

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับทำแบบจำลอง

- 1.1 ตู้จำลองโครงสร้างเม็ดดิน ทำจากอะคริลิก (acrylic) ขนาด 14.5 x 29.4 x 3 นิ้ว
- 1.2 ปั๊มชนิด peristaltic pump รุ่น L/S 17, 20 – 600 rpm. และสายยาง Tygon lab ϕ 0.06 นิ้ว โดยมี flow 1.3-130 ml/min ยี่ห้อ Masterflex ของ บริษัท เคโมไซเอนซ์ จำกัด
- 1.3 น้ำกรอง (ผ่านเครื่องกรองคาร์บอน) จากเครื่องทำน้ำกลั่นในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 2
- 1.4 ตู้ควบคุมระดับน้ำให้คงที่ (constant-head reservoir) ทำจากอะคริลิก หนา 1 cm
- 1.5 ถังรองรับน้ำเข้า – ออกจากระบบ ถังพลาสติกขนาด 2 ลิตร
- 1.6 อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างท่อสแตนเลส ได้แก่ pipe fitting ของ Swagelok
- 1.7 สายยาง PTFE ของ Masterflex ϕ 0.25 นิ้ว
- 1.8 ตาข่ายทองเหลืองเบอร์ 20 เพื่อใช้กันทรายไหลออก
- 1.9 อลูมิเนียมฟอยล์และฉนวนกันความร้อน สำหรับป้องกันการระเหยของน้ำมัน
- 1.10 ทรายขาวขนาด 1.18 – 2.36 mm. โดยทำการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงเบอร์ 8/16
- 1.11 ดินเหนียวอ่อนจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีสีเทา ที่ระดับความลึก 2 – 3 เมตร

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 2.1 ตู้อบ (Drying oven) 103 – 105°C
- 2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ของ Precisa รุ่น 240A
- 2.3 ชุดเครื่องมือการหาขนาดเม็ดดิน (grain size analysis)

3. สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 3.1 Sodium azide (NaN_3)
- 3.2 Sudan IV ($\text{C}_{24}\text{H}_{20}\text{N}_4\text{O}$)

4. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์การปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง

- 4.1 น้ำมันเบนซิน 91 สำหรับเครื่องรอบเร็ว (automotive diesel oil)
- 4.2 ปั๊มชนิด peristaltic pump (low flow) รุ่น C/L, 10 – 60 rpm และสายยาง Tygon fuel & lubricant ϕ 0.03 นิ้ว โดยมี flow 0.36 – 36 ml/min ยี่ห้อ Masterflex ของ บริษัท เคโมไซเอนซ์ จำกัด
- 4.3 กล้องดิจิทัล Casio รุ่น EX-Z40 ความละเอียด 4 mega pixels x 3 optical zoom
- 4.4 โปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 7.0
- 4.5 นาฬิกาจับเวลา

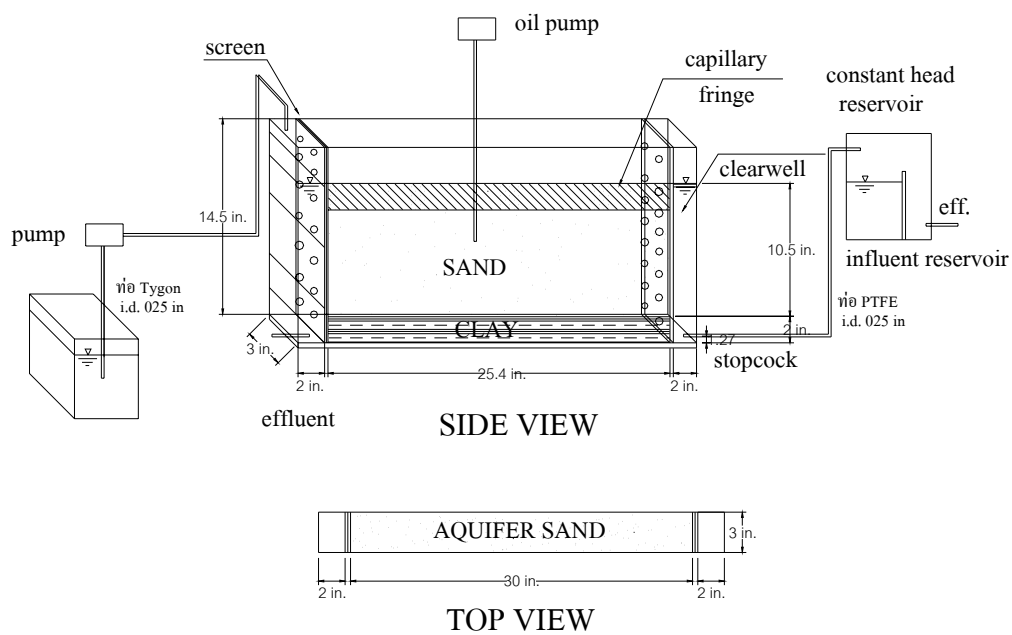
การสร้างเครื่องมือทดลอง

1. การสร้างตู้จำลอง (acrylic tank)

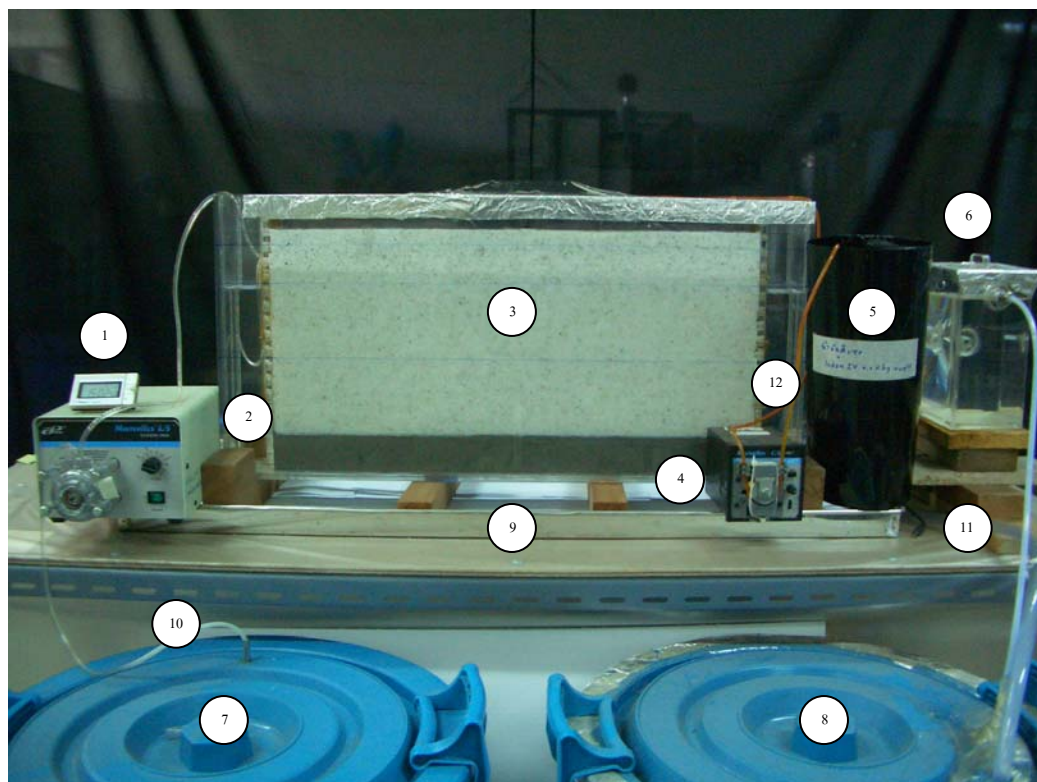
แบบจำลองที่ใช้ในงานทดลองนี้เป็นตู้อะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สร้างเป็นแบบ 2 มิติโดยขนาดภายในดังนี้ คือ ความสูง 14.5 นิ้ว ความยาว 25.4 นิ้ว และความกว้าง 3 นิ้ว แผ่นกั้นทางเข้า-ออกขนาดใหญ่ 2 แผ่น มีขนาดความสูง 14.5 นิ้ว ความกว้าง 3 นิ้ว แผ่นอะคริลิกมีความหนา 10 mm. สำหรับรองรับกำลังการบดอัดเป็นพิเศษ โดยใช้แท่งอะคริลิกในการเชื่อมต่อแผ่นอะคริลิก เพื่อป้องกันการรั่ว ตู้จำลองดังกล่าวได้ดัดแปลงมาจากงานทดลองของ Whelan *et al.* (1994)

2. การสร้างถังน้ำเข้าและถังน้ำออก (influent and effluent clearwell)

ถังน้ำเข้าและถังน้ำออก จะถูกสร้างติดกับผนังแผ่นกั้นตู้ที่มีขนาดความสูง 14.5 นิ้ว ความยาว 2 นิ้ว และความกว้าง 3 นิ้ว โดยเจาะรูที่ผนังกั้นระหว่างตู้จำลองกับ clearwell เพื่อให้ น้ำไหลผ่านได้ จากนั้นทำการติดตั้งตาข่ายสแตนเลสที่ทางเข้า-ออกตู้จำลอง โดยใช้ตาข่ายสแตนเลส ขนาดช่องลอด 0.5 mm. ซึ่งเป็นขนาดเล็กเพียงพอที่จะป้องกันทรายไหลออก สำหรับการไหลออกจะใช้ท่อ Teflon ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เชื่อมระหว่างผนังทางออกกับถังควบคุมระดับน้ำให้คงที่ โดยถังนี้มีขนาดความสูง 20 cm. ความยาว 10 cm. และ ความกว้าง 10 cm. ทำหน้าที่ปรับระดับน้ำ โดยให้ท่อออกจากผนังที่ระดับความสูง 0.5 นิ้ว จากก้นตู้จำลอง โดยทำการจัดชุดอุปกรณ์ในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 12



(a)



(b)

ภาพที่ 12 a) แบบการจัดอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลองและ b) ภาพรวมการติดตั้งตู้จำลอง

อุปกรณ์มีดังนี้:

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. นาฬิกาจับเวลา | 7. ถังน้ำเข้า |
| 2. ปั๊มน้ำ MFLEX, L/S | 8. ถังน้ำออก |
| 3. Reactor | 9. ถาดสเตนเลส |
| 4. ปั๊มน้ำมัน MFLEX, C/L | 10. สายยาง MFLEX, Tygon lab# 14 |
| 5. ขวดน้ำมันเบนซิน 91 + Sudan IV | 11. สายยาง PTFE, 3/16" x 1/4" |
| 6. ถัง Constant head reservoir | 12. สายยาง MFLEX, Tygon F&L, #13 |

การเตรียมอุปกรณ์

1. การเตรียมตัวอย่างน้ำใต้ดิน

นำน้ำกรอง (ผ่านเครื่องกรองคาร์บอน) ผสมโซเดียมเอไซด์ (NaN_3) 200 mg/l. (Whelan *et al.*, 1994) เพื่อยับยั้งการเกิดกิจกรรมของแบคทีเรียในดินที่ใช้ทดลอง จากนั้นนำน้ำที่ผสมแล้วนี้เติมลงในตุ้มจำลอง โดยใช้ถัง constant head reservoir เป็นตัวปรับระดับน้ำ เนื่องจากระดับน้ำใต้ดินจริงจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำขึ้น-ลงเสมอ ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลซึมเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการจำลองการรั่วของถังเก็บน้ำมันใต้ดินที่ระดับน้ำต่างๆ กัน ทั้งนี้กำหนดให้มีระดับน้ำเท่ากับ 5, 13 และ 21 cm. จากกันตุ้มจำลอง ซึ่งเป็นการจำลองระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นและระดับน้ำลดลง ตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินจริง

2. การจัดตัวกลางใส่ตุ้มจำลอง

นำทรายที่ผ่านการแยกขนาดแล้วมาใช้ทำการทดลอง โดยจะมีขนาด 1.18 - 2.36 mm. ส่วนดินเหนียวเป็นดินเหนียวอ่อน มีสีเทา ที่ระดับความลึก 2 – 3 m. ซึ่งนำมาจากในบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ทำการจัดเรียงชั้นทรายและดินเหนียวให้มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นที่จริงที่ใช้วางถังเก็บน้ำมันใต้ดิน โดยชั้นบนจะเป็นชั้นทรายล้อมรอบถังน้ำมันและต่อมาเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ใส่ดินเหนียวลงในตุ้มจำลองให้สูงประมาณ 5 cm. จากนั้นตุ้มแล้วเติมน้ำใต้ดินที่เตรียมไว้ลงไปให้สูงกว่าระดับชั้นดินเหนียวเล็กน้อย แช่ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอึดตัวจากนั้นค่อยๆ เติมทรายขาวทีละ 5 cm. สลับกับการเติมน้ำ โดยระดับน้ำจะต้องอยู่เหนือชั้นทรายเสมอ เพื่อ

ป้องกันการเกิดฟองอากาศและลดการแบ่งชั้นของทราย (Michael *et al.*, 1993) ทำแบบนี้สลับกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ชั้นทรายสูง 32 cm. (ความสูงรวมชั้นดินเหนียว) จากกันตู้จำลอง แล้วนำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) มาคลุมตู้อีกที เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำมันออกไปด้านนอกตู้ ตู้จำลองนี้เป็นการจำลองลักษณะของชั้นใต้ดินจริง ซึ่งไม่มีแสงแดด ดังนั้นจึงต้องนำแผ่นฉนวนกันความร้อนมาคลุมปิดให้ทั่วตู้ เพื่อให้เหมือนกับสภาพแวดล้อมของชั้นใต้ดินจริง โดยตรวจสอบลักษณะสมบัติของดินและทรายที่จัดเตรียมขึ้นตามพารามิเตอร์ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างดินและทราย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์ดิน	วิธีวิเคราะห์ทราย
ความหนาแน่น [g/cm^3]	ASTM D 698 – 70	ASTM D 698 – 70
Optimum water content (%)	ASTM D 698 – 70	ASTM D 698 – 70
ขนาดเม็ดทราย [mm.]	ASTM D - 422	ASTM D - 422
ความถ่วงจำเพาะ (Gs)	ASTM D 854 – 58	ASTM C127 – 81
Unit weight, [g/cm^3]	-	ASTMC29
อัตราส่วนช่องว่าง (e)	จากการคำนวณ	-
ค่าความพรุน (n), [%]	จากการคำนวณ	จากการคำนวณ
ปริมาณสารอินทรีย์	-	ASTM C 40 - 79
ความสามารถในการซึมผ่าน(K), [cm/s]	ASTM 2434 - 68	ASTM 2434 – 68

3. ทำการติดตั้งอุปกรณ์

นำสายซิลิโคนชนิด Tygon lab ซึ่งต่อจากถังใส่น้ำใต้ดินสังเคราะห์เชื่อมกับปั๊มน้ำ peristaltic pump รุ่น L/S จากนั้นเชื่อมต่อเข้าถึง influent clearwell ในส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิง จะทำการต่อสายซิลิโคนชนิด Tygon fuel & lubricant กับปั๊มน้ำมัน MFLEX, C/L จากนั้นโยงสายซิลิโคนเข้าไปเสียบในท่อที่อยู่กลางทราย ส่วนที่ผนังท่อ effluent clearwell จะต่อสายยาง PTFE เข้ากับถัง constant head reservoir แล้วเชื่อมสายยางต่อเข้าถึงน้ำออกสุดท้าย จากนั้นทำการคลุมตู้ทดลองทั้งหมดด้วยกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ ซึ่งใช้ป้องกันการระเหยออกสู่ด้านนอก

วิธีการ

1. การทดลองเบื้องต้น

1.1 การทดสอบหาวัสดุที่เหมาะสมในการสร้างตู้จำลอง

เตรียมอะคริลิก 2 ชิ้น ทำการวัดขนาดและจดบันทึกไว้ จากนั้นนำบีกเกอร์ 2 อัน ซึ่งใส่น้ำมันเบนซิน 91 และน้ำกลั่น นำอะคริลิกใส่ลงในบีกเกอร์แต่ละอัน แช่ไว้ 5 วัน สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอะคริลิก

1.2 การทดสอบสายซิลิโคน (Silicon) สำหรับใช้น้ำมันเบนซิน 91

นำสายซิลิโคนชนิด Tygon lab, Tygon fuel & lubricant และ Tygon LFL แบ่งเป็น อย่างละ 2 ชิ้น นำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาด จากนั้นนำสายซิลิโคนแต่ละชนิดมาใส่บีกเกอร์ 2 อัน โดยในแต่ละบีกเกอร์จะใส่น้ำมันเบนซิน 91 และน้ำกลั่น ตามลำดับ แช่สายซิลิโคนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสายซิลิโคน โดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว

1.3 การย้อมสีน้ำมันเบนซิน 91

เททรายลงจานแก้ว จากนั้นเทน้ำลงไป เพื่อให้ทรายอิมตัว ทำการชั่งน้ำหนักน้ำมันเบนซิน 91 เพื่อคำนวณหาค่าสาร Sudan IV ที่ต้องใช้ ต่อมาทำการย้อมสีน้ำมันเบนซิน 91 ด้วย สาร Sudan IV ตามเปอร์เซ็นต์ที่กำหนดขึ้นมา จากนั้นใช้ปั๊มของ Masterflex รุ่น C/L ปล่อยน้ำมันเข้าสู่จานแก้ว สังเกตสีและทำการบันทึกภาพ ทำการ dilution จนกว่าจะได้เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสม ในการมองเห็นสีของน้ำมันเบนซิน 91 ได้อย่างชัดเจน

1.4 การคัดขนาดทรายที่เหมาะสม

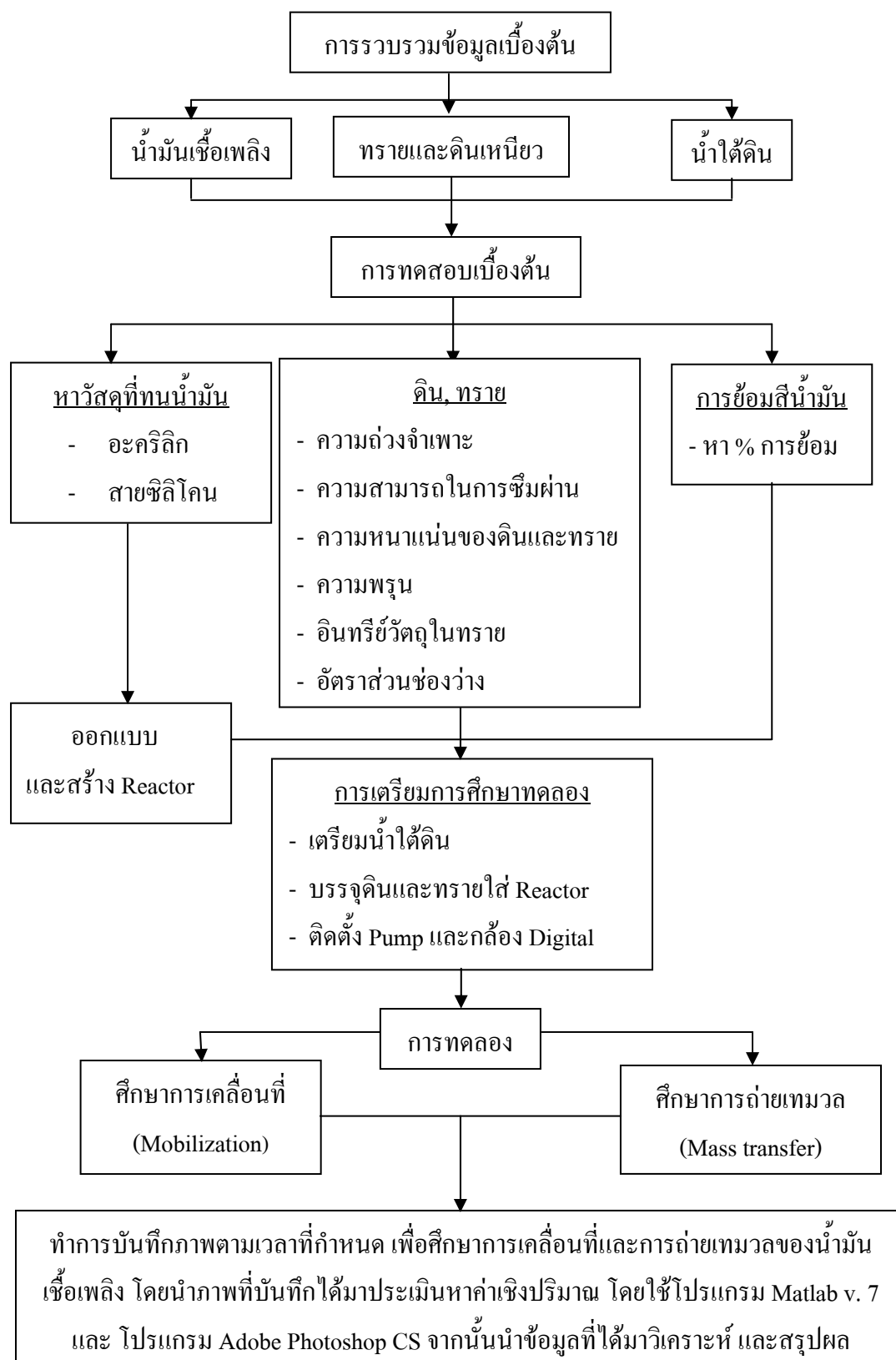
นำทรายไปล้างน้ำ เพื่อกำจัดฝุ่นออก จากนั้นนำไปตากแดดจนแห้งต้อนำทรายไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต้อนำทรายที่อบเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำทรายมาใส่ตะแกรง โดยเรียงลำดับจากเบอร์ 8 เบอร์ 16 และถาดรอง แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่า หลังจากนั้นแยกเอาเฉพาะทรายที่ค้างอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 และเบอร์ 16 จะได้ทรายขนาด 1.18–2.36 mm. มาใช้ทำการทดลอง ซึ่งเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับทรายจีเปิดที่ใช้ถมบริเวณถังเก็บกักน้ำมันใต้ดินจริง

2. ภาพรวมของการดำเนินการทดลอง

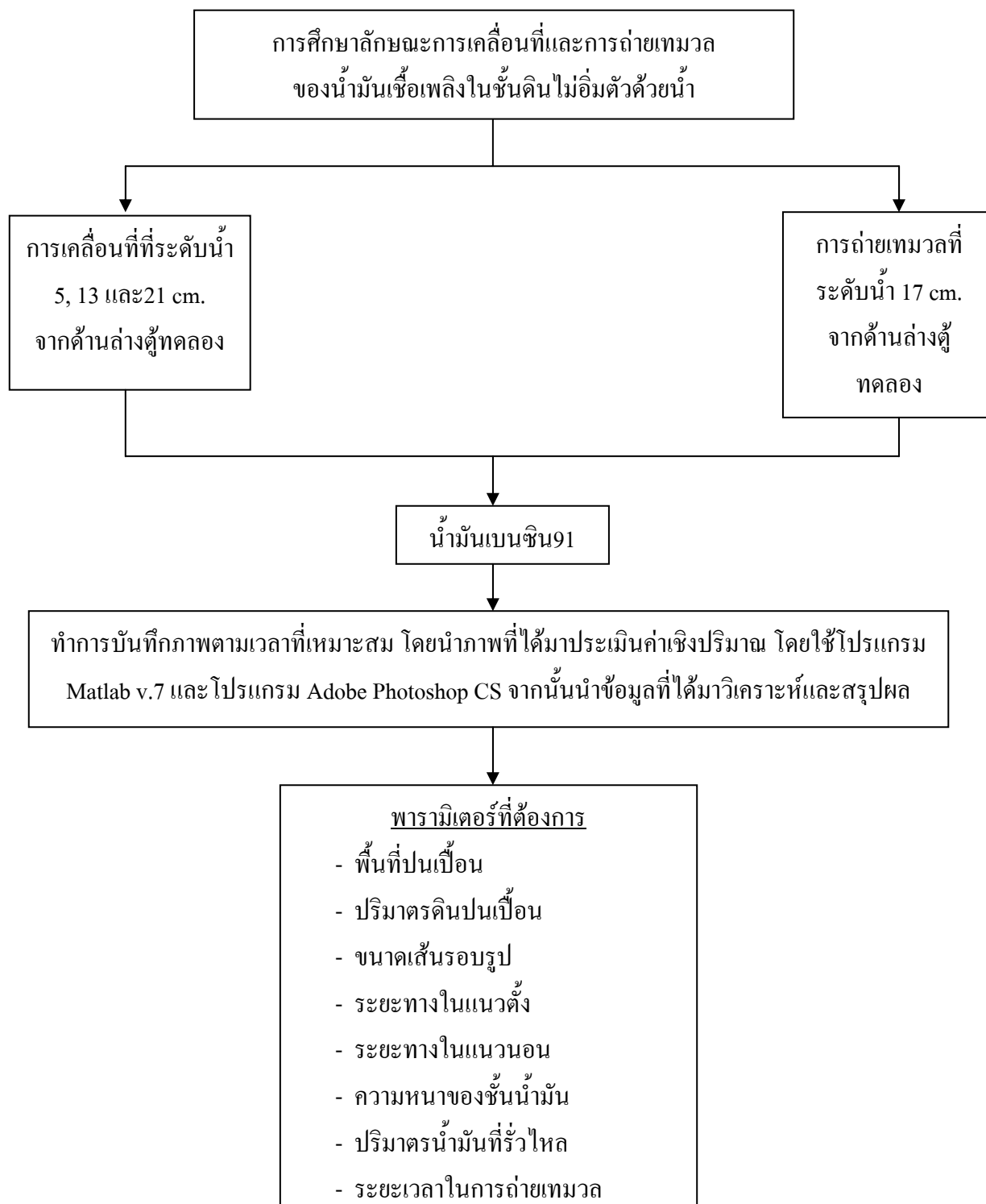
การศึกษาทดลองพฤติกรรมการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างเม็ดดิน 2 มิติ ที่ทำการจัดเรียงชั้นดินตามธรรมชาติเรียบร้อยแล้ว ซึ่งแผนภาพรวมของการดำเนินการศึกษาวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 13 และขั้นตอนการทดลองแสดงในภาพที่ 14 รายละเอียดของการดำเนินการ มีดังต่อไปนี้

2.1 การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ของสาร LNAPL

โดยการทดลองเริ่มด้วยการใช้ปั๊มของ Masterflex รุ่น L/S สูบน้ำใต้ดินจากถังเก็บน้ำใต้ดินสังเคราะห์สู่ถัง influent clearwell และส่งต่อเข้าสู่ถังจำลองอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ถัง constant head reservoir เป็นตัวปรับระดับน้ำ ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ระดับ โดยกำหนดให้มีระดับน้ำเท่ากับ 5, 13 และ 21 cm. จากกันตู้จำลอง ด้วยอัตราการไหล 6.4, 11.22 และ 22.43 ml/min ตามลำดับ คิดเป็นค่าความเร็ว seepage ที่ไหลผ่านตู้จำลอง 0.4 cm/min ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่อยู่ในช่วงของการไหลของน้ำใต้ดินโดยทั่วไป รอนจนกระทั่งดินและทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ใช้เวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังเก็บกักเก็บใต้ดิน โดยใช้ปั๊มน้ำมัน MFLEX รุ่น C/L ปั๊มน้ำมันด้วยอัตราการไหล 1 ml/min โดยปล่อยให้มีการไหลลงสู่ชั้นดินในแนวดิ่ง จนกระทั่งน้ำมันจับตัวเป็น plume คงที่เหนือระดับน้ำ จึงหยุดปล่อยน้ำมัน จากนั้นทำการลดระดับน้ำและอัตราการไหลตามค่าที่กำหนดแล้วข้างต้น จนกระทั่งน้ำมันเป็น plume คงที่เหนือระดับน้ำ การทดลองนี้จะทำจนกระทั่งน้ำมันเคลื่อนที่ถึงชั้นดินเหนียวจึงหยุดทำการทดลอง ทั้งนี้ตลอดการทดลองจะปล่อยให้ น้ำไหลเข้าสู่ตู้จำลองอย่างต่อเนื่อง ทำการบันทึกภาพตามเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



2.2 การทดลองการถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในแต่ละสถานะ

ขั้นตอนการทดลองคล้ายกับการทดลองการเคลื่อนที่ของสาร LNAPL เพียงแต่การถ่ายเทมวลของสาร BTEX จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ โดยการทดลองเริ่มด้วยการใช้ปั๊มน้ำ MFLEX รุ่น L/S สูบน้ำใต้ดินจากถัง influent reservoir สู่ถัง influent clearwell และส่งต่อเข้าสู่จำลองอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ถัง constant head reservoir ปรับระดับน้ำให้มีระดับน้ำเท่ากับ 17 cm. จากกันตู้จำลอง ด้วยอัตราการไหล 16.82 ml/min ตามลำดับ คิดเป็นค่าความเร็วที่ไหลผ่านตู้จำลอง 0.6 cm/min ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการไหลของน้ำใต้ดินโดยทั่วไป รอยน้ำทั้งดินและทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ใช้เวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจากถังกักเก็บใต้ดิน โดยใช้ปั๊มน้ำมัน MFLEX รุ่น C/L ปั๊มน้ำมันด้วยอัตราการไหล 1 ml/min โดยปล่อยให้มีการไหลลงสู่ชั้นดินในแนวดิ่ง จนกระทั่งน้ำมันจับตัวเป็น plume คงที่เหนือระดับน้ำ จึงหยุดปล่อยน้ำมัน ทั้งนี้ตลอดการทดลองจะปล่อยให้ น้ำไหลเข้าสู่ตู้จำลองอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการบันทึกภาพตามเวลาที่เหมาะสม ทำการบันทึกภาพจนกระทั่ง plume น้ำมันละลายเหลือเพียง 50 % ของ plume เริ่มต้น จากนั้นจึงหยุดทำการทดลอง โดยมีลักษณะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ลักษณะการทดลองการถ่ายเทมวลของสาร BTEX ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดลองที่	การทดลอง	อัตราการไหลของ น้ำใต้ดิน	ระดับน้ำใต้ดิน (cm.)
		(ml/min)	จากกันตู้ทดลอง
1	การเคลื่อนที่ของ plume น้ำมัน	22.43	ที่ 21 cm.
		11.22	ที่ 13 cm.
		6.40	ที่ 5 cm.
2	การถ่ายเทมวลของสาร BTEX	16.82	ที่ 17 cm.

2.3 การบันทึกภาพ

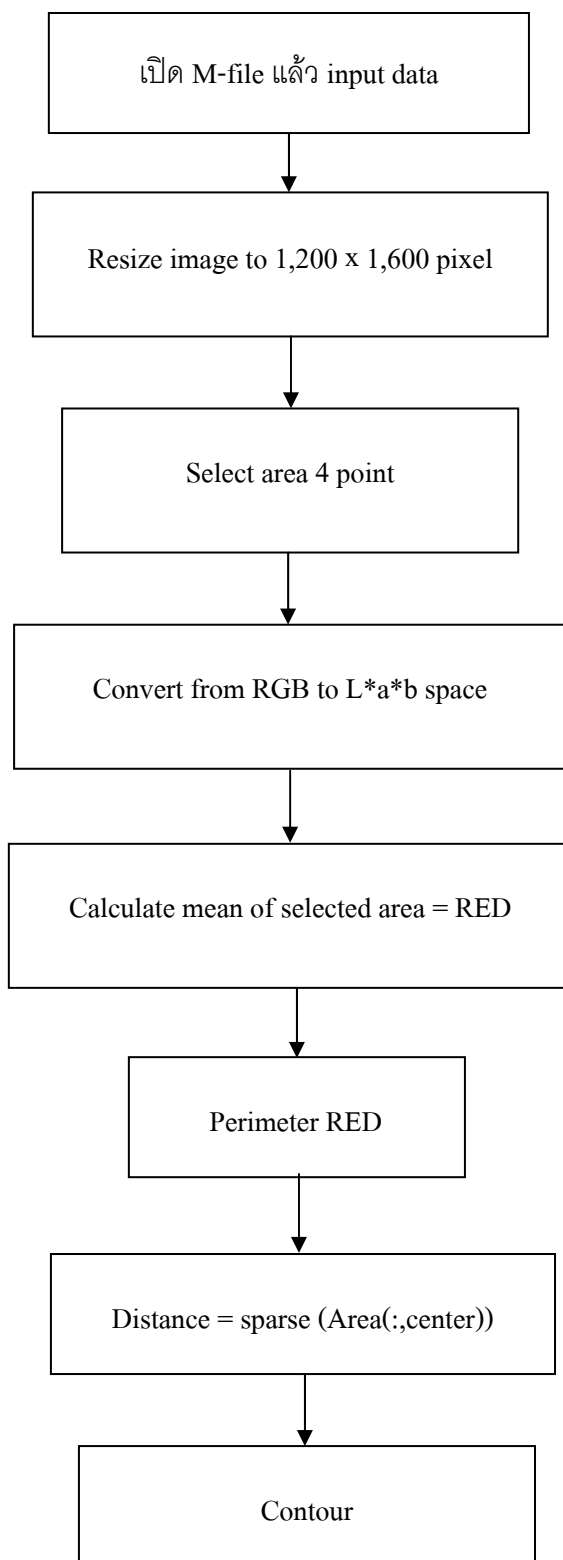
ลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายเทมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกบันทึกโดยกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Casio รุ่น EX-Z40 4 mega pixels x 3 zoom ที่มีความคมชัดสูง ที่เวลาต่างๆ ตามเหมาะสม จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการประมวลผล โดยใช้โปรแกรม Matlab V.7 เพื่อหาค่าเชิงปริมาณ จากนั้นทำซ้ำจนครบทุกการทดลอง โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

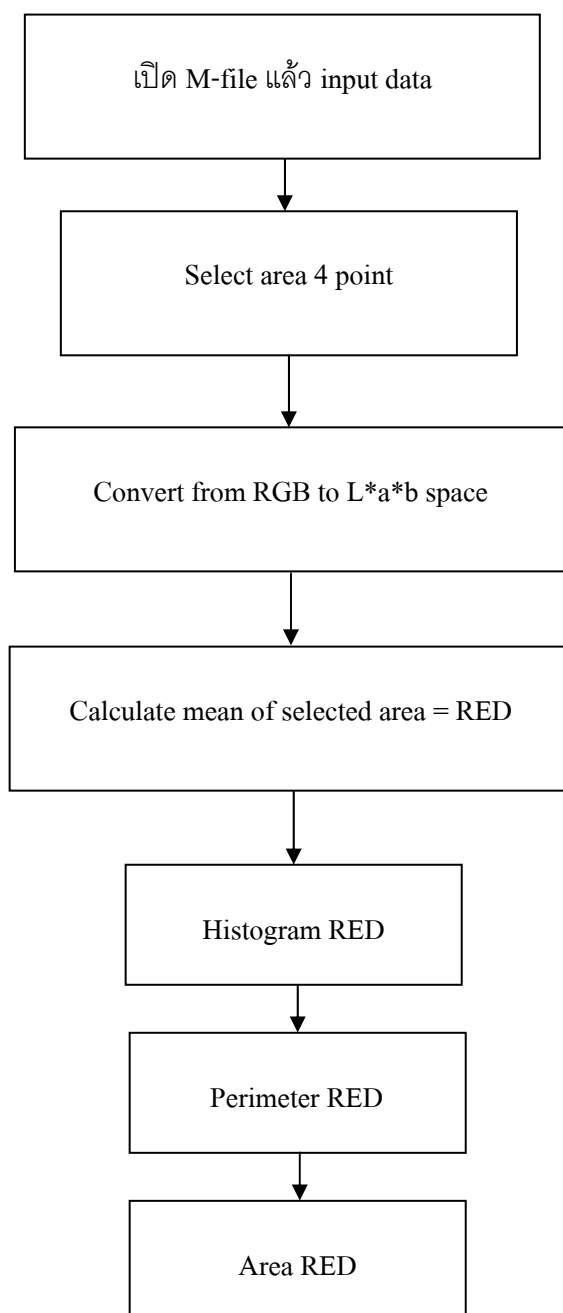
พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือในการวิเคราะห์
การเคลื่อนตัวของน้ำมันเชื้อเพลิง	Image analysis	- กล้องดิจิทัล Casio รุ่น EZ-Z40 4 mega pixels x 3 Optical zoom
- ระยะทางในแนวตั้ง		
- ระยะทางในแนวนอน		- โปรแกรม Matlab Version 7 และ
การถ่ายเทมวลของสาร BTEX		โปรแกรม Adobe Photoshop CS
- พื้นที่ปนเปื้อน		
- ปริมาตรทรายปนเปื้อน		
- ความหนาของชั้นน้ำมัน		
- ขนาดเส้นรอบขอบ		
- ระยะเวลาในการทดลอง	จับเวลา	- นาฬิกาจับเวลา
- ปริมาณน้ำมัน	Calculation	- Oil pump

2.4 การประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Matlab v.7

ในการประมวลผลจากภาพในเรื่องการเคลื่อนที่โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาในรูปของเส้นรอบขอบ (contour) โดยมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 15 ส่วนในเรื่องการถ่ายเทมวลโปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ที่ปนเปื้อนน้ำมัน (area) และขนาดเส้นรอบรูป (perimeter) โดยมีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 15 ฟังก์ชันประมวลผลการเคลื่อนที่ของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7



ภาพที่ 16 ฟังก์ชันประมวลผลการถ่ายภาพเทมพลของสาร BTEX โดยใช้โปรแกรม Matlab v.7

