



วิทยานิพนธ์

ออกซิเดชันเคมีของโทลูอินในเขตอุ้มน้ำโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูก
ปลดปล่อยอย่างช้าๆ

**CHEMICAL OXIDATION OF TOLUENE IN SATURATED
ZONE USING SLOWLY RELEASED OXIDIZING AGENT**

นางสาววรรณิภา หนองพงษ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ออกซิเดชันเคมีของโทลูอินในเขตอิ่มน้ำโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ

Chemical Oxidation of Toluene in Saturated Zone Using Slowly Released Oxidizing Agent

นามผู้วิจัย นางสาววรรณิภา หนองพงษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จี้มา ชมสุรินทร์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ออกซิเดชันเคมีของโทลูอินในเขตอิ่มน้ำโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ

Chemical Oxidation of Toluene in Saturated Zone Using Slowly Released Oxidizing Agent

โดย

นางสาววรรณิกา หนองพงษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

วรรณิกา หนองพงษ์ 2550: ออกซิเดชันเคมีของโทลูอินในเขตอู่น้ำโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูก
ปลดปล่อยอย่างช้าๆ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
จิมา ชมสุรินทร์, Ph.D. 111 หน้า

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการออกซิเดชันเคมี ในการบำบัดโทลูอินด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
โดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ หินภูเขาไฟ ขี้ผึ้งพาราฟิน และไขมันพว้าง ในชุดทดลอง
ดินทรายในลักษณะอิมัลชันด้วยน้ำ เพื่อเลือกวัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมในการผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกา
เนตในการบำบัดโทลูอิน เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการบำบัดแบบประหยัดค่าสารเคมี และเพิ่มระยะเวลาการ
บำบัดให้นานขึ้น ผลการทดลองพบว่า ไขมันพว้างไม่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยมีการปลดปล่อยออกมา
เป็นตะกอนสีดำ ละลายน้ำได้น้อย โดยหินภูเขาไฟมีการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเร็วที่สุด
รองลงมาคือ สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งการ
ปลดปล่อยไม่คงที่สม่ำเสมอค่อนข้างที่จะแตกต่างกันมากเมื่อ pore volume เพิ่มขึ้น และขี้ผึ้งพาราฟินมีการ
ปลดปล่อยช้าที่สุดและมีค่าความเข้มข้นคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นวัสดุมีความเหมาะสมที่สุด จึงเลือกนำมาใช้เป็น
วัสดุผสมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และขี้ผึ้งพาราฟิน ไม่มีความเป็นพิษ ราคาถูก และง่ายต่อการทำ
ปฏิกิริยา

เมื่อทำการทดลองบำบัดโทลูอิน pure phase จำนวน 15 มิลลิลิตร ในชุดทดลองดินทรายในลักษณะ
อิมัลชันด้วยน้ำโดยใช้น้ำกลั่นด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่า Re เท่ากับ 0.027 ผ่านเข้าไปยัง
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อให้ปลดปล่อยอย่างช้าๆ ออกมาจากขี้ผึ้งพาราฟินในการบำบัด จากการ
ทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินได้ถึง 91.85% (คำนวณจากสมดุลมวล) ที่เมื่อเครื่องมีวัดมี
ค่า detection limit เท่ากับ 5 mg/L ใช้เวลาทั้งหมด 8,340 นาที PV เท่ากับ 49.87 โดยเกิดปัญหาการอุดตัน
เล็กน้อยของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชัน จากการทดลองบำบัดโทลูอิน ที่ PV
เท่ากับ 49.87 (8,340 นาที) เมื่อทำการสมดุลมวลพบว่า ใช้ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการทำ
ปฏิกิริยาเท่ากับ 51.87 กรัม หรือ 0.324 โมล (โทลูอินในน้ำ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งใช้น้อยกว่าโพแทสเซียม
เปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในการบำบัดโทลูอินที่ ความเข้มข้นเท่ากันถึง 190.69 กรัม คิดเป็น
78.61% (โทลูอินในน้ำน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่การทดลองนี้ใช้เวลามากกว่า 3,770 นาที หรือ 62.83
ชั่วโมง ดังนั้นวิธีการบำบัดโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จะทำให้ประหยัดค่าสารเคมีได้มากกว่า 70% แต่จะ
ใช้เวลามากกว่า

Wannipa Nongpong 2007: Chemical Oxidation of Toluene in Saturated Zone Using Slowly Released Oxidizing Agent. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Cheema Chomsurin, Ph.D. 111 pages.

Chemical oxidation of toluene was studied in saturated sand using potassium permanganate (KMnO_4) that was released from organic matrix. Three organic materials used were volcano rock, paraffin wax and coconut ride. The releasing rate from solid KMnO_4 . It was found that the solid KMnO_4 attached to paraffin wax provide low and constant releasing rate which is suitable for toluene oxidation.

Experiment showed that when KMnO_4 was released at Reynold number equaled where flow rate was 2 ml/min and pore volume was 49.87, toluene removed efficiency was 91.85.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ชมสุรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ การให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนการนำบทความไปเผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รอง รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ ประธานการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ โครงการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2549 ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิเชียร คุณแม่สมจิต หนองพงษ์ และขอบคุณพี่น้อง รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วรรณภา หนองพงษ์

ตุลาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	21
วัสดุและอุปกรณ์	21
วิธีการ	25
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานและการคำนวณ	78
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลอง	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีในน้ำใต้ดิน	6
2	ลักษณะของผลผลิตปิโตรเลียม	9
3	โครงสร้างและคุณสมบัติของโทลูอิน	12
4	อิทธิพลของปริมาณโทลูอิน ที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อได้รับโทลูอินโดยการสูดดมในระยะเวลาสั้น ๆ	14
5	ค่า Oxidation Potentials ของสาร Electron acceptor	16
6	คุณสมบัติของดินทราย	24

ตารางผนวกที่

ก1	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่างๆ	79
ก2	ค่าการดูดกลืนแสงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในตัวอย่างน้ำออก	80
ก3	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นโทลูอินต่างๆ	81
ก4	ค่าพื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินในตัวอย่างน้ำออก	82
ก5	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นแมงกานีสไอออนต่างๆ	83
ก6	ค่าพื้นที่ใต้กราฟของแมงกานีสไอออนในน้ำตัวอย่าง	84
ก7	ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวเซนเซอร์ในเครื่องวัดแรงดันก่อนการทดลอง	85
ก8	แสดงการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าแรงดัน	86
ก9	ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน ในชุดควบคุมการทดลอง	88
ข1	ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยออกจากวัสดุอินทรีย์ (หินภูเขาไฟ และ ขี้ผึ้งพาราฟิน) กับความเข้มข้นที่ปลดปล่อยจากเกลือต่าง ๆ อย่างเป็นอิสระ	91
ข2	ผลการทดลองเมื่อน้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ทดลองเป็นเวลา 32 ชั่วโมง (ชุดควบคุมการทดลอง)	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข3 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดันเมื่อใช้น้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง (ชุดควบคุมการทดลอง)	93
ข4 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟิน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	94
ข5 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะคอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟิน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	95
ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง	96
ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะคอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง	101

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ผิวดิน	5
2	ลักษณะการเคลื่อนที่ของ LNAPLs ในชั้นน้ำใต้ดิน	11
3	การเคลื่อนที่ของน้ำมันตามการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน	11
4	ลักษณะของคอลัมน์บรรจุดินทรายที่ใช้ในการทดลอง	21
5	ลักษณะของคอลัมน์บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการทดลอง	21
6	แผนภาพแสดงการจัดเรียงอุปกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ	23
7	ลักษณะของดินทรายที่ใช้ในการทดลอง	23
8	ลักษณะจีฟี่งพาราฟิน	25
9	ลักษณะหินภูเขาไฟ	26
10	ลักษณะใยมะพร้าว	27
11	ขั้นตอนการทดลองการเปรียบเทียบการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้า ๆ	29
12	ขั้นตอนการทดลองของชุดควบคุมการทดลอง	31
13	ลักษณะของจีฟี่งพาราฟินที่ใช้ในการผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	32
14	ลักษณะของจีฟี่งพาราฟินเมื่อผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร	32
15	ขั้นตอนการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ	34
16	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากจีฟี่งพาราฟินที่ขนาดต่างกัน	37
17	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากหินภูเขาไฟ	38
18	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากเกล็ดต่างทับทม	38
19	ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากจีฟี่งพาราฟิน หินภูเขาไฟ และ เกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ลักษณะจีฟึงพาราฟินผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5000 เท่า	42
21	ความเข้มข้นของโพลีอินในน้ำ ในชุดควบคุมการทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	44
22	ค่าการสูญเสียแรงดัน ในชุดควบคุมการทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	45
23	ความเข้มข้นของโพลีอินในน้ำ ในการออกซิเดชัน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	46
24	ค่าการสูญเสียแรงดันในการออกซิเดชันเคมี เป็นเวลา 32 ชั่วโมง	48
25	กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของโพลีอินหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 139 ชั่วโมง	52
26	กราฟแสดงค่าการสูญเสียแรงดันหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 139 ชั่วโมง	53
27	กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปนมากับน้ำออก	55
28	เส้นสเปกตรัมจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ทดสอบด้วยเครื่อง XRD	57
29	เส้นสเปกตรัมเปรียบเทียบจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจาก TCE โดย Li and Schwartz	58
30	ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5000 เท่า	58
31	ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 8000 เท่า	59
32	ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์จาก TCE ถ่ายด้วยเครื่อง TEM โดย Li and Schwartz	60
33	ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 20000 เท่า โดย อรมณี (2549)	61
34	ลักษณะของดินทรายหลังจากการออกซิเดชันโพลีอินด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1	กราฟมาตรฐานโพเทนเชียลเคมีแอมเพอร์แมงกานิต
ก2	กราฟมาตรฐานไทลูอิน
ก3	กราฟมาตรฐานแมงกานีสไอออน
ก4	การคำนวณหาค่า K (hydraulic conductivity) ในชุดควบคุมการทดลอง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด [cm ²]
AAS	=	Atomic Absorption Spectrophotometer
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
A°	=	องศาตรอม
BTEX	=	Benzene, Toluene, Ethylbenzene และ Xylene
C _{KMnO4}	=	ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปนมากับน้ำออก [g/l]
C _{toluene}	=	ความเข้มข้นโทลูอินที่เกิดการละลาย [mg/l]
cm H ₂ O	=	เซนติเมตรน้ำ
cm/s	=	เซนติเมตรต่อวินาที
°C	=	องศาเซลเซียส
DNAPLs	=	Dense Non Aqueous Phase Liquids
dh/dl	=	hydraulic gradient [-]
d ₅₀	=	ขนาดตัวกลางใหญ่สุดที่ผ่านตะแกรงปริมาตรร้อยละ 50 [mm]
EDTA	=	Ethylenediaminetetraacetic Acid
FID	=	Flame Ionization Detector
f _{OC}	=	สัดส่วนสารอินทรีย์คาร์บอน [%]
GC	=	Gas Chromatography
GFC	=	กระดาษกรองใยแก้ว
g/cm ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/l•min	=	กรัมต่อลิตรนาที
h	=	head loss [cm H ₂ O]
h	=	aqueous-phase pressure head [cm H ₂ O]
IR	=	Infrared
K	=	hydraulic conductivity [L/T]
K _d	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน [ml/g]
K _{OC}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ [ml/g]
kPa	=	กิโลปาสกาล
k _{rw}	=	aqueous-phase relative permeability [-]

L	=	ความยาว [m]
LD ₅₀	=	mean Lethal Dose 50 [mg/kg]
LNAPLs	=	Light Non Aqueous Phase Liquids
M	=	โมลาร์
M _{adsorption}	=	มวลส่วนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง [g]
M _{effluent}	=	มวลส่วนที่ออกมาค้บน้ำออก [g]
M _{LNAPL}	=	มวลส่วนที่ตกค้าง (residue) อยู่ [g]
M _{loss}	=	มวลของส่วนที่สูญเสียไป หรือความผิดพลาดอื่นๆ [g]
M _{residual}	=	มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนโดยที่เหลืในจี๊ฟ้งพาราฟิน [g]
M _{oxidation}	=	มวลส่วนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [g]
M _{sand}	=	มวลของทรายที่เกิดการดูดซับ [g]
Mg/g	=	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
mM	=	มิลลิโมลาร์
mol/g•s	=	โมลต่อกรัมวินาที
m ² /g	=	ตารางเมตรต่อกรัม
ND	=	ไม่สามารถตรวจวัดได้
NAPLs	=	Non Aqueous Phase Liquids
n	=	ความพรุน [-]
ORP	=	Oxidation Reduction Potential [V]
PAHs	=	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PCE	=	Perchloroethylene
ppm	=	หนึ่งในล้านส่วน
PTFE	=	Polytetrafluoroethene
PV	=	Pore Volume [-]
Q	=	อัตราการไหล [L ³ /T]
Re	=	Reynolds number [-]
SD	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

SEM	=	Scanning Electron Microscope
SPME	=	Solid Phase Micro Extraction
T	=	ระยะเวลา [min]
TCE	=	Trichloroethylene
TEM	=	Transmission Electron Microscope
TLV	=	ค่าความเป็นพิษเรื้อรัง [ppm]
$\mu\text{g/l}$	=	ไมโครกรัมต่อลิตร
μm	=	ไมโครเมตร
V	=	โวลต์
V_{liquid}	=	ปริมาตรของน้ำ [L^3]
V_{void}	=	ปริมาตรช่องว่าง [L^3]
v	=	ความเร็วของการไหล [L/T]
v_a	=	ความเร็วของน้ำในช่องว่าง [L/T]
VOCs	=	Volatile Organic Compounds
XRD	=	X-Ray Diffraction
XRF	=	X-Ray Fluorescence

ออกซิเดชันเคมีของโทลูอินในเขตอู่มน้ำโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ

Chemical Oxidation of Toluene in Saturated Zone Using Slowly Released Oxidizing Agent

คำนำ

ปัจจุบันการปนเปื้อนของโทลูอินลงสู่ดินและน้ำใต้ดินในสาเหตุหนึ่งมาจากการรั่วไหลของสารเคมีจากถังเก็บบนดินและใต้ดิน (underground storage tank) บริเวณปั้มน้ำมัน และถังบรรจุเนื่องจากโทลูอินทำเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการรั่วไหลจากถังบรรจุและอุปกรณ์ต่างๆ ได้ และโทลูอินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวออกจากน้ำ (Light Nonaqueous Phase Liquid, LNAPLs) และมีความหนืดต่ำ มักเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวราบลงสู่ดินและน้ำใต้ดิน ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และก่อให้เกิดการปนเปื้อนในชั้นดินอู่มน้ำ (saturated zone) ซึ่งโทลูอินมีอัตราการละลายน้ำต่ำจึงทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลานาน และ ก่อให้เกิดความเสี่ยงสูงต่อสุขภาพของประชากร เนื่องจากน้ำใต้ดินเป็นส่วนสำคัญที่ประชาชนนำมาใช้ในการอุปโภค บริโภค รวมถึงการเกษตรกรรม จากปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการบำบัดและลดปริมาณการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในดินและน้ำใต้ดินทางกายภาพ เคมี และทางชีวภาพ โดยวิธีการบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้มากกว่าวิธีอื่น ๆ (Evan,1992)

กระบวนการออกซิเดชันเคมี (chemical oxidation) เป็นการบำบัดสารอันตรายด้วยวิธีทางเคมี สามารถบำบัดสารพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินได้มากกว่าวิธีอื่นๆ (Evan,1992) โดยการบำบัดมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การกำจัดความเป็นพิษของของเสีย ด้วยการใช้สารออกซิไดซ์ เป็นวิธีที่อาศัยความรู้ทางเคมีค่อนข้างมาก วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูง สามารถทำลายหรือกำจัดพวกโมเลกุลสารอินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น สาร VOCs ต่าง ๆ สารฟีนอล เป็นต้น ถ้าของเสียอันตรายอยู่ในรูปของดินและน้ำใต้ดินอาจใช้วิธีการบำบัดในพื้นที่เลย (*in situ* remediation) ไม่ต้องนำขึ้นมาบำบัด (pump and treat) เพราะจะมีราคาแพง รวมถึงการดำเนินการและระยะเวลาดูแล สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งสามารถจะนำไปใช้จัดการกับปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันที่ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินต่างๆ ได้ (เกรียงศักดิ์, 2546)

งานวิจัยนี้เลือกสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่สภาวะ pH 7 ซึ่งสามารถบำบัดโทลูอิน ได้มากกว่า 99.98% (จุฑารัตน์, 2548) เพื่อการบำบัดน้ำใต้ดินในพื้นที่เกิด (*in situ* remediation) เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ใช้ได้กับทั้งสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ มีความปลอดภัย หาซื้อได้ง่าย ขนย้ายสะดวก และราคาถูก จึงนิยมนำมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อน เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบำบัดสารอินทรีย์ ที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดิน ก็จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ผลิตภัณฑ์หนึ่ง คือ ตะกอนของแมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide ; MnO_x) และฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยงานวิจัยจะทำการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้า ๆ (slowly released) จากวัสดุอินทรีย์ เพื่อเป็นการประหยัดสารเคมี เนื่องจากพบว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ บำบัดโทลูอิน 13.05 กรัม (pure phase toluene) เหลือปนมากับน้ำออกซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาก่อนข้างมาก (อรมณี, 2549) เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดให้ยาวนานขึ้นโดยไม่ต้องทำการบำบัดหลายครั้ง และเป็นการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี (Schwartz *et al.*, 2005)

คำสำคัญ (Keywords) น้ำใต้ดิน (groundwater), ออกซิเดชันเคมี (chemical oxidation), โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassiumpermanganate; KMnO_4), ปลดปล่อยสารออกซิไดซ์อย่างช้า ๆ (slowly released oxidizing agent), ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความสามารถในการบำบัดโทลูอินด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
2. ศึกษาอัตราการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้า ๆ
3. ศึกษาประสิทธิภาพและระยะเวลาในการบำบัดโทลูอินเมื่อมีการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้า ๆ

ขอบเขตของการวิจัย

- 1) การศึกษาความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) เมื่อมีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ ในการบำบัด pure phase toluene
- 2) ทดลองเปรียบเทียบการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยออกจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต กับการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากวัสดุอินทรีย์ (organic materials) ซึ่งได้แก่ จี๊ฟซิงพาราฟิน หินภูเขาไฟ และไขมะพร้าว
- 3) การทดลองให้ดินทรายในคอลัมน์จำลองอ้อมตัวด้วยน้ำ โดยคอลัมน์ทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก และคอลัมน์ทดลองสำหรับบรรจุสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก
- 4) การทดลองเตรียมโทลูอิน (pure phase toluene) ความเข้มข้นคงที่ 99.50%
- 5) การทดลองควบคุมอัตราการไหลของน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่า Reynolds number (Re) = 0.027 จัดเป็นการทดลองแบบ laminar flow

6) คุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณโทลูอิน (มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าพีเอช ความเข้มข้นเปอร์แมงกาเนตในน้ำ (กรัมต่อลิตร) ปริมาณแมงกานีสออกไซด์ในระบบ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ค่าการสูญเสียแรงดัน ลักษณะและองค์ประกอบของตะกอนแมงกานีสออกไซด์

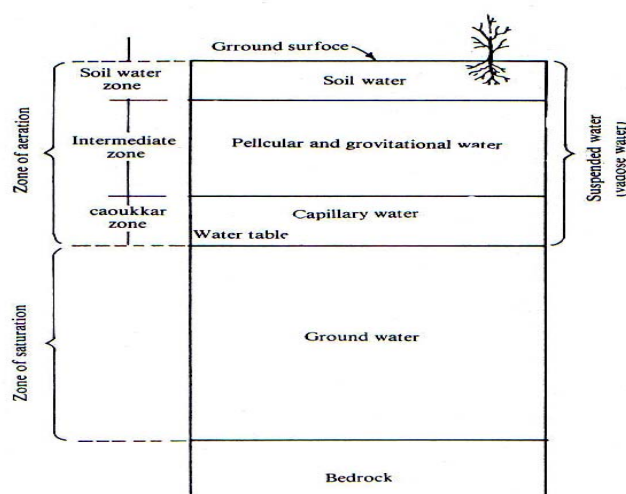
การตรวจเอกสาร

1. น้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดิน (groundwater) หมายถึง น้ำที่ถูกกักเก็บอยู่ในช่องว่างในชั้นหินหรือในชั้นดิน อยู่ใต้เส้นระดับน้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล (water table) น้ำที่มากักเก็บมาจากน้ำฝนหรือน้ำในแม่น้ำลำคลองที่ไหลซึมลงไปได้ดิน โดยส่วนตั้งแต่ใต้ผิวดินลงไปจนถึงน้ำใต้ดินนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 โซน คือ โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone) และโซนอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) ซึ่งแบ่งแยกจากกันด้วยระดับน้ำใต้ดิน และส่วนแคปิลลารี (capillary fringe) ซึ่งอยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดิน

ชั้นน้ำใต้ดินแบ่งออกได้เป็นแบ่งออกเป็น 2 โซน คือ

1. โซนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated zone) เรียกว่า Vadose zone โซนนี้มีอากาศและน้ำอยู่รวมกัน โดยมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ชั้นผิวดิน (soil water zone), ชั้นดินช่วงกลาง (intermediate zone) และชั้นดินชุ่มน้ำ (capillary zone)
2. โซนอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) เรียกว่า Phreatic zone โดยช่องว่างดินและหินจะมีน้ำแทรกอยู่เต็มไปหมด น้ำที่กักเก็บในส่วนนี้ เรียกว่า น้ำใต้ดินหรือน้ำบาดาล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถพัฒนาขึ้นมาใช้เพื่อการอุปโภค บริโภค ทั้งนี้ ความหนาและความลึกของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของชั้นดินชั้นหิน ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่



ภาพที่ 1 การแบ่งชั้นดินตามลักษณะของน้ำใต้ผิวดิน

ที่มา: Domenico (1990)

1.1 คุณภาพน้ำใต้ดิน

ในธรรมชาติน้ำบาดาลมีคุณภาพต่างกันแต่ละพื้นที่ ในบางพื้นที่พบว่าคุณภาพน้ำใต้ดินมีความกระด้างและเหล็กสูง หรือมีสิ่งปนเปื้อนจากผิวดินลงไป โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินทางกายภาพและทางชีววิทยาจะอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น มีความใส ปราศจากตะกอนความขุ่น ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากถูกกรองด้วยชั้นของดิน แต่สำหรับคุณภาพของน้ำใต้ดินทางเคมีมักจะไม่น่าไว้วางใจส่วนมากมักจะมีแร่ธาตุและสารเคมีและละลายปนอยู่ในน้ำที่มีปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีในน้ำใต้ดิน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาล (ไมโครกรัมต่อลิตร)
เบนซีน	5
โทลูอิน	1,000
ไซลีน	10,000
เอธิลเบนซีน	700

ที่มา: พระราชบัญญัติคุณภาพน้ำบาดาล (2542)

1.2 การไหลของน้ำใต้ดิน

การไหลของน้ำใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค กล่าวคือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar Flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในลักษณะตามกันไปเป็นแผ่นหรือชั้นเรียบๆ โดยที่แผ่นหนึ่งเคลื่อนทับอีกแผ่นหนึ่ง ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางไม่แน่นอน โดยสามารถนำหลักการของ Darcy's law มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นกฎที่มีความสำคัญมากต่อการคำนวณการวิเคราะห์เกี่ยวกับการโยกย้ายสารปนเปื้อน ซึ่งใช้กันมากในงานน้ำใต้ดินโดยพบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวกลางพรุน (porous media) แปรผันตรงกับ head loss (h) พื้นที่หน้าตัดของท่อรูปทรงกระบอก (A) และธรรมชาติของ

ตัวกลางพรุนนั้นๆ (K) แปรผกผันกับความยาวของท่อรูปทรงกระบอก (L) ตามแนวการไหล (Darcy Henry, 1856)

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (1)$$

เมื่อ	q	=	อัตราการไหลจำเพาะ [$\text{m}^2/\text{s.m}$]
	K	=	สภาพนำเชิงชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) [m/s]
	$-\frac{dh}{dl}$	=	ความลาดชันเชิงชลศาสตร์ [m/m]

ถ้าตัวกลางพรุนมีค่า K สูง แสดงว่าอัตราการไหลผ่านของน้ำจะสูงและการไหลของน้ำก็จะสะดวก ซึ่งสมการของดาร์ซีนี้จะใช้ได้ถูกต้องเฉพาะการไหลแบบ laminar flow เท่านั้น สิ่งที่จะกำหนดว่าสภาพการไหลเป็นแบบ laminar flow หรือ turbulent flow คือค่า Reynolds Number (R_e) ที่สามารถเขียนอยู่ในรูปของ

$$R_e = \frac{v \times d}{V_w} \quad (2)$$

เมื่อ	R_e	=	Reynolds number [-]
	v	=	ความเร็วของน้ำไหลตามผิวของเม็ดดิน [m/s]
	d	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดดิน [cm]
	V_w	=	ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity), [cm^2/s]

การไหลของน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางพรุน (porous media) จะเป็นไปตามหลักกลศาสตร์ของไหล กล่าวคือ สภาพการไหลเกิดขึ้นจากตำแหน่งที่มีพลังงานของของไหลสูงกว่าไปยังตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า พลังงานของของไหลจะประกอบไปด้วยพลังงานเนื่องจากระดับ (elevation) พลังงาน เนื่องจากความดัน (pressure) และพลังงานเนื่องจากความเร็ว

2. Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPLs)

Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPLs) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวออกจากน้ำ ซึ่งเป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ หรือเบากว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับน้ำ จะมีลักษณะลอยอยู่บนน้ำ ซึ่งเป็นผลผลิตปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้ น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีมากมายหลายประเภทตามลักษณะของสูตรทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุล แต่มีเพียง 3 ประเภทเท่านั้น ที่มีความสำคัญเกี่ยวข้องกับปิโตรเลียม (กรมธุรกิจพลังงาน, 2546) คือ 1) ประเภทพาราฟิน (paraffin) ซึ่งเป็นพวก alkane สูตร C_nH_{2n+2} 2) ประเภทแนพทีน (naphthene) ซึ่งเป็นพวก alkane สูตร C_nH_{2n-6} 3) ประเภทโรเมติก (aromatic) ซึ่งเป็นพวก cycloalkane สูตร C_nH_{2n-6} ซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สารทำละลาย น้ำมันหล่อลื่น ฯลฯ โดยแยกสารไฮโดรคาร์บอนออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) Aromatic hydrocarbons ในกลุ่มนี้ ได้แก่ พวก C_5 ไปถึง C_{12} ของพวก alkanes เช่น n-hexane, n-octane, n-decane, cycloalkanes, alkylcycloalkanes เป็นต้น

2) Aliphatic hydrocarbons ในกลุ่มนี้ ได้แก่ Benzene, Toluene, Alkylbenzene และ Xylene สารกลุ่มนี้โดยมากใช้เป็นน้ำมันเบนซิน ส่วนสาร Xylene และ Alkylbenzene จะใช้เป็นสารทำละลายสำหรับการล้างทำความสะอาด และใช้เป็นสารสังเคราะห์โพลิเมอร์ต่าง ๆ

เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งแยกตัวจากน้ำ โดยเรียกตามลักษณะของสารประกอบนี้ว่า non-aqueous phase liquid (NAPLs) โดยมีการแบ่งชนิดของ NAPLs ตามความหนาแน่นเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 1 ได้แก่

1. Light non-aqueous phase liquids (LNAPLs) เป็นของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบา คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำโดยทั่วไปจะลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

2. Dense non-aqueous phase liquids (DNAPLs) เป็นของเหลวชนิดที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ โดยทั่วไปจะจมอยู่ใต้น้ำ เช่น chlorinated solvent

โดยงานวิจัยนี้ทำการบำบัดของเหลวชนิดที่มีน้ำหนักเบากว่าน้ำ คือมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (LNAPLs) ละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นเมื่อ LNAPLs ปนเปื้อนลงสู่ น้ำใต้ดินจะลอยอยู่บนผิวน้ำใต้ดิน โดยตัวแทนของ LNAPLs คือ โทลูอิน เนื่องจากเป็นส่วนประกอบของสาร BTEX โดยมี ส่วนประกอบโดยน้ำหนัก toluene 26% ด้วยคุณสมบัติทางเคมีของ BTEX คือ มีขั้ว (polarity) และละลายน้ำได้ดี จึงแทรกซึมเข้าสู่ดิน และน้ำใต้ดินได้ ทำให้เป็นปัญหาร้ายแรง และส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2 ลักษณะของผลผลิตของสารปิโตรเลียม

ผลผลิต	ขนาดของไฮโดรคาร์บอน	ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัว (°C)	องค์ประกอบ*
1. น้ำมันเบนซิน	$C_5 - C_{10}$	40 – 205	Alkanes, Isoalkanes, Cycloalkenes, Aromatics, BTEX
2. น้ำมันดีเซล	$C_{15} - C_{25}$	200 – 400	Alkanes, Isoalkanes, Cycloalkenes, PAHs
3. น้ำมันเชื้อเพลิง	$C_{10} - C_{25}$	140 – 400	Alkanes, Isoalkanes, Cycloalkenes, BTEX, PAHs
4. น้ำมันหล่อลื่น	$C_{20} - C_{70}$	เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ทางเคมี	Alkanes, PAHs

หมายเหตุ BTEX = Benzene, Toluene, Ethylbenzene และ Xylene

PAHs = Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2546)

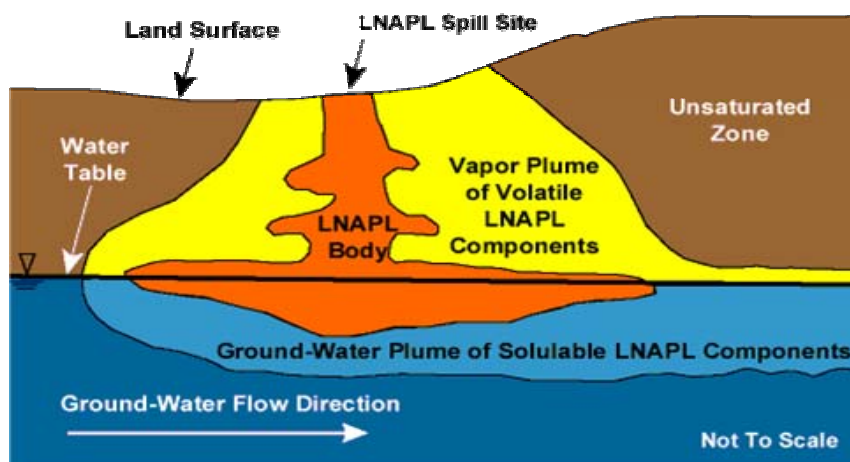
3. การเคลื่อนที่ของ Light Nonaqueous Phase Liquids (LNAPLs) ในน้ำใต้ดิน

น้ำมันเมื่อเกิดการรั่วไหลจะทำให้เกิดการปนเปื้อนเข้าสู่ น้ำใต้ดินได้ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของน้ำใต้ดิน คือ ชั้นบนซึ่งเป็นเขตที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเพราะมีอากาศแทรกอยู่ระหว่างเม็ดทราย (aeration zone หรือ unsaturation zone) เรียกว่า vadose zone และชั้นล่างซึ่งเป็นเขตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายจะเต็มไปด้วยน้ำ โดยเส้นที่แบ่งเขตทั้งสองนี้คือระดับน้ำใต้ดิน (water table)

แรกเริ่ม LNAPL จะเคลื่อนที่หรือไหลไปตามที่ราบหรือซึมลงสู่บริเวณเหนือระดับน้ำผลของ capillary effect อาจทำให้มีการกระจายของน้ำมันไปตามด้านข้างเหนือระดับน้ำ โดยน้ำมันจะพัฒนาเป็นจันมีรูปร่างคล้ายขนนก (plume) น้ำมันจะคงตัวภายในบริเวณชั้น capillary fringe และเกิดสถานะการละลายในน้ำใต้ดิน น้ำมันบางส่วนจะเหลือติดค้างในดินตามช่องว่างเนื่องจาก capillary force หลังจากนั้นการระเหยของน้ำมันจะเกิดตามแนวการกระจาย ถ้าปริมาณน้ำมันมีน้อยหรือชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำลึกมาก น้ำมันทั้งหมดก็就会被ดูดซับจนหมดอยู่ในชั้นดินนี้ ไม่สามารถซึมลงถึงระดับน้ำใต้ดิน แต่ถ้าปริมาณน้ำมันมีมากพอ น้ำมันบางส่วนที่เหลือจากการดูดซับของชั้นดินเหนือระดับน้ำใต้ดินก็จะไหลลงสู่ระดับน้ำใต้ดิน เมื่อ LNAPLs เคลื่อนที่ถึงระดับน้ำใต้ดินแล้วก็จะกระจายลงอยู่บนผิวน้ำใต้ดินและบริเวณเขตอิ่มตัวเหนือระดับน้ำใต้ดิน (capillary zone) หลังจากการสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำใต้ดิน น้ำมันบางส่วนจะเกิดการละลายและเคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดินด้วยถ้า น้ำใต้ดินมีการไหล (กลอง, 2538) เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อน้ำมันซึมลงถึงชั้นน้ำใต้ดิน จะลอยอยู่เหนือผิวน้ำ เมื่อระดับน้ำใต้ดินขึ้น – ลง ตามสภาพธรรมชาติ จะทำให้น้ำมันถูกยกกระดึ้นขึ้น – ลงตามระดับน้ำใต้ดินด้วย (วรรณัฐ, 2549)

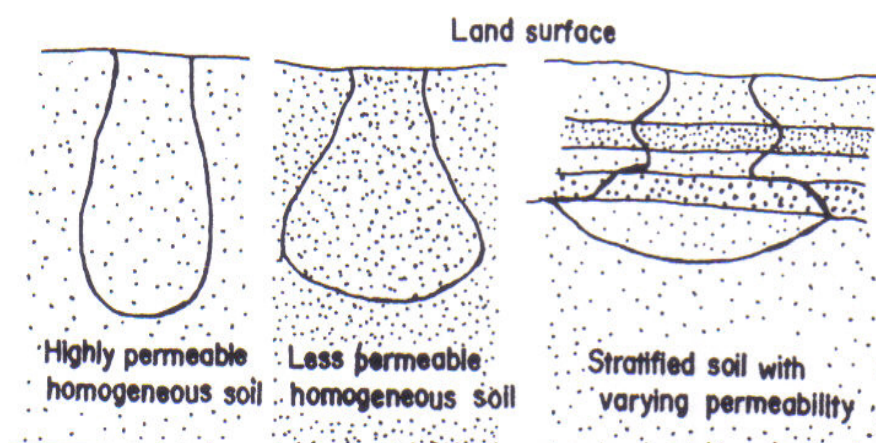
น้ำมันเมื่อหกหรือรั่วไหลลงบนพื้นดิน อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วจะขึ้นอยู่กับค่าความหนืดและคุณสมบัติของดิน น้ำมันที่มีน้ำหนักเบา (LNAPLs) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินได้เร็วกว่าน้ำมันที่มีน้ำหนักมาก (American Petroleum Institute, 1980) น้ำมันบางส่วนจะเคลื่อนที่ลงตามช่องว่างของดินไปตามแรงแผ่นดินด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และบางส่วนจะเคลื่อนที่ออกด้านข้างของชั้นดินตามช่องว่างหรือรอยแตก (fissure) ของเนื้อดิน น้ำมันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินจะเข้าแทรกหรือแทนที่ที่อยู่ระหว่างสารอินทรีย์และอนุภาคของดิน ทำให้เกิดเกิดการซับ (sorption) โดยการสัมผัสกันของสารอินทรีย์สู่ผิวเม็ดดิน (soil surface) หรือการนำเข้า

จากสารอินทรีย์สู่เมทริกซ์ของดิน (soil matrix) โดยขบวนการเคลื่อนที่นี้จะมีเนื้อดินบางส่วนที่ยอมให้น้ำมันเคลื่อนที่ผ่านได้ในช่วงแรกเท่านั้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งจะไม่ยอมให้น้ำมันซึมผ่านเนื่องจากดินดูดซับน้ำมันจนตัวมันเองอึดตัวไปด้วยน้ำมัน ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดสารเหลือค้าง (residual saturation) ในชั้นดิน นอกจากนี้ ในกรณีที่น้ำมันซึมผ่านชั้นดินที่สามารถซึมผ่านได้ (permeable soil) ไปจนถึงชั้นดินเหนียว (impermeable clay) หรือชั้นหิน ซึ่งไม่ยอมให้น้ำมันสามารถผ่านไปได้ มวลน้ำมันอาจเคลื่อนตัวหรือซึมออกด้านข้างไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเกิด residual saturation ในดินชั้นนั้นหรืออาจเกิดปริมาณน้ำมันที่หกได้ไหลผ่านชั้นดินไปกับน้ำใต้ดิน



ภาพที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ LNAPLs ในชั้นน้ำใต้ดิน

ที่มา: Delin *et al.*, (1998)



ภาพที่ 3 การเคลื่อนที่ของน้ำมันตามการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน

ที่มา: ชรัตน์ (2533)

4. โทลูอิน (Toluene)

โทลูอินเป็นสารเคมีในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน โดยมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย การผลิตโทลูอิน เป็นผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมถ่านหินและอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคอล ในอุตสาหกรรมถ่านหินจะได้จาก gas และ coal tar ส่วนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคอลจะได้ โทลูอินโดยการ dehydrogenation พวก naphthalene หรือโดยการ cyclization และ aromatization สาร paraffin hydrocarbon มีคุณสมบัติเป็นของเหลวใสและมีกลิ่นเหมือนเบนซีนแต่มีความเป็นพิษน้อยกว่าเบนซีน และมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดีจึงได้ถูกนำมาใช้กันมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากโทลูอินเป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคอล ดังนั้นจึงแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โดยการฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศ และปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำใต้ดินจากถังเก็บสารเคมีบนดินและใต้ดิน บริเวณปั๊มน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์

ตารางที่ 3 โครงสร้างและคุณสมบัติของโทลูอิน

ชื่ออื่นๆ (synonyms)	Toluene, methylbenzene, toluol, phenylmethane, methacide
สูตรโมเลกุล (molecular formula)	$C_6H_5CH_3$
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	99.13
สูตรโครงสร้าง (structure formula)	
จุดหลอมละลาย (melting point)	-95 °C
จุดวาบไฟ (flash point)	6-10 °C
ความหนาแน่นจำเพาะ (Specific density)	0.861 ที่ 25 °C
จุดเดือด (boiling point)	110.4 °C
ความหนาแน่นไอ (vapor pressure)	3.2
ความดันไอ (vapor pressure)	36.7 mm ที่ 30 °C
ค่าการละลายน้ำ (solubility)	421 mg/L (ละลายน้ำได้น้อยมาก)

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2541)

4.1 ความเป็นพิษของโทลูอิน (toxicity)

ความเป็นพิษของโทลูอินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นพิษของโทลูอิน และ เบนซีน แล้วโทลูอินจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าเบนซีน โดยเมื่อการหายใจเอาโทลูอิน ในความเข้มข้น 0.4 mg/l จะทำให้มีอาการปวดหัว วิงเวียนศีรษะ หน้ามืดและระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ถ้าได้รับปริมาณความเข้มข้นสูงๆ จะมีอาการร้ายแรงขึ้น ส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลางและถ้าได้รับเป็นระยะเวลานานก็จะทำลายสมอง แต่ไม่พบว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (เกรียงศักดิ์, 2546; Chirstensen and Elton, 1996)

1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity)

ความรุนแรงของพิษจากโทลูอิน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโทลูอินและระยะเวลาที่สัมผัสกับสารนี้ดังตารางที่ 4

ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่ก่อให้เกิดผลต่อผู้สูดหายใจ คือ

10-15 ppm	จะได้กลิ่น
100 ppm	มีผลรบกวนด้านจิตใจ
200 ppm	มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง

4.2 ความเป็นพิษเรื้อรัง (chronic toxicity)

ความเป็นพิษแบบเรื้อรังไม่ถึงขนาดก่อให้เกิดความมินงแบบรุนแรง หรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดเลือด แต่จะก่อให้เกิดความไม่สัมพันธ์กันของการเคลื่อนไหว และระบบประสาทสัมผัสไม่ดีซึ่งมีผลทำให้เกิดอุบัติเหตุหกล้มง่าย นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อผิวหนัง ผิวหนังไม่มีไขมันและผิวหนังอักเสบ

ตารางที่ 4 แสดงอิทธิพลของปริมาณโทลูอินที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อได้รับโทลูอิน โดยการสูดดมในระยะเวลาสั้น ๆ

ปริมาณความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลาที่สัมผัส (ชั่วโมง)	ผลที่เกิดขึ้น
5-100	-	ไม่สังเกตเห็นอาการความแตกต่างหลังการสัมผัส
2000	8	เกิดอาการเล็กน้อย ได้แก่ อาการเหนื่อยล้า อ่อนเพลีย ความคิดสับสน ซาที่ผิวหนัง อาการเหนื่อยล้า จะคง อยู่เป็นเวลาหลายชั่วโมง และเกิดอาการนอนไม่หลับ และกระวนกระวาย
300	8	เกิดอาการข้างต้นชัดเจนขึ้น
400	8	เกิดอาการข้างต้นและมีอาการจิตใจฟุ้งซ่าน สับสน
600	3	เกิดอาการมึนงง เหนื่อยถึงละเมื่อยล้มมาก จิตใจ ฟุ้งซ่านและสับสน คลื่นเหียน ปวดศีรษะ บางราย ถึงกับหมดสติ
800	-	เกิดอาการคล้ายคลึงกับอาการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ใช้เวลาสัมผัสน้อยกว่า
> 800	-	มีอาการข้างต้น และยังมีอาการอื่น เช่น โลหิตจาง และตับโต

หมายเหตุ 1 ppm = 3.75 mg/m³ ของ Toluene

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2530)

5. การเกิดออกซิเดชันเคมี (chemical oxidation)

การเกิดออกซิเดชันเคมีจะเป็นกระบวนการบำบัดสารอันตรายด้วยวิธีเคมีที่สามารถกำจัดสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้มากกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ (Evan, 1992) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ กำจัดความเป็นพิษของสารอันตราย ด้วยการใช้สารออกซิไดซ์ วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูง สามารถทำลาย หรือกำจัดพวกโมเลกุลสารอินทรีย์ได้หลายชนิด เช่น สาร VOCs ต่างๆ ฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสารอนินทรีย์ได้ด้วย เช่น สารไซยาไนด์ สารซัลไฟด์ เป็นต้น

ในการเลือกใช้ออกซิเดชันเคมีจะใช้กำจัดสารอันตรายที่มีความเข้มข้นต่ำด้วย หรือต้องการกำจัดให้เหลือความเข้มข้นที่ต่ำด้วย สารอันตรายจะสามารถอยู่ในรูปของน้ำเสีย ของดิน และของน้ำใต้ดิน ถ้าเป็นของดิน หรือของน้ำใต้ดินอาจใช้วิธีบำบัดในที่เลย ไม่ต้องนำขึ้นมาบำบัด เพราะจะมีราคาแพง (เกรียงศักดิ์, 2546)

นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาด้วยว่า เมื่อมีการเกิดออกซิเดชันเคมีกับสารอันตรายซึ่งอาจเกิดได้หลายลักษณะ ดังต่อไปนี้

- 1) เกิดการย่อยสลายในโครงสร้างหลักของสารอันตราย
- 2) เกิดการย่อยสลายในโครงสร้างหลักของสารจนทำให้ความเป็นพิษลดลง
- 3) เกิดการย่อยสลายจนทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 4) เกิดการย่อยสลายในโครงสร้างหลักจนทำให้สารอันตรายเพิ่มความเป็นพิษ

การเกิดออกซิเดชันเคมี จะขึ้นอยู่กับ

1. ค่า Free Energy ของปฏิกิริยา
2. ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP)
3. อุณหภูมิ
4. ค่า pH

6. สารออกซิไดซ์

สารออกซิไดซ์ (oxidizing reagent) ที่นิยมใช้ได้แก่

1. Hydroxyl radical ($\text{OH} \cdot$)
2. Hydrogen Peroxide (H_2O_2)
3. Potassium permanganate (KMnO_4)
4. Ozone (O_3)

ตารางที่ 5 ค่า Oxidation Potentials ของสาร Electron acceptor

Electron acceptor	Oxidation Potentials (Volts)
Hydroxyl radical	2.8
Ozone	2.1
Hydrogen peroxide	1.8
Potassium permanganate	1.7

ที่มา: Lehr (2001)

เมื่อเปรียบเทียบสารออกซิไดซ์ พบว่า โอโซนมีประสิทธิภาพการบำบัดดี แต่มี half – life สั้น และราคาแพง ส่วนก๊าซผสม(Mixing gases;ซึ่งประกอบด้วย ClO_2 เป็นหลัก และมีตัวอื่นๆ คือ Cl_2 , O_3 และ H_2O_2) มีประสิทธิภาพการบำบัดดี จุดเด่น ใช้งานง่าย, ฆ่าเชื้อโรคได้, และควบคุมการเกิด Trihalomethane (THMs formation) (Kun *et al.*, 1997) โดยที่ KMnO_4 เป็นสารออกซิไดซ์ ที่สามารถบำบัดสาร DNAPLs ได้ดี โดยเป็นสารออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นของแข็ง, มีค่าการละลายน้ำ 64 g/L at 20 °C, หนัาย่อยสลาย และมีราคาถูก (Schnarr *et al.*, 1998)

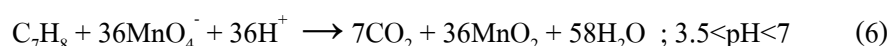
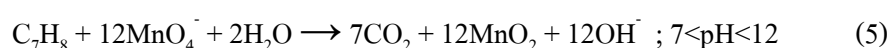
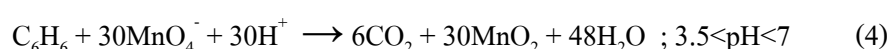
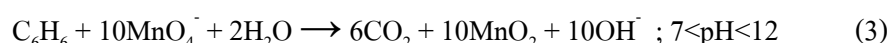
โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ KMnO_4 ในการบำบัดสาร LNAPLs โดยเลือกโทลูอินเป็นตัวแทนของสารประกอบดังกล่าว เนื่องจาก KMnO_4 เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงใช้ได้กับทั้งสารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น น้ำมัน และสารอนินทรีย์ ซึ่งมีความปลอดภัย หาซื้อได้ง่าย หนัาย่อยสลาย และราคาถูก (Siegrist *et al.*, 2001) จึงนิยมนำมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อน

6.1 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; KMnO_4)

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassiumpermanganate, KMnO_4) เป็นสารที่มีความสามารถออกซิไดซ์ได้ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะใน pH สูงๆ แต่ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้บ้างใน pH ช่วงกว้าง (Walton *et al.*, 1991) และจะอยู่ในสภาพเสถียรเป็นของแข็ง (Philip *et al.*, 1991) สามารถออกซิไดซ์สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ณ สภาพะพีเอช 7-8 โดยสารนี้จะอยู่ในสภาพเสถียรที่เป็นผลึกของแข็งสีม่วง หรือในรูปของสารละลายเข้มข้น มีค่าการละลายน้ำ 6.4 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส (Schnarr *et al.*, 1996) มีค่า Oxidation Reduction Potential (ORP) เท่ากับ 1.7 โวลต์

สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตใช้ในการกำจัดสารอันตรายได้หลายชนิด โดยทำการออกซิเดชัน สารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ซึ่งใช้ได้กับโรงงานต่างๆ นอกจากนี้แล้วสาร KMnO_4 ยังสามารถกำจัดสารอันตรายอื่น ๆ อีกได้อย่างมาก ได้แก่ Phenol พวกร Aromatic compounds พวกร Chlorinated aliphatics เป็นต้น

ตัวอย่างการเกิดออกซิเดชันทางเคมีโดยมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) และโพแทสเซียมแมงกาเนตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) โดยสมการที่ (3) และ (4) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้าง benzene และสมการที่ (5) และ (6) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้าง toluene เป็น CO_2 ตามลำดับ (เกรียงศักดิ์ 2546)



โดยจากสมการผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการะบวนการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), น้ำ และตะกอนแมงกานีสออกไซด์หรือแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ซึ่งตะกอนแมงกานีสออกไซด์มีลักษณะเป็นผลสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ ซึ่งไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ (by products) เช่น โพแทสเซียมไอออน (K^+) และสารประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากสารออกซิไดซ์ (Suthersan, 2002) โดยประสิทธิภาพของการเปลี่ยน

โครงสร้างสารพิษขึ้นอยู่กับ ค่า free energy ของปฏิกิริยาเคมี ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP) อุณหภูมิ และค่า pH

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schnarr *et al.*, (1998) ศึกษาการบำบัดสาร DNAPLs จำพวก Trichloroethylene (TCE) และ Perchloroethylene (PCE) ในตัวกลางที่มีรูพรุน (porous media) โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารออกซิไดซ์ มีค่าการละลายน้ำ 64 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 °C, ขนย้ายสะดวกและมีราคาถูก การทดลองในห้องปฏิบัติการมี 5 คอลัมน์ โดยเปรียบเทียบ Darcy flux และความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พบว่า ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ที่ออกมาลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เหลือ ส่วนความเข้มข้นของ PCE ลดลงเหลือน้อยกว่า 1 กรัมต่อลิตร สำหรับงานวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บำบัด PCE 1 ลิตร โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร แบบ recycle จากส่วนที่ 1 อัตราการไหล 50 ลิตรต่อวัน เป็นเวลา 290 วัน เมื่อสิ้นสุดเหลือสารปนเปื้อน 62% as eq Cl⁻ จากงานวิจัยที่ 1 จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าแต่ใช้สารออกซิไดซ์มากกว่า

Huang *et al.*, (2001) ศึกษาการออกซิไดซ์ Trichloroethylene (TCE) ในสถานะสารละลายและสารละลายบริสุทธิ์ ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) ใน sandy aquifer matrix และศึกษาผลของปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด H⁺ และ MnO_x กับ pH การปลดปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออน และความสามารถในการซึมผ่านของตัวกลาง โดยใช้คอลัมน์จำลองในการทดลอง ผลปรากฏว่า KMnO₄ สามารถ dechlorinated TCE ได้อย่างสมบูรณ์ โดยการตรวจวัด Cl⁻ ได้ ~100% ดังสมการ



ส่วนการศึกษาผลของ H⁺ และ MnO_x ในตัวกลางพบว่า มีการลดลงของ pH ในน้ำออกอย่างชัดเจน (เช่น จาก 6.7 เป็น 2 เป็นต้น) และมีตะกอนสีน้ำตาลของ MnO_x จำนวนมากอยู่ในคอลัมน์ การลดลงของ pH ทำให้ปริมาณเหล็กในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อทำ Bromide tracer tests พบว่า การตกตะกอนของ MnO_x ทำให้ช่องว่างในตัวกลางลดลง 20% และจากการศึกษาลักษณะของ MnO_x ด้วย X-Ray diffraction (XRD) และ Infrared (IR) spectroscopy พบว่า เป็น MnO_x ชนิด birnessite.

Franklin and Schwartz (2005) ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกจากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน(paraffin wax) เพื่อเป็นการเพิ่มระยะเวลาการบำบัดสารปนเปื้อนให้นานขึ้น ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีครึ่งปฏิกิริยา (semi-passive) โดยสร้างให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีการควบคุมการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ ออกจากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน ซึ่งขี้ผึ้งพาราฟินมีคุณสมบัติ คือ อ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูงและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง ไม่เป็นพิษ ไม่ทำปฏิกิริยา เหนียว และราคาถูก โดยให้ผสมรวมกันระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและขี้ผึ้งพาราฟินในห้องอุณหภูมิสร้างให้มีลักษณะแท่ง เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 10 cm ใช้ 70 g ของ KMnO_4 วางในคอลัมน์แก้วขนาด 4.8 cm ยาว 15 cm การทดลองใช้อัตราการไหล 19 – 21 ml/min โดยตรวจวัดทุก 12 ชั่วโมง

จากผลปรากฏว่าอัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นเริ่มต้น 238 mg/L และหลังจากนั้นปลดปล่อยความเข้มข้นที่ 24 mg/L ในเวลามากกว่า 12 ชั่วโมง โดยจากการคำนวณ mass balance ในช่วงเริ่มต้นระหว่างวันแรกมีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็วมากพบว่าปลดปล่อยออกมาประมาณ 6.8 g (0.057 mole) จากการคำนวณสามารถควบคุมการแพร่กระจายของเปอร์แมงกาเนตได้ 26 g (0.164 mole) โดยจากผลการทดลองควบคุมค่าความเข้มข้นเปอร์แมงกาเนตที่วัดได้ประมาณ 3 mg/L โดยมีค่าคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 216 ถึงชั่วโมงที่ 600.

Li *et al.*, (2006) ศึกษาการบำบัดสาร DNAPLs ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินในที่เกิด (*in-situ* chemical oxidation) จำพวก Trichloroethylene (TCE) โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารออกซิไดซ์ โดยศึกษาหลักการควบคุมปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกมาอย่างช้าๆ (Slow release) จุดประสงค์เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดให้นานขึ้น และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย โดยสร้างให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้ฝังตรงเข้าไปในวัสดุ Polymer resin ให้มีลักษณะเป็นทรงกลม เพื่อให้สามารถปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกมาอย่างช้าๆ โดยผสม Polymer resin และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 35 g ลักษณะแท่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 5 cm การทดลองเก็บตัวอย่างทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 วันพบว่า ความเข้มข้นเปอร์แมงกาเนต 56.6 mg/L วันแรก หลังจากนั้นค่าการปลดปล่อยลดลง มีค่า 14.3 mg/L ในวันต่อมา และค่อยๆ ลดลงเหลือ 3.3 g ในช่วงวันที่ 20 โดยมีการปลดปล่อยทั้งหมด 5.1 g

การทดลองสร้างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้ฝังตรงเข้าไปในวัสดุ Polymer resin 100 g กลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 10 cm โดยขึ้นรูปในท่อ PVC 2 แท่ง ทำการทดลองในคอลัมน์

(L x W x D = 1000 cm x 20 cm x 50 cm) อัตราการไหล 19.2 L/day พบว่าช่วงวันแรกมีการปลดปล่อยค่อนข้างเร็วคือ 10 - 70 mg/L ในช่วง 5 วันแรก และลดลงจนคงที่ในช่วง 10 - 30 mg/L ในวันที่ 6 จากผลการทดลอง พบว่า 1 mM MnO_4 สามารถบำบัด TCE 0.06 mM ได้ ในเวลาน้อยกว่า 100 นาที และ 15.5 g MnO_4 สามารถบำบัด TCE 4.7 g จาก 8.6 g โดยใช้เวลามากกว่า 37 วัน และจากผลผลิตพบว่าเกิด MnO_2 6.3 g.

Ross *et al.* (2005) ศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกจากแคปซูลโพลิเมอร์ที่ห่อหุ้ม โดยสร้างแคปซูลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microcapsule) บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าไปเพื่อให้การปลดปล่อยสารออกมาอย่างช้าๆ (Slow release) โดยทำการทดลองแบบ Batch พบว่ามีการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเริ่มต้น 2.70 กรัม โดยพบว่าอัตราการปลดปล่อยทั้งหมดใช้เวลาจาก 3 - 80 วัน โดยมีอัตราเฉลี่ยที่ 27 วัน, โดยช่วงแรกพบว่าค่าความเข้มข้นไม่คงที่ มีค่า การปลดปล่อยสูงสุด ($C_{r,max}$) 0.88 - 1.05 g แต่อัตราการปลดปล่อยมีค่าน้อยกว่าการคำนวณจาก Model

ผลจากการทดลองบำบัดสาร Trichloroethylene (TCE) พบว่ามีค่าความเข้มข้นของ TCE ลดต่ำลง โดยที่เริ่มต้น $1.8 \mu\text{mol TCE d}^{-1}$, และใช้เวลาเฉลี่ยในการบำบัด TCE 15.5 วัน ได้ในช่วงความเข้มข้น $0.07 - 3.8 \mu\text{mol TCE d}^{-1}$ จากการใช้แคปซูล (microcapsule) ห่อหุ้มเปอร์แมงกาเนตให้ปลดปล่อยออกมาช้าๆ โดยมีเวลาเพิ่มขึ้น 3 - 4 เท่า ในช่วงระหว่างการทำปฏิกิริยาเริ่มต้นกับอัตราการปลดปล่อยเปอร์แมงกาเนต (slow release permanganate), ซึ่งอัตราการทำปฏิกิริยาจะเกิดน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณจาก Model โดยจากผลมีความคาดหวังว่าจะสามารถทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างช้าๆ เพื่อเป็นการเพิ่มระยะเวลาการบำบัดสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม.

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

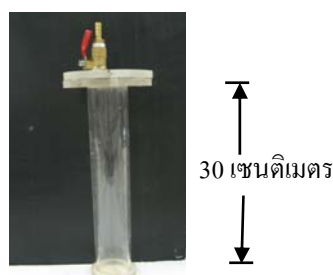
1. อุปกรณ์

1. คอลัมน์ทดลอง ทำด้วยพลาสติกอะคริลิก รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร โดยติเกลียวหัวท้าย มีจุดวัดแรงดันที่ระยะ 11, 21, 31 และ 46 เซนติเมตร และ คอลัมน์จำลอง ทำด้วยพลาสติกอะคริลิกรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร ติเกลียวสองจุดด้านบนสำหรับต่อท่อ



ภาพที่ 4 ลักษณะของคอลัมน์บรรจุดินทรายที่ใช้ในการทดลอง

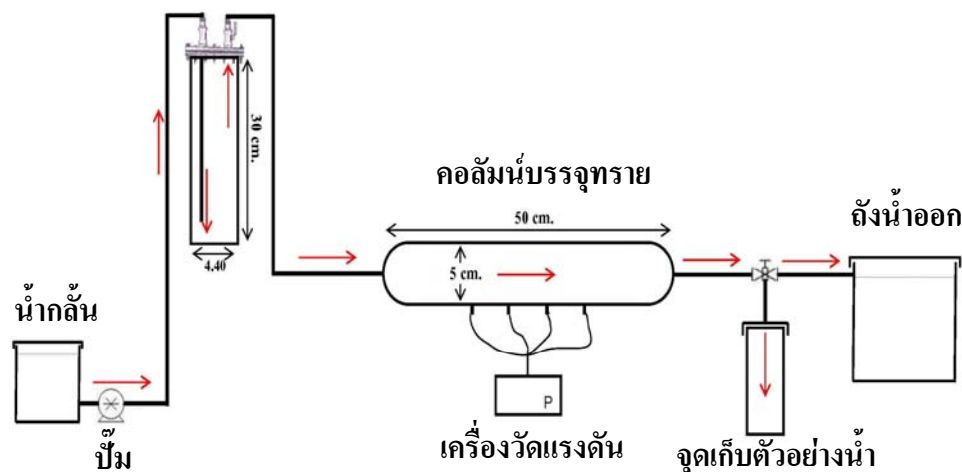
โดยกำหนดให้ จุด 1 เป็นจุดอ้างอิงสำหรับคำนวณค่า Pressure loss
 จุด 2 เป็นจุดวัดแรงดันสำหรับคำนวณ Pressure loss 12
 จุด 3 เป็นจุดวัดแรงดันสำหรับคำนวณ Pressure loss 13
 จุด 4 เป็นจุดวัดแรงดันสำหรับคำนวณ Pressure loss 14



ภาพที่ 5 ลักษณะของคอลัมน์บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการทดลอง

2. ถังเก็บน้ำเข้า และน้ำออก ขนาด 15 ลิตร
3. ปั๊มน้ำชนิด Static pump ของ Masterflex รุ่น Console Drive ใช้กับ Easy load 3 model 77521-57 ใช้อัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที
4. ระบบการส่ง และระบายน้ำ (ท่อ PTFE ขนาด 0.635 เซนติเมตร (1/4 นิ้ว), ท่อ Tygon 14 ของ Masterflex, 3-way ball valve ขนาด 0.635 เซนติเมตร (1/4 นิ้ว) ของ Swagelok รุ่น ss-43Xs4, Reducing adapter ลดจากขนาด 1.270 เซนติเมตร (1/2 นิ้ว) เป็น ขนาด 0.635 เซนติเมตร (1/4 นิ้ว) ของ Swagelok รุ่น ss-8-RA-4, Cap tube ขนาด 0.635 เซนติเมตร (1/4 นิ้ว) ของ Swagelok และตระแกรงกรอง)
5. pressure transducer สำหรับวัด head loss
6. Atomic Absorption Spectrophotometer ; AAS ของ Perkin elmer รุ่น AAnalyst100
- 7 Spectrophotometer รุ่น U-2800 แบบ Double beam ของ Hitachi
8. Gas chromatography ; GC ของ Shimadzu รุ่น GC-14B ที่ใช้ Flame Ionization Detector (FID) ติดตั้งคอลัมน์ SUS Packed Column (GC-8A) 3mm IDx2m Unisole F-200 30/60 โดยตั้งอุณหภูมิ Injector, Detector และ Column เท่ากับ 140, 150, 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับและตั้งอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 30 มิลลิลิตรต่อนาที สารที่วิเคราะห์ คือ โทลูอิน ทำการวิเคราะห์ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
9. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณโทลูอินสำหรับใช้กับเครื่อง GC ชนิดเข็ม SPME ของ SUPELCO ประกอบด้วย Solid Phase Micro-Extraction Holder และ SPME Fiber Assembly 100 μ m Polydimethylsiloxane Coating
10. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ของ Hanna Instruments รุ่น HI98103
11. นาฬิกาจับเวลา ของ CASIO
12. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของ Chyo รุ่น MP3000
13. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของ Precisa รุ่น 240A
14. ขวดแก้วสีชา (vial) พร้อมฝาเกลียวปิด และเคลือบด้วยแผ่น PTFE ขนาด 25 มิลลิลิตร ของ Cole-Palmer Instruments

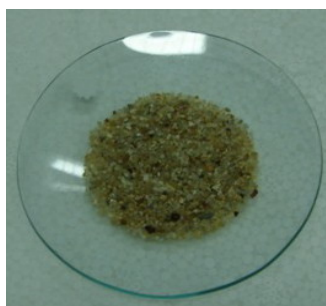
คอลัมน์บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต



ภาพที่ 6 แผนภาพแสดงการจัดเรียงอุปกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ

2. วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลาง คือ ดินทราย นำดินทรายหยาบสีน้ำตาลมาล้างด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10% และน้ำประปา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และสิ่งสกปรกที่ปนมากับดินทราย ตากให้แห้ง และอบที่ อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาร่อน เพื่อคัดแยกขนาดให้ได้ 0.85-2.00 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 20) ขนาดเม็ดทรายใหญ่ที่สุดที่ ลอดผ่านตะแกรงปริมาณร้อยละ 50 (d_{50}) คือ 1.28 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของทราย ที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชา ปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลักษณะของดินทราย แสดงดังภาพที่ 7 และผล การทดสอบแสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 7 ลักษณะของดินทรายที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของดินทราย

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้	วิธีการ
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.53	ASTM C 127 (ASTM, 1997)
การดูดซึม (Absorption)	1.088%	ASTM C 128 (ASTM, 1997)
ความซึมน้ำ (Permeability)	2.57×10^{-3} cm/s	ASTM D 2434 (ASTM, 1997)
หน่วยน้ำหนัก (Unit weight)	1.55 g/cm ³	ASTM C 29 (ASTM, 1997)
อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio)	38.74%	จากการคำนวณ
ความพรุน (Porosity)	0.97	จากการคำนวณ
สารอินทรีย์รวม (Organic matter)	0.07%	ASTM C 40 (ASTM, 1997)
สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)	0.04%	ASTM C 40 (ASTM, 1997)

3. สารเคมี

3.1 โทลูอิน (Toluene) 99.50% AR Grade ของ Merk

3.2 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassiumpermanganate, KMnO_4) 99.0% AR ของ Ajax Finechem

การเตรียมสารเคมี

การเตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือเกลือต่าง ๆ เพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released)

1) เตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 22.9 กรัม เพื่อผสมในวัสดุอินทรีย์ (ขี้เถ้าพาราฟิน) 100 กรัม

2) เตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.4 โมลาร์ ปริมาณ 87 มิลลิลิตร (โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.4 โมลาร์ ปริมาณ 87 มิลลิลิตร ให้ดูดซับเข้าไปในหินภูเขาไฟได้หมดใช้เวลา 30 วัน) ซึ่งค่าการละลายน้ำของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เท่ากับ 64 กรัมต่อลิตร ณ 20 องศาเซลเซียส (Schnarr *et al.*, 1998) นั่นคือ 0.40 โมลาร์ โดยชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จำนวน 63.9876 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำ

กลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา หลีกเลี่ยงการโดนแสง เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ เพื่อผสมในวัสดุหินภูเขาไฟ 100 กรัม

3) เตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 22.9 กรัม เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยกับวัสดุอินทรีย์

วิธีการ

1. วิธีการทดลอง

1.1 การผสมสารออกซิไดซ์ในวัสดุอินทรีย์

การผสมสารออกซิไดซ์ในวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ จี๊ฟซิงพาราฟิน หินภูเขาไฟ และใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ ราคาถูกและหาง่ายในท้องตลาด เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาอัตราการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่ปลดปล่อยจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เปรียบเทียบกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากวัสดุอินทรีย์

ลักษณะวัสดุอินทรีย์ที่ใช้และการผสมสารออกซิไดซ์เพื่อการ Slowly released

1. จี๊ฟซิงพาราฟิน

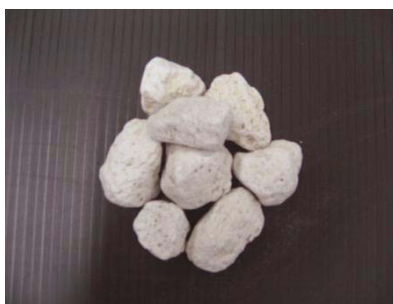


ภาพที่ 8 ลักษณะของจี๊ฟซิงพาราฟิน

จี๊ฟซิงพาราฟินมีลักษณะและคุณสมบัติเป็นก้อนแข็งคล้ายเทียนมีสีขาว เป็นไขมันที่ได้จากการกลั่นจากปิโตรเลียม ซึ่งจะได้สารเคมีในกลุ่ม Alkane Hydrocarbon โดยมีสูตรโครงสร้างคือ

C_6H_{2n+2} ไม่มีพิษ เนื้อเยื่อ และไม่ทำปฏิกิริยา (Schwartz *et al.*, 2005) ชื่อจากบริษัท อินเทลเลคท์ จำกัด ซึ่งจำหน่ายเป็นกิโลกรัม การผสมระหว่างวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินและสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทดลองใช้ขี้ผึ้งพาราฟินต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตปริมาณ 100 กรัม : 22.9 กรัม วิธีการทำโดยการหลอมเหลวขี้ผึ้งพาราฟินในบีกเกอร์ที่อุณหภูมิ 60°C (melting point $45-71^{\circ}\text{C}$) และทิ้งให้เย็นลงจนขี้ผึ้งพาราฟินมีลักษณะเหนียวแล้วผสมเกลือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เตรียมลง ไปใช้แท่งแก้วคนสารผสมให้เข้ากันโดยทั่วและนำไปบรรจุในท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ทิ้งให้แข็งตัวแล้วดึงออกในลักษณะแท่ง ดังภาพที่ 14

2. หินภูเขาไฟ



ภาพที่ 9 ลักษณะของหินภูเขาไฟ

หินภูเขาไฟ ชนิดหินพัมมิส เป็นวัสดุธรรมชาติมีลักษณะและคุณสมบัติเป็นก้อนสีขาว น้ำหนักเบา และมีรูพรุนจำนวนมาก อัดแน่นได้ดี พื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูง คือ $100-200\text{ m}^2/\text{m}^3$ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี มีความเป็นกรดอ่อน $5.0-6.0$ และมี SiO_2 , CaO และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 1.30 เซนติเมตร หาซื้อได้ทั่วไปตามร้านอุปกรณ์เลี้ยงปลา จำหน่ายเป็นถุงละกิโลกรัม ซึ่งมีราคาถูก การผสมระหว่างหินภูเขาไฟและสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการทดลองใช้หินภูเขาไฟต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตปริมาณ 100 กรัม : 5.57 กรัม วิธีการทำโดยเตรียมสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาณ 87 มิลลิลิตร (5.57 กรัม) แล้วนำหินภูเขาไฟแช่ลงไปในนั้นนำขึ้นมาตากแดดให้แห้งและอบด้วยอุณหภูมิ 103°C เวลา 2 ชั่วโมง ทุกๆ 5 วัน เป็นเวลา 30 วัน (ความสามารถในการดูดซับสารได้ 87 มิลลิลิตร)

3. ไยมะพร้าว



ภาพที่ 10 ลักษณะของไยมะพร้าว

ไยมะพร้าวเป็นวัสดุธรรมชาติมีลักษณะและคุณสมบัติเป็นเส้นใย อุ่มน้ำได้ดีมากและมีความพรุนสูง ซึ่งหาได้ทั่วไปโดยทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร การผสมระหว่างไยมะพร้าวและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการทดลองใช้ไยมะพร้าวต่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตปริมาณ 10 กรัม : 6.4 กรัม วิธีการทำโดยเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.4 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร (6.4 กรัม) แล้วนำไยมะพร้าวแช่ลงไปเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำขึ้นมาตากแดดให้แห้งและอบด้วยอุณหภูมิ 103 °C เวลา 2 ชั่วโมง

1.2 การทดลองศึกษาเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุอินทรีย์ เปรียบเทียบกับการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เพื่อทราบอัตราการปลดปล่อยสารออกซิไดซ์และเลือกวัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผสมสารออกซิไดซ์เพื่อการบำบัดสารโพลูอิน

การเตรียมคอลัมน์ทดลองเพื่อเปรียบเทียบการปลดปล่อย โดยวิธี Slowly released

- 1) เตรียมดินทรายอิมตัวด้วยน้ำบรรจุในคอลัมน์ทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ลักษณะอิมตัวด้วยน้ำ (มีการเปลี่ยนทรายทุกครั้งที่ทำการทดลอง)
- 2) ผสมสัดส่วนเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ต่อจีฟี่พาราฟิน 22.9 กรัม : 100 กรัม บรรจุในคอลัมน์ทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร

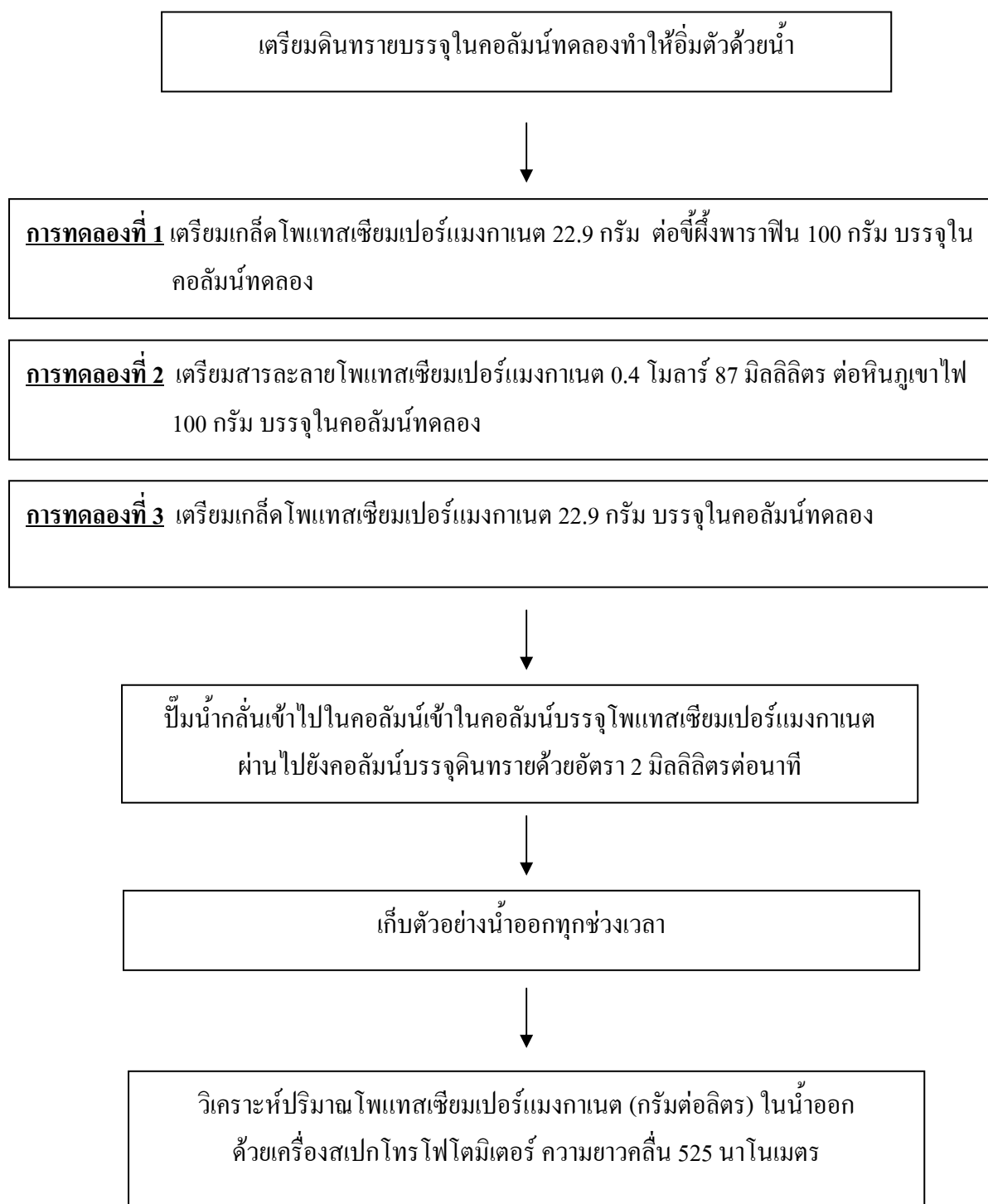
3) ผสมสัดส่วนสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ต่อหินภูเขาไฟ 0.4 โมลาร์ หรือ 87 มิลลิลิตร : 100 กรัม (สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตผิ่เข้าไปในหินภูเขาไฟใช้เวลา 30 วัน) บรรจุในคอลัมน์ทดลองดังข้อ 2

4) เตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือเกลือต่างที่บัพทิม 22.9 กรัมบรรจุในคอลัมน์ทดลองดังข้อ 2

5) ป้อนน้ำกลั่นด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าคอลัมน์ที่บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตผ่านไปยังคอลัมน์บรรจุดินทราย ลักษณะ ดังภาพที่ 6

6) เก็บตัวอย่างน้ำทุกช่วงเวลาเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดลองแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการทดลองการเปรียบเทียบการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้าๆ

1.3 การศึกษาโครงสร้างและรูปร่างของสารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

การศึกษาโครงสร้างและรูปร่างของสารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ โดยถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อทราบโครงสร้างภายในของสารออกซิไดซ์เมื่อถูกผสมกับวัสดุอินทรีย์

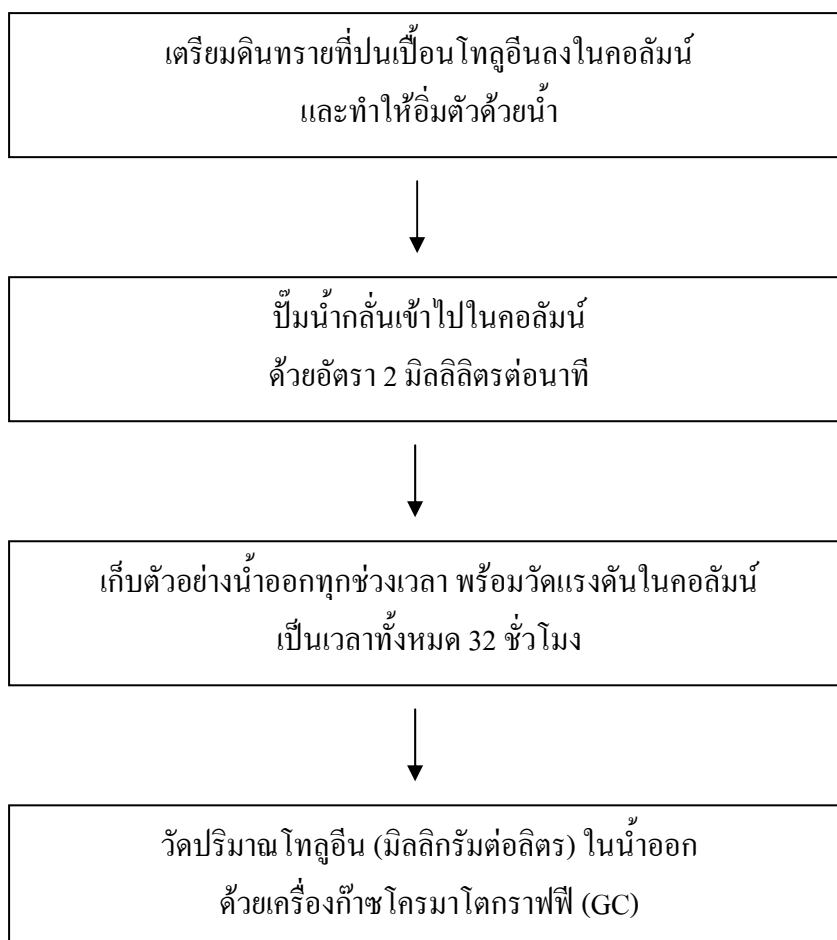
1.4 การทดลองศึกษาการบำบัดโทลูอินด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released oxidizing agent)

เพื่อทราบประสิทธิภาพและระยะเวลาในการบำบัดโทลูอินด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

1.4.1 การศึกษาปริมาณโทลูอินในน้ำในชุดควบคุมการทดลอง

การทดลองใช้น้ำกลั่นป้อนด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปในคอลัมน์ทดลองซึ่งบรรจุดินทรายที่ปนเปื้อนโทลูอิน จากนั้นวัดแรงดันในคอลัมน์ และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทดลองที่เวลาต่างๆ เป็นเวลา 32 ชั่วโมง เพื่อนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณโทลูอินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

ขั้นตอนการทดลอง แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการทดลองของชุดควบคุมการทดลอง

1.4.2 การออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

- 1) เตรียมดินทรายอิมัลชันด้วยน้ำบรรจุในคอลัมน์ทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ลักษณะอิมัลชันด้วยน้ำ
- 2) เตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 กรัม ต่อวัสดุอินทรีย์ (จีฟิงพาราฟิน) 100 กรัม ซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ที่เลือกนำมาใช้ผสมกับสารออกซิไดซ์ เนื่องจากมีค่าการปลดปล่อยออกมาช้า และคงที่สม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งได้จากการทดลองส่วนที่ 1
- 3) ป้อนน้ำกลั่นด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าคอลัมน์ที่บรรจุโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตผ่านไปยังคอลัมน์บรรจุดินทราย ลักษณะดังภาพที่ 6
- 4) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์ทดลองทุกช่วงเวลา โดยวิเคราะห์ปริมาณไทลูอินด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC) พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันในคอลัมน์

ขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 13 ลักษณะของจีฟิงพาราฟินที่ใช้ในการผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต



ภาพที่ 14 ลักษณะจีฟิงพาราฟินผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ขึ้นรูปในท่อพีวีซี ใช้ในการทดลองส่วนที่ 2

1.4.2.1 การวัดค่าการสูญเสียแรงดันของน้ำ (Head loss)

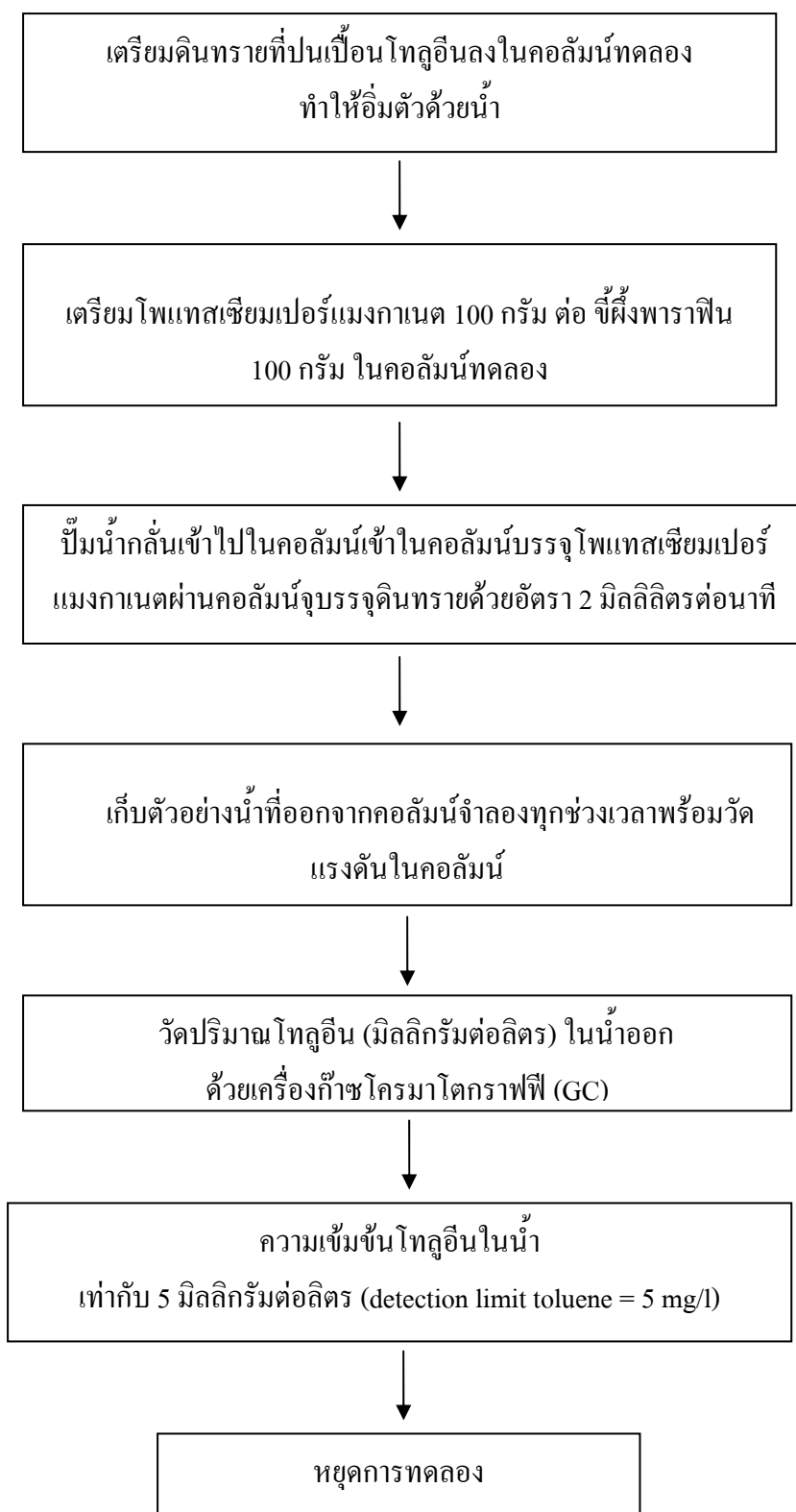
ในการทดลองการวัดค่าการสูญเสียแรงดันของน้ำ (head loss) ภายในคอลัมน์ ทำการวัดเพื่อทราบแรงดันที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยวัดในแต่ละจุดของคอลัมน์ ทดลองที่ใช้สำหรับบรรจุหินทราย คือ จุดวัดที่ 1 2 3 4 ดังภาพที่ 4 โดยมีจุดที่ 1 เป็นจุดอ้างอิง และทำการวัดแรงดันที่ระยะของจุด 12, 23 และ 34 ทั้งสามระยะทุกช่วงเวลาทำการเก็บตัวอย่าง โดยถ้าค่าการสูญเสียแรงดันที่วัดได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่า แรงดันที่จุดนั้นๆ มีค่ามากกว่าแรงดันที่ด้านทางเข้า (ที่จุดอ้างอิง 1) ในทางเดียวกันถ้าค่าการสูญเสียแรงดันที่วัดได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่า แรงดันที่ด้านทางเข้า (ที่จุดอ้างอิง 1) มีค่ามากกว่าแรงดันที่จุดนั้นๆ ซึ่งค่าที่วัดจะออกมาในรูปแบบการวัดศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) ของของเหลวในคอลัมน์โดยที่ ศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ (V) เท่ากับแรงดันน้ำ 1 กิโลปาสกาล (kPa) ซึ่งเท่ากับความสูงน้ำ 10.1973 เซนติเมตรน้ำ (cm H₂O) โดยการแสดงค่าการสูญเสียแรงดันของน้ำนี้จะแสดงออกมาเป็นหน่วยของเซนติเมตรน้ำ แสดงวิธีการคำนวณดังนี้คือ

ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวเซนเซอร์ในเครื่องวัดแรงดันก่อนการทดลองจุดที่ 1 = 0.18 โวลต์ (V) และเมื่อวัดแรงดันที่จุด 1 ในเวลาทำการเก็บตัวอย่าง ได้ = 0.42 ค่าศักย์ไฟฟ้าจริง คือ $0.42 - 0.18 = 0.24$ โวลต์ (V) และนำค่าแรงดันมาคิดเป็นหน่วยเซนติเมตรน้ำ (cmH₂O) คือ $(0.24/0.45) \times 10.1973 = 5.438$ เซนติเมตรน้ำ (cmH₂O) โดยทำการวัดเซนเซอร์จุดที่ 2, 3 และ 4 และคิดเช่นเดียวกันให้เป็นหน่วยเซนติเมตรน้ำก่อน จากนั้นถ้าจะคิดค่าสูญเสียแรงดัน (head loss 12) นั่นก็คือค่าสูญเสียแรงดันระหว่างจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 ก็นำค่าสูญเสียแรงดัน (cmH₂O) จุดที่ 1 - จุดที่ 2 ซึ่งจะแสดงวิธีการคำนวณอย่างละเอียดในตารางผนวก ก7 และ ก8

1.4.2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

วิเคราะห์ลักษณะทางเคมี และทางกายภาพของน้ำ ดังนี้

- 1) วิเคราะห์ โทลูอิน ด้วย Gas Chromatography
- 2) วิเคราะห์แมงกานีส ด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer
- 3) วิเคราะห์โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตด้วย Spectrophotometer
- 4) วิเคราะห์พีเอชด้วย pH meter



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ

1.5 การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

เพื่อทราบโครงสร้างของตะกอนเมกานีสออกไซด์โดยถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โครงสร้างตะกอนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) และธาตุองค์ประกอบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

1.6 การศึกษาปริมาณของตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

เพื่อทราบปริมาณของตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบจากกระบวนการออกซิเดชันเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

สถานที่และระยะเวลาในการทำงานวิจัย

1. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 1, 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

2. ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

เริ่มดำเนินการวิจัยตั้งแต่ เดือนกันยายน 2549 – เดือนกรกฎาคม 2550

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนารูปแบบการบำบัดน้ำได้ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี ณ ที่เกิด
2. เพิ่มระยะเวลาการบำบัดให้นานขึ้นเพื่อลดความถี่ในการทำการบำบัด
3. เพื่อประหยัดค่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด

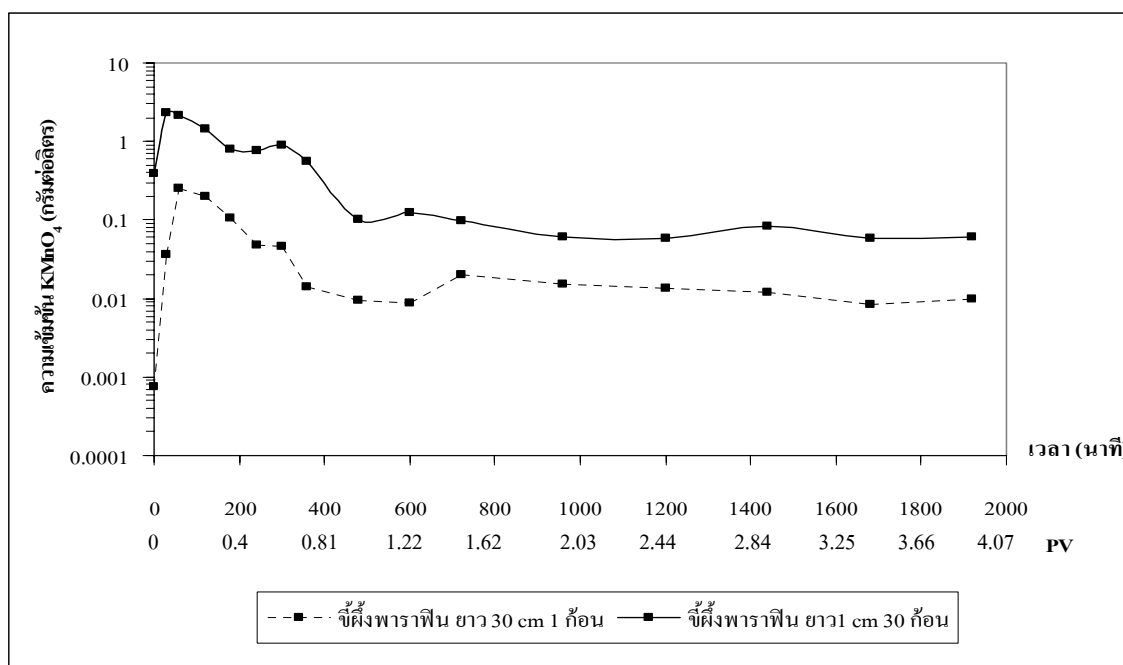
4. แหล่งทุนสนับสนุน

ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาประจำปีการศึกษา 2549

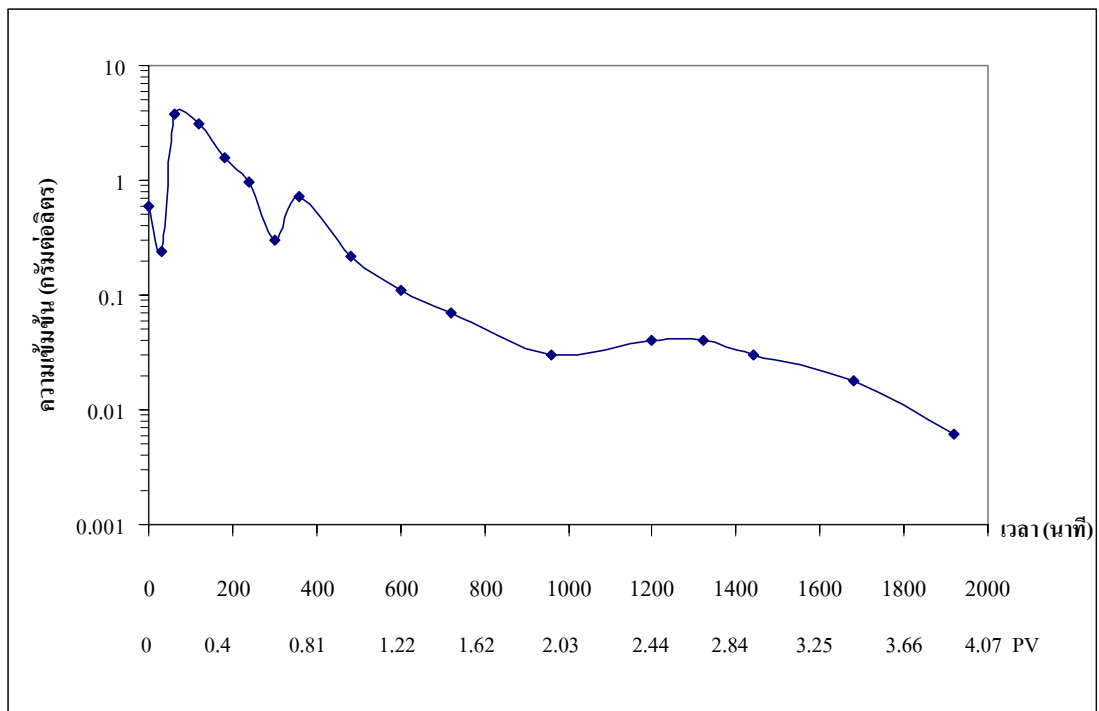
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การทดลองศึกษาเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุอินทรีย์ เปรียบเทียบกับการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

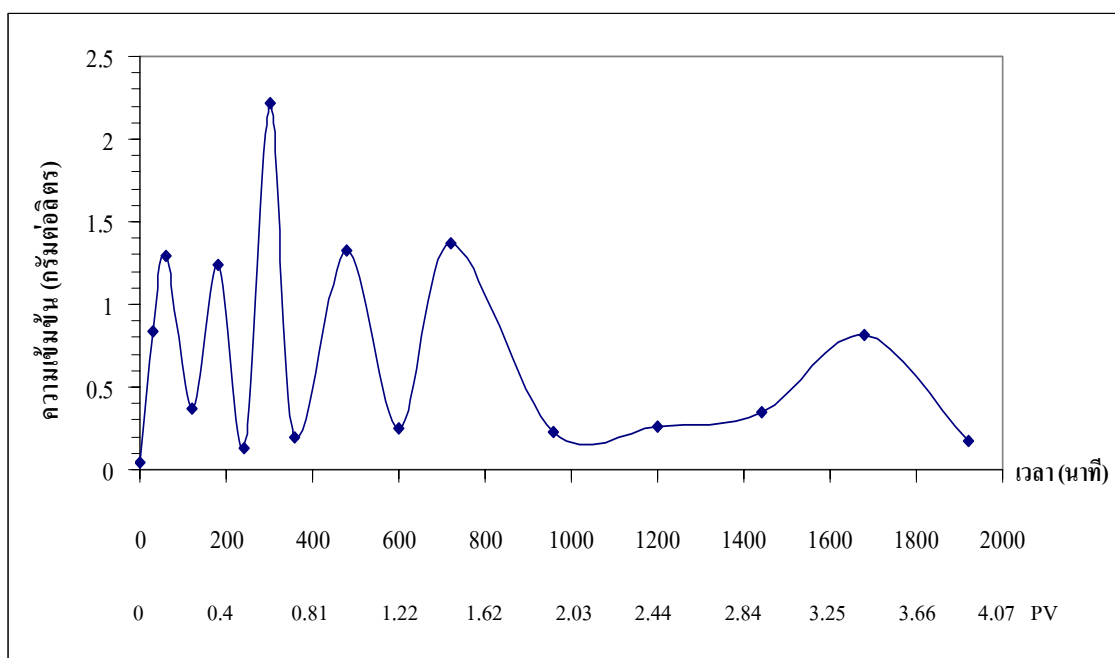
การทดลองเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกจากวัสดุอินทรีย์ คือ ขี้ผึ้งพาราฟิน หินภูเขาไฟ และ ไขมะพร้าว เบื้องต้นพบว่าไขมะพร้าวไม่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยเนื่องจากลักษณะการปลดปล่อยออกมาแบบไม่สม่ำเสมอ เป็นตะกอนสีดำ และไม่มีการปลดปล่อยออกมาเป็นสารละลายสีม่วงของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยตะกอนดังกล่าวเป็นการปลดปล่อยสารออกซิไดซ์อย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเลือกวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน และ หินภูเขาไฟ นำมาทำการทดลองเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อเลือกวัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ



ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากขี้ผึ้งพาราฟินที่ขนาดต่างกัน



ภาพที่ 17 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากหินภูเขาไฟ



ภาพที่ 18 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากเกลือต่างทับทิม

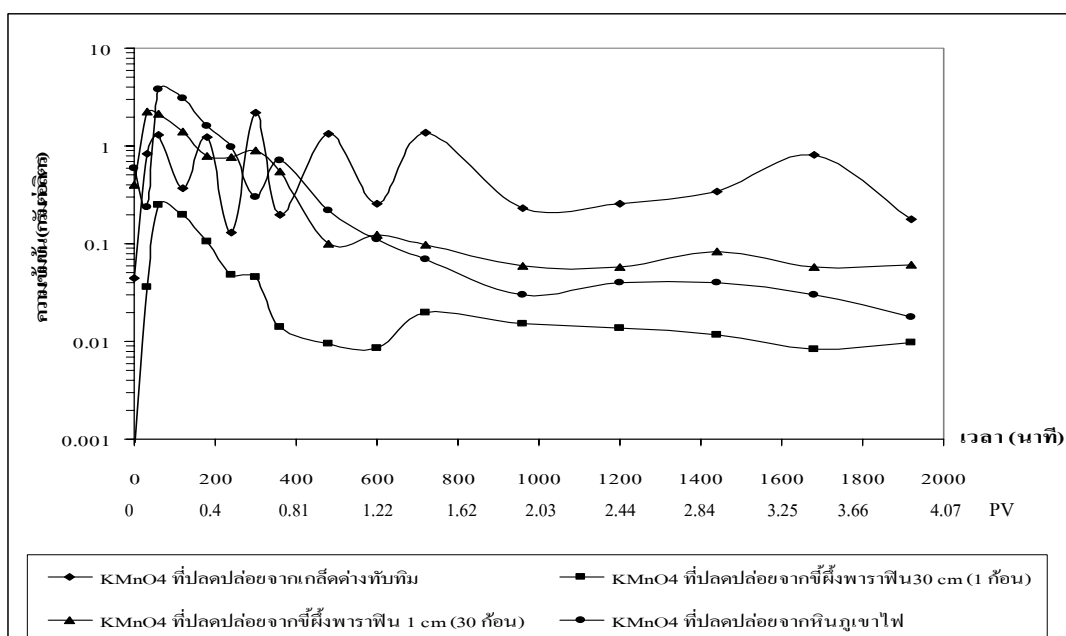
ภาพที่ 16 - 18 เป็นการแสดงผลระหว่างค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต กับสัดส่วนระหว่างปริมาตรน้ำที่ผ่านช่องว่างกับปริมาตรช่องว่างทราย (Pore Volume) โดยมีลักษณะการทดลอง คือ อัตราการไหลของน้ำ 2 มิลลิลิตรต่อนาที มีความเร็วน้ำในคอลัมน์ 1.69×10^{-5} เมตรต่อวินาที คิดเป็นค่า Re เท่ากับ 0.027 จัดเป็นการไหลแบบ laminar flow

ภาพที่ 16 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากซีฟี่งพาราฟินก้อนเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร 30 ก้อน) กับซีฟี่งพาราฟินก้อนใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร 1 ก้อน) จากผลการทดลองจะเห็นว่าช่วงแรกการปลดปล่อย สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกมาจากซีฟี่งพาราฟิน (paraffin wax) มีค่าความเข้มข้นต่ำ เมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นสูง และหลังจากนั้นมีค่าลดลงและลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าคงที่สม่ำเสมอช่วง Pore Volume ที่ 1.46 – 3.90 โดยเปรียบเทียบขนาดของซีฟี่งพาราฟินที่มีมวลเท่ากันคือ 22.9 กรัม จากการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากซีฟี่งพาราฟิน พบว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความเข้มข้นเมื่อครั้งที่ กล่าวคือ ซีฟี่งพาราฟินก้อนเล็ก มีการปลดปล่อยได้มากกว่าก้อนใหญ่ซึ่งถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าก็จะทำให้เกิดการสัมผัสมากกว่า ดังนั้นเมื่อมีการสัมผัสกับน้ำก็จะมีการปลดปล่อยออกมามากกว่า โดยจะเห็นว่าความเข้มข้นที่ปลดปล่อยออกมาจากซีฟี่งพาราฟินก้อนเล็กปลดปล่อยออกมามากกว่าซีฟี่งพาราฟินก้อนใหญ่ประมาณ 10 เท่า

ภาพที่ 17 เป็นการแสดงผลระหว่างค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากหินภูเขาไฟกับ Pore Volume จากผลแสดงให้เห็นว่าช่วงแรกการปลดปล่อย สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกมาจากหินภูเขาไฟ มีค่าความเข้มข้นต่ำ และเมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึง Pore Volume ที่ 0.122 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.82 กรัมต่อลิตร คือมีการละลายสูงที่สุด และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมาจากช่วงแรกมีการละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกมาที่บริเวณผิวของหินภูเขาไฟเมื่อปลดปล่อยออกมาบริเวณผิวหมดจึงเกิดการปลดปล่อยออกมาบริเวณรูพรุน ซึ่งหินภูเขาไฟก็ดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าไปในรูพรุนค่อนข้างมากเนื่องจากมีคุณสมบัติอุ้มน้ำได้ดี แต่พบว่ามี การปลดปล่อยออกมาไม่ดี โดยยังมีโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถูกกักไว้ในหินค่อนข้างมาก ซึ่งจะพบว่าการปลดปล่อยจะปลดปล่อยออกมาจากบริเวณผิวมากกว่า

ดังนั้นจึงทำให้ค่าความเข้มข้นที่ปลดปล่อยออกมาจากกรูพุนมีค่าต่ำและมีแนวโน้มที่จะต่ำลงมากซึ่งเป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยที่ไม่คงที่สม่ำเสมอ และถ้าใช้หินภูเขาไฟเป็นวัสดุอินทรีย์จะทำให้เสียเวลาในการเตรียมค่อนข้างมากในการดูดซึมสารเข้าไปของการทดลองนี้ใช้เวลา 30 วัน ในการดูดซึมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาณ 87 มิลลิลิตรเข้าไปในหินภูเขาไฟ 100 กรัม

ภาพที่ 18 เป็นการแสดงผลระหว่างค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยจากเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยตรงกับ Pore Volume แสดงให้เห็นว่าช่วงแรกการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในรูปของแข็งมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ และหลังจากนั้น Pore Volume เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างไม่สม่ำเสมอ คือมีการละลายอย่างไม่คงที่ และมีค่าการละลายสูงที่สุดใน Pore Volume 0.61 คือ 2.212 กรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นที่ปล่อยออกมาแต่ละจุดมีค่าค่อนข้างแตกต่างกันมาก เมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้น ซึ่งจากค่าที่ไม่สม่ำเสมอดังกล่าว เนื่องมาจากเกิดการละลายเมื่อสัมผัสกับบริเวณผิวชั้นบนก่อน เพราะเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะกองอยู่ที่ก้นคอลัมน์ และเมื่อผ่านซึมผ่านชั้นผิวหน้าลงไปจึงเกิดการละลายมากขึ้นดังนั้นจึงทำให้การละลายไม่สม่ำเสมอ



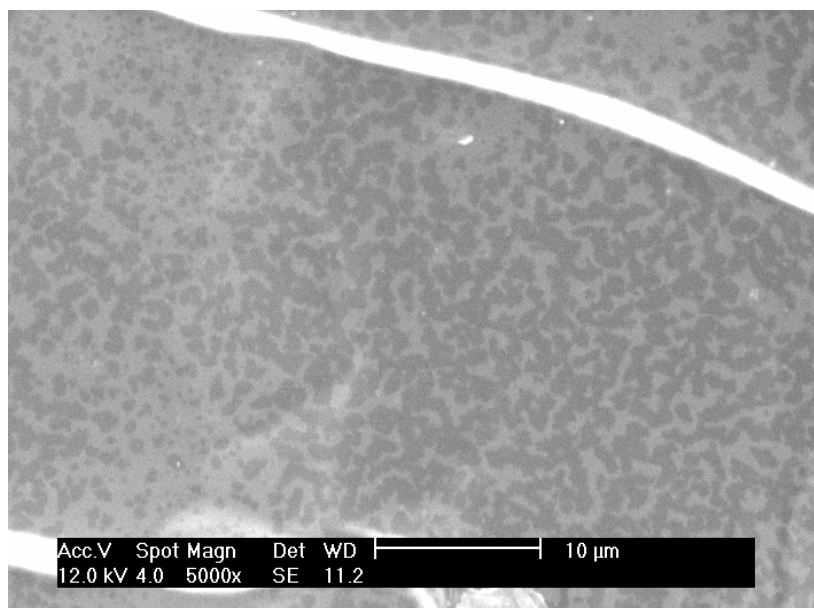
ภาพที่ 19 ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยจากขี้เถ้าพาราไฟน หินภูเขาไฟ และ เกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ภาพที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบการปลดปล่อยของสาร โพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตเมื่อเทียบกับ Pore Volume จะเห็นได้ว่าสารละลายโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยออกมาจากซีฟี่พาราฟินมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำและปลดปล่อยออกมาอย่างคงที่สม่ำเสมอมากที่สุด โดยสารละลายโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยออกมาจากซีฟี่พาราฟินก้อนใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร 1 ก้อน) มีค่าความเข้มข้นที่ปลดปล่อยออกมามีค่าต่ำที่สุดและยังคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งเห็นได้ดังภาพที่ 13 สารละลายโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยจากเกล็ดโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนต มีการปลดปล่อยออกมาต่ำในช่วง Pore Volume ที่ 0 แต่เมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้นค่าการปลดปล่อยมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง อย่างไม่คงที่สม่ำเสมอซึ่งค่อนข้างที่จะแตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยออกจากวัสดุอินทรีย์ซีฟี่พาราฟิน และ หินภูเขาไฟ และโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยออกมาจากหินภูเขาไฟมีการปลดปล่อยออกมาเร็วที่สุดเนื่องจากปริมาณโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ใส่ในระบบน้อยที่สุดคือ 5.568 กรัม และหลังจากนั้นเมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นมีแนวโน้มลดต่ำลงมาก ซึ่งการปลดปล่อยค่อนข้างไม่คงที่สม่ำเสมอเมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแนวโน้มการปลดปล่อยลดต่ำลงโดยตลอด จากการสังเกตด้วยตาที่พบว่า สีม่วงของสารละลายโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตค่อยๆ ลดลงจนเป็นสีม่วงจาง แต่เมื่อ Pore Volume 0.97- 3.90 พบว่า สารละลายโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยจากเกล็ดโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตมีการปลดปล่อยออกมาเร็วที่สุดเนื่องมาจากมีการปลดปล่อยโดยตรงเมื่อสัมผัสน้ำ ดังนั้นเมื่อปริมาตรน้ำมีการสัมผัสมากขึ้นจึงเกิดการปลดปล่อยสารละลายออกมามากกว่าส่วนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุซีฟี่พาราฟินและหินภูเขาไฟ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าซีฟี่พาราฟิน (paraffin wax) เป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผสมกับโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตเพื่อการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ เนื่องจาก มีการปลดปล่อยอย่างสม่ำเสมอคงที่ เมื่อเทียบกับเกล็ดโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตและหินภูเขาไฟ โดยที่ซีฟี่พาราฟินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร (1 ก้อน) มีการปลดปล่อยค่อนข้างช้าและคงที่สม่ำเสมอเมื่อ Pore Volume เพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยปลดปล่อยออกมาน้อยกว่าซีฟี่พาราฟินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร (30 ก้อน) ประมาณ 10 เท่า ที่ Pore Volume และเวลาเท่ากัน จากการศึกษาจึงเลือกวัสดุอินทรีย์ซีฟี่พาราฟินมาใช้เป็นวัสดุผสมกับโพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนตในการบำบัดโกลูอินด้วยกระบวนการออกซิเดชันเคมี โดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

2. การศึกษาโครงสร้างของสารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

จากการทดลองนำจีฟี่งพาราฟินที่ผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อศึกษาโครงสร้างและรูปร่างจากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



ภาพที่ 20 ลักษณะจีฟี่งพาราฟินผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5000 เท่า

จากภาพที่ 17 ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง SEM ขนาดกำลังขยาย 5000 เท่า จะเห็นว่าเกล็ดของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีการผสมในจีฟี่งพาราฟินอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน เมื่อสังเกตจากจุดสีดำที่แสดงดังภาพ เพราะจีฟี่งพาราฟินเป็นสีขาวทั้งก่อนโดนความร้อนและหลังจากหลอมเหลวด้วยความร้อนจากการทดลองโดยไม่มีการเปลี่ยนสี ซึ่งส่วนที่เป็นเส้นสีขาวจะเป็นส่วนของจีฟี่งพาราฟินที่ถูกตัดก้อนให้บางเพื่อนำไปถ่ายด้วยเครื่อง SEM ซึ่งการตัดอาจไม่เรียบโดยตลอดทั้งก้อนทำให้พื้นผิวส่วนที่ถ่ายรูปไม่เรียบเท่ากัน และจากภาพไม่เห็นเป็นลักษณะผลึกของเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั้นเนื่องมาจากผิวส่วนที่ถ่ายรูปเกิดจากการตัดก้อนจีฟี่งพาราฟินให้มีความบาง ดังนั้นจึงเป็นการตัดผลึกของเกล็ดโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตด้วยจึงทำให้ไม่เห็นลักษณะรูปร่างเป็นผลึก

3. การทดลองศึกษาการบำบัดโทลูอินด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ (slowly released oxidizing agent)

3.1 การศึกษาปริมาณโทลูอินในน้ำในชุดควบคุมการทดลอง

ในชุดควบคุมเป็นการใช้น้ำกลั่น ป้อนด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปใน คอลัมน์ทดลองซึ่งบรรจุดินทรายที่ปนเปื้อนโทลูอิน จากนั้นเก็บตัวอย่างทดสอบที่ทางออกคอลัมน์ ทดลองที่เวลาต่างๆ เป็นเวลา 1,920 นาที PV เท่ากับ 11.48 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 21 ซึ่งการ ทดลองนี้แสดงให้เห็นผลของกลไกที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของสารแยกตัวจากน้ำ (non aqueous phase liquid) แบบยังไม่มีปฏิกิริยาเคมี มีกลไกที่ควบคุม คือ

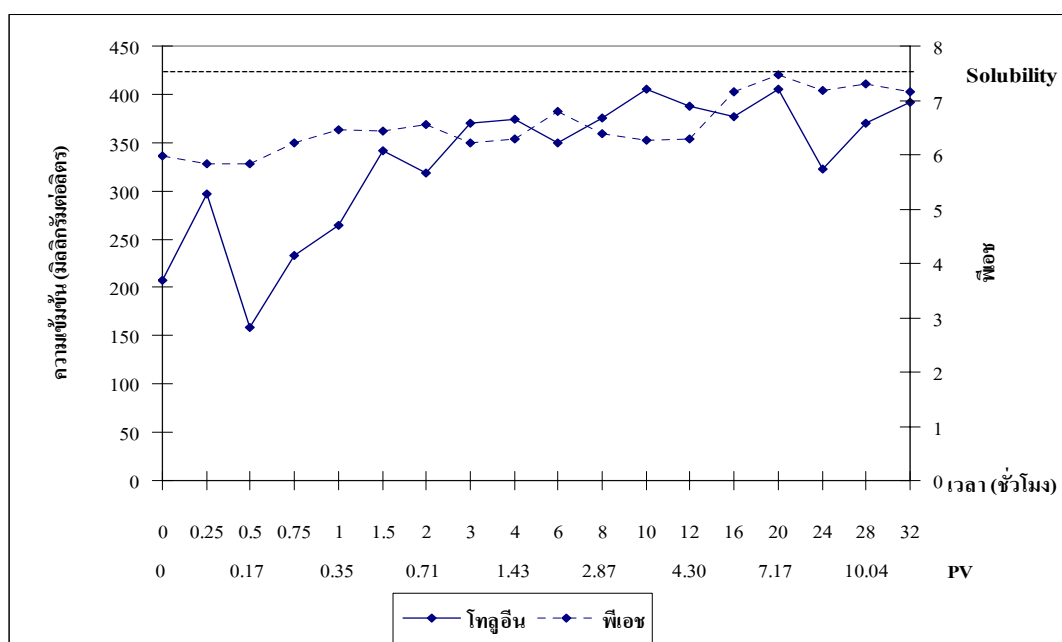
1. การถ่ายเทมวล (mass transfer) โดยการละลาย (dissolution) จากสถานะที่ไม่ใช่น้ำ (non aqueous) ของโทลูอินไปยังน้ำ โดยค่าความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility) ของโทลูอิน คือ 421 มิลลิกรัมต่อลิตร (Pankow and Cherry, 1996)

2. การเจือจาง (dilution) ของความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำ เมื่อรวมกับน้ำที่เข้า (influent) ไม่มีความเข้มข้นของโทลูอิน เนื่องจากความเข้มข้นของโทลูอินเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การแพร่ (diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโทลูอินในน้ำ จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

4. การพา (advection) เนื่องจากน้ำมีความเร็วในคอลัมน์เท่ากับ 1.69×10^{-5} เมตรต่อวินาที คิดเป็นค่า Reynolds Number (Re) เท่ากับ 0.027 จัดเป็นการไหลแบบ laminar flow (Freeze and Cherry, 1979) จาก $Re = q \rho d_{50} / \mu n$ เมื่อ q คือ ความเร็วดาร์ซี (Darcy velocity) [m/s], ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (density) [g/cm^3], d_{50} คือ ขนาดดินทรายโดยเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 [cm], μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (viscosity) [$g/cm \cdot s$] และ n คือ ความพรุน (porosity) [-]

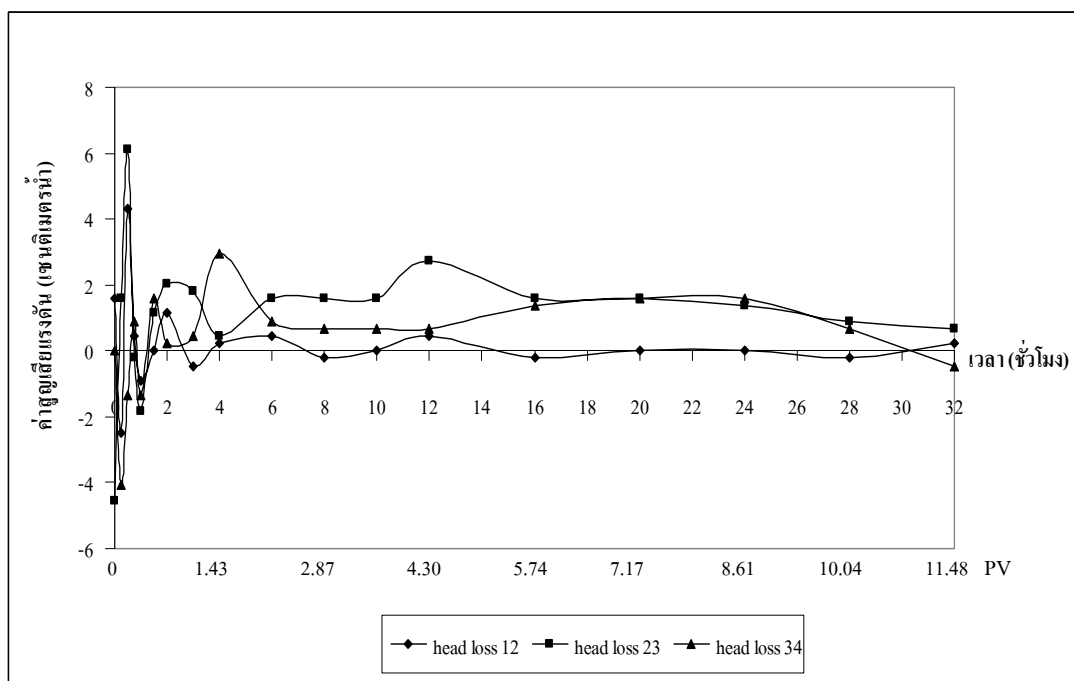
นอกจากนี้ในการทดลองอาจเกิด preferential flow ซึ่งเกิดจาก wall effect บริเวณขอบของคอลัมน์ เมื่อพิจารณาจาก พื้นที่ผิวสัมผัสในคอลัมน์ต่อปริมาตรของคอลัมน์ ทำให้น้ำไหลผ่านบริเวณขอบของคอลัมน์มากกว่าที่จะผ่านบริเวณภายในดินทราย หรือสารปนเปื้อนที่อยู่ส่วนกลาง



ภาพที่ 21 ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำ ในชุดควบคุมการทดลอง

ภาพที่ 21 แสดงค่าความเข้มข้นโทลูอินในน้ำ เมื่อเทียบกับเวลา และ Pore volume ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก4 พบว่า ความเข้มข้นของโทลูอินมีค่าอยู่ในช่วง 159.01-404.64 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการละลายน้ำของโทลูอิน คิดเป็น 37.76-96.11% ของความสามารถในการละลายน้ำ ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (effluent) มีค่าค่อนข้างคงที่ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำของโทลูอิน มีค่าเฉลี่ยที่ $337.64 (\pm 71.73)$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ อรมนิ (2549) ที่ทำการทดลองลักษณะเดียวกันโดยใช้ขนาดคอลัมน์ทดลอง และปริมาณโทลูอินที่เท่ากัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการละลายน้ำของโทลูอิน คิดเป็น 70.67-99.6% มีค่าเฉลี่ยที่ $357.36 (\pm 82.14)$ อาจเนื่องมาจากการเกิด preferential flow และคุณสมบัติของเม็ดทรายที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันเล็กน้อย จึงทำให้ปริมาณน้ำไหลผ่านบริเวณขอบของคอลัมน์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านบริเวณทรายต่างกัน หรือไหลผ่านสารปนเปื้อนที่อยู่ส่วนกลาง ดังนั้นปริมาณโทลูอินที่ละลายในน้ำจึงมีค่าน้อยกว่ากันเล็กน้อย

และพบว่าฟิเอนน้ำออกมีค่าเป็นกรค่อนถึงเป็นกลางโดยมีค่าค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 5.83 – 7.46 โดยมีค่าเฉลี่ย 6.54 (± 0.49) ซึ่งมีค่าค่อนข้างเป็นกลางเนื่องจากไม่มีการทำปฏิกิริยาใดๆ



ภาพที่ 22 ค่าการสูญเสียแรงดัน ในชุดควบคุมการทดลอง

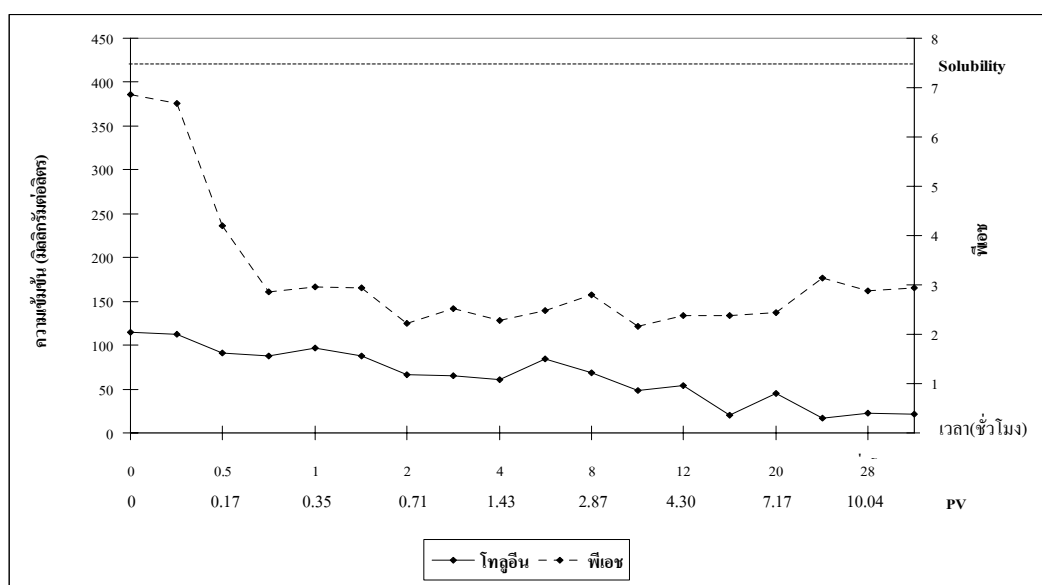
ภาพที่ 22 แสดงค่าการสูญเสียแรงดัน (pressure loss) ที่ระยะต่างๆ มีค่าต่ำ โดยเฉลี่ยต่ำกว่า 3 เซนติเมตรน้ำ และค่อนข้างคงที่และส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวก มีการสูญเสียแรงดัน เฉลี่ยเท่ากับ 0.856 (± 0.628), 2.417 (± 1.026) และ 2.366 (± 0.975) เซนติเมตรน้ำ ซึ่งเป็นความดันสูญเสียระหว่างตำแหน่ง 12, 23 และ 34 ตามลำดับ เนื่องจากความพรุนในคอลัมน์มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก แต่ในช่วงแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันเพิ่มขึ้น และลดลงค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดินทรายในคอลัมน์ทดลองมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีสัมพันธ์กับแรงดันของน้ำ เมื่อปั๊มเข้าคอลัมน์ทดลองในช่วงแรก ทำให้ส่งผลถึงค่าความดัน ค่าการสูญเสียแรงดันในช่วงต้นมีค่าเป็นบวกค่อนข้างมาก เนื่องมาจากแรงดันของน้ำในการไล่ฟองอากาศออกจากคอลัมน์ทดลอง ส่วนแรงดันที่มีค่าเป็นลบ เนื่องมาจากฟองอากาศไปถึงจุดวัดแรงดันนั้นๆ พอดี แรงดันที่จุดนั้นจึงมากกว่าที่จุดอ้างอิง จุด 1 วิธีการคำนวณค่าการสูญเสียแรงดันแสดงในภาคผนวก ก7 และ ก8 ซึ่งค่าการสูญเสียแรงดันนี้สามารถบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการซึมผ่านของทรายภายในคอลัมน์ได้ ถ้าความสามารถในการซึมผ่านมีค่ามากน้ำก็สามารถไหลผ่านไปได้โดยง่าย และจะ

ใช้แรงดันต่ำ ในทางเดียวกันค่าการสูญเสียแรงดันจึงมีค่าน้อย ความสามารถในการซึมน้ำมีค่าต่ำ น้ำก็สามารถไหลผ่านไปได้ยาก โดยสาเหตุนี้อาจเกิดการอุดตันของดินทราย ดังนั้นในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของดินทรายในคอลัมน์ก็สามารถสังเกตได้จากค่าการสูญเสียแรงดันนี้

ค่าการสูญเสียแรงดันนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณค่า K (hydraulic conductivity) ของดินทรายทั้งสามส่วน คือ 12, 23 และ 34 ด้วย (วิธีการคำนวณค่า K แสดงดังภาคผนวก ก4)

3.2 การศึกษาความสามารถกระบวนการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุจีฟิงพาราฟิน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง

การทดลองใช้เกลือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 กรัม ต่อ จีฟิงพาราฟิน 100 กรัม หรืออัตราส่วน 1 : 1 เพื่อใส่ลงในระบบในปริมาณที่มากเกินไป โดยประเมินจากค่าความเข้มข้นและระยะเวลาการปลดปล่อยในภาพที่ 16 โดยให้น้ำกลั่นไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตร ต่อ นาที ในการบำบัดโทลูอินที่ปนเปื้อนในดินทรายในคอลัมน์ทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง แสดงผลการทดลอง ดังในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความเข้มข้นโทลูอินในน้ำภายหลังการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุจีฟิงพาราฟินเป็นเวลา 32 ชั่วโมง

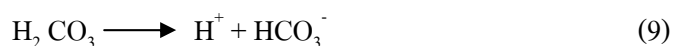
ภาพที่ 23 ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำเริ่มตรวจวัดได้ตั้งแต่เนาที่แรก ($PV = 0$) และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 32 ($PV = 11.48$) อันเนื่องมาจากโทลูอินมีการละลายน้ำผ่านไปยังปลายคอลัมน์ทดลอง ในช่วงที่ทำให้คอลัมน์อิ่มตัวด้วยน้ำทำให้เกิดการออกซิเดชันตั้งแต่เนาที่แรก จึงสามารถตรวจพบค่าตั้งแต่เนาที่แรก จนถึงชั่วโมงที่ 32 ($PV = 0 - 11.48$) โดยในการทดลองนี้ เมื่อมีการปั้มน้ำกลั่นเข้าไปในคอลัมน์มีการปลดปล่อยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตออกจากขี้นพาราฟินช่วงแรกค่อนข้างเข้มข้นมากจากการสังเกตเห็นสีม่วงที่ผ่านดินทรายภายในคอลัมน์ทดลอง และพบว่าค่าความเข้มข้นสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่วัดได้จากน้ำออกในช่วงแรกไม่พบความเข้มข้น โดยอาจเกิดจากการมีการออกซิเดชันระหว่างโทลูอินกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหมดโดยไม่เหลือสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลือทิ้งออกมา โดยน้ำในคอลัมน์มีความเร็ว (seepage velocity) เท่ากับ 1.69×10^{-5} เมตรต่อวินาที

ดังนั้นน้ำส่วนที่อยู่ในคอลัมน์ทดลองต้องเดินทางเป็นระยะทาง 50 เซนติเมตร (เท่าความยาวคอลัมน์) ใช้เวลา 148 นาที $PV = 0.88$ โดยโทลูอินในน้ำลดลงอย่างสม่ำเสมอ ตั้งแต่เนาที่แรก จนถึงชั่วโมงที่ 32 มีความเข้มข้น 114.24 - 21.81 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $64.61(\pm 31.15)$ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นโทลูอินที่ปนมากับน้ำออกเมื่อปั้มน้ำกลั่นในเวลา 32 ชั่วโมง ดังภาพที่ 21 พบว่ามีค่าน้อยกว่า 86.28 - 71.76 % ตามลำดับ และพบว่า pH ของน้ำออกมีค่าลดลงโดยมีค่า pH ต่ำลงอย่างชัดเจนจาก pH เท่ากับ 6.87 ในช่วงแรก ลดต่ำลงจนมีค่า pH ประมาณ 2 เนื่องมาจากเมื่อเกิดการออกซิเดชันเคมีระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับโทลูอิน จะเกิดตะกอนสีน้ำตาลของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_x) จำนวนมากอยู่ในคอลัมน์ และเกิดการบอนด์ออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 6

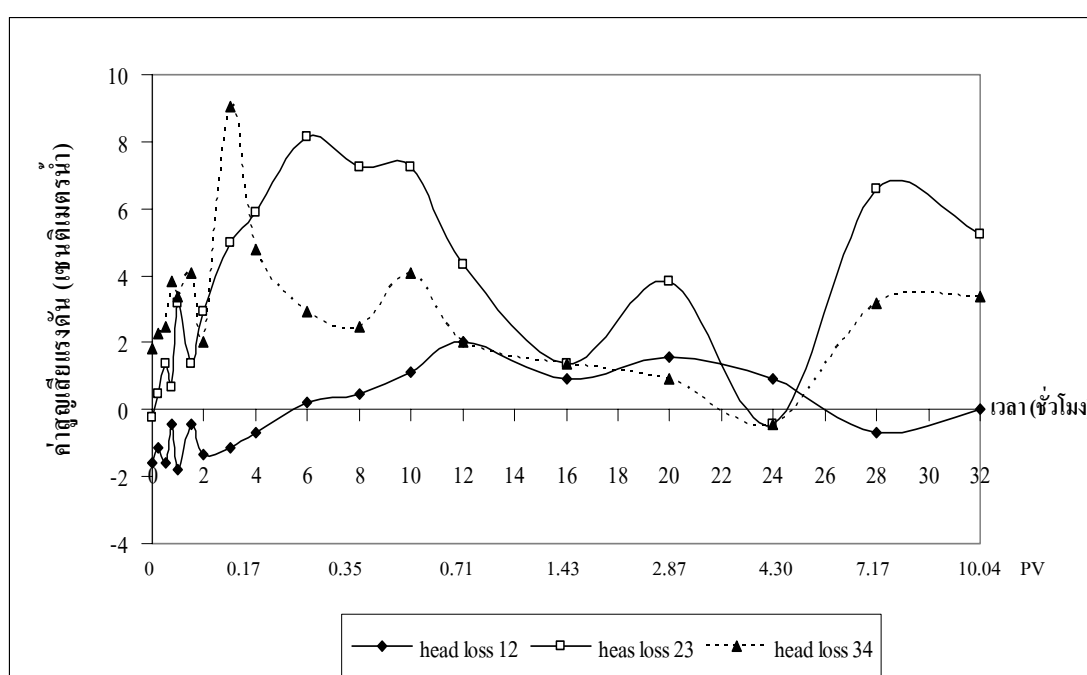
และการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาละลายน้ำและทำปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ดังสมการที่ 8



จากนั้นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) บางส่วนจะแตกตัว ให้ไฮดรอกไซด์ไอออนคาร์บอเนต (H_2CO_3) ดังสมการที่ 9



โดยที่กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ง่ายเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำมากขึ้นก็จะทำให้เกิด H_2CO_3 มากขึ้นด้วยร่วมกับการแตกตัวของ H_2CO_3 ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ ไฮโดรเจนคาร์บอเนต (HCO_3^-) เนื่องจาก H_2CO_3 และ H^+ ที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ลดต่ำลง แต่ค่าเป็นกรด (pKa) H_2CO_3 มีค่าเท่ากับ 3.26 ซึ่งในผลการทดลองที่ pH ลดต่ำมากจนมีค่า pH ~ 2 นั้นไม่สามารถอธิบายได้ทางทฤษฎีถึง pH ที่ลดต่ำและมีค่าเฉลี่ย pH = 2.55 (± 0.31)



ภาพที่ 24 ค่าการสูญเสียแรงดันภายหลังการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินเป็นเวลา 32 ชั่วโมง

ภาพที่ 24 ค่าการสูญเสียแรงดันที่ระยะ 12, 23 และ 34 นั้น ทั้งสามระยะมีค่าการสูญเสียแรงดันเพิ่มมากขึ้นและลดลงอย่างไม่สม่ำเสมอแต่ก็ไม่แตกต่างกันมาก เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น และค่อนข้างมีค่าเป็นบวกเกือบทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.20(± 1.16), 3.56(± 2.78) และ 2.98(± 1.97) สำหรับระยะ 12, 23 และ 34 ตามลำดับ แสดงว่า มีการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการซึมน้ำของดินทรายภายในคอลัมน์ทดลอง โดยมีความสามารถในการซึมน้ำลดลงทำให้ต้องใช้แรงดันเพิ่มมากขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงการจกเรียงตัวของเม็ดทรายร่วมในช่วงแรกด้วย โดยจากภาพ

จะเห็นว่ามีค่าสูญเสียแรงดันสูงในช่วงที่ 2 - 10 เนื่องมาจากเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโพลีเอทิลีนและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้นขึ้นก่อนข้างเข้มข้นในช่วงแรก จึงเกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มากขึ้นด้วยโดยบางส่วนเกาะกับดินทราย และบางส่วนตกตะกอนอยู่ภายในช่องว่างต่างๆ ทำให้ดินทรายมีค่าความพรุนลดลง ความสามารถในการซึมน้ำลดลง โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำให้มีแรงดันของก๊าซร่วมด้วย จึงทำให้ระบบมีแรงดันเพิ่มมากขึ้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานมากขึ้น ความสามารถในการซึมน้ำไม่สม่ำเสมอมากนัก อาจเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนที่เกิดขึ้นปลดปล่อยออกมากับน้ำออกได้ ทั้งในรูปของฟองก๊าซที่ถูกพาออกมา และในรูปที่ละลายมากับน้ำ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ มีการละลายเท่ากับ 1.45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส (David, 1992)

ค่าแรงดันที่ระยะ 12 มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นทรายส่วนต้นน้ำที่ไม่มีการปนเปื้อนโพลีเอทิลีนจึงไม่เกิดตะกอนแมงกานีสขึ้นจึงมีค่าต่ำ ส่วนค่าสูญเสียแรงดันที่ระยะ 23 มีค่ามากที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่บรรจุ pure phase toluene ดังนั้นเมื่อเกิดการทำให้ปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจึงเกิดการอุดตันของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการออกซิเดชันเคมี ดังสมการที่ 6 และค่าสูญเสียแรงดันที่จุด 34 มีค่าน้อยกว่าจุด 23 เนื่องจากการทำให้ปฏิกิริยาจากจุด 23 ไปยังจุด 34 (ส่วนท้ายน้ำ) เพื่อเก็บตัวอย่างดังนั้นจึงเกิดการอุดตันของตะกอนแมงกานีสและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย แต่พบว่าความแตกต่างของระยะ 23 และ 34 มีค่าต่างกันเพียง 16.29% ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์กันระหว่างการลดลงของความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนในน้ำจากกระบวนการออกซิเดชัน กับค่าการสูญเสียแรงดันและค่าการปลดปล่อยของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างช้าๆ จากวัสดูชี้ฝั่งพาราฟิน เมื่อเวลานานขึ้น ดังนั้นถ้าระยะเวลาการทดลองนานมากกว่า 32 ชั่วโมง (PV มากกว่า 11.48) ก็น่าจะทำให้มีค่าการสูญเสียแรงดันมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงที่ไม่แตกต่างกันมาก

3.3 การศึกษาความสามารถกระบวนการออกซิเดชันเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดูชี้ฝั่งพาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง (ไม่สามารถตรวจวัดโพลีเอทิลีนในน้ำได้) (not detected)

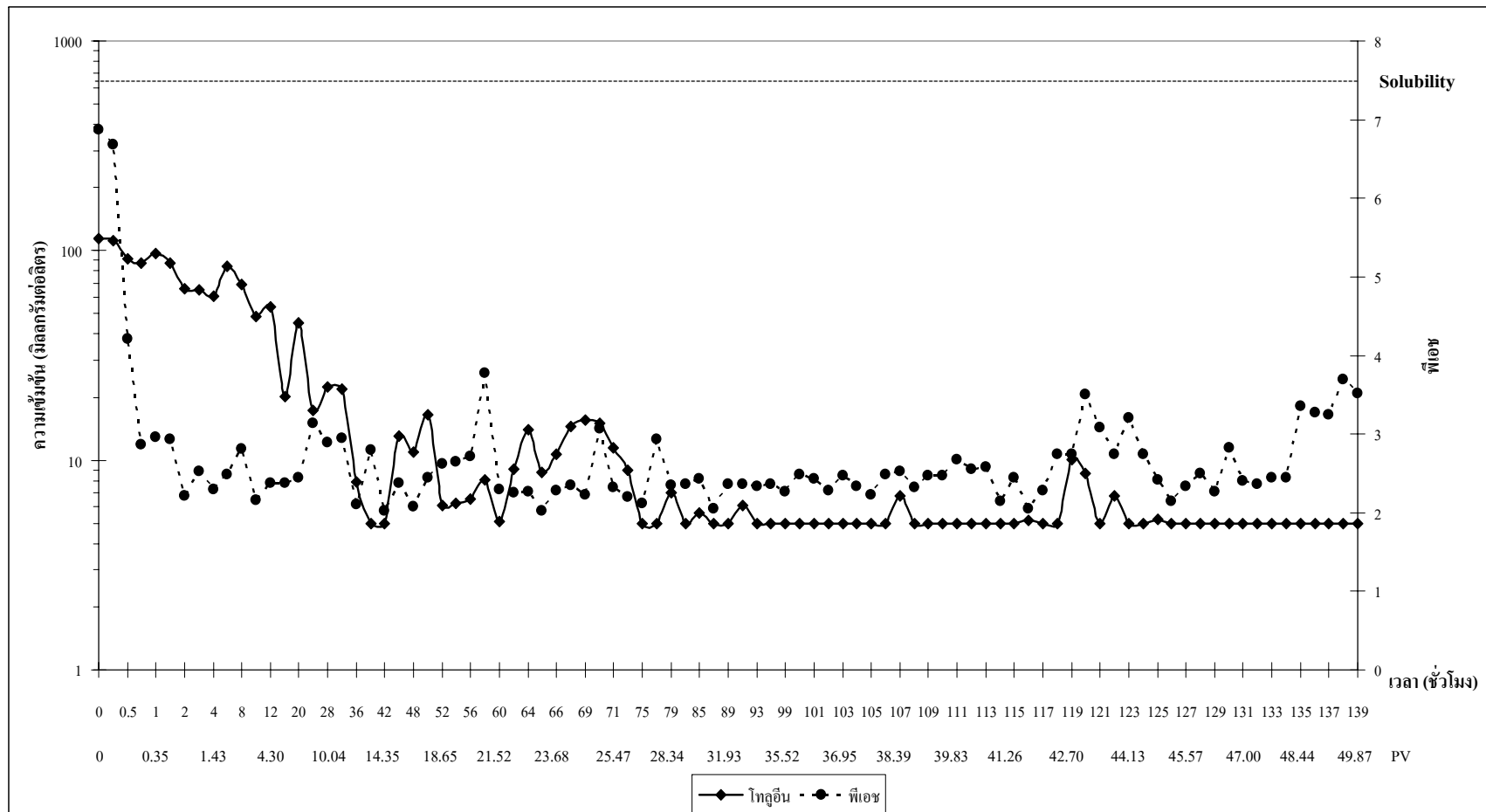
ภาพที่ 25 แสดงค่าความเข้มข้นโทลูอินในน้ำ เมื่อเทียบกับเวลา และ Pore volume (PV) ซึ่งวิธีการคำนวณแสดงดัง ตารางผนวกที่ ก4 พบว่า ความเข้มข้นของโทลูอินมีค่าอยู่ในช่วง 5.22 – 114.24 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการละลายน้ำของโทลูอิน คิดเป็น 98.77-72.86% ของความสามารถในการละลายน้ำซึ่งมีค่าลดลงอย่างคงที่และต่อเนื่อง มีค่าเฉลี่ยที่ 124.26 (± 17.37) มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการทดลองวิเคราะห์ค่าต่ำสุดของความเข้มข้นของโทลูอินได้ที่ 5.22 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความสามารถต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (detection limit toluene = 5 mg/L) แต่มีแนวโน้มลดลงจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 75 และไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้คือมีค่าต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 126 – 139 PV = 45.212 – 49.877

จากผลการทดลองพบว่า สามารถตรวจวัดความเข้มข้นโทลูอินได้ตั้งแต่นาทีแรก และมีค่าลดลงอย่างคงที่และต่อเนื่องตั้งแต่นาทีแรก จนถึงชั่วโมงที่ 32 PV = 0 – 11.48 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองของ อรมณี (2549) ที่ทำการบำบัดโทลูอินความเข้มข้นที่เท่ากันแต่ใช้ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.2 โมลาร์ พบว่า สามารถตรวจวัดความเข้มข้นโทลูอินได้ตั้งแต่นาทีที่ 30 และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงนาทีที่ 100 หลังจากนั้นมีความเข้มข้นลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ในนาทีที่ 140 หรือ ชั่วโมงที่ 2.30 (ความเข้มข้นโทลูอินน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การทดลองของ อรมณี (2549) ที่ทำการบำบัดโทลูอินความเข้มข้นที่เท่ากันแต่ใช้ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.2 โมลาร์ พบว่า ไม่สามารถตรวจพบความเข้มข้นของโทลูอินได้ในชั่วโมงที่ 2.30 นั้นมาจากการเคลือบของตะกอน แมงกานีสออกไซด์ที่บริเวณผิวของทรายซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการออกซิเดชัน จึงเกิดการอุดตันภายในคอลัมน์ เมื่อเวลานานขึ้นก็เกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์มากขึ้น ทำให้มีสารโทลูอินจำนวนมาก (ส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา) อยู่ภายในคอลัมน์ ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่าการไหลผ่าน (bypassing) จึงต้องทำการชะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันก่อน สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจึงจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารโทลูอินส่วนที่เหลือถัดไปได้

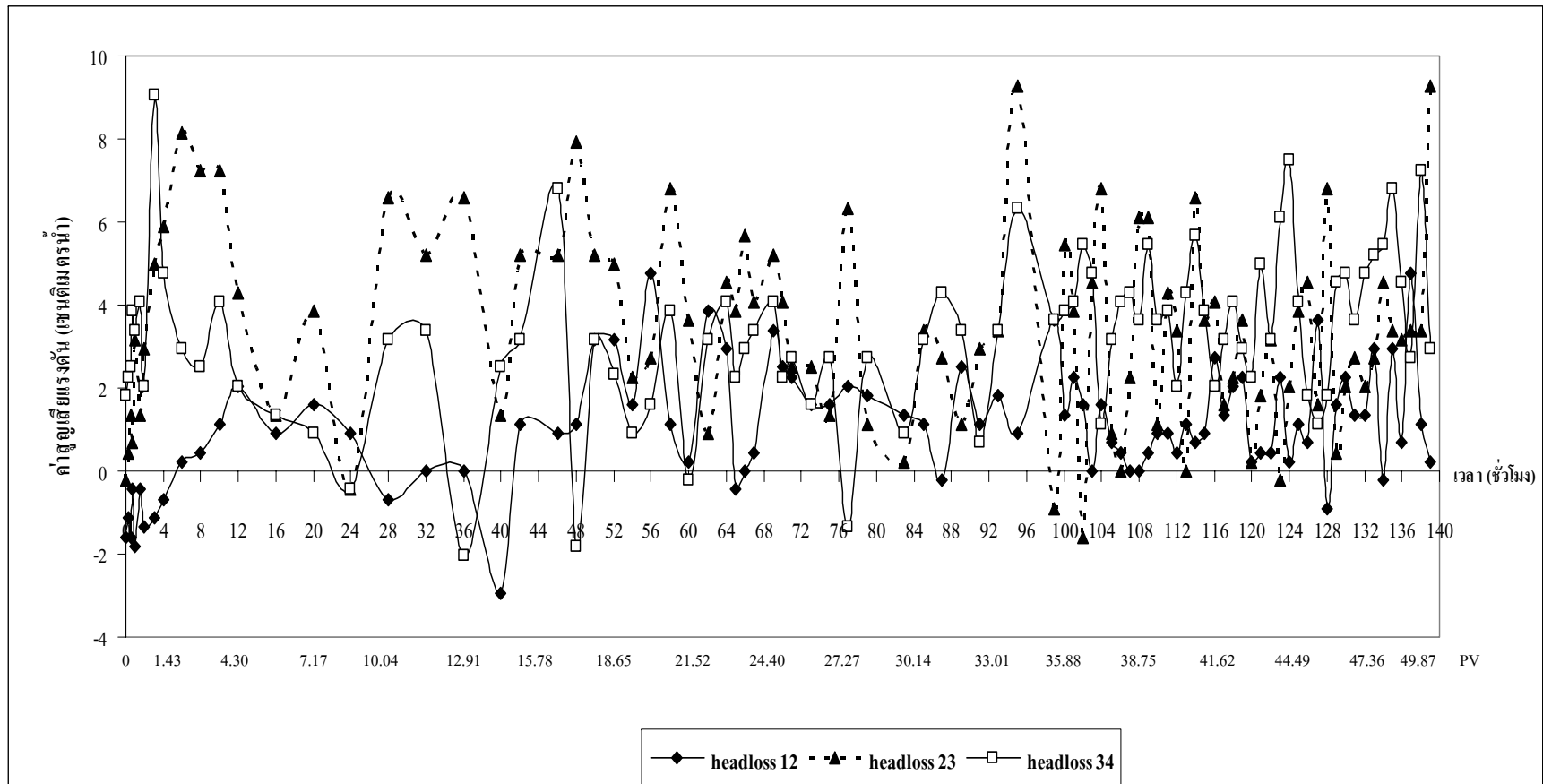
การทดลองนี้ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟินในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีกับโทลูอิน โดยสามารถตรวจพบค่าความเข้มข้นของ

โทลูอินได้โดยตลอดตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 32 นั้น ก็แสดงว่า ความเข้มข้นของ โพลีเอทิลีนเปอร์เมอแกนตที่ปลดปล่อยออกมามีค่าค่อนข้างต่ำมากซึ่งก็จะทำให้ตะกอน แมงกานีสออกไซด์เกิดขึ้นน้อยไปด้วย ดังนั้นจึงทำให้ยังสามารถตรวจพบปริมาณโทลูอินได้อย่าง ต่อเนื่อง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาระหว่างโพลีเอทิลีนเปอร์เมอแกนตและโทลูอินนานขึ้นโดยจะ ทำให้ลดปัญหาของค่าการซึมผ่านที่ลดลงด้วย.



ภาพที่ 25 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของโทลูอินภายหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 139 ชั่วโมง

หมายเหตุ: detection limit toluene = 5 mg/L

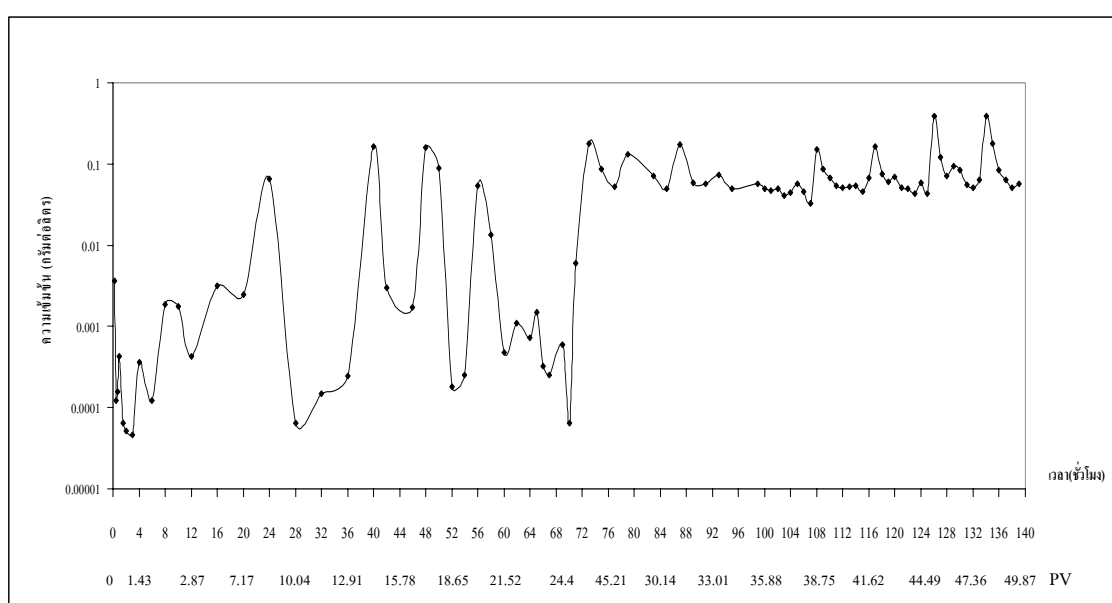


ภาพที่ 26 กราฟแสดงค่าการสูญเสียแรงดันภายหลังการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 139 ชั่วโมง

จากภาพที่ 25 การทดลองใช้เวลาทั้งหมด 8,340 ชั่วโมง ($PV = 49.87$) จะเห็นว่าความเข้มข้น โทลูอินในน้ำออก ตั้งแต่วันที่ที่ 15 ($PV = 0.89$) มีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องโดยตลอด จนถึงระดับความเข้มข้นที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ (not detected) คือ ที่เวลา 2,400 นาที ($PV = 14.35$) ซึ่งมีเวลาที่ลดลงช้ากว่าการทดลองของอรมณี (2549) มีแนวโน้มลดลงในเวลา 1,170 นาที ซึ่งมีเวลาเร็วกว่า 1,230 นาที และเวลาที่ 7,560 นาที ปริมาณโทลูอินที่ลดลงเหลือน้อยกว่าความสามารถในการตรวจวัดของตัวตรวจวัด (detection limit toluene) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเทียบกับการทดลองของอรมณี (2549) ปริมาณโทลูอินมีค่าลดลงเหลือน้อยกว่าความสามารถในการตรวจวัดของตัวตรวจวัด (detection limit) ที่เวลา 5,660 นาที ซึ่งมีเวลาเร็วกว่า 1,900 นาที เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการออกซิเดชันน้อยกว่าจึงทำให้ระยะเวลาในการบำบัดมากกว่า โดยการทดลองของอรมณี (2549) นั้น ใช้ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ หรือ 32 กรัมต่อลิตร แต่การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำมากซึ่งต่ำกว่า 0.1 โมลาร์ โดยให้ปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ลักษณะแสดงดังภาพที่ 16 ซึ่งการทดลองวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโทลูอินได้ที่ 5.22 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากความสามารถต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (detection limit = 5 mg/L) แต่มีแนวโน้มลดลงจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 75 ($PV = 26.91$) และไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้คือมีค่าต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 126 – 139 และจากการทดลองพบว่าค่า pH ของน้ำออก (effluent) มีค่าลดลงจากชั่วโมงแรกจากพีเอชเท่ากับ 6.87 ซึ่งมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นเป็นกลาง เมื่อเวลาและ PV เพิ่มขึ้น พบว่าค่าพีเอชลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าพีเอช ประมาณ 2 เนื่องจากเกิดตะกอนสีน้ำตาลของแมงกานีสออกไซด์จำนวนมากในคอลัมน์ จะเกิดตะกอนสีน้ำตาลของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_x) จำนวนมากอยู่ในคอลัมน์ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Huang *et al.*, (2001) และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 6

และการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาละลายน้ำและทำปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ดังสมการที่ 8 โดยที่กรดคาร์บอนิกมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนและแตกตัวได้ง่ายเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำมากขึ้นก็จะทำให้เกิด H_2CO_3 มากขึ้นไปด้วยร่วมกับการแตกตัวของ H_2CO_3 ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ ไฮโดรเจนคาร์บอเนต ดังสมการที่ 9 เนื่องจาก H_2CO_3 และ H^+ ที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ลดต่ำลง แต่ค่าเป็นกรด (pK_a) H_2CO_3 มีค่า = 3.26 ซึ่งในผลการทดลองที่ pH ลดต่ำมากจนมีค่า pH ~ 2 นั้นไม่สามารถอธิบายได้ทางทฤษฎีถึง pH ที่ลดต่ำและมีค่าเฉลี่ย $pH = 2.55 (\pm 0.31)$

จากภาพที่ 26 ค่าการสูญเสียแรงดันที่ระยะ 12, 23 และ 34 นั้น ทั้งสามระยะมีค่าการสูญเสียแรงดันเพิ่มมากขึ้นและลดลงอย่างไม่สม่ำเสมอมากนักเมื่อเวลาและ PV เพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.05 (\pm 1.43)$, $3.44 (\pm 2.38)$ และ $3.27 (\pm 1.91)$ สำหรับระยะ 12, 23 และ 34 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 5 เซนติเมตรน้ำ แสดงว่า มีการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการซึมน้ำของดินทรายภายในคอลัมน์ทดลอง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีจะเกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะทำให้คอลัมน์มีความชื้นน้ำลดลงจึงทำให้ต้องใช้แรงดันเพิ่มมากขึ้น แต่จากภาพที่พบว่าแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอั้นเกิดมาจากการที่เกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นก็จะทำให้มีแรงดันมากขึ้น และส่วนที่พบว่าแรงดันลดลงด้วยนั้นก็อาจเกิดมาจากการที่ฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการละลายเพราะว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถละลายน้ำได้ คือ มีค่าการละลายเท่ากับ 1.45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส (David, 1992) ร่วมกับการที่ถูกพัดมาด้วยน้ำอีกด้วยเมื่อทำการวัดค่าแรงดัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการละลายและพัดไปยังจุดน้ำออกนั้น ๆ ที่จุดวัดพอดีจึงทำให้ค่าแรงดันที่วัดได้ลดลง โดยตลอดการทดลองนั้นจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการละลายจึงพบว่าแรงดันมีค่าไม่สม่ำเสมอซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง และพบว่าค่าสูญเสียแรงดันที่จุด 34 มีค่าน้อยกว่าจุด 23 เนื่องจาก ที่ระยะ 23 เป็นจุดที่ปนเปื้อน pure phase toluene จึงทำให้เกิดการอุดตันจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด ค่าแรงดันจึงมีค่าสูงสุด แต่ความแตกต่างของระยะ 23 และ 34 (ส่วนท้ายน้ำ) ก็มีค่าต่างกันเพียง 4.94% ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อยมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 27 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปนมากับน้ำออก

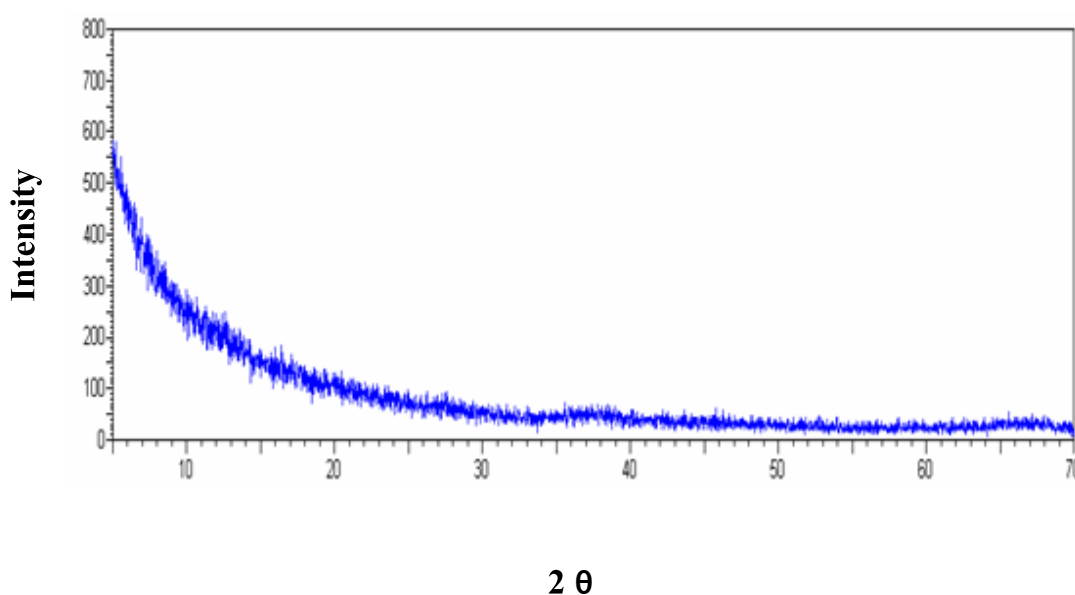
จากภาพที่ 27 พบว่าค่าโพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมากในช่วงแรก จนถึงชั่วโมงที่ 73 $PV = 0 - 26.19$ โดยมีค่าเฉลี่ย $0.01 (\pm 0.04)$ กรัมต่อลิตร เนื่องจากช่วงแรกมีการทำปฏิกิริยาระหว่างโพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมากกับโทลูอินที่เข้มข้น (pure phase toluene) ในคอลัมน์ จึงทำให้เกิดการออกซิไดซ์ของโพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมาก และจากการที่โพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมากที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ ซึ่งมีความเข้มข้นที่ปลดปล่อยออกมาต่ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาและใช้สารโพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมาก จึงพบว่าความเข้มข้นที่เหลือนอกออกมาต่ำ หลังจากนั้นตั้งแต่ชั่วโมงที่ 75 – 139 พบว่าค่าความเข้มข้นมีค่าค่อนข้างสูงขึ้นและคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยที่ $0.08 (\pm 0.07)$ มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องมาจากการที่โทลูอินมีค่าลดลงแต่ยังคงมีปริมาณโทลูอินจำนวนมากอยู่ในคอลัมน์ ทำให้เกิดตะกอนเมกานีสออกไซด์ ในสมการ (6) จำนวนมากในคอลัมน์ทำให้เกิดการอุดตัน และเกิดการเคลือบของตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่บริเวณผิวของทรายร่วมด้วย ทำให้โพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมากเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอินภายในคอลัมน์ได้น้อยลง จึงทำให้เกิดการไหลผ่าน (bypassing) ไม่เข้าทำปฏิกิริยากับโทลูอินที่ถูกกักไว้ในตะกอนเมกานีสออกไซด์จึงพบความเข้มข้นที่ปนมากับน้ำออกมามากกว่าช่วงแรก

4. การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

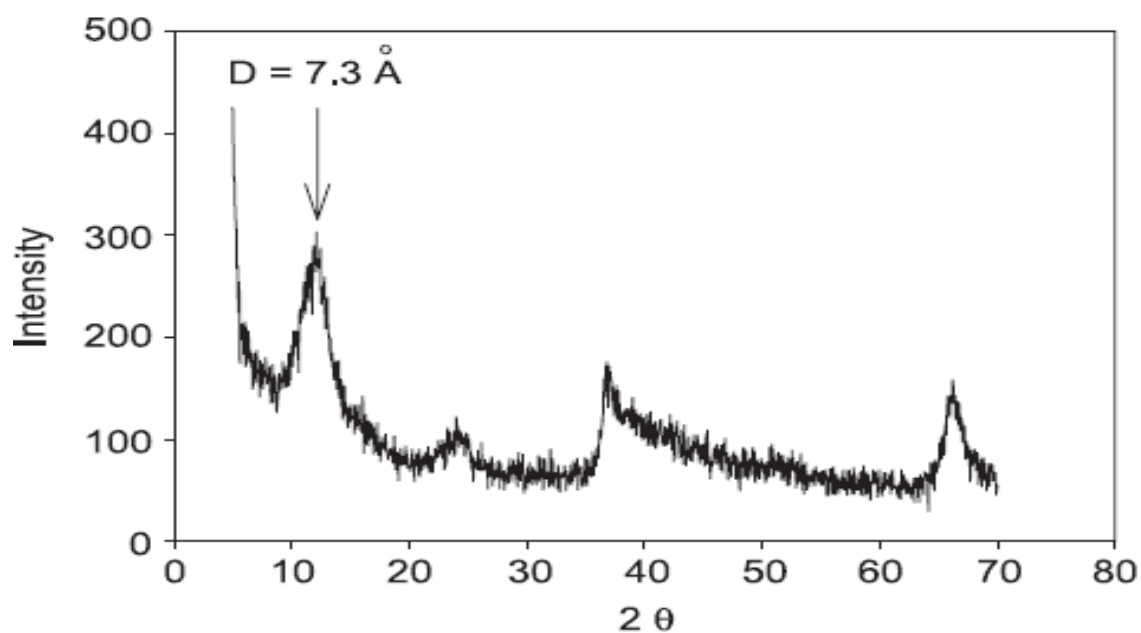
การทดลองทำการนำตะกอนเมกานีสออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการไปศึกษารูปร่างลักษณะตะกอนพร้อมกับการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ศึกษาโครงสร้างตะกอนด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) และศึกษาธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

จากการศึกษาโครงสร้างตะกอนด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตะกอนมีลักษณะไม่เป็นผลึก (not crystallized) ไม่เป็นรูปร่างแน่นอน (amorphous) เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง XRD จึงไม่ปรากฏ peak ใดๆ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประเภทของสารประกอบ ดังภาพที่ 28 แตกต่างจากการทดลองของ Li and Schwartz (2004a) ที่ทำการออกซิไดซ์สารไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene; TCE) ด้วยสารละลายโพเทนเชียลเยลไมเกรนค่านี้น่าจะต่ำมาก เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนเมกานีสออกไซด์ ซึ่งเมื่อศึกษาด้วยเครื่อง XRD พบว่า เกิดยอดที่ระยะห่างระหว่างชั้นของโมเลกุลเมกานีสออกไซด์ เท่ากับ 7.3 อังสตรอม ดังภาพที่ 29 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเป็นโครงสร้างของเมกานีสออกไซด์ชนิด Bernessite

จากการศึกษาธาตุองค์ประกอบในตะกอนด้วยเครื่อง XRF พบว่า มีธาตุองค์ประกอบเท่าที่สามารถตรวจสอบได้ของเครื่องมือ ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon; Si) โพแทสเซียม (Potassium; K) และ แมงกานีส (Manganese ; Mn) โดยมีปริมาณเท่ากับ 11.10%, 2.72% และ 56% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า มีปริมาณของธาตุแมงกานีสมากที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการออกซิเดชันเคมี คือ แมงกานีสออกไซด์ และจากสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาซึ่งมีธาตุแมงกานีส และโพแทสเซียมเป็นส่วนประกอบ ทำให้ตรวจพบธาตุโพแทสเซียมด้วยซึ่งพบค่อนข้างน้อยเนื่องจากความเข้มข้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดำ ส่วนธาตุซิลิคอนที่ตรวจพบนั้น น่าจะมาจากการใช้กระดาษกรองใยแก้ว (GFC) กรองเอาตะกอนจากการทดลอง ซึ่งกระดาษกรองใยแก้วมีธาตุซิลิคอนเป็นส่วนประกอบด้วยจึงทำให้ปะปนลงไปในตัวอย่งตะกอนแมงกานีสออกไซด์ นอกเหนือจากธาตุองค์ประกอบดังกล่าวจะพบเป็นธาตุอื่นๆ

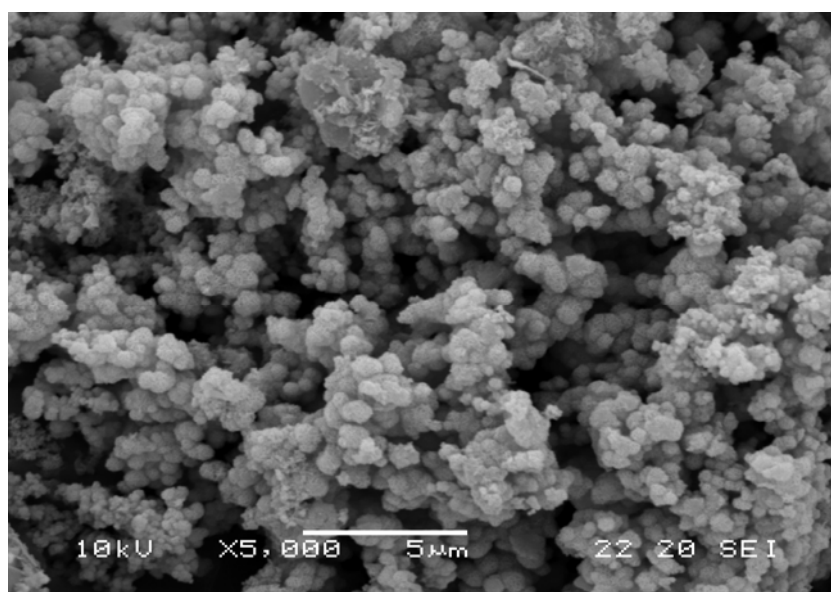


ภาพที่ 28 เส้นสเปกตรัมจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ทดสอบด้วยเครื่อง XRD

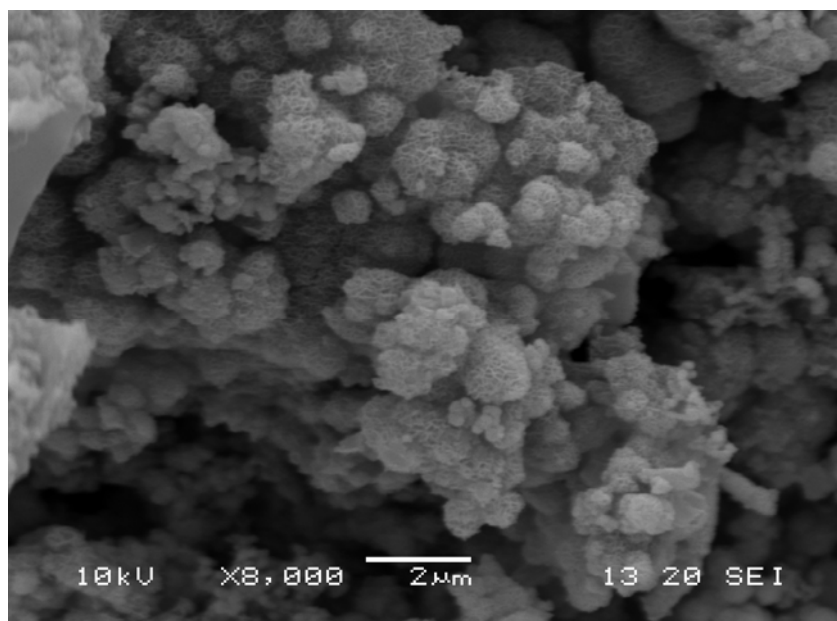


ภาพที่ 29 เส้นสเปกตรัมเปรียบเทียบจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจาก TCE โดย Li, *et al.*
ที่มา: Li and Schwartz (2004a)

การศึกษารูปร่างลักษณะของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM แสดงดังภาพที่ 30 และ 31



ภาพที่ 30 ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 5000 เท่า

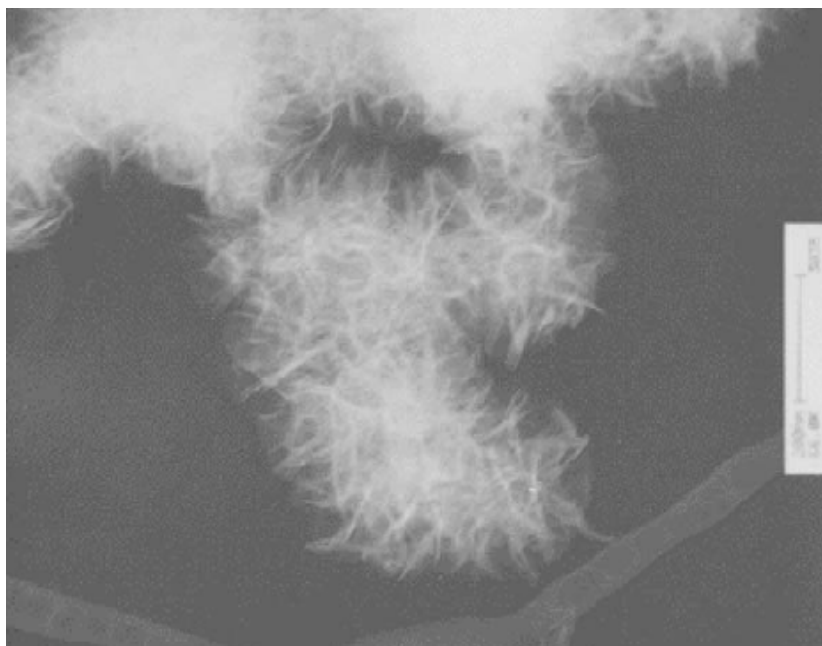


ภาพที่ 31 ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 8000 เท่า

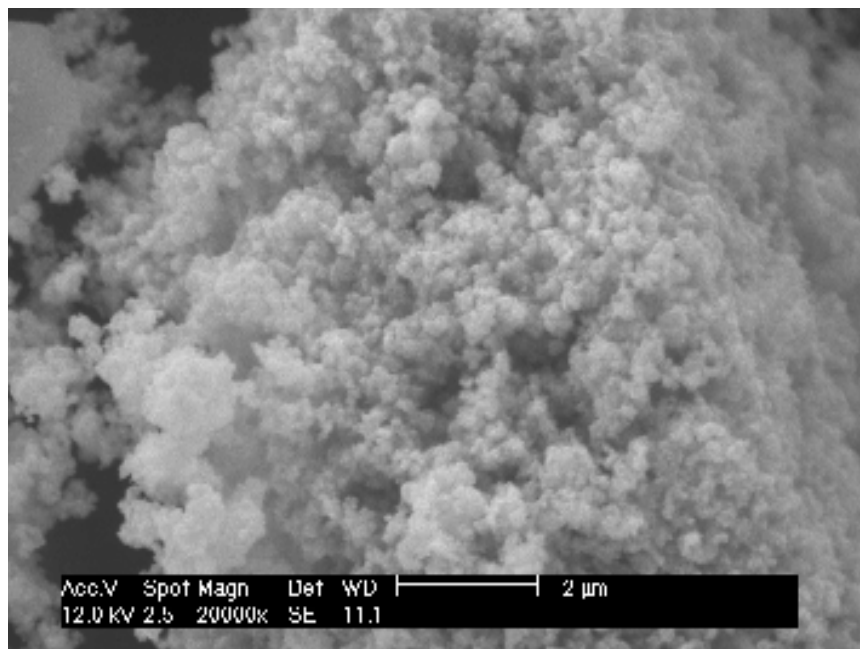
จากภาพที่ 30 ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง SEM ขนาดกำลังขยาย 5000 เท่า จะเห็นว่าตะกอนแมงกานีสออกไซด์มีลักษณะเป็นผลึกก้อนเล็กๆ หลายก้อนเกาะกันเป็นกลุ่ม รูปร่างค่อนข้างเป็นผลึกก้อนกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ไมโครเมตร โดยมีขนาดก้อนที่ใกล้เคียงกันทุกก้อน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 8000 เท่า ในภาพที่ 31 จะเห็นอย่างชัดเจนว่าตะกอนแมงกานีสออกไซด์มีลักษณะค่อนข้างหนาแน่น มีรูพรุนมากและขนาดเล็กมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตร และมีลักษณะแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Li and Schwartz (2004a) ที่ทำการออกซิไดซ์สารไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene; TCE) ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเมื่อศึกษาด้วยเครื่อง Transmission electron microscopy (TEM) พบว่าตะกอนมีลักษณะเป็นผลึกรูปแท่งขนาดเล็ก (small needle-shaped crystals) ค่อนข้างเกาะเป็นกลุ่มอย่างหนาแน่น แสดงดังภาพที่ 32 และแตกต่างกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของอรมณี (2549) ที่ทำการบำบัดโทลูอินด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ สลับกับการละลายตะกอนแมงกานีสออกไซด์ด้วยกรดซิตริกจากภาพที่ 33 ซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง SEM ขนาดกำลังขยาย 20000 เท่า จะเห็นว่า ตะกอนแมงกานีสออกไซด์มีลักษณะค่อนข้างเกาะกันอย่างหนาแน่น มีรูพรุนเล็กมากและขนาดเล็กมาก โดยเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 31 ตะกอนแมงกานีสออกไซด์จะมีขนาดใหญ่กว่าและเป็นรูปร่างเห็น

ชัดเจนกว่า เป็นไปได้ว่าลักษณะตะกอนในภาพที่ 33 งานของอรมณี (2549) ที่มีขนาดเล็กกว่านั้นจะเกิดจากการรบกวนของกรรตริกที่ใช้ในการละลายตะกอนแมงกานีสออกไซด์จึงทำให้ขนาดรูปร่างค่อนข้างแตกต่างกันกับในภาพที่ 31

ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโทลูอินไม่ค่อยสมบูรณ์ จึงทำให้ไม่เกิดผลึกของแมงกานีสออกไซด์ที่ดี ต่างกับปฏิกิริยาที่เกิดจาก TCE ซึ่งความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากจีฟี่พาราฟินอาจมีความเข้มข้นไม่สม่ำเสมอตลอดการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอิน และโดยทั่วไปแล้วแมงกานีสออกไซด์จะไม่ค่อยตกผลึก (crystallized) เพียงพอ หรือตกผลึกได้ไม่ดี ไม่เป็นรูปร่าง (poorly crystalline as amorphous) ที่จะนำไปวิเคราะห์ได้ โดยเฉพาะแมงกานีสออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ (Post, 1999)



ภาพที่ 32 ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์จาก TCE ถ่ายด้วยเครื่อง TEM โดย Li and Schwartz ที่มา: Li and Schwartz (2004a)



ภาพที่ 33 ลักษณะตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ถ่ายด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 20000 เท่า
ที่มา: อรรถณีย์ (2549)

6. การศึกษาปริมาณของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันเคมีโดยใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันเคมีสารโพลีอินด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.1 โมลาร์) โดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released KMnO_4) จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน เป็นเวลา 8,340 นาที $\text{PV} = 49.87$ เมื่อทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยทำการตรวจวัดปริมาณตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นในทรายทั้ง 3 ส่วน ที่ขนาดเท่ากัน โดยส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3 เป็นส่วนที่ทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ และส่วนที่ 2 เป็นส่วนกลางซึ่งเป็นทรายส่วนที่ปนเปื้อนโพลีอิน

ผลการตรวจวัด พบว่า ส่วนที่ 1 มีปริมาณเกิดขึ้น 5.295 มิลลิกรัมต่อกรัม, ส่วนที่ 2 มีปริมาณที่เกิดขึ้น 9.735 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ส่วนที่ 3 มีปริมาณเกิดขึ้น 5.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งทรายส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่เกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือทรายส่วนที่ 3 และทรายส่วนที่ 1 เกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์น้อยที่สุด ตามลำดับ โดยจากการที่ทรายส่วนที่ 2 เกิด

ตะกอนเมงกานีสมากที่สุด เนื่องมาจากมีปริมาณโทลูอินส่วนที่ยังไม่ละลายออกมากับน้ำออก ปริมาณมากเพราะทรายส่วนที่ 2 นี้เป็นส่วนที่บรรจุโทลูอิน จึงทำให้เกิดปริมาณตะกอนเมงกานีส ออกไซด์มากกว่าบริเวณอื่น ส่วนทรายส่วนที่ 3 นั้น มีปริมาณเมงกานีสมากกว่าทรายส่วนที่ 1 แต่ น้อยกว่าทรายส่วนที่ 2 เนื่องมาจากการเกิดกลไกการพาโดยการปั้มน้ำกลั่นผ่านทรายส่วนที่ 2 ซึ่ง บรรจุโทลูอินไปยังทรายส่วนที่ 3 เพื่อเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ที่จุดน้ำออก ทำให้โทลูอินเกิด การละลายและเกิดการพาจากทรายส่วนที่ 2 ไปยังส่วนที่ 3 ดังนั้นความเข้มข้นโทลูอินจึงมีความ เข้มข้นน้อยกว่าส่วนที่ 2 จึงทำให้เกิดปริมาณตะกอนเมงกานีสออกไซด์น้อยกว่าทรายส่วนที่ 2 และ ปริมาณตะกอนเมงกานีสออกไซด์ที่พบในทรายส่วนที่ 1 ที่พบว่ามีความเข้มข้นน้อยกว่าทรายส่วนที่ 2 และ 3 นั้นเนื่องมาจากเกิดการไหลย้อนกลับของโทลูอิน ที่ปนเปื้อนในทรายส่วนที่ 2 โดยจากการใช้อัตรา การไหลค่อนข้างต่ำ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที Re เท่ากับ 0.027 จึงทำให้เกิดการไหลย้อนกลับบางส่วนใน ช่วงแรกจึงทำให้เกิดตะกอนเมงกานีสออกไซด์น้อยกว่าทรายส่วนอื่น

จากการตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกอนเมงกานีสออกไซด์ของทรายส่วนที่ 1, 2 และ 3 จาก กระบวนการออกซิเดชันเคมีโดยการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมเปอร์เมงกานेटจากวัสดุขี้ผึ้ง พาราฟิน พบว่าปริมาณที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมเปอร์เมงกานेटที่ ปลดปล่อยออกมาในการออกซิเดชันกับโทลูอินมีความเข้มข้นต่ำมากจึงทำให้ตะกอนเมงกานีส ออกไซด์เกิดน้อยลงไปด้วย และยังไม่ทำให้เกิดปัญหาการลดลงของความพรุนและความชื้นน้ำของ ดินทรายมากตามไปด้วย

ลักษณะของดินทรายหลังจากการบำบัดโทลูอินด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์เมงกานेट โดยใช้วิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน



ภาพที่ 34 ลักษณะของดินทรายหลังจากการออกซิเดชันโทลูอินด้วยโพแทสเซียมเปอร์เมงกานेट

จากภาพที่ 34 ลักษณะของดินทรายภายหลังจากการออกซิเดชันโทลูอินด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินเป็นเวลา 8,340 นาที พบว่า เม็ดทรายมีคราบสีน้ำตาลเคลือบอยู่บนพื้นผิว ซึ่งคราบสีน้ำตาลจะเป็นตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชัน จากสมการ (6) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีระหว่างโทลูอินกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) และน้ำ ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าเกิดคราบสีน้ำตาลเข้มที่เคลือบดินทรายเป็นบางส่วน และพบบางส่วนเป็นสีของทรายหรือเป็นสีน้ำตาลอ่อนเคลือบ เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีการปลดปล่อยออกมาจากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินมีค่าความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ จึงทำให้เกิดตะกอนแมงกานีสออกไซด์น้อยตามไปด้วย และนอกจากนี้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตยังผ่านบริเวณช่องว่างทรายที่สามารถมารอดผ่านได้เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่เกิดการเคลือบของตะกอนแมงกานีสออกไซด์สีน้ำตาลเข้มทั่วทุกเม็ดทราย

เมื่อทำการคำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างง่ายจะได้

$$\begin{aligned}\text{Input} &= \text{Output} + \text{Accumulation} \\ &= M_{\text{effluent}} + M_{\text{adsorption}}\end{aligned}$$

โดยที่

Input คือ มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใส่ลงในระบบ (กรัม)
 Output คือ มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ออกจากระบบ (กรัม)
 M_{effluent} คือ มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนที่ออกมาพร้อมกับน้ำออก (กรัม)
 $M_{\text{adsorption}}$ คือ มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนที่ถูกดูดซับไว้ในทราย (กรัม)
 $M_{\text{oxidation}}$ คือ มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีกับโทลูอิน (กรัม)

ดังนั้น

Input = มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใส่ลงในระบบ

ใส่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงในระบบ 100 กรัม เท่ากับ 0.625 โมลาร์

ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออกรวมเท่ากับ 0.00984 กรัม หรือ 0.000006 โมลาร์ (ปริมาณรวมทั้งหมดที่ออกมา)

ดินทรายมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอนกับ 0.04% และโทลูอินมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Adsorption coefficient; K_{OC}) เท่ากับ 135

$$M_{\text{adsorption}} = K_d \times C_{\text{KMnO}_4} \times M_{\text{sand}}$$

โดย K_d = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน (soil distribution coefficient)

$$= K_{OC} \times f_{OC}$$

$$= 135 \times 0.0004$$

$$= 0.054 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

$$C_{\text{KMnO}_4} = \text{ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปนมากับน้ำออก (กรัมต่อลิตร)}$$

ในการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 8,340 นาที ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิกรัมต่อนาที

$$\text{ดังนั้น ปริมาณน้ำทั้งหมด (W)} = 8340 \text{ นาที} \times 2 \text{ มิลลิกรัมต่อนาที}$$

$$= 16680 \text{ มิลลิกรัม หรือ 16.68 ลิตร}$$

$$C_{\text{KMnO}_4} = M_{\text{effluent}} / W$$

$$= 0.00984 \text{ กรัม} / 16.68 \text{ ลิตร}$$

$$= 0.00059 \text{ กรัมต่อลิตร หรือ 0.0000037 โมลาร์}$$

$$M_{\text{sand}} = \text{มวลของทรายเกิดการดูดซับ คือ มวลของทรายที่ใช้ในคอลัมน์}$$

$$= 944 \text{ กรัม}$$

$$\text{จาก } M_{\text{adsorption}} = K_d \times C_{\text{KMnO}_4} \times M_{\text{sand}}$$

$$= 0.054 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \times 0.00059 \text{ กรัมต่อลิตร} \times 944 \text{ กรัม}$$

$$= 0.03 \text{ กรัม}$$

$M_{\text{oxidation}}$ = มวลของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนที่ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีกับโทลูอิน (กรัม)

$$M_{\text{residual}} = \text{มวลโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตส่วนโดยที่เหลือในจีฟี่พาราฟิน (กรัม)}$$

จาก

$$\begin{aligned}\text{Input} &= M_{\text{oxidation}} + M_{\text{effluent}} + M_{\text{adsorption}} + M_{\text{residual}} \\ 100 \text{ กรัม} &= M_{\text{oxidation}} + 0.00059 \text{ กรัม} + 0.03 \text{ กรัม} + 48.10 \text{ กรัม} \\ M_{\text{oxidation}} &= 51.87 \text{ กรัม หรือ } 0.324 \text{ โมลาร์}\end{aligned}$$

ดังนั้นมวลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอิน 13.05 กรัม เท่ากับ 51.87 กรัม

เมื่อทำการคำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของโทลูอินอย่างง่าย จะได้

$$\begin{aligned}\text{Input} &= \text{Output} + \text{Accumulation} \\ &= M_{\text{oxidation}} + M_{\text{effluent}} + M_{\text{adsorption}} + M_{\text{loss}} + M_{\text{LNAPL}}\end{aligned}$$

โดยที่

- Input คือ มวลของโทลูอินที่ใส่ลงในระบบ (กรัม)
- Output คือ มวลของโทลูอินที่ออกจากระบบ (กรัม)
- $M_{\text{oxidation}}$ คือ มวลของโทลูอินส่วนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี (กรัม)
- M_{effluent} คือ มวลของโทลูอินส่วนที่ออกมาคือน้ำออก (กรัม)
- $M_{\text{adsorption}}$ คือ มวลของโทลูอินส่วนที่ถูกดูดซับไว้ในทราย (กรัม)
- M_{loss} คือ มวลของโทลูอินส่วนที่สูญเสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (volatile) หรือ ความผิดพลาด (error) อื่นๆของการทดลอง (กรัม)
- M_{LNAPL} คือ มวลของโทลูอินส่วนที่ตกค้าง (residue) อยู่ภายในคอลัมน์ (กรัม)

ดังนั้น

Input = มวลของโทลูอินที่ใส่ลงในระบบ

ใส่โทลูอินเข้มข้น 99.5% ลงในทรายจำนวน 15 มิลลิลิตร โทลูอินมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.87 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$\begin{aligned}\text{Input} &= 15 \text{ มิลลิลิตร} \times 0.87 \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร} \\ &= 13.05 \text{ กรัม}\end{aligned}$$

ปริมาณโทลูอินในน้ำออกรวมเท่ากับ 1.062 กรัมต่อลิตร หรือ 1,062 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปริมาณรวมทั้งหมดที่ออกมา)

ดินทรายมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอนกับ 0.04% และโทลูอินมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Adsorption coefficient; K_{OC}) เท่ากับ 135

$$M_{\text{adsorption}} = K_d \times C_{\text{toluene}} \times M_{\text{sand}}$$

โดย K_d = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดิน (soil distribution coefficient)

$$= K_{OC} \times f_{OC}$$

$$= 135 \times 0.0004$$

$$= 0.054 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

C_{toluene} = ความเข้มข้นสารโทลูอินที่เกิดการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ในการทดลองนี้ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 8,340 นาที ด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิเมตรต่อนาที

ดังนั้น ปริมาณน้ำทั้งหมด (W) = 8,340 นาที $\times$ 2 มิลลิเมตรต่อนาที

$$= 1,668 \text{ มิลลิเมตร หรือ } 16.68 \text{ ลิตร}$$

$$C_{\text{toluene}} = M_{\text{effluent}} / W$$

$$= 1,062 \text{ มิลลิกรัม} / 16.68 \text{ ลิตร}$$

$$= 63.669 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

M_{sand} = มวลของทรายเกิดการดูดซับ คือ มวลของทรายที่ใช้ในคอลัมน์

$$= 944 \text{ กรัม}$$

$$\text{จาก } M_{\text{adsorption}} = K_d \times C_{\text{toluene}} \times M_{\text{sand}}$$

$$= 0.054 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \times 63.669 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \times 944 \text{ กรัม}$$

$$= 3.245 \text{ มิลลิกรัม}$$

M_{loss} = มวลของโทลูอินส่วนที่สูญเสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (volatile) หรือ ความผิดพลาด (error) อื่นๆของการทดลอง

เนื่องจากในการทดลองเป็นระบบปิด จึงกำหนดให้มวลของโทลูอินส่วนที่สูญเสียไปมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ 0 กรัม

M_{LNAPL} = มวลของโทลูอิน (pure phase) ส่วนที่ตกค้าง (residue) อยู่ภายในคอลัมน์

สามารถหาได้โดยทำการทดลองสกัดโทลูอิน ส่วนที่ตกค้างอยู่ในทรายออกมา อาจใช้ตัวทำละลายบางชนิดเป็นตัวสกัด แล้ววัดปริมาณโทลูอินในตัวทำละลายนั้นๆ เนื่องจากในการทดลองบำบัดโทลูอินในน้ำจืดมีความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงกำหนดให้มวลของโทลูอินส่วนที่ตกค้างอยู่ในคอลัมน์มีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ 0 กรัม

จาก

$$\text{Input} = M_{\text{oxidation}} + M_{\text{effluent}} + M_{\text{adsorption}} + M_{\text{loss}} + M_{\text{LNAPL}}$$

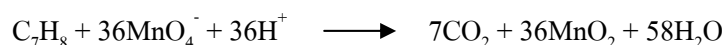
$$13.05 = M_{\text{oxidation}} + 1.062 \text{ กรัม} + 0.003245 \text{ กรัม} + 0 + 0$$

ดังนั้น

$$M_{\text{oxidation}} = 11.987 \text{ กรัม}$$

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโทลูอินเท่ากับ 91.85 เปอร์เซ็นต์

และเมื่อพิจารณาสมการที่ (6)



ในการทดลองใส่โทลูอินลงในระบบเท่ากับ

$$13.02 \text{ กรัม} / 92.14 \text{ กรัมต่อโมล} = 0.1416 \text{ โมล}$$

ปริมาณเปอร์แมงกาเนตที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ

$$36 \times 0.1416 \text{ โมล} = 5.0976 \text{ โมล}$$

ในการทดลองทำการชะลอด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 โมลาร์ โดยใช้การปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released) จากวัสดุซีฟิงพาราฟิน ซึ่งป้อนน้ำกลั่นผ่านด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลารวมทั้งหมด 8,340 นาที และปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอิน 13.05 กรัม เมื่อทำการสมดุลมวล เท่ากับ 51.87 กรัม หรือ 0.324 โมล ซึ่งจะเห็นว่าใช้ความเข้มข้นน้อยกว่าจากที่คำนวณได้จากสมการ 93.64 % ซึ่ง อรมณี (2549) ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโทลูอิน 13.05 กรัม ปริมาณ 242.56 กรัม หรือ 1.516 โมลาร์ แต่ทำการบำบัดจนโทลูอินมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในการทดลองนี้ทำการบำบัดจนโทลูอินมีค่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (detection limit column = 5 mg/L) และใช้ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เท่ากับ 51.87 กรัม หรือ 0.324 โมล โดยใช้น้อยกว่า 190.69 กรัม คิดเป็น 78.61%

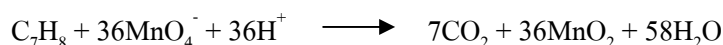
สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองการเกิดออกซิเดชันเคมีของโทลูอินที่ปนเปื้อนในดินทรายด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน (โดยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และชุดจำลองการปนเปื้อนโทลูอิน ซึ่งดินทรายที่ใช้นี้ได้ทำการกำจัดสารประกอบอินทรีย์และสิ่งสกปรกที่ปะปนมากับดินทรายในธรรมชาติก่อนการทดลอง) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาความสามารถในการบำบัดโทลูอินด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีระหว่างโทลูอินกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (6)



จากการศึกษากระบวนการออกซิเดชันเคมีสารโทลูอินด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟินความเข้มข้นที่ปลดปล่อยออกมาต่ำกว่า 0.1 โมลาร์ ในชุดการทดลองเป็นเวลา 139 ชั่วโมง ($\text{PV} = 49.87$) สามารถบำบัดโทลูอินได้มีประสิทธิภาพมากกว่า 91.85% (detection limit volume = 5 mg/L) โดยค่าความเข้มข้นเริ่มลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 75 ($\text{PV} = 26.91$) และตรวจวัดค่าต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ในชั่วโมงที่ 125 ($\text{PV} = 44.85$) เท่ากับ 5.22 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นชั่วโมงที่ 126 – 139 ($\text{PV} = 45.571 - 49.87$) ไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) และทำให้ค่าการซึมผ่านของดินทรายเป็นลบ โดยมีค่าการสูญเสียแรงดันมีค่าเฉลี่ย $1.05 (\pm 1.43)$, $3.44 (\pm 2.38)$ และ $3.27 (\pm 1.91)$ สำหรับระยะ 12, 23 และ 34 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 5 เซนติเมตรน้ำ เนื่องจากเกิดการอุดตันของตะกอนสีน้ำตาลดำของแมงกานีสออกไซด์ และฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบว่าค่า pH ของน้ำออก (effluent) มีค่าลดต่ำลงจาก pH เท่ากับ 6.87 ลด

ต่ำลงจน pH มีค่าประมาณ 2 เนื่องมาจากเมื่อเกิดการออกซิเดชันเคมีระหว่างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับไทลูอิน จะเกิดตะกอนสีน้ำตาลของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_x) จำนวนมากอยู่ในคอลัมน์ และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 6 และจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเกิดการละลายน้ำและทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ดังสมการที่ 8 โดยที่กรดคาร์บอนิกมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ง่ายเมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำมากขึ้นก็จะทำให้เกิด H_2CO_3 มากขึ้นด้วยร่วมกับการแตกตัวของ H_2CO_3 ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ ไฮโดรเจนคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังสมการที่ 9 เนื่องจาก H_2CO_3 และ H^+ ที่เกิดขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ลดต่ำลง แต่ค่าเป็นกรด (pKa) H_2CO_3 มีค่า = 3.26 ซึ่งในผลการทดลองที่ pH ลดต่ำมากจนมีค่า pH ~ 2 นั้นไม่สามารถอธิบายได้ทางทฤษฎีถึง pH ที่ลดต่ำและมีค่าเฉลี่ย $\text{pH} = 2.55 (\pm 0.31)$

2. การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันเคมี

ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชันเคมีสารไทลูอินด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 โมลาร์ โดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released KMnO_4) จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน เมื่อถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) มีลักษณะค่อนข้างเป็นก้อนกลมเกาะกันเป็นกลุ่มอย่างหนาแน่นและมีรูพรุนมาก แต่เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ไม่ปรากฏยอดใดๆ มีธาตุองค์ประกอบของตะกอนโดยวิเคราะห์จากเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon; Si) โพแทสเซียม (Potassium; K) และ แมงกานีส (Manganese ; Mn) โดยมีปริมาณเท่ากับ 11.10%, 2.72% และ 56% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3. การศึกษาปริมาณของตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันเคมี

ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการออกซิเดชันเคมีสารไทลูอินด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.1 โมลาร์) โดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released KMnO_4) จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง $\text{PV} = 49.87$ เมื่อทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (ใช้วิธีทดสอบตาม Method

3030 ของ Standard Method for the Examination of Water and Wastewater 20th ed.) โดยทำการตรวจวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นในทรายทั้ง 3 ส่วน พบว่า ส่วนที่ 1 มีปริมาณเกิดขึ้น 5.295 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนที่ 2 มีปริมาณที่เกิดขึ้น 9.735 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ส่วนที่ 3 มีปริมาณเกิดขึ้น 5.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งทรายส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่เกิดตะกอนแขวนลอยมากที่สุด รองลงมาคือทรายส่วนที่ 3 และทรายส่วนที่ 1 เกิดตะกอนแขวนลอยน้อยที่สุดตามลำดับ

4. การศึกษาปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้า ๆ ในการออกซิเดชันเคมี

ในการทดลองทำการชะลอด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 โมลาร์ โดยใช้การปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released) จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน ซึ่งป้อนน้ำกลั่นผ่านด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลารวมทั้งหมด 8,340 นาที หรือ 139 ชั่วโมง ($PV = 49.87$) โดยใช้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีกับโทลูอีน 13.05 กรัม พบว่าปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ เท่ากับ 51.87 กรัม หรือ 0.324 โมล โดยเมื่อเทียบกับปริมาณที่คำนวณได้จากสมการ คือ 5.0976 โมล (ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.2 โมลาร์) จะใช้น้อยกว่า 93.84 % และเมื่อเปรียบเทียบกับงานของอรเมณี (2549) ซึ่งใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.2 โมลาร์ หรือ 32 กรัมต่อลิตร บำบัดโทลูอีนในปริมาณเท่ากันใช้ 242.56 กรัม หรือ 1.516 โมลาร์ (แต่ทำการบำบัดจนโทลูอีนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะใช้ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตน้อยกว่า 190.69 กรัม หรือ 1.192 โมล คิดเป็น 78.61% แต่ในการทดลองนี้ทำการบำบัดจนโทลูอีนมีค่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (detection limit toluene = 5 mg/L) และใช้เวลาในการบำบัดมากกว่างานของอรเมณี 3770 นาที หรือ 62.83 ชั่วโมง

จากการศึกษากระบวนการออกซิเดชันเคมีสารโทลูอีนด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (slowly released) จากวัสดุขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) จะทำให้สามารถประหยัดค่าสารเคมีได้มากกว่า 70 % และสามารถทำให้ยืดยาวระยะเวลาการบำบัดให้นานขึ้นได้ (Schwartz *et al.*, 2005) โดยไม่ต้องทำการบำบัดหลายครั้ง

ข้อเสนอแนะ

1. ในการบำบัดนั้น น้ำที่ออก (effluent) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะทำให้ค่า pH ค่อนข้างต่ำมาก ($\text{pH} \sim 2$) เนื่องจากเกิดการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายในน้ำและทำปฏิกิริยาได้เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอ่อนจึงทำให้ pH ลดลง ดังนั้นควรมีการปรับ pH ของน้ำออกให้มีค่าใกล้เคียงความเป็นกลาง คือ $\text{pH} = 7$ หลังจากทำการบำบัดน้ำออกแล้ว
2. ในการวิเคราะห์ค่าน้ำออกควรใช้คอลัมน์ที่สามารถวิเคราะห์ค่าโทลูอินในน้ำให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อจะได้ทราบปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่แท้จริงในการบำบัดให้น้ำออกมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน
3. ในการผสมสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับวัสดุซีฟี่งพาราฟินควรมีการคำนวณปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและซีฟี่งพาราฟินให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อการปลดปล่อยค่าความเข้มข้นออกมาในปริมาณที่เหมาะสมกับโทลูอินที่จะบำบัดเพื่อที่สามารถคาดการณ์ระยะเวลาการบำบัดได้
4. ในการนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานจริง จะมีความแตกต่างกันของสภาวะต่างๆ อาจต้องมีการนำดินจากพื้นที่ปนเปื้อนจริงมาใช้ในการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. โครงสร้างและคุณสมบัติของโทลูอิน. แหล่งที่มา:

<http://www.udru.ac.th/pasak/toluene.html>, 15 กรกฎาคม 2550.

จุฑารัตน์ ศรีภูม้น. 2548. การฟื้นฟูน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการออกซิเดชันเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฉลอง บัวผัน. 2538. น้ำบาดาล. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ชรินทร์ รุ่งเรืองศิลป์. 2533. น้ำมัน. กองวิเคราะห์ผลกระทบบสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

พระราชบัญญัติคุณภาพน้ำบาดาล. 2542. แหล่งที่มา:

http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water03.html, 22 มกราคม 2550.

วรรณัฐ ศรีพงษ์พิจิตร. 2549. การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำด้วยวิธีการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2530. อิทธิพลของปริมาณโทลูอินที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์. แหล่งที่มา: <http://www.udru.ac.th/pasak/toluene.html>, 15 กรกฎาคม 2550.

ไสว พงษ์สุวรรณ. 2531. น้ำใต้ดิน (Groundwater). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

อรมนี นิยมลัยแก้ว. 2549. การบำบัดการปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันเชื้อเพลิงอิมัลชันด้วยน้ำโดยการเกิดออกซิเดชันทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Delin. 1998. **Light non - aqueous phase liquids (LNAPLs)**. Available Source:

<http://www.toxics.usgs.gov/definitions/lnapls.html>, July 24, 2007.

Domenico, PA. and F.W. Schwartz. 1990. **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley & Sons Inc., New York.

Evan K., 1992, **Groundwater Treatment Technology**, A division of International Thomson Publishing, Inc., New York.

Lee, E. S., W. Franklin and Schwartz. 2006. Characteristics and applications of control – release KMnO_4 for groundwater remediation. **Geological Sciences**. 66: 2058 – 2066

Freeze, R. A., Cherry and A. John 1979. **Groundwater**. Prentice-Hall. Inc., New Jersey

Frank W. and Schwartz. 2005. Semi-passive-passive, Chemical Oxidation Schemes for the Long-term Treatment of Contaminants. **Geological Sciences**. Grant Number: DE-FG07-02ER63487.

Huang K., George E. H., C. Pradeep, A. W. Bernard and Gregory M. D. 2001. Chemical oxidation of trichloroethylene with potassium permanganate in porous medium. **Advances in Environmental Research**. 7: 217-229.

LaGrega, M.D. , P.L. Buckingham, and J.C.Evans. 2001. **Hazardous Waste Mangement**, 2nd ed., McGraw – Hill, New York.

- Lehr, J., M. Hyman, T. E. Gass, and W. SeEVERS. 2001. **Handbook of Complex Environmental Remediation Problem**. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Li, X.D., Schwartz, F.W. 2003. Permanganate Treatment of DNAPLs in Reactive Barriers and Source Zone Flooding Schemes. **Geological Sciences**. Grant Number : DE-FG07-00ER15115
- Li, X.D. and F.W. Schwartz. 2004a. DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate. Part I. Mineralogy of Mn Oxide and its dissolution in organic acids. **Journal of Contaminant Hydrology**. 68: 39-53.
- Li, X.D. and F.W. Schwartz. 2004b. DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate. Part II. Increasing removal efficiency by dissolving in organic acids. **Journal of Contaminant Hydrology**. 68: 269-287.
- Pankow, J.F. and J.A. Cherry. 1996. **Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater**. Waterloo Press, USA.
- Philip, A., M. Joseph and V. Joseph. 1991. Uses of KMnO_4 , H_2O_2 and ClO_2 in wastewater applications. **Chemical oxidation: Technology for the nineties** (FEB 20-22): 205-221.
- Post, J.E. 1999. Manganese oxide minerals: Crystal structures and economic and environmental significance. **Proc. Natl. Acad. Sci.** 96: 3447-3454.
- Ross, C., L.C. Murdoch, D.L. Freedman, and R.L. Siegrist. 2005. Characteristics of potassium permanganate encapsulated in polymer. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 131, Issue 8. Pages 1

- Schnarr, M., Truax, G. Farqueter, E. Hood, T. Gonullu and B. Stickney. 1998. Laboratory and controlled field experiments using potassium permanganate to remediate trichloroethylene and perchloroethylene DNAPLs in porous media. **Journal of Contamination Hydrology** (50): 79-78
- Schwartz, Frank W., E. S. Lee, Ibaraki and Motomu. 2003. Semi-passive Treatment of DNAPL plum using slow release permanganate. **Geological Society of America**. Vol. 35, No 6. p. 372
- Suthesan, Suthen S. 2002. **Natural and enhanced remediation systems**. CRC Press LLC, USA. Christensen, J.S. and J. Elton. 1996. **Soil and Groundwater pollution from BTEX**. Available Source: <http://ewr.cee.vt.edu/environmental/gwprimer/btex/btex.html>. August 10, 2005.
- Walton, J., P. Labine and A. Reidies. 1991. The chemistry of permanganate in degradative oxidations. **Chemical Oxidation: Technology for the nineties** (FEB 20-22): 205-221

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐานและการคำนวณ

กราฟมาตรฐานและตัวอย่างการคำนวณ

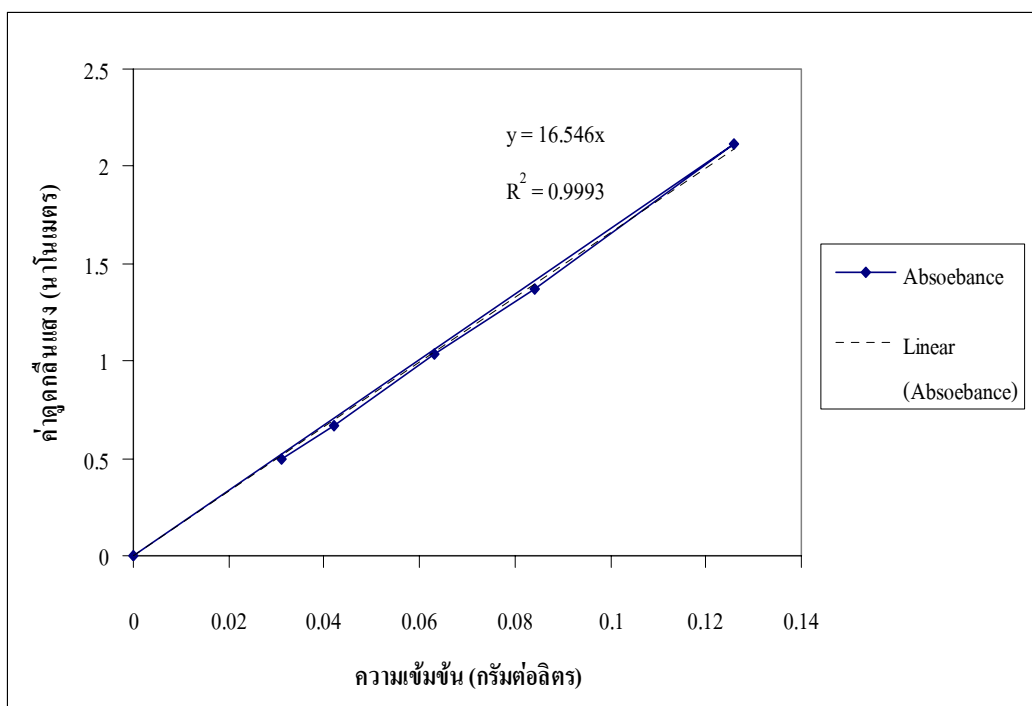
1. กราฟมาตรฐานโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

เตรียมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

ตารางที่ผนวก ก1 ค่าดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตต่างๆ

ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (กรัมต่อลิตร)	ค่าดูดกลืนแสง (Absorbance)
0	0
0.126	2.111
0.084	1.370
0.063	1.038
0.042	0.672
0.031	0.500

นำค่าที่ได้มาพล็อตระหว่างความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (กรัมต่อลิตร) กับ ค่าดูดกลืนแสง เพื่อหาความสัมพันธ์ และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก1 กราฟมาตรฐานโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

สมการ $y = 16.564x$ $R^2 = 0.9993$

โดยที่ y = ค่าดูดกลืนแสง

x = ค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (กรัมต่อลิตร)

1.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าดูดกลืนแสงของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในตัวอย่างน้ำออก

ตัวอย่างที่	ค่าดูดกลืนแสง (Absorbance)
1	0.222
2	...
...	...

$$\text{สมการ } y = 16.546x$$

ตัวอย่างที่ 1

$$\text{แทนค่า } x = 0.222/16.546$$

$$x = 0.013 \text{ กรัมต่อลิตร}$$

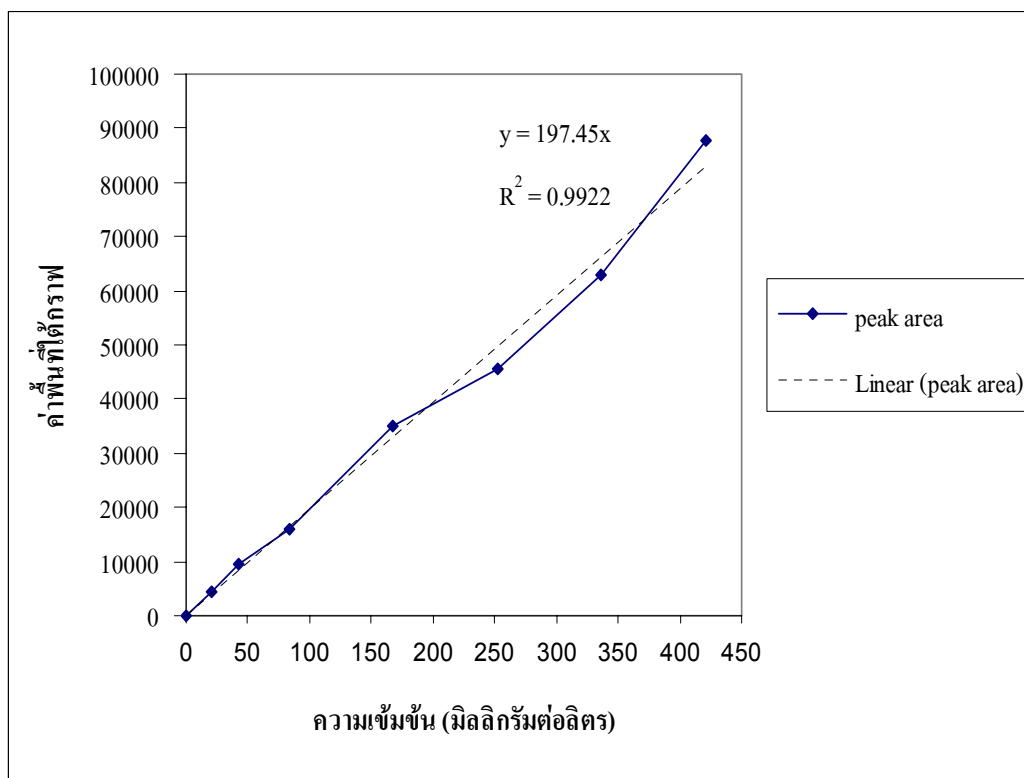
2. กราฟมาตรฐานโทลูอิน

เตรียมโทลูอินที่ความเข้มข้นต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ได้แสดงดังตารางผนวกที่ 3

ตารางผนวกที่ 3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้น โทลูอินต่างๆ

ความเข้มข้น โทลูอิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
0	0
21	4327.63
42	9407.63
84	15968.87
168	34924.85
252	456.50.70
336	62956.10
421	87592.70

นำค่าที่ได้มาพล็อตระหว่างความเข้มข้นโทลูอิน (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณโทลูอินในตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก2 กราฟมาตรฐานโทลูอิน

สมการ $y = 197.45x$ $R^2 = 0.9922$

โดยที่ $y =$ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

$x =$ ค่าความเข้มข้นโทลูอิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณโทลูอิน

ตารางที่ 4 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินในตัวอย่างน้ำออก

ตัวอย่างที่	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peak area)
1	40908
2	...
...	...

$$\text{สมการ } y = 197.45x$$

ตัวอย่างที่ 1

$$\text{แทนค่า } x = 40908/197.45$$

$$x = 207.18 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

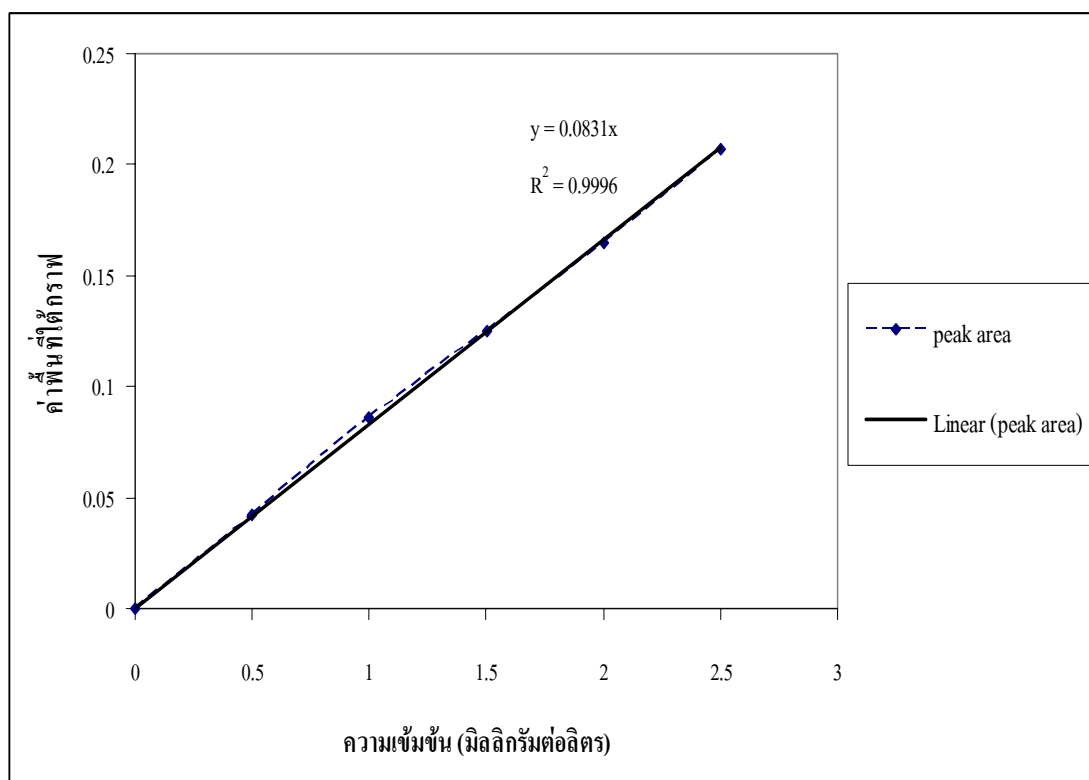
3. กราฟมาตรฐานแมงกานีสไอออน

เตรียมแมงกานีสไอออนที่มีความเข้มข้นต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ได้แสดงดังตารางผนวกที่ ก5

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นแมงกานีสไอออนต่างๆ

ความเข้มข้นแมงกานีสไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
0	0
0.5	0.042
1	0.086
1.5	0.125
2	0.165
2.5	0.207

นำค่าที่ได้มาพล็อตระหว่างความเข้มข้นแมงกานีสไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร) กับ ค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ และใช้เป็นกราฟมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ก3 กราฟมาตรฐานแมงกานีสไอออน

สมการ $y = 0.0831x$ โดย $R^2 = 0.9996$

โดยที่ y = ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

x = ค่าความเข้มข้นแมงกานีสไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแมงกานีสไอออน

ตารางที่ ก6 ค่าพื้นที่ใต้กราฟของแมงกานีสไอออนในตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างที่	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peak area)
1	0.088
2	...
...	...

$$\text{สมการ } y = 0.0831x$$

ตัวอย่างที่ 1

$$\text{แทนค่า } x = 0.088/0.0831$$

$$x = 1.059 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

นำตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์เจือจาง 50 เท่า ดังนั้นปริมาณแมงกานีสไอออนคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณแมงกานีสไอออน} = 1.059 \times 50$$

$$= 52.95 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

4. การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดันของน้ำ (Pressure loss)

ในการทดลองใช้เครื่องวัดแรงดันน้ำในคอลัมน์ ซึ่งพัฒนาโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งจะออกมาในรูปแบบการวัดศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) ของของเหลวในคอลัมน์โดยที่ ศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ (V) เท่ากับแรงดันน้ำ 1 กิโลปาสกาล (kPa) ซึ่งเท่ากับความสูงน้ำ 10.1973 เซนติเมตรน้ำ (cm H₂O)

จากภาพที่ 4 การวัดความดันที่จุดต่างๆในคอลัมน์ทดลอง ประกอบไปด้วยจุด 1, 2, 3 และ 4 การคำนวณค่าการสูญเสียแรงดันทำได้โดยการนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ก่อนการทดลองที่จุดต่างๆลบจากค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างการทดลอง และแปลงหน่วยจากค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นความสูงของน้ำ (pressure head) ที่จุดนั้นๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ก7 และ ก8

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวเซนเซอร์ในเครื่องวัดแรงดันก่อนการทดลอง

เซนเซอร์ตัวที่ (จุดที่)	ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์; V)
1. จุด 1	0.18
2. จุด 2	0.24
3. จุด 3	0.19
4. จุด 4	0.22

4.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าการสูญเสียแรงดัน

ตารางผนวกที่ ก8 แสดงการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าแรงดัน

เซนเซอร์ตัวที่ (จุดที่)	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (โวลต์; V)	ค่าศักย์ไฟฟ้าแท้จริง (โวลต์; V)	ค่าแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ; cm H ₂ O)
1. จุด 1	0.18	$0.42 - 0.18 = 0.24$	$(0.24/0.45) \times 10.1973 = 5.438$
2. จุด 2	0.24	$0.44 - 0.24 = 0.20$	$(0.20/0.45) \times 10.1973 = 4.532$
3. จุด 3	0.19	$0.29 - 0.19 = 0.10$	$(0.10/0.45) \times 10.1973 = 2.266$
4. จุด 4	0.22	$0.25 - 0.22 = 0.03$	$(0.03/0.45) \times 10.1973 = 0.679$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการสูญเสียแรงดันจุด 2 (pressure loss 12)} &= \text{ค่าแรงดันจุดอ้างอิง (จุด 1) - ค่าแรงดันจุด 2} \\
 &= 5.438 - 4.532 \\
 &= 0.906 \text{ เซนติเมตรน้ำ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการสูญเสียแรงดันจุด 3 (pressure loss 23)} &= \text{ค่าแรงดันจุดที่ 2 - ค่าแรงดันจุด 3} \\
 &= 4.532 - 2.266 \\
 &= 2.266 \text{ เซนติเมตรน้ำ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าการสูญเสียแรงดันจุด 4 (pressure loss 34)} &= \text{ค่าแรงดันจุดที่ 3 - ค่าแรงดันจุด 4} \\
 &= 2.266 - 0.679 \\
 &= 1.587 \text{ เซนติเมตรน้ำ}
 \end{aligned}$$

ค่าการสูญเสียแรงดัน มีค่าเป็นบวก แสดงว่า แรงดันที่จุดนั้นๆ มีค่ามากกว่าแรงดันด้านทางเข้า แต่ถ้าค่าการสูญเสียแรงดัน มีค่าเป็นลบ แสดงว่า แรงดันด้านทางเข้า มีค่ามากกว่าแรงดันที่จุดนั้นๆ

5. การคำนวณค่า Pore volume (PV)

Pore volume คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำที่ผ่านตัวกลาง (V_{liquid}) ต่อปริมาตรช่องว่างในตัวกลาง (V_{void}) นั่นคือ

$$PV = V_{\text{liquid}}/V_{\text{void}}$$

จาก $V_{\text{liquid}} = QT$ และ $V_{\text{void}} = ALn$

เมื่อ Q = อัตราการไหล [ml/min]

T = ระยะเวลาในการชะ [min]

A = พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ [cm^2]

L = ความยาวของคอลัมน์ส่วนที่ปนเปื้อนโทลูอิน [cm]

n = ความพรุน [-]

5.1 ตัวอย่างการคำนวณค่า Pore volume

คำนวณค่า Pore volume ที่ระยะเวลา (T) 1920 นาที ในการทดลองนี้ใช้ปั๊มอัตราการไหล (Q) 2 มิลลิลิตรต่อนาที พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A) เท่ากับ 20.28 ตารางเซนติเมตร ความยาวของคอลัมน์ส่วนที่ปนเปื้อนโทลูอิน (L) 17 เซนติเมตร และความพรุนของดินทราย (n) เท่ากับ 0.97

$$\begin{aligned} \text{จาก } PV &= V_{\text{liquid}}/V_{\text{void}} \\ &= QT/ALn \\ &= (2 \times 1920)/(20.28 \times 17 \times 0.97) \\ &= 11.48 \text{ เท่า} \end{aligned}$$

ดังนั้นที่ระยะเวลาการชะคอลัมน์ 1920 นาที คิดเป็น Pore volume เท่ากับ 11.48 เท่า

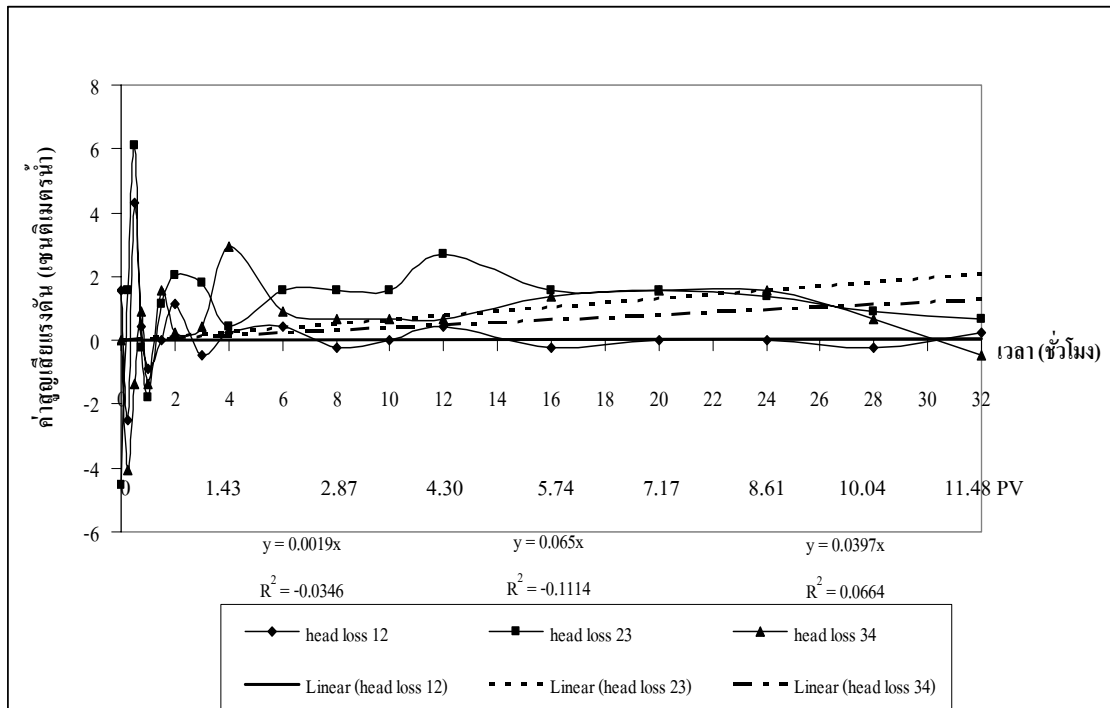
6. การคำนวณค่า K (hydraulic conductivity) ในชุดควบคุมการทดลอง

ในชุดควบคุมใช้น้ำกลั่น ป้อนด้วยอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าไปในคอลัมน์ทดลอง ที่ปนเปื้อนโทลูอิน จากนั้นวัดค่าแรงดัน เพื่อคำนวณค่าการสูญเสียแรงดัน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อใช้น้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ทดลอง

เวลา (นาที่)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
0	0	0	-4.532	1.586
15	0.089	-4.078	1.586	-2.492
30	0.179	-1.359	6.118	4.305
45	0.269	0.906	-0.226	0.543
60	0.358	-1.359	-1.812	-0.906
90	0.538	1.586	1.133	0
120	0.717	0.226	2.039	1.133
180	1.076	0.453	1.812	-0.453
240	1.435	2.945	0.453	0.226
360	2.152	0.906	1.586	0.453
480	2.870	0.679	1.586	-0.226
600	3.588	0.679	1.586	0
720	4.305	0.679	2.719	0.453
960	5.741	1.359	1.586	-0.226
1200	7.176	1.586	1.586	0
1440	8.611	1.586	1.359	0
1680	10.047	0.679	0.906	-0.226
1920	11.482	-0.453	0.679	0.226

นำค่าที่ได้มาพล็อตระหว่างค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ) กับ ค่า Pore volume (PV) เพื่อหาความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง



ภาพผนวกที่ ก4 การคำนวณหาค่า K (hydraulic conductivity) ในชุดควบคุมการทดลอง

จากสมการของดาร์ซี

$$v = Q/A = -K\Delta h/\Delta l \quad (10)$$

จะได้ $K = Q\Delta l/A\Delta h$

โดยที่ Δl = ความยาวของคอลัมน์ระยะต่างๆ [L]

กำหนดให้ L_{12} , L_{23} และ L_{34} เป็นความยาวของระยะ 12, 23 และ 34 ตามลำดับ

$$\text{ดังนั้น } K_{12} = [QL_{12}/A] [1/(0.0019PV)]$$

$$K_{23} = [QL_{23}/A][1/(0.065PV)]$$

$$K_{34} = [QL_{34}/A][1/(0.397PV)]$$

ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ปลดปล่อยออกจากวัสดุอินทรีย์ (หินภูเขาไฟ และ จี๊ฟซิงพาราฟิน) กับความเข้มข้นที่ปลดปล่อยจากเกลือต่างทับทมอย่างเดี่ยว

เวลา (นาทึ)	Pore volume PV	วัสดุอินทรีย์ (กรัมต่อลิตร)			
		จี๊ฟซิงพาราฟิน	จี๊ฟซิงพาราฟิน	หินภูเขาไฟ	เกลือต่างทับทม
		ยาว 1 cm 30 ก่อน	ยาว 30 cm 1 ก่อน		
0	0	0.395	0.00074	0.593	0.44
30	0.061	2.275	0.036	0.240	0.833
60	0.122	2.114	0.25	3.820	1.292
120	0.244	1.420	0.199	3.120	0.370
180	0.366	0.785	0.106	1.600	1.237
240	0.488	0.767	0.048	0.970	0.129
400	0.611	0.891	0.046	0.300	2.212
360	0.732	0.547	0.014	0.715	0.195
480	0.976	0.100	0.009	0.221	1.327
600	1.221	0.122	0.008	0.110	0.254
720	1.465	0.098	0.020	0.069	1.372
960	1.953	0.060	0.015	0.030	0.233
1200	2.442	0.058	0.013	0.040	0.258
1440	2.93	0.083	0.011	0.040	0.346
1680	3.149	0.057	0.008	0.030	0.812
1920	3.907	0.061	0.009	0.018	0.176

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองเมื่อใช้น้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง
(ชุดควบคุมการทดลอง)

เวลา (นาที่)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโพลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	5.98	0	207.181
15	5.83	0.089	296.752
30	5.82	0.179	159.012
45	6.21	0.269	233.493
60	6.45	0.358	264.143
90	6.43	0.538	341.164
120	6.56	0.717	317.895
180	6.22	1.076	370.604
240	6.30	1.435	373.962
360	6.80	2.152	349.532
480	6.38	2.870	374.916
600	6.26	3.588	404.649
720	6.28	4.305	387.602
960	7.15	5.741	376.322
1200	7.46	7.176	404.838
1440	7.18	8.611	322.663
1680	7.29	10.047	370.584
1920	7.15	11.482	391.794

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อใช้น้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ทดลอง เป็นเวลา 32 ชั่วโมง (ชุดควบคุมการทดลอง)

เวลา (นาที่)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
0	0	0	-4.532	1.586
15	0.089	-4.078	1.586	-2.492
30	0.179	-1.359	6.118	4.305
45	0.269	0.906	-0.226	0.543
60	0.358	-1.359	-1.812	-0.906
90	0.538	1.586	1.133	0
120	0.717	0.226	2.039	1.133
180	1.076	0.453	1.812	-0.453
240	1.435	2.945	0.453	0.226
360	2.152	0.906	1.586	0.453
480	2.870	0.679	1.586	-0.226
600	3.588	0.679	1.586	0
720	4.305	0.679	2.719	0.453
960	5.741	1.359	1.586	-0.226
1200	7.176	1.586	1.586	0
1440	8.611	1.586	1.359	0
1680	10.047	0.679	0.906	-0.226
1920	11.482	-0.453	0.679	0.226

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอัลมันท์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	6.87	0	114.245
15	6.68	0.089	111.989
30	4.21	0.179	91.529
45	2.86	0.269	87.307
60	2.96	0.358	96.752
90	2.94	0.538	87.394
120	2.22	0.717	66.125
180	2.52	1.076	65.429
240	2.29	1.435	60.738
360	2.48	2.152	83.882
480	2.81	2.870	68.788
600	2.16	3.588	48.338
720	2.38	4.305	53.854
960	2.38	5.741	20.155
1200	2.44	7.176	45.113
1440	3.14	8.611	17.270
1680	2.89	10.047	22.400
1920	2.95	11.482	21.811

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะลอถัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 32 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
0	0	-1.586	-0.226	1.812
15	0.089	-1.133	0.453	2.266
30	0.179	-1.586	1.359	2.496
45	0.269	-0.453	0.679	3.852
60	0.358	-1.812	3.172	3.399
90	0.538	0.453	1.359	4.078
120	0.717	-1.359	2.945	2.039
180	1.076	-1.133	4.985	9.064
240	1.435	-0.679	5.891	4.758
360	2.152	0.226	8.157	2.945
480	2.870	0.453	7.251	2.492
600	3.588	1.133	7.251	4.078
720	4.305	2.039	4.395	2.039
960	5.741	0.906	1.359	1.359
1200	7.176	1.586	3.852	0.906
1440	8.611	0.906	0.453	-0.453
1680	10.047	-0.679	6.571	3.172
1920	11.482	0	5.211	3.399

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอัลมันท์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	6.87	0	114.245
15	6.68	0.089	111.989
30	4.21	0.179	91.529
45	2.86	0.269	87.307
60	2.96	0.358	96.752
90	2.94	0.538	87.394
120	2.22	0.717	66.125
180	2.52	1.076	65.429
240	2.29	1.435	60.738
360	2.48	2.152	83.882
480	2.81	2.870	68.788
600	2.16	3.588	48.338
720	2.38	4.305	53.854
960	2.38	5.741	20.155
1200	2.44	7.176	45.113
1440	3.14	8.611	17.270
1680	2.89	10.047	22.400
1920	2.95	11.482	21.811

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอัลมันท์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
2160	2.11	12.917	7.863
2400	2.80	14.353	ND
2520	2.03	15.070	ND
2760	2.38	16.506	13.083
2880	2.08	17.223	10.920
3000	2.45	17.941	16.458
3120	2.62	18.659	6.059
3240	2.65	19.376	6.236
3360	2.71	20.094	6.530
3480	3.78	20.812	8.097
3600	2.29	21.529	5.087
3720	2.25	22.247	9.107
3840	2.27	22.965	14.013
3900	2.03	23.324	8.726
3960	2.28	23.682	10.702
4020	2.35	24.041	14.547
4120	2.23	24.759	15.029
4200	3.07	25.118	11.410

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอัลมันท์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
4260	2.32	25.477	8.947
4380	2.20	26.194	ND
4500	2.12	26.912	ND
4620	2.94	27.630	7.027
4740	2.35	28.347	ND
4980	2.36	29.783	5.597
5100	2.43	30.500	ND
5220	2.05	31.218	ND
5340	2.36	31.936	6.100
5460	2.36	32.653	ND
5580	2.34	33.371	ND
5700	2.36	34.089	ND
5940	2.27	35.524	ND
6000	2.48	35.883	ND
6060	2.43	36.242	ND
6120	2.28	36.600	ND
6180	2.47	36.959	ND
6240	2.34	37.318	ND

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะคอัลมันท์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
6300	2.23	37.677	ND
6360	2.49	38.036	ND
6420	2.52	38.395	6.763
6480	2.32	38.753	ND
6540	2.47	39.112	ND
6600	2.47	39.471	ND
6660	2.67	39.830	ND
6720	2.56	40.189	ND
6780	2.58	40.548	ND
6840	2.15	40.906	ND
6900	2.45	41.265	ND
6960	2.05	41.624	5.177
7020	2.28	41.983	ND
7080	2.74	42.342	ND
7140	2.75	42.701	10.021
7200	3.50	43.059	8.664
7260	3.08	43.418	ND
7320	2.74	43.777	6.785

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองปริมาณโทลูอินในน้ำ เมื่อชะกอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของโทลูอินในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
7380	3.21	44.136	ND
7440	2.75	44.495	ND
7500	2.42	44.854	5.225
7560	2.14	45.212	ND
7620	2.33	45.571	ND
7680	2.50	45.930	ND
7740	2.27	46.289	ND
7800	2.83	46.648	ND
7860	2.40	47.007	ND
7920	2.37	47.365	ND
7980	2.45	47.724	ND
8040	2.45	48.083	ND
8100	3.36	48.442	ND
8160	3.27	48.801	ND
8220	3.25	49.160	ND
8280	3.70	49.518	ND
8340	3.52	49.877	ND

หมายเหตุ ND = Not Detected (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะลอถัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
0	0	-1.586	-0.226	1.812
15	0.089	-1.133	0.453	2.266
30	0.179	-1.586	1.359	2.496
45	0.269	-0.453	0.679	3.852
60	0.358	-1.812	3.172	3.399
90	0.538	0.453	1.359	4.078
120	0.717	-1.359	2.945	2.039
180	1.076	-1.133	4.985	9.064
240	1.435	-0.679	5.891	4.758
360	2.152	0.226	8.157	2.945
480	2.870	0.453	7.251	2.492
600	3.588	1.133	7.251	4.078
720	4.305	2.039	4.395	2.039
960	5.741	0.906	1.359	1.359
1200	7.176	1.586	3.852	0.906
1440	8.611	0.906	0.453	-0.453
1680	10.047	-0.679	6.571	3.172
1920	11.482	0	5.211	3.399

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะกอลัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
2160	12.917	0	6.571	-2.039
2400	14.353	-2.945	1.359	2.492
2520	15.070	1.133	5.211	3.172
2760	16.506	0.906	5.211	6.798
2880	17.223	1.133	7.931	-1.812
3000	17.941	3.172	5.211	3.172
3120	18.659	3.172	4.985	2.311
3240	19.376	1.586	2.266	0.906
3360	20.094	4.758	2.719	1.586
3480	20.812	1.133	6.798	3.852
3600	21.529	0.266	3.625	-0.336
3720	22.247	3.852	0.906	3.712
3840	22.965	2.945	4.532	4.078
3900	23.324	-0.453	3.852	2.266
3960	23.682	0	5.665	2.945
4020	24.041	0.453	4.078	3.399
4140	24.759	3.399	5.211	4.078
4200	25.118	2.492	4.078	2.266

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะลอถัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
4260	25.477	2.266	2.492	2.719
4380	26.194	1.586	2.492	1.586
4500	26.912	1.586	1.359	2.719
4620	27.630	2.039	6.344	-1.359
4740	28.347	1.812	1.133	2.719
4980	29.783	1.359	0.226	0.906
5100	30.500	1.133	3.399	3.172
5220	31.218	-0.226	2.719	4.305
5340	31.936	2.492	1.133	3.399
5460	32.653	1.133	2.945	0.679
5580	33.371	1.812	3.399	3.399
5700	34.089	0.906	9.290	0.344
5940	35.524	3.625	-0.906	3.625
6000	35.883	1.359	5.438	3.852
6060	36.342	2.266	3.852	4.078
6120	36.600	1.586	-1.596	5.438
6180	36.959	0	4.532	4.758
6240	37.318	1.586	6.798	1.133

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะลอถ่มน้ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
6300	37.677	0.679	0.906	3.172
6360	38.036	0.453	0	4.078
6420	38.395	0	2.266	4.305
6480	38.753	0	6.611	3.625
6540	39.112	0.453	6.611	5.438
6600	39.471	0.906	1.133	3.625
6660	39.830	0.906	4.305	3.852
6720	40.189	0.453	3.399	2.039
6780	40.548	1.133	0	4.305
6840	40.906	0.672	6.571	5.665
6900	41.265	0.906	3.625	3.852
6960	41.624	2.719	4.078	2.039
7020	41.983	1.359	1.586	3.172
7080	42.342	2.039	2.266	4.078
7140	42.701	2.266	3.625	2.945
7200	43.059	0.226	0.226	2.266
7260	43.418	0.453	1.812	4.985
7320	43.777	0.453	3.712	3.172

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าการสูญเสียแรงดัน เมื่อชะลอถัมน์ทดลองด้วยสารละลาย
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยวิธีการปลดปล่อยอย่างช้าๆ จากวัสดุขี้ผึ้ง
พาราฟิน เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทีก)	Pore volume (PV)	ค่าการสูญเสียแรงดัน (เซนติเมตรน้ำ)		
		Pressure loss	Pressure loss	Pressure loss
		12	23	34
7380	44.136	2.266	-0.226	6.118
7440	44.495	0.266	2.039	7.478
7500	44.854	1.133	3.852	4.078
7560	45.212	0.679	4.532	1.812
7620	45.571	3.625	1.586	1.133
7680	45.930	-0.906	6.798	1.812
7740	46.289	1.586	0.453	4.532
7800	46.648	2.266	2.039	4.758
7860	47.007	1.359	2.719	3.625
7920	47.365	1.359	2.039	4.758
7980	47.724	2.945	2.719	5.211
8040	48.083	-0.226	4.532	5.438
8100	48.442	2.945	3.399	6.798
8160	48.801	0.679	3.172	4.532
8220	49.160	4.758	3.399	2.719
8280	49.518	1.133	3.399	7.251
8340	59.877	0.226	9.290	2.948

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ่)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก (กรัมต่อลิตร)
0	6.87	0	0
15	6.68	0.089	0.003626
30	4.21	0.179	0.000120
45	2.86	0.269	0.000157
60	2.96	0.358	0.000423
90	2.94	0.538	0.000064
120	2.22	0.717	0.000052
180	2.52	1.076	0.000046
240	2.29	1.435	0.000362
360	2.48	2.152	0.000120
480	2.81	2.870	0.001873
600	2.16	3.588	0.001752
720	2.38	4.305	0.000423
960	2.38	5.741	0.003142
1200	2.44	7.176	0.002477
1440	3.14	8.611	0.065272
1680	2.89	10.047	0.000064
1920	2.95	11.482	0.000150

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก (กรัมต่อลิตร)
2160	2.11	12.917	0.000247
2400	2.80	14.353	0.169197
2520	2.03	15.070	0.002960
2760	2.38	16.506	0.001690
2880	2.08	17.223	0.15882
3000	2.45	17.941	0.08890
3120	2.62	18.659	0.00181
3240	2.65	19.376	0.00025
3360	2.71	20.094	0.05450
3480	3.78	20.812	0.01340
3600	2.29	21.529	0.00048
3720	2.25	22.247	0.00108
3840	2.27	22.965	0.00075
3900	2.03	23.324	0.00151
3960	2.28	23.682	0.00032
4020	2.35	24.041	0.00025
4120	2.23	24.759	0.00060
4200	3.07	25.118	0.00006

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ่)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก (กรัมต่อลิตร)
4260	2.32	25.477	0
4380	2.20	26.194	0.179076
4500	2.12	26.912	0.085640
4620	2.94	27.630	0.052701
4740	2.35	28.347	0.139956
4980	2.36	29.783	0.070772
5100	2.43	30.500	0.049498
5220	2.05	31.218	0.171038
5340	2.36	31.936	0.059047
5460	2.36	32.653	0.057778
5580	2.34	33.371	0.074156
5700	2.36	34.089	0.049619
5940	2.27	35.524	0.056871
6000	2.48	35.883	0.050127
6060	2.43	36.242	0.047383
6120	2.28	36.600	0.049317
6180	2.47	36.959	0.040766
6240	2.34	37.318	0.044965

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ่)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก (กรัมต่อลิตร)
6300	2.23	37.677	0.057597
6360	2.49	38.036	0.045328
6420	2.52	38.395	0.032757
6480	2.32	38.753	0.150791
6540	2.47	39.112	0.086063
6600	2.47	39.471	0.067508
6660	2.67	39.830	0.054575
6720	2.56	40.189	0.051492
6780	2.58	40.548	0.052761
6840	2.15	40.906	0.053366
6900	2.45	41.265	0.045207
6960	2.05	41.624	0.066904
7020	2.28	41.983	0.162033
7080	2.74	42.342	0.076722
7140	2.75	42.701	0.060801
7200	3.50	43.059	0.069805
7260	3.08	43.418	0.051492
7320	2.74	43.777	0.049377

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก เป็นเวลา 139 ชั่วโมง

เวลา (นาทึ่)	pH	Pore volume (PV)	ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตในน้ำออก (กรัมต่อลิตร)
7380	3.21	44.136	0.042621
7440	2.75	44.495	0.058987
7500	2.42	44.854	0.042729
7560	2.14	45.212	0.383778
7620	2.33	45.571	0.119364
7680	2.50	45.930	0.070711
7740	2.27	46.289	0.094161
7800	2.83	46.648	0.083162
7860	2.40	47.007	0.056025
7920	2.37	47.365	0.050707
7980	2.45	47.724	0.064607
8040	2.45	48.083	0.392844
8100	3.36	48.442	0.180587
8160	3.27	48.801	0.085096
8220	3.25	49.160	0.063399
8280	3.70	49.518	0.051190
8340	3.52	49.877	0.056750

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววรรณิภา หนองพงษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 เมษายน 2524
สถานที่เกิด	นครนายก
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อม สาขอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี พ.ศ. 2549

