ายุบตัวลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น



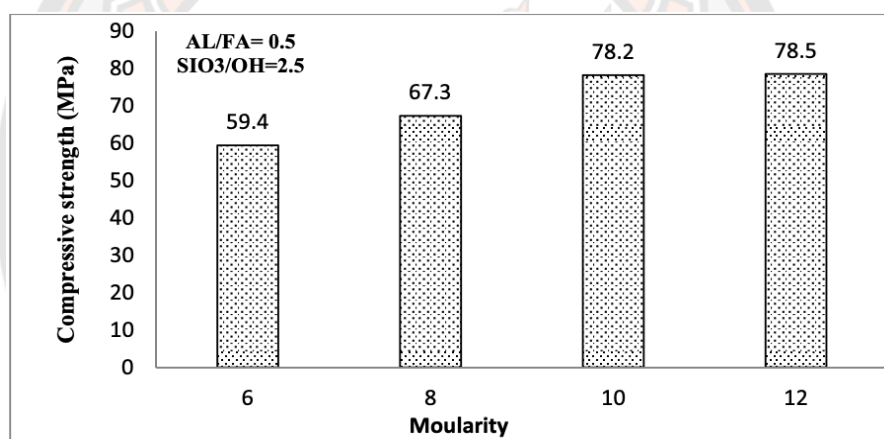
ภาพ 16 ค่ายุบตัวสัมพัทธ์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ (17)



ภาพ 17 ค่ายุบตัวสัมพัทธ์ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและเถ้าแกลบเป็น 0.5 (17)



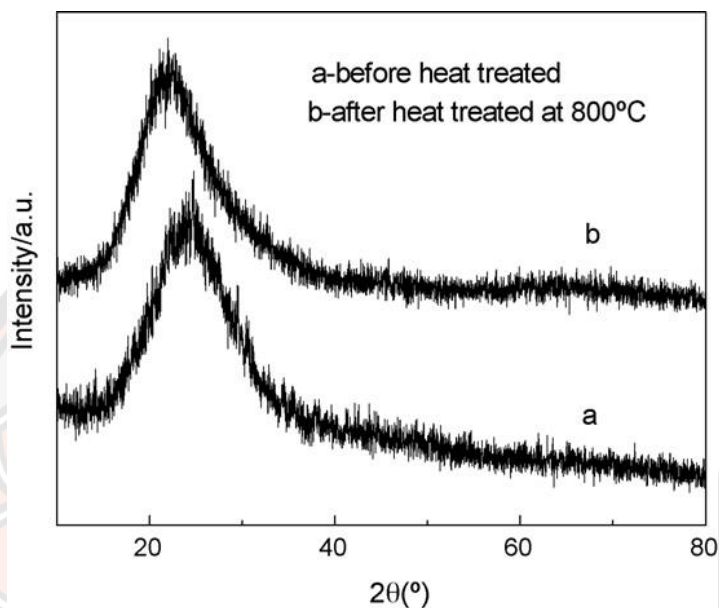
ภาพ 18 ความแข็งแรงทางแรงกดที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 10 โมลาร์ (17)



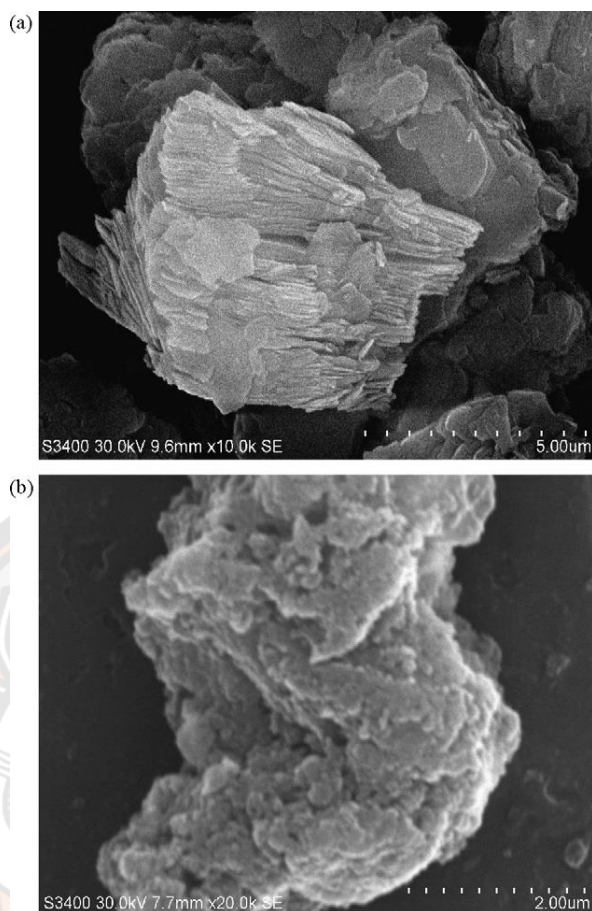
ภาพ 19 ความแข็งแรงทางแรงกดที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและแก้วกลบเป็น 0.5 (17)

อย่างไรก็ตามการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากแก้วกลบยังคงแสดงความไม่บริสุทธิ์ของผงผลึก และมีอัตราส่วนระหว่างอะตอมของอะลูมิเนียมและซิลิกอนไม่คงที่ ดังนั้นการเตรียมผงผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีความบริสุทธิ์สูงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง Xue-Min Cui และคณะ (18) เตรียมผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซลเจล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของผงผลึกโดยใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผงผลึกแสดงโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous phase structure) แสดงดังภาพที่ 20 โครงสร้างจุลภาคของผงผลึกมีลักษณะเป็นชั้นๆ ดังแสดงในภาพ 20 ขนาดของอนุภาคเป็น 400-500 นาโนเมตร จากนั้นทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ที่อัตราส่วนระหว่างผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ และโซเดียมซิลิเกต

เป็น 0.4, 0.375, 0.35, 0.325, 0.288, 0.26, 0.23 และ 0.2 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างน้ำ และโซเดียมออกไซด์เป็น 11.7 โดยโมล ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำที่ใช้ไม่ส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของ ผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ แต่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค นอกจากนี้สภาพการนำไฟฟ้าของ ผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ในอากาศที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ $1.5 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$



ภาพ 20 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (a) ไม่แคลไซน์ และ (b) แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C (18)



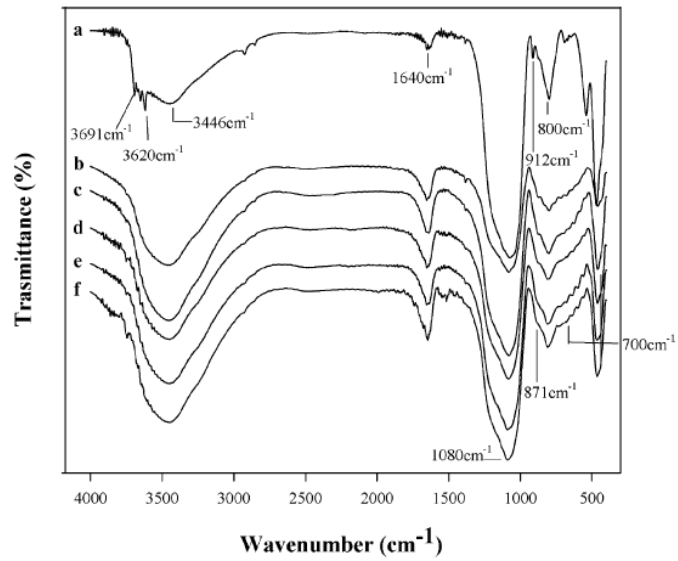
ภาพ 21 โครงสร้างจุลภาคของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ที่กักกรองด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (a) ดินขาวธรรมชาติ และ (b) ผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C (18)

ในปี 2016 Michelina Catauro และคณะ (19) เตรียมผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซลเจลผงผลึกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำผงผลึกที่ได้ผสมกับสารกระตุ้นในอัตราส่วน 1.4:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นเมใส่แม่พิมพ์อบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FTIR) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy: NMR) จากนั้นเปรียบเทียบกับโครงสร้างของดินขาว (metakaolin) พบว่าผงผลึกแสดงโครงสร้างแบบบริสุทธิ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X ray Fluorescence Spectroscopy) แสดงดังตาราง 10

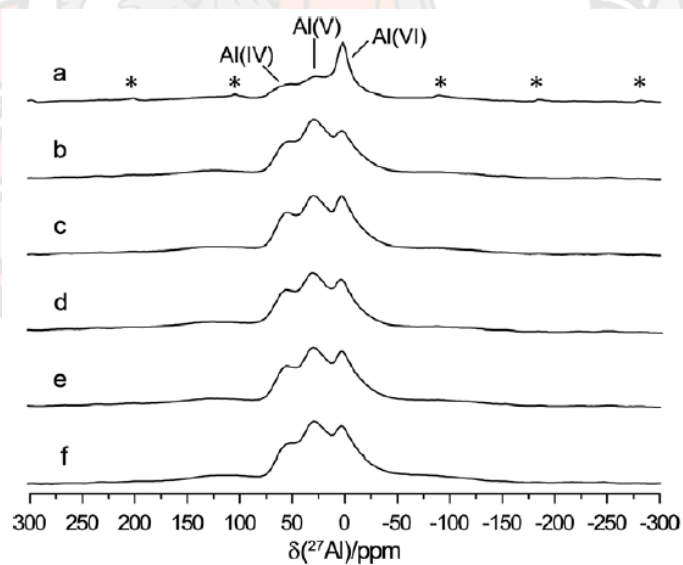
ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบโดย XRF (19)

	Al ₂ O ₃ (wt%)	SiO ₂ (wt%)	K ₂ O (wt%)	Fe ₂ O ₃ (wt%)	TiO ₂ (wt%)	MgO (wt%)	CaO (wt%)
Metakaolin	40.86	49.79	1.13	2.40	3.88	1.52	0.42
S9-65°	45.36	54.65					
S13-Ta	45.42	54.58					
S13-65°	45.53	54.46					
S18-65°	45.65	54.33					
S27-65°	45.7	54.29					

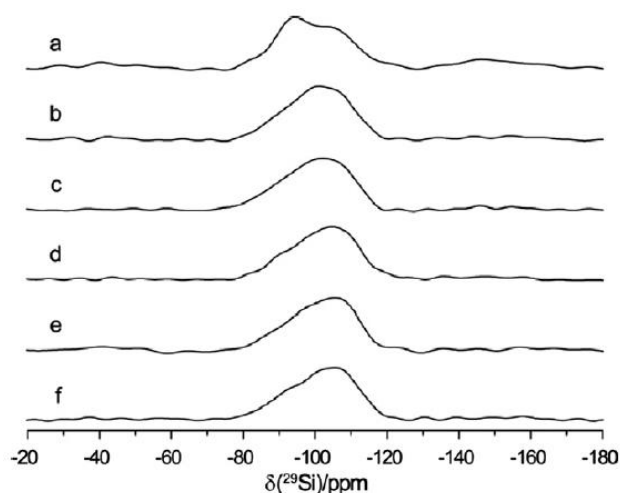
ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR พบว่าค่าสเปกตรัมของตัวอย่างที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจลมีความเหมือนกับดินขาว ยกเว้นในช่วงเลขคลื่น 3,700-3,000 cm⁻¹ และ 870-500 cm⁻¹ แสดงดังภาพที่ 22 โดยภาพที่ 23 แสดงการวิเคราะห์สเปกตรัม ²⁷Al MAS NMR พบว่าเรโซแนนซ์ในสเปกตรัมของดินขาวซ้อนทับกันที่สัญญาณ 60, 28 และ 2 ppm แสดงถึงตำแหน่งของอะลูมิเนียมที่ 4, 5 และ 6 นอกจากนี้ พบว่าสเปกตรัมของผงผลึกที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลมีลักษณะเหมือนกันแตกต่างกันแค่ความเข้ม สเปกตรัม ²⁹Si MAS NMR แสดงดังภาพที่ 22 พบว่าทุกสเปกตรัมเกิดที่สัญญาณตั้งแต่ -80 ถึง -120 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง



ภาพ 22 สเปกตรัม FT-IR (a) ดินขาว เปรียบเทียบกับสเปกตรัม FT-IR ของผงผลึกแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 750 °C: (b) S9-65°; (c) S13-65°; (d) S13-T_a; (e) S18-65° และ (f) S27-65°

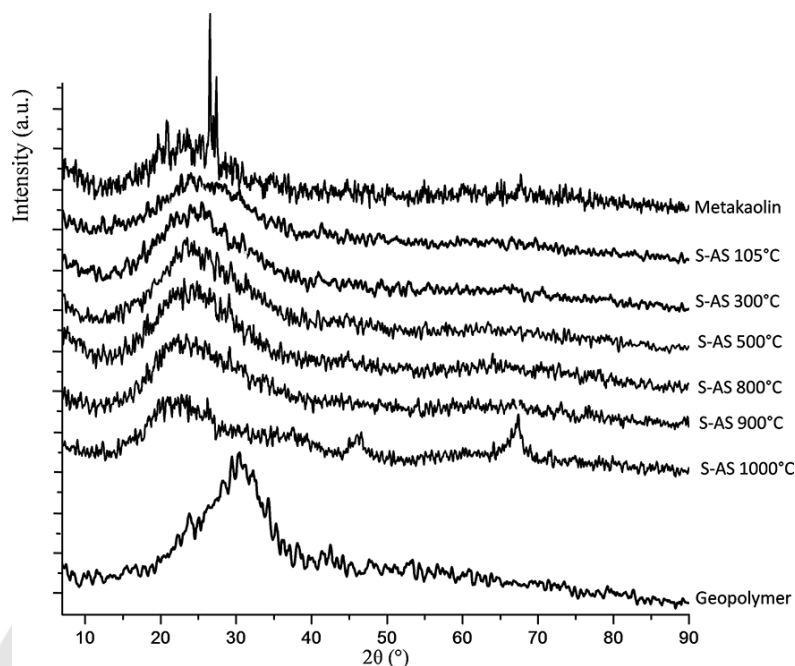


ภาพ 23 สเปกตรัม ^{29}Si MAS NMR ของ (a) ดินขาว และตัวอย่างที่เตรียมจากวิธีโซลเจล แคลไซต์ที่อุณหภูมิ 750 °C: (b) S9-65°; (c) S13-65°; (d) S13-T_a; (e) S18-65° และ (f) S27-65° (19)



ภาพ 24 สเปกตรัม ^{29}Si MAS NMR ของ (a) ดินขาว และตัวอย่างที่เตรียมจากวิธีโซลเจล แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750°C : (b) S9- 65° ; (c) S13- 65° ; (d) S13- T_8 ; (e) S18- 65° และ (f) S27- 65° (19)

เมื่อไม่นานมานี้ Mariana Arruda Pereira และคณะ (20) เตรียมจีโอพอลิเมอร์ด้วยวิธีโซลเจล โดยผงผลึกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 200 - $1,000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0.68$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3.2$ และ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=6.7$ จากนั้นศึกษาโครงสร้างของผงผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าผงผลึกแสดงพีคที่มุม 15° ถึง 35° ในขณะที่พีคของจีโอพอเมอร์เกิดที่มุมประมาณ 28° แสดงดังภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่าผงผลึกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 105°C ถึง 900°C แสดงโครงสร้างออสัณฐาน แต่เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เป็น $1,000^\circ\text{C}$ ผงผลึกแสดงโครงสร้างผลึกซึ่งยืนยันการเกิดเป็นผลึกของผง

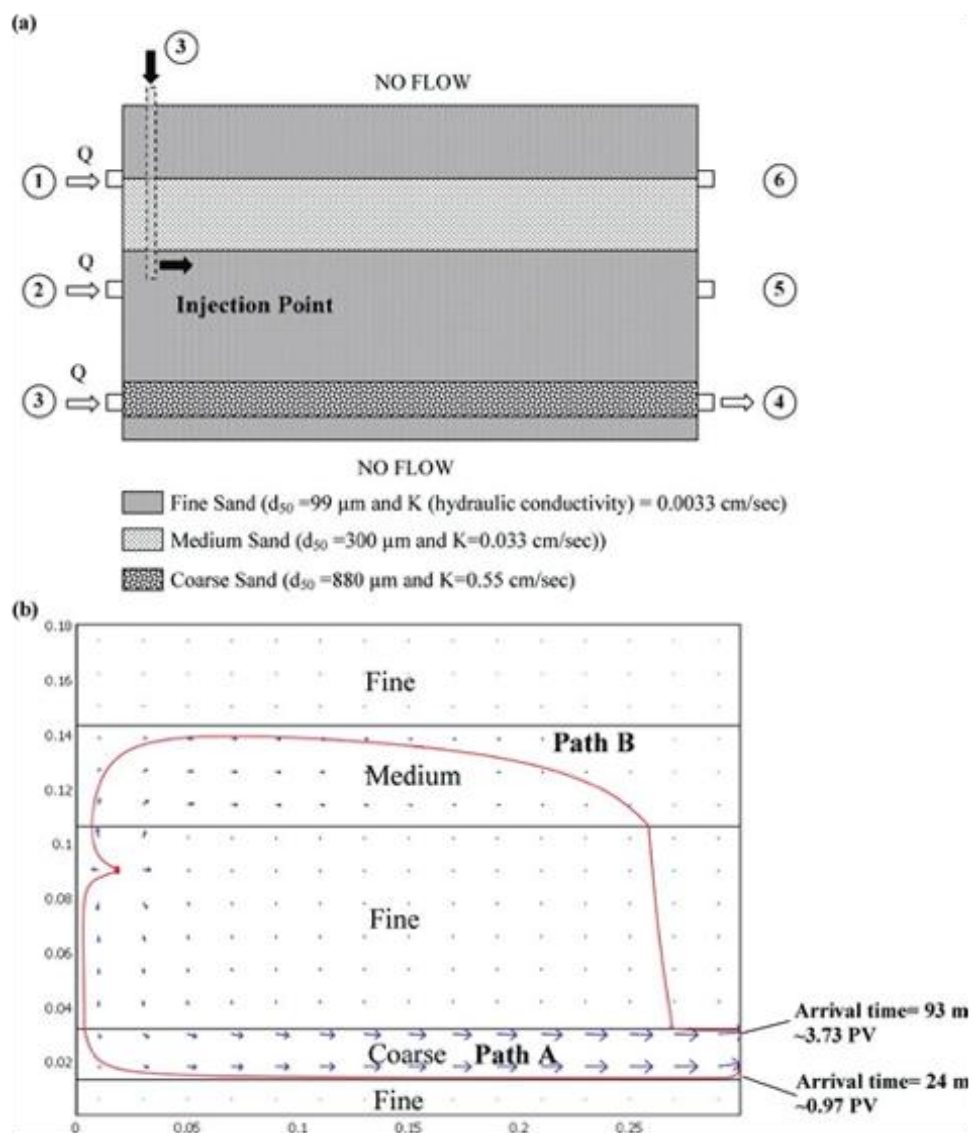


ภาพ 25 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอพอลิเมอร์ และผงผลึกแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ (20)

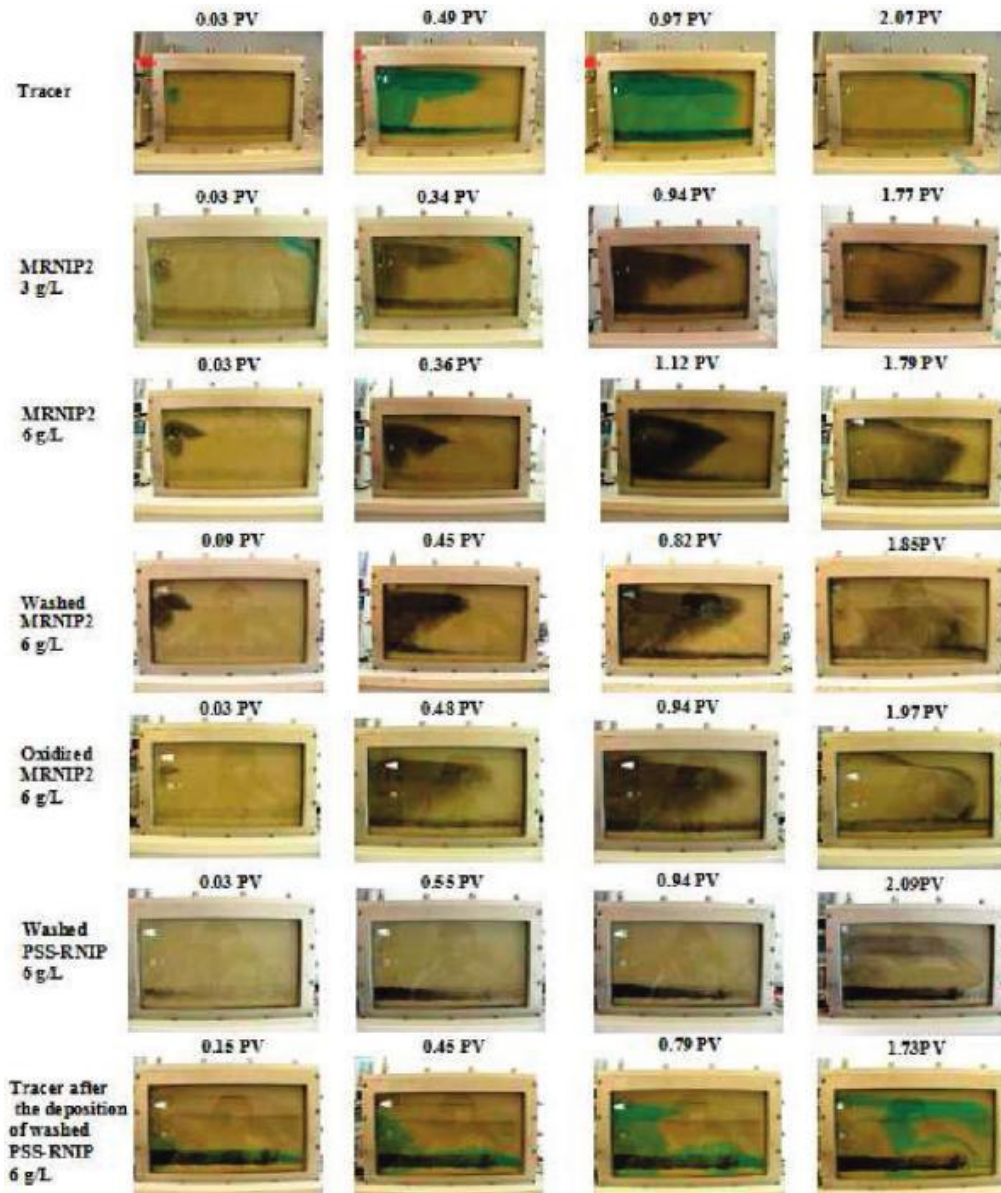
2.9.2 การใช้แบบจำลองในการไหล

Thanapon Phenrat และคณะ (21) ศึกษาการใช้พอลิเมอร์กับเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI) อัดลงในชั้นทรายที่มีขนาดต่างกันเพื่อบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน จากนั้นศึกษาผลของการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของ NZVI การทำปฏิกิริยาของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนต่อ สารปนเปื้อนในแบบจำลอง 2 มิติ ภาพที่ 26 (a) แสดงแบบจำลอง 2 มิติที่สร้างขึ้นมาโดยทรายที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ทรายละเอียด (fine sand) มีขนาดประมาณ $99 \mu\text{m}$ ทรายขนาดปานกลาง (medium sand) มีขนาดประมาณ $330 \mu\text{m}$ และทรายหยาบ (coarse sand) มีขนาดประมาณ $880 \mu\text{m}$ ซึ่งขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของทรายแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 0.3-0.4 โดยกำหนดทิศทางการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองจากการการแจกแจงความเร็วในแต่ละชั้นทรายโดยอ้างอิงจากกฎของ Darcy (Darcy's Law) โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics Software แสดงดังภาพที่ 26 (b) จากนั้นทำการทดลองโดยวิธีการใช้สารติดตาม (tracer test) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ และนำค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ (Hydraulic conductivity) นี้มาเป็นตัวชี้วัดการเคลื่อนที่ ที่ทำการอัดของเหลวเข้าไปในแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 26 พบว่าการเคลื่อนที่ของ NZVI ในชั้นทรายที่มีขนาดต่างกันที่ความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนต่ำ (0.3 g/L) ดีกว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนสูง (3 และ 6 g/L) เนื่องจากที่ความหนาแน่นสูงอนุภาคเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่น นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้นของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโนสูงมีการถ่าย

โหนดระหว่างการอัด NZVI เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นของเหล็กประจุศูนย์ขนาดนาโน ซึ่งทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก และยังพบว่าความหนาของชั้นดูดซับพอลิเมอร์ (adsorbed polymer layer thickness) ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของ NZVI ผลการทดลองทำให้ทราบว่า NZVI ที่มีความหนาของชั้นดูดซับพอลิเมอร์ (~30 นาโนเมตร) ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่คล่องตัว เมื่อเทียบกับการขยายความหนาของชั้นดูดซับพอลิเมอร์ (~70 นาโนเมตร) สันนิษฐานว่าความหนาของชั้นดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนและเกิดการสะสมใกล้บริเวณทางเข้า



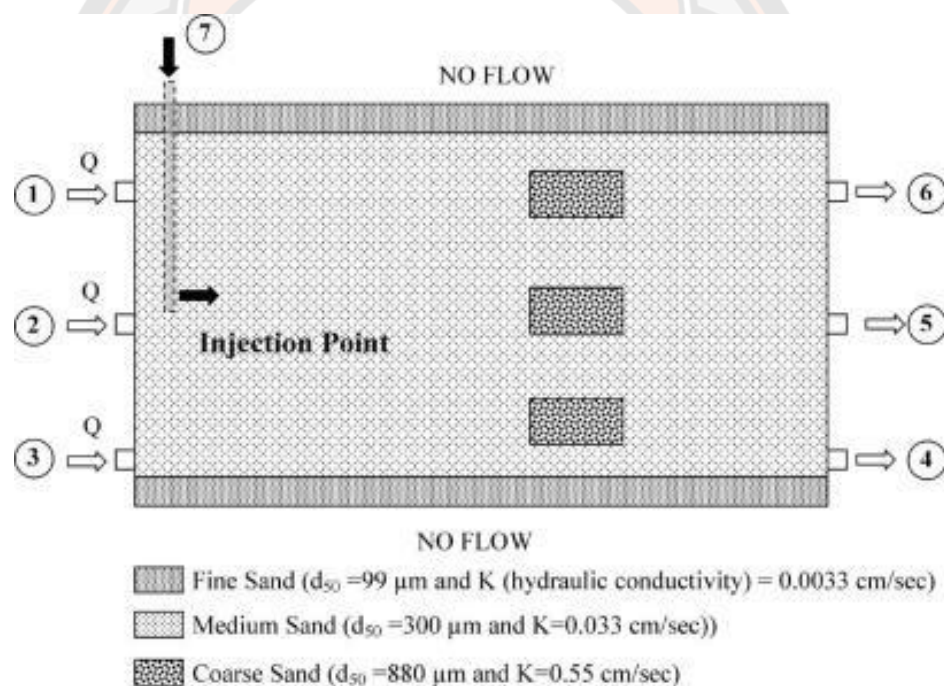
ภาพ 26 (a) แบบจำลอง 2 มิติ ขนาด $18 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ กับชั้นทรายแต่ละขนาด (b) ทิศทางการไหลของ NZVI ซึ่งกำหนดโดยแบบจำลอง COMSOL particle tracking (21)



ภาพ 27 แสดงการเคลื่อนที่ของสารติดตาม fresh MRNIP3 ที่ 3 g/L และ 6 g/L, washed MRNIP2 ที่ 6 g/L, oxidized MRNIP2 ที่ 6 g/L, washed PSS-RNIP ที่ 6 g/L และสารติดตามหลังจากการสะสมของ washed PSS-RNIP (21)

ในปี 2011 Tanapon Phenrat และคณะ (22) ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์เมื่อปรับปรุงพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ (Polymer-modified nanoscale zerovalent iron: NZVI) ในรูปพุน สำหรับแหล่งกำเนิดการปนเปื้อนสารในรูปน้ำมันที่ไม่ละลาย (ละลายน้ำช้ามาก) และรวมตัวกับน้ำได้ (Non-aqueous Phase Liquid: NAPL) โดยความเข้มข้นของ NZVI ความอิมมิตัวของ NZVI และเทคนิคการฉีด NZVI โดยวิธี olefin maleic acid copolymer (MRNLP2) ในพื้นที่

เป้าหมายซึ่งเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่าง NAPL กับน้ำในแบบจำลองวัสดุรูพรุน 2 มิติ แสดงดังภาพที่ 27 โดย NAPL ที่ใส่ในแบบจำลองจะใช้ Dodecane โดย MRNLP2 ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ (0.5 g/L) ไม่แสดงการเกาะติดกันใกล้บริเวณ NAPL แต่อย่างไรก็ตาม MRNLP2 ที่ความเข้มข้นสูง (3 และ 6 g/L) เกิดการเกาะกลุ่มกันบริเวณ NAPL ปริมาณของ MRNLP2 ที่กำหนดแหล่งกำเนิด NAPL ขึ้นอยู่กับความอิ่มตัวของ NAPL (S_n) ซึ่งหมายถึงความอิ่มตัวจะควบคุมการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่าง NAPL กับน้ำ และทิศทางการไหลของแหล่งกำเนิด NAPL (ภาพ) พบว่าที่ค่า S_n ต่ำ การไหล MRNIP2 ไปสู่การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่าง NAPL กับน้ำ ถูกยึดติดกับ NAPL อย่างไรก็ตามมวลของ MRNIP2 ต่อหน่วยผิวสัมผัสระหว่าง NAPL กับน้ำ ค่อนข้างคงที่ ($\sim 0.8 \text{ g/m}^2$ สำหรับ MRNIP2 = 3 g/L) จาก $S_n=3$ ถึง 100% ซึ่งสันนิษฐานว่ากำหนดเป้าหมายของ NAPL ส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยการดูดซับด้วย MRNIP2 บนการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่าง NAPL กับน้ำ



ภาพ 28 แบบจำลองการไหลต่อเนื่องแบบ 2 มิติ (22)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นให้กับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยและกักเก็บไม่ทำให้สารอินทรีย์ระเหยไหลออกไปกับน้ำใต้ดินได้ โดยจะทำการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่พื้นที่ๆ มีการปนเปื้อนในลักษณะของเหลวจากนั้นให้ความร้อนกับ จีโอพอลิเมอร์เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัว ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 ปฏิบัติการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

- 1) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
- 2) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
- 4) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)
- 5) เตตระคลอโรเอทิลีน (PCE)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

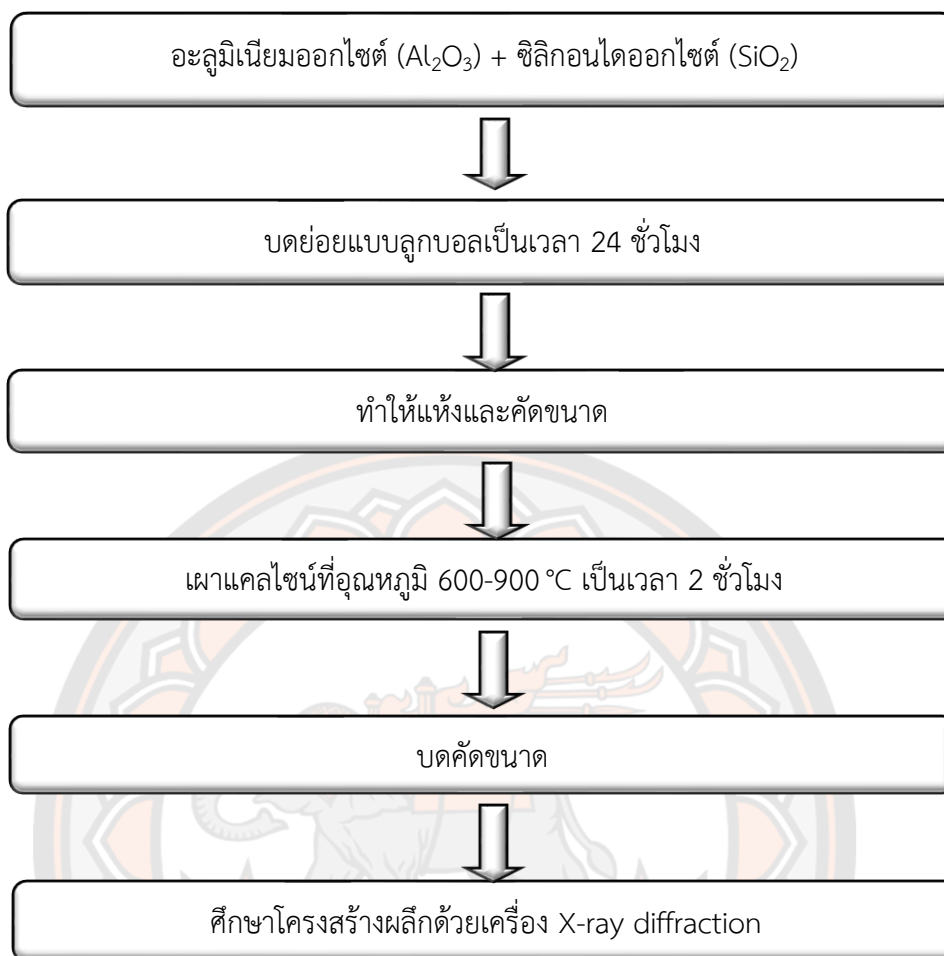
- 1) เครื่องชั่งแบบละเอียด satorius AG GOTTINGEN type Fabr-Nr (ควบคุมการทำงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์) ใช้ชั่งมวลได้มากที่สุดไม่เกิน 310 กรัม โดยมีความละเอียด 0.001 กรัม
- 2) ตู้อบสารของยี่ห้อ Memmert UF110 Models 30 – 1,060 อุณหภูมิในการอบสูงสุด 200 °C
- 3) กระบอพลาสติกที่ใช้ในการผสมสารทำด้วยโพลีเมอร์และมีฝาปิดสนิท ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 4) เม็ดบดย่อยทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 มิลลิเมตร (ใช้ในจำนวนประมาณ 250 เม็ด) เครื่องผสมแบบบดย่อยแบบลูกบอล (Ball-milling)
- 5) Hot plate สำหรับใช้ในการทำให้สารระเหยออก
- 6) Magnetic stirrer สำหรับคนสารให้เข้ากัน
- 7) ซ้อนตักสาร

- 8) ปีกเกอร์ขนาด 1,000 ซีซี
- 9) กระดาษฟอยล์ (Foil)
- 10) เตาเผาสาร Eurotherm อุณหภูมิสูงสุดในการเผา 700 °C
- 11) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)
- 12) แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)
- 13) เครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดแบบอัลตราไวโอเล็ตและแบบแสงมองเห็น (UV-Vis)

3.3 วิธีการเตรียมสาร

ตอนที่ 1 การเตรียมผงผลึก $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

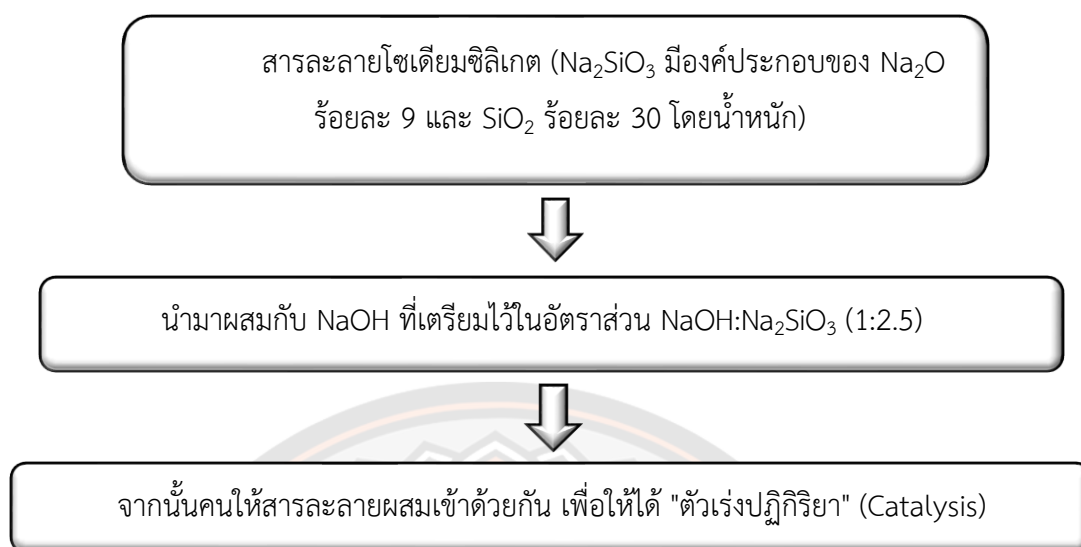
- 1) ชั่งสารตั้งต้นคืออะลูมิเนียมออกไซด์และซิลิกอนออกไซด์ ซึ่งตามอัตราส่วนโดยโมลที่ได้จากการคำนวณ ในอัตราส่วน 1:2
- 2) นำสารที่ผ่านการชั่งจากข้อ 1 มาทำการผสมตามชนิดของผงผลึกที่ต้องการในกระป๋องพลาสติกที่มีเม็ดบอลขนาด 7 มิลลิเมตร จำนวนประมาณ 250 เม็ด โดยเติมเอทานอลในปริมาณ 500 มิลลิลิตร ซึ่งจะช่วยให้การผสมสารให้ผสมกันดียิ่งขึ้น จากนั้นนำไปด้อยบนเครื่องบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว จากนั้นนำสารที่อยู่ในกระป๋องบอลแต่ละกระป๋องทำการเทลงในตะแกรงลวดที่วางอยู่บนปีกเกอร์เพื่อแยกของที่ผสมออกจากเม็ดบอล โดยการแยกนี้จะเป็นชุดตามชนิดของสาร แล้วจึงนำสารแต่ละชุดทำการแยกเอาเอทานอลออกโดยใช้ Hot plate
- 4) เมื่อทำการแยกเอทานอลออกจากสารแล้วจึงทำการอบในเตาอบ โดยใช้อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- 5) นำสารที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาทำการบดอย่างหยาบโดยใช้ครกหยก (Agate) เพื่อคัดขนาดและเพื่อให้ได้ผงผลึกที่มีขนาดที่สม่ำเสมอ
- 6) นำผงผลึกที่ผ่านการบดคัดขนาดใส่ใน Crucible เปิดฝาจากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ในเตา โดยใช้อุณหภูมิ 600-900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที
- 7) นำผงผลึกที่ได้มาบดคัดขนาด จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่อง X-ray diffraction



ภาพ 29 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

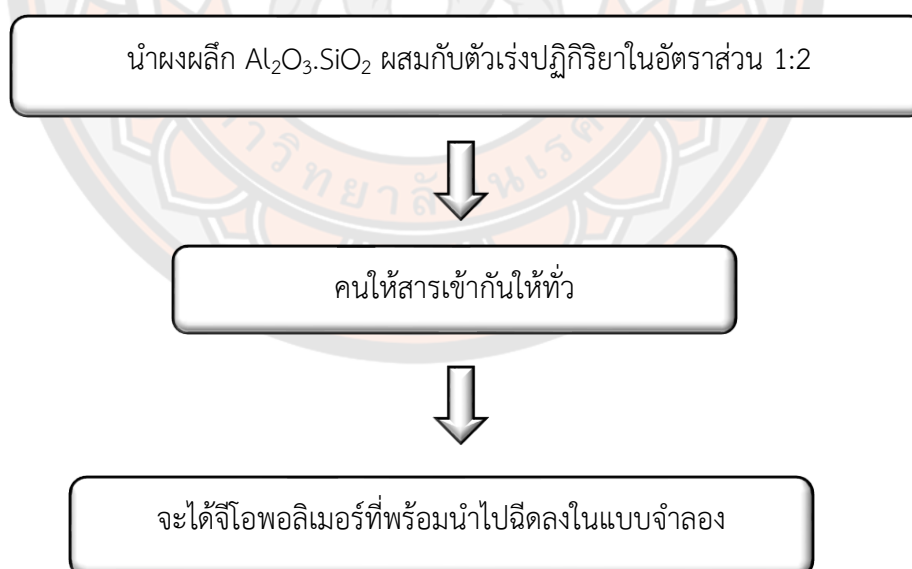
ตอนที่ 2 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล ซึ่งวิธีการผสมสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 10 โมล สามารถสรุปได้ดังนี้ สารละลาย NaOH แบบเกรด 400 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร หลังจากนั้นคนให้สารละลายเข้ากับน้ำกลั่นและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



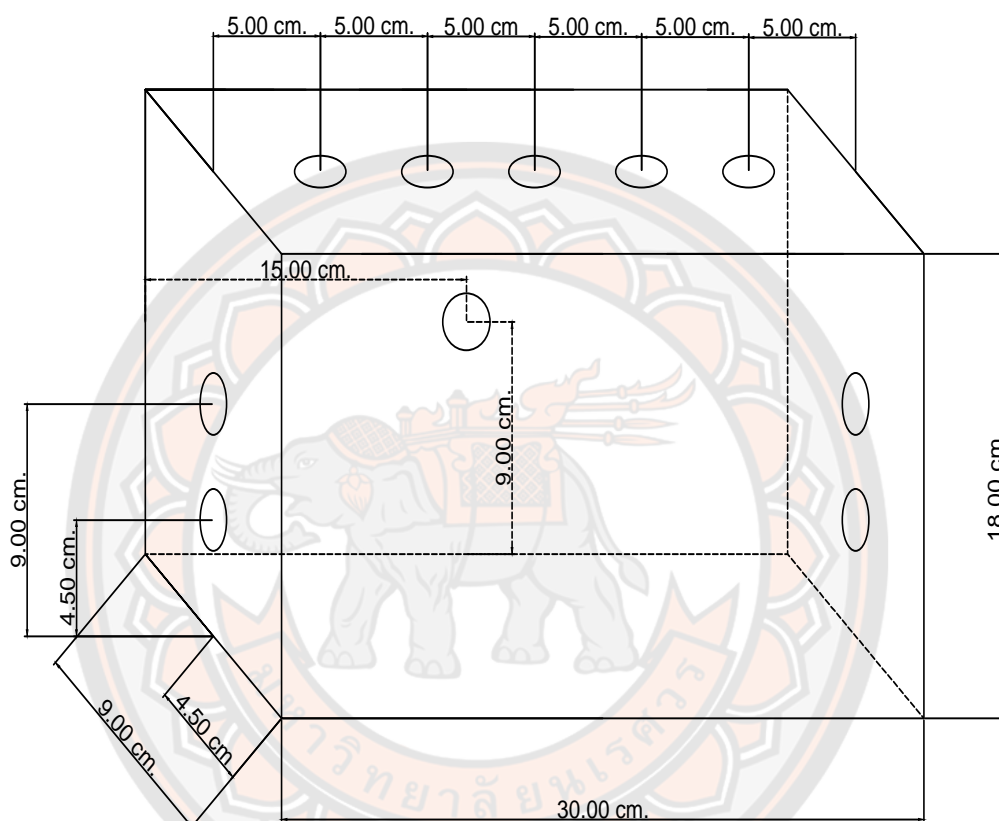
ภาพ 30 แผนผังขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.4 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)



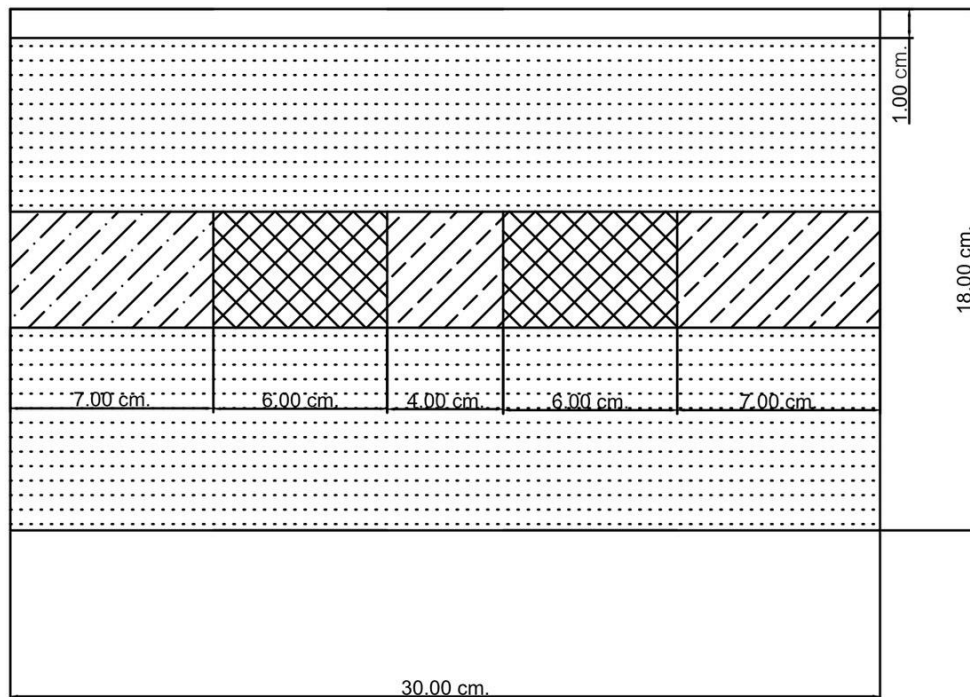
ภาพ 31 แผนผังขั้นตอนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์





3.5 การออกแบบและสร้างแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน



ภาพ 32 ภาพแบบจำลอง 3 มิติ ของแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน

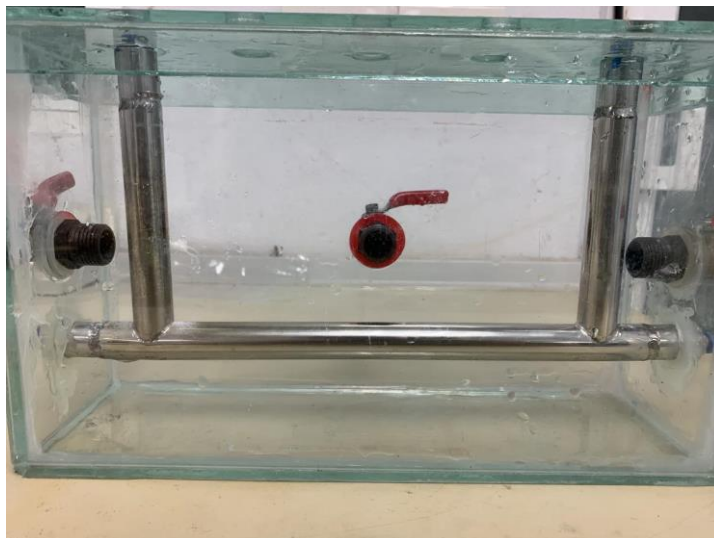
จากภาพที่ 32 พื้นที่ด้านข้างเจาะรูตรงกลางทั้ง 2 ด้านใช้สำหรับเป็นช่องการไหลของน้ำ โดยน้ำเข้าจากทางซ้ายและไหลออกทางด้านขวา เจาะรูด้านล่างใช้สำหรับใส่ท่อสำหรับให้น้ำร้อนไหลผ่านเพื่อให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลอง ด้านหลังสำหรับฉีดสารเข้าสู่แบบจำลองส่วนด้านบนมีการเจาะรูทั้งหมด 5 รู นับจากทางซ้ายมือ รูแรกและรูสุดท้ายสำหรับใส่ท่อความร้อน อีก 3 รูตรงกลางสำหรับฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลอง



-  Bentonite
-  Fine sand
-  Coarse sand
-  Medium sand

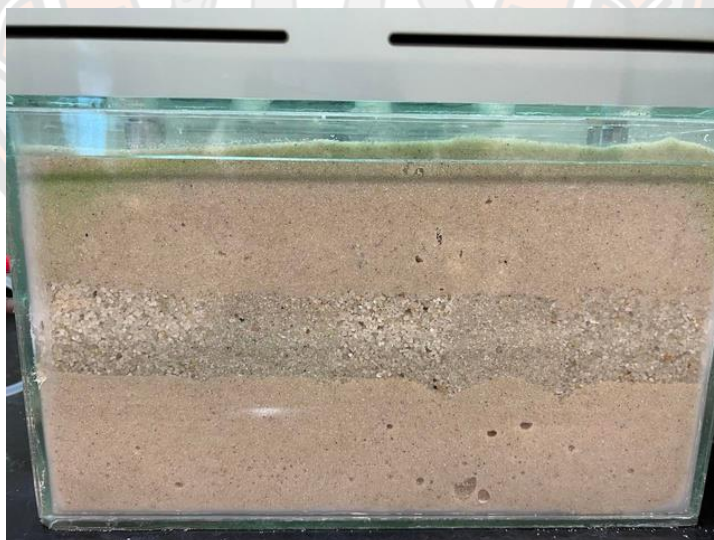
ภาพ 33 ภาพแบบจำลอง 2 มิติ ของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ขณะสร้างชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน

จากภาพที่ 33 ออกแบบจำลองโดยใช้ทราย 3 ชนิด คือ ทรายละเอียด ทรายปานกลางและ ทรายหยาบ เนื่องจากทรายแต่ละชนิดมีค่าความหนาแน่นและค่าการซึมผ่านได้แตกต่างกัน โดยทรายหยาบมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดและมีค่าการซึมผ่านของน้ำสูงที่สุด ตามลำดับ เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของน้ำที่เข้าสู่แบบจำลอง มีการใช้ทราย 2 ชนิดบริเวณตรงกลางของแบบจำลองสำหรับกักเก็บสารพิษไว้ในพื้นที่บริเวณตรงกลางของแบบจำลอง



ภาพ 34 ภาพแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน

จากภาพที่ 34 ท่ออลูมิเนียมภายในแบบจำลองคือท่อสำหรับให้น้ำร้อนไหลผ่านเพื่อส่งความร้อนเข้าสู่แบบจำลอง น้ำจะไหลผ่านก็อกด้านซ้ายและออกที่ด้านขวา บริเวณด้านหลังสำหรับฉีดสารอินทรีย์ระเหยเข้าสู่แบบจำลอง รูด้านบนสำหรับฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่พื้นที่ที่เราต้องการ



ภาพ 35 ภาพแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน ขณะสร้างชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน

จากภาพ 35 แสดงให้เห็นถึงการใส่ทรายเข้าสู่แบบจำลองโดยแบ่งเป็นชั้นความหนาแน่นที่ต่างกันเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของน้ำที่ไหลเข้าสู่แบบจำลองตามการไหลผ่านความหนาแน่นของชั้นทรายภายในแบบจำลอง

บทที่ 4

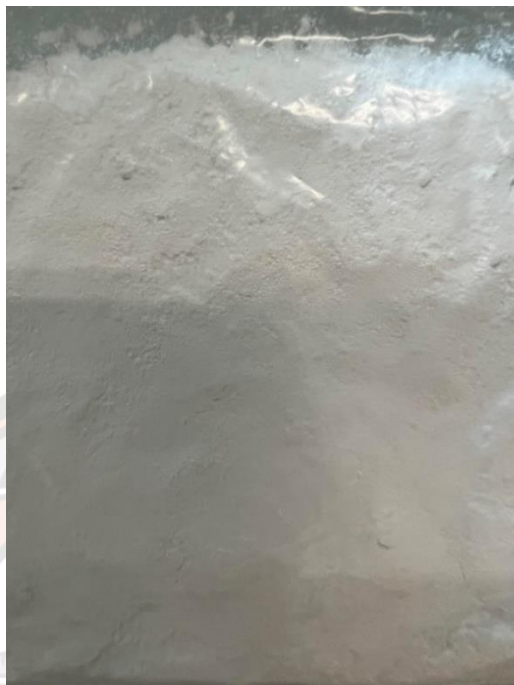
ผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ทดลอง ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยในดินและน้ำใต้ดินด้วยการใช้จีโอพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการทำเสถียรและการทำก้อนแข็งเพื่อใช้ควบคุมการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหย ในดินและน้ำใต้ดินให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

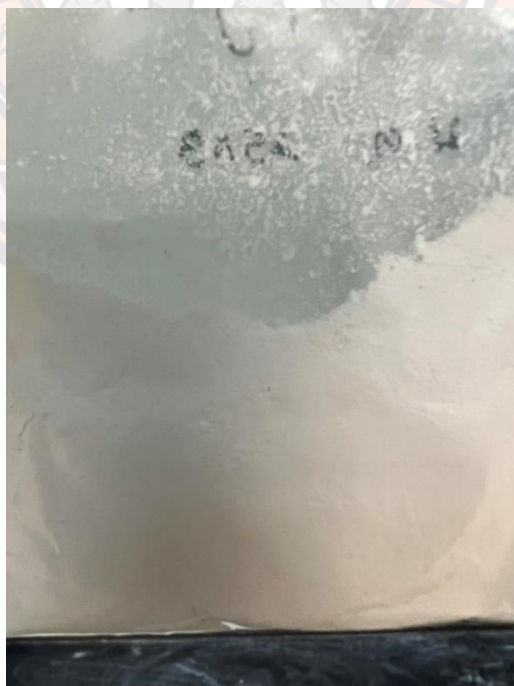
จากวิธีการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ได้มีความสามารถในการกระจายตัวเข้าสู่ชั้นดินและมีประสิทธิภาพในการแข็งตัวเมื่อโดนความร้อนซึ่งจีโอพอลิเมอร์สามารถทำเสถียรและแข็งตัวเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ วัตถุประสงค์จากการทดลอง ทิศทางการไหลของน้ำ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองการควบคุมการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความสามารถในการลดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยได้โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทำการทดลองและเสนอผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาจำแนกเป็น 7 ขั้นตอนตามลำดับต่อไปนี้

- 4.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์
- 4.2 การให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลอง
- 4.3 การศึกษารูปแบบการไหลของน้ำในแบบจำลอง
- 4.4 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน
- 4.5 การฉีดสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกย้อมสีเข้าสู่แบบจำลอง
- 4.6 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองเพื่อลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย
- 4.7 ลักษณะจีโอพอลิเมอร์หลังจากให้ความร้อนภายในแบบจำลอง

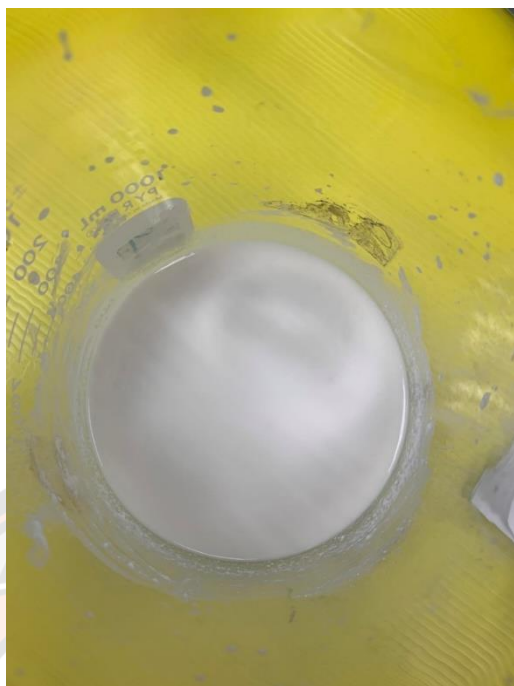
4.1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์



ภาพ 36 จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ถูกแคลไซน์



ภาพ 37 จีโอพอลิเมอร์ที่ถูกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C



ภาพ 38 จีโอพอลิเมอร์ที่ผสมในตัวเร่งปฏิกิริยา

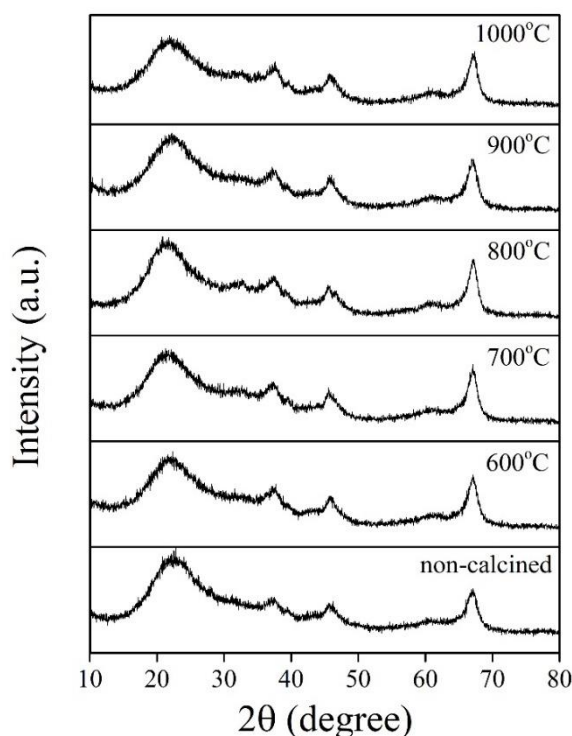


ภาพ 39 จีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการทำก้อนแข็ง

ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายแป้งดังภาพที่ 36 และภาพที่ 37 เมื่อนำผงที่ได้ผสมด้วยตั้งเร่งปฏิกิริยา ($\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$) จะได้เป็นของเหลวดังภาพที่ 38 ทำการนำไปให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้ก้อนแข็งสีขาวมีลักษณะดังภาพ 39 โดยสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์มา 6 รูปแบบคือ

- 1) ไม่ผ่านการแคลไซน์
- 2) แคลไซน์ที่ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 3) แคลไซน์ที่ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4) แคลไซน์ที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 5) แคลไซน์ที่ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 6) แคลไซน์ที่ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$

โดยแต่ละอุณหภูมิมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน ผู้ศึกษาจึงได้นำผงที่ได้ในจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อทราบโครงสร้างผลึกและความเป็นจีโอพอลิเมอร์ต่อไปในกระบวนการรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก (XRD) ต่อไป



ภาพ 40 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $600\text{-}1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตาราง 11 ค่าความเป็นผลึกของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 600-1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	พื้นที่ใต้กราฟทุกพีค	พื้นที่ใต้กราฟพีคผลึก	%Crystallinity
Non-calcined	17,350	9,507	54.79
600	17,218	9,450	54.88
700	16,598	9,311	56.09
800	16,772	9,352	55.75
900	16,816	9,326	55.45
1,000	17,583	9,652	54.89

รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 600-1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 39 โดยทั่วไปแล้ว จีโอพอลิเมอร์ที่มี โครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) แสดงพีคกว้าง (broad peak) ที่มุม $18^\circ - 36^\circ$ (23-25) ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบวัฏภาค (phase) แสดงพีคเดี่ยวที่มุม 46° และ 67° (26) ทุก ตัวอย่างแสดงโครงสร้างแบบผสมระหว่างอสัณฐานและวัฏภาค ซึ่งมีความเป็นผลึก (crystallization) สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มมากขึ้น ความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ (14) (27)

$$\%Crystallinity = \frac{(\text{area under the crystal line peaks})}{(\text{area under all peaks})} * 100 \quad (14)$$

โดยค่าความเป็นผลึกแสดงดังตาราง 11 พบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ 700 °C ผงผลึกแสดงความเป็นผลึกสูงสุด

ตาราง 12 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ

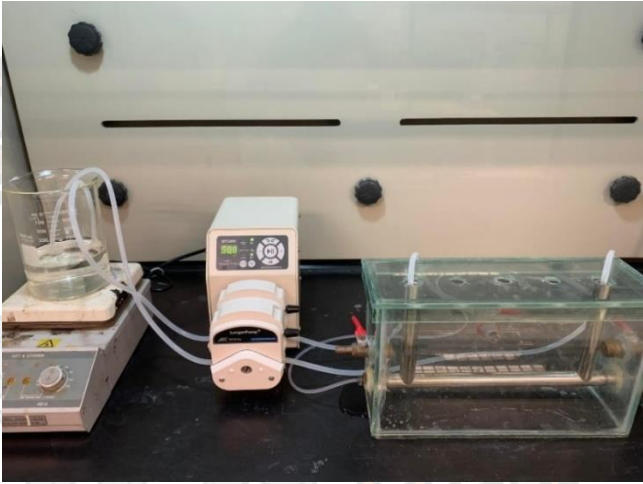
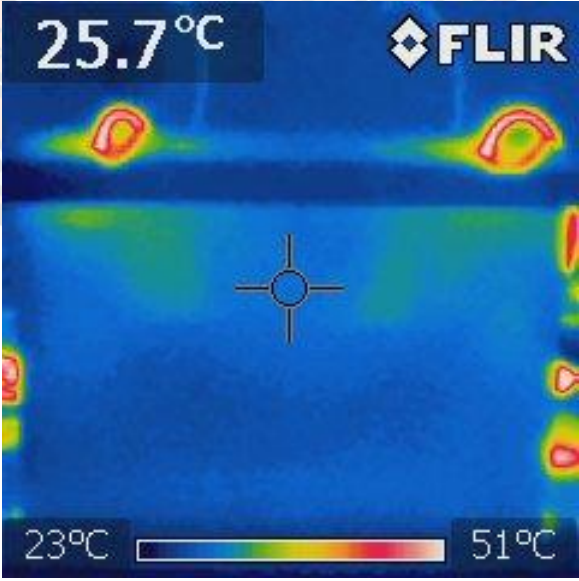
อุณหภูมิแคลไซน์ (°C)	Compressive strength (kPa)
Non-calcined	0.533
600	2.933
700	1.653
800	1.867
900	1.547
1,000	1.493

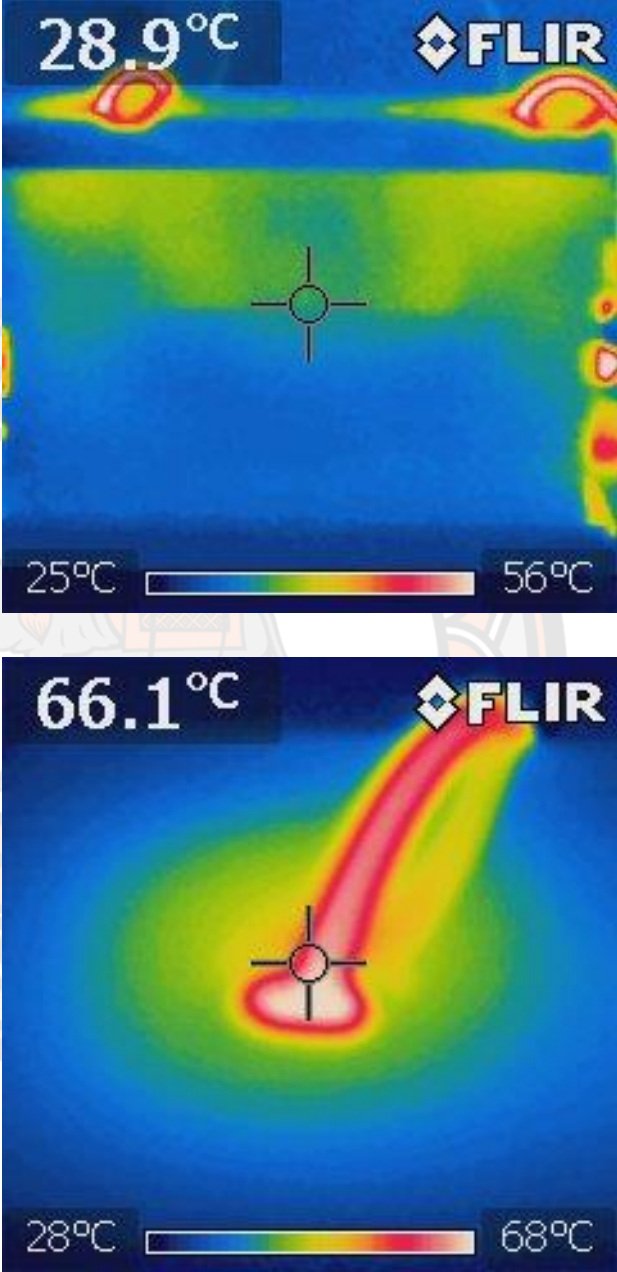
ผลึกของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์และแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ นำไปขึ้นรูปและทำการทดสอบความเค้น โดยยค่ากำลังรับแรงอัดแสดงดังตาราง 12 พบว่าผลึกที่ไม่ผ่านการแคลไซน์แสดงค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.533 kPa เนื่องจากยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่งผลให้เกิดจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชันที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อนำผลึกผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 2.933 kPa เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นเป็น 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเป็น 1.653 kPa จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.867 kPa ที่อุณหภูมิแคลไซน์ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 900-1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับผลึกที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ ค่ากำลังรับแรงอัดของผลึกที่ผ่านการแคลไซน์มีค่าสูงกว่า เนื่องจากการเผาแคลไซน์สามารถกำจัดสารอินทรีย์และไล่ความชื้นที่มีอยู่ในผลึกและทำให้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกจากอสัณฐาน (amorphous) ไปเป็นวัฏภาค (phase) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้นำไปสู่การเกิดจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชันได้ดี สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย x-ray diffraction

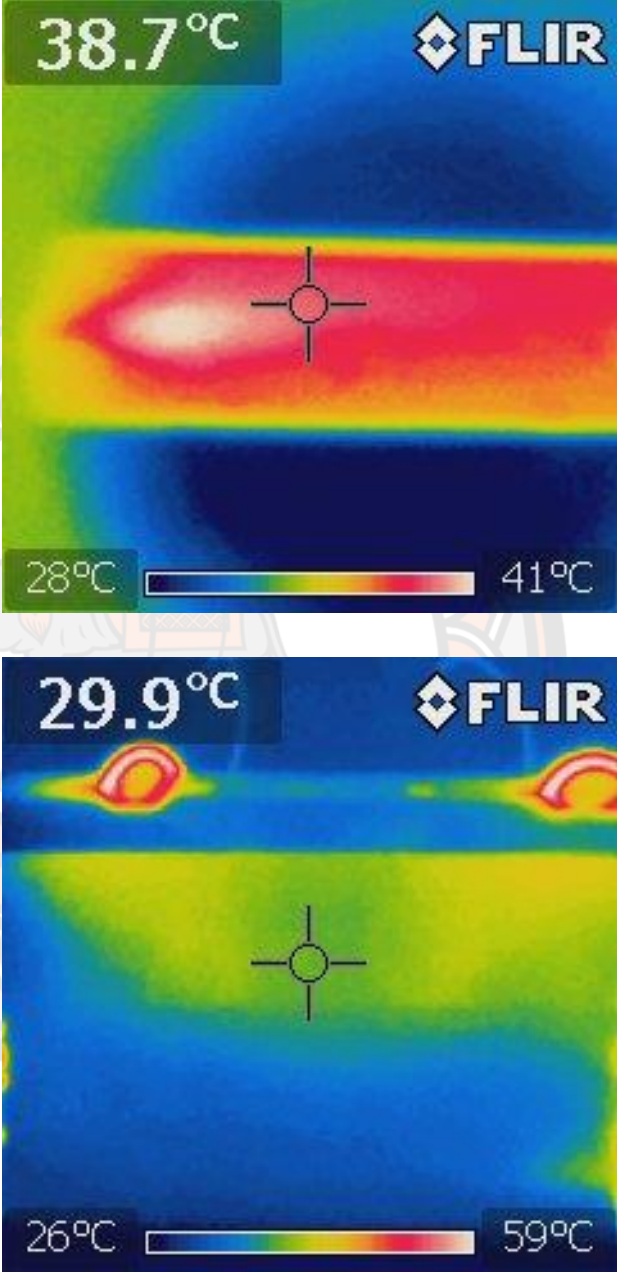
4.2 การให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลอง

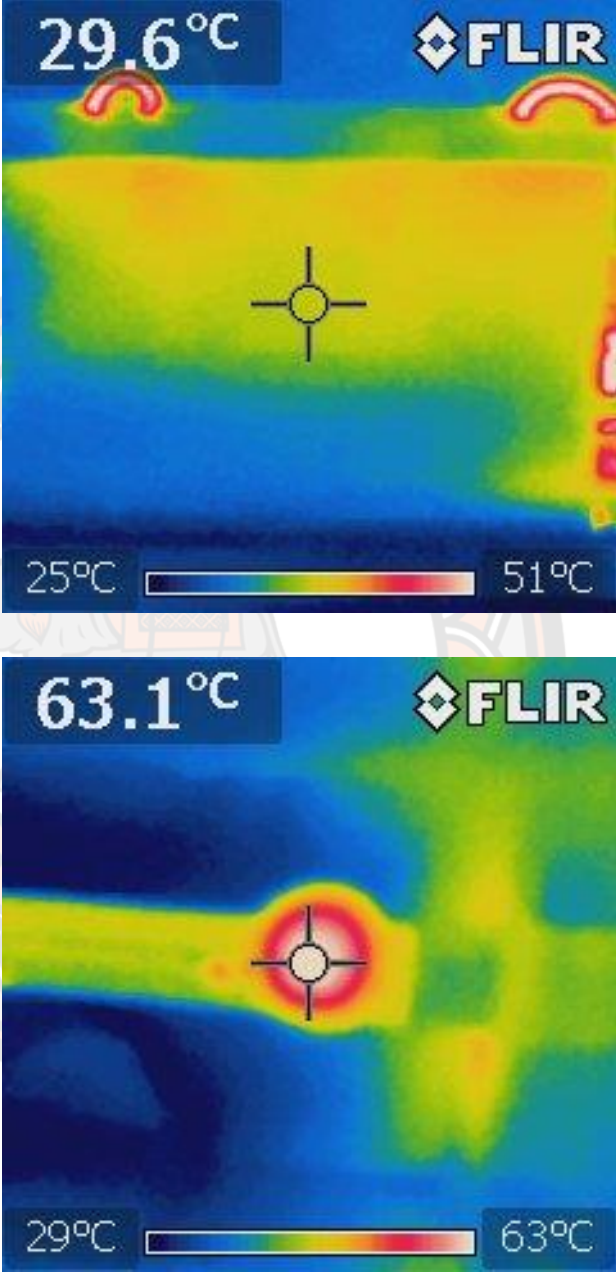
ตาราง 13 ทดลองการให้ความร้อนตู้กระจกเปล่า

โดยใช้น้ำร้อนประมาณ 80 °C น้ำร้อนไหลผ่าน 60 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา	รูปภาพ
เริ่มต้น	
5 นาที	

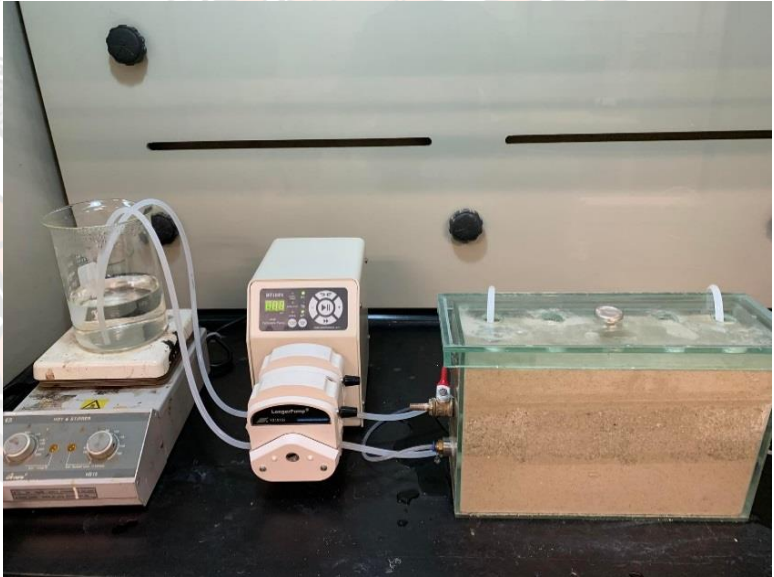
เวลา	รูปภาพ
10 นาที	 <p>The figure displays two FLIR thermal images. The top image shows a temperature of 28.9°C with a color scale from 25°C to 56°C. The bottom image shows a temperature of 66.1°C with a color scale from 28°C to 68°C. Both images feature a central crosshair and the FLIR logo in the top right corner.</p>

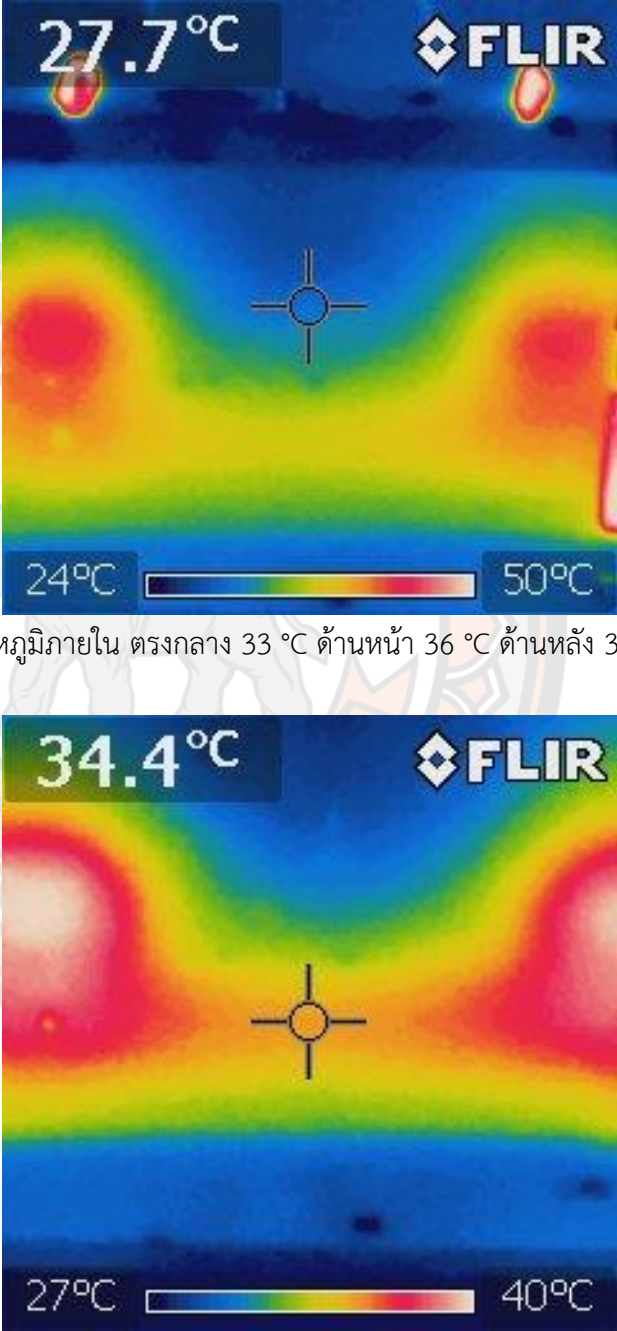
เวลา	รูปภาพ
30 นาที	 <p data-bbox="874 1776 1027 1816">รูปทอด้านใน</p>

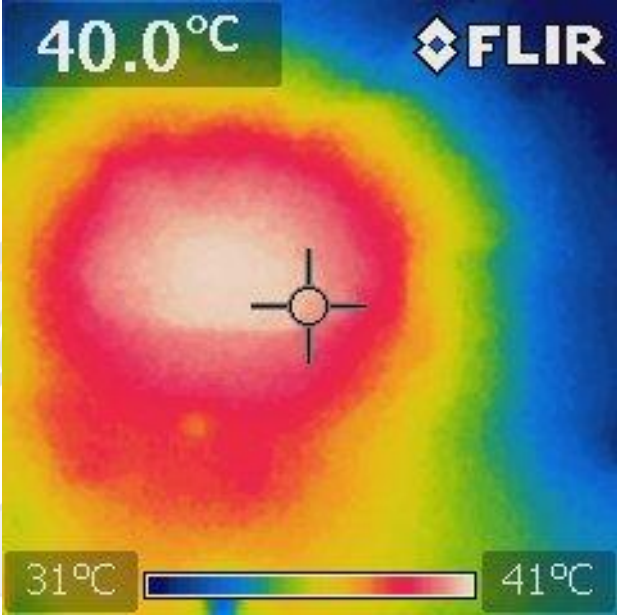
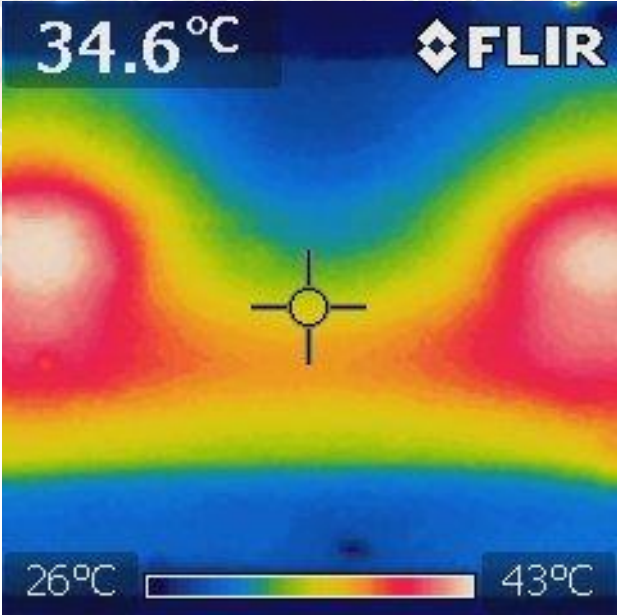
เวลา	รูปภาพ
1 ชั่วโมง	 <p data-bbox="826 1778 1082 1816">รูปความร้อนด้านในท่อ</p>

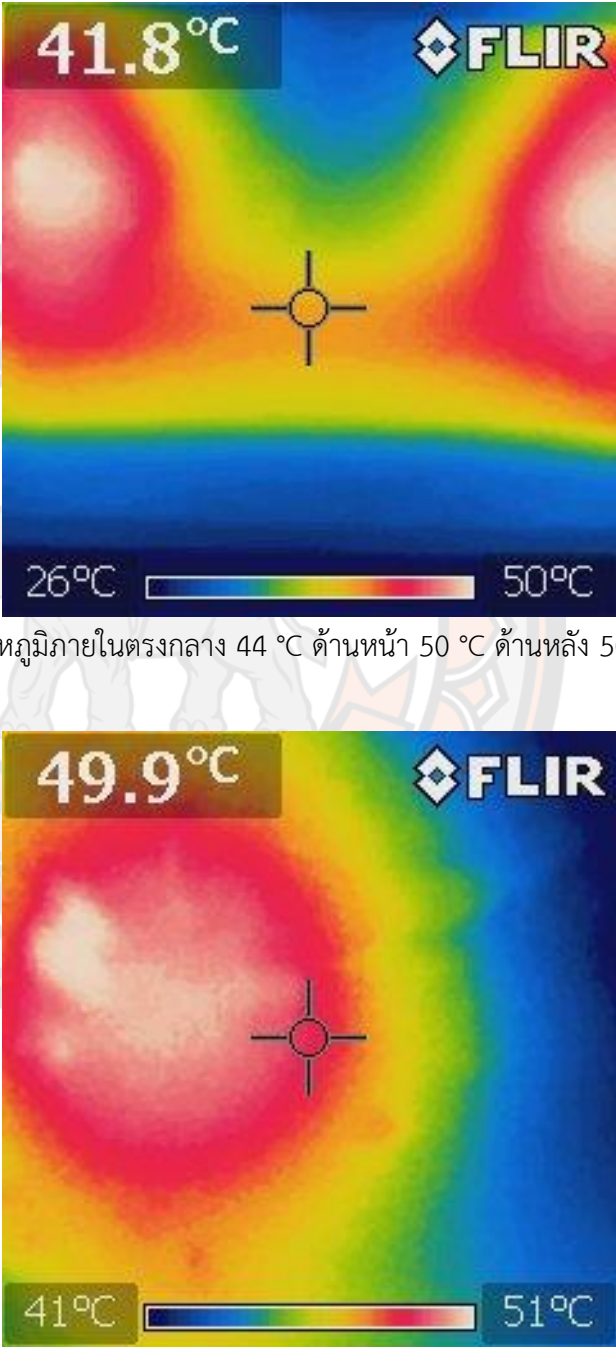
จากตาราง 13 การทดลองการให้ความร้อนแบบจำลองตู้กระจกใส แสดงความร้อน ในช่วงเวลาต่างๆ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ด้วยความเร็ว 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยรูปภาพอินฟราเรดแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการให้ความร้อนอุณหภูมิภายนอกอยู่ที่อุณหภูมิ 25.7 °C ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภาพถ่ายอินฟราเรดแสดงให้เห็นอุณหภูมิความร้อนอยู่ที่ 55.1 °C เมื่อวัดจากภายนอก วัดจากภายในแบบจำลองอุณหภูมิความร้อนภายในที่อยู่ที่ 63.1 °C ภาพถ่ายอินฟราเรด แสดงความร้อนในเวลาต่างๆ ตามลำดับภาพ

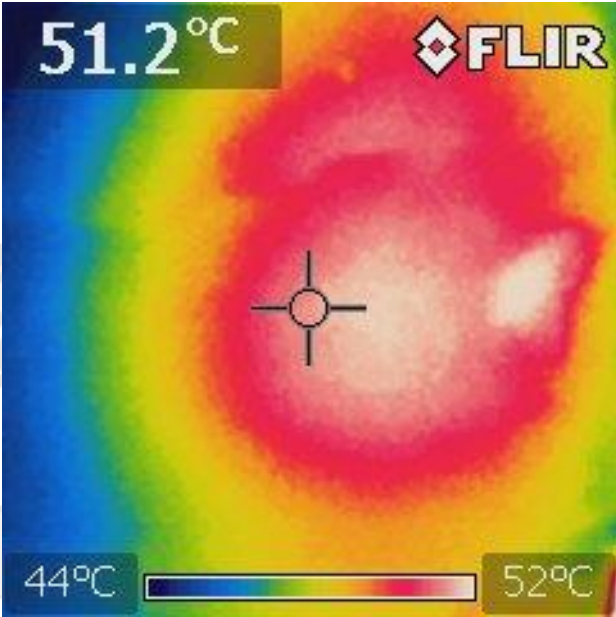
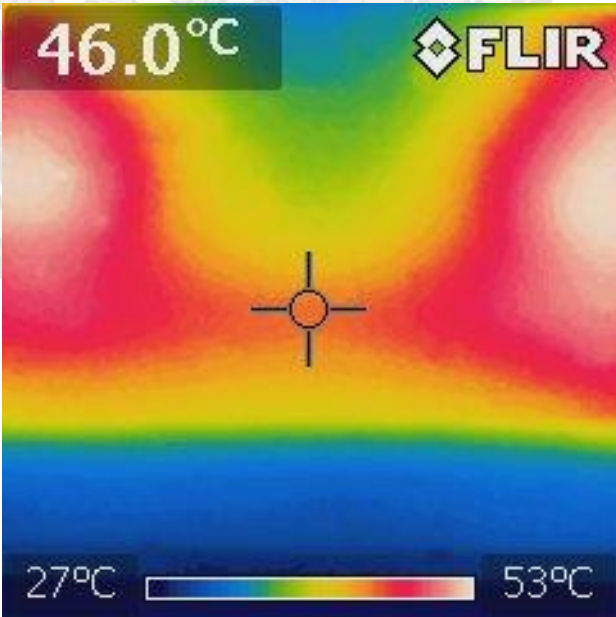
ตาราง 14 ทดลองการให้ความแบบจำลองชั้นดินและน้ำใต้ดินโดยใช้น้ำร้อน 80 °C น้ำร้อนไหลผ่าน 70 มิลลิลิตรต่อนาที

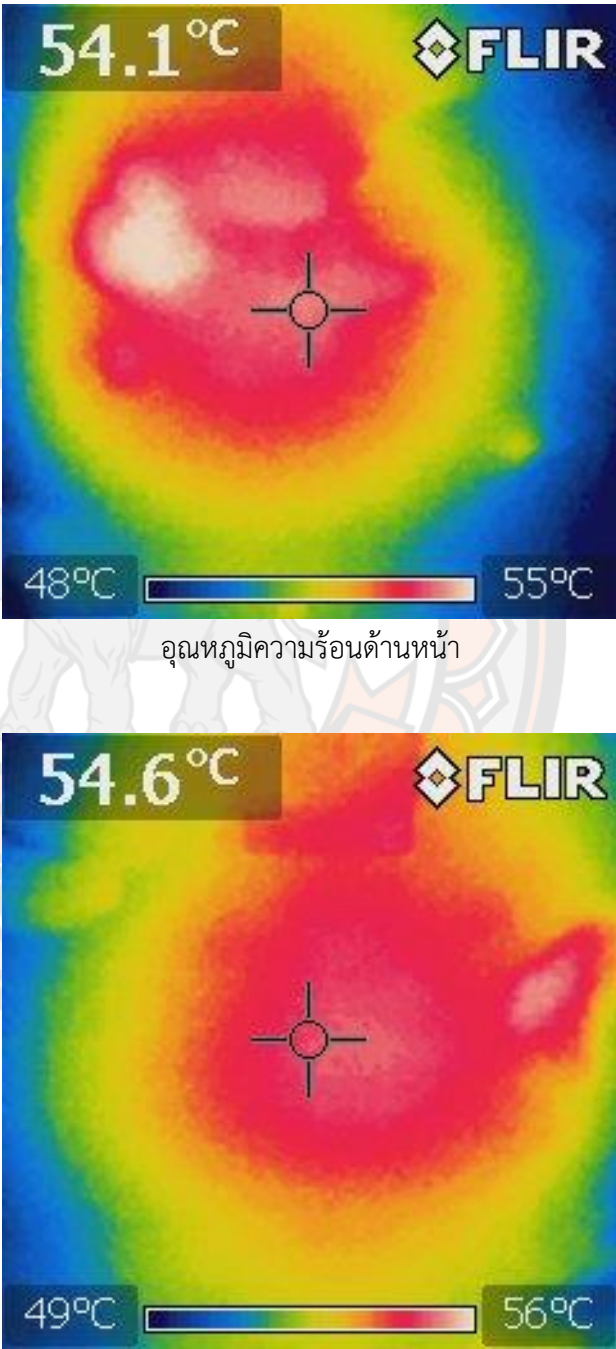
เวลา	รูปภาพ
เริ่มต้น	 <p data-bbox="683 1608 1203 1653">อุณหภูมิภายใน 25 °C อุณหภูมิขณะนั้น 19 °C</p>

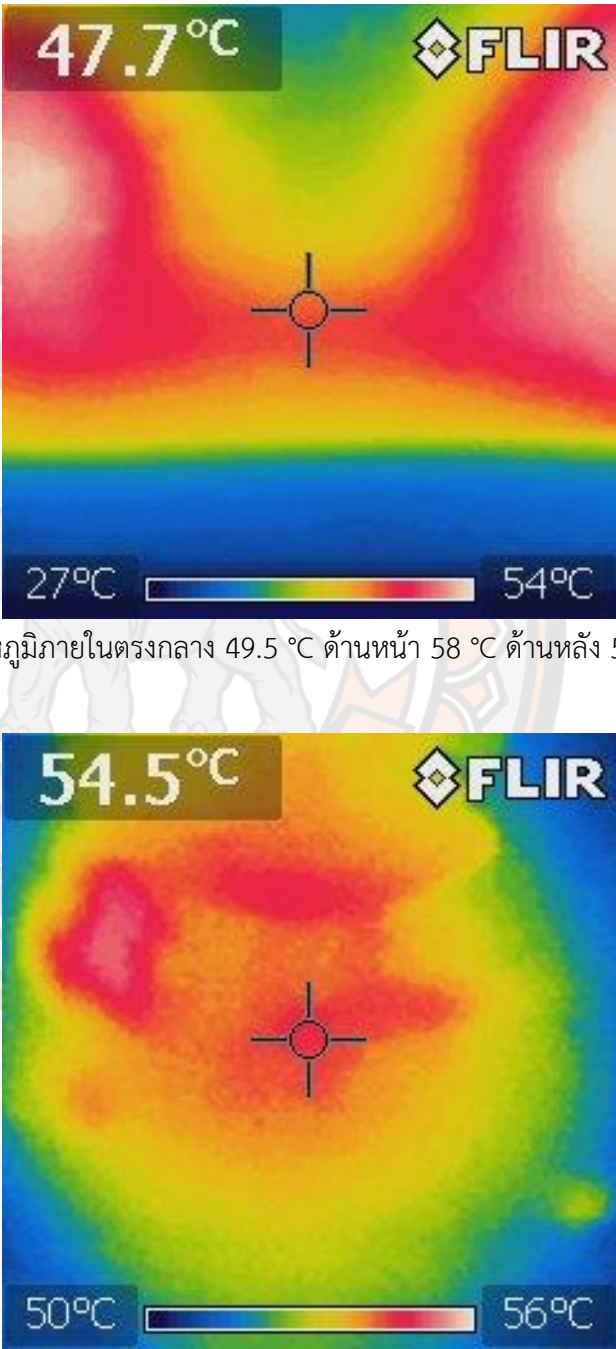
เวลา	รูปภาพ
15 นาที	 <p data-bbox="592 1122 1318 1160">อุณหภูมิภายใน ตรงกลาง 33 °C ด้านหน้า 36 °C ด้านหลัง 36 °C</p> <p data-bbox="804 1839 1102 1877">อุณหภูมิตรงกลาง 34.4 °C</p>

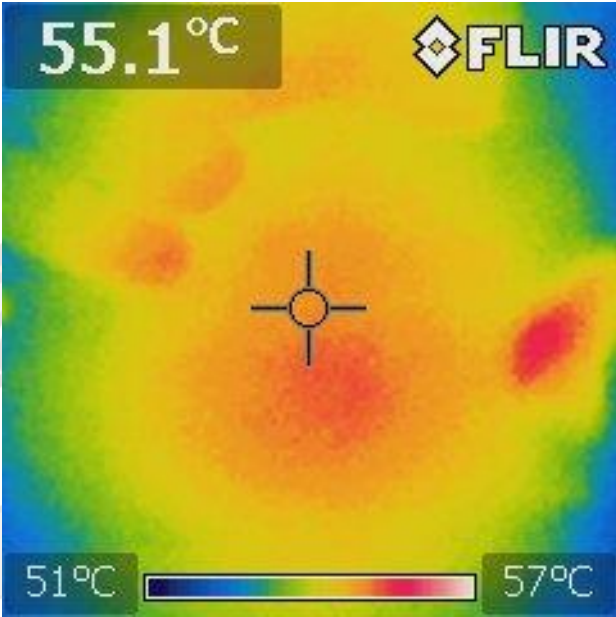
เวลา	รูปภาพ
15 นาที	 <p data-bbox="810 1122 1102 1160">อุณหภูมิด้านหน้า 40.5 °C</p>
30 นาที	 <p data-bbox="595 1850 1313 1888">อุณหภูมิภายในตรงกลาง 36 °C ด้านหน้า 39 °C ด้านหลัง 40 °C</p>

เวลา	รูปภาพ
1 ชั่วโมง	 <p data-bbox="596 1122 1310 1160">อุณหภูมิภายในตรงกลาง 44 °C ด้านหน้า 50 °C ด้านหลัง 50 °C</p> <p data-bbox="751 1850 1155 1888">อุณหภูมิความร้อนด้านหน้า 49.6 °C</p>

เวลา	รูปภาพ
1 ชั่วโมง	 <p data-bbox="751 1122 1155 1160">อุณหภูมิความร้อนด้านหลัง 51.2 °C</p>
1 ชั่วโมง 30 นาที	 <p data-bbox="596 1850 1315 1888">อุณหภูมิภายในตรงกลาง 48 °C ด้านหน้า 54 °C ด้านหลัง 55 °C</p>

เวลา	รูปภาพ
1 ชั่วโมง 30 นาที	 <p data-bbox="804 1115 1106 1160">อุณหภูมิความร้อนด้านหน้า</p> <p data-bbox="804 1845 1106 1890">อุณหภูมิความร้อนด้านหลัง</p>

เวลา	รูปภาพ
2 ชั่วโมง	 <p data-bbox="587 1122 1326 1160">อุณหภูมิภายในตรงกลาง 49.5 °C ด้านหน้า 58 °C ด้านหลัง 56 °C</p> <p data-bbox="804 1850 1102 1888">อุณหภูมิความร้อนด้านหน้า</p>

เวลา	รูปภาพ
2 ชั่วโมง	 <p data-bbox="804 1173 1102 1211">อุณหภูมิความร้อนด้านหลัง</p>


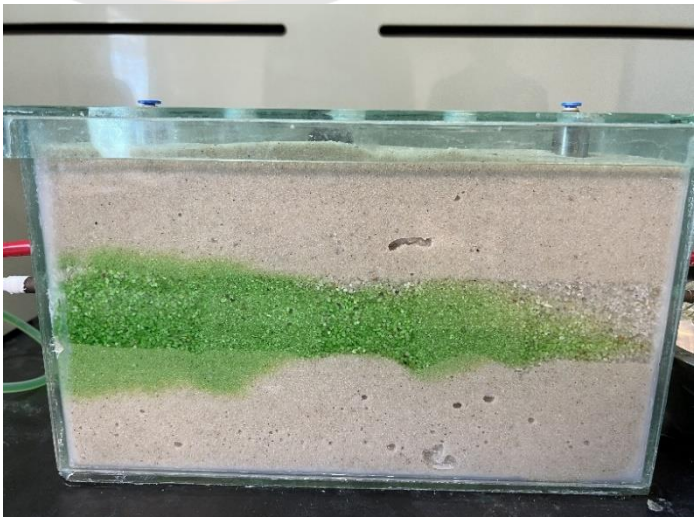
จากตาราง 14 จากการทดลองการให้ความร้อนแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน แสดงความร้อนในช่วงเวลาต่างๆ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ด้วยความเร็ว 70 มิลลิลิตรต่อนาที โดยรูปภาพแสดงให้เห็นอุณหภูมิภายในแบบจำลองและภายนอกแบบจำลอง โดยใช้กล้องอินฟราเรดและเทอร์โมมิเตอร์ในการวัดอุณหภูมิ ภาพถ่ายทั้งหมดบ่งบอกถึงการที่อุณหภูมิที่เข้าสู่แบบจำลองและกระจายตัวนั้นจะส่งความร้อนไปให้กับจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกส่งเข้าไปสู่ภายในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนและจะแข็งตัวเมื่อโดนความร้อน รูปภาพอินฟราเรดแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการให้ความร้อน อุณหภูมิภายนอกอยู่ที่อุณหภูมิ 19 °C อุณหภูมิภายในวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์อยู่ที่อุณหภูมิ 25 °C ให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภาพถ่ายอินฟราเรดแสดงให้เห็นอุณหภูมิความร้อนอยู่ที่ 47.7 °C เมื่อวัดจากภายนอกและเทอร์โมมิเตอร์วัดค่าอุณหภูมิจากภายในแบบจำลองได้อยู่ที่ 58 °C ตามลำดับ ภาพถ่ายอินฟราเรดและอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์วัดได้ภายในแบบจำลอง



4.3 การศึกษารูปแบบการไหลของน้ำในแบบจำลอง

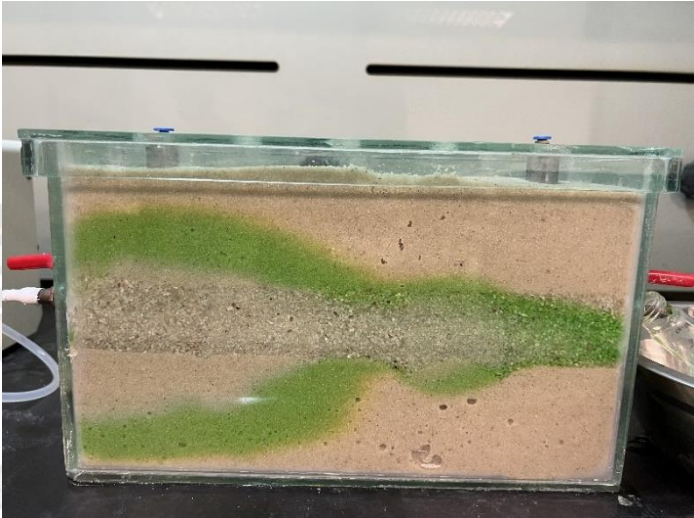
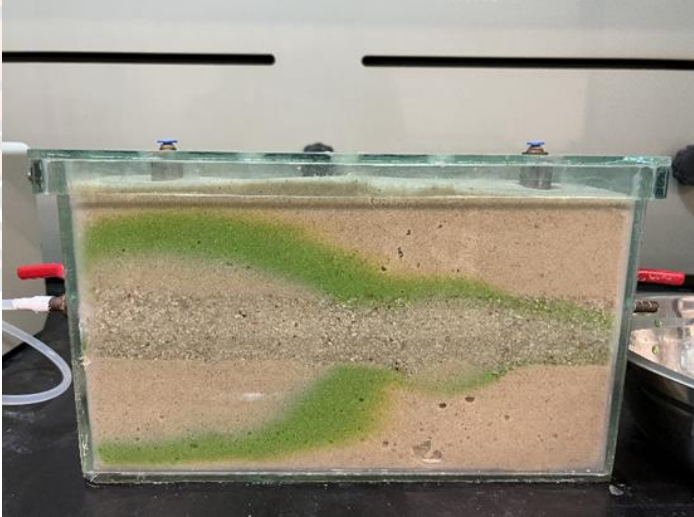
ตาราง 15 การทดลองการเดินน้ำสีเพื่อวัดค่าการดักกิ้นแสงในแบบจำลอง

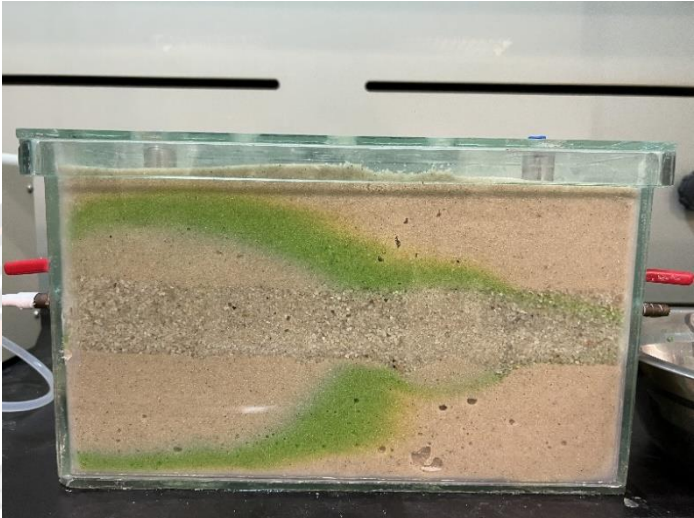
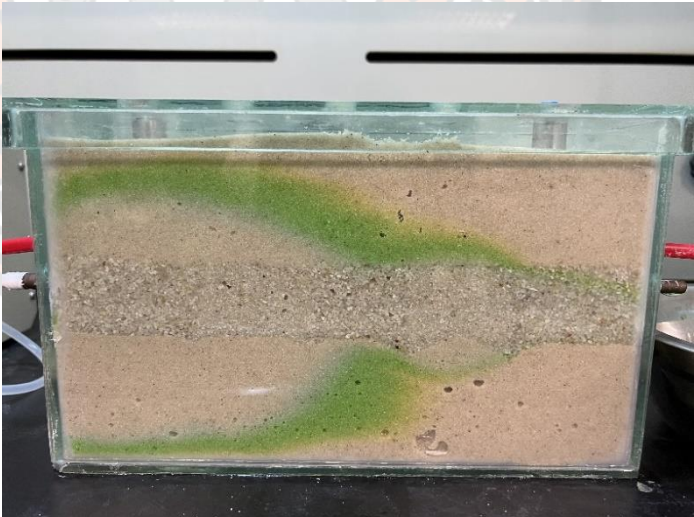
โดยใช้สีผสมอาหาร (สีเขียว) 1 กรัมต่อน้ำ 5 ลิตร

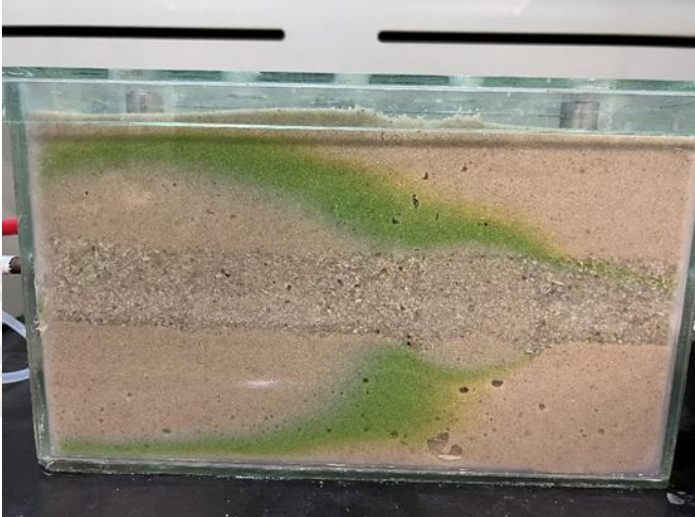
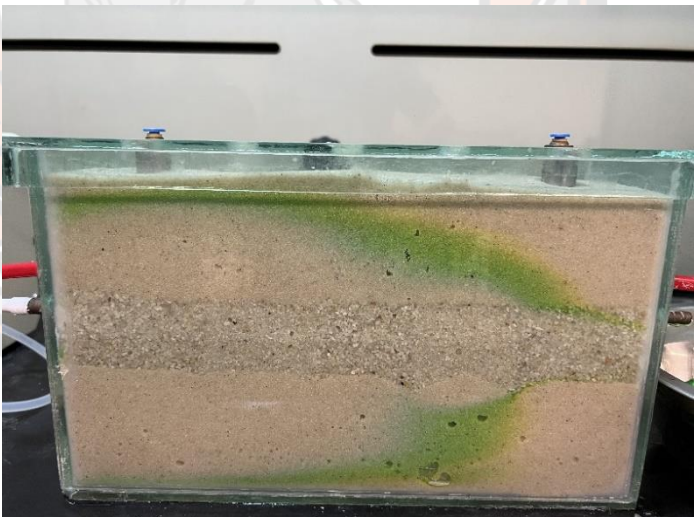
1 PV (รอบของความหนาแน่นของน้ำภายในแบบจำลอง) = 1.6 / อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที (0.19 เซนติเมตรต่อนาที)

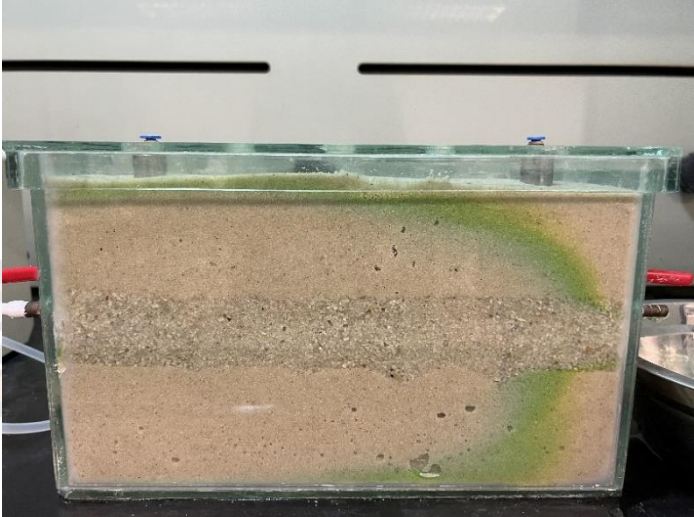
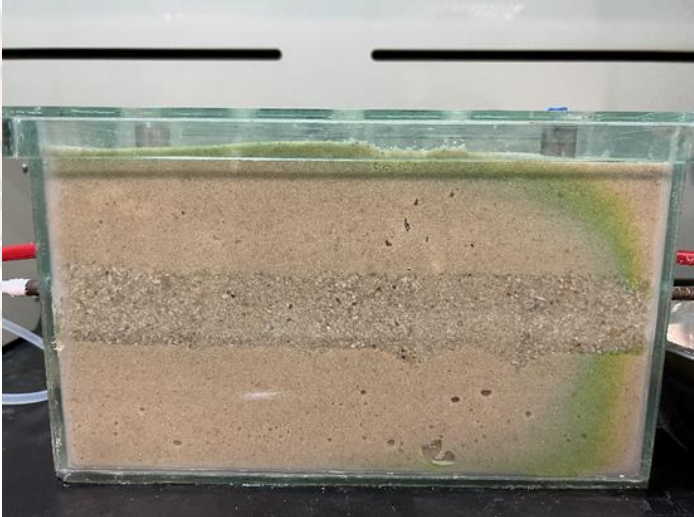
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	


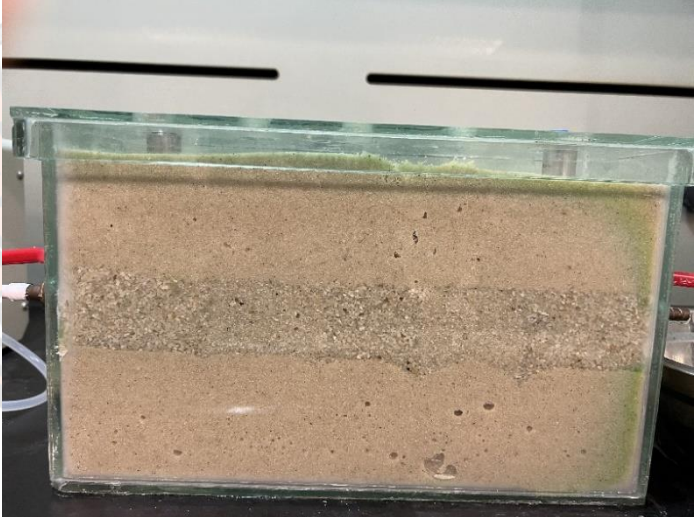
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	

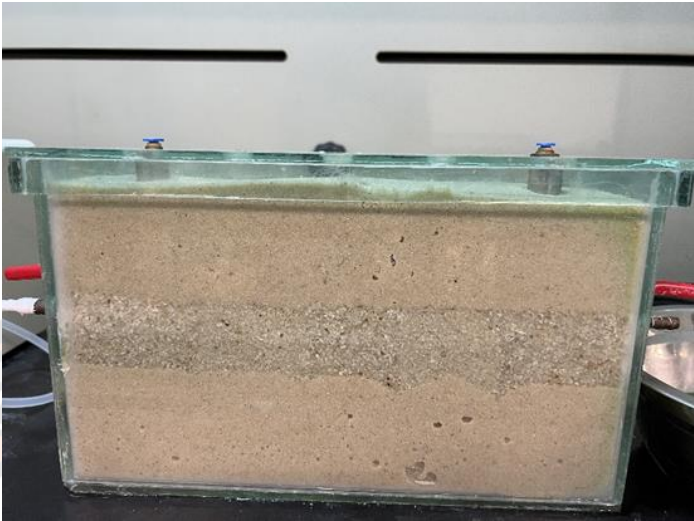

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 5	
ภาพที่ 6	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	
ภาพที่ 10	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 11	
ภาพที่ 12	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 15	
ภาพที่ 16	

จากตาราง 15 การทดลองการเดินน้ำสีเพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงในแบบจำลอง ใช้เวลา 24 ชั่วโมงในการเก็บตัวอย่าง โดยน้ำสีที่ใช้เกิดจากการผสมกันระหว่างสีผสมอาหาร 1 กรัมต่อน้ำ 5 ลิตร ความหนาแน่นของมวลน้ำในตู้กระจกคือ 1.6 ลิตร กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินอยู่ที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาทีซึ่งเทียบเท่ากับการไหล 0.19 เซนติเมตรต่อนาทีในแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน รูปภาพจะแสดงการไหลเข้าของน้ำสีเขียว

ผ่านแบบจำลองเพื่อให้เห็นการไหลของน้ำที่ผ่านแบบจำลองในเวลาต่างๆ เริ่มจาก 0 นาที จนถึง 1,440 นาทีและเก็บตัวอย่างในเวลาต่างๆ เพื่อดูระยะเวลาการเคลื่อนที่ของสีน้ำในช่วงเวลา โดยกำหนดทิศทางการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองจากการแจกแจงความเร็วในแต่ละชั้นทรายอ้างอิงจากกฎของ Darcy (Darcy's Law)(24) หลังจากนั้นทำการทดลองโดยวิธีการใช้สารติดตาม (tracer test) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ และนำค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ (Hydraulic conductivity) เก็บเป็นตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectroscopy) รูปภาพจากตาราง 15 แสดงการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน 1.6 ลิตรภายใน 160 นาทีและหลังจากนั้นรูปภาพแสดงการไหลของน้ำปกติเพื่อล้างสีภายในแบบจำลองจากกลับมาเป็นแบบจำลองตอนเริ่มต้นอีกครั้ง

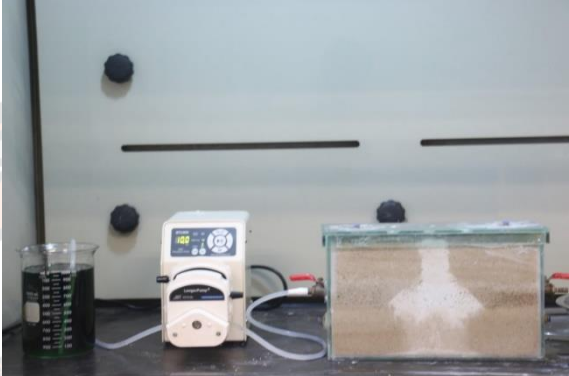
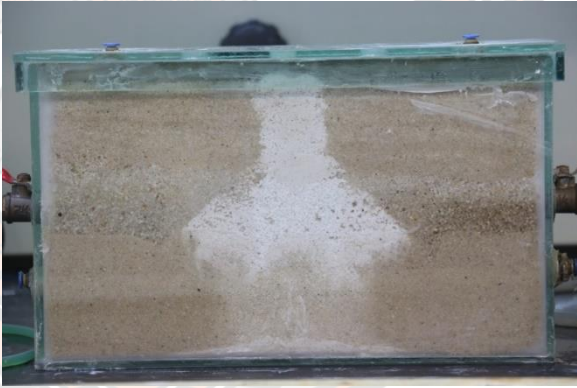
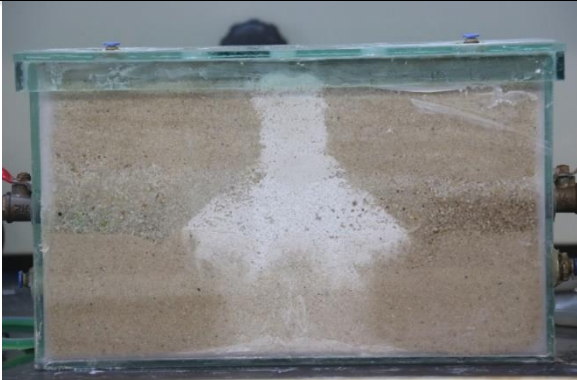


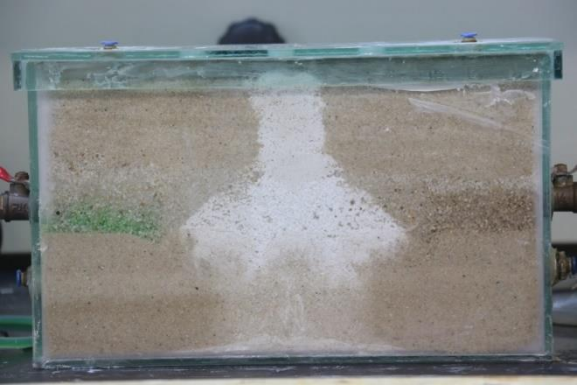
ภาพ 41 การไหลของน้ำผ่านแบบจำลอง

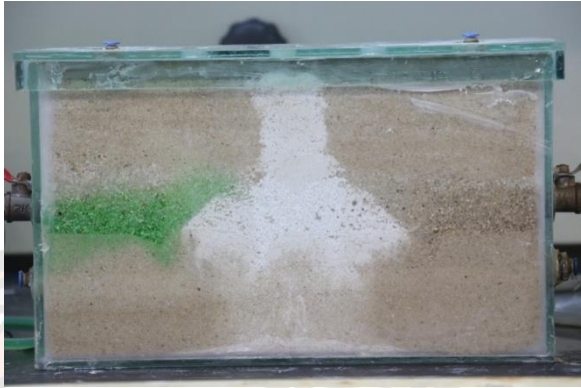
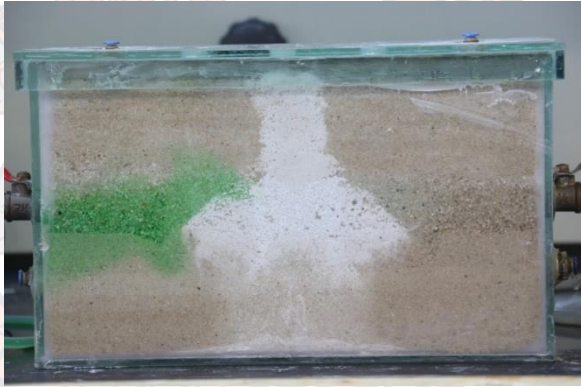
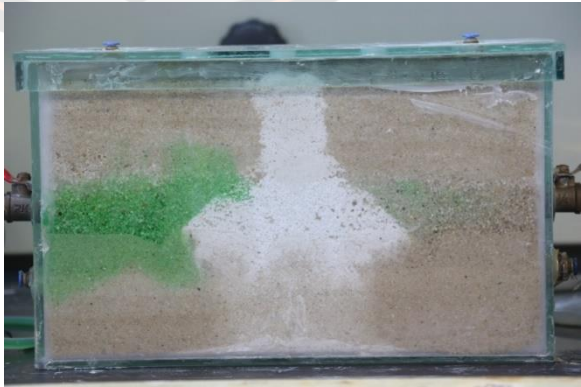
จากภาพ 41 การไหลของน้ำผ่านแบบจำลองเป็นการทดลองโดยวิธีการใช้สารติดตาม (tracer test) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic conductivity) เป็นการทดลองเพื่อดูระยะเวลาทางการเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงเวลาต่างๆ กราฟแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนแสงของน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองในทุกๆ 30 นาทีจนถึงเวลา 450 นาที ค่าสูงสุดอยู่ที่เวลา 180 นาที หลังจากนั้นค่าที่เก็บได้มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกลับมาสู่ค่าเริ่มต้นอีกครั้งใช้เวลารวมทั้งสิ้น 450 นาที

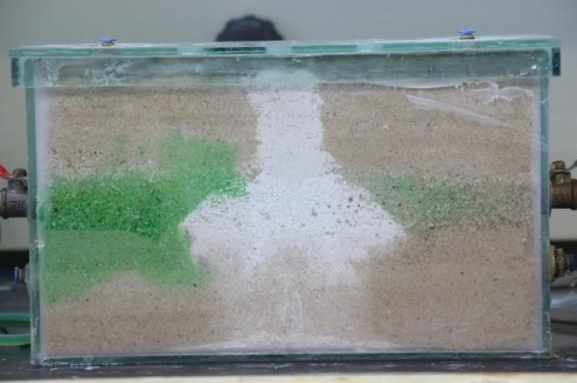
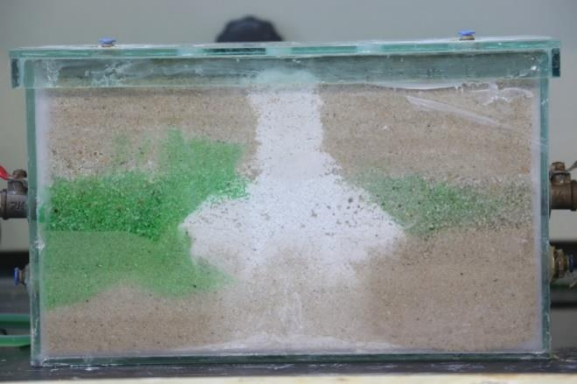
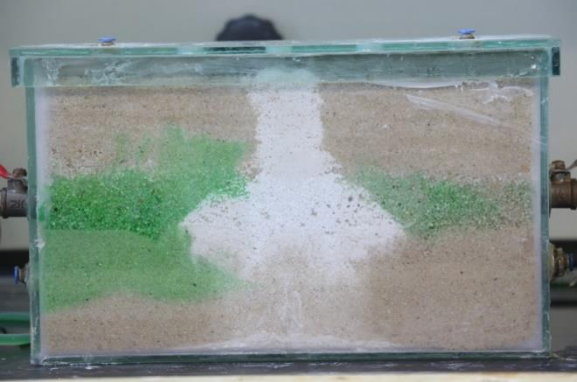
4.4 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน



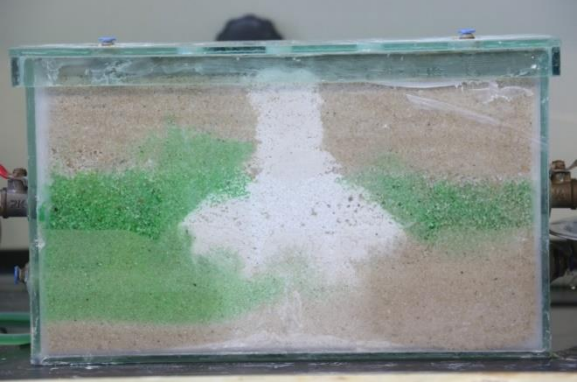
ตาราง 16 การทดลองการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน
เก็บค่าการดูดกลืนแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

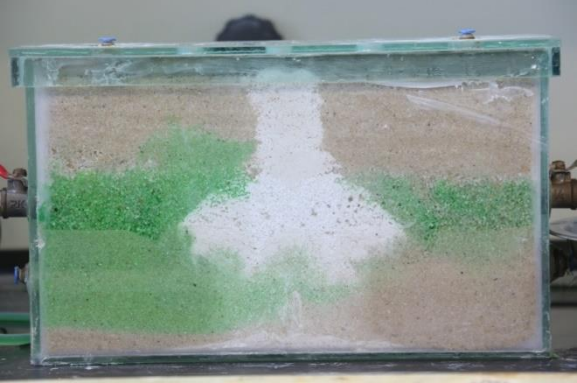

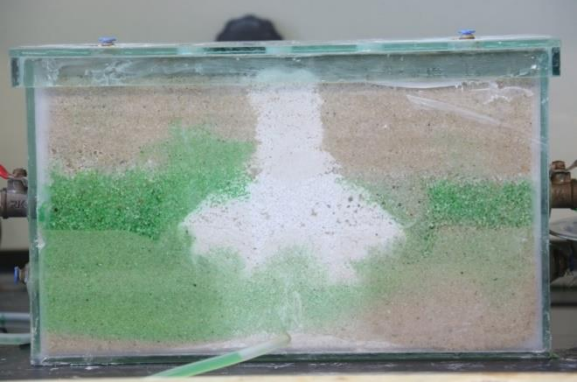
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	
ภาพที่ 3	

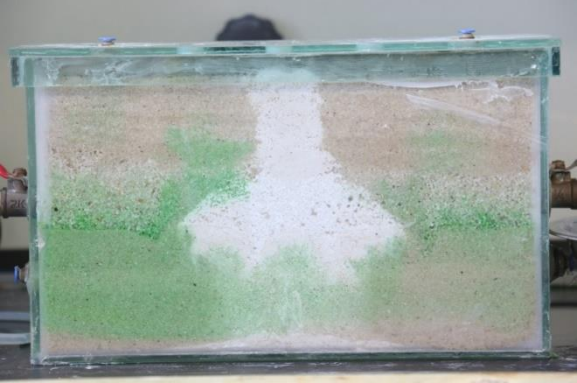
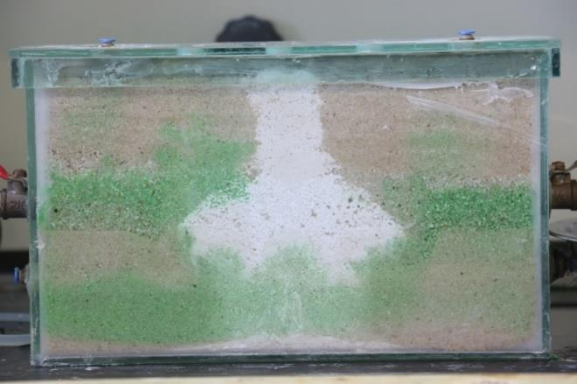
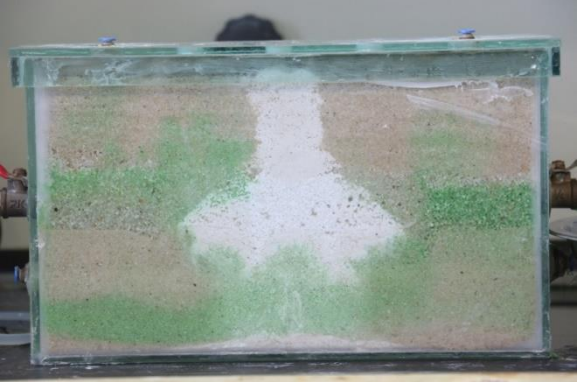
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 4	
ภาพที่ 5	
ภาพที่ 6	

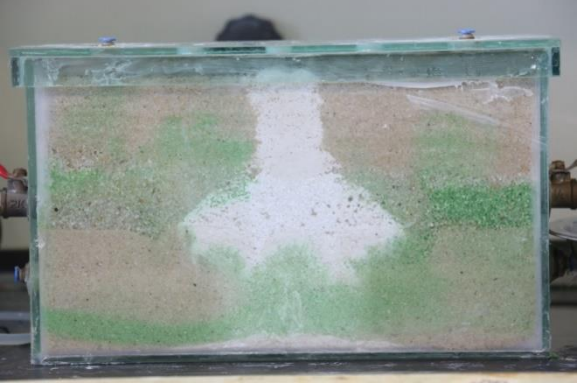

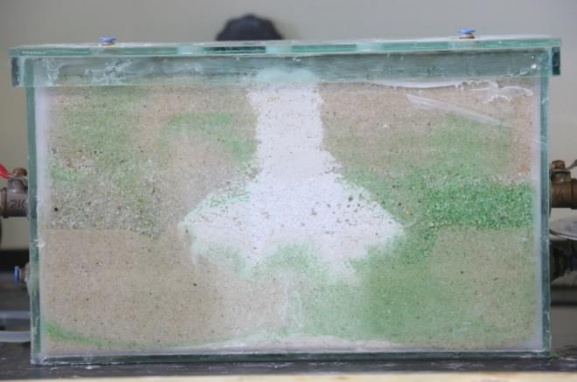
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	
ภาพที่ 9	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 10	
ภาพที่ 11	
ภาพที่ 12	

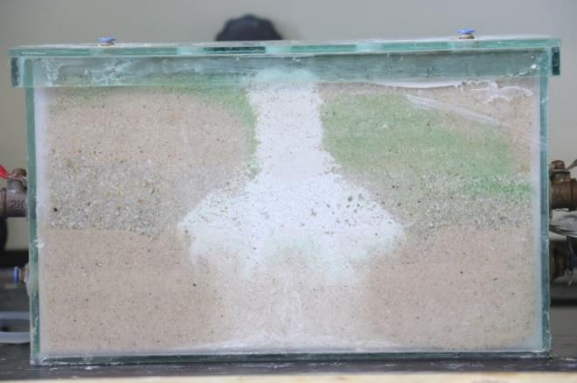
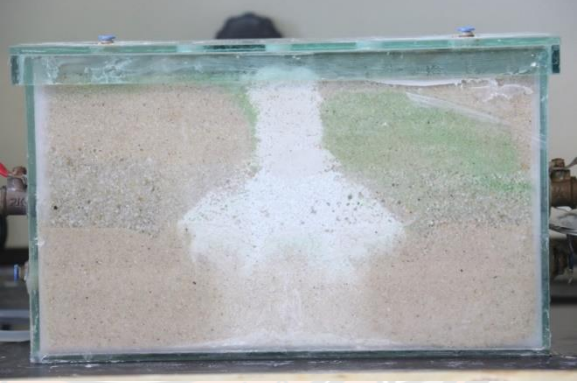
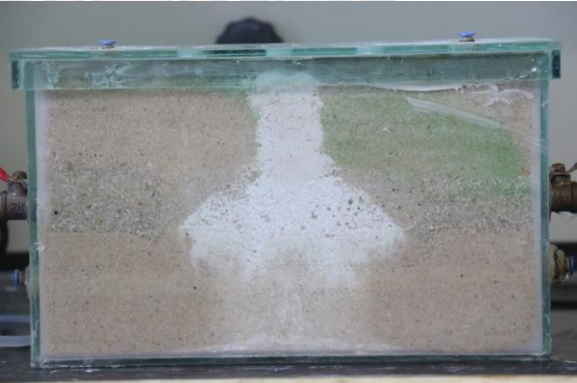
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	
ภาพที่ 15	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 16	
ภาพที่ 17	
ภาพที่ 18	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 19	
ภาพที่ 21	
ภาพที่ 22	

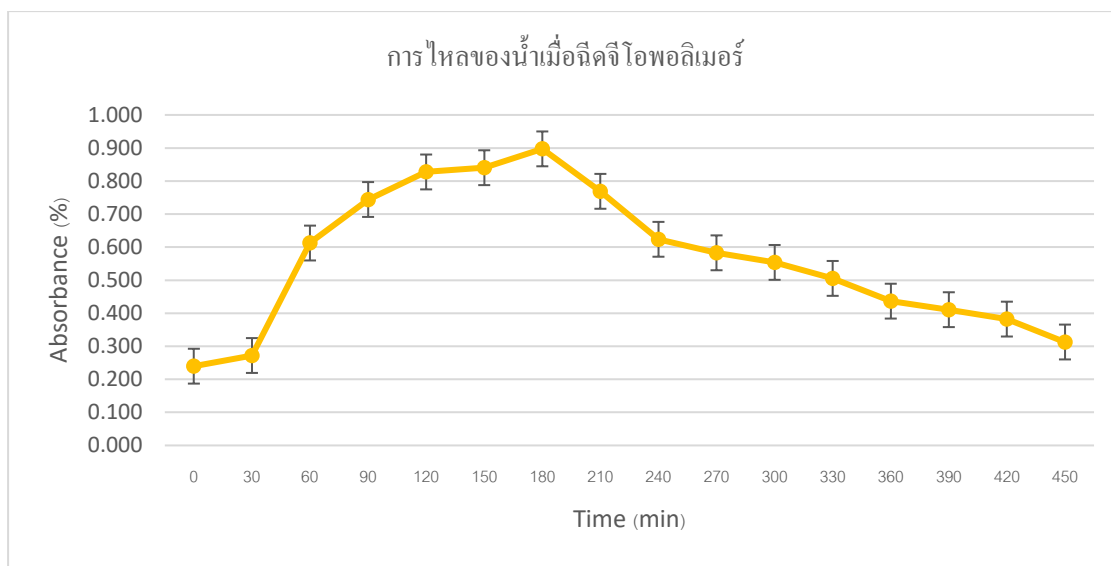
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 23	
ภาพที่ 24	
ภาพที่ 25	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 26	
ภาพที่ 27	
ภาพที่ 28	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 29	
ภาพที่ 30	
ภาพที่ 31	

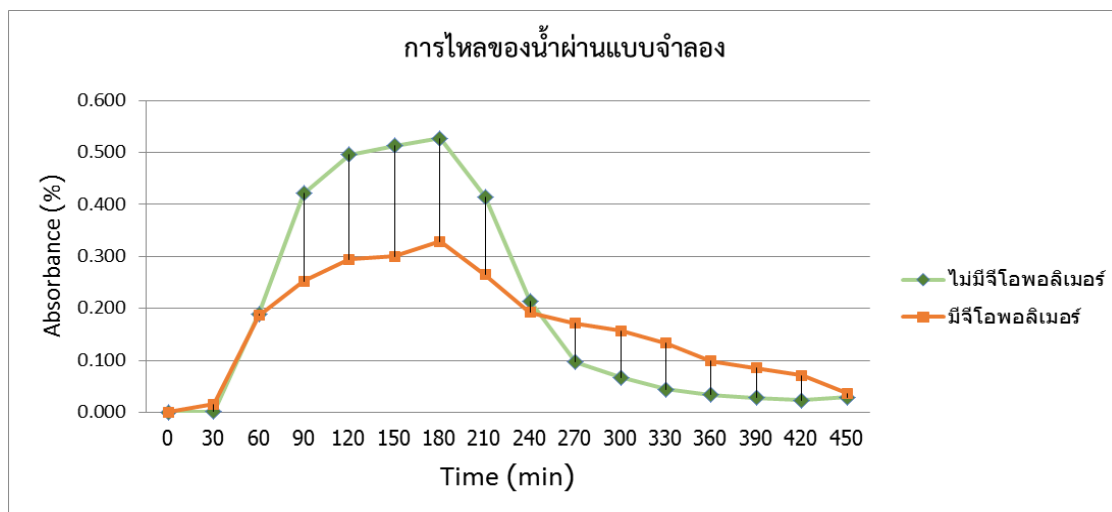
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 32	

จากตาราง 16 การทดลองการเดินน้ำสีเพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงในแบบจำลองที่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลอง ในบริเวณที่มีค่าการซึมผ่านสูง ใช้เวลา 8 ชั่วโมง ในการเก็บตัวอย่าง โดยน้ำสีที่ใช้เกิดจากการผสมกันระหว่างสีผสมอาหาร 1 กรัมต่อน้ำ 5 ลิตร ความหนาแน่นของมวลน้ำในตู้กระจกคือ 1.6 ลิตร กำหนดให้ อัตราการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินอยู่ที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาทีซึ่งเทียบเท่ากับการไหล 0.19 เซนติเมตรต่อนาทีในแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน รูปภาพจะแสดงการไหลเข้าของน้ำสีเขียวและผ่านจีโอพอลิเมอร์ ผ่านแบบจำลอง เพื่อให้เห็นการไหลของน้ำที่ผ่านแบบจำลองในเวลาต่างๆ เริ่มจาก 0 นาที จนถึง 1,440 นาทีและเก็บตัวอย่างในเวลาต่างๆ โดยภาพจะแสดงให้เห็นถึงการหน่วงและการเปลี่ยนทิศทางการไหล ของน้ำสีเขียวด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่อยู่ในบริเวณกลางแบบจำลอง กำหนดทิศทางการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองจากการการแจกแจงความเร็วในแต่ละชั้นทรายอ้างอิงจากกฎของ Darcy (Darcy's Law)(24) หลังจากนั้นทำการทดลองโดยวิธีการใช้สารติดตาม (tracer test) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ และนำค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ (Hydraulic conductivity) เก็บเป็นตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectroscopy) รูปภาพจากตาราง 16 แสดงการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน 1.6 ลิตร ภายใน 160 นาทีและหลังจากนั้นรูปภาพแสดงการไหลของน้ำปกติเพื่อล้างสีภายในแบบจำลองกลับมาเป็นแบบจำลองตอนเริ่มต้นอีกครั้ง



ภาพ 42 การไหลของน้ำเมื่อนิดจีโอพอลิเมอร์

จากภาพ 42 การไหลของน้ำผ่านแบบจำลองเป็นการทดลองโดยวิธีการใช้สารติดตาม (tracer test) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic conductivity) โดยมีการนิตจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองและทำให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัวด้วยความร้อน เป็นการทดลองเพื่อดูระยะทางการเคลื่อนที่ของน้ำในช่วงเวลาต่างๆ เก็บตัวอย่างจากทางออกของแบบจำลองมาวัดค่าการดูดกลืนแสง หลังจากที่มีจีโอพอลิเมอร์เข้าไปปรับสภาพ บริเวณที่มีค่าการซึมผ่านของน้ำสูงภายในแบบจำลองให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง กราฟแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนแสงของน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองในทุกๆ 30 นาทีจนถึงเวลา 450 นาที ค่าสูงสุดอยู่ที่เวลา 180 นาที หลังจากนั้นค่าที่เก็บได้มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกลับมาสู่ค่าเริ่มต้นอีกครั้งใช้เวลา รวมทั้งสิ้น 450 นาที






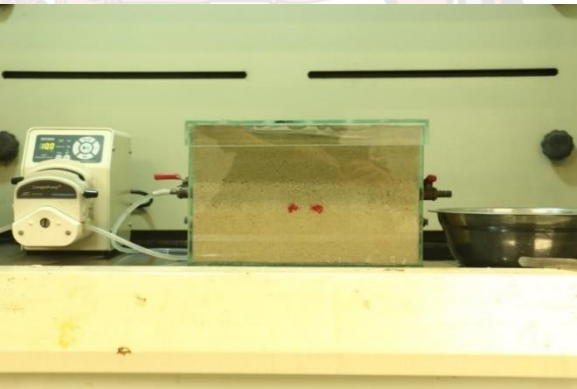

**ภาพ 43 เปรียบเทียบการไหลของน้ำในแบบจำลอง
ระหว่างชนิดจีโอพอลิเมอร์และไม่ชนิดจีโอพอลิเมอร์**

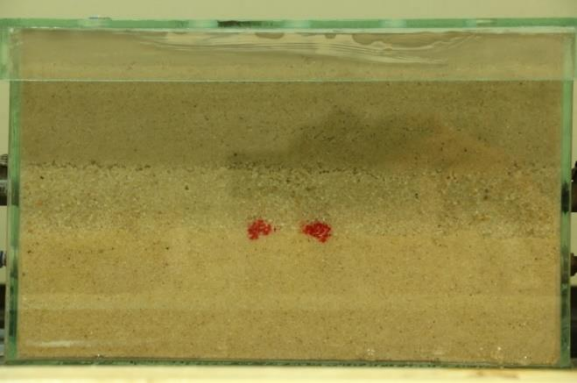
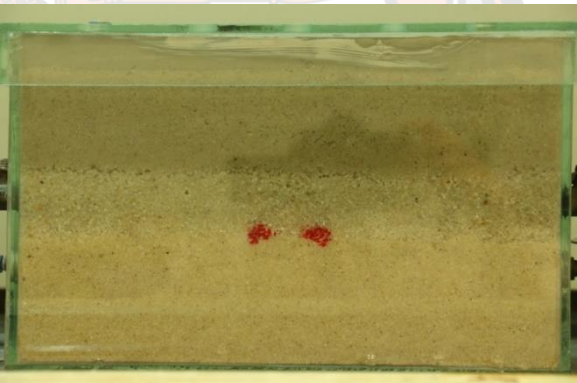
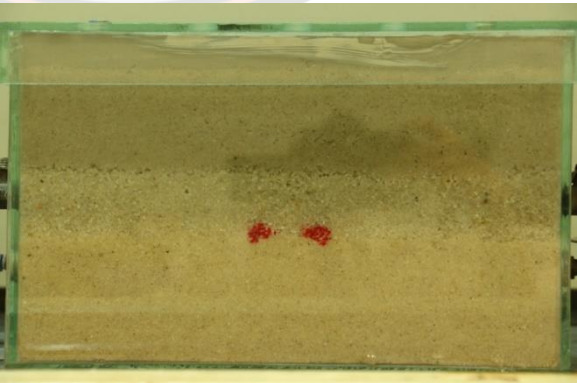
จากภาพ 43 การเปรียบเทียบการไหลของน้ำสีเขียวในแบบจำลองระหว่างชนิดจีโอพอลิเมอร์กับไม่ชนิด จีโอพอลิเมอร์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำในช่วงเวลาที่เท่ากัน กราฟแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลานั้นการไหลของน้ำภายในแบบจำลองเท่ากันมีจุดสูงที่สุดในเวลาเดียวกันคือ 180 นาที แต่หลังจากนั้นกราฟที่ไม่มีชนิดจีโอพอลิเมอร์ลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่กราฟของแบบจำลองที่มีการชนิดจีโอพอลิเมอร์นั้นเกิดการลดลงได้ช้ากว่า เนื่องจากน้ำที่ผ่านแบบจำลองที่ไม่มีชนิดจีโอพอลิเมอร์นั้นไหลผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ทำให้น้ำไหลได้ง่ายกว่า ส่วนแบบจำลองที่มีการชนิดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปเพื่อทำให้บริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยกว่านั้นแข็งตัวและกลายเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น น้ำที่ไหลผ่านจึงมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลอ้อมผ่านบริเวณที่มีการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้น้ำที่ไหลออกมานั้นมีการไหลออกจากแบบจำลองได้ช้ากว่า

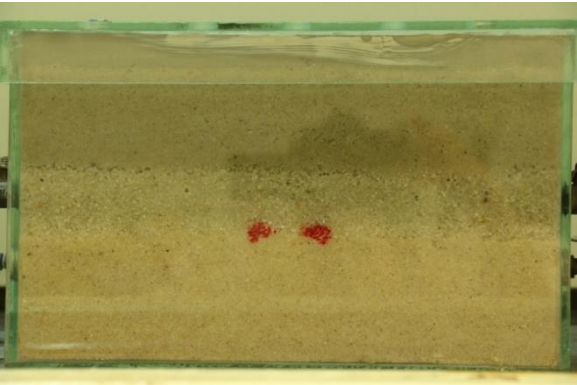
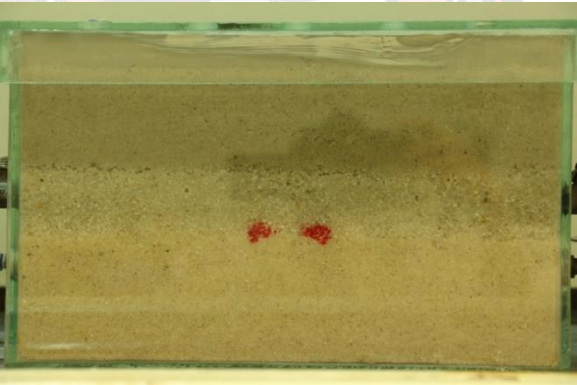

4.5 การฉีดสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกข้อมสิเข้าสู่แบบจำลอง

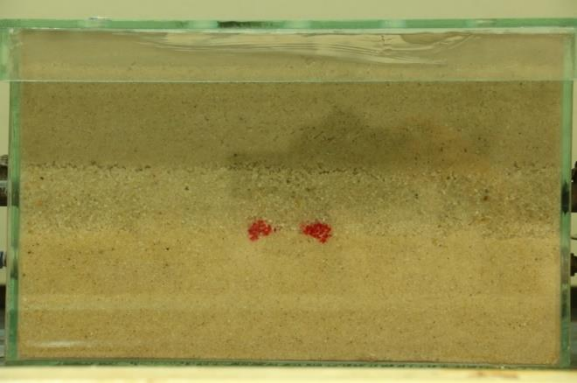
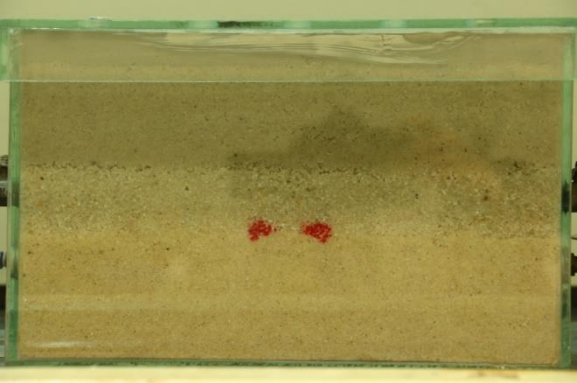
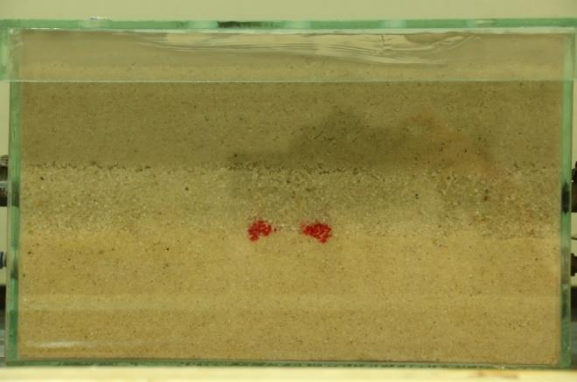
ตาราง 17 การทดลองการฉีดสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) และเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

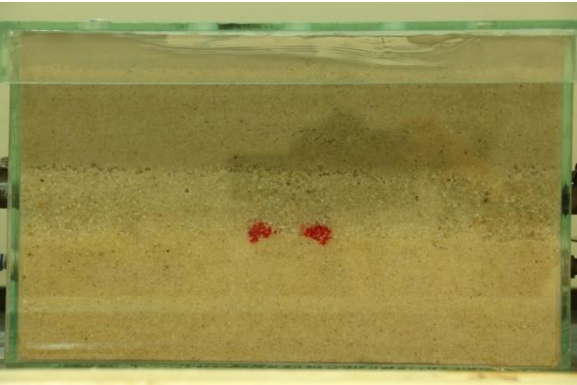
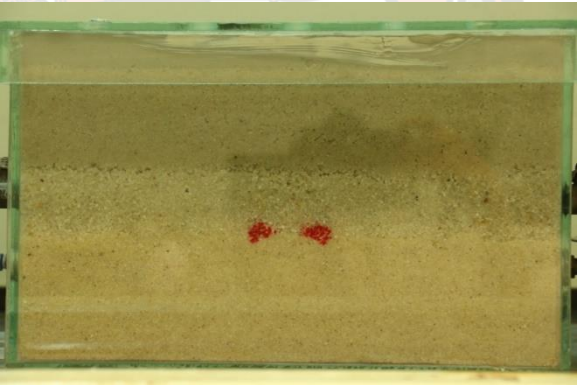
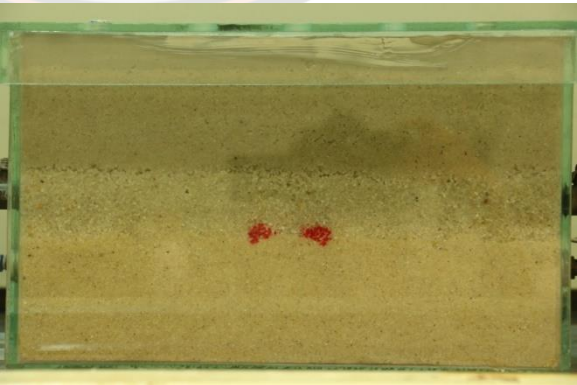
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	

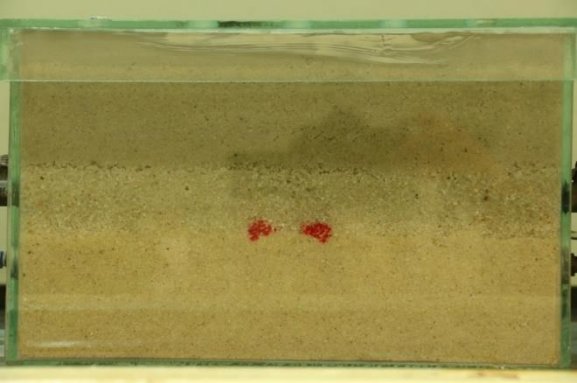
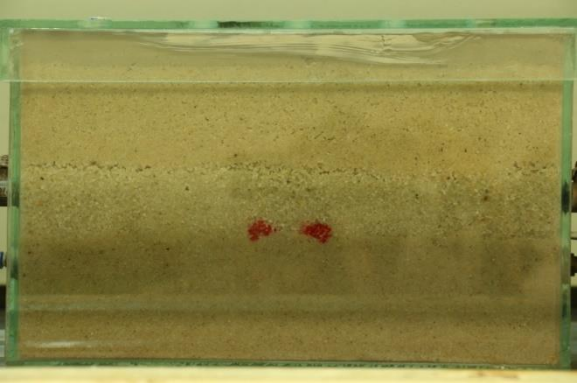
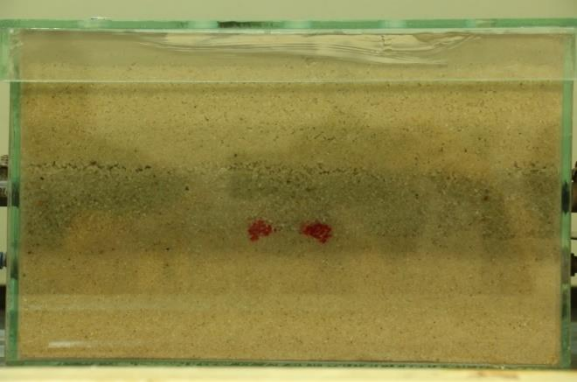
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	
ภาพที่ 5	

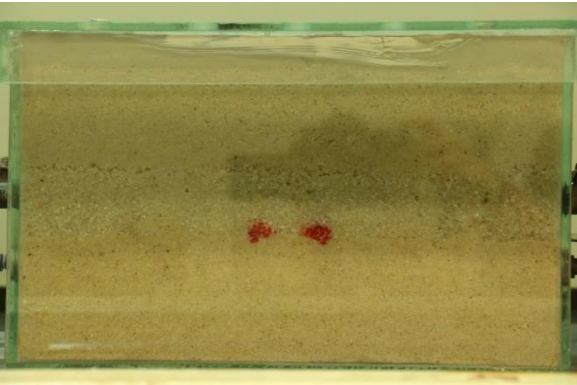
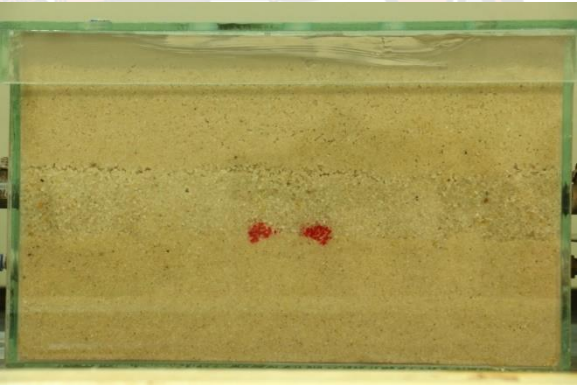
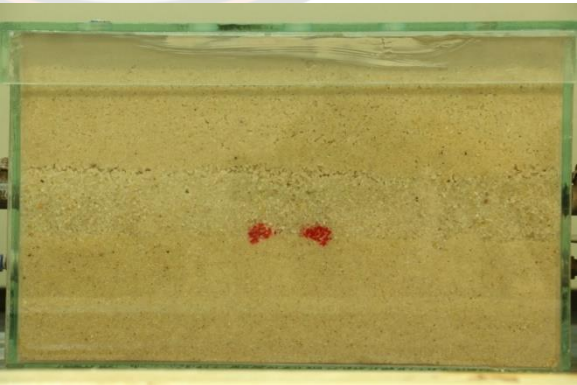
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 6	
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	

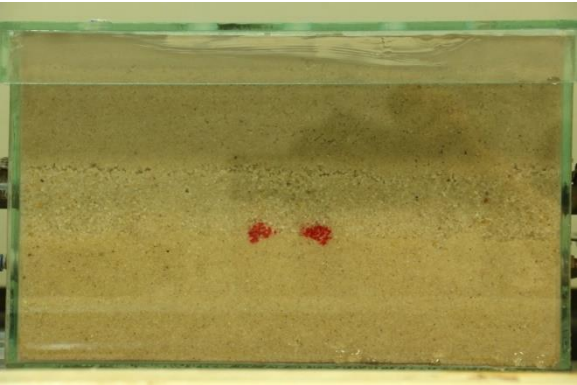
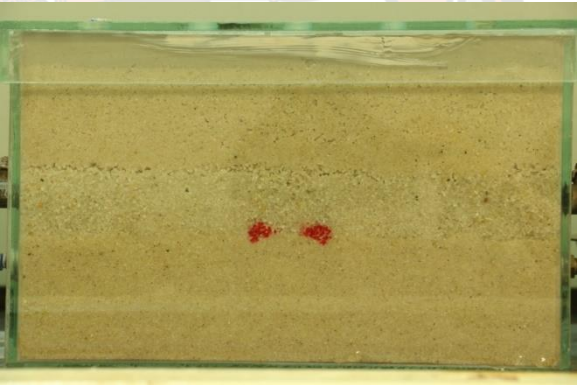
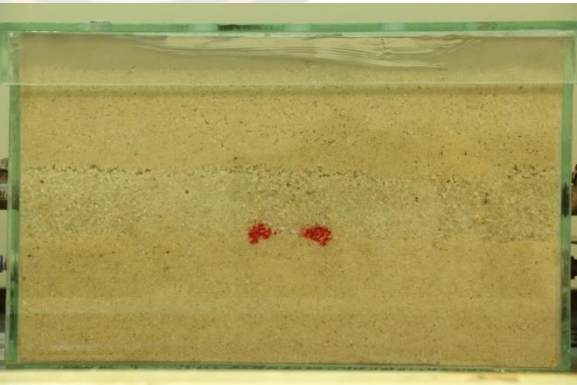
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	
ภาพที่ 10	
ภาพที่ 11	

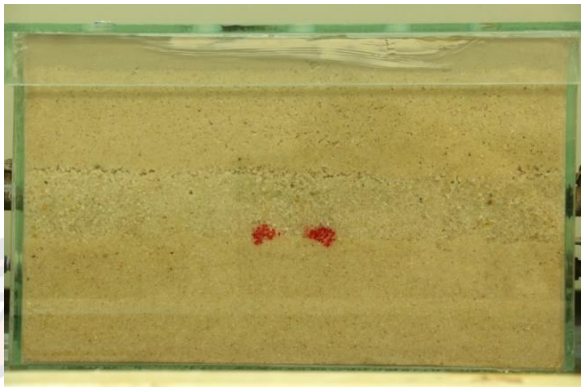
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 12	
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 15	
ภาพที่ 16	
ภาพที่ 17	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 18	
ภาพที่ 19	
ภาพที่ 20	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 21	
ภาพที่ 22	
ภาพที่ 23	


ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 24	
ภาพที่ 25	
ภาพที่ 26	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 27	


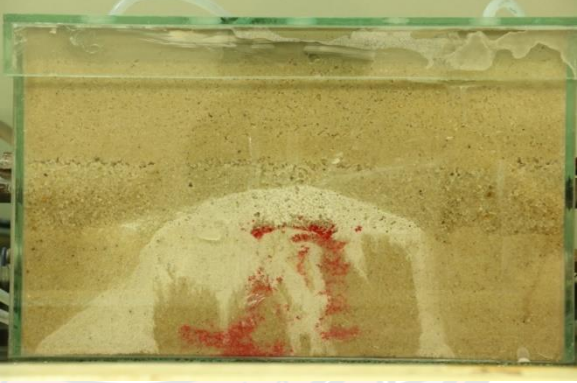
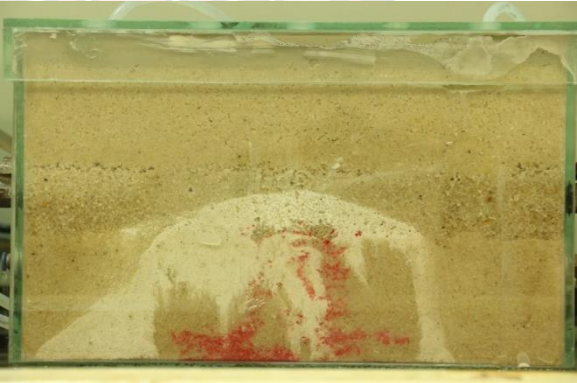
จากตาราง 17 Control การทดลองการฉีดสารเตตระคลอโรเอทีลีน (PCE) ที่ถูกข้อมสีด้วยสีแดงเข้าสู่แบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินและเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อวัดค่าการไหลของสารพิษในเวลาต่างๆ ตารางแสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายในแต่ละช่วงเวลาซึ่งการไหลของน้ำที่ผ่านเข้าไปในแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินนั้นไม่มีการส่งผลให้สารที่ถูกข้อมสีเปลี่ยนแปลงในเวลาที่แตกต่างกันไป มีการเก็บตัวอย่างที่ออกจากแบบจำลองทุกๆ 1 ชั่วโมง

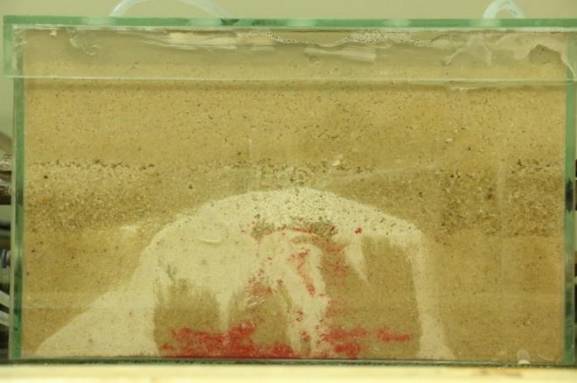


4.6 การฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองเพื่อลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย

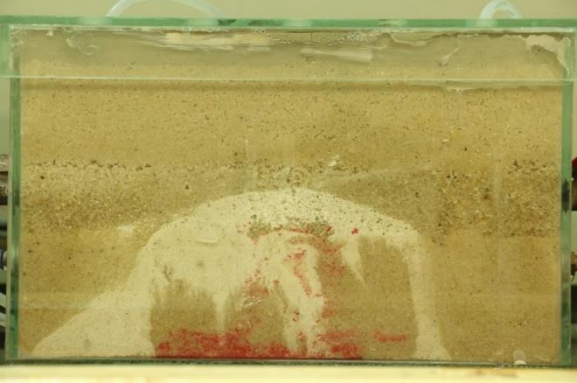

ตาราง 18 การฉีดจีโอพอลิเมอร์แล้วให้ความร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 2	
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	



ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 5	
ภาพที่ 6	
ภาพที่ 7	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 8	 A rectangular micrograph showing a biological specimen, possibly a cross-section of a plant or animal tissue, stained with a red dye. The specimen is centered and has a light, almost white, color with some darker, brownish areas. The red staining is concentrated in the lower portion of the specimen. The background is a uniform, light brown color.
ภาพที่ 9	 A rectangular micrograph showing a biological specimen, similar to the one in the previous image, stained with a red dye. The specimen is centered and has a light, almost white, color with some darker, brownish areas. The red staining is concentrated in the lower portion of the specimen. The background is a uniform, light brown color.
ภาพที่ 10	 A rectangular micrograph showing a biological specimen, similar to the ones in the previous images, stained with a red dye. The specimen is centered and has a light, almost white, color with some darker, brownish areas. The red staining is concentrated in the lower portion of the specimen. The background is a uniform, light brown color.


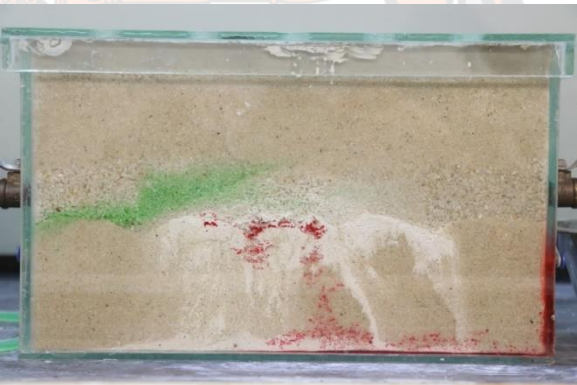

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 11	
ภาพที่ 12	




จากตารางภาพ 18 การฉีดจีโอพอลิเมอร์แล้วให้ความร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการให้ความร้อนในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัว โดยรูปภาพมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) กระจายตัวลงสู่พื้นที่ด้านล่าง อย่างไรก็ตามจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถติดตามลงไปครอบคลุมพื้นที่ด้านล่างด้วยเช่นกัน สังเกตจากบริเวณที่สารปนเปื้อนไหลลงไปไม่มีการล้อมรอบจีโอพอลิเมอร์โดยจีโอพอลิเมอร์นั้นจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนาแน่นให้กับชั้นดินที่มีค่าการซึ่่งผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ดีให้ความหนาแน่นมากขึ้นรวมทั้งในบริเวณที่มีการปนเปื้อนรวม โดยจีโอพอลิเมอร์ที่เพิ่มความหนาแน่นให้ความสัมพันธ์นั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำที่จะมีการไหลผ่านบริเวณที่มีการปนเปื้อน




ตาราง 19 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำภายในแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งตัวในพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยครั้งที่ 1


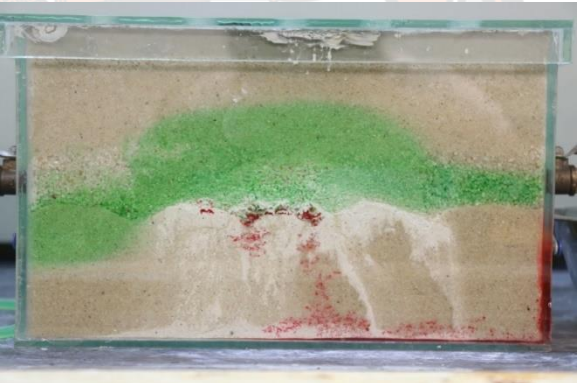

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	
ภาพที่ 5	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 6	
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	
ภาพที่ 10	
ภาพที่ 11	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 12	
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 15	
ภาพที่ 16	
ภาพที่ 17	



ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 18	
ภาพที่ 19	
ภาพที่ 20	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 21	
ภาพที่ 22	
ภาพที่ 23	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 24	 A photomicrograph of a soil sample. The image shows a cross-section of soil with a distinct green layer in the upper-middle part. Below this layer, there are several red spots and a lighter, sandy-looking area. The soil is contained within a glass slide.
ภาพที่ 25	 A photomicrograph of a soil sample, very similar to the previous one. It shows a green layer, red spots, and a sandy area. A large, faint watermark of a university seal is visible in the background of this row.
ภาพที่ 26	 A photomicrograph of a soil sample, showing the same features as the previous two: a green layer, red spots, and a sandy area.

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 27	
ภาพที่ 28	
ภาพที่ 29	

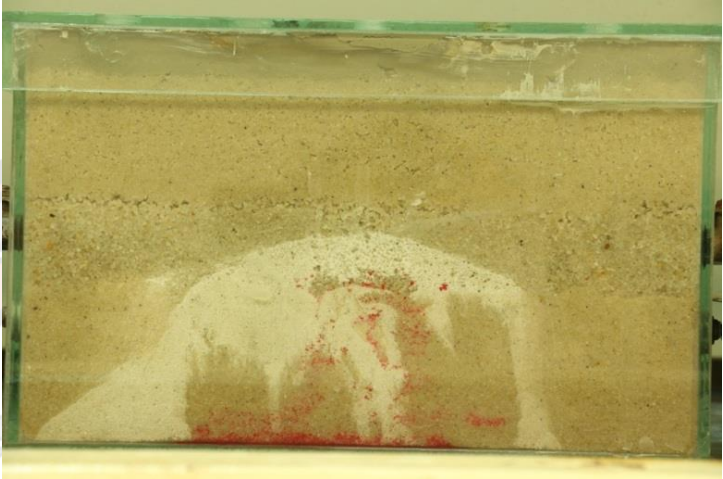
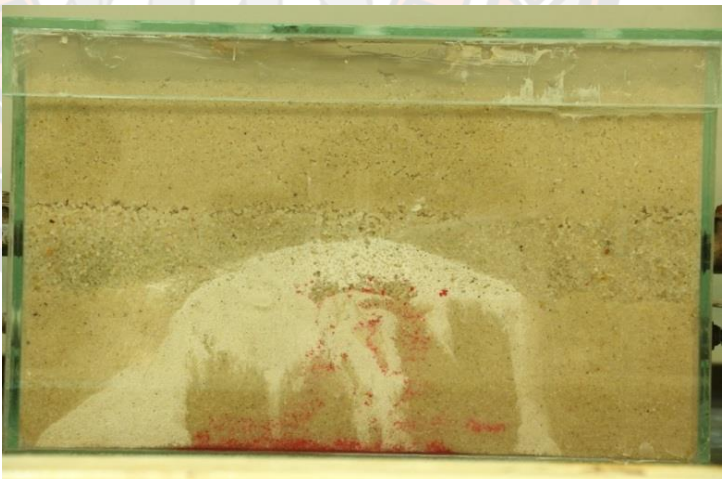
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 30	
ภาพที่ 31	
ภาพที่ 32	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 33	
ภาพที่ 34	
ภาพที่ 35	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 36	




จากตาราง 19 เริ่มต้นน้ำสี 1.6 ลิตรเข้าสู่แบบจำลองเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลของน้ำที่ผ่านแบบจำลองและบริเวณที่มีการปนเปื้อน รวมถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มความหนาแน่นในพื้นที่ของจีโอพอลิเมอร์ ภาพถ่ายทิศทางการไหลของน้ำจากแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในช่วงเวลาต่างๆมีการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 600 นาที รูปภาพแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของน้ำที่เข้าสู่แบบจำลองผ่านบริเวณที่มีจีโอพอลิเมอร์ล้อมรอบพื้นที่ปนเปื้อน ลักษณะการไหลในบริเวณที่มีจีโอพอลิเมอร์ จะมีความหนาแน่นมากกว่าทำให้ น้ำสีเขียวเปลี่ยนทิศทางการไหลไปในทิศทางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าตามทฤษฎีกฎของ Darcy (Darcy's Law)(24) โดยน้ำจะไหลผ่านพื้นที่ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด




ตาราง 20 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำภายในแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งตัวในพื้นที่
ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยครั้งที่ 2

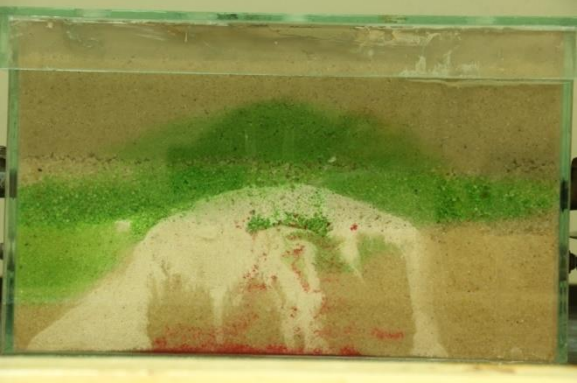


ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	



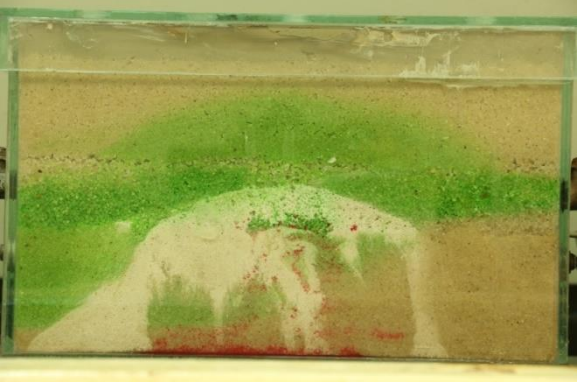
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	
ภาพที่ 5	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 6	
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	
ภาพที่ 10	
ภาพที่ 11	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 12	
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	


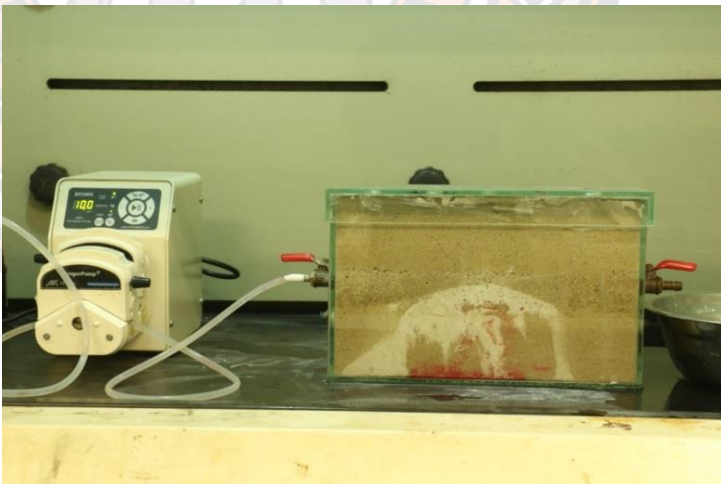
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 15	
ภาพที่ 16	
ภาพที่ 17	




ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 18	
ภาพที่ 19	
ภาพที่ 20	

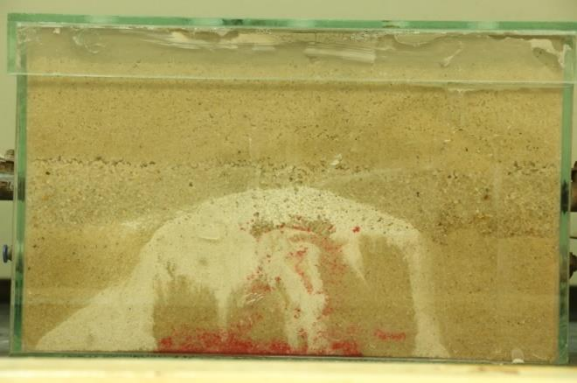
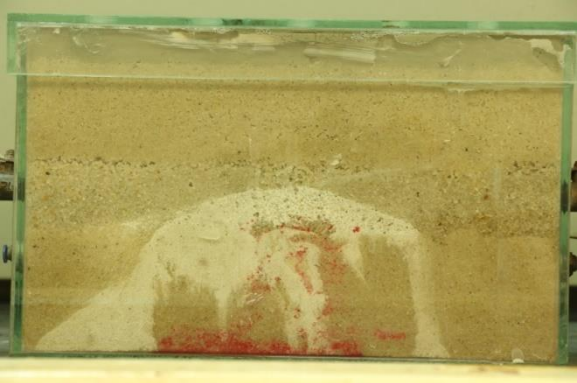

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 21	

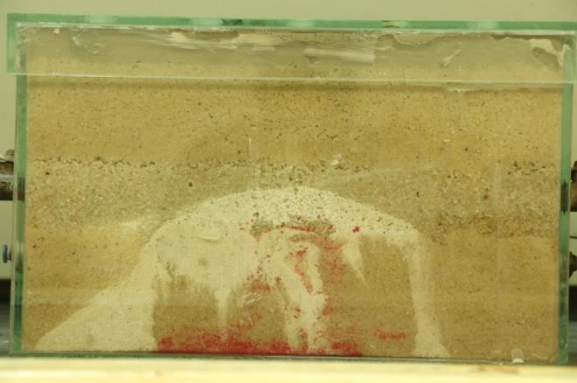
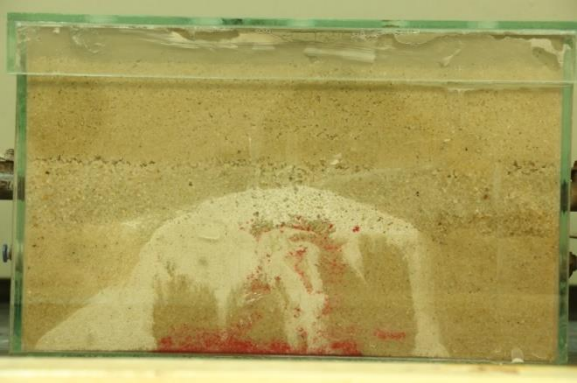
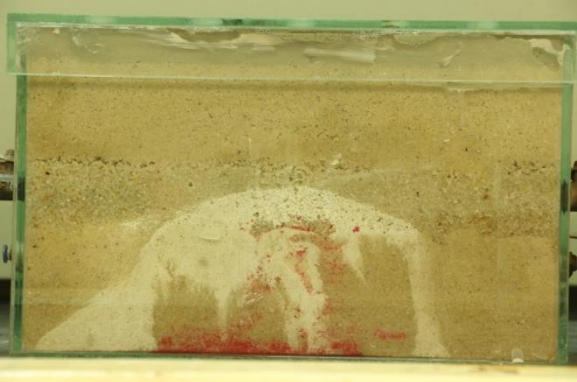
จากตาราง 20 เริ่มเติมน้ำสี 1.6 ลิตรเข้าสู่แบบจำลองครั้งที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงลักษณะการไหลของน้ำที่ผ่านแบบจำลองและบริเวณที่มีการปนเปื้อน รวมถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มความหนาแน่นในพื้นที่ของจีโอพอลิเมอร์ระหว่างตาราง 19 และตาราง 20 ภาพถ่ายทิศทางการไหลของน้ำจากแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในช่วงเวลาต่างๆมีการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 600 นาที รูปภาพแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของน้ำที่เข้าสู่แบบจำลองผ่านบริเวณที่มี จีโอพอลิเมอร์ล้อมรอบพื้นที่ปนเปื้อน ลักษณะการไหลในบริเวณที่มีจีโอพอลิเมอร์ จะมีความหนาแน่นมากกว่าทำให้น้ำสีเขียวเปลี่ยนทิศทางการไหลไปในทิศทางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าตามทฤษฎีกฎของ Darcy (Darcy's Law)(24) โดยน้ำจะไหลผ่านพื้นที่ที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด


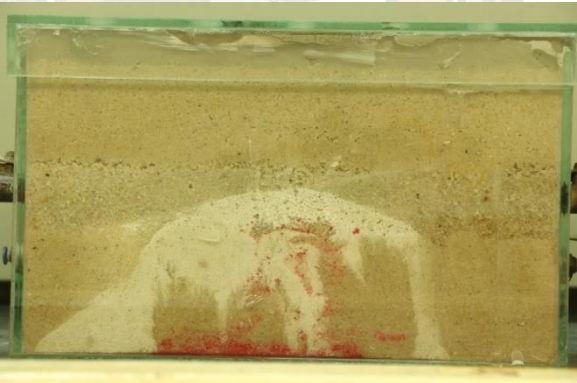
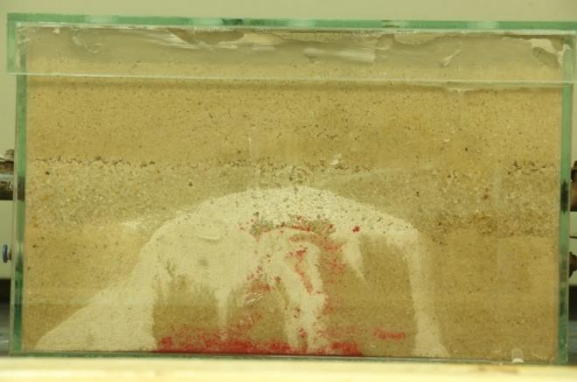
ตาราง 21 เก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์แข็งตัวล้อมรอบพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย


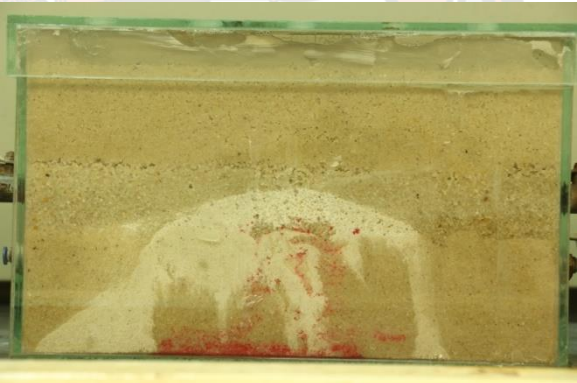

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	



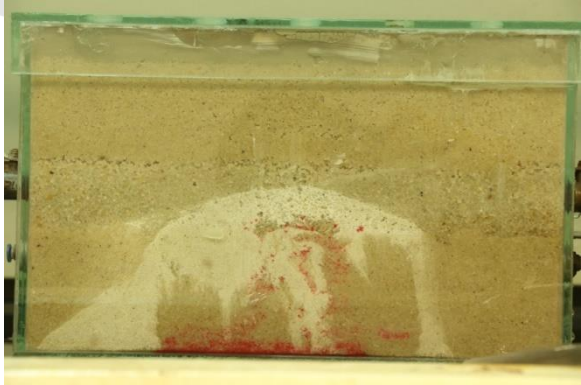
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	
ภาพที่ 5	


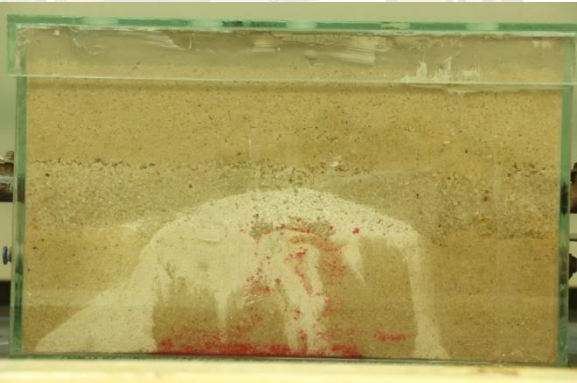
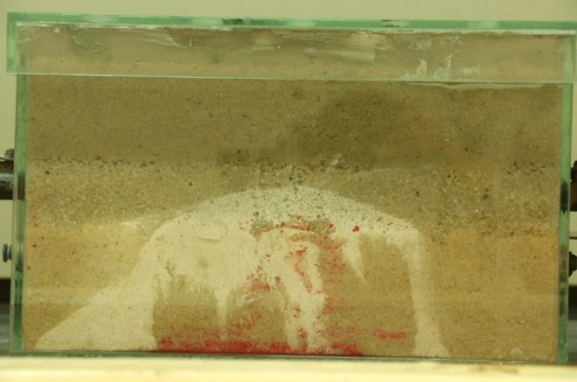
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 6	
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	

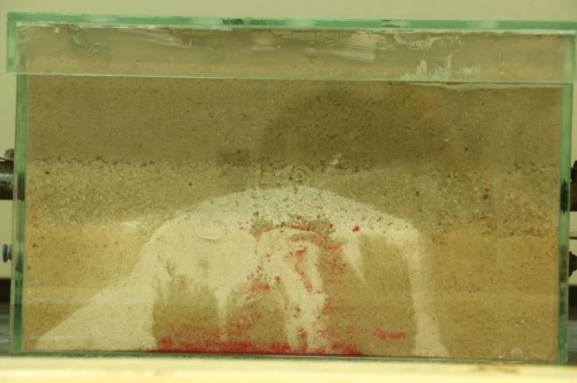
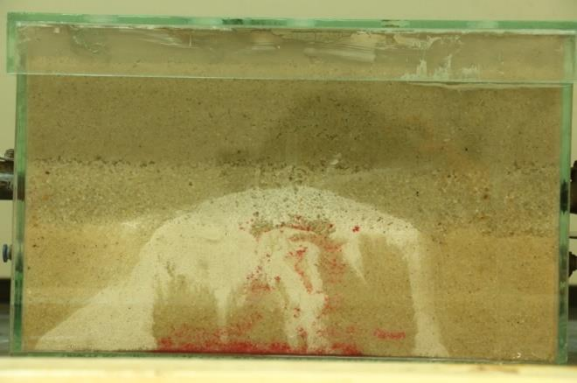
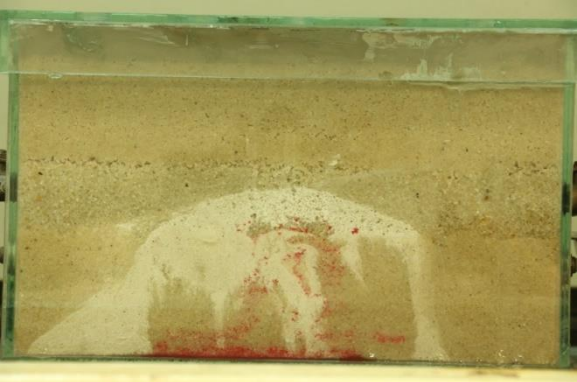
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	
ภาพที่ 10	
ภาพที่ 11	

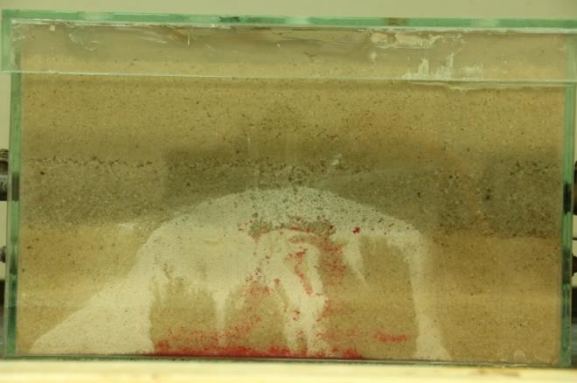
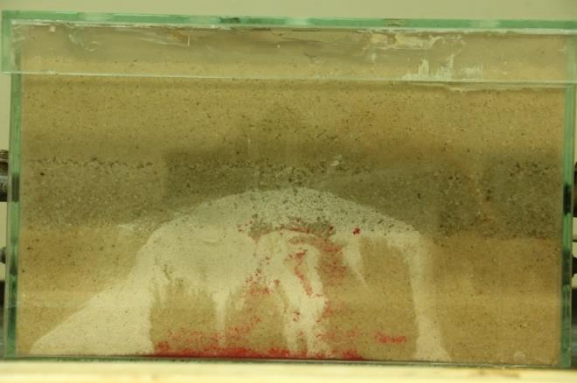
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 12	
ภาพที่ 13	
ภาพที่ 14	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 15	
ภาพที่ 16	
ภาพที่ 17	

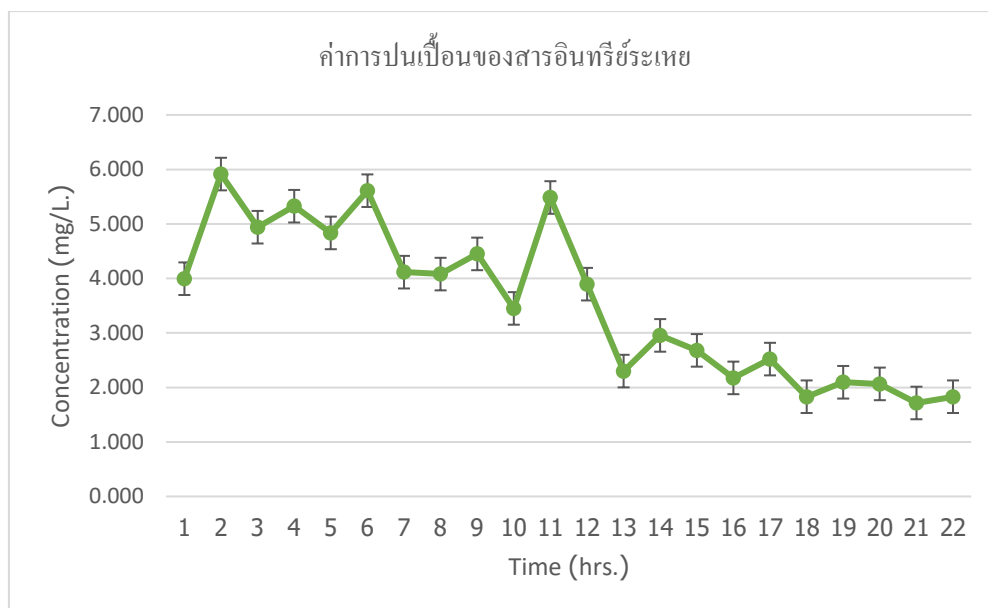
ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 18	
ภาพที่ 19	
ภาพที่ 20	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 21	
ภาพที่ 22	
ภาพที่ 23	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 24	
ภาพที่ 25	
ภาพที่ 26	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 27	
ภาพที่ 28	

จากตารางภาพ 21 การทดลองเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจากแบบจำลองโดยมีจีโอพอลิเมอร์
 แข็งตัวล้อมรอบพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ เป็นการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าการ
 ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph) นำค่าที่ได้มา
 เปรียบเทียบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ ในการลดค่าการปนเปื้อนที่ไหลออกมาจากแบบจำลองระหว่าง
 การมีจีโอพอลิเมอร์และไม่มีจีโอพอลิเมอร์ เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 22 ชั่วโมง โดย 10 ชั่วโมงแรกเป็น
 การเก็บตัวอย่างที่ไหลออกมาจากแบบจำลองที่ไม่มีการ ฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปทำการปรับเสถียรและ
 การทำก้อนแข็ง ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 11 จนถึงชั่วโมงที่ 22 เป็นการเก็บตัวอย่างที่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้า
 ไปทำการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง







ภาพ 44 การเปรียบเทียบการเก็บค่าการไหลของน้ำผ่านจีโอพอลิเมอร์ในพื้นที่ปนเปื้อน

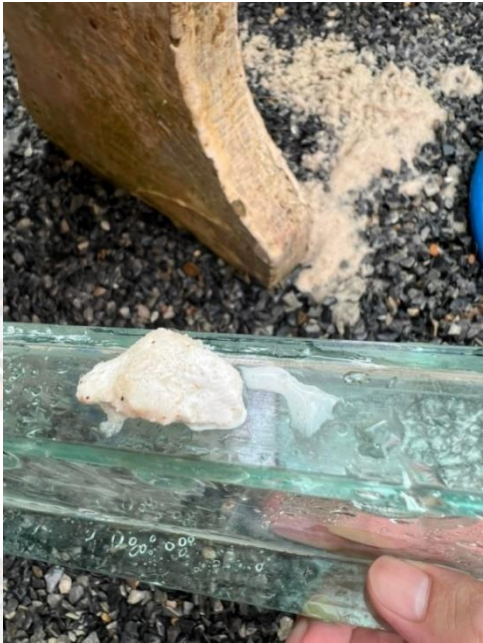

จากภาพ 44 แสดงให้เห็นถึงค่าการปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) ที่ออกมาจากแบบจำลอง โดย 10 ชั่วโมงแรกเป็นการเก็บตัวอย่างสารปนเปื้อนที่ไม่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองและเริ่มฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปทำการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งในชั่วโมงที่ 11 เป็นต้นไป ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของการเก็บตัวอย่างที่ยังไม่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์คือ 5.92 และ 3.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่ได้หลังจากฉีดจีโอพอลิเมอร์คือ 5.49 และ 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำค่าสูงสุดในขณะที่ไม่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์และค่าต่ำสุดหลังจากมีการฉีดจีโอพอลิเมอร์ เปรียบเทียบแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 71 เปอร์เซ็นต์ของการลดลงของค่าการปนเปื้อน



4.7 ลักษณะจีโอพอลิเมอร์หลังจากให้ความร้อนภายในแบบจำลอง

ตาราง 22 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการปรับเถียรและทำก้อนแข็ง

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 1	
ภาพที่ 2	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 3	
ภาพที่ 4	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 5	
ภาพที่ 6	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 7	
ภาพที่ 8	

ลำดับภาพ	รูปภาพ
ภาพที่ 9	

จากตารางภาพ 22 แสดงให้เห็นถึงลักษณะภายในของจีโอพอลิเมอร์ที่อยู่ภายในแบบจำลอง หลังจากการทำการทดลองการให้ความร้อนเพื่อให้จีโอพอลิเมอร์เพิ่มความหนาแน่นในพื้นที่ เมื่อสังเกตลักษณะของจีโอพอลิเมอร์ในรูปภาพมีการประสานระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับชั้นทรายเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและความหนาแน่นมากขึ้น

ดังนั้นจากการทำการทดลองที่แสดงผลให้เห็นทั้งหมด สรุปได้ว่าการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพทั้งในด้านการแข็งตัว การกระจายตัวในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน รวมถึงการสร้างความหนาแน่นซึ่งเป็นกระบวนการทำให้เสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการออกแบบแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน เพิ่มต่อการให้ความร้อนสำหรับทำให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัว กำหนดพื้นที่ที่มีค่าการซึมผ่านได้ง่าย ปานกลาง และยาก ตามขนาดของทรายที่มีลักษณะความหนาแน่นต่างกัน ทดลองการไหลผ่านของน้ำที่เข้าสู่แบบจำลองเพื่อศึกษาที่ทางการไหลของน้ำที่เข้าสู่แบบจำลองทั้งแบบจำลองปกติและแบบจำลองที่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความหนาแน่น

การออกแบบแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินถูกปรับปรุงจนเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการสร้างพื้นที่ภายในแบบจำลองเพื่อหิมพื้นที่ในการทดลองสำหรับการฉีดสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE)

เข้าสู่พื้นที่ภายในแบบจำลอง เพื่อให้เห็นภาพการเคลื่อนที่และการกระจายตัวทั้งสารปนเปื้อน สำหรับการเก็บตัวอย่างแบบจำลองที่ไม่มีจีโอพอลิเมอร์ที่ถูกฉีดเข้าสู่แบบจำลองอยู่ที่ 5.92 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าต่ำสุดจากการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปปรับเสถียรและทำก้อนแข็งอยู่ที่ 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงถึงการลดลงของค่าการปนเปื้อนถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการทำก้อนแข็งของพื้นที่ปนเปื้อนที่ถูกเพิ่มความหนาแน่นในพื้นที่ ทำให้น้ำที่ไหลผ่านบริเวณที่ปนเปื้อนเปลี่ยนทิศทางการไหลไปในทิศทางอื่น

หลังจากทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวัดค่าต่างๆ ได้มีการเปิดแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินที่มีจีโอพอลิเมอร์อยู่ด้านใน ผลปรากฏว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถเพิ่มความหนาแน่นให้ชั้นทรายบริเวณที่ฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลอง มีลักษณะเป็นก้อนสีขาวที่มีความหนืดมากขึ้นรวมทั้งเป็น ทำให้ชั้นทรายบริเวณนั้นจับตัวกันเป็นก้อนได้ดีมากขึ้น



บทที่ 5

บทสรุป

การวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโรเอทิลีนโดยการให้ความร้อนจีโอพอลิเมอร์ (แบบในที่) มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นของเหลว จากนั้นทำให้แข็งตัวเมื่อโดนความร้อนใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวอยู่ที่ 8 ชั่วโมง โดยได้ทำการทดลองฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่บริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหย รอให้จีโอพอลิเมอร์กระจายตัว ล้อมสารอินทรีย์ระเหยจากนั้นเริ่มให้ความร้อนจากที่น้ำร้อนที่ฝังเอาไว้ภายในแบบจำลอง ซึ่งความร้อนจะทำให้จีโอพอลิเมอร์แข็งตัวเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้กับบริเวณที่จีโอพอลิเมอร์กระจายตัวอยู่ รวมทั้งยังช่วยเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำที่จะพาสารอินทรีย์ระเหยออกนอกบริเวณพื้นที่การปนเปื้อนอีกด้วย การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ข้อสรุปของผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะจากการวิจัย ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เพื่อมาใช้ปรับปรุงน้ำใต้ดินปนเปื้อนตัวทำละลายอุตสาหกรรม จากการวิจัยพบว่ามีคุณสมบัติเป็นของเหลวและแข็งตัวเป็นของแข็งเมื่อได้รับความร้อน ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเพื่อใช้สำหรับการจำลองการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย โดยมีการออกแบบน้ำเข้า, น้ำออก, จุดฉีดสารพิษ, และจุดฉีดจีโอพอลิเมอร์ในแบบจำลอง มีการออกแบบชั้นทรายที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณให้สอดคล้องกับทิศทางการไหลของน้ำในชั้นดิน และชั้นน้ำใต้ดิน ภายในแบบจำลองได้มีการติดตั้งท่อสำหรับให้ความร้อนกับจีโอพอลิเมอร์หลังจากฉีดเข้าสู่แบบจำลองซึ่งใช้เวลา 8 ชั่วโมงในการทำให้แข็งตัว

การทดลองการเดินน้ำร้อนสามารถบอกถึงการกระจายอุณหภูมิในจุดต่างๆ ความร้อนสูงสุดในช่วงเวลาที่ต่างกันโดยวัดได้จากภาพถ่ายของกล้องอินฟราเรด การทดลองการให้ความร้อนมี 2 แบบ คือ การให้ความร้อนแบบจำลองเปล่าและการให้ความร้อนในแบบจำลองที่บรรจุชั้นทรายภายในแบบจำลอง การให้ความร้อนแบบจำลองเปล่า พบว่าความร้อนเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25.7 °C อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้คือ 55.1 °C การให้ความร้อนในแบบจำลองที่บรรจุชั้นทรายภายในแบบจำลอง พบว่าค่าเริ่มต้นภายนอกโดยกล้องอินฟราเรดและภายในโดยเทอร์โมมิเตอร์ ค่าเริ่มต้นอยู่ที่อุณหภูมิ 19 และ 25 °C ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 47.7 และ 58 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายความร้อนในเวลาต่างๆ ซึ่งหลังจากการทดลองการให้ความร้อน ได้ทำการทดลอง ให้น้ำไหลผ่าน

แบบจำลองเพื่อดูการไหลของน้ำที่ผ่านในแบบจำลอง รวมถึงการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำ นำค่าที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง เข้าสู่การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปี ผลที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของช่วงเวลาที่มีน้ำไหลผ่านในแบบจำลองระหว่างการมีจีโอพอลิเมอร์และไม่มีจีโอพอลิเมอร์

ความสามารถในการควบคุมการปนเปื้อนสารอินทรีย์ของจีโอพอลิเมอร์นั้นได้มีการทดลองการฉีดสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) เข้าสู่แบบจำลอง มีการเก็บตัวอย่างการปนเปื้อนที่ยังไม่มีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองและการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลอง เริ่มต้นการทดลองโดยการเก็บน้ำที่ไหลผ่านจุดที่ปนเปื้อนแบบไม่มีจีโอพอลิเมอร์ในแบบจำลองแล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph) พบว่าค่าสูงที่มีการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) จากแบบจำลองโดยไม่มีจีโอพอลิเมอร์อยู่ที่ 5.92 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าต่ำสุดจากการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าไปปรับเสถียรและทำก้อนแข็งอยู่ที่ 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงถึงการลดลงของค่าการปนเปื้อนถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองสามารถควบคุมการปนเปื้อนรวมถึงเพิ่มความหนาแน่นให้พื้นที่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของน้ำได้

5.2 อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์การปรับเสถียรแหล่งกำเนิดเตตระคลอโรเอทิลีน โดยการให้ความร้อนจีโอพอลิเมอร์ (แบบในที่) โดยใช้การสังเคราะห์สารจีโอพอลิเมอร์ได้กระบวนการกระบวนการเตรียมแบบปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ดร.สุพล อนันตา (2546) และมีการทดสอบความเป็นจีโอพอลิเมอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) ซึ่งผลที่นำไปวิเคราะห์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mariana Arruda Pereira (2019) ที่มีการวิเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ไว้ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

การศึกษาการออกแบบแบบจำลองชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน การฉีดสารเข้าสู่แบบจำลอง เพื่อใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanapon Phenrat (2010) โดยมีการนำทฤษฎีของ Darcy (Darcy's Law) มาใช้ในการจำลองพื้นที่ความหนาแน่นของชั้นใต้ที่ถูกจำลองขึ้น ซึ่งได้นำมาพัฒนาเพื่อใส่ท่อความร้อนให้จีโอพอลิเมอร์ที่กระจายลงไปแบบจำลองนั้นมีการแข็งตัวเกิดเป็นกระบวนการการทำเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2546) โดยหลังจากการการทำเสถียรและการทำก้อนแข็งในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยนั้นได้นำการวิจัยการฉีดสารที่มีคุณสมบัติเกี่ยวกับการบำบัดสารพิษภายในแบบจำลอง โดนนำวิธีการทดลองนี้มาปรับใช้

เพื่อให้จีโอพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสำหรับการฉีดเข้าสู่แบบจำลองที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Tanapon Phenrat (2011) ที่ได้ทำการศึกษาออกแบบการเก็บตัวอย่าง เพราะไปวิเคราะห์ผลในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งแสดงออกมาเป็นรูปภาพของการเปรียบเทียบสารปนเปื้อนอินทรีย์ระเหย

5.3 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นการพาสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยของจีโอพอลิเมอร์ลงสู่ด้านล่างของพื้นที่ ซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหาการกระจายตัวของสารอินทรีย์ระเหยลงสู่ด้านล่างชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดิน คือ การเพิ่มการฉีดสารจีโอพอลิเมอร์จากด้านล่างชั้นสู่ด้านบน เพื่อให้สารจีโอพอลิเมอร์กระจายตัว และสามารถครอบคลุมพื้นที่ในการเกิดสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจากการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยควรพัฒนาต่อไปโดยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำได้มากขึ้นจะสามารถลดการปนเปื้อนของน้ำจากสารอินทรีย์ระเหยได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปแก้ปัญหาในพื้นที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยในภาคสนาม ซึ่งจะทำให้การวิจัยในครั้งต่อไปได้ผลที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นอีกด้วย



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยพระนคร

บรรณานุกรม

- 1 กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง เอทิลีนไดคลอไรด์ (Ethylene dichloride). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- 2 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล. กรุงเทพฯ: ราชกิจจานุเบกษา 28 สิงหาคม 2562
- 3 สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ(Volatile Organic Compounds : VOCs). กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์, 2555
- 4 เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. ของเสียอันตราย. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, 2546.
- 5 Michael D. LaGrega, Phillip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans. Hazardous Waste Management. McGraw-Hill, 1994
- 6 วินิต ซ่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete technology. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2539.
- 7 U.S. EPA. (2000). Report on Carcinogens Background Document for Trichloroethylene. Durham, NC: Technology Planning and Management Corporation, U.S. EPA.
- 8 Weaver, J. W., & Huling, S. G. (1991). Ground Water Issue: DENSE NONAQUEOUS PHASE LIQUIDS. Washington, DC: Office of Research and Development, U.S. EPA.
- 9 Davidovits, J., (1999), Chemistry of geopolymeric Systems, Terminology. Proceedings: 2nd International conference on geopolymers, France: Paris, pp. 9-40.
- 10 Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M. (2004). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. Cement and Concrete research. 35. 1204-1209.
- 11 Hench, L. (1998). SOL-GEL SILICA. Properties, Processing and technology Transfer. Noyes Publication.
- 12 ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547) เถ้าลอยในงานคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพฯ.
- 13 ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). สารจีโอพอลิเมอร์: วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2549

- 14 อภาพกร พรหมเพชร. การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและกากของเสียจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2556.
- 15 ดร.สุพล อนันตา. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการกระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกขั้นสูง, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ , 2546.
- 16 สุรินทร์ ลิ้มปนาท และ ศรีไฉน ขุนทน. (2543). เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกชัน. ในเครื่องมือวิจัยทางวัสดุ: ทฤษฎีและการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- 17 S A Arafa, A Z M Ali, A.S.M. A Awal and L Y Loon. Optimum mix for fly ash geopolymer binder based on workability and compressive strength. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 140, Issue 1, pp. 012157 (2018).
- 18 Cui Xue-min, Guang-Jian Zheng, Yao-Cong Han, Feng Su. A study on electrical conductivity of chemosynthetic $Al_2O_3-2SiO_2$ geopolymer materials. Journal of Power Sources 184(2):652-656
- 19 Michelina Catauro, Flavia Bollino, Alice Silvia Cattaneo, Piercarlo Mustarelli. $Al_2O_3-2SiO_2$ powders synthesized via sol-gel as pure raw material in geopolymer preparation. Journal of the American Ceramic Society. Volume100, Issue5 2017: 1919-1927.
- 20 Mariana Arruda Pereira, Daniela C. Leite Vasconcelos, Wander Luiz Vasconcelos. Synthetic Aluminosilicates for Geopolymer Production. Materials Research. 2019; 22(2): 20180508.
- 21 Tanapon Phenrat, Abdullah Cihan, Hye-Jin Kim, Menka Mital, Tissa Illangasekare, and Gregory V. Lowry. Transport and Deposition of Polymer-Modified Fe^0 Nanoparticles in 2-D Heterogeneous Porous Media: Effects of Particle Concentration, Fe^0 Content, and Coatings. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 23, 9086–9093.
- 22 Tanapon Phenrat, Fritjof Fagerlund, Tissa Illangasekare, Gregory V. Lowry, Robert D. Tilton. Polymer-Modified Fe^0 Nanoparticles Target Entrapped NAPL in Two Dimensional Porous Media: Effect of Particle Concentration, NAPL Saturation, and Injection Strategy. Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 6102–6109.
- 23 Johan Forsgren, Christian Pedersen, Maria Strømme, Hakan Engqvist. Synthetic Geopolymers for Controlled Delivery of Oxycodone: Adjustable and Nanostructured Porosity Enables Tunable and Sustained Drug Release. PLoS ONE 6(3): e17759.

- 24 Xiaolu Guo, Huisheng Shi, Warren A. Dick. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 142-147.
- 25 F. M. Maingi, H. M. Mbuvi, M. M. Ng'ang'a, H. Mwangi. Adsorption of Cadmium Ions on Geopolymers Derived from Ordinary Clay and Rice Husk Ash. *International Journal of Materials and Chemistry* 2018, 8(1): 1-9.
- 26 Mariana Arruda Pereira, Daniela C. Leite Vasconcelos, Wander Luiz Vasconcelos. Synthetic Aluminosilicates for Geopolymer Production. *Materials Research*. 2019; 22(2): e20180508.
- 27 Materials Characterization Lab, Department of Materials Science and Engineering, The University of Utah. Percent Crystallinity by the XRD Integration Method. แหล่งที่มา: <https://mcl.mse.utah.edu/xrd-crystallinity-by-integration/> Retrieved May 19, 2023.



อภิธานศัพท์



อภิธานศัพท์

Geopolymer (จีโอพอลิเมอร์)	: เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่ง โดยมี สารประกอบทางเคมี (SiO_2) + (Al_2O_3) เป็นหลักแตก
Stabilization (การทำเสถียร)	: การใส่สารเพิ่มเติม เพื่อให้ลดความอันตราย โดยลักษณะทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลง
Solidification (การทำหล่อแข็ง)	: การใส่สารเพิ่มเติม เพื่อให้เกิดความแข็งแรง รับแรงได้มากขึ้น ช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้
Dense Non-aqueous Phase Liquid	: สารในรูปของน้ำมันสามารถรวมตัวกับน้ำได้ แต่มีความ (DNAPL) หนาแน่นมากกว่าน้ำ
Source zone (พื้นที่การปนเปื้อน)	: พื้นที่ที่ออกแบบให้มีการฉีดยาปนเปื้อนเข้าสู่ภายในแบบ เพื่อทำการทดลองและเก็บตัวอย่างสารปนเปื้อนที่ออกมาจากแบบจำลอง
1 PV	: รอบของความหนาแน่นของน้ำภายในแบบจำลองเท่ากับ 1.6 ลิตร
Non-chlorinated VOCs	: กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล
Non-halogenated hydrocarbons	: กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล
halogenated hydrocarbons	: กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล



ตาราง 23 การวัดค่าการดูดกลืนแสงครั้งที่ 1

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Blank	0.077	0.077	0.076	0.077
Tracer	0.308	0.308	0.308	0.308
0 min	0.077	0.078	0.078	0.078
15 min	0.077	0.077	0.077	0.077
30 min	0.076	0.077	0.079	0.077
45 min	0.077	0.078	0.079	0.078
60 min	0.118	0.119	0.118	0.118
70 min	0.173	0.174	0.174	0.174
80 min	0.191	0.192	0.192	0.192
90 min	0.204	0.206	0.206	0.205
105 min	0.218	0.218	0.218	0.218
135 min	0.231	0.23	0.231	0.231
160 min	0.236	0.237	0.237	0.237
190 min	0.242	0.242	0.242	0.242
205 min	0.244	0.244	0.244	0.244
220 min	0.241	0.242	0.242	0.242
230 min	0.208	0.209	0.21	0.209
240 min	0.164	0.164	0.164	0.164
250 min	0.13	0.13	0.131	0.130
265 min	0.11	0.111	0.109	0.110
295 min	0.098	0.099	0.099	0.099
320 min	0.093	0.092	0.093	0.093
335 min	0.091	0.091	0.09	0.091
350 min	0.086	0.086	0.086	0.086
380 min	0.084	0.084	0.084	0.084
410 min	0.083	0.082	0.082	0.082
480 min	0.086	0.086	0.086	0.086
640 min	0.086	0.085	0.085	0.085
800 min	0.083	0.083	0.082	0.083
960 min	0.08	0.081	0.08	0.080
1120 min	0.08	0.079	0.079	0.079
1280 min	0.079	0.078	0.078	0.078
1440 min	0.078	0.078	0.078	0.078

ตาราง 24 การวัดค่าการดูดกลืนแสงครั้งที่ 2

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Blank	0.077	0.077	0.076	0.077
Tracer	0.308	0.308	0.308	0.308
0 min	0.077	0.078	0.078	0.078
15 min	0.077	0.077	0.077	0.077
30 min	0.076	0.077	0.079	0.077
45 min	0.077	0.078	0.079	0.078
60 min	0.118	0.119	0.118	0.118
70 min	0.173	0.174	0.174	0.174
80 min	0.191	0.192	0.192	0.192
90 min	0.204	0.206	0.206	0.205
105 min	0.218	0.218	0.218	0.218
135 min	0.231	0.23	0.231	0.231
160 min	0.236	0.237	0.237	0.237
190 min	0.242	0.242	0.242	0.242
205 min	0.244	0.244	0.244	0.244
220 min	0.241	0.242	0.242	0.242
230 min	0.208	0.209	0.21	0.209
240 min	0.164	0.164	0.164	0.164
250 min	0.13	0.13	0.131	0.13
265 min	0.11	0.111	0.109	0.11
295 min	0.098	0.099	0.099	0.099
320 min	0.093	0.092	0.093	0.093
335 min	0.091	0.091	0.09	0.091
350 min	0.086	0.086	0.086	0.086
380 min	0.084	0.084	0.084	0.084
410 min	0.083	0.082	0.082	0.082
480 min	0.086	0.086	0.086	0.086
640 min	0.086	0.085	0.085	0.085
800 min	0.083	0.083	0.082	0.083
960 min	0.08	0.081	0.08	0.08
1120 min	0.08	0.079	0.079	0.079
1280 min	0.079	0.078	0.078	0.078
1440 min	0.078	0.078	0.078	0.078

ตาราง 25 การวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยมีการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองครั้งที่ 1

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Blank	0.067	0.068	0.068	0.068
Tracer	0.316	0.317	0.316	0.316
0 min	0.077	0.077	0.078	0.077
15 min	0.078	0.079	0.077	0.078
30 min	0.078	0.079	0.079	0.079
45 min	0.181	0.182	0.182	0.182
60 min	0.234	0.232	0.232	0.233
75 min	0.257	0.257	0.257	0.257
90 min	0.262	0.262	0.262	0.262
105 min	0.264	0.264	0.265	0.264
120 min	0.268	0.268	0.268	0.268
135 min	0.274	0.272	0.273	0.273
160 min	0.280	0.280	0.280	0.280
175 min	0.295	0.296	0.296	0.296
190 min	0.296	0.297	0.297	0.297
205 min	0.286	0.287	0.287	0.287
220 min	0.254	0.255	0.255	0.255
235 min	0.238	0.238	0.239	0.238
250 min	0.229	0.228	0.229	0.229
265 min	0.214	0.213	0.214	0.214
280 min	0.205	0.205	0.206	0.205
295 min	0.203	0.204	0.204	0.204
310 min	0.189	0.190	0.190	0.190
325 min	0.178	0.177	0.177	0.177
355 min	0.141	0.141	0.140	0.141
385 min	0.128	0.129	0.128	0.128
415 min	0.115	0.116	0.115	0.115
480 min	0.104	0.104	0.105	0.104
640 min	0.088	0.088	0.088	0.088
800 min	0.081	0.081	0.081	0.081
960 min	0.077	0.077	0.078	0.077
1120 min	0.075	0.076	0.076	0.076
1280 min	0.073	0.074	0.074	0.074
1440 min	0.072	0.072	0.073	0.072
1600 min	0.071	0.071	0.070	0.071

ตาราง 26 การวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยการฉีดจีโอพอลิเมอร์เข้าสู่แบบจำลองครั้งที่ 2

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Blank	0.068	0.069	0.068	0.068
Tracer	0.296	0.305	0.307	0.303
0 min	0.072	0.071	0.071	0.071
15 min	0.096	0.093	0.093	0.094
30 min	0.09	0.089	0.091	0.09
45 min	0.105	0.105	0.105	0.105
60 min	0.146	0.147	0.148	0.147
75 min	0.177	0.181	0.181	0.18
90 min	0.196	0.201	0.201	0.199
105 min	0.22	0.224	0.224	0.223
120 min	0.229	0.234	0.235	0.233
135 min	0.236	0.241	0.243	0.24
160 min	0.238	0.241	0.244	0.241
175 min	0.247	0.253	0.254	0.251
190 min	0.254	0.262	0.263	0.26
205 min	0.257	0.265	0.266	0.263
220 min	0.218	0.223	0.225	0.222
235 min	0.179	0.181	0.182	0.181
250 min	0.158	0.158	0.158	0.158
265 min	0.146	0.148	0.149	0.148
280 min	0.139	0.143	0.143	0.142
295 min	0.137	0.141	0.141	0.14
310 min	0.134	0.137	0.138	0.136
325 min	0.132	0.138	0.138	0.136
355 min	0.128	0.13	0.132	0.13
385 min	0.125	0.126	0.128	0.126
415 min	0.12	0.122	0.123	0.122
480 min	0.088	0.09	0.091	0.09
640 min	0.081	0.082	0.082	0.082
800 min	0.075	0.076	0.076	0.076
960 min	0.074	0.075	0.075	0.075
1120 min	0.072	0.074	0.076	0.074
1280 min	0.07	0.072	0.073	0.072
1440 min	0.071	0.072	0.07	0.071
1600 min	0.07	0.071	0.071	0.071

ตาราง 27 การเก็บค่าการไหลของน้ำที่ผ่านการปนเปื้อนสารเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE)

Time/hrs.	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ค่าเฉลี่ย
	Sample name	Area	ความเข้มข้น (mg/L)	Sample name	Area	ความเข้มข้น (mg/L)	
1	Control 1	192843155	4.00	2Control 1	192470895	3.99	3.995
2	Control 2	316472722	6.56	2Control 2	254301322	5.27	5.915
3	Control 3	281521765	5.83	2Control 3	195375843	4.05	4.940
4	Control 4	219157439	4.54	2Control 4	295063523	6.11	5.325
5	Control 5	201631879	4.18	2Control 5	264921172	5.49	4.835
6	Control 6	296247163	6.14	2Control 6	245306707	5.08	5.610
7	Control 7	219982881	4.56	2Control 7	177336021	3.67	4.115
8	Control 8	207678009	4.30	2Control 8	186125069	3.86	4.080
9	Control 9	194509255	4.03	2Control 9	235006450	4.87	4.450
10	Control 10	174339206	3.61	2Control 10	158703631	3.29	3.450
11	Control 11	337220214	6.99	2Control 11	192051082	3.98	5.485
12	Control 12	206166569	4.27	2Control 12	170068312	3.52	3.895
13	Control 13	97990274	2.03	2Control 13	123887426	2.57	2.300
14	Control 14	116782491	2.42	2Control 14	168508958	3.49	2.955
15	Control 15	79348651	1.64	2Control 15	179535061	3.72	2.680
16	Control 16	100949128	2.09	2Control 16	108998935	2.26	2.175
17	Control 17	1060850077	2.20	2Control 17	137231375	2.84	2.520
18	Control 18	78437417	1.63	2Control 18	97867212	2.03	1.830
19	Control 19	76540247	1.59	2Control 19	125610029	2.60	2.095
20	Control 20	67807612	1.40	2Control 20	131868417	2.73	2.065
21	Control 21	82638101	1.71	2Control 21	82917681	1.72	1.715
22	Control 22	102691843	2.13	2Control 22	73762423	1.53	1.830