ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางน้ำใต้ดินที่ต่างกันด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

Remediation of Toluene and Trichloroethylene Contaminated Groundwater in Different Media Types Using Chemical Oxidation

นามผู้วิจัย นางสาวโศรยา ธีระวัฒนกิตติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จีมา ศรลัมพ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางน้ำใต้ดินที่ต่างกัน ด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

Remediation of Toluene and Trichloroethylene Contaminated Groundwater in Different Media Types Using Chemical Oxidation

โดย

นางสาวโศรยา ธีระวัฒนกิตติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2552

โศรยา ธีระวัฒนกิตติ 2552: การบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางน้ำใต้ดินที่ต่างกันด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จีมา ศรลัมพ์, Ph.D. 117 หน้า

งานวิจัยนี้มุ่งถึงการบำบัดน้ำใต้ดินและตัวกลางที่ปนเปื้อนด้วยวิธีการออกซิเดชันเคมีโดยใช้สาร โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในตัวกลางที่ต่างกัน โดยใช้ตัวแทนของตัวกลาง คือ ดินเหนียว (clay) ทรายร่วน (silty sand) และทราย(sand) โดยใช้สาร $KMnO_4$ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ณ pH 7 ทำการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้สารโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้นและปริมาณที่เท่ากับสาร $KMnO_4$ เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา โดยการทดลองนี้ได้ศึกษาหาปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม พบว่าที่ปริมาณของ $KMnO_4$เท่ากับ 100 ml มีประสิทธิการบำบัดสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อได้ปริมาณของ $KMnO_4$ที่เหมาะสมในการบำบัดแล้ว นำไปศึกษาการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน TCE ในตัวกลางที่ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติของตัวกลางที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิการบำบัด ผลการทดลองพบว่า การบำบัด TCE ในตัวกลางทรายมีประสิทธิภาพสูงสุด ร้อยละ 78.7 รองลงมาคือ ทรายร่วน 70.0 % และดินเหนียว 12.2 % ตามลำดับ และมีการปลดปล่อยคลอไรด์ ไอออนที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด เท่ากับ 639 , 555 และ 503 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยค่าคลอไรด์ที่เกิดขึ้นพิจารณาจากค่าโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาแนวโน้มของคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้น เมื่อหลังทำการบำบัด ด้าน อิทธิพลของคุณสมบัติของตัวกลางที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ ค่าสารอินทรีย์รวมคาร์บอน โดยทรายมีสารอินทรีย์รวมคาร์บอนน้อยที่สุด เท่ากับ 0.21 % รองลงมาคือ ทรายร่วน และทราย คือ 0.14 % และ 0.02 % เนื่องจากตัว oxidant ในการทำปฏิกิริยาจะไปทำปฏิกิริยาสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในธรรมชาติอื่นๆที่ไม่ใช้สารปนเปื้อนด้วย ดังนั้นเมื่อทำการบำบัด จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณสารเคมีที่ใช้อย่างมากเกินพอ เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้ทั้งหมด

ส่วนการศึกษาหาสารตัวกลางหลังการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนละโทลูอีน พบว่าพบว่าในทุกๆตัวกลางได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารชนิดเดียวกัน คือ สาร trichloromethane, trichloroethylene(TCE) และสาร tetrachloroethylene (PCE) ใกล้เคียงกันในทุกตัวกลาง แต่ค่าของสาร tetrachloroethylene(PCE) มีค่าสูงมากที่สุด โดยพบในตัวกลาง ดินเหนียวและทรายร่วนมาก รองลงมาคือ ทรายและไม่มีตัวกลาง ตามลำดับ ซึ่งค่าของสาร PCE มีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน แต่เมื่อพิจารณากระบวนการทางเคมีของการออกซิเดชันสาร ไตรคลอโรเอทธิลีน พบว่าสาร PCE น่าเกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง ดังนั้นสารตัวกลาง (intermediate) ที่คาดว่าเกิดขึ้นหลังจากการบำบัด คือ สาร trichloromethane ส่วนการศึกษาสารตัวกลางหลังการบำบัดสารโทลูอีน พบว่าไม่มีสารตัวกลางใดเกิดขึ้น นอกจากสารโทลูอีนที่เหลือหลังจากการบำบัด แต่ไม่อาจสรุปได้ว่ามีสารอื่นอีกหรือไม่ เนื่องจากได้ตามการตรวจวัดประเภทของสารที่เกิดขึ้นตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาลเท่า

_____ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Soraya Teerawattanakitti 2009: Remediation of Toluene And Trichloroethylene Contaminated Groundwater in Different Media Types Using Chemical Oxidation. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Cheema Soralump, Ph.D. 117 pages.

The objective of this experimental investigation was remediation of TCE- Contaminated groundwater in difference media types using potassium permanganate ($KMnO_4$). And these experiments were applied to ex situ remediation. The experiments were to determine the optimal $KMnO_4$ dosage and evaluate the effects of the total organics matter in different media types on efficiency of TCE oxidant. Three sediments (clay, silty sand and sand) were used in this test. Remediation TCE-contaminated used $KMnO_4$ 0.2 M at pH7, Shaker speed 200 RPM and retention time was 3 hours. The oxidation reaction was quenched at the appropriate time interval by the addition of 0.2 M Sodium bisulfate solution. Study results showed that the 22 mmol (110 ml) of $KMnO_4$ dosage was 98.2% remediation efficiency and 20 mmol (100 ml) $KMnO_4$ dosages was 97.3% efficiency respectively. But anyway this experiment chooses 22 mmol of $KMnO_4$ dosage because remediation efficiency was not significant difference.

TCE-contamination remediation efficiency in 3 different types of media showed that the greatest efficiency remediation was sand media. It was efficiency 78.7%, silty sand and clay 70.0 %, 12.2 % respectively. And Cl^- ion after oxidation were 63.9 % in sand , silty sand 55.5 % , and Clay 50.3 % respectively .The other factor that influence on remediation efficiency was total organics matter . Results reveal that Sand had the lowest of total organics matter 0.02 % and silty sand and Clay 0.14% and 0.21% respectively .That related to remediation efficiency. When using $KMnO_4$ in chemical oxidation reaction will react both of target and non target organics matter. So it was important to look at the chemical oxidation demand of the system at the total organics carbon as evaluation parameter for chemical oxidation.

___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีมา ศรลัมพ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ การให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนการนำบทความไปเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35 ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร .สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รอง ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณโครงการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2552 ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอบคุณห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล และอำนวยความสะดวกต่างๆในการทำงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณ คุณพ่อสนิท คุณแม่สุดาพร ธีระวัฒนกิตติ และขอบคุณมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

โศรยา ธีระวัฒนกิตติ

กันยายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	37
วัสดุและอุปกรณ์	37
วิธีการ	40
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุป	80
ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารและการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานและการทดลอง	94
ภาคผนวก ข ตารางและภาพบันทึกผลการทดลอง	97
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าความ เข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีในน้ำใต้ดิน	9
2	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)	24
3	ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันเมื่อสัมผัสสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่มีต่อมนุษย์	25
4	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)	27
5	ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารโทลูอีน (Standard and Toxicity)	28
6	ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP) ของสารออกซิเดชัน	31
7	คุณสมบัติของตัวกลาง	38
8	ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากกระบวนการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางชนิดต่างๆโดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	73
9	ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากกระบวนการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางชนิดต่างๆโดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	77

ตารางผนวกที่

ก1	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนต่างๆ	95
ข1	ผลการทดลองศึกษาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ในตัวกลางดินเหนียวโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	98
ข2	ผลการทดลองศึกษาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ในตัวกลางทรายออตตาวาโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	99

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียว	100
ข4	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทรายร่วน	100
ข5	ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทราย	101
ข6	ผลการทดลองศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ไม่มีตัวกลาง, ดินเหนียว, ทรายร่วน และทราย	101
ข7	ผลการทดลองศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารโทลูอีนในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ไม่มีตัวกลาง, ดินเหนียว, ทรายร่วน และ ทราย	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเคลื่อนที่ NAPLs ที่แบ่งแยกตามความหนาแน่น คือ LNAPLs และ DNAPLs	12
2	แสดงการเคลื่อนที่ของNAPLs โดยภาพบนแสดงการเคลื่อนที่ของ NAPLs จากแหล่งที่มีปริมาณและเกิดการไหลอย่างรวดเร็ว ทางด้านรูปล่างแสดงการเคลื่อนที่ออกจากแหล่งอย่างช้าๆและมีปริมาณของสารปนเปื้อนน้อย	13
3	แสดงลักษณะของ NAPLs ที่ถูกกักไว้ในโพรงที่มีลักษณะเป็นได้ทั้งอนุภาค (Blob) และรวมกันเป็นร่างแห(Ganglia)	14
4	แสดงลักษณะการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนตามคุณสมบัติของแต่ละสารปนเปื้อนนั้นๆ	17
5	การทดลองหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน	42
6	การทดลองความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน	43
7	การทดลองการเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวกลางและ ผลิตภัณฑ์รอง ที่เกิดจากการบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดระหว่างน้ำใต้ดินไม่มีตัวกลางและน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง(Medium)ที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน	47
8	ประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน(ก) และ(ข)ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัดด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที	48
9	ประสิทธิภาพการบำบัดของสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ปนเปื้อนในตัวกลางน้ำใต้ดิน 2 ชนิด คือดินเหนียว และทรายออตตาวา โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที	51

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
10	ปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดในตัวกลางดินเหนียวและทรายออตตาวาที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน	51
11	ค่าความเข้มข้นหลังการบำบัดตัวกลางน้ำใต้ดินปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ต่างกัน	54
12	ค่าคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดตัวกลางน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน	57
13	อิทธิพลของค่าสารอินทรีย์รวมในตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน	59
14	อิทธิพลของค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน	69
15	อิทธิผลของค่าความพรุนและอัตราส่วนช่องว่างในตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน	69
16	ขั้นตอนของสารเปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) รวมตัวกับสาร TCE เกิดสารประกอบที่เรียกว่า cyclic hypomanganate ester	74
17	ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนตกับสารไตรคลอโรเอทธิลีน	75
18	การทำปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนตกับสารโทลูอีน	78

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนต่างๆ	96
ข1	ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 70	103
ข2	ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ลักษณะเป็นทรายสีดำ	104
ข3	ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ที่มีลักษณะเป็นดินทราย	105
ข4	ผลการทดลองค่า Specific gravity ของดินเหนียว	106
ข5	ผลการทดลองค่า Specific gravity ของทรายร่วน	107
ข6	ผลการทดลองค่า Specific gravity ของทราย	108
ข7	ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำ ของดินเหนียว	109
ข8	ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำของทรายร่วน	110
ข9	ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำของทราย	111
ข10	ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของทราย	112
ข11	ผลการจำแนกประองค์ประกอบของดินในดินเหนียว	113
ข12	ผลการทดลอง Hydrometer Test ในตัวกลางดินเหนียว	114
ข13	ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ของทรายร่วน	115
ข14	ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ที่ของดินทรายและดินเหนียว	116

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของชั้นน้ำ [L^2]
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BTEX	=	Benzene, Toluene, Ethyl benzene และ Xylene
C_{TCE}	=	ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมาจากน้ำออก [mg/L]
$C_{toluene}$	=	ความเข้มข้นของสารโทลูอีนที่ออกมาจากน้ำออก [mg/L]
cm / s	=	เซนติเมตร ต่อ วินาที
C_c	=	มวลของสารปนเปื้อนในสารอินทรีย์คาร์บอน [mg/g]
$C_{octanal}$	=	ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสารออกทานอล [mg/l]
C_S	=	มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกซับต่อมวลตัวซับ [mg/g]
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ [L]
DNAPLs	=	Dense Non Aqueous Liquids
∂h	=	ความแตกต่างของระดับน้ำบาดาล [L]
∂L	=	ระยะทางในแนวการไหล [L]
d50	=	ขนาดตัวกลางที่ใหญ่ที่ที่สุดผ่านตะแกรงปริมาณร้อยละ 50
FID	=	Flame Ionization Detector
f_{oc}	=	ค่าเศษส่วนของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน
GC	=	Gas Chromatography
g / cm^3	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g / l.min	=	กรัมต่อลิตร นาที
h	=	Head Loss [cm H_2O]
K	=	hydraulic conductivity [L/T]
K_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน (Soil distribution coefficient)
K_{oc}	=	ค่าสมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon partition coefficient)
K_{ow}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล (Octanol-water partition coefficient)
k_{rw}	=	aqueous-phase relative permeability[-]

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

L	=	ความยาว[m]
LD_{50}	=	Lethal Dose [mg/kg]
LNAPLS	=	Light Non Aqueous Liquids
M	=	โมลาร์
$M_{adsorption}$	=	มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง (กรัม)
$M_{effluent}$	=	มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก (กรัม)
$M_{intermediate}$	=	มวลของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัด (กรัม)
M_{loss}	=	มวลของไตรคลอโรเอทธิลีน ส่วนที่สูนย์เสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (Volatile) หรือความผิดพลาด(Error) อื่นๆของการทดลอง (กรัม)
$M_{oxidation}$	=	มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนในส่วนที่ทำปฏิกิริยา (กรัม)
M_{total}	=	มวลรวมทั้งหมด (กรัม)
M_{soil}	=	มวลของทรายที่ใช้ดูดซับ [g]
mg / g	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg / kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ml	=	มิลลิลิตร
mmol	=	มิลลิโมล
mol	=	โมล
mol/g.s	=	โมลต่อกรัมวินาที
NAPLS	=	Non Aqueous Liquids
n	=	ความพรุน [-]
n_e	=	Effective porosity
N_R	=	Reynolds Number
ORP	=	Oxidation Reduction Potential [V]
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ [M/L^3]
PAHs	=	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PCE	=	Perchloroethylene
ppm	=	หนึ่งส่วนในล้านส่วน
PTFE	=	Polytetrafluoroethene

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

PV	=	Pore Volume [-]
Q	=	อัตราการไหลของน้ำบาดาล [L^3/T]
SD	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SPME	=	Solid phase Micro Extraction
T	=	ระยะเวลา [min]
TCE	=	Trichloroethylene
TLV	=	ค่าความเป็นพิษเรื้อรัง
μ	=	Dynamic viscosity ของน้ำ [M/LT]
µg/l	=	ไมโครกรัมต่อลิตร
V	=	ความเร็วในการไหลของน้ำ [L^3/T]
v	=	Darcy Velocity หรือ Specific Velocity
v_a	=	ความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างช่องว่างของเม็ดตะกอน
v_t	=	ปริมาตรทั้งหมด (Total volume)[L^2]
v_v	=	ปริมาตรของช่องว่าง (Effective void volume)[L^3]

การบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางน้ำใต้ดินที่ต่างกันด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

Remediation of Toluene and Trichloroethylene Contaminated Groundwater in Different Media Types Using Chemical Oxidation

คำนำ

ปัญหาการปนเปื้อนชั้นดินและน้ำใต้ดินในปัจจุบัน พบว่าสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการปนเปื้อนน้ำมัน หรือสารเคมีจากถังเก็บกักบนดินหรือใต้ดิน นอกจากนี้สาเหตุอีกประการคือการปนเปื้อนด้วยน้ำซะมูลฝอยในบ่อฝังกลบที่ไม่ได้รับมาตรฐาน ดังเช่นมีรายงานการปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนเป็นจำนวนมากในบ่อฝังกลบชุมชน(วิจิตร, 2549) ซึ่งสารปนเปื้อนจากแหล่งเหล่านี้ ส่วนมากเป็นของเสียที่ไม่ละลายน้ำ (Non-aqueous Phase Liquids ; NAPL's) เมื่อของเสียที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้ เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินหรือชั้นดินก่อให้เกิดปัญหาที่ตามมามากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาทางสิ่งแวดล้อม และผลกระทบต่อมนุษย์ เนื่องจากสานปนเปื้อนนี้ มีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยมาก จึงก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนอยู่ในชั้นดินและน้ำใต้ดินเป็นเวลานาน ส่งผลทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม อันเนื่องมาจากน้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในการอุปโภค ปบริโภคที่สำคัญ และการปนเปื้อนในชั้นดินทำให้ยากที่จะประกอบการเกษตรกรรม นอกจากนี้สารประกอบเหล่านี้ถือว่าเป็นว่าเป็นสารอินทรีย์ระเหย ที่สามารถระเหยออกสู่อากาศ มีพิษทั้งเฉียบพลันและเรื้อรัง โดยของเสียที่ไม่ละลายน้ำบางชนิดถือว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อน และบำบัดให้สารปนเปื้อนเหล่านี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในปัจจุบันวิธีที่เข้ามาจัดการของเสียอันตรายมีหลากลายปนระเภท ได้แก่ การบำบัดในพื้นที่(in situ remediation) และการบำบัดนอกพื้นที่ (ex situ remediation) โดยเทคโนโลยีที่ใช้ในการฟื้นฟูมีทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น Soil washing , Pump and treat, Bio remediation และ chemical oxidation เป็นต้น ซึ่งวิธีที่เป็นที่นิยม และได้รับการยอมรับอย่างมาก คือ วิธีออกซิเดชันเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยวิธีที่นี้อาศัยกระบวนการทางเคมีเป็นตัวฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่บำบัดสารพิษที่ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินได้มากกว่าวิธีอื่นๆ(Evan,1999) โดยเมื่อหลังการฟื้นฟูได้ผลิตภัณฑ์ เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ หรือเปลี่ยนเป็นสารชนิดอื่นที่มีความเป็นพิษลดลง หรือสารประกอบที่พบได้ในตามธรรมชาติ อย่างไรก็

ตามผลิตภัณฑ์เหล่านี้อาจสามารถมีพิษเพิ่มขึ้นได้(Suthesan,2002) โดยสารเคมีที่นิยมใช้ในการฟื้นฟู คือ สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการออกซิเดชันเคมียังมีข้อจำกัด คือ การทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถเกิดได้ในหลายปัจจัย เช่น สภาวะการบำบัดไม่เหมาะสม ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ไม่เพียงพอ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ เป็นต้น(Boulding,1996) และในดินหรือตัวกลางในชั้นน้ำใต้ดินมีสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อทำการบำบัดสารอินทรีย์ตามธรรมชาติเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้ จึงมีผลให้ปริมาณของสารเคมีที่เติมลงไปไม่เพียงพอที่จะบำบัดได้อย่างสมบูรณ์ ก่อให้เกิดสารตัวกลาง(Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง(By product) ที่สามารถมีความเป็นพิษได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาในสารตัวกลาง(Intermediate) และ ผลิตภัณฑ์รอง(By product) ที่เกิดขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี ด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยจำลองชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำที่มีตัวกลาง(Media)แตกต่างกัน คือ ดินทราย ดินร่วน และดินเหนียว โดยเลือกตัวแทนของสารปนเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำ คือ โทลูอีน(Toluene) และไตรคลอโรเอทธิลีน(TCE) โดยทำปฏิกิริยาที่สภาวะ pH เท่ากับ 7 เนื่องจากงานวิจัยของจุฑารัตน์รายงานว่า เป็นสภาวะที่บำบัดโทลูอีนที่ได้ที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 99.98 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนนั้นไม่ขึ้นกับ pH (Yan and Schwartz, 2000) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีการการฟื้นฟูนอกพื้นที่(ex situ remediation) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถควบคุมและติดตามตรวจสอบได้ดีกว่าวิธีการบำบัดในพื้นที่(Wang *et al.*, 2007) จึงทำให้การศึกษานี้มีความเข้าใจในกระบวนการออกซิเดชันเคมีและปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และเป็นการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีการออกซิเดชันเคมี

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน (TCE) ด้วยวิธีการออกซิเดชันเคมี โดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

2. ศึกษาสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดขึ้นเมื่อฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี โดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3. ศึกษาความสามารถการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน (TCE) ในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ดินเหนียว ดินทรายและ ดินร่วน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองเปรียบเทียบการบำบัดสารปนเปื้อนในตัวกลางที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ดินทราย (Sand) และดินร่วน(Silty Sand)

2. การทดลองเตรียมโทลูอีน ความเข้มข้นร้อยละ 99 และ ไตรคลอโรเอทธิลีนความเข้มข้นร้อยละ99

3. การทดลองเป็นการบำบัดสารปนเปื้อนแบบนอกพื้นที่ (ex situ remediation) โดยทำปฏิกิริยาในถังปฏิกิริยาแบบ Batch

4. คุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณโทลูอีน และ ไตรคลอโรเอทธิลีน (มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าpH ค่าอินทรีย์รวม (Soil organics matter) ค่าความเค็ม ขนาดของตัวกลาง (มิลลิเมตร) สารตัวกลางและผลิตภัณฑ์รองที่เกิดขึ้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

การตรวจเอกสาร

1.น้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดิน หมายถึง น้ำทุกประเภทที่อยู่ใต้ผิวดิน มักเป็นน้ำที่อยู่ใต้เส้นระดับน้ำใต้ดิน(Water table) ซึ่งน้ำแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของเม็ดดิน หรือ หิน ที่อิ่มตัวด้วยน้ำใต้ผิวดินลงไป จนถึงบริเวณต่ำสุดของชั้นดินหรือชั้นหินพรุน โดยช่องว่างในเม็ดดิน หินรวมถึงรอยแตก (Fracture) โพรง (void) เนื้อที่ระหว่างเม็ดตะกอน (pore) ซึ่งการเกิดน้ำใต้ดินเกี่ยวข้องกับ วัฏจักรของน้ำ (hydrology) แหล่งน้ำของน้ำใต้ดิน ส่วนใหญ่ คือน้ำจากบรรยากาศ หรือน้ำฝน(Precipitation) และน้ำผิวดินต่างๆ ไหลซึมผ่านชั้นดินหรือหินไม่อุ้มน้ำโดยตรง และถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินหรือหินอุ้มน้ำ

ลักษณะทางกายภาพของชั้นดินที่เกิดน้ำใต้ดินนั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 ชั้น คือ ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) และชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) โดยชั้นทั้งสองถูกแบ่งด้วยเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) ซึ่งเป็นระดับที่ความดันของน้ำใต้ดิน (hydrostatic pressure) เท่ากับความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) (วีระพล,2528)

1) ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone)

เนื่องจากชั้นดินนี้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินประกอบด้วยอากาศและน้ำ จึงนิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า aeration zone (วีระพล,2528) หรือ vadose zone โดยน้ำในเขตนี้เป็นน้ำที่เกาะในช่องว่างของเม็ดดิน หรือน้ำที่กำลังอยู่ในระหว่าง ทางที่จะเคลื่อนลงไปสู่ ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) น้ำในชั้นนี้จะถูกกระทำด้วยแรงดึงดูดของโมเลกุล ด้วยการต่อต้านกับแรงโน้มถ่วง ซึ่งแรงดึงดูดนี้มีผลในระยะทางที่น้อยมาก สามารถดึงน้ำได้ในช่องว่างเล็กๆระหว่างหินและแผ่ตัวออกเป็นฟิล์มบางๆเคลือบบนผิวของหินหรือเม็ดดินนั้นๆ(สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ,2542)ด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (adhesive force) น้ำที่อยู่ในชั้นดินนี้ เรียกว่า vadose water หรือ soil moisture ชั้นไม่อิ่มด้วยน้ำนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชั้นย่อยโดยเริ่มจากผิวดินด้านบนลงมาถึงระดับน้ำใต้ดิน(ชูโชค,2535) ได้แก่

- ชั้นดิน-น้ำ(soil-water zone) เป็นชั้นที่อยู่ติด กับพื้นผิวดิน การกระจายของความชื้นนี้จะขึ้นกับสภาพผิวดิน ซึ่งแปรเปลี่ยนตามฤดูกาล และชั้นกับระดับน้ำใต้ดิน การเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นนี้เป็นไปได้ทั้งสองทิศทาง โดยเคลื่อนที่ลง เมื่อน้ำซึมผ่านลงมาตามแรงโน้มถ่วง และเคลื่อนที่ขึ้น ในกรณีที่เกิดการระเหย และการดูดน้ำจากพืช ภายในชั้นนี้อาจอิ่มน้ำได้เป็นครั้งคราว เนื่องจากฝนตกหนัก หรือได้รับน้ำ

จากการชลประทานมาก เมื่อการเคลื่อนที่ลงของน้ำโดยแรงโน้มถ่วงหยุดแล้ว ปริมาณน้ำในดินของชั้นนี้ เรียกว่า field capacity และถ้าปริมาณน้ำในดินในชั้นนี้ลดลงไปจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งพืชไม่สามารถดูดเอาไปใช้ได้แล้ว น้ำที่คงค้างอยู่ เรียกว่า hygroscopic water

- ชั้นกลาง (intermediate zone) เป็นชั้นที่มีความหนาแน่นไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดิน ถ้าระดับน้ำใต้ดินสูงมาก อาจไม่มีชั้นนี้ก็เป็นได้ น้ำในชั้นนี้ประกอบด้วยน้ำโดยแรงโน้มถ่วง (gravitational water) จะเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วน pellicular water จะยึดติดอยู่แรง capillary

- ชั้นคาปิลลารี (capillary fringeหรือ capillary zone) เป็นส่วนที่อยู่เหนือเส้นระดับน้ำใต้ดิน (water table) เล็กน้อย โดยเริ่มจากระดับน้ำใต้ดินขึ้นไปจนถึงระดับสูงสุดของความชื้นที่จะถูกดึงขึ้นไปด้วยแงดึงประเภทแรงตึงผิว (surface tension) แรงคาปิลลารี (capillary force) และพลังงานผิว (surface energy) น้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ตามช่องว่างดินในชั้นนี้ด้วยแรงตึงผิว(ฉลอง, 2538) การที่น้ำชั้นนี้อยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินเล็กน้อย เนื่องมาจากความดันในชั้นนี้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยความสูงของชั้นนี้ขึ้นกับขนาดของช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าช่องว่างยิ่งเล็ก น้ำสามารถขึ้นไปได้มากซึ่งเรียกว่า capillary rise

2) ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone)

ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้อยู่ต่อจากชั้นชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturation zone) มีความหนาแน่นแตกต่างกันไปหลายระดับ และแผ่ขยายลงไปจนถึงระดับความลึกของชั้นหินที่ไม่มีช่องว่าง ทุกช่องว่าง รวมถึงรอยแยก หรือโพรง ในชั้นนี้จะเต็มไปด้วย น้ำภายใต้แรงดันที่เรียกว่า hydrostatic pressure เป็นชั้นกักเก็บน้ำใต้ดินดังกล่าวแล้ว ผิวบนของชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้จะอยู่ภายใต้แรงกดดันของบรรยากาศ ซึ่งระดับน้ำสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่างอิสระ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ ซึ่งน้ำที่อยู่ใต้สภาวะนี้เรียกว่าชั้นน้ำอิสระ (unconfined ground water) แต่ถ้าส่วนบนของชั้นนี้อยู่ใต้แรงกดดันของ hydrostatic pressure ซึ่งเกิดจากมีชั้นหินเนื้อแน่น(impermeable formation) ปิดทับอยู่ด้านบน เรียกว่า ชั้นน้ำภายใต้แรงดัน(confined ground water) หรือน้ำบาดาล(artesian water) (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ,2542)

1.2 การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินจะเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่ง โดยไหลผ่านชั้นหินอุ้มน้ำซึ่งมีรูพรุน โดยการไหลของน้ำใต้ดิน เปรียบเสมือนน้ำไหลผ่านท่อที่มีขนาดใหญ่มหาศาล การไหลของน้ำใต้ดินนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ Darcy's law ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองของ Henry Darcy (1856) ที่กรองน้ำด้วยการปล่อยให้น้ำไหลผ่านชั้นทรายตามแนวราบ จากการทดลองของ Darcy พบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านชั้นวัตถุพรุน (Porous Media) แปรผันตรงกับ Head Loss พื้นที่หน้าตัดของกระบอกทราย และธรรมชาติของวัตถุพรุนนั้น แปรผกผันกับความยาวของกระบอกทรายตามแนวการไหล (Darcy, 1856) สามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q \propto \frac{-A\partial h}{\partial L} \quad (1)$$

ดังนั้นถ้า K เป็นค่าคงที่

$$Q = \frac{-KA\partial h}{\partial L} \quad (2)$$

หรือในเทอมทั่วไป

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{-K\partial h}{\partial L} \quad (3)$$

โดย
- Q เป็น อัตราการไหลของน้ำบาดาล [L^3/T]
- K เป็น สัมประสิทธิ์ของการซึมได้ (Hydraulic conductivity) [L/T]
- A เป็น พื้นที่หน้าตัดของชั้นน้ำ [L^2]
- ∂h เป็น ความแตกต่างของระดับน้ำบาดาล[L]
- ∂L เป็น ระยะทางในแนวการไหล [L]
- v เป็น Darcy velocity หรือ specific velocity

ทั้งนี้ เครื่องหมาย(-) หมายถึง การไหลของน้ำไปในทิศทางที่ head ลดลงค่าสัดส่วนคงที่ (K) เรียกว่า hydraulic conductivity หรือ permeability เป็นคุณสมบัติของดินหรือหิน ค่า hydraulic conductivity นี้ จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและช่องว่างของดินหรือวัตถุที่เป็นชั้นน้ำนั้น โดยช่องว่างของวัตถุที่เป็นชั้นน้ำ มีความสามรถในการซึมผ่านมาก ค่า K จะมากตามไปด้วย (ไสว, ม.ป.ป.)

สิ่งที่ Darcy ไม่ได้คำนึงถึง คือ ความพรุนของเม็ดตะกอน ทั้งที่น้ำใต้ดินไหลอยู่ในช่องว่างของเม็ดดิน หรือตะกอน จึงจำเป็นต้องนำค่าที่เกี่ยวข้องกับช่องว่างของเม็ดดิน หรือตะกอนมาคำนวณด้วย ค่าดังกล่าวนั้นคือ ความพรุนต่อเนื่อง (Effective porosity, n_e) (กิจการ, 2547) ได้สมการดังนี้

$$v_a = \frac{Q}{n_e A} = \frac{-K\partial h}{n_e \partial L} \quad (4)$$

ความพรุนต่อเนื่อง (Effective porosity, n_e)

$$n_e = \frac{v_v}{v_t} \quad (5)$$

โดย v_a เป็น ความเร็วการไหลของน้ำใต้ดินระหว่างช่องว่างของเม็ดตะกอน

v_v เป็น ปริมาตรของช่องว่าง (Effective void volume)[L^3]

v_t เป็น ปริมาตรทั้งหมด(Total volume)[L^2]

ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า การไหลของน้ำใต้ดินเปรียบเสมือนกับน้ำที่ไหลภายในท่อขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะการไหลของน้ำผ่านท่อมีอยู่ 2 ประเภท คือ การไหลแบบ Laminar flow และการไหลแบบ Turbulent flow (Mendel, 1989) ซึ่งการแบ่งแยกว่าเป็นลักษณะการไหลแบบใด สามารถอธิบายด้วย Reynolds Number (N_R)

$$N_R = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (6)$$

โดย D เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ [L]

V เป็น ความเร็วในการไหลของน้ำ [L^3/T]

ρ เป็น ความหนาแน่นของน้ำ [M/L^3]

μ เป็น Dynamic viscosity ของน้ำ [M/LT]

ซึ่งการไหลของน้ำผ่านวัตถุพรุนใน Darcy's law ใช้ได้ดี เมื่อ $N_R < 1$ ซึ่งข้อจำกัดของ Darcy's law ไม่สามารถใช้ได้ในการไหลของน้ำที่ไหลเร็ว และเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) แต่

ใช้ได้เฉพาะการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งเป็นการไหลในความเร็วค่อนข้างต่ำ และโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ไปตามแนวราบเรียบเกือบๆขนานกับขอบของแข็งในช่องว่าง การไหลแบบราบเรียบนี้แรงหนืด (viscous force) ของของไหลจะมีอิทธิพลเหนือแรงอื่นๆ ดังนั้น head loss จะเปลี่ยนไปตามความเร็วเช่นเดียวกันกับ Darcy's law ถ้าความเร็วเพิ่มขึ้นถึงจุดๆหนึ่ง แรงเฉื่อย (inertial force) จะมีอิทธิพลเหนือแรงอื่นเป็นเหตุให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เป็นแนวสับสนไม่เป็นระเบียบ แม้การไหลในท่อตรงก็ตาม เกิดกระแสหมุนวน (eddies) เป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน(turbulent flow)(ฉลอง ,2528);(Younger,2007);(ไสว, ม.ป.ป)

ซึ่ง Harr (1992) กล่าวว่าค่า critical value ของค่า Reynolds Number (N_R) น้ำที่ไหลในดินสามารถเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบ(laminar flow) ไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ด้วยช่วงระหว่าง 1-12 ซึ่งค่า Reynolds Number (N_R) ดังกล่าวสามารถทำให้ทราบได้ว่าน้ำใต้ดินส่วนมากจะเคลื่อนที่ โดยการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) เสมอ ส่วนการไหลแบบปั่นป่วนอาจเกิดขึ้นได้ในช่องว่างใหญ่ๆและมีความลาดทางชลศาสตร์มากๆ อีกกรณีที่ Darcy's law อาจไม่สามารถใช้ได้ คือ เมื่อน้ำมีค่า permeability (K) ต่ำ เพราะมีช่องว่างขนาดเล็กมาก ความลาดทางชลศาสตร์ (hydraulic gradients) จะไม่สามารถขับดันไปให้น้ำไหลผ่านได้ โดยช่องว่างของเม็ดดิน หรือตะกอนที่มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 10 μm การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน จะใช้แรงผลักดันให้เคลื่อนที่จาก natural hydraulic gradient ได้ช้ากว่าการแพร่ผ่านของโมเลกุล(molecular diffusion) ซึ่งในกรณีนี้ Darcy's law ใช้ไม่ได้ผล (Younger,2007)

1.3 คุณภาพน้ำใต้ดิน

ในธรรมชาติน้ำบาดาลมีคุณภาพต่างกันแต่ละพื้นที่ ในบางพื้นที่พบว่าคุณภาพน้ำใต้ดินมีความกระด้างและเหล็กสูง หรือมีสิ่งปนเปื้อนจากผิวดินลงไป โดยปกติคุณภาพของน้ำใต้ดินทางกายภาพและชีวภาพจะอยู่ในเกณฑ์ดี เช่น มีความใส ปราศจากตะกอนความขุ่น ปราศจากเชื้อจุลชีพ เนื่องจากถูกกรองด้วยชั้นของดิน แต่สำหรับคุณภาพของน้ำใต้ดินทางเคมีมักจะไม่แน่นอน ส่วนมากมักจะมีแร่ธาตุและสารเคมีและลายปะปนอยู่ในน้ำที่มีปริมาณมากกว่าน้ำผิวดิน

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีในน้ำใต้ดิน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาล [ไมโครกรัมต่อลิตร]
เบนซิน	5
โทลูอีน	1,000
ไซลีน	10,000
เอธิลเบนซิน	700
ไตรคลอโรเอทธิลีน	5000

ที่มา: พระราชบัญญัติคุณภาพน้ำบาดาล (2542)

2. ของเสียที่ไม่ละลายน้ำ(Non-aqueous Phase Liquids; NAPL's)

ของเสียที่ไม่ละลายน้ำ(Non-aqueous Phase Liquids ; NAPL's) เป็นองค์ประกอบหนึ่งในปิโตรเลียม ซึ่งปิโตรเลียมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีของสารอินทรีย์ในชั้นใต้ดินลึกเป็นเวลานับพันปี ซึ่งสารประกอบของปิโตรเลียม เช่น ไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ปิโตรเลียมสามารถมีได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ก๊าซธรรมชาติ 2)น้ำมันดิบ 3)ของแข็งยางมะตอย (เกรียงศักดิ์,2546) โดยปิโตรเลียมนำไปเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนมาก ทำให้เกิดการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมตามที่ต่างๆ ปิโตรเลียมถูกกลั่นมาจากพวกน้ำมันดิบ โดยน้ำมันดิบสารประกอบประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กับ ไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันดิบมี 3 ประเภท(ปราโมทย์ ,2533)

1) พาราฟิน (paraffin or alkanes)
2) แนฟทีน (naphthenes or cycloalkanes)
3) อะโรมาติก (aromatic compound)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง คือ โอเลฟิน (olefins or alkenes) ไม่ได้พบในน้ำมันดิบตามธรรมชาติ แต่เกิดจากกระบวนการแตกตัว (cracking) ต่างๆที่ใช้ในโรงกลั่น ซึ่งจะกลายเป็นของเสีย ปกติน้ำมันดิบที่ถูกกลั่น หรือ ถูกเปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นผลผลิตปิโตรเลียมหลากหลายตามการใช้งาน โดยผลผลิตปิโตรเลียมสามารถถูแบ่งออกได้ 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1) น้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น
2) สารปิโตรเคมี ได้แก่ ตัวทำละลาย(solvent) พลาสติก ทินเนอร์ เป็นต้น

เนื่องจากส่วนประกอบหลักในปิโตรเลียม คือ ไฮโดรคาร์บอน(hydrocarbon) คุณสมบัติของไฮโดรคาร์บอน คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทุกชนิดจัดเป็นโมเลกุลไม่มีขั้วแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ โมเลกุลโคเวเลนต์มีขั้วละลายน้ำได้ โดยโมเลกุลของน้ำ จะหันขั้วที่มีอำนาจไฟฟ้าตรงกันข้าม เข้าดึงดูดกับโมเลกุลโคเวเลนต์มีขั้วหรือไอออน น้ำที่ล้อมรอบจะมีจำนวนมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับขนาด และประจุของโมเลกุลหรือไอออน ซึ่งไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดละลายน้ำได้น้อยมาก และเมื่อสัมผัสกับน้ำ จะเกิดการแยกชั้น(immiscible) ออกจากน้ำอย่างชัดเจน ซึ่งไฮโดรคาร์บอนสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ (ประดิษฐ์,2545);(เกรียงศักดิ์ ,2546)

1) Aliphatic Hydrocarbon ในกลุ่มนี้ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 5 ตัว จนถึง 12 ตัว ของหมู่ Alkanes เป็นสารประกอบพวกโมเลกุลโซ่เปิด(Open chain) ไม่ต่อกันเป็นวงแหวน เรียกอีกอย่างว่าสารประกอบ Acyclic compound เช่น n-hexene , n-octane , cycloalkane alkylcycloalkane เป็นต้น

2) Aromatic Hydrocarbon ในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบที่โลเลกุลต่อกันเป็นโซ่ปิด (close chain) เรียกอีกชื่อว่า สารประกอบไซคลิก (cyclic compound) เช่น เช่น เบนซีน (benzene) โทลูอีน(toluene) เอทธิลเบนซีน(ethylbenzene) และไซลีน(xylene) เป็นต้น

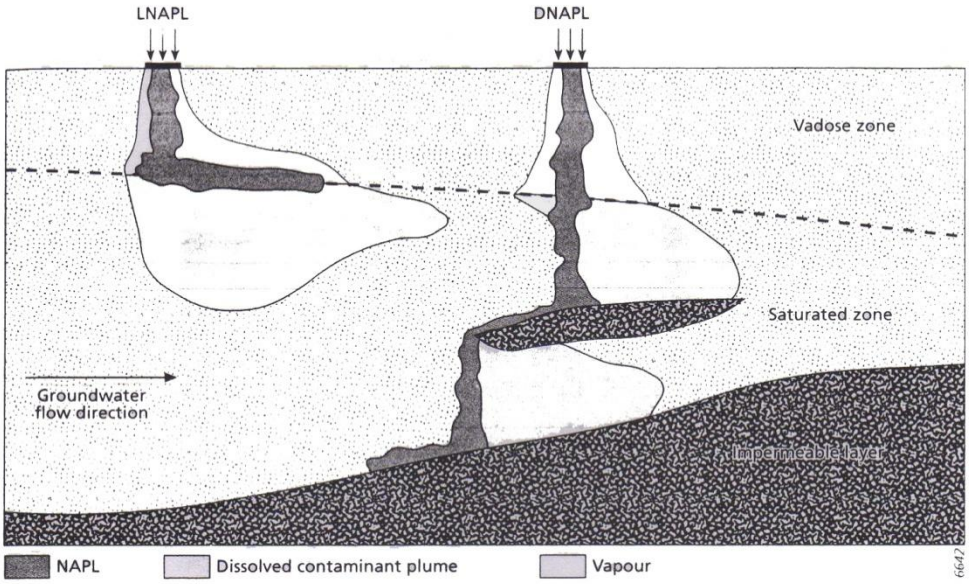
2.1 พฤติกรรมการปนเปื้อนของ LNAPLs ในชั้นน้ำใต้ดิน

ของเสียที่ไม่ละลายน้ำ(Non-aqueous Phase Liquids ; NAPL’s) ถูกค้นพบอย่างมากในการปนเปื้อน ชั้นใต้ดินและน้ำใต้ดินโดยถูกปลดปล่อยออกจากสถานกำจัดมูลฝอยอันตรายและสถานกำจัดมูลฝอยชุมชน ที่ถูกใช้งานมานาน หรือมีระบบการจัดการที่มี่ ซึ่งส่วนมากปัญหาการปนเปื้อน NAPLs นี้

เกี่ยวข้องกับการรั่วซึมของท่อหรือบรรจุภัณฑ์ของปิโตรเลียม ท่อที่เกิดจากการกัดกร่อน บ่อบาดาลที่ร้าง และอุบัติเหตุต่างๆ(Testa,1994);(Cohen and Mercer,1993) ซึ่ง NAPLs เหล่านี่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจาก NAPLs เกิดการตกค้างภายในชั้นดิน และถ้าปริมาณ NAPLs มีมากพอก็จะสามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ระดับน้ำใต้ดิน(water table) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว โดยปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมการปนเปื้อนที่ต่างกัน คือ ความหนาแน่น ดังภาพที่ 1 ซึ่ง NAPLsสามารถถูกแบ่งประเภทได้ตามความหนาแน่น เมื่อเทียบกับน้ำโดยความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 g/cm^3 (Testa,1994)

NAPLs ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (< 1 g/cm^3) เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินจะเกิดสภาพการลอยอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน เรียกสารปนเปื้อนชนิดดังกล่าวว่า LNAPLs (Light Nonaqueous Phase Liquid) ชนิดของ LNAPLs ส่วนมากคือ ปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการกลั่น เช่น gasoline, diesel และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งทางอากาศ

ส่วนของ NAPLs ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ (> 1 g/cm^3) เรียกว่า DNAPLs (Dense Non-aqueous Phase Liquid) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภท chlorinated solvent (PCBs) และ tar ซึ่ง NAPLs แต่ละชนิดเกิดจากการผสมของสารที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันได้อย่างหลากหลาย ซึ่งพฤติกรรมของ NAPLs นั้นๆ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารที่เติมลงไปเป็น NAPLs ชนิดต่างๆ(Hardisty and Özdemiroglu,2005) ซึ่ง Frenstra and Cherry ไดกล่าวว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของ NAPLs ขึ้นอยู่กับ 1) ปริมาณของ NAPLsที่ไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม 2) ลักษณะพื้นที่ที่ถูก NAPLs ปนเปื้อน 3) ระยะเวลาที่ NAPLs ถูกปลดปล่อย 4) คุณสมบัติของ NAPLs 5) สภาวะของการไหลในชั้นใต้ดิน โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะของเสียที่ไม่ละลายน้ำ ประเภท ความหนานแน่นน้อยกว่าน้ำ(Light Nonaqueous Phase Liquid ; LNAPLs)

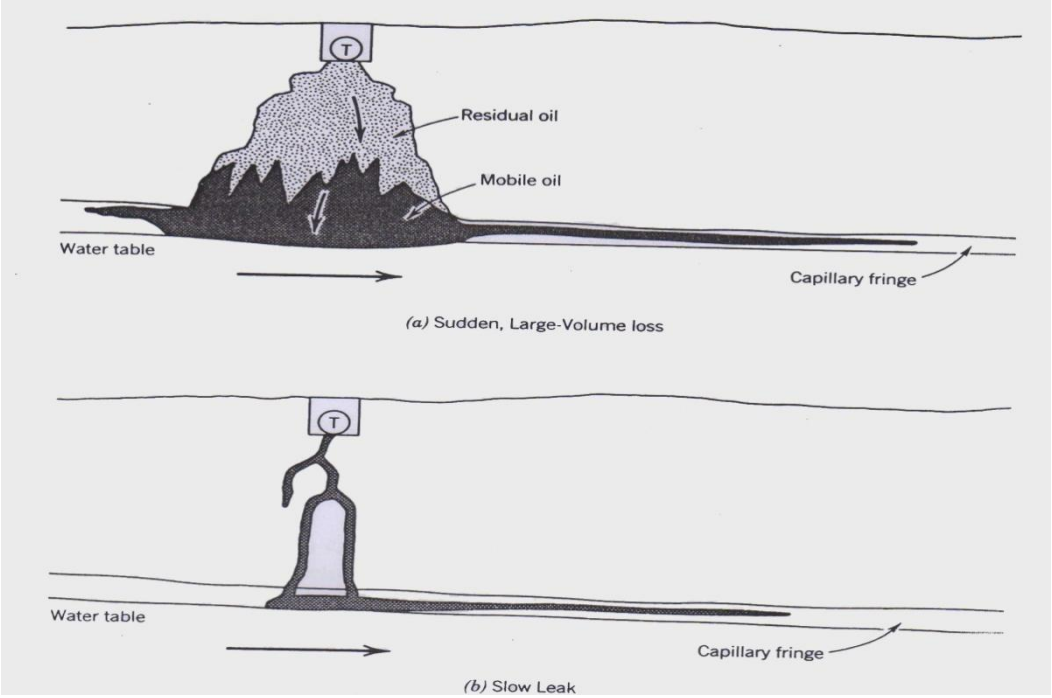


ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่ NAPLs ที่แบ่งแยกตามความหนาแน่น คือ LNAPLs และ DNAPLs

ที่มา : Mercel van der perk (2006)

เมื่อการหก หรือรั่วซึมของ LNAPLs ลงสู่ชั้นใต้ดิน สารปนเปื้อนจะซึมผ่านชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Zone) ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวดิ่งด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก(gravitational force)(Fetter,1999) ความสามารถของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความไม่เป็นระเบียบของเม็ดดินหรือหินตะกอนต่างๆ(Lehr *et al.* . ,2002) ซึ่งปกติในชั้นใต้ดินจะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ เนื่องมากจากชั้นดินเกิดจากดิน หลายชนิดอยู่ร่วมกัน Hardisty and Özdemiroglu (2005) อธิบายว่า ตัวกลางที่ไม่เป็นระเบียบ(heterogonous media) จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง และเกิดการแผ่กระจายไปทางด้านข้างในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Domenico and Schwartz (1990) อธิบายว่า รูปแบบการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนขึ้นอยู่กับบริเวณที่เกิดการปนเปื้อนเช่นเดียวกัน การปล่อยของสารปนเปื้อนในปริมาณมากๆและในระยะเวลาอันสั้น สารปนเปื้อนจะสามารถเคลื่อนที่ลงอย่างรวดเร็วและมีการแพร่กระจายออกทางด้านข้าง เป็นรูปกรวยดังภาพที่ 2 (บน) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยสารปนเปื้อนอย่างช้าๆระยะเวลานาน การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปตามช่องที่สามารถซึมผ่านไปได้โดยสะดวกมากดังภาพที่ 2 (ล่าง) ซึ่งช่องดังกล่าวนี้อาจเป็นช่องเดี่ยวหรือแขนงก็เป็นได้ เมื่อ LNAPLs เคลื่อนที่ไป สารปนเปื้อนนี้สามารถเกาะที่ผิวของอนุภาคเม็ดดินอย่างหลวมๆ เรียกว่า sorbed contaminated (Pinder *et al.* ., 2006)

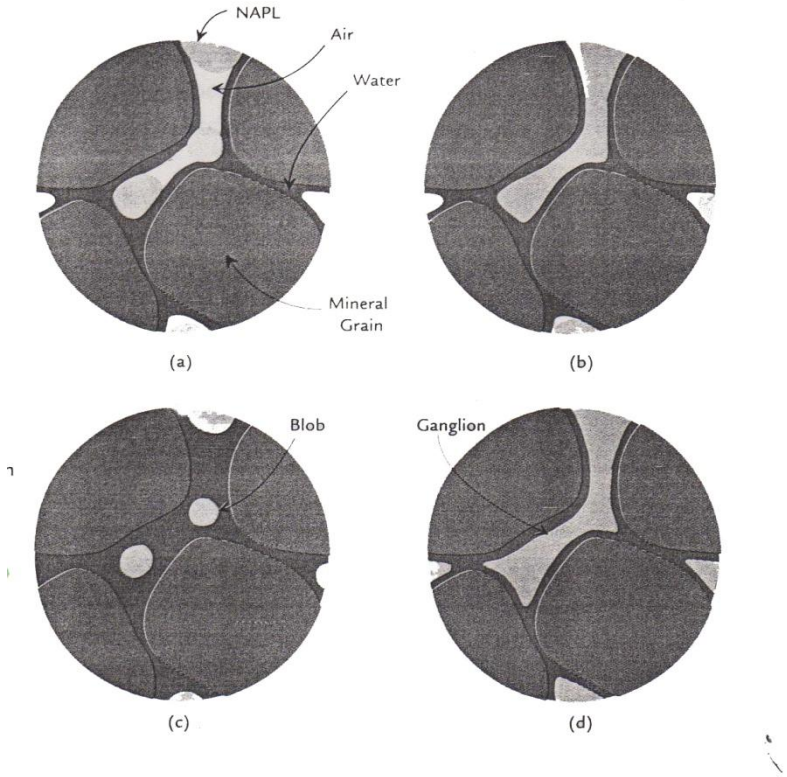


ภาพที่ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของNAPLs โดยภาพบนแสดงการเคลื่อนที่ของ NAPLs จากแหล่งที่มีปริมาณและเกิดการไหลอย่างรวดเร็ว ทางด้านรูปล่างแสดงการเคลื่อนที่ออกจากแหล่งอย่างช้าๆและมีปริมาณของสารปนเปื้อนน้อย

ที่มา : Domenico and Schwartz (1990)

ซึ่ง Fitts (2002) ได้อธิบายในเรื่องของพฤติกรรมของของไหลที่ไม่ผสมกับน้ำ(NAPLs)ในโพรงหรือรูในเม็ดดินว่า ของไหลมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงๆสามารถจับบนผิวของของแข็งที่เป็นแผ่นฟิล์มบางๆในขณะที่ของไหลชนิดอื่นๆที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อยกว่าไม่สามารถเคลือบอยู่บนผิวของของแข็งได้แต่จะอาศัยอยู่บริเวณศูนย์กลางของโพรงหรือรูนั้นแทน โดยของไหลที่สามารถเคลือบผิวของของแข็ง เรียกว่า wetting fluid และของไหลอื่นๆนั้น เรียกว่า non-wetting fluid โดยทั้งในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะเป็น wetting fluid ขณะที่อากาศและ/หรือ NAPLs เป็น non-wetting fluid ถ้าในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำที่มีลักษณะที่แห้งมาก(ปราศจากน้ำ) NAPLs กลายเป็น wetting fluid แทน ปริมาณของ NAPLs ที่ถูกกักไว้ในโพรงนั้นขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลัก คือ ความพรุนของดิน(porosity) และคุณสมบัติพื้นฐานของสารปนเปื้อนนั้น(Freeze and Cherry,1979)

เมื่อปริมาณของ LNAPLs ถูกกักไว้ในโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินมีปริมาณต่ำ LNAPLs จะมีรูปร่างคลายกับทรงกลมเรียกว่า blobs ซึ่งไม่เคลื่อนที่การเกิด blobs นั้นจะเกิดในโพรงหรือรูที่มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าปริมาณ LNAPLs ในโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินมีปริมาณมาก blobs เหล่านั้นจะรวมตัวกันเป็นรูปร่างอื่น เป็นร่างแห เรียกว่า ganglia ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน การเกิด ganglia อาจเกิดได้ในกรณีที่โพรงหรือรูมีการเชื่อมกันอย่างหลวมๆ ถ้า LNAPLs รวมตัวกันมีปริมาณมากพอจะทำให้เกิดการพลักดันไปสู่โพรงหรือรูของเม็ดดินใหม่ LNAPLs ที่ไม่เคลื่อนที่จะอาศัยอยู่ในโพรงหรือรูในเม็ดดินนั้น เรียกว่า residual saturation (Domenico and Schwartz,1990)



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของ NAPLs ที่ถูกกักไว้ในโพรงที่มีลักษณะเป็นได้ทั้งอนุภาค (Blob) และรวมกันเป็นร่างแห(Ganglia)

ที่มา : Fitts (2002)

Fitts (2002) ยังกล่าวต่อไปว่า LNAPLs นั้นไม่ใช่อยู่รูปของ Blobs หรือ Ganglia เท่านั้น NAPLs ยังสามารถอยู่ในรูปของคอลลอยด์(colloidal) ได้อีกด้วย โดย NAPLs ที่มีขนาดเล็กมากๆ (droplet) มีขนาดน้อยกว่า 10 μm ซึ่ง NAPLsในรูปของคอลลอยด์นี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปกับการไหลของน้ำใต้ดิน ไหลผ่านโพรงหรือรูของชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งคอลลอยด์สามารถเคลื่อนที่ไปได้

เร็วกว่าค่า average linear velocity(v)ของน้ำ และคอลลอยด์เหล่านี้สามารถถูกเก็บเอาไว้ในความพรุนของอนุภาคของดินได้ด้วยการซับ(sorption) เนื่องด้วยคอลลอยด์มีประจุที่ผิวทำให้เกิดแรงดึงดูดและมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวกับน้ำหนักมหาศาล จึงทำให้เกิดการดูดซับมาก

ซึ่ง Domenico and Schwartz(1990) กล่าวว่าผลของการดูดซับและตกค้างของ LNAPLs ที่อยู่ระหว่างโพรงหรือรูของเม็ดดินดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น ทำให้ปริมาณของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่มีปริมาณลดลงในกรณีที่แหล่งกำเนิดของของเสียที่ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นปริมาณของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ลงในระยะทางไกลๆจะมีค่าน้อยกว่า ปริมาณของสารปนเปื้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาทั้งหมด ถ้าปริมาณของสารปนเปื้อนมีน้อย การเคลื่อนที่ของ LNAPLs จะหยุดบริเวณที่ชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเท่านั้น แต่ถ้าสาร LNAPLs ที่ปนเปื้อนมีปริมาณมากเกินกว่าที่ถูกเก็บกักไว้เป็น Residual Saturation แล้วการเคลื่อนที่ของสารจะดำเนินไปถึงชั้นคาปิลลารี่(Capillary zone) (Hardisty and Özdemiroglu,2005)

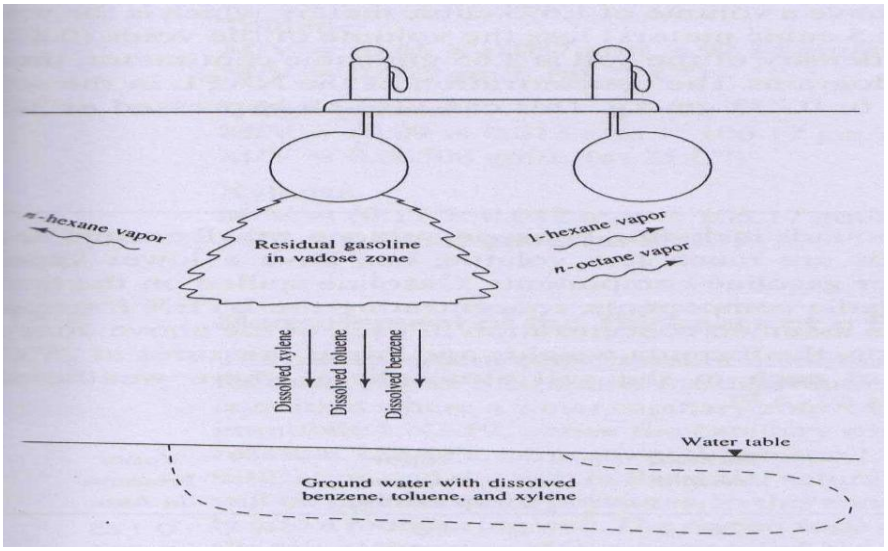
ซึ่งภายในชั้นนี้จะทำให้เกิดการแผ่กระจายทางด้านข้าง เนื่องมาจากแรงคาปิลลารี่(capillary force) ที่กระทำร่วมกับแรงโน้มถ่วง (gravitational force) ทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ทำให้ LNAPLs ที่อยู่ชั้นบนชั้นคาปิลลารีจะมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบการแผ่กระจายไปทิศทางข้างๆมากขึ้น เนื่องจากบริเวณบริเวณชั้นคาปิลลารี่มีน้ำที่อิ่มตัวอยู่ในโพรงหรือรูปริมาณมาก เนื่องจากแรงคาปิลลารีและค่า relative permeability ของ LNAPLs มีค่าลดลงด้วยเหตุนี้ สารปนเปื้อนจึงแนวโน้มที่ค่อนข้างแผ่กระจายไปทางด้านข้างตรงบริเวณด้านบนของชั้นคาปิลลารีซึ่ง Fitter(1990) ได้อธิบายว่าการเคลื่อนที่ลงของ LNAPLs มาถึงชั้นคาปิลลารี่นั้นบางส่วนของสารปนเปื้อนจะเกิดการแทนที่น้ำที่อาศัยอยู่ในชั้นคาปิลลารีที่เรียกว่า capillary water จากนั้น LNAPLsเริ่มสะสมตัวกลายเป็นชั้นอยู่เหนือชั้นคาปิลลารีเรียกว่า oil table และเหนือระดับ oil table จะเกิด oil capillary fringe จนในที่สุดชั้นคาปิลลารี่อาจหายไปจึงทำให้ LNAPLs สัมผัสกับระดับน้ำใต้ดินโดยตรง ซึ่งผิวของ LNAPLs ที่ลอยสัมผัสกับน้ำใต้ดินจะมีลักษณะรูปร่างโค้งนูน(lens-shapped bottom) เมื่อ LNAPLs แพร่กระจายต่อเนื่องจนกระทั่งปริมาณของสารปนเปื้อนในชั้นดังกล่าวอยู่ในสภาวะ residual saturation จนมีความเสถียร ชั้นน้ำมันหรือสารปนเปื้อนดังกล่าวจะไปกดทับระดับน้ำใต้ดิน(water table) ให้ต่ำลง เนื่องมาจากน้ำหนักของชั้น LNAPLs ที่ถ่ายลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลก(gravitational force)

การที่ชั้นของ LNAPLs (free product) มีผลกับชั้นคาปิลลารี่มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับอัตราการปลดปล่อยสารปนเปื้อน ถ้าอัตราการปลดปล่อยสารปนเปื้อนมีค่าสูง สารปนเปื้อนจะถึงชั้นคาปิลลารี่ได้ในระยะสั้นๆ ทำให้ระดับของ fringe ลดลง และไปกดทับระดับน้ำใต้ดิน โดยพื้นที่ที่ถูกกดทับนั้นขึ้นอยู่

กับปริมาณและความหนาแน่นของสารปนเปื้อน แต่ถ้าอัตราการปลดปล่อยต่ำก่อให้เกิดผลกระทบต่อระดับของ capillary fringe หรือระดับของชั้นน้ำใต้ดินน้อยมาก (Domenico and Schwartz, 1990)

ขณะที่ LNAPLs เคลื่อนที่หรือถูกกักไว้ในโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ LNAPLs บางส่วนจะเกิดการละลายสู่น้ำในโพรงเหล่านี้อย่างช้าๆ เนื่องจากสารปนเปื้อนที่เป็น NAPLs ทั้งหมดสามารถละลายน้ำได้ แต่มีความสามารถในการละลายต่ำ (Fitts, 2002) เมื่อ LNAPLs ที่มีปริมาณมากพอสามารถเคลื่อนที่มาถึงระดับน้ำใต้ดิน บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง LNAPLs กับระดับน้ำใต้ดินก่อให้เกิดการละลายของ LNAPLsลงสู่น้ำใต้ดิน ทำให้เกิดรูปร่างของสารปนเปื้อนในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำเรียกว่า plume โดย plume จะเคลื่อนที่ไปตามระดับความชัน(slope)ของน้ำใต้ดิน โดยอาศัยกระบวนการแพร่(diffusion) และการพา(advection) โดยบางกรณี plume อาจเคลื่อนที่ไปได้ไกลจนถึงชั้น aquifer(Fitts, 2002);(Pinder and Celia, 2006)

กระบวนการเคลื่อนที่ของLNAPLs มิได้มีเพียงการเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งเท่านั้น สารปนเปื้อนบางชนิดที่คงค้างอยู่ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ อาจสามารถเกิดการระเหย(vapor phase) ได้ดีเท่ากับการละลายใน capillary water ซึ่งสารปนเปื้อนสามารถระเหยได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการระเหยและความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อน โดยค่าที่ความสำคัญในการบ่งชี้ความสามารถในการระเหย คือ Henry’s law constant หรือ water-air partition coefficients สารประกอบใดๆที่มีค่าคงที่นี้ต่ำ เช่น อัลเคน(Alkanes) จะมีความสามารถในการระเหยได้ดี แต่ถ้ามีค่าคงที่มากสารประกอบเหล่านี้จะสามารถละลายน้ำได้ดี เช่น เบนซิน (benzene) โทลูอีน(toluene) เอทธิลเบนซิน(ethylbenzene) และไซลีน(xylene) สารประกอบเหล่านี้มีความสามรถในการละลายใน capillary phase ได้ดี เมื่อสารปนเปื้อนสามารถเคลื่อนมาถึงชั้นคาปิลลารี่ได้โดยเกิดการระเหยน้อยมาก



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนตามคุณสมบัติของแต่ละสารปนเปื้อนนั้นๆ

ที่มา : Fitter (1993)

อีกปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้น คือ การลดและการเพิ่มของระดับน้ำใต้ดิน อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน(water table) คือ ของไหลที่มีน้ำหนักน้อยกว่าน้ำที่ลอยอยู่ด้านบนของระดับน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนแบบถูกกักเก็บในโพรงหรือรูของเม็ดดิน (residual saturation) และชั้นของไหลที่เคลื่อนที่ได้ตามความชันของระดับน้ำใต้ดิน (free product) การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินทำให้เกิดการลดปริมาณของ free product แต่เพิ่มการกักเก็บในโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินแทน (Domenico and Schwartz, 1990) ถ้าระดับน้ำใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงมากก่อให้เกิดการปนเปื้อนมากขึ้น โดยพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน เรียกว่า smear zone (Pinder and Celia, 2006) สาเหตุสำคัญที่ทำให้ระดับน้ำใต้ดินเปลี่ยนแปลง คือ ฤดูกาล

เมื่อระดับน้ำใต้ดินเคลื่อนที่ลดลง ชั้นของไหลที่เคลื่อนที่ได้ตามความชันของระดับน้ำใต้ดิน (free product)จะลดลงตามระดับน้ำใต้ดินด้วย ในขณะที่ free product เคลื่อนที่ไปตามระดับน้ำใต้ดิน จะเกิดการกักเก็บไว้ในโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินตามระยะทางที่ free productเคลื่อนที่ลง มีผลให้ระดับของ oil table เคลื่อนลงตามไปด้วย เมื่อระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้น oil table จะเคลื่อนที่ตามระดับน้ำใต้ดิน แต่อย่างไรก็ตาม residual oil ที่ถูกเก็บกัก เมื่อระดับน้ำใต้ดินลดลง ยังคงหลงเหลืออยู่ในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

(unsaturated zone) ถ้าระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าการเพิ่มของระดับ oil table ที่กำลังจะเพิ่มขึ้นตาม ปรากฏการณ์นี้จะทำให้สารปนเปื้อนที่เป็น free product คงค้างอยู่ภายใต้น้ำใต้ดิน โดยงานวิจัยนี้ทำการบำบัดของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (LNAPLs) โดยใช้ตัวแทนของ LNAPLs คือโทลูอีน ส่วนตัวแทนของของเสียที่ไม่ละลายน้ำ(DNAPLs) คือ สารไตรคลอโรเอทธิลี เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้

2.2 พฤติกรรมการปนเปื้อนของ DNAPLs ในชั้นน้ำใต้ดิน

ของเสียที่ไม่ละลายน้ำที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ(Dense Non-aqueous Phase Liquid; DNAPLs) โดยรวมถึงสารประกอบอินทรีย์ทีประกอบด้วยคลอรีน โบรมีน หรือ ฟลูออรีน มากกว่าหรือเท่ากับ 1 หมู่ โดยพฤติกรรมการปนเปื้อนของ DNAPLs เมื่อเกิดการปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำใต้ดินจะก่อให้เกิดกระบวนการ 4 กระบวนการ คือ 1) การละลาย (Dissolution) ลงสู่น้ำใต้ดินหรือน้ำในดิน 2) การระเหยของสารเคมีที่ละลายในน้ำสู่อากาศ (Volatilization) 3) การระเหยของ DNAPLs สู่อากาศ (Vaporization) 3) การดูดซับ หรือ ดูดซึมลงสู่ดิน (Sorption) (Pankow and Cherry,1996)

เมื่อ DNAPLs ปนเปื้อนลงสู่ดินจะเกิดการเคลื่อนที่ลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก โดยปริมาณของ DNAPLsที่เคลื่อนได้จะมีบางส่วนตกค้างอยู่ในโพรง หรือรูระหว่างเม็ดดิน ณ ชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ DNAPLs มีความสามารถที่จะซึมผ่านได้ดีกว่าน้ำ เนื่องจาก DNAPLs เป็น non-wetting fluid จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูหรือโพรงได้ดีกว่าน้ำที่เป็น wetting fluid (Fitter, 1993)

อีกปัจจัยที่ DNAPLs เคลื่อนที่ในชั้นใต้ดินได้ดี เพราะมีความหนาแน่นสูง ความหนืด และความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ (Hasan,1996) ด้วยคุณสมบัติการละลายน้ำได้น้อยนี้ ก่อให้เกิดการแยกชั้นของสารปนเปื้อนกับน้ำ ส่วนคุณสมบัติที่มีความหนาแน่นสูง และความหนืดที่ต่ำ ทำให้ DNAPLs เคลื่อนที่ได้ดีจนถึงชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยขณะเคลื่อนที่ DNAPLsจะไปแทรกตัวแทนที่น้ำที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของ DNAPLs ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารปนเปื้อนที่ออกมากปนเปื้อนสู่ส่งแวดล้อม ถ้าสารปนเปื้อนมีการหกหรือรั่วซึมในปริมาณน้อย สารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่ไปชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำตามแรงโน้มถ่วงของโลก ขณะเคลื่อนที่ DNAPLs จะเข้าไปแทนที่น้ำใต้ดิน ซึ่ง DNAPLs มีความหนืดน้อยกว่าน้ำ ทำให้เกิดของเหลวไม่เสถียร (unstable liquid)(Mirsal,2004) และจะหยุดเมื่อ DNAPLs ถูกกักเก็บไว้ในโพรงระหว่างเม็ดดินจนหมด หรือลักษณะการปนเปื้อนในปริมาณน้อยก่อให้เกิดรูปร่างการไหลที่เรียกว่า viscous fingering ซึ่งมีลักษณะการไหลเป็นทางยาวตามแนวดิ่งเล็กๆเป็นสาย โดยขณะที่สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ลงนั้นจะเกิดการระเหยเป็นไปตามบางส่วน

(vapor phase) ส่วน DNAPLs ที่เหลืออยู่จะเคลื่อนสู่ชั้น Capillary อาจเข้าสู่ชั้นระดับน้ำใต้ดิน(water table) ทำให้เกิดการเคลื่อนไปตามด้านข้าง (spreading) เนื่องจากแรงคาปิลลารี ทำให้ DNAPLs สัมผัสกับน้ำใต้ดินเกิดการละลายสารเคมีลงสู่ชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

ถ้าสารปนเปื้อนมีการรั่วซึมสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปริมาณมาก พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของ DNAPLs จะต่างออกไป โดยเคลื่อนผ่านชั้น capillary และระดับน้ำใต้ดิน โดยขณะเคลื่อนผ่านชั้นเหล่านี้ จะเกิดแรงต้านทานจาก capillary force ถ้ามวลของ DNAPLs มากกว่าแรงต้าน จะเกิดการเคลื่อนที่ลงจนถึงชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ถ้ามีปริมาณมากเพียงพอจะสามารถเคลื่อนจนถึงชั้นหินแข็ง (aquitard) ก่อให้เกิดการสะสมของ DNAPLs เป็น free product ที่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ เรียกว่า pool โดยการไหลผ่านระดับน้ำใต้ดินจนถึงชั้นหินที่ซึมผ่านได้ยากแล้ว DNAPLs บางส่วนจะละลายกับน้ำใต้ดิน เรียกว่า plume

โดยชั้นหินที่ซึมผ่านได้ยากอาจมีบางส่วนเป็นรอยแตก ภายในชั้นหิน ดังนั้น free product ของ DNAPLs สามารถที่จะเคลื่อนที่แทรกตัวเข้าไปตามรอยแยกเหล่านั้นได้ ซึ่งการเคลื่อนที่ของ free productในชั้นหินแข็งถูกควบคุมด้วยการเชื่อมต่อระหว่างรอยแยกนั้น และลักษณะของรอยแยก (Pankow and Cherry, 1996) โดยรอยแยกในแนวดิ่งอาจเชื่อมต่อกับรอยแตกในแนวขวาง จึงมีผลให้ DNAPLs เคลื่อนที่ลงผ่านรอยแยกนั้นไปเชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ในบางครั้งโพรงต่างๆอาจโยงใยเป็นร่างแห และในบางตำแหน่งอาจเป็นโพรง ขนาดใหญ่มาก ก่อให้เกิดการสะสมในโพรงเหล่านั้น ซึ่งทำการบำบัดฟื้นฟูได้ยาก

2.3 การถ่ายเทมวลของสาร NAPLs ในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ

การปนเปื้อนของ NAPLs สามารถแบ่งได้จากการเคลื่อนที่ระหว่างสถานะในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำได้ 3 สถานะ คือ ดิน น้ำ และ สารปนเปื้อน(NAPLs) เมื่อเกิดการปนเปื้อนของ NAPLs ระหว่างสถานะในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ มวลของNAPLsจะเข้าสู่สมดุล(equilibrium condition) โดยสามารถแบ่งตามการถ่ายเทมวลระหว่างสถานะในชั้นใต้ดินดังนี้ 1) NAPLs-น้ำ เกิดการถ่ายเทมวลแบบการละลายNAPLs ถ่ายเทมวลสู่น้ำ 2) NAPLs-ดิน เกิดการถ่ายเทมวลแบบการดูดซับ(Adsorption) เป็นการถ่ายเทมวลสู่ Solid phase ซึ่งกระบวนการถ่ายเทมวลในแต่ละสถานะสามารถแบ่งตามการกระจายของNAPLs หลังจากเกิดการรั่วไหลลงสู่ชั้นใต้ดิน ดังนี้

2.3.1 การถ่ายเทมวลระหว่าง NAPLs-ดิน

เมื่อ NAPLsเกิดการปนเปื้อนในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ) NAPLsจะเกิดกระบวนการซับ(sorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เคลื่อนจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง โดยผ่านเส้นแบ่งสภาวะ (boundary) โดยการดูดซับ(adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยการซับจะเกิดการเคลื่อนของโมเลกุลสารอินทรีย์สู่ผิวของตัวซับ โดยปกติแล้วการส่งผ่านในชั้นฟิล์มและการแพร่ผ่านในรูพรุนเป็นขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ดังนั้นจึงเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการดูดซับ (rate limiting step) เมื่อใดที่การแพรในรูพรุนเป็นกระบวนการที่ควบคุมการดูดซับ อัตราการแพร่ผ่านจะลดลง เมื่อสารนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นและขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลง โดยมีแรงตางๆที่ควบคุมการดูดซับ ได้แก่แรงดึงดูดระหว่างขั้ว และ แรงvan der waal เป็นต้น

กลไกการซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำ(Hydrophobic) ถูกดูดซับไว้กับดิน โดยทั่วไปการซับจะมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ 1) การดูดซับ(Adsorption) เป็นการแยกสารปนเปื้อนออกจากสารละลายแล้วเกาะติดบนของแข็ง 2) การไม่ดูดซับ(Desorption)เป็นการหลุดออกของสารปนเปื้อนออกจากผิวแข็งการซับด้วยดิน ดินเป็นตัวดูดซับที่มีความสำคัญชนิดหนึ่ง โดยทำให้การดูดซับสารปนเปื้อน ที่มีคุณสมบัติการละลายน้ำได้น้อย หรือเป็นพวกไม่ชอบน้ำ จะทำให้ดินดูดซับสารปนเปื้อนได้มาก ทั้งนี้ปัจจัยต่างๆมีผลต่อความจุของของการดูดซับของดิน ได้ แก่ค่าการละลาย โครงสร้างโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล ขั้วของสารปนเปื้อน ค่าการอิ่มตัวของNAPLs เป็นต้น

ดังนั้นค่าที่บ่งชี้ว่าดินมีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนและสารอินทรีย์คาร์บอนในดินได้ดีหรือไม่ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซับต่างๆ โดยค่าเหล่านี้นำไปสู่การแสดงพฤติกรรมการปนเปื้อนของสาร NAPLs โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการไหลของน้ำใต้ดิน และความเร็วของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ในชั้นใต้ดิน ซึ่งอธิบายถึงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกน้ำกับออกทานอล(Octanol-water partition coefficient, K_{ow}) ค่านี้จะบ่งชี้ว่าสารประกอบอินทรีย์จะแบ่งแยกระหว่างข้างน้ำกับข้างอินทรีย์มากน้อยขนาดไหน ดังสมการที่ 7โดยค่านี้ได้มาจากการทดลอง ซึ่งถ้าค่า K_{ow} มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสามรถในการละลายน้ำได้ คือ เมื่อสารปนเปื้อนมีค่า K_{ow} มากจะเป็นพวกไม่ชอบน้ำ ทำให้เกิดการละลายน้ำได้น้อยลง ดังนั้นดินจะดูดซับสารปนเปื้อนนี้ได้มาก

$$K_{ow} = \frac{C_{octanal}}{C_w} \quad (7)$$

เมื่อ $C_{octanal}$ คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในสารออกทานอล [mg/l]

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในดิน(Soil distribution coefficient, K_d) ค่านี้จะบ่งชี้ถึงแนวโน้มของสารเคมีปนเปื้อนถูกดูดซับด้วยดินได้มากหรือน้อย ดังสมการ

$$K_d = \frac{C_S}{C_w} \quad (8)$$

เมื่อ C_S คือ มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกซับต่อมวลตัวซับ [mg/g]

ค่าสมประสิทธิ์การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน(Organic carbon partition coefficien, K_{oc}) เนื่องจากดินมีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นส่วนมากที่ทำหน้าที่ดูดซับสารเคมีปนเปื้อน จึงนิยมใช้ค่า K_{oc} มาคำนวณ ดังสมการ

$$K_{oc} = \frac{C_c}{C_w} \quad (9)$$

เมื่อ C_c คือ มวลของสารปนเปื้อนในสารอินทรีย์คาร์บอน [mg/g]

โดยค่า K_{oc} มีความสัมพันธ์กับค่าK_d ดังในสมการที่ 10 ดังนี้

$$K_d = K_{oc} f_{oc} \quad (10)$$

เมื่อ f_{oc} คือ ค่าเศษส่วนของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในดิน

และสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมาคำนวณค่ามวลในตัวดูดซับของสารปนเปื้อนในแต่ละตัวได้ โดยสมการ 11 ดังนี้

$$M_{ad,i} = K_d \, x \, K_{oc} x \, C_{w,i} \, x \, M_{soil} \quad (11)$$

เมื่อ M_{soil} คือ มวลของทรายที่ใช้ดูดซับ [g]

2.3.2 การถ่ายเทมวลระหว่าง NAPLs-น้ำใต้ดิน

เมื่อ NAPLs ถึงชั้น Capillary fringe ซึ่งเป็นบริเวณที่มีน้ำใต้ดินแทรกขึ้นมาตามช่องว่างของเม็ดทราย ทำให้เกิดการพื้นที่สัมผัสระหว่างNAPLs และ น้ำใต้ดิน ซึ่งNAPLsส่วนที่สัมผัสกับกับน้ำใต้ดินนั้นสามารถเกิดการละลายและเคลื่อนที่ไปกับน้ำใต้ดินได้ ซึ่งอัตราการละลายของสารประกอบ NAPLs ในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำนี้ ขึ้นอยู่กับค่าการละลาย (Solubility) และการแพร่ของโมเลกุลของสารประกอบ NAPLs โดยความเข้มข้นของNAPLsที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆของสารปนเปื้อน

อัตราการถ่ายเทมวล(rate of mass transfer) จาก napls เข้าสู่น้ำใต้ดิน ถูกแสดงโดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ความเข้มข้นของสารที่แตกต่าง(concentation diffrence) และพื้นที่ส่วนสัมผัส(contact area) โดยมีสมการดังนี้

อัตราการถ่ายเทมวล = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล x ความเข้มข้นที่แตกต่าง x พื้นที่สัมผัส (12)

[M/T] [L/T] [M/L^3] [L^2]

การละลายของ NAPLs จะเกิดที่ถาวะสมดุล โดยส่วนมากแล้ว NAPLs จะละลายน้ำได้น้อยมาก โดยพื้นฐานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของสาร NAPLs แต่ละชนิด โดยการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่แตกต่างของสาร NAPLs กับน้ำใต้ดินที่เข้าระบบโดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการบำบัดฟื้นฟูสารปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันทางเคมี ซึ่งคัดเลือกตัวแทนของของเสียที่ไม่ละลาย คือ โทลูอีน และ ไตรคลอโรเอทธิลีน

3. โทลูอีน (Toluene)

การจำแนกสารและคุณสมบัติ Toluene เป็น aromatic hydrocarbon ที่เป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่นเหมือน benzene แต่ความเป็นพิษน้อยกว่า benzene จัดเป็นสารที่เสี่ยงต่อการติดไฟและระเบิด ซึ่ง toluene เป็นผลพลอยได้ (by-product) ของอุตสาหกรรมถ่านหินและอุตสาหกรรมปิโตรเคมิคอล ในอุตสาหกรรมถ่านหินจะได้ toluene จาก gas และ coal tar ส่วนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมิคอลจะได้ toluene โดยการ dehydrogenation พวก naphthene หรือโดยการ clyclization และ aromatization สาร paraffin hydrocarbon โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)(กรมควบคุมมลพิษ,2541) ดังตารางที่ 2

ซึ่ง Christensen and Elton(1996) รายงานว่า โทลูอีน(Toluene) เป็นส่วนหนึ่งของสาร BTEX โดยสาร BTEX ประกอบด้วย benzene, ethyl benzene, toluene, และ xylene ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากเมื่อมีการปนเปื้อนลงสู่ดินหรือน้ำใต้ดิน เนื่องจากสารในกลุ่มนี้ทังหมดมีความเป็นพิษทั้งเฉียบพลันและระยะยาว เมื่อโทลูอีนถูกปลดปล่อยทิ้งลงสู่พื้นดิน สารนี้จะไหลลงสู่น้ำใต้ดินและระเหยออกเมื่ออยู่บริเวณผิวดิน ซึ่งสามารถถูกำจัดได้ด้วยแสงอาทิตย์(เกรียงศักดิ์,2546) สารนี้ไม่ถูกดูดซับด้วยดินหรือตะกอนมากนัก แต่พบว่าดินเหนียวสามารถดูดซับได้สารโทลูอีนได้เมื่อ pH ลดลงจะมีความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น ก่อให้เกิดการกำจัดได้ยากขึ้นตามมา

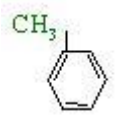
3.1 ความเป็นพิษของโทลูอีน

ความเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute toxicity) toluene เป็นสารที่ทำให้ผู้สูดหายใจเข้าไปเกิดอาการมึนงงและมีความเป็นพิษแบบเฉียบพลันรุนแรงกว่า benzene ซึ่งปริมาณความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลันต่อคน ดังแสดงในตารางที่ 3 ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่จะก่อให้เกิดผลต่อผู้สูดหายใจ คือ

10 – 15 ppm	จะได้กลิ่น
100 ppm	มีผลรบกวนทางด้านจิตใจ (Psychotropic effect)
200 ppm	มีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง (CNS effect)

ความเป็นพิษเรื้อรัง (Chronic toxicity) ความเป็นพิษแบบเรื้อรังไม่ถึงขั้นก่อให้เกิดความมึนงงแบบรุนแรง หรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดเลือด แต่จะก่อให้เกิดความไม่สัมพันธ์ของการเคลื่อนไหว (impairment of co-ordination) และระบบประสาทไม่ดีซึ่งมีผลทำให้เกิดความระคายเคืองต่อผิวหนัง ผิวหนังไม่มีไขมันและผิวหนังอักเสบ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)

สูตรโมเลกุล(molecular formula)	$C_6H_5CH_3$
สูตรโครงสร้าง (structure formula)	
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	92.13
ชื่ออื่นๆ (synonyms)	methybenzene , toluol , phenylmetane และ methacide
จุดหลอมละลาย (melting point)	-95 ^{o}C
จุดวาบไฟ (flash point)	6-10 ^{o} C
ความหนาแน่น (density)	0.866
จุดเดือด (boiling point)	110.4 ^{o}C
ความหนาแน่นไอ (vapor density)	3.2
ความดันไอ (vapor pressure)	36.7 mm ที่ 30 ^{o}C
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง	896 ^{o}F
การละลาย (solubility)	ละลายน้ำได้น้อยมาก(515 mg/l) ละลายได้ดีใน alcoholchloroform, etheacetone, acitic acid
ค่า Soil organics carbon/water partition (Log K_{oc})	2.96-3.03 (ทรายในชั้นaquifer)
Henry's law constant (at 25 C) [kPa*m^3/mole]	0.67
Octanol-water partition coeff. (at 20 C) (log *Kow*)	2.69

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2541) ; Christensen and Elton (1996)

ตารางที่ 3 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันเมื่อสัมผัสสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่มีต่อมนุษย์

ปริมาณความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลาที่สัมผัส (ชั่วโมง)	ผลที่เกิดขึ้น (effect)
50 - 100	-	ไม่สังเกตเห็นอาการความแต่ต่างหลังการสัมผัส
200	8	เกิดอาการบ้างเล็กน้อยได้แก่ อาการเหนื่อยล้า อ่อนเพลีย ความคิดสับสน เกิดอาการชาที่ผิวหนัง อาการเหนื่อยล้าจะคงอยู่เป็นเวลาหลายชั่วโมง และเกิดอาการนอนไม่หลับและกระวนกระวาย
300	8	เกิดอาการข้างต้นเด่นชัดขึ้น
400	8	เกิดอาการข้างต้นและมีอาการจิตใจฟุ้งซ่านสับสน
600	8	เกิดอาการมึนงง เหนื่อยและเมื่อยล้ามาก จิตใจฟุ้งซ่านและสับสน คลื่นเหียน ปวดศีรษะและเวียนศีรษะ บางรายถึงกับหมดสติ
800	-	เกิดอาการคล้ายคลึงกับอาการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแต่ใช้เวลาสัมผัสน้อยกว่า
>800	-	มีอาการข้างต้น และยังมีอาการอื่น เช่น โลหิตจางและตับโต

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2546)

4. ไตรคลอโรเอทธิลีน(TCE)

4.1 การจำแนกคุณสมบัติและสารเคมี

Trichloroethylene (TCE) เป็นสารระเหย (Volatile organic compound, VOC) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดในงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ตัวทำละลาย ไตรคลอโรเอทีลีนเป็นสารอีก

ตัวหนึ่งที่ใช้เป็นตัวทำละลาย มันเป็นของเหลวใส ไม่มีสี กลิ่นคล้ายอีเทอร์และคลอโรฟอร์ม คุณสมบัติที่สามารถละลายไขมันได้ดี จึงเหมาะกับงานทำความสะอาดคราบไขมัน เช่น ทำความสะอาดผิวโลหะในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมซักแห้ง นอกจากนั้นยังใช้ผสมสีและกาว น้ำยาลบคำผิดและหมึกด้วย โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)(กรมควบคุมมลพิษ,2541);(เกรียงศักดิ์,2546) ดังตารางที่ 4

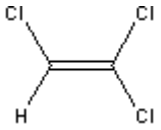
4.2 ความเป็นพิษของไตรคลอโรเอทธิลีน

อันตรายเฉียบพลัน (Acute Effects) เมื่อสัมผัสทางหายใจ การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ, เวียนศีรษะ, คลื่นไส้, ไอ หายใจติดขัด หมดสติ, เป็นลม และอาจเสียชีวิตได้เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูงๆ และสัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสถูกผิวหนังซ้ำหรือเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำให้ผิวหนังอักเสบ เนื่องจากการสูญเสียไขมันของชั้นผิวหนังได้ และอาจทำให้เกิดภาวะภูมิแพ้ต่อการสัมผัสผิวหนังได้

กินหรือกลืนเข้าไป การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ไอ ปวดท้อง ท้องร่วง และอาจหมดสติได้ หรือมีการสัมผัสถูกตา การสัมผัสกับของเหลวหรือไอระเหยที่ความเข้มข้นสูง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และทำให้น้ำตาไหลได้ การสัมผัสในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและเยื่อเมือก ผิวหนัง และทำให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง อาจทำให้เกิดการทำลายทางเดินอาหาร ตับ และไตได้การหายใจหรือการดูดซับของสารเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง , ทำลายตับและไต รวมทั้งทำให้เกิดภาวะที่ไวต่ออีพิเนฟพริน

อันตรายเรื้อรัง(Chronic toxicity) การสัมผัสเป็นเวลานานๆ จะทำให้ผิวหนังอักเสบ มักมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ตัวสั่น เวียนศีรษะแบบบ้านหมุน ปวดศีรษะ สมาธิลดลง มือชา หัวใจเต้นช้า นอนไม่หลับ พฤติกรรมเปลี่ยนแปลง และทำอันตรายต่อตับด้วย

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี(Physical and Chemical properties)

ชื่อทางเคมี (Chemical	Trichloroethylene (ไตรคลอโรเอทธิลีน)
สูตรโครงสร้าง	
ชื่อทางการค้า (Trade Name) และ/หรือชื่ออื่นๆ	ไตรคลอโรเอทธิลีน; Acetylene trichloride; Algylen; Anamenth; Benzinol; Blacosolv; Cecolene; Chlorilen; Densinfluat; 1,1-Dichloro-2-chloroethylene; Ethylene trichloride; Fleck-Flip; Gemalene; Lanadin; Lethurin; TCE; 1,1,2-Trichloroethylene; Trilene
สูตรทางเคมี (Chemical)	$ClCH=CCl_2$
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	131.40
ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Colour and Odor)	ของเหลวไม่มีสี กลิ่นหอมหวานคล้ายคลอโรฟอร์ม ระเหยได้ หนักกว่าน้ำ
จุดเดือด (Boiling Point)	86.76 องศาเซลเซียส ที่ 760 มิลลิเมตรปรอท (หรือ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ)
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	- 73 องศาเซลเซียส
ความดันไอ (Vapour Pressure)	57.8 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นไอ (Vapour Density)	4.54 (เมื่อเทียบกับอากาศ, อากาศ = 1)
การละลายน้ำ (Solubility in Water)	ละลายน้ำได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในสารทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	1.465 (เมื่อเทียบกับน้ำ, น้ำ = 1)
จุดวาบไฟ (Flash Point)	ในภาวะการทำงานปกติไม่ติดไฟ , ไอระเหย 12.5 - 90 % โดยปริมาตรมีจุดวาบไฟที่ 30 - 82 องศาเซลเซียส ไอระเหยผสมออกซิเจนบริสุทธิ์ 10.3 - 64.5 โดยปริมาตรมีจุดวาบไฟที่ 25.5 องศาเซลเซียสขึ้นไป
อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature)	410 องศาเซลเซียส

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2546)

ตารางที่ 5 ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารโทลูอีน (Standard and Toxicity)

ค่ามาตรฐาน	ความเป็นพิษ
LD50 [mg/L]	5650 (หนู) LC50[mg/m^3] : 138,009 / 1 ชั่วโมง (หนู)
IDLH [ppm]	1000 ADI [ppm]: - MAC [ppm]: -
PEL-TWA [ppm]	50 PEL-STEL[ppm]: - PEL-C [ppm]: 200
TLV-TWA [ppm]	50 TLV-STEL [ppm]: 200 TLV-C [ppm]: -
พรบ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 [ppm] เฉลี่ย 8 ชั่วโมง	300 ระยะสั้น - ค่าสูงสุด – สารเคมีอันตราย

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2546)

4. เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน

การจัดการของเสียของเสียอันตรายมีเทคโนโลยีที่หลากหลาย ทั้งการบำบัดฟื้นฟู ณ ที่เกิด(In situ) และการบำบัดนอกพื้นที่ (ex situ) โดยการฟื้นฟูในพื้นที่ (In situ remediation) หมายถึงสารปนเปื้อนของของเสียอันตรายที่ไม่สามารถถูกกำจัดจากการเก็บ หรือการฝังกลบทั่วไป การฟื้นฟูประเภทนี้จะมีการผสมสารเคมีลงสู่พื้นที่ที่ปนเปื้อนโดยตรง หรืออาศัยอุปกรณ์บางชนิดในการทำงาน เช่น สว่าน เป็นต้น ส่วนการฟื้นฟูนอกพื้นที่(ex situ remediation) หมายถึง สารปนเปื้อน หรือสารอันตรายที่สามารถกำจัดได้โดยการกักเก็บ หรือนำไปฝังกลบได้ เช่น การขุดดินที่ปนเปื้อนไปบำบัดต่อจนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานและค่อยนำไปฝังกลบ เป็นต้น(Wang *et al.* . .,2007)

โดยปัจจัยที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนประเภทใดนั้นสามารถพิจารณาจากปัจจัยเหล่านี้ 1) ชนิดของสารปนเปื้อน 2) ปัจจัยทางด้านกฎหมาย 3) ขนาดของพื้นที่ และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่ปนเปื้อน 4)ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟู 5) ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์และต้นทุน 6) ความเสี่ยงในการบำบัด

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้มุ่งการศึกษาไปที่การฟื้นฟูแบบนอกพื้นที่(ex situ remediation) เนื่องจากมีการติดตามตรวจสอบและควบคุมการดำเนินการได้ดีกว่าวิธีการบำบัดในพื้นที่ โดยการบำบัดแบบ

นอกพื้นที่นั้น(ex situ remediation)สามารถฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้หลากหลาย เช่น ดิน น้ำ น้ำใต้ดิน และดินตะกอนตามธรรมชาติ นอกจากนี้วิธีการบำบัดแบบนอกพื้นที่(ex situ remediation)สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) การฟื้นฟูทางกายภาพ 2) การฟื้นฟูทางกายภาพเคมี 3) การฟื้นฟูทางชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทางกายภาพ และกายภาพเคมี เป็นกระบวนการที่บำบัดสารปนเปื้อนด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของสารปนเปื้อน หรือ คุณสมบัติของตัวกลางในพื้นที่ที่ปนเปื้อน ในการบำบัดด้วยวิธีนี้มีวิธีการที่หลากลาย เช่น chemical oxidation , air stripping , soil washing เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการฟื้นฟูแบบนอกพื้นที่ด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

5. การเกิดออกซิเดชันเคมี(Chemical Oxidation)

การเกิดออกซิเดชันเคมี(Chemical Oxidation) เป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดทั้งของเสียอันตรายและไม่อันตราย น้ำดื่ม และน้ำเสียชุมชน เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ มีความปลอดภัยในการใช้งาน สามารถบำบัดปนเปื้อนจำพวกสารอินทรีย์ได้หลากหลาย (Freeman, 1998) เช่น ฟีนอล (Phenol) ยาฆ่าแมลง สารอาโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrogen) เบนซีน (Benzene) และโทลูอีน (toluene)

ซึ่งกระบวนการบำบัดนี้ เกิดจากปฏิกิริยา Oxidation-Reduction (Redox reaction)เป็นปฏิกิริยาเกิดสภาวะออกซิเดชัน เปลี่ยนอะตอมของสารประกอบก่อให้เกิดการโยกย้าย(Transfer)อิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสานหนึ่ง สารประกอบที่ให้ตัวอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า ตัวออกซิไดซ์(Oxidizing agent) เป็นสารที่ค่า Oxidation number เพิ่มขึ้น(สูญเสียอิเล็กตรอน)แต่ถ้าสภาวะออกซิเดชันก่อให้เกิดค่า Oxidation number ของสารเคมีลดลง(ได้รับอิเล็กตรอน) เรียกสารเคมีนั้นว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ซึ่งในทางวิศวกรรมศาสตร์ ปฏิกิริยารีดอกซ์ จะถูกใช้แยกจากกัน โดยปฏิกิริยา Oxidation ถูกใช้เมื่อสารปนเปื้อนเป็นตัวออกซิไดซ์ และปฏิกิริยา Reduction ถูกใช้เมื่อสารเคมีที่ใช้บำบัดเป็นตัวรีดิวซ์

โดยกระบวนการการเกิดออกซิเดชันเคมี(Chemical Oxidation) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนดีหลากหลาย เนื่องจากมีการใช้สารเคมีที่แรง โดยสารปนเปื้อนที่ถูกทำปฏิกิริยา (Oxidized) ได้ผลิตภัณฑ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ หรือเปลี่ยนเป็นสารชนิดอื่นที่เป็นพิษลดลง หรือ สารประกอบที่พบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไป (Suthesan, 2002) ซึ่งเกรียงศักดิ์ (2546) รายงานว่า เมื่อเกิดการออกซิเดชันเคมีกับสารอันตราย อาจเกิดผลลักษณะดังต่อไปนี้

1) เกิดการย่อยสลายโครงสร้างหลักของสารอันตราย
2) เกิดการย่อยสลายในโรงสร้างหลักของสารจนทำให้ความเป็นพิษลดลง
3) เกิดการย่อยสลายจนทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4) เกิดการย่อยสลายในโครงสร้างหลักจนทำให้สารอันตรายเพิ่มความเป็นพิษ

ส่วนมากสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีการเกิดออกซิเดชันเคมี(Chemical Oxidation) คือ Chloride(Cl^-) ,Hydrogen peroxide(H_2O_2) ,Potassium permanganate($KMnO_4$), oxygen(O_2), Ozone (O_3) เป็นต้น สารเคมีเหล่านี้ทำให้เกิดประสิทธิในการบำบัดได้สูง เมื่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนมีค่าต่ำ (COD < 5000 mg/l) (Freeman,1998) เนื่องจากถ้าความเข้มข้นของปนเปื้อนมีค่าสูงแล้ว มีผลต่อค่าบำบัดทำให้มีราคาแพง เพราะสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดถูกใช้ในปริมาณมากและมีราคาสูง สารเคมีมากมายหลายชนิดที่สามารถเป็นตัว Oxidized ได้ แต่มีน้อยมากที่จะสามารถใช้ในงานฟื้นฟูน้ำเสียและของเสียอันตราย การเลือกสารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูนั้น ถูกกำหนดด้วยหลายปัจจัย คือ Redox potential ความเป็นพิษของสารเคมี ราคาของสารเคมี และผลิตภัณฑ์รอง (By-product) จึงจำเป็นต้องมีการทำการทดลองแต่ละสถานที่ เพื่อเลือกตัว Oxidant ที่เหมาะสมในการใช้งานในพื้นที่ปนเปื้อน

LeGraca *et al.* . (1994) กล่าวว่า สภาวะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา Redox reaction ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ สำหรับใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย คือ ค่า Free energy และค่า Oxidation Reduction Potential (ORP) ดังตารางที่ 6 หรือปัจจัยอื่นๆ เช่นอุณหภูมิ และ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้ข้นของสารปนเปื้อน ปัจจัยเหล่านี้เป็นอิทธิพลที่สำคัญในการเลือก Oxidizing agent และนำไปคำนวณว่าเกิดความคุ้มทุนหรือไม่ สาร Oxidant ทั่วไปที่ใช้ในวิธี in situ Chemical Oxidation(ISCO) ที่ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน DNAPLs ส่วนมากใช้สารเคมีพวก Hydrogen peroxide(H_2O_2), Potassium permanganate($KMnO_4$) โดยเปอร์แมงกาเนตมีราคาแพงกว่าเปอร์ออกไซด์ แต่มีความเสถียรมากกว่าและมีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานในช่วง pH ที่กว้าง ส่วน Ozone (O_3)เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง เพราะมีค่า Oxidation Potential (E^o) เท่ากับ 2.07 v อย่างไรก็ตาม โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซ และถูกใช้ในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือใช้ในการบำบัด LNAPLs ที่สะสมในชั้น Capillary Fringe

ตารางที่ 6 ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP) ของสารออกซิเดชัน

สารออกซิเดชัน	Oxidation Reduction Potential(ORP) (Volts)
Ozone	2.07
Hydrogen peroxide	1.8
Potassium permanganate	1.7

ที่มา : Lehr (2001)

ปริมาณการใช้สารเคมีที่เหมาะสม ต้องมีการคำนวณหาปริมาณของสารออกซิไดซ์จากสมการของสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่ง Suthesan (2002) ได้อธิบาย วิธีออกซิเดชันเคมี ตัว oxidant ในการทำปฏิกิริยาจะไปทำปฏิกิริยาสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในธรรมชาติอื่นๆที่ไม่ใช้สารปนเปื้อนด้วย(natural and nontarget organics matter) ดังนั้นเมื่อทำการบำบัด จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณสารเคมีที่ใช้อย่างมากเกินพอ เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้ทั้งหมด(target organics matter) ซึ่งค่าความต้องการสารเคมีในการทำปฏิกิริยา(chemical oxidation demand) ที่ควรพิจารณาควบคู่ไปกับค่า TOC (Total Organics Carbon) เพื่อนำสารเคมีไปใช้งานจริง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวตรงกับงานวิจัยของอรมณี(2549) ที่ทำการศึกษาปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยปริมาณความต้องการเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการทดลองจริงมีค่ามากกว่าการคำนวณจากสมการถึง 3 เท่า

ข้อดีของวิธี chemical oxidationคือ เป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าเชื่อถือ ถูกใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนมาหลายสิบปี มีประสิทธิภาพในการทำลายสารปนเปื้อนได้อย่างรวดเร็ว และทำปฏิกิริยาในทันที แม้ว่าราคาของสารเคมีจะมีราคาสูง เมื่อเทียบกับการบำบัดทางชีวภาพ แต่วิธีทางเคมีนั้นถูกใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากกว่าวิธีทางชีวภาพ(Suthesan,2002) และ วิธี chemical oxidation สามารถใช้งานวิธีเดี่ยว หรือใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เช่นทำงานร่วมกับการฟื้นฟูด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยวิธี chemical oxidationจะใช้เป็นการทำหน้าที่ pre-treatment ก่อนการใช้วิธีทางชีวภาพ

อีกเหตุผลสำคัญที่กระบวนการออกซิเดชันเคมี ถูกเลือกใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดิน คือ ความสามารถของสารเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ แต่ในกรณีนี้ต้องเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์(Nyer, 1992) และกระบวนออกซิเดชันเคมีสามารถใช้ในการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนได้ทั้ง สารอินทรีย์ เช่น น้ำมัน น้ำซะมูลฝอย เป็นต้น และสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก เป็นต้น และข้อดีที่สำคัญอีกข้อของกระบวนการนี้ คือ สามารถฆ่าเชื้อโรค (disinfection) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Nyer,1992)

ข้อเสียของวิธีนี้คือมีราคาแพง โดยวิธีออกซิเดชันเคมีนี้ จะเกี่ยวกับปฏิกิริยา exothermic reaction ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดความร้อน และความดันของก๊าซเพิ่มมากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของสารและอัตราของปฏิกิริยา สารออกซิไดซ์ที่แรง ก่อให้เกิดการกัดกร่อนและมีการระเบิดได้ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดีเมื่อขณะปฏิบัติงาน ข้อที่สำคัญที่สุดในปฏิกิริยา oxidation คือ จะเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ต่อสารปนเปื้อนที่สะสมอยู่ในชั้นดิน จึงไม่สามารถฟื้นฟูได้ทั้งหมด โดยสารปนเปื้อนที่ถูกกักเก็บไว้ในโพรงสามารถไหลออกมาสู่น้ำใต้ดินหรือชั้นดินที่ผ่านการบำบัดแล้ว ด้วยกระบวนการแพร่(diffusion)และการพา(advection) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดเนื่องมากจากความเข้มข้นของสารที่ไม่เท่ากัน โดยน้ำใต้ดินที่ถูกบำบัดแล้ว จะมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ หรือแทบไม่มีเลยก่อให้เกิดการแพร่และการพาจากโพรงที่สารปนเปื้อนถูกเก็บไว้นั้น ไหลออกมาปนเปื้อนสู่น้ำใต้ดิน

วิธีการออกซิเดชันเคมีนั้น ต้องมีการควบคุม pH ซึ่งในบางกรณีต้องมีการควบคุมความร้อนและก๊าซที่เกิดขึ้น เพราะมารถควบคุมได้ยาก สารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต(Potassium permanganate) แม้ว่าจะมีราคาแพงแต่มีความเสถียรมากกว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(hydrogen peroxide) และมีประสิทธิภาพในช่วงของ pH ที่กว้าง แต่กระบวนการออกซิเดชันของ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต นั้นก่อให้เกิดแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ ก่อให้เกิดการอุดตัน หรือในกรณีของโอโซนที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีราคาถูกกว่าเปอร์แมงกาเนต (permanganate) กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่ในข้อคำนึงที่สำคัญในการใช้โอโซน คือ มีสถานะเป็นก๊าซซึ่งอาจแพร่กระจายได้ดีในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ต้องมีการกำจัดการระเหย จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์

ข้อจำกัดอีกประการที่สำคัญของวิธีออกซิเดชันเคมี คือ เมื่อมีการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีไม่สมบูรณ์จะก่อให้เกิดสารตัวกลางและผลิตภัณฑ์รอง สารตัวกลางเหล่านี้อาจก่อให้เกิดสารอันตรายอีกชนิดในการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ อาจเกิดมาจากสาเหตุของปริมาณของสารออกซิไดซ์ไม่เพียงพอ สภาวะในการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสม เช่น pH , อุณหภูมิ เป็นต้น ความแรงของสารเคมี สารประกอบ

ธรรมชาติที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ได้ เช่นตัวกลางที่อยู่ในชั้นน้ำใต้ดินประเภทดินหรือหินที่มีสารอินทรีย์(Boulding,1996) ซึ่ง Seller(1999) ได้กล่าวสารประกอบคาร์บอเนต และ ฟอสเฟต ที่เป็นสารธรรมชาติที่อยู่ในน้ำใต้ดินนั้นสามารถใช้สารเคมี(oxidizing agent) ในการทำปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องการมีเติมสารเคมีอย่างมากเกินพอในการทำปฏิกิริยา และปัจจัยต่อมาที่ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อทำการบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันเคมี ควรมีการติดตามตอบสารปริมาณสารเคมีที่คงค้างอยู่ในพื้นที่ที่ปนเปื้อน, สารปนเปื้อน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

6. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate; $KMnO_4$)

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดื่มและใช้ในการบำบัดน้ำเสียมาเป็นเวลานาน เพราะมีประสิทธิภาพในการ Oxidized สารปนเปื้อนได้หลากหลาย รวมถึง ฟีนอล (Phenol) , เฟอรัส ไอออน(Fe^{2+}), ซัลไฟด์ (S^{2-}) และรสชาติ หลายปีที่ผ่านมาเริ่มมีการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสาร Oxidantในการบวนการบำบัด ณ ที่เกิดด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

คุณสมบัติทางกายภาพของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั้นมีลักษณะเป็นสีดำ เมื่อเป็นของแข็ง มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี(65 g/l at 20 ^{o}C) โดยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีสีชมพู จนถึงม่วงขึ้นอยู่กับความเข้มข้น โดยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถใช้งานงานในทั้งรูปแบบสารละลายและของแข็ง แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจะใช้ในรูปของสารละลาย เนื่องจากใช้งานง่ายและมีความเสถียร และสีของสารละลายของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั้นสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) บ่งบอกว่าสารเคมีเริ่มทำปฏิกิริยาหรือไม่

เมื่อทำปฏิกิริยากับสารใดๆก็ตามจะเปลี่ยนสีเป็นสีดำ หรือน้ำตาล สภาวะการทำงานของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั้นสามารถทำงานได้ทั้งสภาวะกรด หรือด่าง เมื่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำปฏิกิริยาในสภาวะกรดแก่ เปอร์แมงกาเนตจะไปลด Mn^{2+} ไปเป็น Mn^{7+} เกิดการโยกย้ายอิเล็กตรอน 5 ตัว ซึ่งในช่วงpH 3-11 (Freeman,1998) ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) และในสภาวะด่าง(> 10 M KOH) เกิดการโยกย้ายอิเล็กตรอนหนึ่งตัวได้ MnO_4^- ซึ่งปฏิกิริยาในสภาวะนี้ไม่ค่อยมีความสำคัญในด้านการบำบัดสารปนเปื้อน ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆเมื่อโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำปฏิกิริยานั้น คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ หรือสารตัวกลางอื่นๆ (Intermediate Compound) ชนิดอื่นๆ (Suthesan, 2002)

ตัวอย่างการเกิดออกซิเดชันทางเคมี โดยมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Aceptor) โดยสมการที่ (7) และ(8)เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโทลูอีน และสมการที่ (9)เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของไตรคลอโรเอทธีรีน โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารปนเปื้อนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ตามลำดับ(เกรียงศักดิ์,2546);(Schnarr *et al.*, 1996)

$$C_6H_7 + 12\ MnO_4^- + 2H_2O \longrightarrow 7CO_2 + 12\ MnO_4 + 12OH^- \quad ; 7<pH<12 \qquad (13)$$

$$C_6H_7 + 36MnO_4^- + 36H^+ \longrightarrow 7CO_2 + 36\ MnO_4 + 58H_2O \quad ; 3.5<pH<7 \qquad (14)$$

$$C_2Cl_3H + 2MnO_4^- \longrightarrow 2CO_2 + MnO_2^- + 3Cl^- + H^+ + 2K^+ \qquad (15)$$

ข้อจำกัดของเปอร์แมงกาเนต คือ Hydroxyl radical(OH^-) ของสารเคมีเปอร์แมงกาเนต ซึ่งมีความแรงในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอนินทรีย์ในน้ำใต้ดิน เช่น คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต อีกข้อคำนึงเมื่อมีการใช้เปอร์แมงกาเนตในห้องปฏิบัติการ คือ ต้องมีการใช้สารเคมีให้มากเกินพอ ซึ่งการใช้สารเคมีในปริมาณที่มากเกินก่อให้เกิดการออกซิไดซ์ที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีศักยภาพ แต่ในทางปฏิบัติจริง เปอร์แมงกาเนตไม่สามารถใช้ในปริมาณที่มากเกินพอได้ เพราะสารเคมีอาจปนเปื้อนจนถึงชั้นaquifer ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์รอง เช่น คีโตน(ketone), อัลดีไฮด์(aldehldes) และสารประกอบอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้ และไปสะสมตามโพรงหรือรูระหว่างเม็ดดินในชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำหรือชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

7.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบำบัดดินและน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน NAPLs ด้วยวิธีออกซิเดชันเคมีด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตนั้นได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ราคาถูก มีความเสถียร ใช้งานง่าย มีความแรงของสารเคมี และมีประสิทธิภาพสูง โดย Huang *et al*. (2001) รายงานว่า สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถ dechlorinate TCE ในคอลัมน์ทดลองได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการตรวจวัดคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ได้ประมาณร้อยละ 100 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ จุฑารัตน์ (2548) ที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์น้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน เบนซินและโทลูอีน โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และ Fenton’s reagent พบว่าสารที่ทำการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนเบนซินและโทลูอีนได้ดีที่สุด คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ตามลำดับ

แต่ปัญหาที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต คือ แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ทั้ง 2 ชนิดนี้ มีผลต่อความพรุนของตัวกลางที่มีรูพรุน (Porous media) เนื่องจาก Schroth *et al.* (2001)ได้ทำการศึกษาการบำบัดสาร DNAPLs ประเภท TCE และ PCE ในตัวกลางที่มีรูพรุนปรากฏว่าเมื่อทำการบำบัดด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพียงชนิดเดียว มีค่า Aqueous-phase relative permeability (K_{rw}) ร้อยละ 90 และค่า Aqueous-phase pressure head (h) 1000 cm H_2O และศึกษาเพิ่มเติมโดยเติมสาร Na_2HPO_4ให้ทำงานร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต พบว่ามีค่า Aqueous-phase relative permeability(K_{rw})ร้อยละ 53 และ Aqueous-phase pressure head (h) 15 cm H_2O ตามลำดับ สาเหตุที่การที่เติมสาร Na_2HPO_4ให้ทำงานร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีการอุดตันน้อยลง เพราะว่าปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดในสภาวะกรด มีผลให้ตะกอนแมงกานีสออกไซด์ตกตะกอนช้า จึงจัดว่าเป็นการเกิดออกซิเดชันในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์(Phosphate-buffered solution)

นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของสารปนเปื้อนยังมีผลต่อประสิทธิภาพของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน โดยงานวิจัยของ Brown *et al.* . (2002) ได้ทำการศึกษาการบำบัดสารปนเปื้อน Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) ที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 160 mM เป็นสารออกซิไดซ์เป็นเวลา 30 นาที โดยสาร PAHs ที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดดังต่อไปนี้ Benzo (a) pyrene 13.4 %, Pyrene 64.2 % Phenanthrene 56.2 %, Anthracene 53.8% , Fluoranthene 13.4 % และ Chrysene 7.8 %

โดยงานวิจัยนี้พบว่าค่า Relative reativity order สูงๆจะถูกบำบัดได้ดี เนื่องจากสาร PAHs มีโครงสร้างหกเหลี่ยมของสารอโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีพันธะคู่ ระหว่าง คาร์บอน ที่ตำแหน่งโครงสร้างแตกต่างกัน การจัดเรียงอะตอมก็แตกต่างกัน ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Kun *et al.* (1997) กล่าวว่า สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวถูกบำบัด หรือกำจัดได้ง่ายกว่าสารไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวบางประเภท เช่น สาร alkane และ สาร alkene เป็นต้น

ข้อจำกัดที่สำคัญในการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี คือ การเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์รอง (by-product) สารตัวกลาง (intermediate) และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งอาจมีความเป็นพิษน้อยหรือมากขึ้นหลังจากการออกซิเดชัน (Boulding,1996) โดยในบางงานวิจัยได้พบผลการศึกษา ดังนี้ Suthersan (2002) ได้ทำการศึกษาแบบ bench-scale ในการบำบัดฟื้นฟูในชั้นน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เมื่อเสร็จสิ้นการฟื้นฟูพบว่า เกิดสารชนิดใหม่คือ acetone , 2-butanone และสารที่เกิดจากการออกซิไดซ์ตัวอื่นๆ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ kun *et*

al. (1997) ที่ทำการศึกษาฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมในน้ำใต้ดิน ด้วยการออกซิเดชันด้วย chlorine dioxide ซึ่งจากเดิมที่มีการปนเปื้อนสารก่อมะเร็งที่ปนเปื้อนทั้งหมด 14 ชนิด พบว่าหลังทำปฏิกิริยาเกิดสารชนิดใหม่ที่เป็นก่อมะเร็ง 5 ชนิด และผลิตภัณฑ์อื่นๆที่ไม่เป็นพิษ 19 ชนิด ซึ่งสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์เหล่านี้เกิดอันเนื่องมาจาก ปริมาณสารเคมีไม่เพียงพอ , สภาวะของการทำปฏิกิริยา, ความแรงของสารเคมี , การกวนสมบูรณ์ , ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และสารประกอบทางธรรมชาติที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีได้ (Boulding,1996)ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนน้ำใต้ดินอย่างสมบูรณ์นั้น ต้องมีการบำบัดทั้งน้ำใต้ดินและดินที่ปนเปื้อน (Kun *et al.*, 1997)

ดังนั้นการศึกษาผลิตภัณฑ์รองและสารตัวกลางของปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเคมี จึงจำเป็นต้องมีการศึกษากระบวนการการออกซิเดชัน (Chemical oxidation pathway) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำปฏิกิริยา โดยการศึกษาของ Guo *et al*. (2007) ได้ทำการศึกษาการบำบัดโทลูอีน ด้วยปฏิกิริยา photocatalytic oxidation โดยศึกษาสารตัวกลางจากกระบวนการดูดซับใน activated carbon fibers พบว่าสารโทลูอีนเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะถูกออกซิไดซ์ ณ ตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหนงของหมู่ methyl และ ตำแหน่งของวงอโรมาติก ซึ่งตำแหน่งของหมู่ methyl เป็นกระบวนการออกซิเดชันที่สำคัญ ในการเกิดปฏิกิริยาหลักที่เกิดในกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นใน pathway นี้ คือ toluene → benzyl alcohol → benzaldehyde benzoic acid และเกิดปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยจนได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ

ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า สำหรับกรณีการศึกษาการบำบัดสารปนเปื้อน NAPLs ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งที่การบำบัดแบบนอกพื้นที่ (ex situ remediation) นั้นสามารถควบคุมการทำปฏิกิริยาขณะที่การบำบัดได้ง่าย เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำการติดตามตรวจสอบและควบคุมสภาวะขณะเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งเลือกสารตัวแทนจากสารปนเปื้อน NAPLS คือ โทลูอีน และ ไตรคลอโรเอทธิลีน โดยมุ่งเน้นทำการศึกษาในเรื่องของผลิตภัณฑ์รอง และสารตัวกลางที่เกิดในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นสำคัญ

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1.อุปกรณ์

1.1 ขวด Precleaned EPA Sample Jar ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยฝาขวดด้านในเคลือบด้วยสาร PTFE ของ Cole – Parmer

1.2 เครื่องเขย่า(Shaker)

1.3 เครื่อง Gas chromatography ; GC ของ Shimadzu รุ่น GC-14B ที่ใช้ Flame ionization Detector (FID) ติดตั้งคอลัมน์ SUS Packed Column (GC-8A) 3 mm IDx2m Unisole F-200 30/60 โดยตั้งอุณหภูมิ Injector , Detector และ Column เท่ากับ 140 ,150,110 องศาเซลเซียส ตามลำดับและตั้งอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 30 มิลลิลิตรต่อนาที สารที่วิเคราะห์คือ โทลูอีน และไตรคลอโรเอทธิลีน ทำการวิเคราะห์ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกตษรศาสตร์

1.4 อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง เพื่อวัดปริมาณโทลูอีนสำหรับใช้กับเครื่อง GC ชนิดเข็ม SPME ของ SUPELCO ประกอบด้วย Solid Phase Micro-Extraction Holder และ SPME Fiber Assembly 100 μm Polydimehylsioxane Coating

1.5 เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ของ Hanna Instruments รุ่น HI98103

1.6 เครื่องวัดค่าโซเดียมคลอไรด์ ของ Hanna Instruments รุ่น HI 255

1.7 นาฬิกาจับเวลา ของ CASIO

1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของ Chyo รุ่น MP3000

1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4ตำแหน่ง (Analytical balance) ของ Precisa รุ่น 240A

1.10 ขวดแก้วเก็บตัวอย่าง (Vial) พร้อมฝาเกลียว เคลือบด้วยแผ่น PTFE ขนาด 40 มิลลิลิตร

2. วัสดุตัวกลาง

วัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ดินเหนียว ดินร่วน และดินทราย โดยใช้ดินในสภาวะธรรมชาติที่มีสารอินทรีย์คงอยู่ โดยดินเหนียวที่นำมาทดลองมาจากหน้าดินธรรมชาติที่มีค่าร้อยละของดินเหนียวเท่ากับร้อยละ 3.41 แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการดินที่มีค่าร้อยละดินเหนียวในปริมาณสูง จึงจำเป็นต้องนำดินดังกล่าวมาผ่านการร่อนที่ตะแกรงเบอร์ 70 โดยเมื่อผ่านตะแกรงร่อนแล้ว พบว่าดินที่

ผ่านการร่อน มีค่าดินเหนียวร้อยละ 53 ส่วนทรายร่วนเป็นหน้าดินธรรมชาติ และสุดท้าย คือ ทรายหยาบ โดยนำทรายหยาบมาล้างด้วยกรดซัลฟูริคเข้มข้น 10 % และน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และสิ่งสกปรก ตากแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศา โดยนำดินที่ต้องการเหล่านี้มาทำการทดสอบคุณสมบัติของทรายที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของตัวกลาง

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้			วิธีการ
	ดินเหนียว	ทรายร่วน	ทราย	
ความถ่วงจำเพาะ(Specific gravity)(-)	2.63	2.59	2.53	ASTM C 127-81
หน่วยน้ำหนัก(Unit weight)(g/cm3)	1.45	1.643	1.87	ASTM D 2434-68
สารอินทรีย์คาร์บอน(TOC)(g/Kg)	12.214	8.456	1.3	ASTM C 28
อัตราส่วนช่องว่าง(Void Ratio)(%)	0.81	0.39	0.54	จากการคำนวณ
ความพรุน(Porosity)(-)	0.45	0.28	0.35	จากการคำนวณ
สารอินทรีย์รวม(Organic Matter) (%)	0.21	0.14	0.02	ASTM C 40
ความสามารถซึมผ่านน้ำ(cm/sec)	8.66×10^{-7}	4.886×10^{-6}	1.913×10^{-5}	ASTM C 40

3. สารเคมี

3.1 โทลูอีน 99.5% AR Grade ของ Hacth

3.2 ไตรคลอโรเอทธิลีน 99 % AR Grade ของ Merck

3.3 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 99.0 % AR Grade ของ Merck

การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต0.40 โมลาร์ เพื่อต้องการให้สารละลายนี้มีความเข้มข้นมากที่สุดในการละลายน้ำได้ ซึ่งค่าการละลายน้ำของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคือ 64 กรัม ต่อลิตร ณ 20 ºC โดยชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจำนวน 63.8384 กรัมละลายในน้ำกลั่น ถ่าย

ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา หลีกเลี่ยงการโดนแสง เนื่องจากเป็นสารออกซิไดซ์

การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต0.20 โมลาร์ เพื่อต้องการให้สารละลายนี้มีความเข้มข้นมากที่สุดในการละลายน้ำได้ ซึ่งค่าการละลายน้ำของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตคือ 64 กรัม ต่อลิตร ณ 20 ºC โดยชั่งโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจำนวน 31.9192 กรัมละลายในน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา หลีกเลี่ยงการโดนแสง เนื่องจากเป็นสารออกซิไดซ์

3.4 สารละลายโซเดียม ไบซัลไฟต์ (sodium bisulfite solution)

การเตรียมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ (Sodium bisulfite solution) เพื่อใช้ในการหยุดปฏิกิริยาของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Brown et al. ., 2002) เตรียมได้จาก นำโซเดียม ไบซัลไฟต์ 41.624 กรัม ละลายน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา หลีกเลี่ยงการโดนแสง เนื่องจากเป็นสารออกซิไดซ์

3.5 สารละลายกรดซัลฟูริค 98.08 % ของ J.T. Bakel

การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริค 1 โมลาร์ เพื่อนำไปใช้ปรับสภาวะพีเอช โดยปิเปตสารละลายกรดซัลฟูริคเข้มข้น 98.08 % ปริมาณ 11.18 มิลลิลิตร ใส่ลงน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตรที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายไว้ในเครื่องแก้วสีชาชนิดที่ทนทานการกัดกร่อน เนื่องจากเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ควรเตรียมสาระลายที่ตู้ดูดควัน

3.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 98.0 % AR Grade ของ Ajax Finechem

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ เพื่อนำไปใช้ปรับสภาวะพีเอช โดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.1633 กรัมในน้ำกลั่นใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บสารละลายในขวดพลาสติกโพลีเอทธิลีน ซึ่งทนต่อด่าง เนื่องจากเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ควรเตรียมสาระลายที่ตู้ดูดควัน

วิธีการ

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวกลางที่ปนเปื้อนโทลูอีน (Toluene) และไตรคลอโรเอทธิลีน (TCE)

นำดินทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นตัวกลางการจำลองชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินทราย โดยนำโทลูอีน ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในดินแต่ละชนิดที่มีปริมาณ 20 กรัม จากนั้นคลุกให้เข้ากัน

ส่วนในขั้นตอนการเตรียมดินที่ปนเปื้อน ไตรคลอโรเอทธิลีนนั้นนำดินทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้เป็นตัวกลางการจำลองชั้นน้ำใต้ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้แก่ ดินเหนียว ดินร่วน และดินทราย ในแต่ละชนิดชนิดละ 20 กรัม และเติมสารไตรคลอโรเอทธิลีนปริมาณ 1 มิลลิลิตรจากนั้นคลุกให้เข้ากัน

2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

2.1 การศึกษาหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน

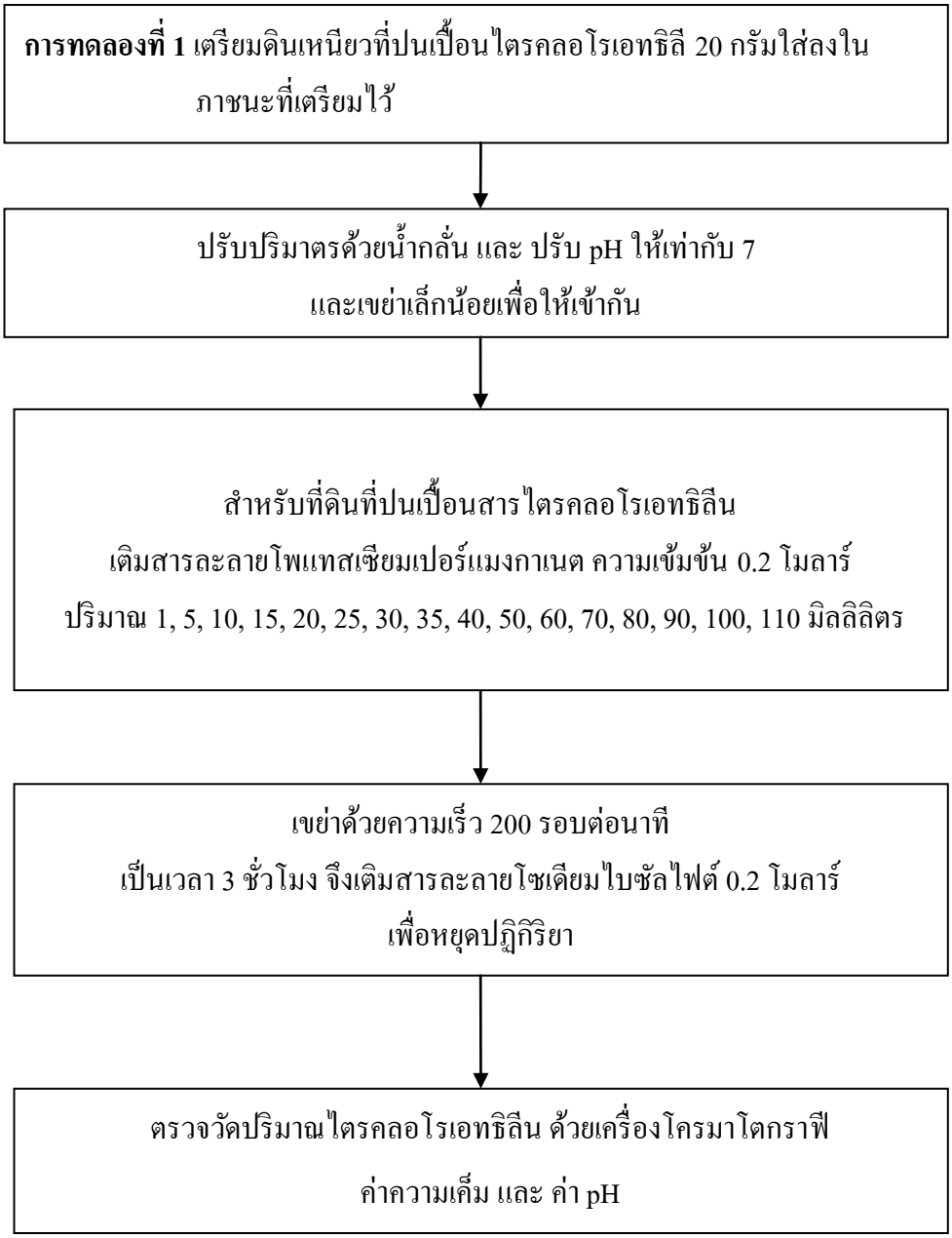
สำหรับการศึกษาหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนดินเหนียวที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน โดยชั่งดินเหนียวที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน น้ำหนัก 20 กรัม ถ่ายลงในขวดปฏิกิริยา (Sample Jar) โดยเติมน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียว และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ใส่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในปริมาณ 1 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 50 , 60 , 70 , 80 , 90 , 100 , 110 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จึงเติมสารสารสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.4 โมลาร์ เพื่อใช้ในการหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือจากการบำบัด ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี และค่า pH ขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 5

2.2 ชุดควบคุมการทดลอง

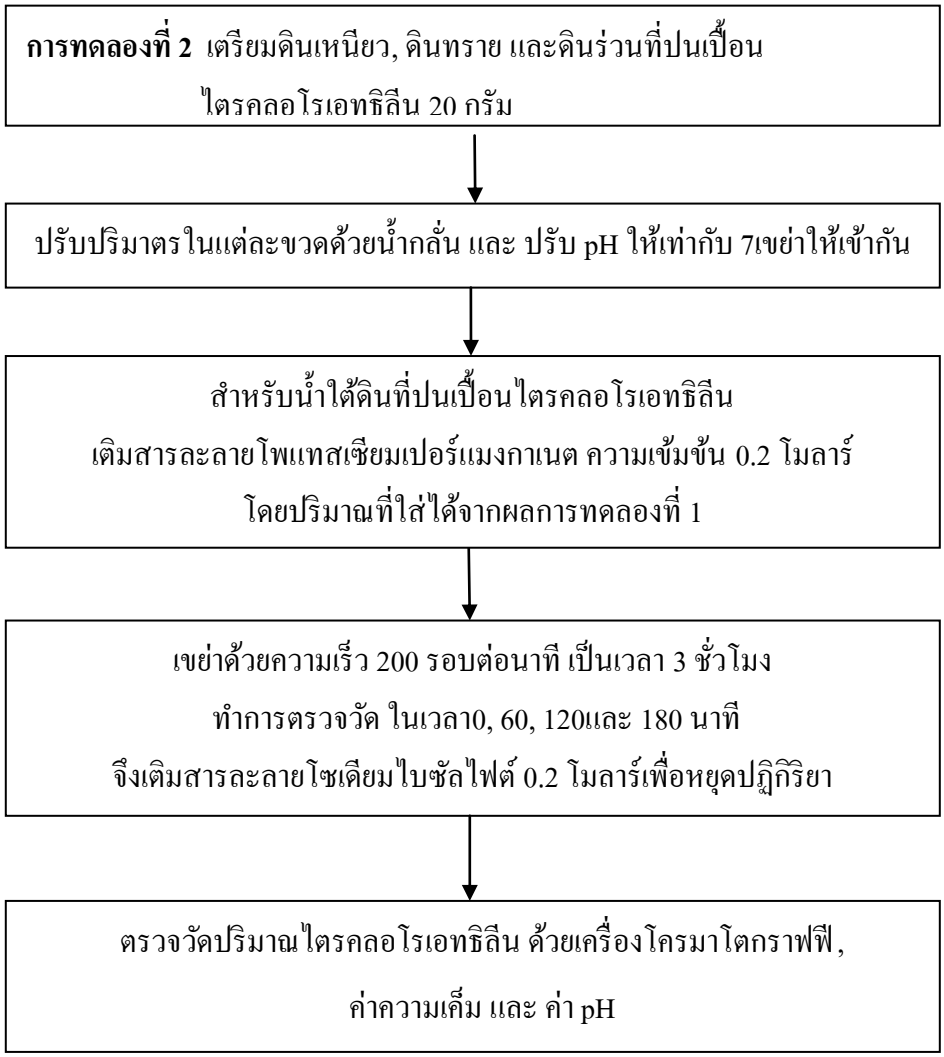
โดยเตรียมดินเหนียวที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนน้ำหนัก 20 กรัม ตามลำดับ ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ลงในแต่ละขวด โดยเติมน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่ เท่ากับ 30 และ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับ เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียว ถ่ายลงในขวดปฏิกิริยา(Sample Jar) เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ณ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณสารไตรคลอโรเอทธิลีน และ ค่า pH

3. ศึกษาความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน

ส่วนศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างชนิดกัน โดยการนำตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ดินทราย และดินร่วนที่ปนเปื้อน ชนิดละ 20 กรัมใส่ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ โดยเติมน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและสารสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ แล้ว เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียว และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ถ่ายลงในขวดปฏิกิริยา (Sample Jar)ใส่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในปริมาณจากการทดลองที่ 1 แล้วเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 60,120 และ 180 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.2 โมลาร์เพื่อหยุดปฏิกิริยา เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือจากการบำบัด ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี , ค่าความเค็ม และ ค่า pH ตามขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การทดลองหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน



ภาพที่ 6 การทดลองความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน

3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนกับค่าสารอินทรีย์คาร์บอน (Soil organic matter) ในตัวกลางแต่ละชนิด

เพื่อทราบความสัมพันธ์ของสารอินทรีย์ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวกลางแต่ละชนิด คือ ดินเหนียว ดินทราย และดินร่วน กับประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน โดยนำตัวกลางแต่ละชนิดก่อนการทดลอง มาวิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์คาร์บอน (Soil organic matter) ด้วยวิธี

ASTM 40 ชุดควบคุมการทดลองใช้ทรายออตตาวา (Ottawa sand) เป็นตัวกลางที่ใช้ในชุดควบคุมการทดลอง เนื่องจากเป็นชนิดทรายที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณน้อยมาก

3.2 ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน กับคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางในแต่ละชนิด

เพื่อทราบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน กับ คุณสมบัติทางกายภาพในตัวกลางแต่ละชนิด คือ ดินเหนียว ดินทราย และดินร่วน โดยในตัวกลางแต่ละชนิดจะคุณสมบัติทางกายภาพด้านธรณีวิทยาที่ต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพด้านธรณีวิทยาที่นำมาศึกได้แก่ อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ค่าความพรุน (Porosity) และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) มาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน

โดยการนำตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ดินทราย และดินร่วนที่ปนเปื้อน ชนิดละ 20 กรัมใส่ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ โดยเติมน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและสารสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ แล้ว เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียว และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ถ่ายลงในขวดปฏิกิริยา (Sample Jar)ใส่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในปริมาณจากการทดลองที่ 1 ปล่อยทิ้งไว้ให้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 180 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.2 โมลาร์เพื่อหยุดปฏิกิริยา เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือจากการบำบัดด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี , ค่าความเค็ม และ ค่า pH

4. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดระหว่างน้ำใต้ดินไม่มีตัวกลาง(Media) และน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง(Media)ที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

4.1 การศึกษาสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดการกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอ ทธิลีน

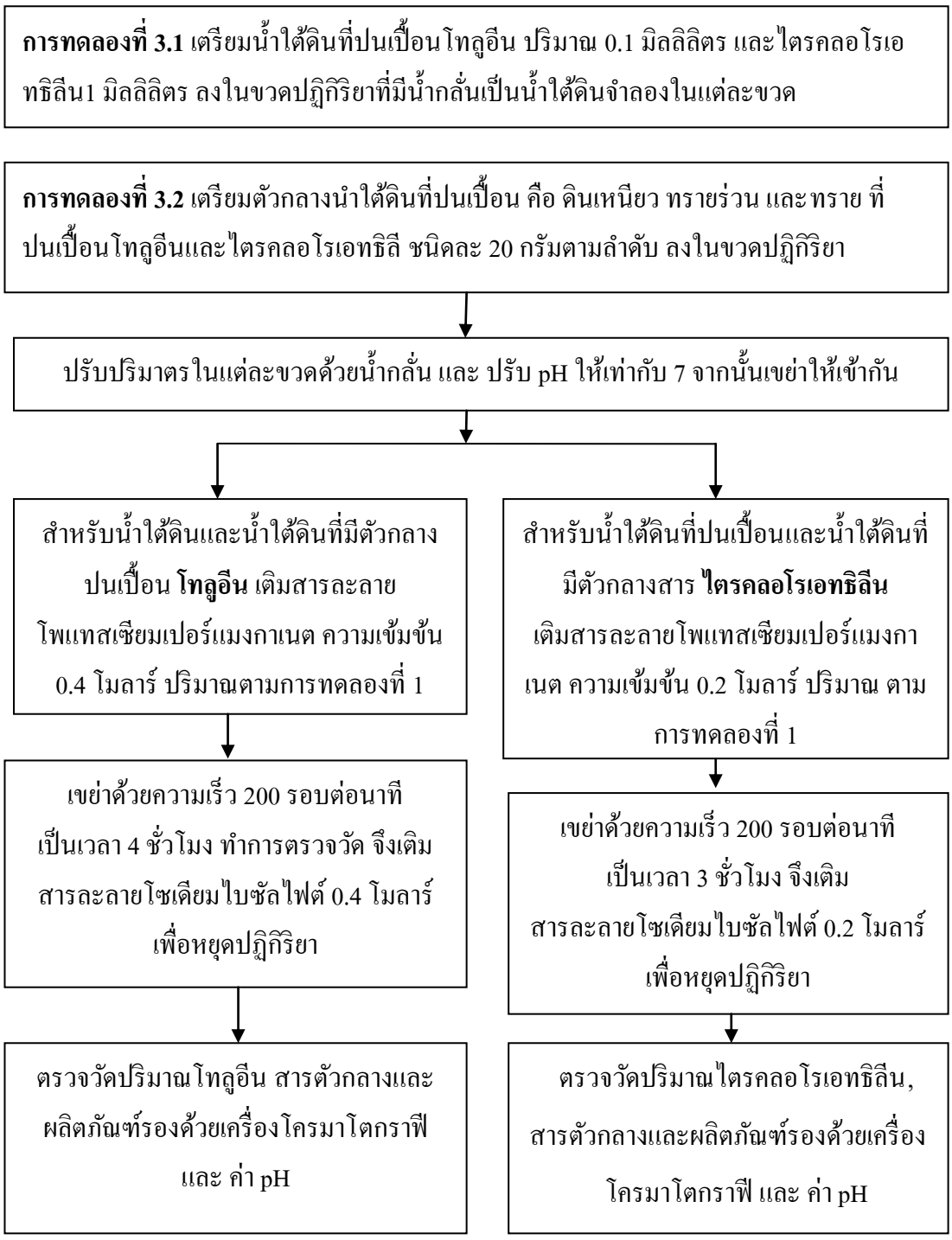
โดยเป็นการศึกษาการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน โดยนำน้ำใต้ดินที่จำลองโดยเตรียมได้จากการนำน้ำกลั่นที่เติมสารปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่นที่บรรจุในขวดปฏิกิริยา (Sample Jar) ที่เตรียมไว้ โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ แล้วเท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากัน และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ใส่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในปริมาณที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 1 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.2 โมลาร์เพื่อหยุดปฏิกิริยา เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือจากการบำบัด สารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดการกระบวนการออกซิเดชันเคมี ในแต่ละช่วงเวลา ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี และค่า pH

ส่วนศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนโดยวิธีการออกซิเดชันเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งเน้นการศึกษาที่ตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด โดยนำน้ำใต้ดินที่จำลองโดยเติมสารปนเปื้อนโทลูอีน ปริมาณ 0.1 มิลลิกรัมลงในน้ำกลั่นที่บรรจุในขวดปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ แล้ว เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อย และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 เติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ในปริมาณที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 1 เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 240 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.4 โมลาร์เพื่อหยุดปฏิกิริยาเพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณโทลูอีนที่เหลือจากการบำบัด สารตัวกลาง (Intermediate) ผลิตภัณฑ์รอง (By product) เกิดการกระบวนการออกซิเดชันเคมี ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี และค่า pH ตามขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 7

4.2 การศึกษาสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดการกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง (Media)ที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

โดยเป็นการศึกษาการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีนโดยวิธีการออกซิเดชันเคมีด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งเน้นการศึกษาที่ตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัด ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ตัวกลาง คือ ดินเหนียว ดินทรายร่วน ดินทราย โดยนำดินแต่ละชนิดที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน ปริมาณ 20 กรัม ลงในขวดปฏิกิริยา (Sample Jar)ที่เตรียมไว้ โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากการคำนวณ เพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากัน และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 เติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ในปริมาณที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 1 เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.2 โมลาร์ เพื่อหยุดปฏิกิริยา เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือจากการบำบัด สารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการออกซิเดชันเคมี ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี และค่า pH

ส่วนศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีน นำตัวกลางแต่ละชนิดที่กล่าวในขั้นต้นนั้น ปริมาณละ 20 กรัมใส่ลงใน ภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากการคำนวณเพื่อปรับปริมาตรสุดท้ายที่รวมกับสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว เท่ากับ 200 มิลลิลิตร เขย่าเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เข้ากัน และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ใส่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ในปริมาณ ตามการทดลองที่ 1 จากนั้นเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 240 นาที จึงเติมสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 0.4 โมลาร์ เพื่อหยุดปฏิกิริยา เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยตรวจวัดปริมาณโทลูอีนที่เหลือจากการบำบัด สารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการออกซิเดชันเคมี ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี และค่า pH ดังขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 7

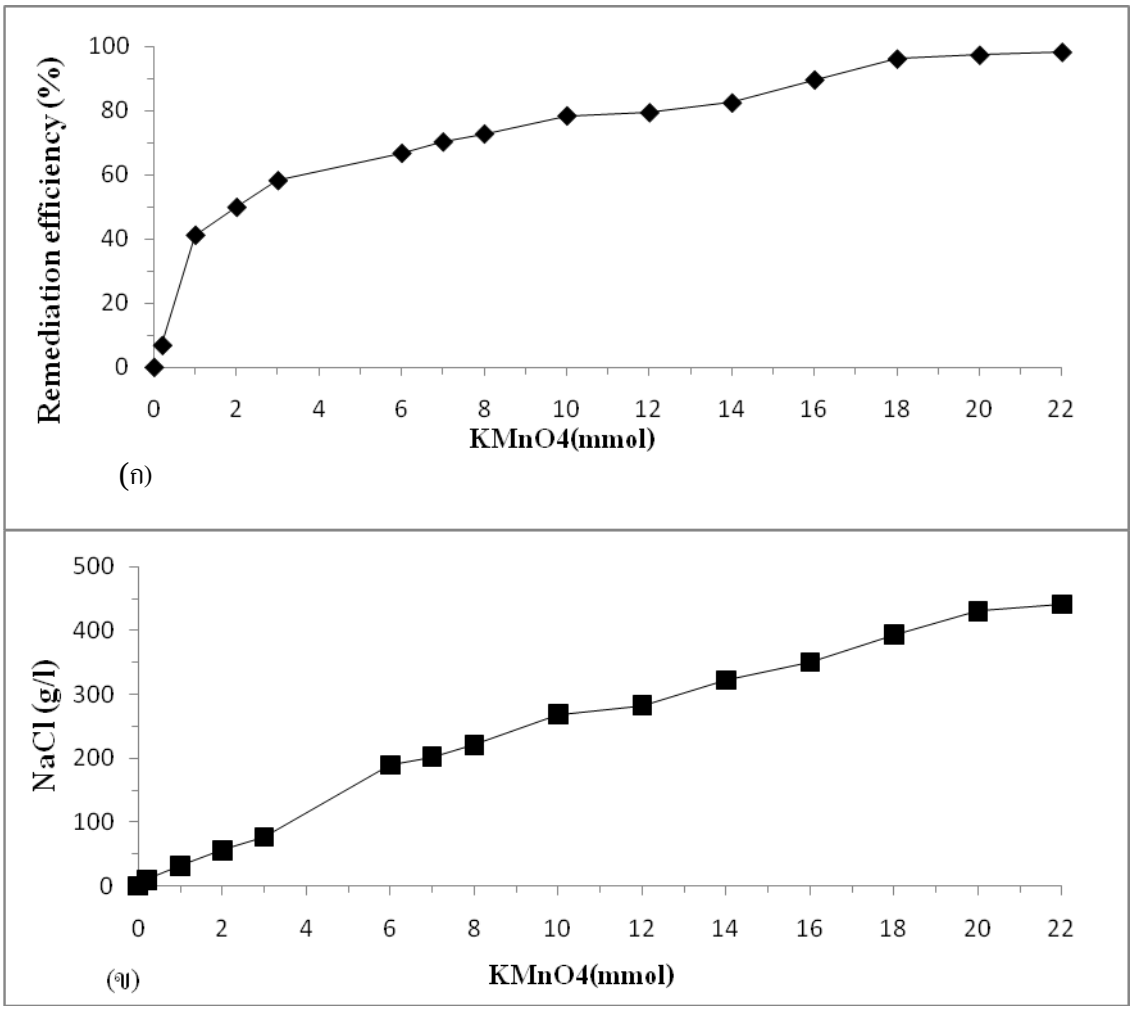


ภาพที่ 7 การทดลองการเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวกลางและ ผลิตภัณฑ์รอง ที่เกิดจากการกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดระหว่างน้ำใต้ดินไม่มีตัวกลางและน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง(Mediaที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

1.1 การศึกษาหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน (ก) และปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัด (ข) ด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที

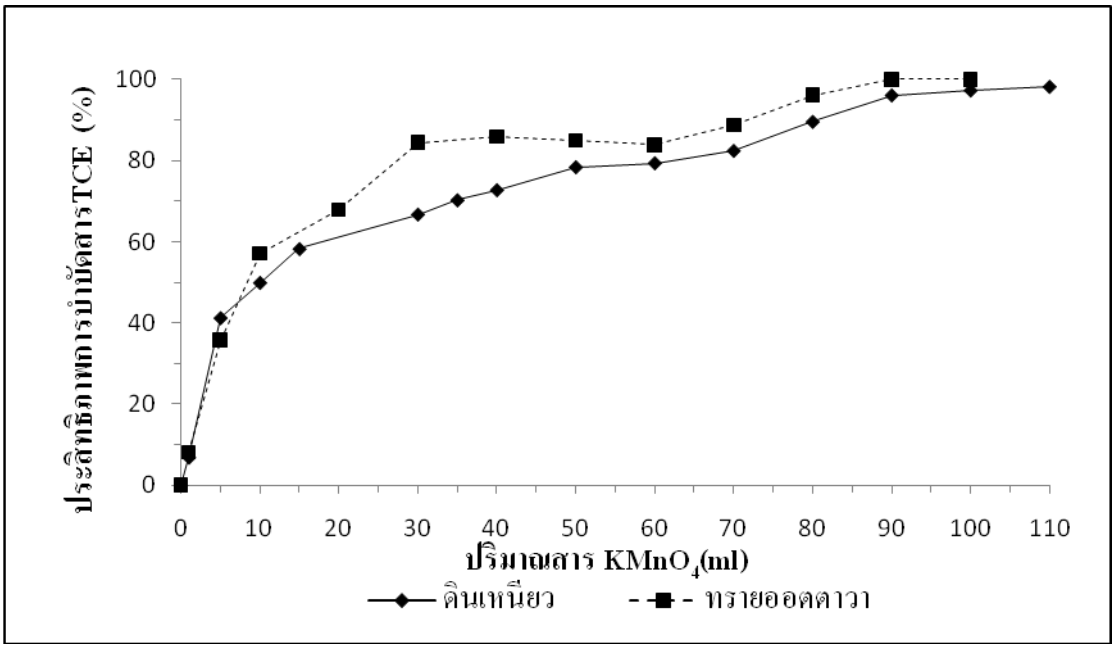
ภาพที่ 8 (ก) แสดงถึงการใช้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที ในการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ปนเปื้อนในดินเหนียว เพื่อหาปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินและตัวกลางที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน โดยนำมาบำบัดโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ปริมาณ 1, 5, 10, 15,20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 50 , 60 , 70 , 80 , 90 , 100 และ 110 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากกรัมของสารเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารออกซิเดชัน จึงทำให้ปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนมากขึ้นเป็นลำดับ แต่ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้สารออกซิเดชันนั้น เมื่อให้ปริมาณสารออกซิไดซ์เพิ่มขึ้นไปสักระยะหนึ่ง จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มคงที่ คือ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดย Ferarese *et al.*(2008) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลง เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วมากจนปฏิกิริยาเคมีจึงหยุดลงอย่างรวดเร็ว สารเคมีไม่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้อย่างสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เมาะสมในการบำบัด เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการบำบัดและก่อเกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

จากภาพที่ 8 (ก) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 110 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 98.24 รองลงมา คือ ประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 97.34 โดยใช้ปริมาณสารออกซิเดชันที่ 100 มิลลิลิตร เมื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบกรัมของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้พบว่า ที่ปริมาณ 110 มิลลิลิตร คิดเป็นกรัมสาร เท่ากับ 3.5 กรัม และที่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร มีกรัมของสารออกซิไดซ์ เท่ากับ 3.19 กรัม แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่างกันที่ร้อยละ 0.9 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดที่แสดงในภาพที่ 8 (ข) เพื่อแสดงแนวโน้มแทนปริมาณของคลอไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัด พบว่า ที่ปริมาณของสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตที่ 110 มิลลิลิตร มีปริมาณการปลดปล่อยคลอไรด์ เท่ากับ 441.3 กรัมต่อลิตร เมื่อหลังการบำบัดจะพบปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพการบำบัดตามลำดับ โดยในการบำบัดสารปนเปื้อนโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดซ์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรพบว่ามีการปลดปล่อยคลอไรด์ เท่ากับ 430.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีการปลดปล่อยคลอไรด์ไม่แตกต่างกันมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงเลือกปริมาณสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนไตรคลอเอทธิลีน ที่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับมวลของสารที่ใช้ในการบำบัด

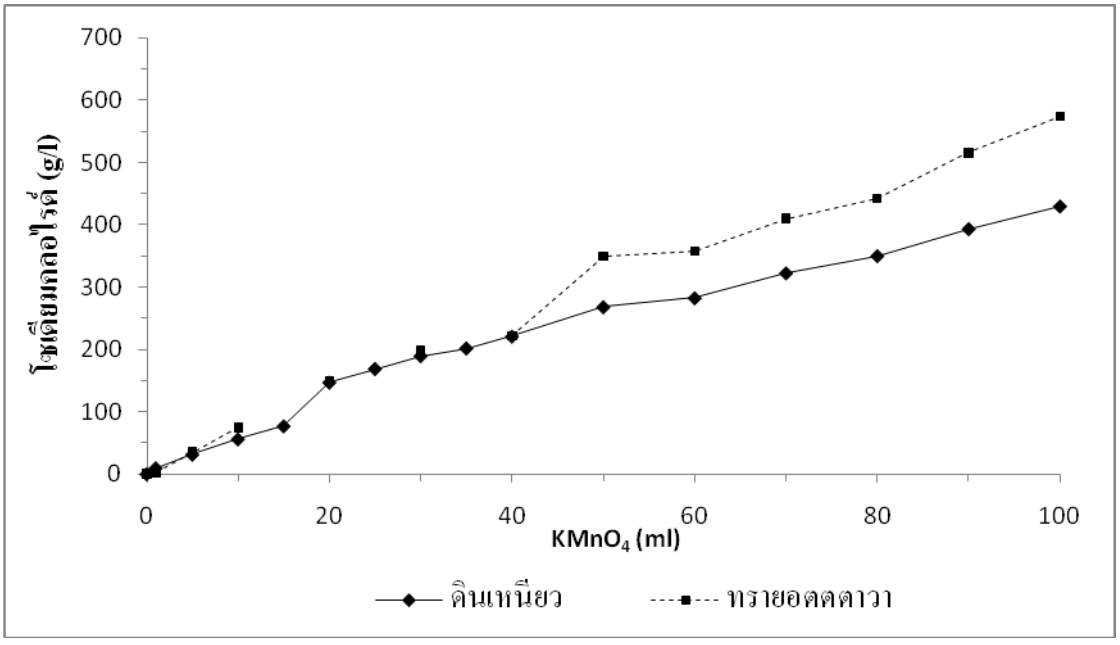
เมื่อเปรียบเทียบความต้องการสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตในการบำบัด จากสมการที่ (15) พบว่าเมื่อไตรคลอโรเอทธิลีนปนเปื้อนปริมาณ เท่ากับ 1 มิลลิลิตร จะใช้ปริมาณของโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตในการบำบัด เท่ากับ 1.4 มิลลิลิตร ซึ่งน้อยกว่าปริมาณของสารโพแทสเซียม เปอร์กาเนต ในการทดลองถึง 70 เท่า เมื่อเทียบกับมวลกรัมของสารออกซิไดซ์ และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการเคมี พบว่า จากทฤษฎีสารไตรคลอโรเอทธิลีน 1 มิลลิลิตร จะทำปฏิกิริยากับสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนต 1.4 มิลลิลิตร จึงทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ โดย Hønning *et al.*(2006) กล่าวว่า ในการบำบัดสารปนเปื้อนในตัวกลาง สารอินทรีย์ในดินจะไม่ทำปฏิกิริยากับ เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-)ในทันที เนื่องจากการใช้สารเปอร์แมงกาเนตในการทำปฏิกิริยาจะต้องผ่านปฏิกิริยาเคมีหลายขั้นตอน ปฏิกิริยาที่สำคัญระหว่างสารปนเปื้อนกับ MnO_4^- คือ การเกิดการแทนที่ซึ่งกันและกัน ดังนั้นการใช้ MnO_4^- ในการทำปฏิกิริยาต่ำ ก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้บางส่วน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาค่าความต้องการสารเคมีก่อนที่จะทำการบำบัดสารปนเปื้อนจริง

และผลการทดลองที่ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่ 5 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพการบำบัด เพียงร้อยละ 41.23 ซึ่งมีการปลดปล่อยของคลอไรด์ เท่ากับ 52±1.7 กรัมต่อลิตร เท่านั้น อาจเกิดสาเหตุอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ จึงทำให้การปลดปล่อยคลอไรด์ไม่เป็นตามสมการทางเคมีที่ (15) ซึ่งในงานวิจัยของ Tsai *et al.* (2008) ได้ทำการบำบัดสาร TCE ในน้ำใต้ดินร่วมกับสาร Surfactant กล่าวว่าปริมาณคลอไรด์ที่เกิดภายใต้การบำบัดมีค่า เพียง1/5 ของทฤษฎีที่คำนวณได้มาจากสมการเคมี โดยผลการทดลองนี้ทำให้บ่งชี้ได้ว่า อาจเกิดผลิตภัณฑ์รอง (by-products) เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดที่ไม่สมบูรณ์

ด้านของสาเหตุที่ปริมาณของสารออกซิไดซ์ในสมการมีค่าแตกต่างกับปริมาณของสารที่ใช้จริง เป็นเพราะในการทดลองได้มีการใส่ตัวกลาง คือ ดินเหนียวที่ค่าสารอินทรีย์รวมในดิน เท่ากับ 21.1 กรัมต่อกิโลกรัม โดยวิธีออกซิเดชันเคมี ตัว oxidant ในการทำปฏิกิริยาจะไปทำปฏิกิริยาสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในธรรมชาติอื่นๆที่ไม่ใช้สารปนเปื้อนด้วย (natural and non-target organics matter) ดังนั้นเมื่อทำการบำบัด จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณสารเคมีที่ใช้อย่างมากเกินพอ เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้ทั้งหมด (target organics matter) ซึ่งค่าความต้องการสารเคมีในการทำปฏิกิริยา (chemical oxidation demand) ที่ควรพิจารณาควบคู่ไปกับค่า OM (Organics Matter) เพื่อนำสารเคมีไปใช้งานจริง เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ (Suthesan ,2002)



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการบำบัดของสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ปนเปื้อนในตัวกลางน้ำใต้ดิน 2 ชนิด คือดินเหนียว และทรายออตตาวา โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์



ภาพที่ 10 ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดในตัวกลางดินเหนียวและทรายออตตาวาที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน

จากภาพที่ 9 แสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียว และทรายออตตาวา โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที โดยใช้ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่โดยนำมาบำบัดเท่ากับ 1, 5, 10, 15, 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 50 , 60 , 70 , 80 , 90, 100 และ 110 มิลลิลิตร ในช่วงแรกของการทดลองใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์กาเนตในปริมาณน้อยเริ่มที่ 1 – 5 มิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดในทั้งสองตัวกลางมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ 10 มิลลิลิตร พบว่าในตัวกลางทรายออตตาวาเริ่มมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าตัวกลางดินเหนียว โดยพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทรายออตตาวา มีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียว ณ ปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ 100 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดในตัวกลางออตตาวามีค่าเท่ากับร้อยละ 99.99 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดในตัวกลางดินเหนียว มีค่าเท่ากับร้อยละ 97.34 ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Hønning *et al.* (2006) ที่พบว่าความต้องการสารเคมีในการทำปฏิกิริยา (Natural oxidant demands) ในดินเหนียวมีค่ามากกว่าตัวกลางทราย ซึ่งในตัวกลางดินเหนียวมีการใช้สารออกซิไดซ์ในการทำปฏิกิริยามากกว่า

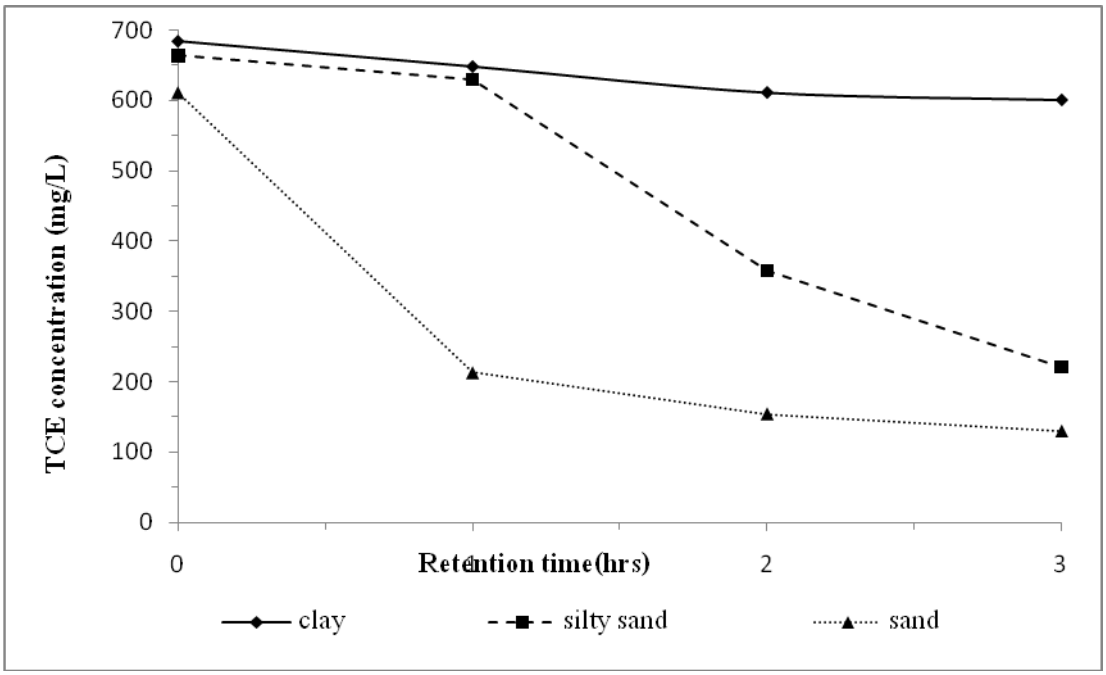
และเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเคมีที่ 90 มิลลิลิตรขึ้นไป ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มคงที่ในทั้งสองตัวกลาง เมื่อมองภาพรวมของประสิทธิภาพของการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีนในภาพที่ 9 ในตัวกลางออตตาวาส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าตัวกลางดินเหนียว เนื่องจากตัวกลางออตตาวาเป็นทรายที่สังเคราะห์จากอุตสาหกรรมที่ถือว่าแทบไม่มีค่าสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ให้มีค่าสารอินทรีย์คาร์บอนของทรายออตตาวา เท่ากับ 0 กรัมต่อกิโลกรัมของตัวอย่างดิน ดังนั้นเมื่อสารปนเปื้อนทำปฏิกิริยากับสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตในตัวกลางทรายออตตาวา สารออกซิไดซ์จึงทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนเป็นหลัก โดยปราศจากสารอินทรีย์จากตัวกลางมาร่วมทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากวิธีการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันเคมีจะทำปฏิกิริยาแบบสุ่ม ไม่เจาะจงว่าจะต้องทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนเท่านั้น (target organics matter) สารอินทรีย์ในตัวกลางสามารถถูกออกซิไดซ์ได้เช่นเดียวกับสารปนเปื้อนจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ใช้สารเคมีมากกว่าการคำนวณจากสมการเคมี (Yan and Schwartz,2000 : Liang and Lee , 2008)ดังนั้นค่าของสารอินทรีย์ในดินจึงมีอิทธิผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี

จากภาพที่ 10 แสดงถึงปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดในตัวกลางดินเหนียวและทรายออตตาวาที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่

ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที ซึ่งค่าโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวแทนของคลอไรด์ไอออนที่เกิดหลังจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีกับสารไรคลอโรเอทธิลีน ซึ่งในช่วงแรกในการใช้ปริมาณของสารเคมีที่ 0 – 40 มิลลิลิตร ในตัวกลางดินเหนียวและตัวกลางทรายออตตาวามีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์ ใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตขึ้นเป็น 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทรายออตตาวาเริ่มมีค่ามากกว่าตัวกลางดินเหนียว จนถึงปริมาณของสารออกซิไดซ์ที่ 100 มิลลิลิตร พบว่ามีค่าคลอไรด์มากที่สุดในทั้งสองตัวกลาง โดยปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ 100 มิลลิลิตร ณ ตัวกลางดินเหนียว มีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์เท่ากับ 430.0 กรัมต่อลิตร ขณะเดียวกับในตัวกลางทรายออตตาวามีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์หลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีเท่ากับ 575.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

สาเหตุอันเนื่องมาจากการสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนต สามารถทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนในตัวกลางทรายออตตาวาได้มากกว่าในตัวกลางดินเหนียว เนื่องจากสารอินทรีย์ในตัวกลางดินเหนียว สามารถทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ได้ ซึ่งค่าสารอินทรีย์คาร์บอนในดินมีส่วนประกอบหลักของสารฮิวมิน (humin) ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี เมื่อตัวกลางมีส่วนประกอบของสารฮิวมิน (humin) และฟัลวิค (Fulvic) จะแสดงลักษณะเฉพาะของการทำปฏิกิริยา ซึ่งถือว่าเป็นอิทธิพลทางลบต่อสภาวะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี (Rivas,2006) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวตรงกับงานวิจัยของ San and Yan (2007) ที่บำบัดสาร PAH ด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี โดยศึกษาอิทธิพลของสาร organic matter ต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยงานวิจัยนี้กล่าวว่าส่วนประกอบของสารorganic matter บางชนิดในตัวกลางอาจทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีได้ยากกว่าทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน เนื่องจากมีค่า heterogeneity สูงซึ่ง เช่น สารฮิวมิน ที่เป็นองค์ประกอบจากสารลิกนิน,โพลีเซคคาไรด์, คาร์บอนแบล็คเป็นต้น ซึ่งคาดว่าจะถูกออกซิไดซ์ได้ยากกว่าสารโมเลกุลเล็ก เช่น สารฟัลวิค เป็นต้น ซึ่งในผลการทดลองพบว่าค่าสารอินทรีย์รวมทั้งหมดในตัวอย่าง เมื่อหลังการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี พบว่าสาร organic matter ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณสารฮิวมินซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์รวมนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นสารที่ทำปฏิกิริยาได้ยากจึงจำเป็นที่ต้องมีการใช้สารเคมีมากขึ้นเพื่อจะทำปฏิกิริยากับสารเหล่านั้น จึงทำให้ค่าของสารเคมีที่ได้จากการคำนวณจากสมการเคมี จึงมีค่าน้อยกว่าสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาจริง

2. ศึกษาความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน



ภาพที่ 11 ค่าความเข้มข้นหลังการบำบัดตัวกลางน้ำใต้ดินปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ต่างกันด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตปริมาณ 100 มิลลิลิตร ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที โดยเปรียบเทียบในตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ทรายร่วน (Silty sand) และทราย (Sand)

ภาพที่ 11 แสดงถึงค่าความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอทธิลีนหลังการบำบัดด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในตัวกลางดินเหนียว (Clay) ทรายร่วน (Silty sand) และทราย (Sand) ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตปริมาณ 100 มิลลิลิตร ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที จากผลการทดลองพบว่า ณ เวลาที่ 0 ชั่วโมงสารไตรคลอโรเอทธิลีนในแต่ละตัวกลางมีค่าไม่ต่างกันมากนัก อย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่เหลือหลังการบำบัดของตัวกลางดินเหนียวและทรายร่วนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ความเข้มข้นของ TCE ในตัวกลางทรายลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

ณ เวลาที่ 2 ชั่วโมง ความเข้มข้นที่เหลือของสาร TCE ในตัวกลางดินเหนียวและตัวกลางทรายเริ่มคงที่ แต่ในตัวกลางทรายร่วนเริ่มมีความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด จากค่าความชันดังภาพที่ 11

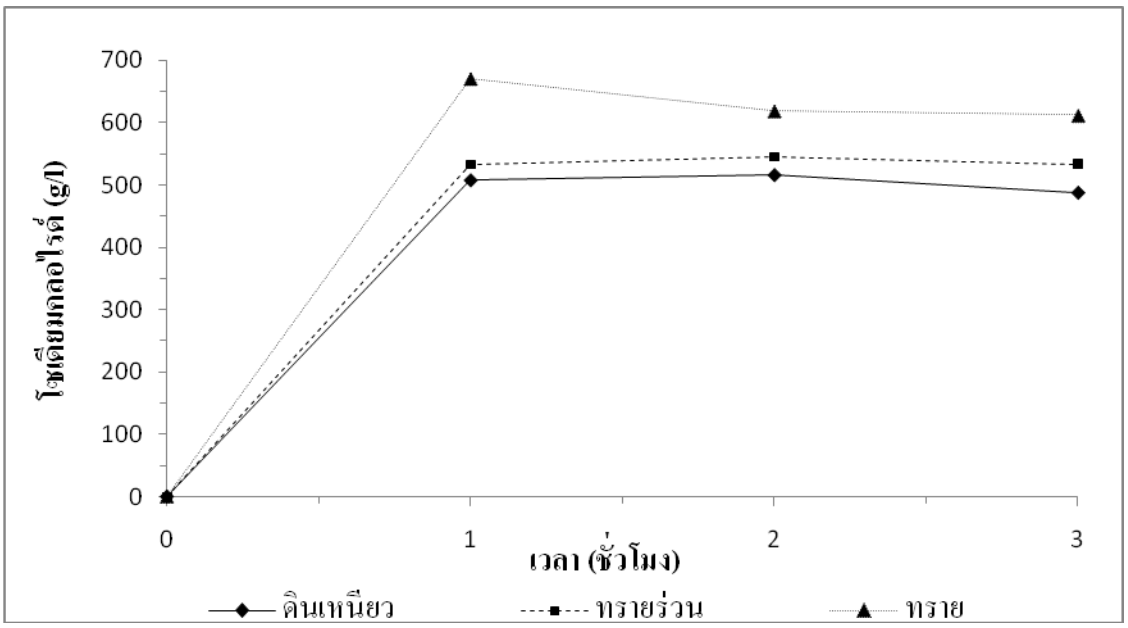
โดยคิดค่าความเข้มข้นที่ลดลงจากชั่วโมงที่ 2 เป็นร้อยละ 26 อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นของ TCE ที่เหลือหลังการบำบัดในตัวกลางทราย มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 130±70 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับร้อยละ 78.7 รองลงมาคือ ทรายร่วนมีค่าความเข้มข้นที่เหลือหลังการบำบัดเท่ากับ 221±45 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ ร้อยละ 70.0 และท้ายที่สุด คือ ตัวกลางดินเหนียวมีค่าความเข้มข้นที่เหลือหลังการบำบัดเท่ากับ 599.8 ±36 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 12.2

โดยสาเหตุที่ตัวกลางทรายมีค่าความเข้มข้นที่หลงเหลืออยู่หลังการบำบัดในชั่วโมงแรกลดลงมากกว่าตัวกลางอื่นๆ อาจเป็นเนื่องมาจากทรายมีค่าสารอินทรีย์น้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.02 จึงทำให้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้ ในตั้งแต่ช่วงเวลาแรกๆ ซึ่งต่างจากตัวกลางดินเหนียวและทรายร่วนที่มีค่าสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับร้อยละ 0.21 และ 0.14 ตามลำดับ ที่มีค่าความเข้มข้นหลังการบำบัดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อาจแสดงได้ว่าสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในตัวกลางก่อนทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน โดยวิธีการออกซิเดชันเคมีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด สารปนเปื้อนต้องอยู่ในรูปของสารละลายให้ได้มากที่สุดก่อนทำการบำบัด ซึ่ง Schnarr *et al* .(1998) กล่าวว่าการละลายของ DNAPLs และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีการเกิดไปพร้อมๆกันกับการเพิ่มของการถ่ายเทมวลระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของ DNAPLs ไปสู่สภาวะสารละลาย ทำให้มีผลต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำ มีค่าสูงขึ้น และถูกสารออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าในสภาวะ DNAPLs (pure phase) เนื่องจากบำบัดสารปนเปื้อนในรูปสารละลายได้ง่ายกว่า (Lachance *et al*.,1998)

แต่ในสภาวะการทดลองในงานวิจัยนี้สาร TCE ในขวดปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองยังเป็นลักษณะของรูป pure phase มากกว่าสารละลาย ดังนั้นสารโพแทสเซียมเปอร์กาเนต จึงทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในตัวกลางได้ดีกว่าการทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน และเมื่อสารออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายแล้ว จึงเริ่มทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน ดังเช่นในตัวกลางทรายร่วน ที่มีในชั่วโมงที่ 1 มีค่าความเข้มข้นของ TCE ที่หลงเหลืออยู่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา 0 ชั่วโมง เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 2 ค่าความเข้มข้นของ TCE เริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เริ่มทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน เมื่อเปรียบเทียบกับในตัวกลางทรายมีค่าสารอินทรีย์ในตัวกลางน้อยกว่าตัวกลางทรายร่วน จึงทำให้ค่าความเข้มข้นของสาร TCE ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในชั่วโมงที่ 1 มากกว่า การทำปฏิกิริยาในตัวกลางทรายร่วน และลดลงน้อยมากในตัวกลางดินเหนียว ดังนั้นภาพที่ 11 จึงแสดงให้เห็นลำดับการปฏิกิริยาของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนในตัวกลางชนิดต่างๆได้อย่างชัดเจน

สารอินทรีย์ในตัวกลางมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี โดยจะลดประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนให้ลดลงและมีการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น (Rivas, 2006; Sun and Yan, 2007; Kulik *et al.*, 2006; Sirguey *et al.,* 2008) ดังนั้นการใช้สารออกซิไดซ์มากขึ้นก็อาจไม่เป็นผลที่ทำให้การบำบัดสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อาจจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องมาจากการใช้สารออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 11 ในตัวกลางดินเหนียวมีค่าสารอินทรีย์มากที่สุด แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด ซึ่งตรงข้ามกับตัวกลางทราย โดยในผลงานวิจัยนี้มีผลตรงกับงานวิจัยของ Hønning *et al.* (2006)ที่ทำการศึกษาปริมาณของสารเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการบำบัดสาร PCE ในชั้นน้ำใต้ดิน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับชั้นดินเหนียว และชั้นทราย โดยผลการศึกษาพบว่าในชั้นดินเหนียวมีประสิทธิภาพการบำบัดสาร PCE น้อยกว่าในชั้นทราย อันเนื่องมาจากตัวกลางที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติขององค์ประกอบในตัวกลางที่ต่างกัน เช่น ค่า OM หรือ ค่าแร่ธาตุภายในดิน เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับสารอินทรีย์ต่างๆ อาจต้องใช้กระบวนทางเคมีการหลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาแทนที่ไฮโดรเจนอะตอม หรือ การแทนที่ของไฮดรอกไซด์ ไอออน เป็นต้น ดังนั้นสาเหตุของการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ในการบำบัด TCE เพราะเกิดการแข่งขันในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในตัวกลางกับสารปนเปื้อน และทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์รอง (intermediate)หลังการบำบัดซึ่งอาจเป็นสารที่มีพิษ หรือไม่มีพิษได้ (Huang *et al.*,2001) ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการบำบัดแบบนอกพื้นที่ (Ex situ remediation) ซึ่งสามารถควบคุมและติดตามตรวจสอบได้ง่ายกว่า การบำบัดแบบ ณ พื้นที่ที่ปนเปื้อน (In situ remediation) ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดอาจไม่ตรงกับผลการทดลองนี้ เนื่องมาจากค่าสารอินทรีย์ในตัวกลางมีความแปรผกผันกับความลึกของชั้นดิน ซึ่งชั้นดินยิ่งลึกค่าสารอินทรีย์ในตัวกลางมีค่าน้อยลงเป็นต้น (Soga *et al.*,2004)

และคุณสมบัติของตัวกลางที่มีค่าสารอินทรีย์มากจะมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารปนเปื้อนสู่ Micro pores ของตัวกลางได้ดีกว่าตัวกลางที่มีสารอินทรีย์น้อย (Bogan *et al*., 2003) อาจเป็นเหตุให้สารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียวถูกดูดซับสู่ micro pores เมื่อหลังการบำบัดสาร TCE ในรูปสารละลายมีค่าลดลง จึงเกิดกระบวนการแพร่และการพาสารปนเปื้อนที่ถูกซับไว้ในตัวกลางเพื่อสภาวะสมดุลในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางดินเหนียวจึงมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบในตัวกลางทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 12 ค่าโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดตัวกลางน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที โดยเปรียบเทียบในตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (clay) ทรายร่วน (silty sand) และทราย (sand)

จากภาพที่ 12 แสดงถึงค่าโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดตัวกลางน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบ/นาที โดยเปรียบเทียบในตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) ทรายร่วน (Silty sand) และทราย (Sand) ซึ่งการวิเคราะห์ค่าโซเดียมคลอไรด์นี้เพื่อแสดงแนวโน้มของค่าคลอไรด์ ไอออนที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด โดยพบว่าในตัวกลางทรายมีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์มากที่สุดในชั่วโมงที่ 1 เท่ากับ 670.5 กรัมต่อลิตร รองลงมาคือทรายร่วน และดินเหนียวที่ 532.5 และ 507.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อระยะการบำบัดผ่านชั่วโมงแรกแล้ว ค่าของคลอไรด์ในแต่ละตัวกลางค่อนข้างคงที่ ดังเช่นในภาพที่ 12 ที่ ณ ช่วงเวลาที่ 1 ถึง 3 ชั่วโมงมีค่าความชันค่อนข้างคงที่ แต่ในภาพรวมการปลดปล่อยคลอไรด์หลังการบำบัดของตัวกลางทรายมีค่าสูงที่สุด รองมาคือ ทรายร่วนและดินเหนียว ตามลำดับ

โดยเวลาการบำบัดที่ 1 ชั่วโมงแรกมีการปลดปล่อยคลอไรด์ออกมาสูงสุด ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่ามากที่สุดในช่วงเวลานี้ และการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ณ ชั่วโมงที่ 1 ในตัวกลางทรายมีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์มากที่สุด รองลงมาคือ ตัวกลางทรายร่วน และดินเหนียว ซึ่งในทั้งสองตัวกลางนี้ มีค่าการคลอไรด์ในชั่วโมงแรกค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นที่เหลือของ TCE หลังการบำบัด ดังภาพที่ 11 ที่ในชั่วโมงที่ 1 มีค่าความเข้มข้นค่อนข้างใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับค่าคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด โดยสาเหตุที่ในตัวกลางทรายมีค่าคลอไรด์ ไอออนสูงที่สุด เมื่อเปรียบกับตัวกลางอื่นๆแล้ว น่าจะเกิดจากสารอินทรีย์ในตัวกลางทรายมีค่าน้อยที่สุด จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารTCE ในตัวกลางทรายมีค่ามากที่สุด ดังนั้นการทำปฏิกิริยาของสารเคมีจึงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารออกซิไดซ์สามารถทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปราศจากสารอินทรีย์จากตัวกลางมาร่วมทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากวิธีการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันเคมีจะทำปฏิกิริยาแบบสุ่ม ไม่เจาะจงว่าจะต้องทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนเท่านั้น (target organics matter) สารอินทรีย์ในตัวกลางสามารถถูกออกซิไดซ์ได้เช่นเดียวกับสารปนเปื้อน (Yan and Schwartz,2000 : Liang and Lee , 2008) จึงเป็นผลให้ภาพรวมของการปลดปล่อยคลอไรด์ในตัวกลางทรายมีค่ามากกว่าทรายร่วนและดินเหนียว โดยในดินเหนียวมีค่าคลอไรด์ ไอออนที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดน้อยที่สุด เนื่องมาจากตัวกลางชนิดนี้มีค่าสารอินทรีย์ในตัวกลางมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 ดังภาพที่ 10 ที่เปรียบเทียบการปลดปล่อยคลอไรด์ในตัวกลางดินเหนียว และตัวกลางทรายออตตาวา ที่พบว่าในทรายออตตาวามีการปลดปล่อยคลอไรด์มากกว่าตัวกลางดินเหนียวเช่นเดียวกัน

การเกิดคลอไรด์ ไอออน หลังการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีด้วยวิธีออกซิเดชันเคมีนั้น เนื่องจากสารไตรคลอโรเอทธิลีนเป็นสารประกอบจากคลอรีนและไฮโดรคาร์บอนที่เรียกว่า chlorinated hydrocarbon และการเกิดคลอไรด์ ไอออนสามารถอธิบายจากกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีเริ่มแรกนั้นสารเปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) จะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของคาร์บอนของสารปนเปื้อนให้แตกตัว อย่างไรก็ตามปฏิกิริยา dechlorination โดยผ่านกระบวนการ Hydrolysis หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการแตกพันธะคู่ หรือ วงของสารปนเปื้อน(cyclic complex) ยังไม่ทราบกระบวนการแตกตัวอย่างแน่ชัด ซึ่งถ้าคลอรีนในสารปนเปื้อนไม่สามารถแตกตัวได้หมด คลอรีนนั้นก็จะสามารถกลายเป็นสารตัวกลาง (intermediate products) หลังจากการแตกพันธะคู่ของสารปนเปื้อนแล้ว ซึ่งอาจได้ผลิตภัณฑ์ประเภทสารประกอบ chlorinated organic acid เช่น formyl chloride, oxalyl chloride , phosgene และคลอไรด์ไอออน เป็นต้น ซึ่งถูกปลดปล่อยออกจากสารละลายหลังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี (Yan and Schwartz,1999) ดังนั้นการปลดปล่อยคลอไรด์ ไอออนจึงสามารถใช้เป็นตัวพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดและแสดงถึงอัตราการใช้สารเปอร์แมงกาเนตในการทำปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน โดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า TCE- dechlorination (Tsai *et al.*, 2009)

และเมื่อนำค่าความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอทธิลีน มาคำนวณค่าอัตราภาระบรรทุก (Loading) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Loading} = \frac{\text{Mole of TCE}}{V \times T} \quad (16)$$

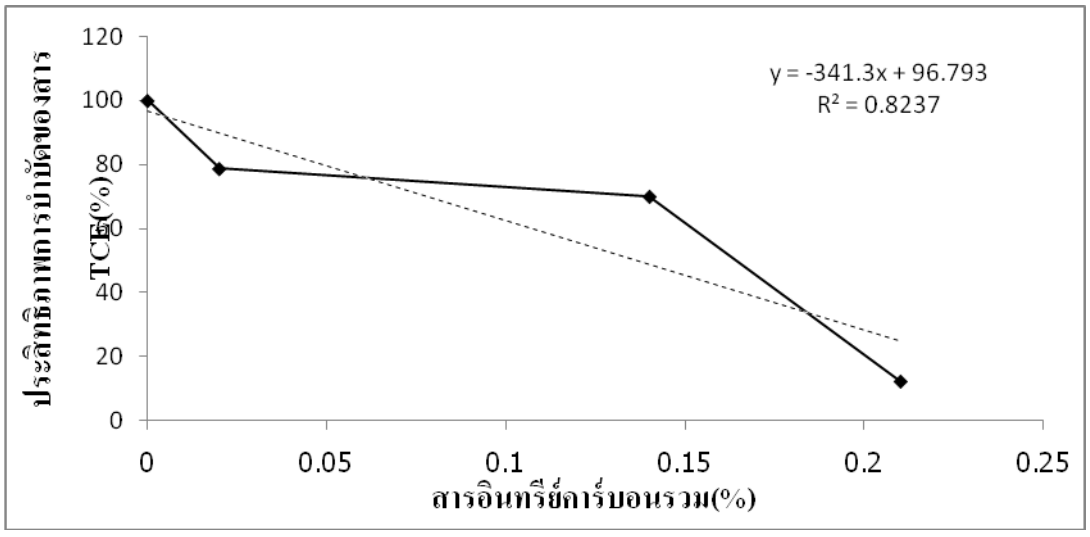
โดย Mole of TCE คือ โมลของ TCE ที่ถูกทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน [mmol]

V คือ ปริมาตรของถังปฏิกิริยา [l]

T คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา [hrs]

เมื่อนำมาคำนวณตามสมการที่ 16 พบว่าค่าอัตราภาระบรรทุกของตัวกลางดินเหนียว ทรายร่วน และ ทราย มีค่า เท่ากับ 1.06, 5.61 และ 6.1 mmol/l.hr ซึ่งค่านี้สามารถนำไปพิจารณาร่วมเมื่อมีการบำบัดในพื้นที่จริงได้

2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนกับค่าสารอินทรีย์คาร์บอน (Soil organic matter) ในตัวกลางแต่ละชนิด



ภาพที่ 13 อิทธิพลของค่าสารอินทรีย์รวมในตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่า 200 รอบ/นาที

ภาพที่ 13 แสดงถึงอิทธิพลของค่าสารอินทรีย์รวม (organic matter)ในตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เขย่า 200 รอบ/นาที โดยค่าสารอินทรีย์ที่นำมาเปรียบเทียบได้จากตัวกลางทรายออตตาวา ,ดินเหนียว ,ทรายร่วน และทราย โดยในตัวกลางทราย ทรายร่วน และดินเหนียว มีค่าสารอินทรีย์ในตัวกลาง เท่ากับ 0.02 %, 0.14 %และ 0.21% ตามลำดับ ส่วนในตัวกลางทรายออตตาวาในงานวิจัยนี้ ถือว่ามีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากทรายออตตาวาเป็นทรายที่ได้จากการสังเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ไม่ใช่ทรายจากหน้าดินธรรมชาติ และมีค่าสารอินทรีย์ในทรายออตตาวาน้อยมากจนแทบจะไม่มีเลย จึงกำหนดให้สารอินทรีย์ในทรายออตตาวามีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 13 พบว่าในตัวกลางทรายออตตาวามีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คือ 99.99% รองลงมาคือ ทราย ทรายร่วน และดินเหนียว ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน เท่ากับ 78.7 %, 70.0 % และ 12.2 % ตามลำดับ

ซึ่งแสดงว่าค่าสารอินทรีย์ในตัวกลางมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยสังเกตได้จากค่าสารอินทรีย์ที่มีค่ามากจะมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด สาเหตุอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ทั้งหมด โดยไม่เจาะจงว่าต้องเป็นสารปนเปื้อนเท่านั้น สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่องค์ประกอบของสารอินทรีย์บางชนิดที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งมีข้อมูลจากงานวิจัยของ Rivas(2006) กล่าวไว้ว่า ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนในดินมีส่วนประกอบหลักของสารฮิวมิน(humin) ที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี เมื่อตัวกลางมีส่วนประกอบของสารฮิวมิน (humin) และฟัลวิค (fulvic) จะแสดงลักษณะเฉพาะของการทำปฏิกิริยา ซึ่งถือว่าเป็นอิทธิพลทางลบต่อสภาวะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีซึ่งข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนงานวิจัยของ San and Yan (2007) ที่บำบัดสาร PAH ด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี โดยศึกษาอิทธิพลของสาร organic matter ต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยงานวิจัยนี้กล่าวว่าส่วนประกอบของสารorganic matter บางชนิดในตัวกลางอาจทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีได้ยากกว่าทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน เนื่องจากมีค่า heterogeneity สูงซึ่ง เช่น สารฮิวมิน ที่เป็นองค์ประกอบจากสารลิกนิน,โพลีเซคคาไรด์, คาร์บอนแบล็ค เป็นต้น ซึ่งคาดว่าจะถูกออกซิไดซ์ได้ยากกว่าสารโมเลกุลเล็ก เช่น สารฟัลวิค เป็นต้น ซึ่งในผลการทดลองพบว่าค่าสารอินทรีย์รวมทั้งหมดในตัวอย่างหลังการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมี พบว่าสาร organic matter ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณสารฮิวมินซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์รวมนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ภาพรวมแล้วสารอินทรีย์ในดินก็ยังถือว่าสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันแคมีได้อย่างดี

ซึ่งในตัวกลางของน้ำใต้ดินแต่ละชนิด มีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกัน จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดสารปนเปื้อนในแต่ละตัวกลางมีค่าแตกต่างกันด้วย จึงน่าจะเป็นพารามิเตอร์สารอินทรีย์ในตัวกลางของชั้นน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน ที่เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชันเคมีนั้น เนื่องจากมีความสัมพันธ์และมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ดังที่แสดงในภาพที่ 13

เมื่อทำการคำนวณสมดุลมวล (Mass balance) ของไตรคลอโรเอทธิลีนอย่างง่าย ดังนี้

$$\text{Input} = \text{Output} + \text{Accumulation}$$

$$M_{total} = M_{oxidation} + M_{effluent} + M_{adsorption} + M_{loss} \quad (17)$$

โดยที่

Input	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนใส่ลงในระบบ(กรัม)
Output	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกจากระบบ(กรัม)
Accumulation	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธีลีนที่สะสมอยู่ในระบบ(กรัม)
M_{total}	คือ มวลรวมทั้งหมด(กรัม)
$M_{oxidation}$	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนในส่วนที่ทำปฏิกิริยา(กรัม)
$M_{effluent}$	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก(กรัม)
$M_{adsorption}$	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง(กรัม)
M_{loss}	คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีน ส่วนที่ศูนย์เสียไป อาจเนื่องจากการระเหย(Volatile) หรือความผิดพลาด(erroe) อื่นๆของการทดลอง (กรัม)

1. คำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทราย (Sand)

ดังนั้น Input คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนใส่ลงในระบบ (กรัม)

ในการทดลองใส่โทลูอีน เข้มข้น 99 % ลงในตัวกลางจำนวน 1 มิลลิลิตร ไรคลอโรเอทธิลีนมีความหนาแน่น เท่ากับ 1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร

Input = 1 มิลลิลิตร ×1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร

= 1.465 กรัม

$M_{effluent}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก (กรัม)

$$M_{effluent} = M_{main\ product} + M_{intermediate}$$

$M_{main\ product}$ = มวลของสารที่ปนเปื้อนที่เหลือหลังจากการบำบัด (กรัม)

การหาปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก ได้มาจากการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโตกราฟี พบว่าความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.001 กรัม ต่อ ลิตร

$M_{main\ product}$ = 0.001 กรัม

$M_{intermediate}$ คือ มวลของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัด (กรัม)

จากการทดลอง เมื่อหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำสารละลายที่ได้ไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่ามีสารตัวกลาง (Intermediate) ที่ออกมากับน้ำออกเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ สารเตตระคลอโรเอทธิลีน และสารไรคลอโรเมทเธน โดยมีความเข้มข้น 417 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

$M_{intermediate}$ = 0.417 + 0.006 = 0.423 กรัม

ดังนั้น $M_{effluent}$ = 0.001 +0.423 = 0.424 กรัม

$M_{adsorption}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง (กรัม)

ทรายที่ใช้ในการทดลองมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 0.02 % และไตรคลอโรเอทธิลีนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Adsorption coefficient, log K_{oc}) เท่ากับ 1.93 (Brasseau *et al.*, 1990)

$$M_{adsorption} = K_d + C_{TCE} + M_{Sand} \quad \text{(วรณัฐ,2547)} \qquad (18)$$

โดยค่า K_d = ค่าสัมประสิทธิ์กระจายในดิน (Soil distribution coefficient)

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

$= \quad 10^{1.93} \times 0.0002 \quad = \quad 0.017$ มิลลิลิตรต่อกรัม

C_{TCE} คือ ความเข้มข้นของไรคลอโรเอทธิลีนที่เกิดการละลาย(มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนของน้ำเข้า เท่ากับ 1100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณน้ำทั้งหมด 0.2 ลิตร

$C_{TCE} = M_{effluent} / W$

$= 1.1/0.2$

$=$ 5. 5 กรัมต่อลิตร หรือ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร

M_{Sand} = มวลของทรายเกิดการดูดซับ คือ มวลของทรายที่ใช้ทำปฏิกิริยา

= 20 กรัม

จากสมการที่ 18

$M_{adsorption} = K_d \times C_{TCE} \times M_{Sand}$

$=$ 0.017 มิลลิลิตรต่อกรัม $\times$ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร $\times$20 กรัม

$=$ 1.87 มิลลิกรัม หรือ 0.0019 กรัม

M_{loss} คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีน ส่วนที่ศูนย์เสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (Volatile) หรือความผิดพลาด (error) อื่นๆของการทดลอง (กรัม)

เนื่องจากการทดลองเป็นระบบปิดจึงกำหนดให้มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนส่วนที่สูญเสียไปมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ 0 กรัม

จากสมการที่ 17

$M_{total} = M_{oxidation} + M_{effluent} + M_{adsorption} + M_{loss}$

$1.465 = M_{oxidation} + 0.424 + 0.0019 + 0$

$M_{oxidation} = 1.04$

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนตัวกลางทราย เท่ากับ 71 เปอร์เซ็นต์

2. คำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทรายร่วน (Silty Sand)

ดังนั้น Input คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนใส่ลงในระบบ (กรัม)

ในการทดลองใส่โทลูอีนเข้มข้น 99 % ลงในตัวกลางจำนวน 1 มิลลิลิตร ไรคลอโรเอทธิลีนมีความหนาแน่น เท่ากับ 1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร

Input = 1 มิลลิลิตร ×1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร

= 1.465 กรัม

$M_{effluent}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก (กรัม)

$$M_{effluent} = M_{main\ product} + M_{intermediate}$$

$M_{main\ product}$ = มวลของสารที่ปนเปื้อนที่เหลือหลังจากการบำบัด (กรัม)

การหาปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก ได้มาจากการวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโตโครมาโตกราฟี พบว่าความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.001 กรัมต่อ ลิตร

$M_{main\ product}$ = 0.001 กรัม

$M_{intermediate}$ คือ มวลของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัด (กรัม)

จากการทดลอง เมื่อหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำสารละลายที่ได้ไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่ามีสารตัวกลาง (Intermediate) ที่ออกมากับน้ำออกเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ สารเตตระคลอโรเอทธิลีน และสารไรคลอโรเมทเธน โดยมีความเข้มข้น 446 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

$M_{intermediate}$ = 0.446 + 0.007 = 0.453 กรัม

ดังนั้น $M_{effluent}$ = 0.453+ 0.001 = 0.454 กรัม

$M_{adsorption}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง (กรัม)

ทรายที่ใช้ในการทดลองมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 0.14 % และไตรคลอโรเอทธิลีนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Adsorption coefficient, log K_{oc}) เท่ากับ 1.93 (Brasseau *et al.*, 1990)

$$M_{adsorption} = K_d + C_{TCE} + M_{Sand} \quad \text{(วรณัฐ,2547)} \qquad (18)$$

โดยค่า K_d = ค่าสัมประสิทธิ์กระจายในดิน (Soil distribution coefficient)

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

$= 10^{1.93} \times 0.0014 =$ 0.12 มิลลิลิตรต่อกรัม

C_{TCE} คือ ความเข้มข้นของไรคลอโรเอทธิลีนที่เกิดการละลาย(มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนของน้ำเข้า เท่ากับ 1100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณน้ำทั้งหมด 0.2 ลิตร

$C_{TCE} = M_{effluent} / W$

$= 1.1/0.2$

$=$ 5. 5 กรัมต่อลิตร หรือ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร

M_{Sand} = มวลของทรายเกิดการดูดซับ คือ มวลของทรายร่วนที่ใช้ทำปฏิกิริยา

= 20 กรัม

จากสมการที่ 18

$M_{adsorption} = K_d \times C_{TCE} \times M_{Sand}$

$=$ 0.12 มิลลิลิตรต่อกรัม $\times$ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร $\times$20 กรัม

$=$ 13.2 มิลลิกรัม หรือ 0.013 กรัม

M_{loss} คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีน ส่วนที่สูญเสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (Volatile) หรือความผิดพลาด (error) อื่นๆ ของการทดลอง (กรัม)

เนื่องจากการทดลองเป็นระบบปิดจึงกำหนดให้มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนส่วนที่สูญเสียไปมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ 0 กรัม

จากสมการที่ 17

$$M_{total} = M_{oxidation} + M_{effluent} + M_{adsorption} + M_{loss}$$

$$1.465 = M_{oxidation} + 0.454 + 0.013 + 0$$

$$M_{oxidation} = 0.99$$

คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนตัวกลางทรายร่วน เท่ากับ 68.3 เปอร์เซ็นต์

3. คำนวณสมดุลมวล (mass balance) ของไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียว (Clay)

ดังนั้น Input คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนใส่ลงในระบบ (กรัม)

ในการทดลองใส่โทลูอีน เข้มข้น 99 % ลงในตัวกลางจำนวน 1 มิลลิลิตร ไรคลอโรเอทธิลีนมีความหนาแน่น เท่ากับ 1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร

Input = 1 มิลลิลิตร ×1.465 กรัมต่อมิลลิลิตร
= 1.465 กรัม

$M_{effluent}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก (กรัม)

$$M_{effluent} = M_{main\ product} + M_{intermediate}$$

$M_{main\ product}$ = มวลของสารที่ปนเปื้อนที่เหลือหลังจากการบำบัด (กรัม)

การหาปริมาณไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก ได้มาจากการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโตกราฟี พบว่าความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนที่ออกมากับน้ำออก เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.001 กรัม ต่อ ลิตร

$M_{main\ product}$ = 0.001 กรัม

$M_{intermediate}$ คือ มวลของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการบำบัด (กรัม)

จากการทดลอง เมื่อหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเมื่อนำสารละลายที่ได้ไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่ามีสารตัวกลาง (Intermediate) ที่ออกมากับน้ำออกเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ สารเตตระคลอโรเอทธิลีน และสารไรคลอโรเมทเธน โดยมีความเข้มข้น 426 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

$M_{intermediate} = 0.426 + 0.008 = 0.434$ กรัม

ดังนั้น $M_{effluent} = 0.434 + 0.001 = 0.435$ กรัม

$M_{adsorption}$ คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนที่ถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง (กรัม)

ทรายที่ใช้ในการทดลองมีค่าสารอินทรีย์คาร์บอน เท่ากับ 0.21 % และไตรคลอโรเอทธิลีนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Adsorption coefficient, log K_{oc}) เท่ากับ 1.93 (Brasseau *et al.*, 1990)

$$M_{adsorption} = K_d + C_{TCE} + M_{Sand} \quad \text{(วรณัฐ,2547)} \qquad (18)$$

โดยค่า K_d = ค่าสัมประสิทธิ์กระจายในดิน (Soil distribution coefficient)

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

$= 10^{1.93} \times 0.0021 = 0.18$ มิลลิลิตรต่อกรัม

C_{TCE} คือ ความเข้มข้นของไรคลอโรเอทธิลีนที่เกิดการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนของน้ำเข้า เท่ากับ 1100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณน้ำทั้งหมด 0.2 ลิตร

$C_{TCE} = M_{effluent} / W$

$= 1.1/0.2$

$=$ 5. 5 กรัมต่อลิตร หรือ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร

M_{Sand} = มวลของดินเหนียวที่เกิดการดูดซับ คือ มวลของทรายที่ใช้ทำปฏิกิริยา

= 20 กรัม

จากสมการที่ 18

$M_{adsorption} = K_d \times C_{TCE} \times M_{Sand}$

$=$ 0.18 มิลลิลิตรต่อกรัม $\times$ 5500 มิลลิกรัมต่อลิตร $\times$20 กรัม

$=$ 19.8 มิลลิกรัม หรือ 0.02 กรัม

M_{loss} คือ มวลของไตรคลอโรเอทธิลีน ส่วนที่ศูนย์เสียไป อาจเนื่องจากการระเหย (Volatile) หรือความผิดพลาด (error) อื่นๆของการทดลอง (กรัม)

เนื่องจากการทดลองเป็นระบบปิดจึงกำหนดให้มวลของไตรคลอโรเอทธิลีนส่วนที่สูญเสียไปมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับ 0 กรัม

จากสมการที่ 17

$$M_{total} = M_{oxidation} + M_{effluent} + M_{adsorption} + M_{loss}$$

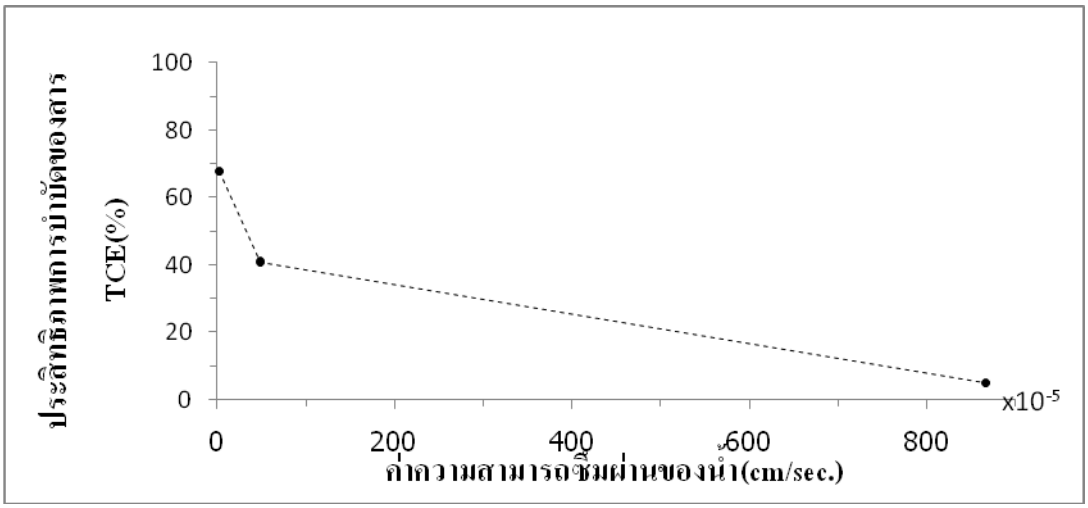
$$1.465 = M_{oxidation} + 0.435 + 0.02 + 0$$

$$M_{oxidation} = 1.01$$

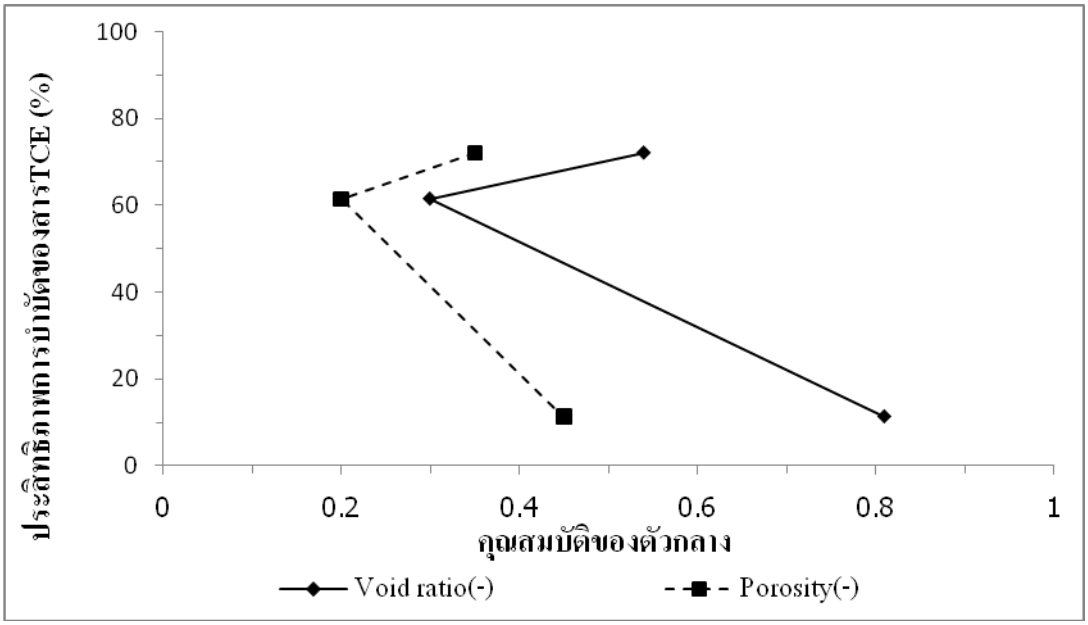
คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนตัวกลางดินเหนียว เท่ากับ 31 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นเมื่อเปรียบการทำสมดุลมวล กับค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น กับความเข้มข้นสุดท้ายในการคำนวณ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากในตัวกลางทรายที่เมื่อคิดประสิทธิภาพการบำบัดโดยจากการคำนวณความเข้มข้นพบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด 78.7 % รองลงมาคือ ทรายร่วน 70.0 % และสุดท้ายคือ ดินเหนียว 12.2 % เมื่อนำมาคิดสมดุลมวลในตัวกลางทรายมีค่าเท่ากับ 71 %, 68.3% และ 31 % ตามลำดับ ซึ่งในตัวกลางดินเหนียวมีประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเปรียบเทียบกันมีค่าความแตกต่างมากที่สุด

2.2 ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน กับคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางในแต่ละชนิด



ภาพที่ 14 อิทธิพลของค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยไม่ผ่านการเขย่า



ภาพที่ 15 อิทธิผลของค่าความพรุนและอัตราส่วนช่องว่างในตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน

ภาพที่ 14 แสดงถึงอิทธิพลของค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำในตัวกลางต่างๆ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดตัวกลางที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีน ด้วยสารโพแทสซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่ต่างกัน ณ ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ pH 7 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยไม่ผ่านการเขย่า เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพในแต่ละตัวกลาง เมื่อบำบัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีออกซิเดชันเคมี โดยจากภาพที่ 14 แสดงถึงผลการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยสารเปอร์แมงกาเนต โดยใช้ตัวแทนของตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยในแต่ละตัวกลางมีค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำที่ 8.66×10^{-3}, 4.886×10^{-4} และ 1.913×10^{-5}เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยในตัวกลางที่มีค่าความสามารถซึมผ่านด้วยน้ำมาก จะบ่งชี้ถึงในตัวกลางนั้นน้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวกลางนั้นได้น้อย เช่นในตัวกลางดินเหนียวมีค่าความสามรถซึมผ่านด้วยน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ ทรายร่วนและทราย ซึ่งในการทดลองนี้ ทำการบำบัดโดยไม่ผ่านการเขย่า เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง โดยพบว่าในตัวกลางดินเหนียวมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด เท่ากับ 4.68 % รองลงมาคือ ทรายร่วนและท้ายสุดคือ ทราย ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 40.9% และ 67.7% ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของประสิทธิภาพการบำบัดในตัวกลางทรายมีค่ามากที่สุด เนื่องมาจากสารอินทรีย์ในตัวกลางดังที่กล่าวไปแล้วในขั้นต้นและค่าของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำด้วย โดยสภาวะของชั้นดินที่สารเคมีสามารถซึมผ่านไปได้ง่าย ย่อมก่อให้เกิดการสัมผัสกับสารเคมีมากกว่า ในตัวกลางที่สารเคมีซึมผ่านไปได้ยากกว่า เนื่องมาจากการกระจายของสารเคมีที่ทำได้ยากและข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลระหว่างสารปนเปื้อนที่ถูกซับอยู่ในตัวกลาง หรืออยู่ในโพรง รอยแตกระหว่างตัวกลาง เป็นไปได้อยากมากกว่า (Siegrist *et al.*, 1999; Soga *et al.*,2004) จึงเป็นสาเหตุหลักในประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ในตัวกลางที่มีค่าความซึมผ่านของน้ำสูง

ซึ่งผลการทดลองนี้ตรงกับงานวิจัยของของ Li and Schwartz (2004) ที่บำบัดสารTCE ด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพบำบัดด้วยการละลายสารแมงกานิสออกไซด์ (MnO_2) พบว่าพื้นที่ที่บำบัดที่มีค่าความสามรถในการซึมผ่านของน้ำสูงนั้น จะพบสาร MnO_2 สูงมากกว่าพื้นที่ที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ เนื่องจากสาร MnO_2 เป็นผลิภัณฑ์ที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสารเปอร์แมงกาเนต แสดงว่าพื้นที่ที่ปนเปื้อนที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูงจะมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีสูงเช่นเดียวกัน เนื่องมาจากการสัมผัสของสารเคมีกับสารปนเปื้อนทำได้ดีกว่า ส่วนในงานวิจัย Kao *et al.* ,(2008) ได้ให้ผลการวิจัยใกล้เคียงกัน ที่ทำการบำบัดสาร TCE ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อทำการศึกษาผลกระทบของความสามารถซึมผ่านด้วยน้ำในตัวกลาง ทรายร่วน ดินเหนียวปนทราย และ ดินเหนียวปนร่วน เพื่อเป็นตัวแทนในการวิจัย โดยดินเหนียวปนร่วนมีค่าความสามารถในการซึมผ่านมากที่สุด เริ่มแรกของการทดลองใช้สาร TCE ปนเปื้อน 5 mg/l ใน

งานวิจัย โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ของตัวกลาง ทรายร่วน ดินเหนียวปนทราย และ ดินเหนียวปนร่วน มีค่าเท่ากับ 250 ,330 และ 460 นาที ตามลำดับ แสดงว่าในตัวกลางที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมาก ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์สูงกว่าในตัวกลางอื่นๆ และแม้ว่าในตัวกลางดินที่สามารถซึมผ่านของน้ำได้น้อยก็ยังสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีความเสถียร และมีความสามารถในการกระจายตัวสูงในตัวกลางชั้นน้ำใต้ดิน และทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่นอกเหนือจากปัจจัยของค่าคุณสมบัติของความสามารถในการซึมผ่านของน้ำแล้ว ต้องพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆในตัวกลางของชั้นน้ำใต้ดินอีกด้วย

ดังเช่นในภาพที่ 15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ความพรุน (-) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (-) ในตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ปนเปื้อนในตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยค่าความพรุนในตัวกลางทั้ง 3 ชนิดมีค่า ดังนี้ 0.81, 0.3 และ 0.54 ตามลำดับ และอัตราส่วนช่องว่างในตัวกลางที่ค่าเท่ากับ 0.45, 0.2 และ 0.35 โดยในดินธรรมชาตินั้นในดินเหนียวจะมีค่าความพรุนและค่าอัตราส่วนช่องว่างน้อยที่สุด เนื่องจากดินเหนียวมีลักษณะของอนุภาคดินขนาดเล็กมากกว่าดินชนิดอื่นๆ จึงสามารถเกาะตัวกันได้แน่นมากกว่า รองลงมาคือ ทรายร่วน และสุดท้ายคือ ทราย แต่ในงานวิจัยนี้ พบว่าในตัวกลางดินเหนียวมีค่าความพรุนและอัตราส่วนช่วงสูง เนื่องมาจากในงานวิจัยได้นำดินธรรมชาติมาแปลงสภาพ โดยการผ่านตะแกรงร่อนทำให้ดินที่อัดแน่น เกิดการแยกตัวเป็นผงร่วน ดังนั้นค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ จึงมีลักษณะที่ไม่ตรงกับหน้าดินธรรมชาติโดยทั่วไป ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนโดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว จึงพบว่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ ไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด อย่างมีนัยสำคัญ

3. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดจากการกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดระหว่างน้ำใต้ดินไม่มีตัวกลาง (Media) และน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง(Media)ที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนและโทลูอีนมาบำบัดโดยวิธีออกซิเดชันเคมี ด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ณ pH 7 เขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยผลการทดลองการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ทั้งไม่ใส่ตัวกลาง และมีตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วนและทราย ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 8

จากตารางที่ 8 แสดงถึงชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากกระบวนการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางชนิดต่างๆโดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ณ pH 7 โดยผ่านการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยภายหลังการบำบัดสาร TCE พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์อยู่ 3 ชนิด คือ สารเตตะคลอโรเอทธิลีน (PCE) สารไตรคลอโรมีเธน (Trichloromethane) และสารไตรคลอโรเอทธิลีน(TCE) โดยพบว่าในทุกๆตัวกลางได้ผลิตภัณฑ์รองหรือสารตัวกลางเป็นสารประเภทเดียวกัน แสดงถึงการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ซึ่งถ้ามีการบำบัดอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยจากการทดลองพบว่าในสารละลายดิน(soil slurry) ที่ทำการบำบัดทั้งหมดมีค่าของสาร trichloromethane และ สาร trichloroethylene (TCE) ใกล้เคียงกันในทุกตัวกลาง แต่ค่าของสาร tetrachloroethylene (PCE) มีค่าสูงมาก โดยพบในตัวกลาง ดินเหนียวและทรายร่วนมาก รองลงมาคือ ทรายและไม่มีตัวกลาง ตามลำดับ ซึ่งค่าของสาร PCE มีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน ที่ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินที่บัญญัติไว้ว่า สารเตตระคลอโรเอทธิลีนและสารไตรคลอโรเอทธิลีน ต้องมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตรส่วนสารไตรคลอโรมีเธนไม่มีกฎหมายกำหนดควบคุม ส่วนสาร TCE ที่พบหลังการบำบัดมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ นอกนั้นไม่พบสารอื่นที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน

เมื่อทำการศึกษากระบวนการออกซิเดชันของสาร TCE พบว่ากระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีนั้นมีหลายขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกในกระบวนการออกซิเดชันเคมี จะเริ่มจากพันธะคู่ของสาร TCE ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลุ่มของอนุพันธุ์ที่เป็นสารประกอบคลอไรด์ ในขั้นตอนแรกของการทำปฏิกิริยากลุ่มของสารแมงกาเนตจะไปร่วมตัวกับสารปนเปื้อน ณ บริเวณพันธะคู่ เกิดสารประกอบ ที่เรียกว่า cyclic hypomanganate ester (2) ซึ่งฟอร์มของสารประกอบนี้เกิดผ่าน organometallic complex โดยในขั้นตอนนี้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ซึ่งผ่าน pathway ที่มีการให้ คลอไรด์ไอออน ไฮโดรเจนไอออน สารแมงกานิสออกไซด์และ กรดคาร์บอกซิลลิก เช่นกระบวนการ oxidative hydrolysis และกระบวนการ hydrolysis อย่างปกติ โดยกระบวนการ oxidative hydrolysis นั้น เป็นกระบวนการเปลี่ยนเปลี่ยนรูปจาก cyclic ester อย่างรวดเร็วเป็นสารประกอบ cyclic manganate(VI) ester (3) โดยมีการแตกตัวเป็น formic acid (5) โดยผ่านสารประกอบที่ (4)โดยทั้งสอง path way นี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ hydrolysis ของสารประกอบ cyclic ester (2) ที่ถูกเปลี่ยนเป็น acyclic hypomangnate (V) ester (6) โดยสาร acyclic manganate(VI) ester (7)ถูกออกซิไดซ์แบบไฮโดรไลซิสจากสารประกอบ acyclic hypomangnate (V) ester (6)

ตารางที่ 8 ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากกระบวนการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางชนิดต่างๆ โดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

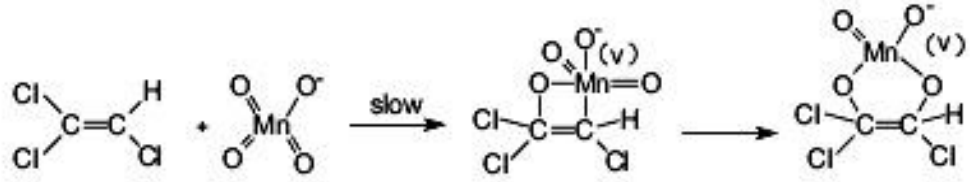
ตัวกลาง / ผลิตภัณฑ์	ไม่มีตัวกลาง	ดินเหนียว	ทรายร่วน	ทราย
ethylbenzene	-	-	-	-
1,1-dichloroethene	-	-	-	-
1,2-dichloroethene	-	-	-	-
o-xylene	-	-	-	-
styrene	-	-	-	-
trans-1,2-dichloroethene	-	-	-	-
cis-1,2-dichloroethene	-	-	-	-
benzene	-	-	-	-
tribromomethane	-	-	-	-
dibromochloromethane	-	-	-	-
bromodichloromethane	-	-	-	-
trichloromethane	6.81	7.455	6.68	5.975
dichloromethane	-	-	-	-
1,1,1-trichloroethane	-	-	-	-
carbon tetrachloride	-	-	-	-
trichloroethylene	0.93	0.87	0.92	0.95
toluene	-	-	-	-
1,1,2- trichloroethylene	-	-	-	-
tetrachloroethylene	319.35	426.31	446.96	417.25
m,p-xylenes	-	-	-	-

หมายเหตุ : วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ค่าที่แสดงมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

: เครื่องหมาย (-) คือ เครื่องไม่สามารถวิเคราะห์ได้

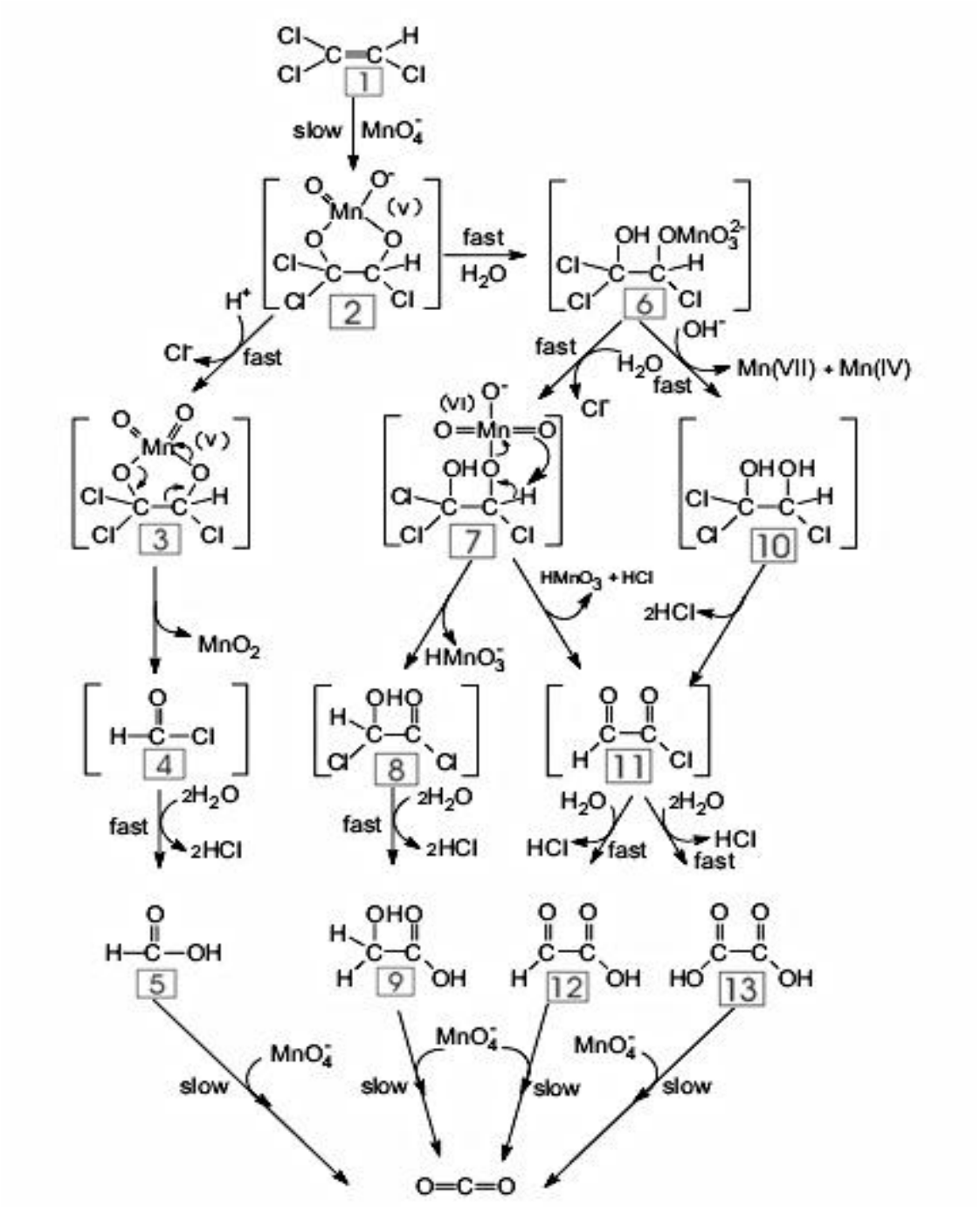
ซึ่งอาจเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน และมีการถูกแทนที่ด้วยน้ำ(hydrolysis) ได้ glycolic acid หรือ (9)ผ่านทางสารประกอบที่(8) ปลดปล่อยไฮโดรเจนและคลอไรด์ หนึ่งโมเลกุล กลายเป็นสารประกอบ glyoxylic acid (12) หรือ oxalic acid (13) ผ่านทรางสารประกอบที่ 11 ซึ่งจะเป็นสารประกอบชนิดใดนั้นขึ้นกับ path way ที่ผ่าน ส่วนในสารละลาย(soil slurry) ที่ค่า pH เป็นด่างอ่อนนั้น สารประกอบ acyclic ester อาจทำถูกแทนที่ด้วยน้ำ(ตามธรรมชาติ) กลายเป็นสารประกอบ trichloroglycol (10) ซึ่งมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนคลอไรด์ 2 โมเลกุลอย่างรวดเร็ว จากสาร 11 ซึ่งสารประกอบที่ 11 ได้ถูกแทนที่ด้วยน้ำได้สารประกอบ glyoxylic acid (12) หรือ oxalic acid (13) ซึ่งสารตัวกลางที่ 4, 8 และ 11 เป็นสารที่เรียกว่า acyl halides ที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำได้โดยง่าย โดยจะเปลี่ยนไปเป็น carboxylic acid โดยสาร carboxylic acid ที่ 5, 9, 12,13 จะถูกออกซิไดซ์ต่อ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังภาพที่ 17 (Huang *et al.*, 2002: Tsai *et al.*, 2009: Dash *et al.*, 2009)

อัตราการแตกตัวของ TCE ไม่ขึ้นกับค่า pH แม้ว่าการทำปฏิกิริยากับcyclic hypomanganate esterและการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับ pH กระบวนการทำปฏิกิริยาหลักมีอยู่ 2 กระบวนการที่ย่อยสาร cyclic hypomanganate ester โดย pH 4 การเปลี่ยนรูปของcyclic hypomanganate ester นั้นจะเด่นชัดมาก และที่ pH 6-8 การย่อยสลายเกิดเป็น glyoxylic acid (12) หรือ oxalic acid (13) ความแตกต่างระหว่าง 2 pathway นี้สามารถสังเกตได้ที่ pH สูงๆ การเปลี่ยนรูปจาก cyclic ester จะเป็นสารประกอบที่ 12, 13 โดยผ่านสารประกอบที่ 11 การที่ปฏิกิริยาการย่อยสลาย TCE ไม่ขึ้นกับ pH นั้นแต่ในธรรมชาติการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นกับ pH เป็นสำคัญ ในการเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น จะมีการเกิดสารตัวกลางในช่วงระยะเวลาสั้นๆ โดยทฤษฎีกล่าวว่าในการเริ่มต้นทำปฏิกิริยา พันธะπ ของอัลคีน (alkene)จะเกิดพันธะ metal-oxo bond ของแมงกานีส ซึ่งจะเปลี่ยนเป็น organometallic complex ซึ่งเรียกว่า cyclic hypomanganate ester ซึ่งในทฤษฎีนี้แสดงว่า TCE ถูกจับด้วย electropositive metal (แมงกานีส) ผ่านกระบวนการดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ขั้นตอนของเปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) รวมตัวกับ TCE เกิดสารประกอบที่เรียกว่า cyclic hypomanganate ester

ที่มา: Dash *et al.* (2009)



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนตกับสารไตรคลอโรเอทธิลีน

ที่มา: Dash *et al. (*2009)

ดังนั้นจากผลการทดลองสาร PCE จึงไม่น่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นค่าความเข้มข้นที่เกิดขึ้นของสารPCE น่าจะเกิดจากความผิดพลาดของการทดลองที่มีการปนเปื้อนของขวด reactor ส่วนสาร Trichloromethane ที่พบด้วยนั้น ถือว่ามีความเป็นไปได้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์และความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์อาจไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา จึงทำให้ปฏิกิริยาหยุดที่ path way นี้ โดยสาร Trichloromethane ที่พบมีคุณสมบัติที่มีความพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ โดยจากข้อมูลของศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ของกรมควบคุมมลพิษพบว่าสาร Trichloromethane เป็นสารที่คาดการว่าก่อให้เกิดมะเร็ง ถ้าสัมผัสไอระเหยของสารนี้เป็นระยะเวลานานหรือสัมผัสถูกสารเคมีบ่อยๆอาจจะทำให้ระบบประสาทส่วนกลาง หัวใจ ตับ และไต ถูกทำลายได้ ผลกระทบจากการสัมผัสกับของเหลวจะทำให้ไขมันถูกทำลายลง อาจจะทำให้ผิวหนังมีการระคายเคืองเรื้อรัง ทำให้ผิวหนังแห้ง และเกิดผิวหนังอักเสบได้

ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้น พบว่าสิ่งแวดล้อมถูกทำลายเสียหาย เมื่อรั่วไหลสู่ดิน สามารถชะล้างลงสู่น้ำใต้ดิน และเมื่อรั่วไหลสู่น้ำจะเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว เมื่อเป็นสารระเหยไม่สามารถคาดได้ว่าจะสะสมสิ่งมีชีวิต โดยมีระยะเวลาของการสลายตัวไปครึ่งหนึ่ง (Half life) ภายในเวลาน้อยกว่า 1-10 วัน ซึ่งสลายตัวได้ปานกลางโดยทำปฏิกิริยากับสารไฮดรอกซิล เรดิคอล ($OH^{\cdot}$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีกับแสง เมื่อรั่วไหลสู่อากาศ แต่เมื่อเป็นสภาวะสารระเหยสามารถสลายตัวโดยการสังเคราะห์แสงได้ปานกลาง เมื่อมีการปนเปื้อนลงแม่น้ำลำคลอง ถือว่าเป็นสารพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยถ้าความเข้มข้นของสารมากกว่า 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถือว่าเป็นค่าความเข้มข้นที่ทำให้ปลาตายกว่าร้อยละ 50 และมีค่า LD 50 ภายใน 96 ชั่วโมง ซึ่งค่าที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าน้อยเกินกว่าที่จะเกิดอันตรายร้ายแรง

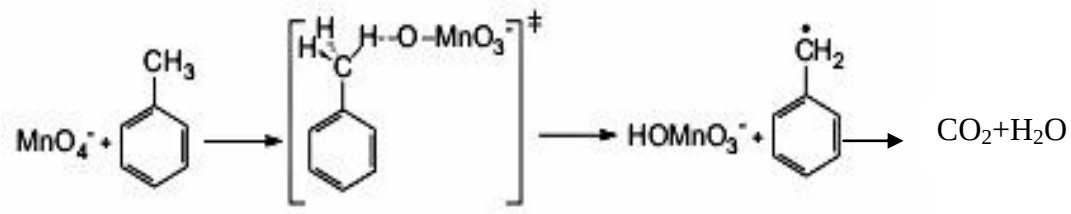
ตารางที่ 9 ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากกระบวนการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางชนิดต่างๆ โดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ตัวกลาง / ผลิตภัณฑ์	ไม่มีตัวกลาง	ดินเหนียว	ทรายร่วน	ทราย
Ethylbenzene	-	-	-	-
1,1-dichloroethene	-	-	-	-
1,2-dichloroethene	-	-	-	-
o-xylene	-	-	-	-
styrene	-	-	-	-
Trans-1,2-dichloroethene	-	-	-	-
Cis-1,2-dichloroethene	-	-	-	-
benzene	-	-	-	-
Tribromomethane	-	-	-	-
Dibromochloromethane	-	-	-	-
bromoDichloromethane	-	-	-	-
trichloromethane	1.18	1. 19	1.17	1.22
dichloromethane	-	-	-	-
1,1,1-trichloroethane	-	-	-	-
Carbon tetrachloride		-	-	-
trichloroethylene	0.18	0.23	0.29	0.34
Toluene	72.82	108.04	79.58	58.76
1,1,2- trichloroethylene	-	-	-	-
tetrachloroethylene	2.93	3.95	0.35	1.41
M,p-xylenes	-	-	-	-

หมายเหตุ : วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ค่าที่แสดงมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

: เครื่องหมาย (-) คือ เครื่องไม่สามารถวิเคราะห์ได้

ด้านการศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจากการบำบัดสารโทลูอีนโดยวิธีออกซิเดชันเคมี โดยผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 9 ที่แสดงถึงสารตัวกลางที่เกิดหลังจากการบำบัดสารโทลูอีนเพื่อเปรียบเทียบทั้งในการบำบัดอย่างไม่มีตัวกลางและมีตัวกลางโดยใช้ตัวกลาง 3 ชนิด คือดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เขย่าที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยในทั้ง 3 ตัวกลางและไม่มีตัวกลาง มีสารตัวกลางชนิดเดียวกัน โดยพบสารโทลูอีนมีความเข้มข้นมากที่สุดในกลุ่มของสารที่พบทั้งหมด โดยในการทดลองนี้พบสารตัวกลางทั้งหมด 3 ชนิด คือ ไตรคลอโรมีเธน (trichloromethane) , เตตระคลอโรเอทธิลีน (tetrachloroethylene) และ สารไตรคลอโรเอทธิลีน (trichloroethylene) โดยพบว่าในตัวกลางดินเหนียว มีค่าความเข้มข้นของสารโทลูอีนที่เหลือหลังจากการบำบัดมากที่สุด รองลงมาคือ ทรายร่วน ไม่ใส่ตัวกลางและทราย ตามลำดับ โดยการบำบัดในงานวิจัยนี้ ถือว่ายังทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังพบสารโทลูอีนที่หลังเหลืออยู่มากกว่าปริมาณที่มาตรฐานน้ำใต้ดินกำหนด คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่พบสารตัวกลางหลังจากการบำบัดสารโทลูอีน ซึ่งผลการทดลองการศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดนี้ได้ทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-MS ซึ่งได้ทำการตรวจวัดสารเพียงแค่ 20 ชนิดตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาลเท่านั้น ดังแสดงรายชื่อของสารที่ตรวจวัดในตารางที่ 8 และ 9 ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดของสารโทลูอีนนั้น ไม่พบสารตัวกลางชนิดอื่นที่เกิดขึ้นหลังจากบำบัด



ภาพที่ 18 การทำปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนตกับสารโทลูอีน

ที่มา: Dash *et al. (*2009)

โดย Dash et al. (2009) ได้อธิบายกระบวนการทำปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนตกับโทลูอีน โดยขั้นแรกของการทำปฏิกิริยาจะมีการแทนที่ของไฮโดรเจนอะตอมโดยสารเปอร์แมงกาเนต ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยานี้มีการจับของไฮโดรเจนอะตอมของสารปนเปื้อนกับออกซิเจนของสารออกซิไดซ์ เกิดเป็นที่พันธะ O-H ดังภาพที่ 18 โดยข้อกำจัดของการทำปฏิกิริยานี้คือการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนอะตอมจาก

กลุ่มของสาร manganese oxo เมื่อทำปฏิกิริยาตามลำดับขั้นตอนทำให้พันธะ C-H แตกตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไป จนสุดท้ายได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เมื่อพิจารณาของขั้นตอนการทำปฏิกิริยาระหว่างสารโทลูอีนและเปอร์แมงกาเนตแล้ว พบว่าสารที่พบทั้ง 3 ชนิด คือไตรคลอโรมีเธน (trichloromethane) , เตตระคลอโรเอทธิลีน (tetrachloroethylene) และ สารไตรคลอโรเอทธิลีน (trichloroethylene) นี้คาดว่าเกิดจากการปนเปื้อนของการทดลอง เนื่องจากสารทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคลอไรด์ (chlorinated hydrocarbon) ซึ่งไม่ใช้สารที่เป็นองค์ประกอบของสารโทลูอีนที่ทำการบำบัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองการเกิดออกซิเดชันของไตรคลอโรเอทธิลีนและโทลูอีนที่ปนเปื้อนในตัวกลางที่ต่างกันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (โดยการทดลองระดับห้องปฏิบัติการและจำลองการปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนและโทลูอีนที่บำบัดนอกพื้นที่ (ex situ remediation) โดยสารตัวกลางที่เป็นแทนในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยในตัวกลางดินเหนียว และทรายร่วนมีการร่อนผ่านตะแกรง เพื่อคัดแยกอนุภาคดิน เพื่อให้ได้อนุภาคดินและประเภทของตัวกลางตามต้องการ ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดินไปบางส่วน ซึ่งอาจไม่ตรงตามกับคุณสมบัติของดินทางธรรมชาติบางประการ) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาหาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน

1.1 ใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่ใช้ในการทดลอง คือ ปริมาณ 1, 5, 10, 15,20 , 25 , 30 , 35, 40 , 50 , 60 , 70 , 80 , 90 , 100 และ 110 มิลลิลิตร

1.2 ปริมาณของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 110 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 98.24 รองลงมา คือ ประสิทธิภาพการบำบัดที่ร้อยละ 97.34 โดยใช้ปริมาณสารออกซิเดชันที่ 100

1.3 ส่วนปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดพบว่าที่ ปริมาณของสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตที่ 110 มิลลิลิตร มีปริมาณการปลดปล่อยคลอไรด์ เท่ากับ 44.13 กรัมต่อลิตร เมื่อหลังการบำบัดจะพบปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามประสิทธิภาพการบำบัด ตามลำดับ โดยในการบำบัดสารปนเปื้อนโดยใช้ปริมาณสารออกซิไดซ์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรพบว่ามีการปลดปล่อยคลอไรด์เท่ากับ 430.0 กรัมต่อลิตร

1.4 ซึ่งมีการปลดปล่อยคลอไรด์ไม่แตกต่างกันมากอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงเลือกปริมาณสารโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนไตรคลอเอทธิลีน ที่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากที่สุดเมื่อเทียบกับมวลของสารที่ใช้ในการบำบัดสูงสุด

2. ศึกษาความสามารถของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่บำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน

2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดในตัวกลางทรายมีค่าสูงที่สุด คือ 78.7 % รองลงมาคือทรายร่วนและดินเหนียว ที่ประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 70.0 และ 12.2 %ตามลำดับ เนื่องจากปัจจัยทางด้านสารอินทร์คาร์บอนรวม ซึ่งในตัวกลางทรายมีค่าน้อยที่สุด และ ทรายร่วน สุดท้าย คือดินเหนียว

2.2 ค่าสารอินทรีย์คาร์บอนรวม ในตัวกลางทราย ทรายร่วนและ ดินเหนียว เท่ากับ 0.02, 0.14 และ 0.21 %

2.3 ค่าคลอไรด์ ไอออนพบว่าในตัวกลางทรายมีค่าการปลดปล่อยคลอไรด์มากที่สุดในชั่วโมงที่ 1 เท่ากับ 670.5 กรัมต่อลิตร รองลงมาคือทรายร่วน และดินเหนียวที่ 532.5 และ 507.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับเมื่อระยะการบำบัดผ่านชั่วโมงแรกแล้ว ค่าของคลอไรด์ในแต่ละตัวกลางค่อนข้างคงที่

2.4 อัตราภาระบรรทุกของตัวกลางดินเหนียว ทรายร่วน และ ทราย มีค่า เท่ากับ 1.06, 5.61 และ 6.1mmol/l.hr

3. ศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนสารไตรคลอโรเอทธิลีนกับค่าสารอินทรีย์คาร์บอน (Soil organic matter) ในตัวกลางแต่ละชนิด

โดยค่าสารอินทรีย์ที่นำมาเปรียบเทียบได้จากตัวกลางทรายออตตาวา ,ดินเหนียว ,ทรายร่วนและทราย โดยในตัวกลางทราย ทรายร่วน และดินเหนียว มีค่าสารอินทรีย์ในตัวกลาง เท่ากับ 0.02 %, 0.14 %และ 0.21% ตามลำดับ ส่วนในตัวกลางทรายออตตาวาในงานวิจัยนี้ ถือว่ามีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากทรายออตตาวาเป็นทรายที่ได้จากการสังเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ไม่ใช่ทรายจากหน้าดินธรรมชาติ และมีค่าสารอินทรีย์ในทรายออตตาวาน้อยมากจนแทบจะไม่มีเลย จึงกำหนดให้สารอินทรีย์ในทรายออตตาวามีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 13 พบว่าในตัวกลางทรายออตตาวามี

ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คือ 99.99% รองลงมาคือ ทราย ทรายร่วน และดินเหนียว ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน เท่ากับ 78.7 % ,70.0 %และ 12.2% ตามลำดับ

4. ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทธิลีน กับคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางในแต่ละชนิด

4.1ใช้ตัวแทนของตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยในแต่ละตัวกลางมีค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำที่ 8.66×10^{-3}, 4.886×10^{-4} และ 1.913×10^{-5}เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

4.2โดยในตัวกลางที่มีค่าความสามารถซึมผ่านด้วยน้ำมาก จะบ่งชี้ถึงในตัวกลางนั้นน้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในตัวกลางนั้นได้น้อย เช่นในตัวกลางดินเหนียวมีค่าค วามสามรถซึมผ่านด้วยน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ ทรายร่วนและ ทราย

4.3 เมื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง โดยพบว่าในตัวกลางดินเหนียวมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยที่สุด เท่ากับ 4.68 % รองลงมาคือ ทรายร่วนและท้ายสุดคือ ทราย ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 40.9% และ 67.7% ตามลำดับ

4.4 อิทธิพลของความพรุน (-) และค่าอัตราส่วนช่องว่าง (-) ในตัวกลางที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนที่ปนเปื้อนในตัวกลาง 3 ชนิด คือ ดินเหนียว ทรายร่วน และทราย โดยค่าความพรุนในตัวกลางทั้ง 3 ชนิดมีค่า ดังนี้ 0.81, 0.3 และ 0.54 ตามลำดับ และอัตราส่วนช่องว่างในตัวกลางที่ค่าเท่ากับ 0.45, 0.2 และ 0.35

4.5 ในงานวิจัยนี้ พบว่าในตัวกลางดินเหนียวมีค่าความพรุนและอัตราส่วนช่วงสูง เนื่องมาจากในงานวิจัยได้นำดินธรรมชาติมาแปลงสภาพ โดยการผ่านตะแกรงร่อน ทำให้ดินที่อัดแน่น เกิดการแยกตัวเป็นผงร่วน ดังนั้นค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ จึงมีลักษณะที่ไม่ตรงกับหน้าดินธรรมชาติโดยทั่วไป ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนโดยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว จึงพบว่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ ไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัด อย่างมีนัยสำคัญ

5. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของสารตัวกลาง (Intermediate) และผลิตภัณฑ์รอง (By product) ที่เกิดจากการกระบวนการออกซิเดชันเคมีบำบัดระหว่างน้ำใต้ดินไม่มีตัวกลาง (Media) และน้ำใต้ดินในสภาวะการจำลองในตัวกลาง (Media) ที่ปนเปื้อนโทลูอีนและไตรคลอโรเอทธิลีน

5.1 ผลการศึกษาการสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสาร TCE พบว่าในทุกๆตัวกลางได้ผลิตภัณฑ์สารประเภทเดียวกัน ทั้ง 3 ชนิด คือ สาร trichloromethane, tetrachloroethylene (PCE) และ สาร trichloroethylene (TCE) แต่ค่าของสาร tetrachloroethylene (PCE) มีค่าสูงมาก

5.2 ความเข้มข้นของสาร trichloromethane และ สาร trichloroethylene (TCE) มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ส่วนด้านของสาร tetrachloroethylene (PCE) มีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดินกำหนด

5.3 พิจารณาจากกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเคมีของสารเปอร์แมงกาเนต กับ TCE พบว่าความเป็นไปได้ที่เกิดผลิตภัณฑ์ได้เป็นสาร PCE ถือว่าเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นสาร PCE ที่เกิดขึ้นน่าเกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง

5.4 ผลการศึกษาการสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารโทลูอีนไม่พบสารตัวกลางชนิดอื่นที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารโทลูอีน แต่อย่างไรตามก็ไม่สามารถสรุปได้ว่าไม่มีสารตัวกลางเกิดขึ้นหลังจากการบำบัด เนื่องจากการวิเคราะห์สารนั้น ตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-MS ที่ทำการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยตามมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินกำหนด ใน 20 ชนิดเท่านั้น ไม่ครอบคลุมสารอินทรีย์ชนิดอื่นด้วย จึงไม่สามารถสรุปว่าไม่พบสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัด

ข้อเสนอแนะ

1.การทดลองหาปริมาณหาสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมควรทำการทดลองในความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในหลายๆความเข้มข้น (soil slurries matrix) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนมากขึ้น ในการทดลองทดลองหาปริมาณของสารเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นของสารไตรคลอโรเอทธิลีนเพียงความเข้มข้นเดียว ดังนั้นในการศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัด จึงมีการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์และความเข้มข้นของสารปนเปื้อนหลังจากการบำบัดมีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน

2.ตัวกลางที่ใช้เป็นตัวกลางที่ถูกแปรสภาพจากดินธรรมชาติ เพื่อให้ได้ตามประเภทดินที่ต้องการ โดยการผ่านตะแกรงร่อน เบอร์ 70 เพื่อให้ได้อนุภาคดินเหนียว และตะแกรง เบอร์35 เพื่อให้ได้ทรายร่วน และทรายซึ่งถูกล้างด้วยกรดซัลฟูริค 10 % และอบที่ 105 องศา ดังนั้น ผลการทดลองเมื่อทำไปประยุกต์ใช้จริง อาจมีผลการทดลองที่ต่างจากงานวิจัยนี้

3. การศึกษาหาผลิตภัณฑ์สารตัวกลาง (intermediate) ในงานวิจัยมีความผิดพลาด โดยมีค่าการปนเปื้อนของสารเตตระคลอโรเอทธิลีนสูง ดังนั้นเมื่อนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้งานควรมีการศึกษาและทดลองเพิ่มเติม

4. ในการนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริง จะมีความแตกต่างของสภาวะต่างๆ อาจต้องมีการนำดินจากพื้นที่จริงมาใช้ในการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. **โทลูอีน**. ครั้งที่2.กองการจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ

กิจการ พรหม. 2547. **อุทกธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม.** มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. ครั้งที่1.มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ

จุฑารัตน์ ศรีภูมั่น. 2548. **การฟื้นฟูน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการออกซิเดชันเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฉลอง บัวผัน. 2528. **น้ำบาดาล**. ครั้งที่1. โอ.เอสพริ้นติง เฮาส์, กรุงเทพฯ

ชูโชค อายุพงศ์. 2535. **อุทกวิทยา**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่

ประดิษฐ์ มีสุข. 2547. **เคมีอินทรีย์เบื้องต้น**. มหาวิทยาลัยทักษิณ, สงขลา

ปราโมทย์ ไชยเวช. 2533. **ปิโตเลียมเทคโนโลยี**. ครั้งที่1. โรงพิมพ์สุนทรออฟเซท, กรุงเทพฯ

มณเทียร กังศศีเทียม. 2529. **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม.** กองวิจัยและทดลอง. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ

ยงยุทธ โอสถสภา. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** พิมพ์ครั้งที่ 7 .ภาควิชาปฐพีวิทยา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.กรุงเทพฯ

วรณัฐ ศรีพงษ์พิจิตร. 2549. **การศึกษาพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่**

อิ่มตัว ด้วยการวิเคราะห์จากภาพดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

วรรณิภา หน่องพงษ์. 2550. **ออกซิเดชันเคมีของโทลูอีนในเขตอุ้มน้ำโดยการใช้สารออกซิไดซ์ที่ถูกปลดปล่อยอย่างช้าๆ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

วิเชียร ฝอยพิกุล. 2548. **เทคนิคการใช้ดิน-ปุ๋ย-น้ำ.คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, สุรินทร์

วิโรจ อิ่มพิทักษ์. 2531. **การจัดการดิน.** คณะเกตษร.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

วีระพล แต้สมบัติ. 2528. **หลักอุทกวิทยา**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สันติ ทองพำนัก. 2528. **หลักอุทกวิทยา**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม

ไสว พงศ์สุวรรณ. ม.ป.ป. **น้ำใต้ดิน**. มหาวิทยาลัยเกตษรศาสตร์, กรุงเทพฯ

อรมณี นิมมาลัยแก้ว. 2549. **การบำบัดการปนเปื้อนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยการเกิดออกซิเดชันเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

Bogan, B.W. and V. Trbovic. 2003. **Effect of sequestration on PAH degradability with Fenton's reagent: roles of total organic carbon, humin, and soil porosity**, J. Hazard. Mater. **100** (1–3): 285–300

Boulding, J. Russell. 1996. **EPA Environmental Engineering Source Book**, Ann Arbor Press. Inc, Michigan

Brown, G.s. 2002. **Permanganate Oxidation of Sorbed Polycyclic Aromatic Hydrocarbons**. Waste Management. 23(2003): 737-740

Christensen, J.S. and J. Elton. 1996**. Soil and Groundwater Pollution from BTEX**. Available Source: http://ewr.cec.vt, July 11, 2008

Dash, Sukalyan, Sabita Patel and Bijay K. Mishra. 2009. **Oxidation by permanganate: synthetic and mechanistic aspects**. Tetrahedron .65 (2009): 707–739

Ferrarese, Elisa., Gianni Andreottola and Irina Aura Oprea. 2008. **Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation**. Journal of Hazardous Material. 152(2008): 128-139

Fitter, C.W. 1992. **Contaminant Hydrology**, 2nd ed. Macmillan Publishing Company, New York

Fitts, Charles R. 2002. **Groundwater Science**. Elsevier Science Hd. Great Britain, Bath

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

Guo, Ting, Zhipeng Bai, Can Wu and Tan Zhu. 2008. **Influence of Relative Humidity on Photo Catalytic Oxidation (PCO) of Toluene by TiO_2 Load on Activated Carbon Fibers: Co Rate and Intermediate Accumulation**. Applied catalysis B: Environmental 79 (2008) :171-178

Hardisty, paul E. and Ece Özdemiroglu. 2005.**The Ecconomic of Groundwater Remediation and Protection**. CRC Press Inc, Florida

Harr, M.E. 1962. **Groundwater and Seepage**. McGraw-hill Inc., New York

Hasan, Syed E. 1996. **Geology and Hazardous Waste Management**. Prentice-Hall, Inc, New Jersey

Heiderscheidt, J.L., R.L. Siegrist and T.H. Illangasekare. 2008. **Intermediate-scale 2D experimental investigation of in situ chemical oxidation using potassium permanganate for remediation of complex DNAPL source zones**. Journal of Contaminant Hydrology. 102: (3–16)

Hønning, J., M.M. Broholm, and P.L. Bjerg. 2007. **Quantification of potassium permanganate consumption and PCE oxidation in subsurface materials**. Journal of Contaminant Hydrology. 90: (221–239)

Huang. Kun-Chang., George E.Hoga, Pradeep Chheda, Bernard A. Woody and Gregory M.Dobbs. 2001. **Chemical Oxidation of Trichloroethylene with Potassium Permanganate in Porous Medium**. Advance in Environmental Research. 7(2002): 217-229

Kao, C.M., K.D. Huang, J.Y. Wang, T.Y. Chen and H.Y. Chien. 2007. **Application of Potassium Permanganate as an Oxidant for In Situ Oxidation of Trichloroethylene-Contaminated Groundwater: A Laboratory and Kinetics Study**. Journal of Hazardous Materials. 153(2008): 919-92

Kulik, N., A. Goia, M. Trapidoa and T. Tuhkanenb.2006. **Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combined chemical pre-oxidation and bioremediation in creosote contaminated soil**, J. Environ. Manage. **78**: 382–39

Kun, Zhu, Chen Huf, Li Guanghe and Liu Zhaochang. 1997 . In Situ Remediation of Petroleum Compounds in Groundwater Aquifer with Chlorine Dioxide VII: s0043-1354(970 00374-6)

LaGrega, M.D., P.L. Buckingham, and J.C. Evans. 2001. **Hazardous Waste Management**, 2nd ed. McGraw-hill Inc., New York

Lee, Eung Seok and Franklin W.Schwartz. 2006. **Charateristics and application of controlled-release $KMnO_4$ for groundwater remediation**. Chemophere. 66: 2058-2066

Lee, Eung Seok and Franklin W.Schwartz. 2007. **Charaterization and optimization of long-term controlled release system for groundwater remediation: A generalized modeling approach**. Chemophere. 69: 247-253

Lee . Eung Seok and Franklin W.Schwartz. 2008. **Characterization of controlled-release $KMnO_4$ (CRP) barrier system for groundwater remediation : A pilot- scale flow-tank study**. Chemophere. 71:902-910

Lehr, Jay. 2002. **Handbook of Complex Environmental Remediation Problem**. McGraw-hill Inc., NewYork

Li, X. David and Franklin W.Schwartz. 2004. **DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate. Part I. Mineralogy of Mn oxide and its dissolution in organics acids.** Journal of Contaminated hydrology. 68:39-53

Li, X. David and Franklin W.Schwartz. 2004. **DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate. Part II Increasing removal efficiency by dissolving Mn oxide precipitate**s. Journal of Contaminated hydrology 68:269-278

Liang, Chenju and I-Ling Lee. 2008. **In situ iron activated per sulfate oxidative fluid sparging treatment of TCE-contamination — A proof of concept study.** Journal of Contaminant Hydrology. 100: 91–100

Marcel van der perk. 2006. **Soil &Water Contamination from Molecular to Catchment Scale**. Taylor and Francis Group, LLC, London

Mercer, J.W. and R.M. Cohen. 1990. **A review of immiscible fluids in the subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation**. Journal of contaminate Hydrology. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Mirsal, Ibrahim A. 2004. **Soil Pollution: Origin, Monitoring & remediation**. Springer-verlag, Berlin

Montgomery, John H. 2007. **Groundwater Chemical Desk Reference**. Tayloy and Francis Group, LLC, London

Nyer, Evan K.N. 1992. **Groundwater Treatment Technology**. 2nd ed. Vannostrand reinhold, New York

Pankow, J.F. and J.A. Cherry. 1996. **Dense Chlorinated Solvent and Other DNAPls in Groundwater: History, Behavior, and Remediation**.Waterloo Press. Portland, Oregon

Pinder, Grorge F. and Celia,Miceael A. 2006. **Subsurface Hydrology**. John Wiley&Sons Inc, Hoboken, New Jersey

Rivas, F. Javier. 2006. **Polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on soils: A short review of chemical oxidation based treatments**. Journal of Hazardous Materials.138: 234–251

Sathesan, suthan S. 2002. **Natural and Enhanced remediation system**. CRC Press Inc, Florida

Schnarr, M., C. Truax, G. Farquhar, 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 Contaminate Hydrology. 29(1998): 205-224

Schroth, M. H., M. Oostrom, T.W. Wietsma and J. D. Istok. 2001. **In Situ Oxidation of Trichloroethylene by Potassium Permanganate: Effects on Porous Medium Hydraulic Properties**. Journal Contaminant Hydrology. 50(2001): 79-98

Seller, Kathleen. 1999. **Fundamental of Hazardous Waste site Remediation**. CRC Press. LLC, Florida

Soga, K., J.W.E. Page and T.H.I llangasekare. 2004. **A review of NAPL source zone Remediation efficiency and the mass flux approach**. Journal of Hazardous Materials. 110: 13–27

Sirguey, Catherine,Paula Tereza de Souza e Silva ,Christophe Schwartz and Marie-odile Simonnot. 2008. **Impact of chemical oxidation on soil quality**. Chemosphere. 72: 282–289

Sun, Hong-Wen and Qi-She Yan. 2007. **Influence of Fenton oxidation on soil organic matter and its sorption and desorption of pyrene**. Journal of Hazardous Materials.144: 164–170

Testa, Stephen M.1994.**Geological Aspects of Hazardous waste Management**, CRC Press Inc, Florida

Tunnicliffe, B.S. and N.R.Thomson.2003.**Mass removal of chlorinated ethylene from rough-walled fractures using permanganate**. Journal of Contaminant Hydrology. 75 (2004): 91–114

Tsai ,T.T., C.M. Kao, A. Hong, S.H. Liang and H.Y. Chien. **Remediation of TCE-contaminated aquifer by an in situ three-stage treatment train system**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Eng. Aspects 322 (2008) 130–137

Tsai , T.T, C.M. Kao, T.Y. Yeh, S.H. Liang and H.Y. Chiena. 2009. **Application of surfactant enhanced permanganate oxidation and biodegradation of trichloroethylene in groundwater**. Journal of Hazardous Materials 161 (2009): 111–119

Tsa,T.T. and C.M. Kao. 2009. **Treatment of petroleum-hydrocarbon contaminated soils using hydrogen peroxide oxidation catalyzed by waste basic oxygen furnace slag**. Journal of Hazardous Materials. xxx: xxx–xxx

United nation. 2000. **Compendium of soil clean-up technologies and soil remediation companies**, 2nd ed. United nation, New York

Wang, Lawrence K. 2007. **Hazardous Industrial Waste Treatment**, Tayloy and Francis Group, LLC, Boca Raton

Yan, Y. Eugene and Franklin W. Schwartz, 2000**. Kinetics and Mechanisms for TCE Oxidation by Permanganate**. Department of Geological Sciences, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210

Yan, Y.E. and F.W. Schwartz. 2000. **Kinetics and mechanism for TCE oxidation by permanganate**. Environmental Science Technology.**34** 12: 2535–2541.

Youg, Raymond N. 2001. **Geoenvironmental Engineering : Contaminated Soil, Pollution fate And Mitigation**,CRC Press, New York

Younger, paul L. 2007. **Groundwater In The Environment: An Introduction**. Blackwell Publising, oxford

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐานและการคำนวณ

กราฟมาตรฐานและตัวอย่างการคำนวณ

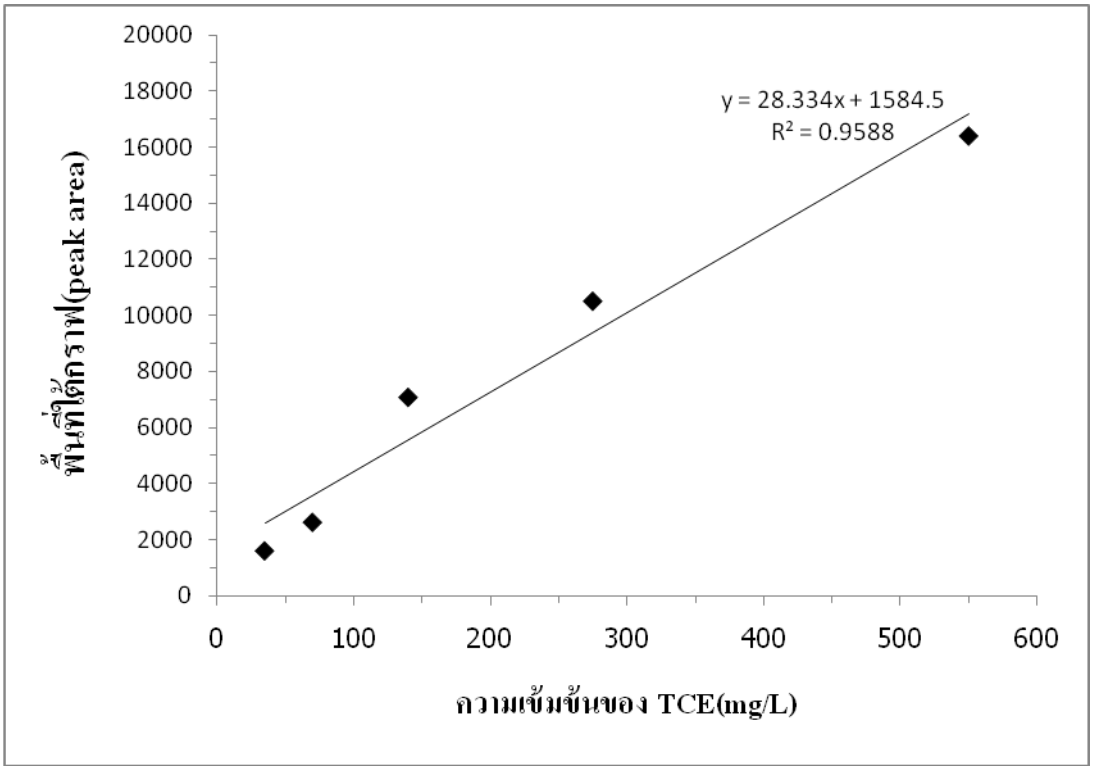
1. กราฟมาตรฐานไตรคลอโรเอทธิลีน

เตรียมไตรคลอโรเอทธิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gastrochromatography (GC) ซึ่งค่าพื้นที่ใต้กราฟ(peak area) ที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนต่างๆ

ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area)
550	16391.17
275	10509.00
140	7085.90
70	2635.40
35	1618.87
0	0

นำค่าที่ได้มาลงจุดในกราฟระหว่างความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีน(มิลลิกรัมต่อลิตร) กับค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ และใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาปริมาณโทลูอีนในตัวอย่างอื่นๆ ต่อไป



ภาพผนวกที่ ก1 ค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ที่ความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีนต่างๆ

สมการ $y = 91.735x - 9480.6$, $R^2 = 0.8861$

โดย y = ค่าพื้นที่ใต้กราฟ

x = ค่าความเข้มข้นไตรคลอโรเอทธิลีน

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองศึกษาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ในตัวกลางดินเหนียวโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ปริมาณKMnO4(ml)	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ	ประสิทธิภาพ(%)	NaCl (%)
0	235352.15	0	0.0
1	219249.8	6.84	09.7
5	138320.27	41.23	31.3
10	117854.60	49.92	56.0
15	98241.83	58.26	77.0
20	98236.3	58.26	147.0
25	94333.43	59.92	169.0
30	78216.9	66.77	189.7
35	69948.8	70.28	202.0
40	64065.73	72.78	221.0
50	50762.1	78.43	268.3
60	48438.9	79.42	282.7
70	41275.8	82.46	322.7
80	24433.45	89.62	350.3
90	9100.23	96.13	393.7
100	6255.2	97.34	430.0
110	4142.65	98.24	441.3

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองศึกษาปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีน ในตัวกลางทรายออตตาวาโดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ปริมาณKMnO4	พื้นที่ใต้กราฟ	ประสิทธิภาพ(%)	NaCl (%)
0	13610.1	0.00	0.0
1	12515.6	8.04	3.0
5	8746.2	35.74	35.0
10	5824.6	57.20	75.0
20	4380.4	67.81	149
30	2118.4	84.44	200
40	1914.5	85.93	222
50	2042.3	84.99	349
60	2193.3	83.88	358
70	1541.0	88.68	410
80	528.0	96.12	442
90	ND	99.99	516
100	ND	99.99	575

หมายเหตุ: ND คือ not detected (มีความเข้มข้นน้อยกว่า 5 mg/l)

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางดินเหนียว โดยใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เวลา(Retention Time)(hr)	พื้นที่ใต้กราฟ	NaCl (%)	ความเข้มข้นของTCE(mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด(%)
0	20950.95	0	683.50	0
1	19930.85	507.5	647.5	5.26
2	18879.53	516.33	610.39	10.69
3	18580.50	484.0	599.84	12.23

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทรายร่วน โดยใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เวลา(Retention Time)(hr)	พื้นที่ใต้กราฟ	NaCl (%)	ความเข้มข้น (mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด(%)
0	20386.80	0.00	737.901461	0
1	19429.87	532.5	629.821651	14.65
2	11709.97	545.0	357.36100	51.57
3	7853.30	533.5	221.246559	70.02

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางทราย โดยใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เวลา(Retention Time)(hr)	พื้นที่ใต้กราฟ	NaCl (%)	ความเข้มข้น (mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด(%)
0	18901.20	0.00	611.16	0
1	7617.65	670.5	212.93	65.16
2	5957.20	619.0	154.32	74.75
3	5269.65	612.0	130.06	78.72

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารไตรคลอโรเอทธิลีนในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ไม่มีตัวกลาง, ดินเหนียว, ทรายร่วน และ ทราย โดยใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สารที่ตรวจพบ / ชนิดตัวกลาง	TCE(ppm)	PCE (ppm)	Trichloromethane (ppm)
ไม่มีตัวกลาง	0.93	319.35	6.81
ดินเหนียว	0.87	426.31	7.455
ทรายร่วน	0.92	446.96	6.68
ทราย	0.95	417.25	5.975

ตารางภาคผนวกที่ ข7 ผลการทดลองศึกษาสารตัวกลางที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดสารโทลูอีนในตัวกลางที่ต่างกัน คือ ไม่มีตัวกลาง, ดินเหนียว, ทรายร่วน และ ทราย โดยใช้ปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 100 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สารที่ตรวจพบ				
ชนิดตัวกลาง	toluene(ppm)	TCE (ppm)	PCE (ppm)	Trichloromethane (ppm)
ไม่มีตัวกลาง	72.82	0.18	2.93	1.18
ดินเหนียว	108.04	0.23	3.95	1.19
ทรายร่วน	79.58	0.29	0.35	1.17
ทราย	58.76	0.34	1.41	1.22

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

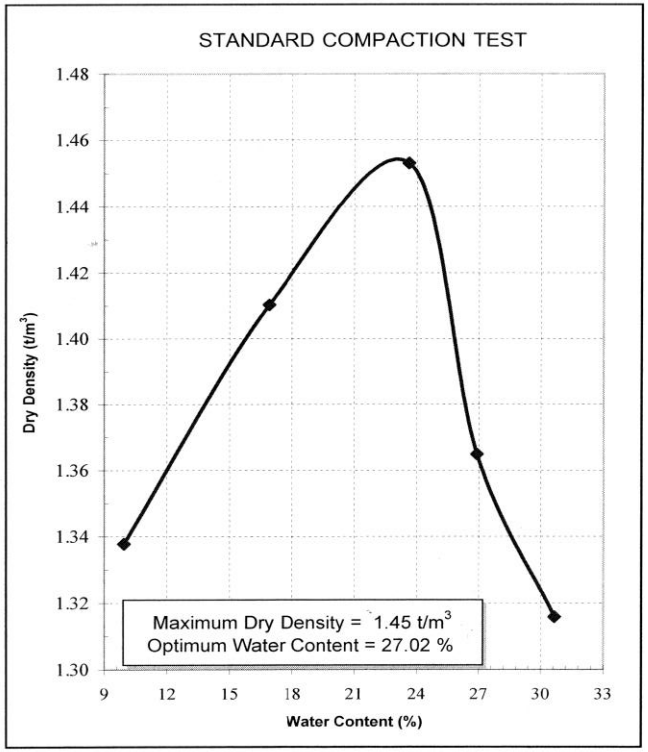
STANDARD COMPACTION TEST

For:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Compaction method	Standard		
Project :	งานวิจัย	Weight of Hammer	5.5	lb.	
	—	Height of Drop	12	in.	
Station	—	Blows Per Layer	25		
Location	—	No. of Layers	3		
Soil Description	ตัวอย่างดินเหนียวร่อนผ่าน# เบอร์ 70	Mould Size	Diameter 3.775	cm	
Date	29/1/2552		Height 7.625	cm	
Tested by	กิตติศักด์	Volume of Mould, V	85.34	cm^3	

COMPACTION Test No.		1	2	3	4	5	6
Assumed Water Content	%						
Weight of Air Dry Soil Used	g						
Water Content of Air Dry Soil	%						
Amount of Water Added	cc						
Weight of Wet Soil+Mould	g	1035.16	1050.34	1062.94	1057.47	1056.38	
Weight of Mould	g	909.64	909.64	909.64	909.64	909.64	
Weight of Wet Soil,W	g	126	141	153	148	147	
Wet Density , γt=W/V	g/cm^3	1.47	1.65	1.80	1.73	1.72	
Dry Density,γd=100γt/(100+w)	g/cm^3	1.34	1.41	1.45	1.36	1.32	

WATER CONTENT

Container No.		A	B	C	D	E	F
Weight of Wet Soil+Container	g	34.71	32.99	43.49	36.30	38.4	
Weight of Dry Soil+Container	g	32.77	30.18	37.70	31.23	32.34	
Weight of Water	g	1.94	2.81	5.79	5.07	6.06	
Weight of Container	g	13.26	13.55	13.19	12.39	12.58	
Weight of Dry Soil	g	19.51	16.63	24.51	18.84	19.76	
Water Content,w	%	9.94	16.90	23.62	26.91	30.67	



Checked by: _____
Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by: _____
Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.
2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.
3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข1 ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติที่ผ่านการร่อนตะแกรงเบอร์ 70

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

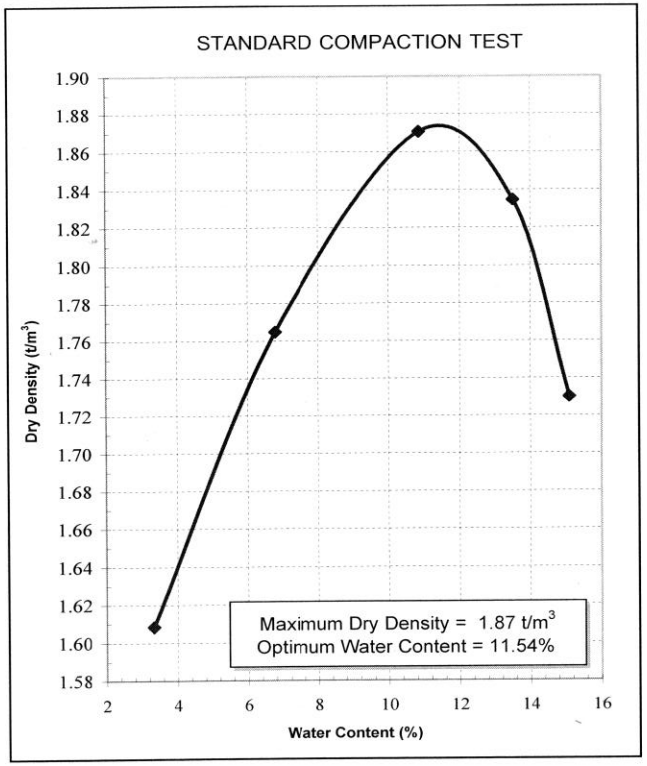
STANDARD COMPACTION TEST

For:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Compaction method	Standard	
Project :	งานวิจัย	Weight of Hammer	5.5	lb.
	—	Height of Drop	12	in.
Station	—	Blows Per Layer	25	
Location	—	No. of Layers	3	
Soil Description	ทรายสีดำ	Mould Size	Diameter 3.775	cm
Date	29/1/2552		Height 7.625	cm
Tested by	กิตติศักดิ์	Volume of Mould, V	85.34	cm^3

COMPACTION Test No.		1	2	3	4	5	6
Assumed Water Content	%						
Weight of Air Dry Soil Used	g						
Water Content of Air Dry Soil	%						
Amount of Water Added	cc						
Weight of Wet Soil+Mould	g	1051.47	1070.47	1086.63	1087.36	1079.57	
Weight of Mould	g	909.64	909.64	909.64	909.64	909.64	
Weight of Wet Soil,W	g	142	161	177	178	170	
Wet Density , γt=W/V	g/cm^3	1.66	1.88	2.07	2.08	1.99	
Dry Density,γd=100γt/(100+w)	g/cm^3	1.61	1.76	1.87	1.83	1.73	

WATER CONTENT

Container No.		A	B	C	D	E	F
Weight of Wet Soil+Container	g	34.11	32.09	33.97	49.42	52.84	
Weight of Dry Soil+Container	g	33.48	31.01	31.93	45.88	48.33	
Weight of Water	g	0.63	1.08	2.04	3.54	4.51	
Weight of Container	g	14.53	15.09	13.15	19.67	18.46	
Weight of Dry Soil	g	18.95	15.92	18.78	26.21	29.87	
Water Content,w	%	3.32	6.78	10.86	13.51	15.10	



Checked by: Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by: Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.

3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข2 ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ลักษณะเป็นทรายสีดำ

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

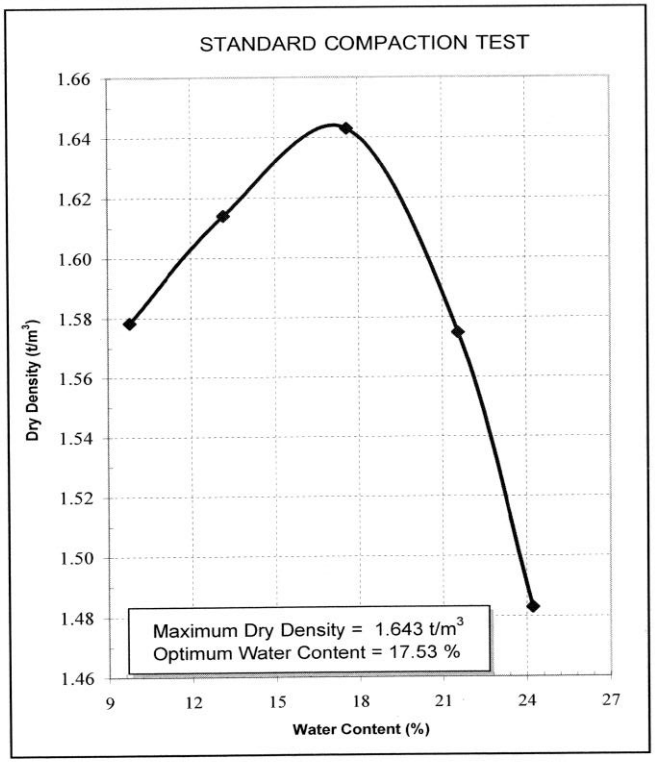
STANDARD COMPACTION TEST

For:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Compaction method	Standard	
Project :	งานวิจัย	Weight of Hammer	5.5	lb.
	—	Height of Drop	12	in.
Station	—	Blows Per Layer	25	
Location	—	No. of Layers	3	
Soil Description	ทราย	Mould Size	Diameter 3.775	cm
Date	29/1/2552		Height 7.625	cm
Tested by	กิตติศักดิ์	Volume of Mould, V	85.34	cm^3

COMPACTION Test No.		1	2	3	4	5	6
Assumed Water Content	%						
Weight of Air Dry Soil Used	g						
Water Content of Air Dry Soil	%						
Amount of Water Added	cc						
Weight of Wet Soil+Mould	g	1057.51	1065.52	1074.55	1073.03	1066.86	
Weight of Mould	g	909.64	909.64	909.64	909.64	909.64	
Weight of Wet Soil,W	g	148	156	165	163	157	
Wet Density , γt=W/V	g/cm^3	1.73	1.83	1.93	1.91	1.84	
Dry Density,γd=100γt/(100+w)	g/cm^3	1.58	1.61	1.64	1.57	1.48	

WATER CONTENT

Container No.		A	B	C	D	E	F
Weight of Wet Soil+Container	g	40.95	34.68	52.01	53.95	57.45	
Weight of Dry Soil+Container	g	38.45	32.12	46.16	46.89	49.46	
Weight of Water	g	2.50	2.56	5.85	7.06	7.99	
Weight of Container	g	12.88	12.68	12.95	14.15	16.47	
Weight of Dry Soil	g	25.57	19.44	33.21	32.74	32.99	
Water Content,w	%	9.78	13.17	17.62	21.56	24.22	



Checked by: _____
Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by: _____
Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.
2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.
3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข3 ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ที่มีลักษณะเป็นดินทราย

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

SPECIFIC GRAVITY TEST

Project:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Location	–
Borehole No.	–	Sample No.	1
Soil Description	ดินเหนียวผ่านตะแกรงเบอร์ 70	Depth	– m.
Test by	อุมาพร	Date	5/2/2552

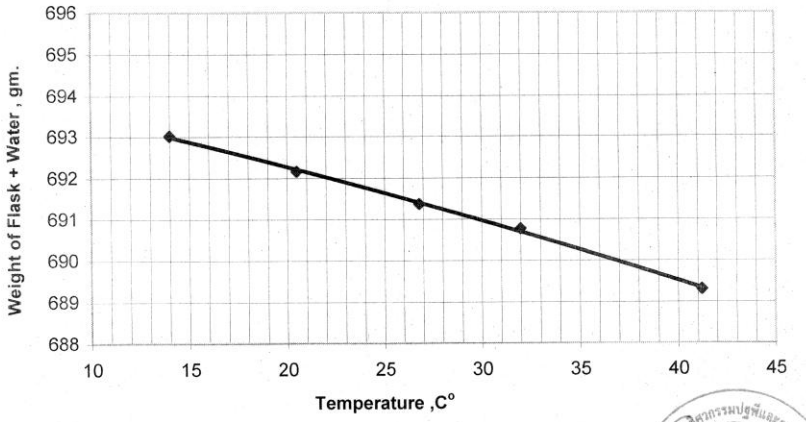
Flask Calibation

Determination No.	1	2	3	4	5	6
Temperature	41.2	32	26.8	20.5	14	
Wt. Flask+Water	689.31	690.77	691.37	692.17	693.02	

SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION

Determination No.		1	2	3	4	5	6
Temperature	C^o	28.5					
Flask+Water	g.	691.21					
Flask+Water+Soil	g.	721.47					
Container No.		A					
Dry Soil+Container	g.	305.83					
Weight of Container	g.	257.1					
Dry Soil	g.	48.73					
Specific Gravity of Water		0.9962					
Specific Gravity of Soil		2.63					
Average Specific Gravity of Soil		2.63					

Calibration of Volumetic Flask



Checked by Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข4 ผลการทดลองค่า Specific gravity ของดินเหนียว

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

SPECIFIC GRAVITY TEST

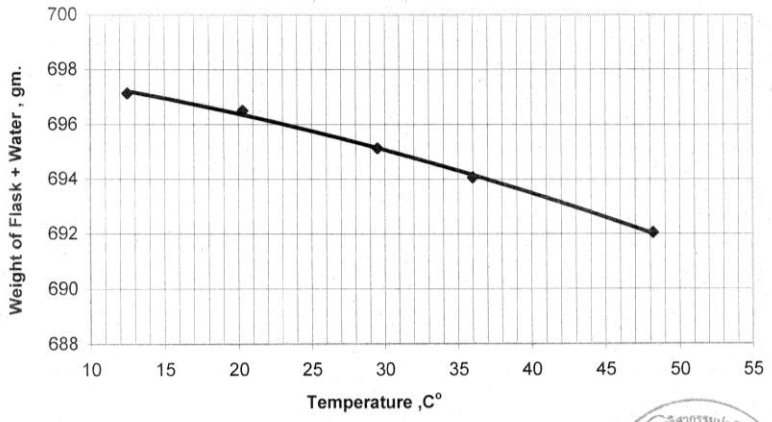
Project:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Location	–
Borehole No.	–	Sample No.	1
Soil Description	ทรายสีดำ	Depth	– m.
Test by	อุมาพร	Date	5/2/2552

Flask Calibation

Determination No.	1	2	3	4	5	6
Temperature	48.2	36	29.5	20.3	12.5	
Wt. Flask+Water	692.05	694.06	695.13	696.5	697.14	

SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION

Determination No.		1	2	3	4	5	6
Temperature	C^o	28.5					
Flask+Water	g.	695.27					
Flask+Water+Soil	g.	725.61					
Container No.		B					
Dry Soil+Container	g.	512.34					
Weight of Container	g.	463					
Dry Soil	g.	49.34					
Specific Gravity of Water		0.9962					
Specific Gravity of Soil		2.59					
Average Specific Gravity of Soil		2.59					



Checked by Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข5 ผลการทดลองค่า Specific gravity ของทรายร่วน

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

SPECIFIC GRAVITY TEST

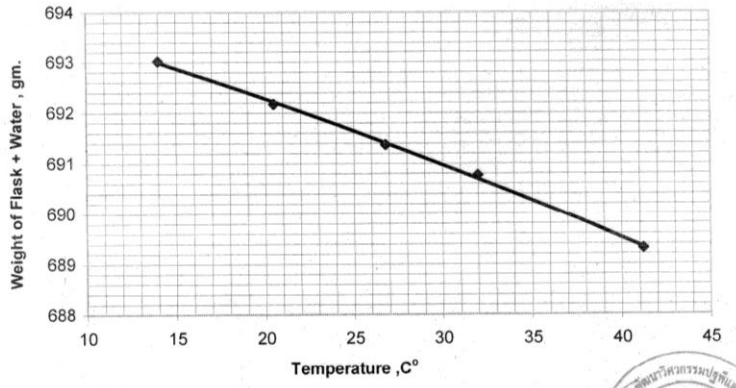
Project:	นิสิตปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	Location	–	
Borehole No.	–	Sample No.	1	
Soil Description	ทราย	Depth	–	m.
Test by	อุมาพร	Date	5/2/2552	

Flask Calibation

Determination No.	1	2	3	4	5	6
Temperature	41.2	32	26.8	20.5	14	
Wt. Flask+Water	689.31	690.77	691.37	692.17	693.02	

SPECIFIC GRAVITY DETERMINATION

Determination No.		1	2	3	4	5	6
Temperature	C^o	28.5					
Flask+Water	g.	691.21528					
Flask+Water+Soil	g.	721.45					
Container No.		A					
Dry Soil+Container	g.	304.13					
Weight of Container	g.	254.3					
Dry Soil	g.	49.83					
Specific Gravity of Water		0.9962					
Specific Gravity of Soil		2.53					
Average Specific Gravity of Soil		2.53					



Checked by Mr.Chalermchai Trakoonpudpong

Approved by Dr.Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข6 ผลการทดลองค่า Specific gravity ของทราย

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

PERMEABILITY TEST (ASTM D 2434)

PROJECT		OWNER		BORING NO.	
SOIL DISCRIPTION	ดินเหนียว ผ่านตะแกรงเบอร์ 70	LOCATION		SAMPLE DEPTH	m.
TESTED BY	มนชิต	DATE			

SAMPLE DATA :

SAMPLE DIAMETER	3.80	cm.	WEIGHT OF MOLD + SOIL	672.5	gm.
SAME HEIGHT	7.60	cm.	WEIGHT OF MOLD	570	gm.
SAMEPLE AREA	11.335	$cm.^2$	WEIGHT OF SOIL	140.25	gm.
SAMPLE VOLUME	86.149	$cm.^3$	DENSITY OF SOIL	1.63	$gm/cm.^3$
TYPE OF SAMPLE	ดินเหนียว		TESTING HEAD	1000	cm.

CONSTANT HEAD PERMEABILITY TEST :

TRIAL NO.	TIME (sec.)	Q (cc)	T (c)	TRIAL NO.	TIME (sec.)	Q (cc)	T (c)
1	300	0.420	28	6	300	0.348	28
2	300	0.320	28	7	300	0.488	28
3	300	0.443	28	8	300	0.311	28
4	300	0.422	28	9	300	0.312	28
5	300	0.412	28	10	300	0.399	28
				Average Values	300	0.388	28

SOIL PERMEABILITY k = 8.66×10^{-7} cm/sec

VARIABLE HEAD PERMEABILITY TEST : AREA OF STANDPIPE _____ $cm.^2$

TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)	TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)
1				6			
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			
				Average Values			

SOIL PERMEABILITY k = _____ cm./sec.

Checked and approved by: _____
Dr. Suttisak Soralump

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.
2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.
3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข7 ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำ ของดินเหนียว

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

PERMEABILITY TEST (ASTM D 2434-68)

PROJECT	วิจัยป.โท สิ่งแวดล้อม	OWNER	–
	–	LOCATION	–
SOIL DISCRIPTION	ดินสีดำ	BORING NO.	–
TESTED BY	มนชิต	SAMPLE DEPTH	– m.
CHECKED & REPORTED BY	กนกวรรณ	DATE	20/2/2552

SAMPLE DATA :

SAMPLE DIAMETER	10.14	cm.	WEIGHT OF MOLD + SOIL	3954	gm.
SAME HEIGHT	11.60	cm.	WEIGHT OF MOLD	2022	gm.
SAMEPLE AREA	80.78	$cm.^2$	WEIGHT OF SOIL	1932	gm.
SAMPLE VOLUME	937.18	$cm.^3$	DENSITY OF SOIL	2.06	$gm/cm.^3$
TYPE OF SAMPLE	Compacted Soil		TESTING HEAD	1000	cm.

CONSTANT HEAD PERMEABILITY TEST :

TRIAL NO.	TIME (sec)	Q (cc)	T (c)	TRIAL NO.	TIME (sec)	Q (cc)	T (c)
1	600	25.36	29	6	600	19.47	29
2	600	22.54	29	7	600	19.10	29
3	600	22.33	29	8	600	18.29	29
4	600	21.72	29	9	600	17.67	29
5	600	20.49	29	10	600	17.07	29
				Average Values	600	20.40	

SOIL PERMEABILITY k = 4.886×10^{-6} cm./sec.

VARIABLE HEAD PERMEABILITY TEST : AREA OF STANDPIPE _____ $cm.^2$

TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)	TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)
1				6			
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			
				Average Values			

SOIL PERMEABILITY k = _____ cm./sec.

RECOMPACTED SAMPLE

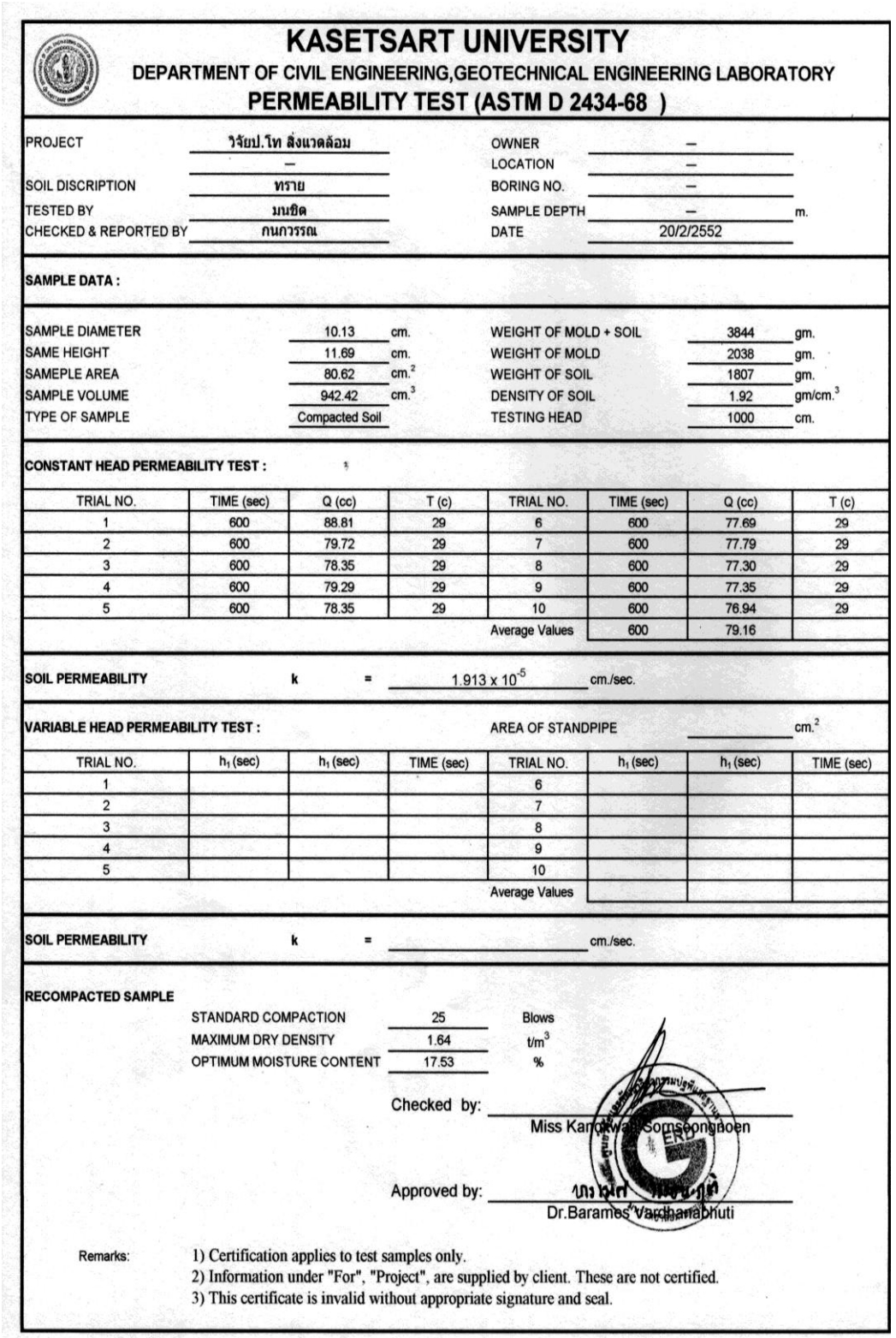
STANDARD COMPACTION	25	Blows
MAXIMUM DRY DENSITY	1.87	t/m^3
OPTIMUM MOISTURE CONTENT	11.54	%

Checked by: _____
Miss Kanokwan Sansoongnoen

Approved by: _____
Dr.Baramee Vardhanabhuti

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.
2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.
3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข8 ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำของทรายร่วน



KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

PERMEABILITY TEST (ASTM D 2434-68)

PROJECT	วิจัยป.โท สิ่งแวดล้อม	OWNER	–
	–	LOCATION	–
SOIL DISCRIPTION	ทราย	BORING NO.	–
TESTED BY	มนชิต	SAMPLE DEPTH	– m.
CHECKED & REPORTED BY	กนกวรรณ	DATE	20/2/2552

SAMPLE DATA :

SAMPLE DIAMETER	10.13	cm.	WEIGHT OF MOLD + SOIL	3844	gm.
SAME HEIGHT	11.69	cm.	WEIGHT OF MOLD	2038	gm.
SAMEPLE AREA	80.62	$cm.^2$	WEIGHT OF SOIL	1807	gm.
SAMPLE VOLUME	942.42	$cm.^3$	DENSITY OF SOIL	1.92	$gm/cm.^3$
TYPE OF SAMPLE	Compacted Soil		TESTING HEAD	1000	cm.

CONSTANT HEAD PERMEABILITY TEST :

TRIAL NO.	TIME (sec)	Q (cc)	T (c)	TRIAL NO.	TIME (sec)	Q (cc)	T (c)
1	600	88.81	29	6	600	77.69	29
2	600	79.72	29	7	600	77.79	29
3	600	78.35	29	8	600	77.30	29
4	600	79.29	29	9	600	77.35	29
5	600	78.35	29	10	600	76.94	29
				Average Values	600	79.16	

SOIL PERMEABILITY k = 1.913×10^{-5} cm./sec.

VARIABLE HEAD PERMEABILITY TEST : AREA OF STANDPIPE _____ $cm.^2$

TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)	TRIAL NO.	h_1 (sec)	h_1 (sec)	TIME (sec)
1				6			
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			
				Average Values			

SOIL PERMEABILITY k = _____ cm./sec.

RECOMPACTED SAMPLE

STANDARD COMPACTION	25	Blows
MAXIMUM DRY DENSITY	1.64	t/m^3
OPTIMUM MOISTURE CONTENT	17.53	%

Checked by: Miss Kanokwan Somsoongnoen

Approved by: Dr.Barames Vardhanabhuti

Remarks:
1) Certification applies to test samples only.
2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.
3) This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข9 ผลการทดลองค่าความสามารถซึมผ่านของน้ำของทราย

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

SPECIFIC GRAVITY ABSORPTION TEST ASTM C128

For:	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
Project:	งานวิจัยนิสิตปริญญาโท
Description of Sample	ทราย
Date	5/2/2552
Tested by	กนกวรรณ - ธนารัช

SAMPLE WEIGHT

Weight of Sample , SSD	500.00	g
Weight of Dry Sample , A	496.03	g
Pycnometer+Water, B	1273.66	g
Pycnometer+Water+Sample, C	1579.05	g

SPECIFIC GRAVITY ABSORPTION TEST

Bulk Specific Gravity	**2.55**
Bulk Specific Gravity (Saturated surface dry)	**2.57**
Apparent Specific Gravity	**2.60**
Absorption %	**0.80**

Checked by: _____
Mr.Chaleermchai Arakoonpudpong

Approved by: _____
Dr.Suttisak Soralump

ERD

Remarks:

1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client.These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข10 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของทราย

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, GEOTECHNICAL ENGINEERING LABOLATORY

SIEVE ANALYSIS (ASTM C136)

Project: ผศ.ดร.จีมา ศรลัมพ์

Location —

Description of Sample ดินเหนียว

Test No. 1 Date 5/11/2551

Tested by อ.กิตติศักดิ์

SAMPLE WEIGHT

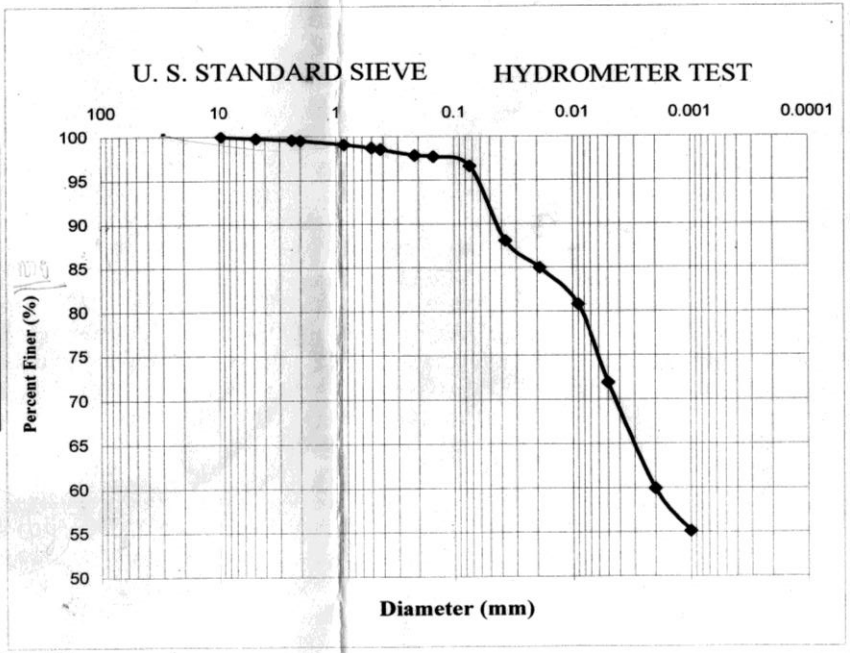
Container No. A10

Weight of Container g. 210.25

Weight of Dry Sample g. 1000

Sieve No.	Sieve Opening	Weight of Soil Retained, g	Cumulative Retained, g	Cumulative Retained, %	Percent Finer
3/8"	9.53	0.00	0.00	0.00	100.00
#4	4.76	2.40	2.40	0.24	99.76
#8	2.36	1.57	3.97	0.40	99.60
#10	2.00	0.85	4.82	0.48	99.52
#20	0.85	4.58	9.40	0.94	99.06
#35	0.50	3.88	13.28	1.33	98.67
#40	0.42	1.72	15.00	1.50	98.50
#70	0.22	6.73	21.73	2.17	97.83
#100	0.15	1.66	23.39	2.34	97.66
#200	0.07	10.74	34.13	3.41	96.59
PAN	PAN	965.87	1000.00	100.00	0.00

D10= D30 = D60 =



Checked and approved by:

Dr. Suttisak Soralump

Remarks:

1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client.These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข11 ผลการจำแนกประองค์ประกอบของดินในดินเหนียว

KASETSART UNIVERSITY

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,GEOTECHNICAL ENGINEERING LABORATORY

HYDROMETER TEST (ASTM D 422)

FOR	ผศ.ดร.จีมา ศรลัมพ์	OWNER	–	JOB NO.	–
PROJECT	–	CODE NO.	–	SAMPLE NO.	–
SOIL DESCRIPTION	ดินเหนียว	DEPTH	–	DATE	4/11/2551
TEST BY	กิตติศักดิ์	CHECKED BY	กนกวรรณ		

SP. GR. OF SIOL =	* 2.65		SAMPLE WEIGHT		
HYDROMETER NO.	151H62		CAN NO.	A	
DISPERSING AGENT	–		DRY SOIL + CAN	513.06	gm.
MENISCUS CORRECTION	–		CAN WT.	462.76	gm.
% FINER THAN No. 200	96.29 %		WT. OF DRY SOIL	50.3	gm.

DATE	TIME	ELAPSED TIME, MIN	R_A	TEMP. °C	R_C	N%	h cm.	D mm.	N'%
27/10/2551	10.25	0.25	29.50	26	30.00	95.79	9.94	0.080	92.24
		0.5	28.50	26	29.00	92.60	10.25	0.058	89.16
		1	28.20	26	28.70	91.64	10.34	0.041	88.24
		2	28.00	26	28.50	91.00	10.40	0.029	87.62
		2	28.00	26	28.50	91.00	9.32	0.027	87.62
		4	27.20	26	27.70	88.45	9.56	0.020	85.16
		8	26.20	26	26.70	85.25	9.87	0.014	82.09
		15	26.00	26	26.50	84.61	9.93	0.010	81.47
		30	25.50	26	26.00	83.02	10.08	0.007	79.94
	11.25	60	23.20	26	23.70	75.67	10.78	0.005	72.87
	12.25	120	22.00	26	22.50	71.84	11.15	0.004	69.18
	13.25	180	21.00	26	21.50	68.65	11.45	0.003	66.10
	14.25	240	20.20	26	20.70	66.09	11.70	0.003	63.64
	15.25	300	20.00	26	20.50	65.46	11.76	0.003	63.03
	16.25	360	19.50	26	20.00	63.86	11.91	0.002	61.49
28/10/2551	16.05	1788	17.50	27	18.00	57.47	12.52	0.001	55.34
29/10/2551	9.30	2823	17.20	27	17.70	56.52	12.61	0.001	54.42
30/10/2551	16.30	4683	17.00	27	17.50	55.88	12.67	0.001	53.80
31/10/2551	16.00	6105	16.20	27	16.70	53.32	12.92	0.001	51.34
1/11/2551	16.30	7563	16.00	26	16.50	52.68	12.98	0.001	50.73

$N = K_1 . R_C$

$D = K2 . \sqrt{h/t}$

$N' = N . (\%\ \text{Finer No. 200})$

$R_C = R_a - C_M + C_T$

* Assume Data

Remarks: 1) Certification applies to test samples only.

2) Information under "For", "Project", are supplied by client. These are not certified.

3)This certificate is invalid without appropriate signature and seal.

ภาพผนวกที่ ข12 ผลการทดลอง Hydrometer Test ในตัวกลางดินเหนียว

Analytical Summary Report
Department of Soil Science

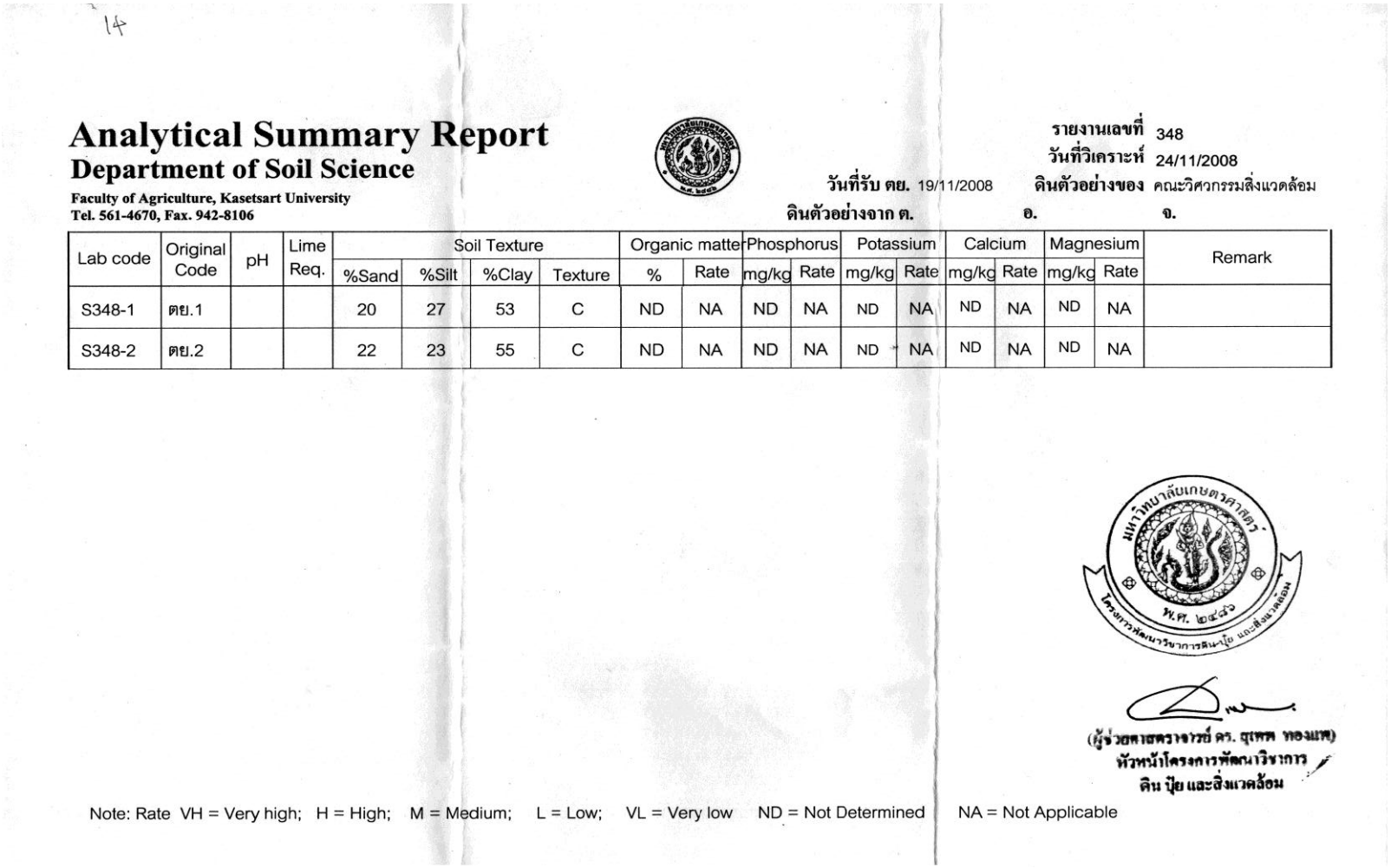
Faculty of Agriculture, Kasetsart University
Tel. 561-4670, Fax. 942-8106

รายงานเลขที่ 376
วันที่วิเคราะห์ 2/12/2008
วันที่รับ ตย. 1/12/2008 **ดินตัวอย่างของ** คุณโศรยา ธีระวัฒนกิตติ
ดินตัวอย่างจาก ต. **อ.** **จ.**

Lab code	Original Code	pH	Lime Req.	Soil Texture				Organic matter		Phosphorus		Potassium		Calcium		Magnesium		Remark
				%Sand	%Silt	%Clay	Texture	%	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	
S376-1	1			80	10	10	SL	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	

Note: Rate VH = Very high; H = High; M = Medium; L = Low; VL = Very low ND = Not Determined NA = Not Applicable

ภาพภาคผนวกที่ ข13 ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ของทรายร่วน



14

Analytical Summary Report

Department of Soil Science

Faculty of Agriculture, Kasetsart University
Tel. 561-4670, Fax. 942-8106

รายงานเลขที่ 348
วันที่วิเคราะห์ 24/11/2008
วันที่รับ ตย. 19/11/2008 ดินตัวอย่างของ คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ดินตัวอย่างจาก ต. อ. จ.

Lab code	Original Code	pH	Lime Req.	Soil Texture				Organic matter		Phosphorus		Potassium		Calcium		Magnesium		Remark
				%Sand	%Silt	%Clay	Texture	%	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	mg/kg	Rate	
S348-1	ตย.1			20	27	53	C	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	
S348-2	ตย.2			22	23	55	C	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	ND	NA	

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุเทพ ทองแพ)
หัวหน้าโครงการพัฒนาวิชาการ
ดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม

Note: Rate VH = Very high; H = High; M = Medium; L = Low; VL = Very low ND = Not Determined NA = Not Applicable

ภาพผนวกที่ ข14 ผลการจำแนกประเภทดินของหน้าดินธรรมชาติ ที่ของดินทรายและดินเหนียว

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	โศรยา ธีระวัฒนกิตติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	4 มีนาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานครฯ
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	เกียรตินิยมอันดับ 2
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์