



## รายงานการวิจัย

การศึกษาและใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์จากการทำเหมือง  
(Leonardite) ในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชที่ตกค้าง  
(Studies and utilization of immature coal  
(Leonardite) to adsorb residual pesticides)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การศึกษาและใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์จากการทำเหมือง  
(Leonardite) ในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชที่ตกค้าง  
(Studies and utilization of immature coal  
(Leonardite) to adsorb residual pesticides)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ ดร. ชนัตต์ โชคเจริญรัตน์

นางสาวอศิราภ์ ฤทธิรัตน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559-2560 งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยการได้รับความช่วยเหลือจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้เงินสนับสนุนงานวิจัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมถึงบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คุณมานพ จรโคกกรวด คุณสินีนานา นอกกระโทก (เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ) ขอขอบคุณ คุณนารี กลิ่นกลาง (เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2561

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทคัดย่อ

ลิโอนาร์ไดต์จัดเป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำเหมืองถ่านหินที่มีปริมาณมากและยากต่อการจัดการ ซึ่งในปัจจุบันนิยมนำลิโอนาร์ไดต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เพราะมีปริมาณกรดฮิวมิกที่สูง รวมถึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำลิโอนาร์ไดต์มาดูดซับสารละลายอาหาราซีนร่วมกับเป็นสารปรับปรุงดินในพื้นที่การเกษตร เนื่องจากปัจจุบันสารอาหาราซีนยังคงได้รับความนิยมในการกำจัดวัชพืชอยู่ ซึ่งสารละลายอาหาราซีนจะส่งผลกระทบต่อดินและสามารถปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำและน้ำใต้ดินได้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองได้แก่ (1) การศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไดต์ (2) การทดลองแบบแบตช์ (batch studies) ประกอบไปด้วย การศึกษาระยะเวลาสัมผัส ค่าความสามารถในการดูดซับ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน และ (3) การทดลองแบบคอลัมน์ (column studies) ผลจากการศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไดต์พบว่า ลิโอนาร์ไดต์มีสารอินทรีย์วัตถุและค่าการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสูง มีค่าความเป็นกรดที่สูง สำหรับการศึกษาแบบแบตช์พบว่า ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 24 ชั่วโมง สารละลายอาหาราซีนถูกดูดซับได้ดีที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ (8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสภาวะที่เป็นกรด (pH = 3) และที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งกลไกของการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไดต์อาจเป็นได้ทั้งสองกลไกคือ แบบทางกายภาพ และแบบเคมี สำหรับการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่าลิโอนาร์ไดต์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นดินในอัตราส่วน 1.0: 1.0 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนได้ดีที่สุด

## Abstract

Leonardite is an immature coal from the power plant, which we obtained from Lampang province, Thailand. It is known to contain relatively high humic substance making it suitable as the soil conditioner in agricultural aspect and as an adsorbent. Our objectives were: (1) to determine the physical and chemical properties of leonardite, (2) to quantify the adsorption efficiency of atrazine from the soil, and (3) column studies. This experiment was achieved within 24 hours so that the equilibrium time and isotherm parameters can be determined. Leonardite relatively high cation exchange capacity ( $59.89 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), and high organic matter of 21.62 %. The mechanism of atrazine adsorption may be deepened on the leonardite's surface and its binding with the functional group of atrazine. The temperature and pH values are also important factors that affect the adsorption. It was found that atrazine solution adsorbed well at acidic conditions. For column studies, Leonardite at the middle of the soil at a ratio of 1.0: 1.0 was the most effective in adsorption of the atrazine solution. Finally, this study proof that leonardite used in the agricultural field can also be useful to adsorb atrazine and simultaneously slow the percolating process of atrazine before contaminating groundwater.

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ลีโอนาร์โด.....	4
2.2 สารฮิวมิค.....	6
2.3 สารกำจัดวัชพืช.....	7
2.3.1 ภาวะมลพิษของดิน.....	7
2.3.2 อนุภาคของดินและคุณสมบัติของสารละลายในดิน.....	8
2.3.3 พฤติกรรมและปฏิกิริยาของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ.....	8
2.3.4 อนุภาคของดินและคุณสมบัติของสารละลายในดิน.....	10
2.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน.....	10
2.3.6 การเคลื่อนที่ และคงทนของสารในดิน.....	12
2.4 สารอะทราซีน (Atrazine).....	12
2.4.1 การใช้สารอะทราซีนในการเกษตร.....	15
2.4.2 พฤติกรรมในพืช.....	15
2.4.3 สารอะทราซีนกับพฤติกรรมในดิน.....	15
2.4.4 การสลายตัวของสารอะทราซีน.....	16
2.4.5 ความเป็นพิษของสารอะทราซีน.....	17
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	19
2.5.1 ลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล.....	20
2.5.2 สมดุลการดูดซับสาร.....	22
2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	22

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.4	จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	25
2.5.5	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ.....	27

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีการศึกษา

3.1	การเตรียมสารละลายอาหาราซีนและวัสดุดูดซับ.....	29
3.1.1	การเตรียมสารละลายอาหาราซีน.....	29
3.1.2	การเตรียมวัสดุดูดซับ.....	29
3.2	การทดลองแบบแบตช์ (Batch studies).....	32
3.2.1	การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	32
3.2.2	การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ.....	33
3.2.3	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	34
3.3	การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบแบตช์.....	32
3.4	การทดลองแบบคอลัมน์ (column studies).....	34
3.4.1	การศึกษา breakthrough curve.....	35
3.4.2	การสกัดวัสดุดูดซับ.....	36
3.5	การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบคอลัมน์.....	37
3.6	การวิเคราะห์สารละลายอาหาราซีนด้วยเทคนิค HPLC.....	37
3.7	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	38
3.7.1	การศึกษา breakthrough curve.....	38
3.7.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.7.3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

### บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1	การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุดูดซับ.....	41
4.1.1	คุณลักษณะของลีโอนาร์ไดต์.....	41
4.1.2	คุณลักษณะของดินจากพื้นที่การเกษตร.....	45
4.2	ผลการศึกษาแบบแบตช์ (Batch studies).....	46
4.2.1	ระยะเวลาสัมพัทธ์.....	46
4.2.2	จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	47
4.2.3	ผลการศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	50
4.2.4	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ.....	53
4.2.4.1	ค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีน.....	53
4.2.4.2	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	54
4.2.4.3	อุณหภูมิ.....	56
4.3	ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (column studies).....	57
4.3.1	ผลการศึกษาลักษณะ breakthrough curve ในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	57
4.3.2	ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซีน.....	61

### บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1	การศึกษาคุณลักษณะของลีโอนาร์ไดต์.....	63
5.2	การศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์และจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	63
5.3	ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	63
5.4	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	64
5.5	การดูดซับสารละลายอาหาราซีนในชุดทดลองคอลัมน์.....	65
5.6	ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย.....	65



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	67
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุดในประเทศไทย.....	75
ภาคผนวก ข. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของลีโอนาร์โดต์กับงานวิจัยอื่น ๆ.....	77
ภาคผนวก ค. การศึกษาระยะเวลาสมดุผลการดูดซับสารละลายยาพาราเซตมอล.....	81
ภาคผนวก ง. ข้อมูลและรายละเอียดการศึกษาแบบแบตช์.....	83
ภาคผนวก จ. ลักษณะการทดลองแบบคอลัมน์.....	90
ภาคผนวก ฉ. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	93
ภาคผนวก ช. ลักษณะของ breakthrough curve.....	96
ภาคผนวก ซ. การทดสอบวัสดุดูดซับ.....	110
ประวัตินักวิจัย.....	114

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะของสารอาหารขึ้น .....13
ตารางที่ 2.2	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี .....21
ตารางที่ 2.3	สมการไอโซเทอมแบบต่าง ๆ .....24
ตารางที่ 3.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ .....30
ตารางที่ 4.1	คุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์ .....41
ตารางที่ 4.2	คุณลักษณะของดินจากพื้นที่การเกษตร.....46
ตารางที่ 4.3	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร .....49
ตารางที่ 4.4	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร .....49
ตารางที่ 4.5	ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วย ลิโอนาร์ไคต์.....51
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วยวัสดุ ดูดซับชนิดต่าง ๆ .....58
ตารางที่ 4.7	รายละเอียดการเดินระบบการทดลองแบบคอลัมน์.....59
ตารางที่ 4.8	ผลการศึกษาศักดิ์สารละลายอาหารขึ้นที่หลงเหลือจากการดูดซับในชุดทดลองแบบ คอลัมน์.....61
ตารางที่ ก.1	ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุดของประเทศไทย.....76
ตารางที่ ข.1	ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลิโอนาร์ไคต์.....78
ตารางที่ ข.2	ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลิโอนาร์ไคต์กับค่ามาตรฐานและงานวิจัยอื่น ๆ.....80
ตารางที่ ง.1	จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลาย อาหารขึ้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND).....84
ตารางที่ ง.2	จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลาย อาหารขึ้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND).....85
ตารางที่ ง.3	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไคต์.....86
ตารางที่ ง.4	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของสารละลายอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไคต์.....87
ตารางที่ ง.5	ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป .....88
ตารางที่ ง.6	ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นกับความเป็นกรด-ด่าง.....88
ตารางที่ ง.7	ค่า pH ทั้งก่อนและหลังดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไคต์.....89
ตารางที่ ง.8	ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป.....89

ตารางที่ ฉ.1	ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุดูดซับประเภทต่าง ๆ .....	94
ตารางที่ ฉ.2	ปริมาณวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์.....	95
ตารางที่ ช.1	ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านวัสดุดูดซับชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	100
ตารางที่ ช.2	ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านวัสดุดูดซับชนิดมีลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลางชั้น ในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	103
ตารางที่ ช.3	ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านดินจากพื้นที่การเกษตรในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	106
ตารางที่ ช.4	ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านทรายออกตดาวาในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	108
ตารางที่ ซ.1	การเปรียบเทียบวัสดุในการออกแบบการทดลองคอลัมน์.....	111



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะลิโอนาร์ไคด์ .....	4
รูปที่ 2.2	กระบวนการการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช .....	9
รูปที่ 2.3	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่ม S-triazine .....	13
รูปที่ 2.4	แผนภาพแสดงกระบวนการดูดซับสารที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ .....	19
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ .....	23
รูปที่ 3.1	รูปแบบและขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย .....	32
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน .....	33
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคด์ .....	33
รูปที่ 3.4	รายละเอียดชุดทดลองแบบ column test .....	35
รูปที่ 4.1	ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไคต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM ...	42
รูปที่ 4.2	แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของลิโอนาร์ไคต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ XRD .....	43
รูปที่ 4.3	ลักษณะดินจากพื้นที่ทำการเกษตรในจังหวัดนครราชสีมา .....	45
รูปที่ 4.4	ระยะเวลาสัมผัสดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ .....	47
รูปที่ 4.5	จลนพลศาสตร์แบบ pseudo first order ในการดูดซับสารละลายอาหาราซีน.....	48
รูปที่ 4.6	จลนพลศาสตร์แบบ pseudo second order ในการดูดซับสารละลายอาหาราซีน .	48
รูปที่ 4.7	ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ .....	50
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น .....	53
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ pH ต่างกัน .....	54
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่อุณหภูมิต่างกัน .....	56
รูปที่ 4.11	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหาราซีน .....	58
รูปที่ 4.12	ลักษณะ breakthrough curve ในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยวัสดุดูดซับต่างชนิดกัน .....	60
รูปที่ ค.1	ระยะเวลาสมดุลของการทดลองแบบ preliminary test .....	82
รูปที่ จ.1	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหาราซีนโดยใช้ลิโอนาร์ไคต์ผสมกับดินจากพื้นที่การเกษตร.....	91

รูปที่ จ.2	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีนโดยให้ลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่าง กลางชั้นกับดินจากพื้นที่การเกษตร .....91
รูปที่ จ.3	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีนด้วยดินจากพื้นที่การเกษตร.....92
รูปที่ จ.4	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีนด้วยทรายออกตาวา.....92
รูปที่ ช.1	ลักษณะ breakthrough curve ที่ลิโอนาร์ไคต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินในพื้นที่ การเกษตร.....97
รูปที่ ช.2	ลักษณะ breakthrough curve ที่ลิโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางชั้นระหว่างดินในพื้นที่ การเกษตร.....98
รูปที่ ช.3	ลักษณะ breakthrough curve ของดินจากพื้นที่การเกษตร.....98
รูปที่ ช.4	ลักษณะ breakthrough curve ของทรายออกตาวา .....99
รูปที่ ช.1	กราฟการเปรียบเทียบวัสดุหน้าแปลนในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ .....111
รูปที่ ช.2	กราฟการดูดซับสารอาหารสีนของยางแต่ละชนิดที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง.....112

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อาชีพเกษตรกรนับว่าเป็นอาชีพหลักที่สำคัญของประเทศไทย โดยวัตถุดิบทางการเกษตรที่ถูกส่งออกเป็นลำดับต้นๆ คือกลุ่มพืชไร่ อาทิเช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าว และ น้ำตาลเป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาผลผลิตทางการเกษตรให้เพียงพอและมากขึ้นสำหรับเป็นสินค้าส่งออก เกษตรกรส่วนใหญ่จึงนิยมใช้สารเคมีในพื้นที่ทำการเกษตร เช่น ปุ๋ยเคมี และสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ในสิ่งแวดล้อม จากสถิติปริมาณและมูลค่าสารกำจัดศัตรูพืชประเภทต่าง ๆ ที่นำเข้าประเทศไทยในช่วงระยะเวลา 5 ปี (กรมวิชาการเกษตร, 2559) จะพบว่าปัจจุบันการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชเป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าการใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตรอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากการขาดแคลนแรงงานด้านการเกษตรทำให้ไม่สามารถทำงานได้ทันกับการเจริญเติบโตของวัชพืช ประกอบกับเป็นวิธีการที่ใช้งานง่าย มีต้นทุนต่ำ และเห็นผลเร็ว (ทศพล, 2545) สำหรับพืชเศรษฐกิจอย่างเช่น อ้อย และข้าวโพด มักนิยมปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย จากงานวิจัยของพวงรัตน์ และคณะ (2557) พบว่ามีการปนเปื้อนของสารกำจัดวัชพืชอย่าง ไกลโฟเซต พาราควอต และ อาทราซีนในพื้นที่การเกษตรค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อดิน แหล่งน้ำที่ใช้อุปโภคและบริโภคของประชากรในจังหวัดด้วย นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าสารที่สามารถเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้โดยการไหลบ่าของน้ำและการชะละลายของหน้าดิน ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนสูงคือ สารอาหาราซีน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะหาแนวทางในการลดการปนเปื้อนและวิธีการป้องกันของสารอาหาราซีนสู่สิ่งแวดล้อม ด้วยกระบวนการดูดซับ เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นวิธีการที่ดำเนินการง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ จึงอาจจะช่วยชะลอการปนเปื้อนของสารอาหาราซีนในสิ่งแวดล้อมได้

ลีโอโนอาร์ไคต์ หรือ low rank coal เป็นชั้นดินปนถ่านหินที่ถูกออกซิไดส์ตามธรรมชาติ มีลักษณะนุ่มไม่แข็งตัว มีสีน้ำตาลอ่อนถึงดำ (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) ลีโอโนอาร์ไคต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่พบได้ที่แหล่งถ่านหินลิกไนต์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการทำเหมือง และมีปริมาณค่อนข้างมาก ยากต่อการจัดการและกำจัด แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำลีโอโนอาร์ไคต์มาใช้ประโยชน์มากขึ้น อาทิเช่น การนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก อย่างการดูดซับสารหนู (Arsenic, As) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ตะกั่ว (Lead, Pb) สังกะสี (Zinc, Zn) (Sardans et al., 2016 ; Chammui et al., 2014; Zengin, 2013 ; Lao et al., 2005) เป็นต้น และการดูด

ซัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon; PAHs) จากแหล่งน้ำ (Zeledon-Toruno et al., 2007) รวมทั้งการนำลีโอนาร์ไต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดินให้กับพื้นที่การเกษตรอีกด้วย เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของลีโอนาร์ไต์เป็นสารฮิวมิก (Humic acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง ภายในองค์ประกอบของลีโอนาร์ไต์มีธาตุคาร์บอน 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนหลายกลุ่มฟังก์ชัน ได้แก่ กลุ่ม carboxyl , hydroxyl และ carbonyl ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง โดยคุณสมบัติของกรดฮิวมิกจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์แก่พืช และทำหน้าที่รักษาโครงสร้างของดินให้อุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) จากงานวิจัยของ จณิตตา (2557) พบว่าการนำลีโอนาร์ไต์ผสมกับปุ๋ยเคมี จะช่วยเพิ่มผลผลิตให้กับอ้อย นอกจากนี้ยังพบว่าลีโอนาร์ไต์เป็นสารประกอบที่ไม่มีขี้ และมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) (Zeledon-Toruno et al., 2007; Lao et al., 2005) รวมถึงภายในโครงสร้างหลักของลีโอนาร์ไต์มีลักษณะเป็นอะโรมาติกส์พอลิเมอร์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งจากงานวิจัยของ Asavasukhi และคณะ (2016) พบว่าลีโอนาร์ไต์จัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีวงแหวนอะโรมาติกส์เป็นส่วนประกอบสามารถนำมาดูดซับสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลีโอนาร์ไต์นอกจากจะนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินแล้วยังสามารถดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำได้อีกด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดูดซับสารอาหารอินทรีย์ด้วยลีโอนาร์ไต์ โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติของลีโอนาร์ไต์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ระหว่างลีโอนาร์ไต์และลีโอนาร์ไต์ที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Carbonization) รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับ และปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับของสารละลายอาหารอินทรีย์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบำบัดสารอาหารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคูณลักษณะพื้นฐาน และลักษณะเฉพาะต่างๆ ของ Leonardite เช่น พื้นที่ผิว ภาพถ่ายขนาดและปริมาณรูพรุนของ Leonardite เป็นต้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของยาปราบศัตรูพืชโดยใช้ Leonardite
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะแวดล้อม และปริมาณที่เหมาะสมของ Leonardite ในการดูดซับยาปราบศัตรูพืช
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของยาปราบศัตรูพืชในชั้นดินแบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดลองแบบ Column ในสภาวะที่มี Leonardite แบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดิน (Homogenous) และแบบชั้นกำแพงประดิษฐ์

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับยาปราบศัตรูพืชโดยใช้ลิโอนาร์ไต์ซึ่งเป็นของเหลือใช้จากการทำเหมือง ซึ่งยาปราบศัตรูพืชที่จะใช้เป็นสารที่ยังมีใช้ในประเทศไทย เช่น สารอาหารราซิน โดยจะเลือกสารปราบศัตรูพืชมาเพียงชนิดเดียว เป็นต้น โดยทำการศึกษาในแบบ lab scale เท่านั้น

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของลิโอนาร์ไต์

1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพของลิโอนาร์ไต์ในการดูดซับสารละลายอาหารราซิน

1.4.3 ทราบถึงสภาวะแวดล้อมและปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายอาหารราซินโดยใช้ลิโอนาร์ไต์เป็นวัสดุดูดซับ

1.4.4 ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารราซินโดยการทดลองแบบ Column studies ในสภาวะที่มีลิโอนาร์ไต์แบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดิน และแบบแยกชั้น





## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลิโอนาร์ไดต์ (Leonardite)

ลิโอนาร์ไดต์ คือดินปนถ่านหินที่เกิดจากสองกรณี คือ

- (1) การผุพังตามธรรมชาติของถ่านหินพีซ และ
- (2) ผลผลิตที่มาจากกระบวนการทำเหมืองของแร่อลิกันต์

ลิโอนาร์ไดต์มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนถึงดำ ประกอบไปด้วยกรดฮิวมิก และกรดอินทรีย์อื่น ๆ (Ausavasukhi et al., 2016) ซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด แหล่งลิโอนาร์ไดต์ขนาดใหญ่ถูกพบที่มลรัฐดาตาเหนือ และไวโอมิง ประเทศสหรัฐอเมริกา และ บริทริช โคลัมเบีย ประเทศแคนาดา สำหรับลิโอนาร์ไดต์ในประเทศไทย พบได้ที่แอ่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีปริมาณถ่านหินลิกไนต์สำรอง 1,139 ล้านตันโดยประมาณ และอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) ลักษณะของลิโอนาร์ไดต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะลิโอนาร์ไดต์ (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552)

จากการศึกษาของ Robert (1997) ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของลิโอนาร์ไดต์ประกอบไปด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) ออกซิเจน (O) และเถ้าถ่าน (ash) เป็นต้น (Robert (1997) อ้างจาก ณธรรศ, 2557) รวมถึงยังประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca), โซเดียม (Na), แมกนีเซียม (Mg) และโพแทสเซียม (K) และแร่ธาตุอีกหลายชนิด อาทิ เช่น แร่ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) แร่แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) แร่กาสิไนต์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ไอออนซัลไฟด์ ( $\text{FeS}_2$ ) และแร่ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นต้น จากข้อมูลข้างต้น พบว่าลิโอนาร์ไดต์มีองค์ประกอบที่เป็น

ประโยชน์ต่อการเกษตรค่อนข้างมาก อีกทั้งยังมีธาตุอาหารที่พืชต้องการด้วยเช่น ฮอร์โมนออกซิน (auxin) ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงนิยมนำลีโอเนาร์ไดต์ไปประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงดินและฟื้นฟูพื้นที่ทางการเกษตร

เนื่องจากลีโอเนาร์ไดต์มีสารประกอบของฮิวมัส (Humus) หรือ สารฮิวมิก (Humic Substances) เป็นองค์ประกอบประมาณ 30-80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วย กรดฟุลวิก (Fulvic acid) กรดฮิวมิก (Humic acid) และฮิวมิน (Humic) ตามลำดับ (Qian et al, 2016 ; วิวัฒน์ และคณะ , 2552) รวมไปถึงสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนหลายกลุ่มฟังก์ชัน ได้แก่ กลุ่ม คาร์บอกซิล (carboxyl group) กลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) ที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง แต่มีรายงานว่าลีโอเนาร์ไดต์ก็มีธาตุโลหะอันตรายหลายชนิดเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ได้แก่ สตรอนเทียม โครเมียม อาร์เซนิก นิกเกิล และ แบเรียม รวมทั้งค่าความเป็นกรดที่สูง (pH เท่ากับ 2 ถึง 4 โดยประมาณ) (สุชาติ, 2556)

จากที่กล่าวมาข้างต้นลีโอเนาร์ไดต์นอกจากจะนิยมนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินแล้วยังมีการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำอีกด้วย อาทิเช่น งานวิจัยของ Zeledón *et al* (2007) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัด PAHs ออกจากน้ำโดยใช้ลีโอเนาร์ไดต์เป็นสารดูดซับ และพบว่าลีโอเนาร์ไดต์สามารถใช้เป็นสารดูดซับ PAHs ในสิ่งแวดล้อมได้ จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการดูดซับของ PAHs แต่อย่างไรก็ตามหนึ่งใน PAHs ที่ Zeledón และคณะได้ศึกษา พบว่า Fluorene แสดงพฤติกรรมดูดซับที่ต่างออกไปเมื่อสารละลายมีความเป็นกรดสูง กล่าวคือดูดซับได้มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงและดูดซับได้น้อยลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของ Fluorene นั้นสูงกว่า PAHs ชนิดอื่นๆ ประกอบกับความมีขั้วของลีโอเนาร์ไดต์จะลดลงมากกว่าเดิมเมื่อค่าพีเอชลดลง ขณะเดียวกันการดูดซับของสาร PAHs ด้วยลีโอเนาร์ไดต์นั้นถูกพบว่าเกิดขึ้นรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงแรก และเข้าสู่สมดุลอย่างสมบูรณ์ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และพบว่าพฤติกรรมดูดซับของสารทั้งสองชนิดนั้นอธิบายได้ด้วยไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิช ซึ่งการทดลองนี้สรุปได้ว่าปริมาณสารฮิวมิกที่อยู่ภายในลีโอเนาร์ไดต์เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และงานวิจัยของ Ausavasukhi *et al* (2016) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับสีคองโกเรดในน้ำเสียด้วยลีโอเนาร์ไดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและดินแดง พบว่าการทดลองแบบ batch studies ภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกันโดยการเปลี่ยนตัวแปรเช่นพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น และเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของสีย้อมบนตัวดูดซับ ลีโอเนาร์ไดต์และดินแดงที่คำนวณได้มีค่า 13.2 - 70.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 7.9-58.5 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ เมื่อนำลีโอเนาร์ไดต์มากระตุ้นด้วยความร้อนผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ทำให้สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนถูกเผา และพบว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวทางเคมีของลีโอเนาร์ไดต์ที่ได้จากการกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

(carbonization) จะส่งผลต่อคุณลักษณะการดูดซับ จากการวิจัยนี้พบว่า Leo 900 (การคาร์บอนเซชัน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส) ที่ค่า pH ในช่วงกว้าง มีการดูดซับสารละลายของโครเมตได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีการนำลิโอนาร์ไดต์มาดูดซับสารอนินทรีย์อีกด้วย อาทิเช่น งานวิจัยของ Chammui *et al* (2014) ที่ทำการศึกษาการกำจัดสารอาร์เซนิก ( $As^{+3}$  และ  $As^{+5}$ ) ด้วยการใช้ลิโอนาร์ไดต์เป็นวัสดุดูดซับ โดยทำการเปลี่ยนสภาพทางกายภาพของลิโอนาร์ไดต์ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน (carbonization) ที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองแบบ batch adsorption พบว่าลิโอนาร์ไดต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสาร  $As^{+3}$  ได้ดีที่สุด คือสามารถกำจัดสารละลายอาร์เซนิกในน้ำได้เกือบจะ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และ ฟรุนดิช รวมถึงงานวิจัยของ Lao *et al* (2005) ที่นำลิโอนาร์ไดต์มาดูดซับโลหะหนัก คือ Cd (II) และ Pb (II) พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และมีค่าความจุในการดูดซับสาร Cd (II) และ Pb (II) เท่ากับ 50.6 และ 250.7 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งกลไกการดูดซับ อาจเกิดจากแรงของไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนของสารละลาย Pb (II) กับพื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไดต์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เกี่ยวข้องด้วย เช่น ขนาดพื้นที่ผิวและรูพรุนลิโอนาร์ไดต์ และความมีขั้วของไอออนของสารละลายโลหะ เป็นต้น

## 2.2 สารฮิวมิก

อินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) หรือ ฮิวมัส (humus) มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลปนดำ เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ที่ผ่านกระบวนการของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอินทรีย์สารลงสู่ดิน จัดเป็นสารอินทรีย์ที่เสถียร และเป็นกลุ่มที่ให้สารประกอบฮิวมิก (humic substance) ซึ่งสารฮิวมิกจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน รูปร่างไม่แน่นอน และคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มาก โครงสร้างหลักจะประกอบด้วยสารประกอบ aromatic compound ซึ่งเป็นแกนทำให้สลายตัวได้ยาก นอกจากนี้สารฮิวมิกยังมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลประมาณ  $30 \times 10^{-10}$  ถึง  $100 \times 10^{-10}$  เมตร ซึ่งการจำแนกสารฮิวมิกจะจำแนกตามคุณสมบัติการละลายในกรดและในด่างที่ต่างกันดังนี้ ฮิวมิน (humin) จะไม่ละลายทั้งในกรดและด่าง กรดฟุลวิก (fulvic) จะมีลักษณะเป็นโมเลกุลที่เล็กและละลายได้ดีในกรด สำหรับกรดฮิวมิก (humic) จะมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ละลายน้ำได้น้อยมากแต่สามารถละลายได้บางส่วนในสารละลายที่เป็นกรดและด่าง (จณิตตา, 2557 ; นัทธีรา และคณะ, 2553)

กรดฮิวมิกประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นส่วนใหญ่ (ร้อยละ 90 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้กรดฮิวมิกยังมีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ฟีนอล (phenol group) และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) รวมถึงหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ด้วย ซึ่งสูตรโครงสร้างอย่างง่ายของกรดฮิวมิก คือ  $C_{10}H_{12}O_5N$  (ไม่รวมธาตุซัลเฟอร์; S) คุณสมบัติของกรดฮิวมิกคือ สามารถ

แลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดี เนื่องจากมีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูง (CEC) และทำให้อนุภาคจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวก-ลบที่สูง รวมทั้งช่วยป้องกันการระเหยของน้ำด้วย เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะระหว่างประจุบวกของกรดฮิวมิกที่ดูดซับไว้กับประจุลบของน้ำ ส่วนประจุบวกที่หลงเหลืออยู่คือไฮโดรเจน (hydrogen, H<sub>2</sub>) ก็สร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจนในน้ำ (Oxygen, O<sub>2</sub>) ต่อไปเรื่อย ๆ จึงทำให้เกิดการอุ้มน้ำได้มากขึ้น (ณรรต, 2557 ; อุษา และคณะ, 2557)

## 2.3 สารกำจัดวัชพืช (Herbicides)

สารกำจัดวัชพืช (herbicides) หมายถึง สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชกลุ่มที่ใช้ยาฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช ทั้งขณะวัชพืชงอกและที่ยังเป็นเมล็ดอยู่ ตลอดจนถึงส่วนต่าง ๆ ของวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้ โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อพืชที่ปลูก (Qasem, 2013) เนื่องจากมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคการเกษตรจึงทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำดื่มค่อนข้างมาก ประกอบกับสารเหล่านี้สามารถตกค้างได้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้นการแยกแยะส่วนประกอบทางสารเคมีและหาปริมาณสารเคมีที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตและคาดการณ์ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ (Aslam et al., 2013) จากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างดินและสารกำจัดวัชพืชได้ดังนี้

### 2.3.1 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (soil pollution) หมายถึง การปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (soil pollutant) ที่เกิดจากอัตราการเพิ่มขึ้นของสารมลพิษมากกว่าการเสื่อมสลายตัวของสารมลพิษ จนทำให้เกิดการสะสมของสารมลพิษที่มากขึ้นและก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดภาวะมลพิษในดิน ได้แก่ สารกำจัดศัตรูพืชและวัชพืช ปุ๋ยอินทรีย์เคมี ของเสียจากสารกัมมันตรังสี และสารเคมีจากกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้สารกำจัดวัชพืชประเภท ไชมาซีน อาทราซีน คาร์บาริล และไลนุรอน ในอัตราที่สูงจะส่งผลกระทบต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ประเภทย่อยสลายเซลลูโลส อย่างในกรณีที่มีการใช้สารอโทรซีนติดต่อกันเกิน 15 ปี จะส่งผลกระทบต่อเชื้อราประเภท *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* และ *Sclerotium rolfsii* ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของเชื้อราพวกเส้นใยและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากวัฏจักรคาร์บอนลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การสลายตัวของอินทรีย์สารในดินลดลง (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2541; ศุภมาส, 2545) สำหรับการใส่สารกำจัดศัตรูพืชและวัชพืชในพื้นที่การเกษตรหรือพื้นที่ว่างเปล่า จะทำให้สารเคมีเกิดการตกค้างสู่สิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อวัฏจักรชีวภาพของดิน รวมถึงส่งผลกระทบต่อระบบห่วงโซ่อาหารด้วย ซึ่งความคงทนของสารเคมีในดินอาจอยู่ได้เพียง 20-30 ปี แต่การฟื้นตัวและ

การปรับปรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์นั้นต้องใช้ระยะเวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการสะสมและการแพร่กระจายของสารมลพิษในดิน เนื่องจากการพา และสภาพการเคลื่อนตัวได้ (mobility) ของสารมลพิษซึ่งจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่าง ๆ ในดิน เนื่องจากน้ำคือพาหะในการแพร่กระจายของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม (Mishra et al., 2015)

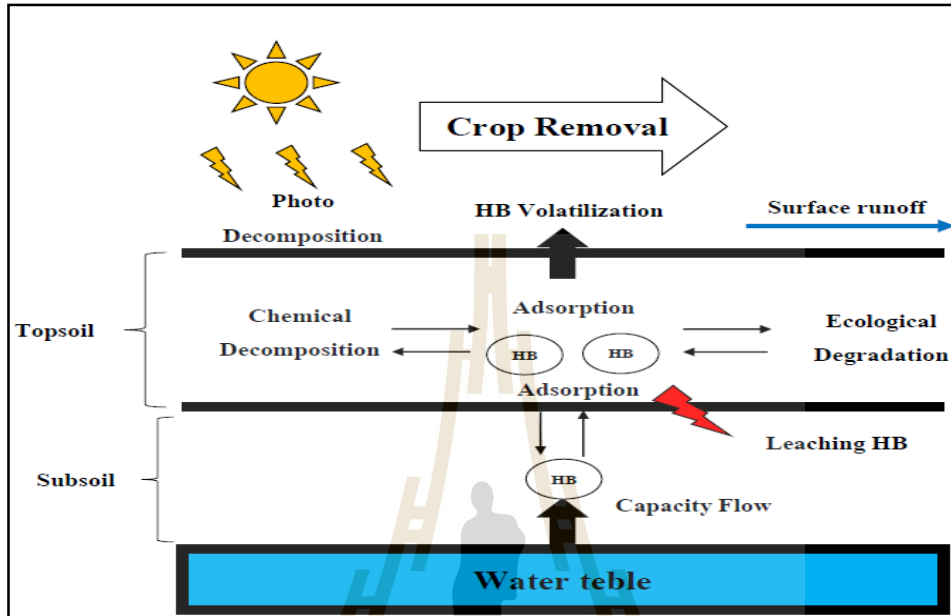
### 2.3.2 อนุภาคของดินและคุณสมบัติของสารละลายในดิน

อนุภาคของดิน (soil phase) จะประกอบไปด้วย อนุภาคที่เป็นของแข็ง (Soil phase) มีหน้าที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของมวลดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุ อนุภาคอนินทรีย์สารจะมีขนาดต่าง ๆ กัน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อนุภาคทราย (sand) เป็นอนุภาคที่ใหญ่ที่สุด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05-2.00 มิลลิเมตร อนุภาคตะกอน หรือ ทรายแป้ง (silt) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05-0.002 มิลลิเมตร มีลักษณะร่วน และอนุภาคดินเหนียว (clay) เป็นอนุภาคที่เล็กที่สุด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตร เป็นอนุภาคที่มีพื้นผิวจำเพาะมากกว่าทราย ภายในมีลักษณะเป็นแผ่นของสารประกอบ aluminosilicate ที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ และมีเนื้อที่ผิวจำเพาะสูง ดังนั้นอนุภาคดินเหนียวจึงสามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี การศึกษาสารคอลลอยด์ในดิน (colloidal properties) ส่วนใหญ่จะนิยมศึกษาในสารละลายของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากมีศักยภาพของการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างสูง เพราะมีสัดส่วนของปริมาณต่อพื้นที่ผิวและมีอัตราการแลกเปลี่ยนประจุสูง โดยที่บริเวณพื้นที่ผิวของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุจะเป็นประจุลบ (anion) หมายความว่าถ้าประจุหรือโมเลกุลของสารที่เป็นประจุลบมาเกาะจะเกิดการผลักกันของประจุ (repell) แต่ถ้าในดินเป็นประจุบวก (cation) โมเลกุลของสารที่มีประจุบวกจะถูกดูดซับ (absorb) ไว้ในสารละลายคอลลอยด์ของดิน (colloids) (Yong et al., 2010) เนื่องจากอนุภาคของดินและโมเลกุลของสารละลายมีประจุที่แตกต่างกัน นอกจากนี้อนุภาคที่เป็นประจุลบจะมีแนวโน้มว่าจะถูกชะออกจากดินได้ ในขณะที่อนุภาคที่เป็นประจุบวกจะยังคงอยู่ในสารละลายในดิน และจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกภายในช่องว่างของดิน หรือ cation exchange capacity (CEC) ซึ่งเป็นความจุของดินที่จะสามารถดูดยึดไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุบวกได้ ซึ่งค่าที่วัดได้คิดเป็น meq (milliequivalents) ต่อ 100 กรัมของดิน (ทศพล, 2545; คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2541)

### 2.3.3 พฤติกรรมและปฏิกิริยาของสารกำจัดวัชพืชในดิน

สารกำจัดวัชพืชมีการสะสมในแหล่งดิน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมและการสลายตัวของสารกำจัดวัชพืช เพื่อให้ทราบถึงระยะทางของการเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชที่จะเกิดปฏิกิริยา และความคงทนที่อยู่ในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของดิน เนื่องจากสารกำจัดวัชพืช

สามารถเกิดการดูดซึม (adsorption) เกิดการเคลื่อนย้าย (transport / movement) และการย่อยสลาย (degradation) ได้ โดยกระบวนการสลายตัวของสารกำจัดวัชพืชดังกล่าวสามารถอธิบายดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการสลายตัวของสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช (HB : herbicides)  
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ross and Lembi, 2009)

คุณสมบัติที่สำคัญของสารกำจัดวัชพืชในดิน คือ สภาพการละลายได้ (solubility) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารในน้ำและดิน ความดันไอ (vapor pressure) จะบอกถึงศักยภาพในการระเหยของสารกำจัดวัชพืชออกจากดิน ความสามารถในการดูดซับ (sorption to adsorb) จะบ่งบอกถึงความสามารถในการถูกดูดซับของสารละลายกับสารอินทรีย์ในดิน สภาพที่มีขั้ว (polarity) ประจุ (charge) และค่า pH ในสารละลาย รวมทั้งอัตราการใช้สารกำจัดวัชพืช ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกค้างของสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปที่กำหนด หรือใช้ในระยะเวลาที่นาน ๆ ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Henson et al. (1997) (อ้างอิงงานวิจัยของ สุชาติ, 2548) พบว่า เมื่อทำการวัดสารอาหารอินทรีย์ในน้ำที่ระบายออกมาจาก soil column ความเข้มข้นของสารอาหารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ที่สูงขึ้น และปริมาณสารอาหารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในดินจะเพิ่มตามอัตราการใช้งานที่สูงขึ้น ส่วนระยะเวลาที่ตรวจพบสารจะต่างกันตามอัตราที่ใช้ โดยที่ระยะเวลาการตรวจพบสารอาหารอินทรีย์เร็วขึ้น ที่อัตราการใช้สารสูง ๆ

#### 2.3.4 ความสัมพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ

การดูดซับสารชนิดหนึ่ง ๆ ในดินส่วนใหญ่จะเกิดจากการดูดซับน้ำ และไอออนในสารละลายดิน โดยการที่ดินเกิดการดูดซับสารได้มากหรือน้อยจะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งสิ่งที่เป็นปัจจัยในการดูดซับสารของดินคือ อนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็ก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับสูง ประกอบกับการที่มีประจุลบจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับไอออนที่เป็นประจุบวกได้ดี ดังนั้นในกรณีที่น้ำถูกดูดซับในดินจึงอาจเกิดในกระบวนการนี้ได้ เนื่องจากน้ำเป็นสารประกอบที่มีขั้ว (polar compound) การดูดซับของสารกำจัดวัชพืชในดิน แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการทางฟิสิกส์ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณผิวนอกของอนุภาคดิน อย่างเช่น การดูดซับแบบแรงแวลเดอร์วาลส์ และแรงดูดซับทางประจุไฟฟ้า สำหรับกระบวนการทางเคมีจะเกิดจากปฏิกิริยาร่วมของหลายกระบวนการที่บริเวณพื้นที่ผิวภายในที่ซับซ้อนของอนุภาคดิน โดยจะเกิดในช่วงระยะเวลาที่สั้น ๆ ได้แก่ การเกิดพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน และกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุภายใน เป็นต้น (ศุภมาส, 2545; ชัยยศ, 2554)

### 2.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดินอธิบายได้ดังต่อไปนี้

(1) ชนิดและปริมาณของรูปสารละลายคอลลอยด์ในดิน เช่น ชนิดของแร่ดินเหนียว ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด มีความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่สูง และมีประจุลบจำนวนมากทำให้เกิด ionic double layer กล่าวคือดินเหนียวจะมีประจุสองชั้น ได้แก่ชั้นในที่เป็นประจุลบที่ผิว และชั้นนอกที่เป็นประจุบวกของแคตไอออนที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของดินเหนียว ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ สำหรับคอลลอยด์อินทรีย์ (organic colloidal) ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส (humus) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง และมีประจุลบมาก โดยเกิดจากหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ที่มีการแตกตัวของ  $H^+$  นอกจากนี้ค่า pH ก็ส่งผลต่อการดูดซับด้วย คือถ้าค่า pH สูงจะเกิดการแตกตัวของกรดสูงทำให้ปริมาณประจุลบของคอลลอยด์อินทรีย์สูงขึ้น นอกจากนี้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุหรือมีสาร humic acid เป็นองค์ประกอบจะมีความสามารถในการจับตัวหรือยึดเกาะได้ดีกว่า และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้สูงกว่าดินเหนียว เนื่องจากบนพื้นที่ผิวที่ผิวของอินทรีย์วัตถุมีประจุลบอยู่จำนวนมาก ทำให้เกิดการดึงดูดสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ดังนั้นองค์ประกอบของดินจึงมีความสำคัญต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืช และการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในดิน (สุชาติดา, 2548)

(2) ค่า pH ในดิน การวิเคราะห์ค่า pH ในดินจะคล้ายกับการวิเคราะห์ค่า pH ในน้ำ แต่จะแตกต่างที่ในดินนั้นมีความเป็นกรด 2 ชนิด คือ กรดจริง และกรดแฝง ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของประจุ โดยที่ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มีประจุบวก เมื่อถูกดูดซับในดินจะเรียกว่า สภาพกรดแฝง (potential acidity) ซึ่งจะพบในดินเหนียวมากกว่าดินทราย เนื่องจากภายในดินเหนียวจะมีประจุลบสูงกว่าจึงมีสภาพเป็นกรดแฝงสูงกว่า และจะเกิดการปลดปล่อยกรดออกมาบางส่วน ซึ่งจะคล้ายกับการ

แตกตัวของกรดอ่อน สำหรับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่ไม่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สภาพกรดจริง (activity acidity) โดยค่า pH ที่วัดได้คือเป็นกรดจริง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสภาพการละลายได้ (solubility) ของธาตุ การเจริญเติบโตของพืช และจุลินทรีย์ในดิน

(3) คุณสมบัติของอนุภาคหรือประจุของสาร (ionization properties) อนุภาคของสารวัชพืชที่เป็นประจุบวกจะมีโมเลกุลในการยึดเกาะดินได้ดี เนื่องจากดินมีอนุภาคที่เป็นประจุลบ ดังนั้นค่า pH จึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุบางส่วนบนพื้นผิวอนุภาคของวัสดุดูดซับ ซึ่งสารกำจัดวัชพืชแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามคุณสมบัติของไอออน คือ กลุ่มกรดอ่อน (weak acid) กลุ่มประจุบวก (cationic) กลุ่มเบสอ่อน (weak base) โดยที่ pH เป็นกรดจะมีสภาพเป็นไอออนบวก และกลุ่มที่ไม่มีประจุ (nonionic) ซึ่งค่า pH จะส่งผลต่อสารกำจัดวัชพืชประเภทกรดอ่อน ๆ หรือต่าง นอกจากนี้ สารเคมีที่มีกลุ่มฟังก์ชัน  $-OH$ ,  $-NH_2$ ,  $-NHR$ ,  $-CONH_2$ ,  $-COOR$ , และ  $-NR_3$  และสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกดูดซับได้ดี รวมถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินด้วย ถ้าในดินมีปริมาณมากจะดูดซับสารเหล่านี้ได้ดี รวมทั้งยังขึ้นกับชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียวด้วย

(4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นในดินจะรบกวนการดูดซับโมเลกุลของสารกำจัดวัชพืชเพราะน้ำเป็นตัวแข่งขันในการยึดเกาะของสารในดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการระเหยของสารกำจัดวัชพืช ซึ่งการวิเคราะห์จำนวนน้ำในดินได้จากระดับความชื้น (water content) คือสัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับปริมาณของดินที่มีน้ำอยู่ ซึ่งหาได้จากการคำนวณระดับความชื้นโดยมวล (mass water content) และ ระดับความชื้นโดยปริมาตร (volume water content)

(5) ความจุแลกเปลี่ยนไอออน (Cation exchange capacity ; CEC) หมายถึงความสามารถของปริมาณแคตไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์จะดูดซับได้ มีหน่วยเป็น meq (milliequivalents) ต่อ 100 กรัมของดิน ซึ่งค่า CEC สามารถใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการบ่งบอกลักษณะของเนื้อดินได้ โดยที่องค์ประกอบของแร่ดินเหนียวสูงจะมีค่า CEC สูง มักจะเป็นเนื้อดินที่ละเอียด นอกจากนี้ดินที่มีฮิวมัสเป็นองค์ประกอบมากจะให้ค่า CEC ที่ค่อนข้างสูงด้วย ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินจะขึ้นกับชนิดของดินนั้น ๆ เช่น ฮิวมัส มีค่า CEC เท่ากับ 200 มิลลิอิควิวาเลนท์ (meq) ต่อ 100 กรัม มอนต์มอริลโลไนต์ มีค่า CEC เท่ากับ 100 มิลลิอิควิวาเลนท์ (meq) ต่อ 100 กรัม และ ไฮดร็อกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม มีค่า CEC เท่ากับ 4 มิลลิอิควิวาเลนท์ (meq) ต่อ 100 กรัม เป็นต้น (Ross and Lembi, 2009; ทศพล, 2545; ศุภมาส, 2545; คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2541; ธวัชชัย, 2540)

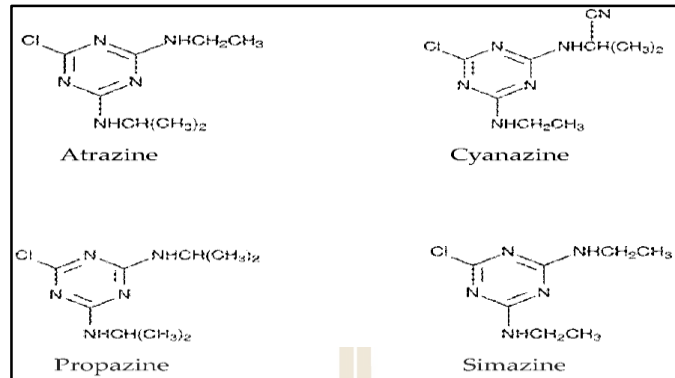
### 2.3.6 การเคลื่อนที่ได้ และความคงทนของสารในดิน



การเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดินจะเกิดจากการพาของน้ำผ่านดิน ซึ่งระหว่าง การไหลผ่านในช่องดินจะเกิดการทำปฏิกิริยาได้ อาทิเช่น การดูดซับ การเสื่อมสลายทางชีวและเคมี การดูดซึมโดยพืช เป็นต้น สารเคมีที่เคลื่อนที่ได้เข้าจะถูกสะสมอยู่บริเวณผิวดิน ส่วนสารเคมีอย่างพวก ไตรอะซีนจะถูกพาจนเคลื่อนที่เลยชั้นของรากพืช จึงทำให้ดินเกิดการดูดยึดไว้ในปริมาณน้อยและเกิด การชะละลายได้ ซึ่งการชะละลาย และการไหลบ่าของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สารกำจัดศัตรูพืชถูก เคลื่อนย้ายไปจากดิน สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ได้ของสารในดินได้แก่ ความชื้นในดิน สภาพการละลายได้ของสาร และสภาพการดูดซับได้ของดิน เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวกับการชะละลาย ได้ของสาร ได้แก่ ศักยภาพและพลวัตของการดูดซับ สภาพการละลายได้ของสาร การไหลของน้ำในช่อง ดิน การฟุ้งกระจายของอนุภาคดินเหนียว และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดิน เป็นต้น การเคลื่อนย้ายของ สารละลายหรือสารแขวนลอย (ขนาดมากกว่า 0.45 ไมครอน) จะขึ้นกับสภาพการละลายได้ของสาร เป็หลัก และสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการแพร่ (diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่ไปกับการไหลของมวล (mass flow) จะเกี่ยวข้องกับโมเลกุลของน้ำหรือสารลิแกนด์ (ligand) โดยเฉพาะสารลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น กรดฟุลวิก (fulvic acid) และกรดฮิวมิก (humic acid) เป็นหลัก (ศุภมาส, 2545)

#### 2.4 สารอะทราซีน (Atrazine)

สารอะทราซีนเป็นสารกำจัดวัชพืชที่จัดอยู่ในกลุ่มของสารไตรอะซีน (Triazines) โดยเกิดจาก สารกำจัดวัชพืชกลุ่มซิมเมตริกอลไตรอะซีน (symmetrical triazine) หรือเอสไตรอะซีน (S-triazine) (สุภัญญา, 2550) สารอะทราซีนมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยวงแหวนของไนโตรเจนสาม อะตอมสลับกับอะตอมคาร์บอน เนื่องจากการที่วงแหวนมีไนโตรเจนอยู่ 2-3 อะตอมจึงเรียกว่าอะซีน (azine) และการจัดตำแหน่งของไนโตรเจนที่สมดุลงันจึงเรียกว่าเอสไตรอะซีน (S-triazine) ซึ่งสารในกลุ่มนี้จะต่างกันที่การแทนที่ในตำแหน่งที่ 2, 4 และ 6 ด้วยหมู่คลอรีน เมทอกซิล และเมทิลไฮโอ ดังรูป 2.3 (พิมพ์ภัก, 2551) สารอะทราซีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1955 โดย Gast Antognini และ Day จากนั้นได้ถูกนำมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ในปี ค.ศ. 1958 และจัดเป็นสารกำจัดวัชพืชที่นิยมใช้กันมากสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา และอีก 70 ประเทศทั่วโลก เนื่องจากการดูดซึมของสารอะทราซีนที่เข้าสู่บริเวณรากของวัชพืชทำให้เกิด การตกค้างในดิน รวมทั้งยังทำให้เกิดความคงทนในดินและเมื่อเกิดการชะละลายสู่แหล่งน้ำและแหล่งน้ำ ใต้ดินจะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย (Douglass et al, 2015) จึงทำให้สารอะทราซีนถูกระงับใช้ในปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991 ในประเทศแถบยุโรป เช่น ประเทศเยอรมัน และอิตาลี และปี ค.ศ. 1994 โดย US.EPA (Environment Protection Agency) (Wang, 2003) แต่สำหรับในประเทศไทยในปัจจุบันสารอะทราซีนยังคงได้รับความนิยมอยู่ ซึ่งอ้างอิงได้จากการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของ ประเทศไทย ดังตารางที่ ก. 1 ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของสารอะทราซีนสามารถอธิบายได้ดังตาราง 2.1



รูปที่ 2.3 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่ม Symmetrical triazine (S-triazine)

ที่มา : Price et al., 2015

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของสารอาหาราซีน (Atrazine)

ชื่อสามัญ (Chemical name)	Atrazine
ชื่อทางเคมี (Chemistry name)	2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-triazine
ชื่อทางการค้า (Trade name)	CAS 1912-24-9, ENT 28244, Aatrex, Aatrex 80 W, Atranex, ATratol, Atrazine 80 W, Gasparim, Griffex, Primatol, Vectal
สูตรโมเลกุล (Molecular formula)	$C_8H_{14}ClN_5$
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	215.69 กรัมต่อโมล (g/mol)
สูตรโครงสร้าง (Structural formula )	
ลักษณะทางกายภาพ (physical state)	ผลึกขาวใส ไม่มีสี ไม่ติดไฟ และไม่ปนสารกัดกร่อน
จุดเดือดและจุดหลอมเหลว (Melting point and boiling point )	จุดหลอมเหลว 173-175 องศาเซลเซียส ไม่ทราบจุดเดือด
Log $K_{ow}$	2.71
$K_{oc}$ <sup>(a)</sup>	100
Log $K_{ow}$ <sup>(b)</sup>	2.43
pK <sub>a</sub> <sup>(c)</sup>	2.27

Henry's Law Constant	$6.13 \times 10^{-8} - 2.45 \times 10^{-7} \text{ atm}\cdot\text{m}^3 / \text{mole}$
ความดันไอ (vapor pressure)	$5.7 \times 10^{-8} \text{ mmHg}$ ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส $3.0 \times 10^{-7} \text{ mmHg}$ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส $1.4 \times 10^{-6} \text{ mmHg}$ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส $2.3 \times 10^{-5} \text{ mmHg}$ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ $0.038 \text{ MPa}$ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส <sup>(c)</sup>
ปริมาตรและขนาด <sup>(d)</sup> (Molar volume)	$169.8 \text{ cm}^3/\text{mol}$ Width 9.6 อังสตรอม (Å) Depth 8.4 อังสตรอม (Å) Thickness $\sim 3$ อังสตรอม (Å)
สภาพการละลาย (solubility)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ละลายน้ำ 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส, 32 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส</li> <li>320 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน N-pentane 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน Petroleum ether 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน Methanol 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน Ethyl acetate 28,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน Chloroform 52,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> <li>- ละลายใน Dimethyl sulfoxide 183,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส</li> </ul>
LD <sub>50</sub>	3,080 mg/kg

ที่มา : ทศพล, 2545

Source<sup>(a)</sup> : Kearney et al. (1998), Source<sup>(b)</sup> : Llado et al. (2015)

Source<sup>(c)</sup> : Lesan and Bhandari (2000), Source<sup>(d)</sup> : Pelekani et al. (2001)

หมายเหตุ : ค่า LD<sub>50</sub> คือ ปริมาณของสารพิษคิดเป็นมิลลิกรัม (mg) ต่อกิโลกรัมของน้ำหนักสัตว์ทดลองที่สามารถทำให้สัตว์ทดลองได้ร้อยละ 50 ของสัตว์ทดลองทั้งหมด

#### 2.4.1 การใช้สารอาหารพืชในการเกษตร

สารอาหารพืชสามารถใช้ควบคุมวัชพืชทั้งแบบก่อนปลูกพืชหลัก (pre-plant) ก่อนวัชพืชงอก (pre emergence) หรือแบบหลังวัชพืชงอก (post emergence) (พิมพ์ภัก, 2551) และจัดเป็นสารเลือกทำลายชนิดใช้ทางดิน ซึ่งจะควบคุมวัชพืชใบกว้างและวัชพืชวงศ์หญ้า เช่น หญ้านกสีชมพู และหญ้าหางจิ้งจอก เป็นต้น และนิยมใช้กับพืชปลูกประเภท อ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่าง สับปะรด หน่อไม้ฝรั่ง พืชวงศ์ส้ม กล้วย กาแฟ น้ำมันปาล์ม และกุหลาบ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารไม่เลือกทำลายในพื้นที่ว่างเปล่าร่วมด้วย (ทศพล, 2545) จากที่กล่าวมาข้างต้นพืชไร่ที่นิยมใช้สารอาหารพืชจะสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ แต่สารอาหารพืชอาจจะไปทำลายสำหรับพืชปลูกบางชนิดได้ เช่น ผัก มันฝรั่งและพืชตระกูลถั่ว โดยจะเข้าไปยับยั้งการสังเคราะห์แสงของพืช (Farruggia et al., 2016) ซึ่งอัตราการใช้สารอาหารพืชโดยเฉลี่ยประมาณ 2.24-4.48 กิโลกรัมสารออกฤทธิ์ต่อเฮกตาร์ (hectare; ha) หรือประมาณ 160-716 กรัมสารออกฤทธิ์ต่อไร่ (กนกวรรณ, 2553; พิมพ์ภัก, 2551)

#### 2.4.2 พฤติกรรมในพืช

การใช้สารผ่านทางดินทำให้สารอาหารพืชสามารถเข้าสู่พืชโดยผ่านทางราก และสามารถผ่านเข้าสู่ทางใบได้เล็กน้อย จากนั้นจะเคลื่อนย้ายไปสู่ยอดและสะสมในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญของพืช ซึ่งกลไกการทำลายพืชของสารอาหารพืชจะไปยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชทำให้พืชมีใบซีดเหลือง เหง้าไหม้ และตายในที่สุด (ทศพล, 2545)

#### 2.4.3 สารอาหารพืชกับพฤติกรรมในดิน

จากที่กล่าวมาในข้างต้นสารอาหารพืชสามารถเคลื่อนที่ในดินได้ และสามารถเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดินค่อนข้างสูง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอาหารพืชในแหล่งน้ำและแหล่งน้ำใต้ดิน คือ การชะละลายและการไหลบ่าของน้ำ ซึ่งปริมาณของสารอาหารพืชที่สูญเสียจากน้ำไหลบ่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.2 – 18 เปอร์เซ็นต์ของสารทั้งหมด แต่ในสภาพที่มีน้ำไหลไม่มาก เช่น ฝนตกเป็นครั้งคราวจะมีค่าน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ (Wang et al., 2005) สำหรับค่าครึ่งชีวิตของสารอาหารพืชโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 60 วัน และมีความคงทนในดินได้เกิน 1 ปีหรือมากกว่าในสภาพที่แห้งและเย็นและดินที่มีสภาพเป็นกรด ถ้าหากมีการใช้สารอาหารพืชในพื้นที่เดิมเป็นระยะเวลานาน เช่น ประมาณ 8 - 9 ปีก็อาจพบการตกค้างของสารอาหารพืชได้ถึงสามปี การเคลื่อนที่ของสารอาหารพืชในดินจะเกี่ยวข้องกับการดูดซับของคอลลอยด์ในดินด้วย ถ้าปริมาณสารอินทรีย์วัตถุและ

อนุภาคดินเหนียวมีค่าสูงจะส่งผลให้สามารถดูดซับสารอาหารซึ้นไว้ได้มาก แต่การดูดซับสารอาหารซึ้นไม่ใช่การดูดซับถาวร เนื่องจากดินสามารถปล่อยสารที่ดูดซับออกมาได้ ซึ่งจะขึ้นกับปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณการใช้สารอาหารซึ้น และคุณลักษณะของดิน อาทิเช่น ถ้าลักษณะของดินเป็นชนิด clay loam จะเกิดการยึดเกาะสารอาหารซึ้นได้แน่นกว่าชนิด fine sandy loam รวมไปถึง อุณหภูมิ ความซึ้น ค่า pH ของดิน ค่าการละลายน้ำ (ค่าการละลายน้ำสูงสุดคือ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของสาร (sorption coefficient,  $K_{oc}$ ) ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง (100 มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นต้น (Farruggia et al., 2016 ; Ross and Lembi, 2009) ดังนั้นกระบวนการดูดซับและคายซึ้นของดินจึงมีผลต่อสารอาหารซึ้นในสิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำใต้ดิน (Jamil et al., 2010 ; Wabel et al., 2010) ผลจากการศึกษาในปี ค.ศ. 1995-1998 ได้มีการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน จำนวน 131 ตัวอย่าง ที่รัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีอย่างน้อย 44 บ่อที่มีการปนเปื้อนของสารอาหารซึ้น จากข้อมูลสรุปได้ว่าอาจเป็นเพราะความคงทนในดินของสารอาหารซึ้นที่มากกว่าสารกำจัดวัชพืชชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน เช่น ไซมาซึ้น โพรพรซึ้น และไซยานาซึ้น ทำให้เกิดการตรวจพบได้มากกว่า (Price et al., 2015) นอกจากนี้งานวิจัยของ อรอนงค์และคณะ (2554) ยังพบว่า มีการตกค้างของสารอาหารซึ้นในดินของพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ ในปริมาณ 0.13-0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และบริเวณน้ำท่า 4.7 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าสารอาหารซึ้นสามารถเคลื่อนย้ายจากบริเวณดินสู่แหล่งน้ำใต้ดินจากการดูดซับกับตะกอนของดิน

#### 2.4.4 การสลายตัวของสารอาหารซึ้น

สารอาหารซึ้นสามารถสลายตัวได้จากกระบวนการทางกายภาพได้ เช่น การสลายตัวด้วยแสงภายใต้แสงธรรมชาติ ที่ค่าความคงทนในดินปานกลาง ( $t_{1/2} = 45$  วัน) ซึ่งจะทำให้โครงร่างของสารเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบของ 2-chloro-4-isopropylamino-6-amino-s-triazine (DEA), chlordiamino-s-triazine (DACT) และ 2-chloro-6-ethylamino-4-amino-s-triazine (DIA) (Farruggia et al., 2016) รวมทั้งสามารถเกิดการระเหยได้ แต่เกิดในปริมาณน้อยมากเมื่ออยู่ในสภาพปกติทั่วไป ซึ่งการเพิ่มอินทรีย์วัตถุจะช่วยให้การย่อยสลายของสารอาหารซึ้นได้ (สุชาติ, 2548) นอกจากนี้สารอาหารซึ้นยังสามารถย่อยสลายทางเคมีและชีวภาพได้อีกด้วย โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิด *Rhodococcus corallinus* ที่ทำการเปลี่ยนรูปของสารประกอบภายในของสารกลุ่ม เอสไตรอะซีน (S-triazine) แต่จุลินทรีย์กลุ่มพวกนี้ไม่สามารถเปลี่ยนรูปของสารอาหารซึ้นได้ (พิมพ์ภัค, 2551)

#### 2.4.5 ความเป็นพิษของสารอาหารซึ้น

จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าสารอาหารซึ้นส่งผลกระทบต่อพืช สิ่งมีชีวิตในดิน (กลุ่มฟังไจ และแบคทีเรียบางชนิดในดิน) และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (ดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน) ดังนั้นทาง

Environmental Protection Agency (EPA) จึงได้ระงับใช้สารอาหารซินสำหรับพื้นที่ทางการเกษตร และจัดสารอาหารซินให้อยู่ในระดับความเป็นพิษประเภท C คืออาจเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งแก่มนุษย์ได้ (Ghosh et al., 2012) ซึ่งรายละเอียดความเป็นพิษของสารอาหารซิน อธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 2.4.5.1 ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ และสัตว์สะเทินบกสะเทินน้ำ

เนื่องจากการไหลบ่าและการชะละลายทำให้สารอาหารซินสามารถแพร่สู่แหล่งน้ำได้ง่าย ดังนั้นอาจทำให้สารอาหารซินส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำได้ เช่น แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ หอยกาบ และปลา โดยจะส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ และระบบการเจริญเติบโต อย่างในกรณีศึกษาการวางไข่ของปลาเทราต์ (rainbow trout) เมื่อได้รับสารอาหารซินในปริมาณ 5 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าการวางไข่ลดจำนวนลง ทำให้ปริมาณไข่ปลาที่ได้น้อยลงไปด้วย (Farruggia et al., 2016) นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของกบอีกด้วย โดยจากการศึกษา กบชนิด American Leopard Frogs พบว่าเมื่อให้สารอาหารซินในปริมาณ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้กบมีการเปลี่ยนแปลงทางอวัยวะสืบพันธุ์เป็นแบบสองเพศในตัวเดียว (Hayes et al., 2003)

#### 2.4.5.2 ผลกระทบต่อมนุษย์

สำหรับคนเมื่อได้รับสารอาหารซินในปริมาณมากจะเกิดอาการปวดท้องน้อย คลื่นเหียน อาเจียน และอาจเกิดมะเร็งได้เมื่อได้รับสารเป็นระยะเวลานาน สำหรับการย่อยสลายทั้งคนและสัตว์ ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของสารจะถูกขับออกมาภายใน 72 ชั่วโมง และ 80 เปอร์เซ็นต์ จะถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารและเข้าสู่เส้นเลือด หลังจากนั้น 65-75 เปอร์เซ็นต์ จะถูกกำจัดในรูปของ Urine หรือทางปัสสาวะ และอีก 15 เปอร์เซ็นต์ จะถูกสะสมในเนื้อเยื่อของตับ ไต และปอด (ทศพล, 2545)

ดังนั้นทาง Environmental Protection Agency (EPA) จึงได้กำหนดค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนสารอาหารซินในแหล่งน้ำให้ไม่เกิน 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (Wu et al., 2009) และทางสหภาพยุโรป (European Community; EU directive) ได้กำหนดค่าสูงสุดของสารกำจัดวัชพืชชนิดที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร (Lupul et al., 2015; Chingombe et al., 2006)

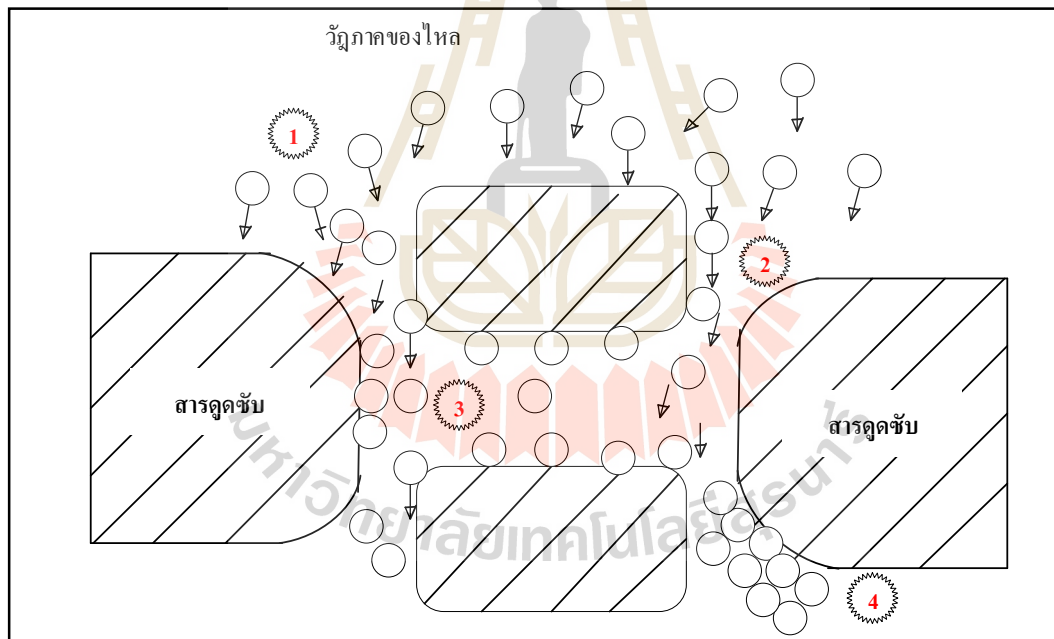
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบจากการใช้สารอาหารซินในพื้นที่การเกษตรนั้นทำให้เกิดการปนเปื้อนในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติได้ จึงมีการคิดค้นวิธีการกำจัดสารอาหารซินไม่ให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม อาทิเช่น การกำจัดอาหารซินโดยใช้แบคทีเรียเซลล์อิสระและเซลล์ตรึงด้วยสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สุนนา, 2551) การใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ ADB ในการย่อย

สลายสารอาหารพืช (พิมพ์ภาค, 2551) การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเคลือบเชิงกลเพื่อใช้ย่อยสลายสารอาหารพืชที่ปนเปื้อนในน้ำภายใต้สภาวะแสงขาว (photocatalysis) (Khamdahsag, P. 2011) เป็นต้น แต่วิธีการส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือ การดูดซับ เนื่องจาก ค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม โดยรอบ โดยจะทำการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ กัน อาทิเช่น งานวิจัยของ Wang (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ในธรรมชาติต่อการดูดซับสารละลายอาหารพืชด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon; GAC) จากการทดลองในสภาวะแบบแบตช์ (batch) จากการทดลองพบว่า ปริมาณของ GAC ที่ 10 ไมโครกรัมต่อกรัม มีประสิทธิภาพดูดซับสูงสุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chingombe *et al* (2006) ที่ได้ศึกษาการดูดซับสารอาหารพืชด้วยถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์สังเคราะห์โดยทำการเพิ่มอนุภาคและสารเคมีเข้าไป ได้ตัวอย่างดังนี้ F400 , F400 AN และ F400 NH<sub>2</sub> ซึ่งในขั้นตอนการดูดซับแบบแบตช์ (batch adsorption) พบว่าสอดคล้องกับสมการของฟรุนดิช และ F400 AN สามารถดูดซับสารละลายอาหารพืชได้ดีที่สุด สำหรับงานวิจัยของ Wabel *et al* (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมของสารอาหารพืชและมาลาไทออนในดิน ด้วยกระบวนการดูดซับ (Sorption) และการย่อยสลาย (Degradation) ในการทดลองแบบ batch experiment ได้ทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอาหารพืชและมาลาไทออนที่ 600 ไมโครกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 50 ไมโครโมลต่อลิตรของสารละลาย CaCl<sub>2</sub> และวิเคราะห์ด้วยวิธี Extraction technique (MAE) โดยใช้สารละลาย acetone : hexane ที่อัตรา 3:2 (v/v) เป็นสารชะละลาย ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับสมการแบบ Exponential isotherm มากกว่าแบบไอโซเทอร์มของ แลงเมียร์ และฟรุนดิช เนื่องจากค่า R<sup>2</sup> เข้าใกล้ 1 และค่า SSE ไม่สูง และสรุปผลได้ว่าสารละลายอาหารพืชมีการตกค้างในดินมากกว่าสารมาลาไทออนต่อวัน (d<sup>-1</sup>) เท่ากับ 0.1053 และมีค่าครึ่งชีวิต 68.1 วัน ส่วนงานวิจัยของ Jamil *et al* (2011) ได้ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของสารละลายอาหารพืชโดยการเตรียมซีโอไลต์จากดินเหนียวอียิปต์ (Egyptian kaolin) โดยทำการดัดแปรซีโอไลต์เป็น 2 ชนิดคือ zeolite x และ zeolite A ในการดูดซับสารอาหารพืช พบว่า zeolite x มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาหารพืชได้ดีกว่า zeolite A และสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบ Dublin-Radushkevich model เป็นต้น

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับสารเป็นหนึ่งในกระบวนการแยกสาร (separation process) โดยจะแยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ไอ, ของเหลว) การดูดซับเกิดจากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของวัสดุดูดซับ (adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับ

(adsorbate) แบ่งออกเป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่มีลักษณะเป็นแรงดึงดูดอ่อน ๆ และการดูดซับทางเคมี ที่เกิดจากการสร้างพันธะทางเคมีที่แข็งแรงกว่า ซึ่งกลไกของการดูดซับเกิดจากการแพร่ของสารถูกดูดซับสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวภายในของวัสดุดูดซับ ทำให้ความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล อธิบายได้ดังรูปที่ 2.4 โดยที่หมายเลข 1 แสดงถึงการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของอนุภาค หมายเลข 2 คือการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ ประกอบด้วย การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (pore diffusion) หมายเลข 3 คือการแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (surface diffusion) และ หมายเลข 4 คือการดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (adsorption sites) เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) ดังนั้นคุณลักษณะของวัสดุดูดซับจำเป็นต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง หรือประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เพื่อให้มีพื้นที่ภายในสูงต่อการดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อหน่วยปริมาตรให้ได้ในปริมาณมาก ดังนั้นโครงสร้างและสัดส่วนปริมาตรของรูพรุนต่าง ๆ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ



รูปที่ 2.4 กระบวนการดูดซับสารที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ  
(ทีมา ; ชัยยศ, 2554)

### 2.5.1 ลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (interaction force)



จากที่กล่าวมาข้างต้น การดูดซับเกิดจากแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับ สามารถจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

### 2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

การดูดซับแบบกายภาพ คือ การดูดซับสารไว้บนผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดหนึ่งร่วมกัน มีแรงดึงดูดค่อนข้างอ่อนและเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) ซึ่งแรงของการดูดซับแบบกายภาพแบ่งได้เป็น แรงดึงดูดระหว่างขั้ว แรงดึงดูดระหว่างประจุ และ แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับ

นอกจากนี้ถ้าสารดูดซับแสดงความมีขั้วหรือมีประจุบนพื้นผิวของแข็งก็ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) แผลออกจากพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้ ซึ่งแรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำส่งผลให้เกิดสภาพมีขั้วในโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และทำให้แรงของการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น โดยลักษณะของวัสดุดูดซับสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทดังนี้

- (1) กลุ่มที่ไม่มีไอออน ไม่มีประจุหรือไม่มีขั้ว เช่น แกรไฟต์
- (2) สารที่มีประจุบวก เช่น สารที่มีหมู่ OH เป็นองค์ประกอบ
- (3) สารที่มีประจุลบ เช่น สารที่มีหมู่ =O หรือ =CO แบ่งเป็น 4 ประเภทดังนี้
  - ลักษณะพันธะแบบซิกมา ( $\sigma$  bonds) ได้แก่ กลุ่มของก๊าซเฉื่อย

ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว

- พันธะแบบพาย ( $\pi$  bonds) ได้แก่ สารอะโรมาติก สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว สารอีเทอร์ สารเอมีน

- แสดงประจุบวกบริเวณด้านนอกของโมเลกุล
- มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและแสดงประจุบวก ได้แก่

โมเลกุลที่มีหมู่ -OH หรือ =NH เป็นต้น

ข้อสังเกตสำหรับลักษณะของการดูดซับแบบกายภาพ คือ เกิดการดูดซับขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของวัสดุดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกรูปแบบนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption) และที่สำคัญการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่เมื่อสารดูดซับที่ใช้เกิดการอิ่มตัว

### 2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

การดูดซับทางเคมี คือ การเกิดพันธะทางเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน นำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ดังนั้นแรงดึงดูดจึงมีค่ามากกว่าการดูดซับทางกายภาพ (specificity) การดูดซับทางเคมีมักจะเกิดได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ๆ และจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น กล่าวคือ จะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ความร้อนในการดูดซับแบบเคมีจะสูงกว่าทางกายภาพ ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี (ชัยยศ, 2554)

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 กิโลจูลต่อโมล และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับ)	สูง (มากกว่า 80 กิโลจูลต่อโมล เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความจำเพาะเจาะจงสูง (เลือกดูดซับสารบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น และไม่มี การแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แม้อาจเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานของการกระตุ้นของการดูดซับสูง

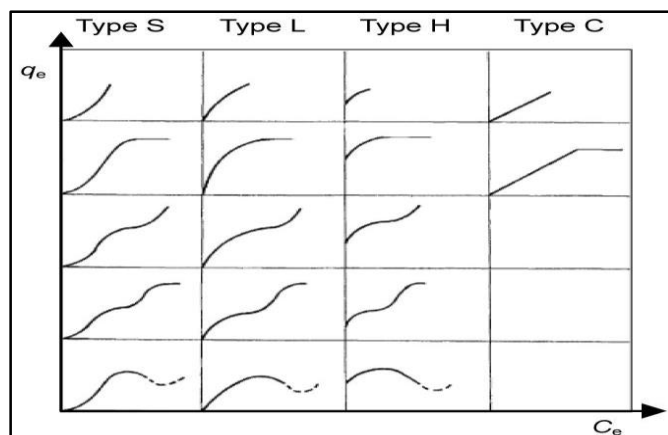
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ
--------------------------	---	--

### 2.5.2 สมดุลการดูดซับสาร (Adsorption Equilibria)

สมดุลการดูดซับสารบ่งบอกถึงลักษณะไอโซเทอมของความสามารถในการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับในสารละลายที่สัมผัส และมีความสมดุลกับสารดูดซับ หรือกล่าวได้ว่าสมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในน้ำเท่ากับค่าความเข้มข้นในวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ และลักษณะไอโซเทอมเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

### 2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับในสภาวะสมดุล จากการศึกษาของ Giles และคณะ พบว่าสามารถจำแนกลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของเหลวได้เป็น 4 แบบ (S, L, H และ C) แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งพิจารณาจากลักษณะของกราฟที่ออกมาจากจุดกำเนิด สำหรับแบบ S ลักษณะของกราฟจะโค้งออกจากแกน X ส่วนแบบ L จะโค้งเข้าหาแกน X ซึ่งทั้งสองแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ 3 และ 1 ในการจำแนกลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซตามลำดับ สำหรับไอโซเทอมแบบ H จะแสดงลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับที่มีค่าสูง ทำให้ลักษณะกราฟที่ได้มีความชันสูงที่ความเข้มข้นต่ำ ส่วนไอโซเทอมแบบ C จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย



## รูปที่ 2.5 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลาย (Xu et al., 2013)

สมการการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีหลักคือ วิธีทางจลนพลศาสตร์ (kinetic approach), วิธีทางอุณหภูมิตศาสตร์ (thermodynamic approach) และ ทฤษฎีศักย์พลังงาน (potential theory) ในความเป็นจริงวัสดุที่นำมาดูดซับจะมีโครงสร้างของรูพรุนและพื้นผิวที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นจึงมีการปรับเปลี่ยนสมการเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายหรือทำนายสมดุลการดูดซับภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 2.5.3.1 สมการไอโซเทอมแบบวิธีจลนพลศาสตร์ มีดังนี้

(1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir equation) ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับโมเลกุลแบบชั้นเดียว และใช้ในการอธิบายการดูดซับของระบบดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี เนื่องจากมีรูปแบบสมการที่ง่าย โดยมีสมมติฐานการดูดซับดังนี้

- โมเลกุลจะถูกจับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิววัสดุดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของวัสดุดูดซับเหมาะกับโมเลกุลที่เป็น monolayer
- พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของวัสดุดูดซับ

(homogeneous surface) จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_e$  และ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า  $q_{max}$  ได้ที่จุดตัดแกน  $y$  และค่า  $K$  ได้จากค่าความชันของกราฟ

(2) ไอโซเทอมแบบ BET (Brunauer, Emmett และ Teller) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งอยู่ใต้สมมติฐานเช่นเดียวกับสมการของแลงเมียร์ คือ พลังงานของการดูดซับจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้น (homogenous surface) และไม่มีแรงกระทำในแต่ละชั้นระหว่างสารถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับ นอกจากนี้ยังใช้อธิบายในการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับด้วย

### 2.5.3.2 สมการไอโซเทอมแบบวิธีอุณหพลศาสตร์ มีดังนี้

(1) ไอโซเทอมแบบกิบส์ (Gibbs isotherm) ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความดันพื้นที่ผิวของชั้นดูดซับกับปริมาณของการดูดซับ จากไอโซเทอมของกิบส์สามารถนำมาประยุกต์เป็นไอโซเทอมแบบอื่น ๆ ได้ ขึ้นกับรูปแบบสมการสถานะของพื้นผิวของการดูดซับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันเชิงพื้นที่ผิว และความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนพื้นผิว

(2) ไอโซเทอมเส้นตรง (linear isotherm) เป็นการดูดซับบริเวณพื้นผิวในแบบอุดมคติ คือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีขนาด และความเข้มข้นมีค่าน้อยทำให้ไม่มีแรงกระทำต่อกัน ซึ่งความดันของชั้นดูดซับจะผันตรงกับจำนวนโมล หรือโมเลกุลของสารถูกดูดซับบนพื้นที่รวมของการดูดซับ

(3) ไอโซเทอมแบบโวลเมอร์ (Volmer isotherm) จะมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมแบบแลงเมียร์แต่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีขนาด และแตกต่างที่ตัวคงที่ของการดูดซับ โดยที่ค่าคงที่  $b$  จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น และที่ความดันเดียวกันปริมาณของการดูดซับจากสมการโวลเมอร์มีค่าน้อยกว่าสมการแบบแลงเมียร์

**2.5.3.3 สมการไอโซเทอมแบบทฤษฎีศักย์พลังงาน** เป็นการนำแนวคิดเกี่ยวกับสนามแรงดึงดูดมาประยุกต์ใช้กับระบบดูดซับแบบแก๊ส โดยที่ชั้นคอนทัวร์ของพลังงานการดูดซับ (adsorption potential contour) นำมาแทนที่กับชั้นของการดูดซับ และปริมาตรสะสมของชั้นดูดซับจะขึ้นกับศักย์ หรือพลังงานการดูดซับ เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้เป็น กราฟคุณลักษณะ (characteristics curve) ซึ่งจะแปรผันตรงกับระบบดูดซับของแก๊สและสารดูดซับคู่หนึ่ง ๆ ไอโซเทอมแบบทฤษฎีพลังงาน ได้แก่ ไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราดเชควิช (Dubinin-Radushkevich ; DR) สามารถบ่งบอกถึงประเภทลักษณะการดูดซับได้ว่าเป็นแบบกายภาพหรือแบบเคมี พิจารณาได้จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  และ  $E^2$  จะได้สมการเส้นตรง ซึ่งค่า  $E$  หาได้จากสมการที่ 2.1

$$E^2 = RT \ln(1 + 1/C_e) \quad (2.1)$$

จากนั้นสามารถหาค่าคงที่  $\ln q_s$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และ ค่า  $K_{ad}$  ได้จากค่าความชัน และนำมาหาค่า  $E$  (พลังงาน ; KJ/mol) ได้ดังสมการที่ 2.2 (Piccin et al., 2011)

$$E = \frac{1}{\sqrt{2K_{ad}}} \quad (2.2)$$

ถ้าค่า  $E$  มีค่าน้อยกว่า 8 KJ/mol หมายความว่า การดูดซับนั้นเป็นแบบกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าค่า  $E$  อยู่ระหว่าง 8-16 KJ/mol แสดงว่าการดูดซับนั้นเป็นแบบเคมี (chemical adsorption) (Blanes et al., 2011)

#### 2.5.3.4 สมการไอโซเทอมแบบสทัมพ์ฟ์ มีดังนี้

(1) สมการฟรุนดิช (Freundlich isotherm) ใช้อธิบายข้อมูลของการดูดซับในช่วงความเข้มข้นปานกลาง และไม่สามารถใช้อธิบายไอโซเทอมแบบเส้นตรงที่มีความดันต่ำได้ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิชจะมีพลังงานการดูดซับบนพื้นผิวมีค่าไม่คงที่ (heterogeneous surface) ซึ่ง

สามารถแบ่งพื้นที่ผิวของการดูดซับได้ตามระดับของพลังงาน โดยแต่ละกลุ่มจะเกิดการดูดซับที่เป็นอิสระต่อกัน จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง สามารถหาค่า  $K_f$  ได้จากจุดตัดแกน  $y$  และค่า  $1/n$  ได้จากความชันของกราฟ เมื่อพิจารณาค่า  $1/n$  จะได้ผลสรุปว่า

ถ้าค่า  $1/n$  เท่ากับ 1 แสดงว่าไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้าค่า  $1/n$  น้อยกว่า 1 แสดงว่าความสามารถการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีปริมาณที่จำกัด และ

ถ้าค่า  $1/n$  มากกว่า 1 แสดงว่าบริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีปริมาณมากพอสำหรับการดูดซับ (กนกวรรณ พาลูกา, 2553)

(2) สมการชิปส์ (Sips isotherm) หรือสมการแบบแลงเมียร์-ฟรุนดิช เป็นการนำไอโซเทอมแบบฟรุนดิชมาดัดแปลง เนื่องจากสมการแบบฟรุนดิชไม่สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับที่ความดันหรือความเข้มข้นสูง ๆ ได้ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แต่จะมีการเพิ่มค่า  $n$  เข้าไปในสมการ จึงเป็นสมการแบบ 3 ตัวแปร แต่ข้อจำกัดของสมการแบบชิปส์คือไม่สามารถอธิบายไอโซเทอมเส้นตรงที่ความดันต่ำ ๆ ได้ จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_e$  และ  $C_e$  จะได้สมการแบบ non linear และค่าคงที่  $Q_s$ ,  $n_s$  และ  $K_s$  ซึ่งค่าคงที่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะของไอโซเทอมได้กล่าวคือ ถ้าค่า  $n_s$  มีค่ามากกว่าแสดงว่ามีความสอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ และถ้าค่า  $Q_s$  หรือ  $K_s$  มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 กราฟที่ได้จะสอดคล้องกับสมการฟรุนดิช (Belhachemi and Addoun, 2011)

(3) สมการทอธ (Toth isotherm) เป็นสมการที่สามารถใช้อธิบายถึงไอโซเทอมเส้นตรงที่ความดันต่ำ และแสดงค่าคงที่ที่ความดันสูงได้ นอกจากนี้สมการของทอธยังประกอบไปด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร ดังนั้นจึงสามารถอธิบายสมดุลของระบบในกรณีที่มีปริมาณของสารถูกดูดซับในจำนวนมากได้

(4) สมการแบบแทมกิน (Tampkin isotherm) วัสดุดูดซับจะมีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช ซึ่งค่าเฉพาะจะขึ้นกับชนิดของวัสดุดูดซับ (ชัยยศ, 2554; เตชา, 2552)

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะของไอโซเทอมชนิดต่าง ๆ สามารถหาได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient,  $R^2$ ) ที่มีค่าสูงที่สุด จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปสมการไอโซเทอมได้ดังตารางที่ 2.3 โดยพิจารณาจากรูปร่างของไอโซเทอมเป็นหลัก ดังนี้

ตารางที่ 2.3 สมการไอโซเทอมแบบต่าง ๆ

Isotherm	Equation	Plot	คำอธิบาย
Linear	$q_e = K'_H C_e$	$q_e$ กับ $C_e$	$q_e$ คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Langmuir	$C_e/q_e = (1/bq_m) + (C_e/q_m)$	$C_e/q_e$ กับ $C_e$	$q_m$ คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
BET	$\frac{C_s}{q(1-C_s)} = \frac{K_{BET}-1}{(q_m)(K_{BET})} C_s + \frac{1}{q_m K_{BET}}$	$\frac{C_s}{q(1-C_s)}$ กับ $\frac{1}{q_m K_{BET}}$	$C_e$ คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
DR	$\ln(q_e) = \ln(q_s) - K_{ad} \epsilon^2$	$\ln(q_e)$ กับ $\epsilon^2$	$b$ คือ ค่าคงที่กับพลังงานในการดูดซับ
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\log q_e$ กับ $\log C_e$	$K_F$ คือ ค่าคงที่ของระบบ
Sips	$q_e = \frac{q_m(K_L C_e)^{1/n}}{1+(K_L C_e)^{1/n}}$	$q/q_m$ กับ $K_L C_e$	$n$ คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
Toth	$q_e = \frac{q_m(K_L C_e)^n}{\{1+(K_L C_e)^n\}^{1/n}}$	$q/q_m$ กับ $K_L C_e$	$q_s$ คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Tempkin	$q_e = (RT/b_T) \ln A_T + (RT/b_T) \ln C_e$	$q_e$ กับ $\ln C_e$	$K_{BET}$ คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของ BET $\square$ คือ ศักย์การดูดซับ $t$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของสมการ (มีค่าน้อยกว่า 1)

ที่มา : ชัยยศ , 2554 ; เตชา, 2552

## 2.5.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption reaction model) ที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 สมการคือ pseudo-first order และ pseudo-second order และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ (adsorption diffusion model) ที่อธิบายถึงสมการการแพร่ภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ รายละเอียดและสมการสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.5.4.1 แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption reaction model)

(1) สมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (pseudo-first order)

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมใช้อธิบายอัตราการดูดซับของเหลว - ของแข็ง โดยที่จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่งอยู่ในสภาวะการดูดซับที่สมดุล ความเข้มข้นของสารละลายจะแปรผันตรงกับเวลาของการดูดซับ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงสมดุลการผันกลับของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับระหว่างพื้นผิวของเหลวและของแข็งด้วย รวมทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับการดูดซับในระบบที่ซับซ้อนได้ สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้จากสมการที่ 2.3

$$\left(\frac{dq_t}{dt}\right) = K_1(q_e - q_t) \quad (2.3)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.3 ที่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้ดังสมการที่ 2.4

$$q_t = q_e (1 - \exp(-k_1 t)) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 เมื่อจัดให้อยู่ในสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ 2.5

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2.5)$$

เมื่อ  $q_t$  คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลา  $t$  (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_e$  คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_1$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (นาที<sup>-1</sup>)

$t$  คือ เวลาใด ๆ (นาที)

จากสมการที่ 2.5 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  และ  $t$  จะได้ค่าคงที่  $q_e$  และ  $K_1$  โดยค่า  $K_1$  จะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มขึ้น

(2) สมการปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (pseudo-second order)

แบบจำลองอันดับสองเทียมใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับภายใต้สมมติฐาน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับบนวัสดุดูดซับจะคงที่ และจำนวนตำแหน่งบน



พื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เกิดพันธะทั้งหมดจะขึ้นกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงได้ดังสมการที่ 2.6

$$(dq_t/dt) = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.6)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.6 ที่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = q_t$  จะได้ดังสมการที่ 2.7

$$q_t = (q_e^2 k_2 t) / (1 + q_e K_2 t) \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 เมื่อจัดให้อยู่ในสมการเส้นตรงจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบดังสมการที่ 2.8 -2.11 (Markandeya *et al.*, 2015)

แบบที่ 1  $t/q_t = (1/k_2 q_e^2) + ((1/ q_e)t) \quad (2.8)$

จากสมการที่ 2.8 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  และ  $t$

แบบที่ 2  $t/q_t = (1/k_2 q_e^2) (1/t) + (1/ q_e) \quad (2.9)$

จากสมการที่ 2.9 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q_t$  และ  $1/t$

แบบที่ 3  $1/t = (k_2 q_e^2)/ q_t - (k_2 q_e^2/ q_e) \quad (2.10)$

จากสมการที่ 2.10 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/(q_t - q_e)$  และ  $t$

แบบที่ 4  $1/(q_t - q_e) = 1/q_t + (k_2 t) \quad (2.11)$

จากสมการที่ 2.8-2.11 เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงจะได้ค่าคงที่  $K_2$  และ  $q_e$  (Shukla and Kisku, 2015) ซึ่งค่า  $K_2$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 2 (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) โดยที่ค่า  $K_2$  จะขึ้นกับปัจจัยการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่า pH ของสารละลาย อุณหภูมิ และอัตราการกวน (พวงรัตน์และคณะ, 2557)

### 2.5.4.2 แบบจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับในวัสดุดูดซับ (intraparticle diffusion model)

กลไกการแพร่ของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรก เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังบริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ (external diffusion) ขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปยังภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ (internal diffusion, intraparticle diffusion) และขั้นตอนที่สาม จะเกิดการดูดซับ (adsorption process) แบบจำลองนี้อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าไปยังรูพรุนและเกิดการดูดซับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$q_t = K_t t^{1/2} + C \quad (2.12)$$

เมื่อ  $K_t$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ในรูพรุน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาทึ)

จากสมการที่ 2.9 เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  และ  $t^{1/2}$  จะได้ค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $K_t$  และจุดตัดแกน  $y$  คือ ค่า  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบ่งบอกถึงผลกระทบจากความหนาของชั้นฟิล์มกล่าวคือ ถ้าค่า  $C$  มีค่ามาก แสดงว่าความหนาของชั้นฟิล์มมีผลต่อการดูดซับมาก

### 2.5.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งอธิบาย ได้ดังนี้

#### 2.5.5.1 วัสดุดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังนี้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการดูดซับสารในปริมาณที่มาก จำเป็นต้องใช้วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากโครงสร้างของรูพรุนจะส่งผลต่อการดูดซับแล้ว เคมีพื้นผิวของสารดูดซับ สมบัติความเป็นขั้วและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ก็ส่งผลเช่นกัน ซึ่งลักษณะของวัสดุดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับอธิบายได้ดังนี้

(1.) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับได้เพิ่มขึ้น เพราะ ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

(2.) ขนาดของวัตถุ ในกรณีที่โมเลกุลเป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

(3.) เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันนอลเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับจะมีคุณสมบัติ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

### 2.5.5.2 สารที่ถูกดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1.) ความสามารถในการละลาย ถ้าสารละลายมีความสามารถในการละลายได้สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องเกิดการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

(2.) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักของโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

(3.) ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

(4.) ค่าของ pH ถ้า  $[H^+]$  ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ  $[H^+]$  เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่เป็นชนิดไม่มีขั้วค่อนข้างจะมีประจุบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วของสารในน้ำมาเกาะติดที่ผิวคาร์บอนได้ดี

(5.) ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (สันทัด, 2552)



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Leonardite) ในการดูดซับอาหารสีน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารสีนด้วยลีโอนาร์ไดต์ รวมถึงการใช้ประโยชน์ของลีโอนาร์ไดต์ในการดูดซับสารละลายอาหารสีนในการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งรายละเอียดการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 3.1 การเตรียมสารละลายอาหารสีนและวัสดุดูดซับ

##### 3.1.1 การเตรียมสารละลายอาหารสีน

การเตรียมสารละลายมาตรฐานอาหารสีนจะเตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยทำการชั่งผงอาหารสีน ปริมาณ 0.1 กรัม และนำมาละลายในสารอะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร และเก็บ stock solution ของสารละลายอาหารสีนไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

##### 3.1.2 การเตรียมวัสดุดูดซับ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วย

###### 1) ลีโอนาร์ไดต์ (LND)

ลีโอนาร์ไดต์ที่จะนำมาใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าเหมืองถ่านหินแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง โดยนำตัวอย่างลีโอนาร์ไดต์ไปอบให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทำการบดลีโอนาร์ไดต์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดไฟฟ้า แล้วทำการใส่ตัวอย่างลีโอนาร์ไดต์ ประมาณ 50 กรัม ในเครื่องร่อนคัดขนาด (Sieve size) ปรับความเร็วเครื่องเขย่าเท่ากับ 60 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที ซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ตะแกรงเบอร์ 40, 60, 80, 100 และถาดรอง (pan) จากนั้นทำการคัดเลือกและเก็บตัวอย่างลีโอนาร์ไดต์ที่ได้จากการคัดขนาดไว้ที่ที่ปราศจากความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับการศึกษาคคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะเฉพาะของลีโอนาร์ไดต์ สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3.1

###### 2) ดินจากพื้นที่การเกษตร

สุ่มเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ทำการเกษตร และนำดินทั้งหมดมาผสมกัน จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นและนำดินที่ปราศจากความชื้นมาคัดขนาด ซึ่งขนาดที่เลือกให้อยู่ในช่วง 10 เมช (mesh) (ขนาด 2 มิลลิเมตร) จากนั้นทำเก็บตัวอย่างดินไว้ที่ที่ปราศจากความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับการวิเคราะห์

คุณลักษณะทางกายภาพของดินประกอบไปด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ร้อยละความชื้น (% moisture) ชนิดของดิน (soil texture) อินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter; OM) และการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity ; CEC) ซึ่งวิธีวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

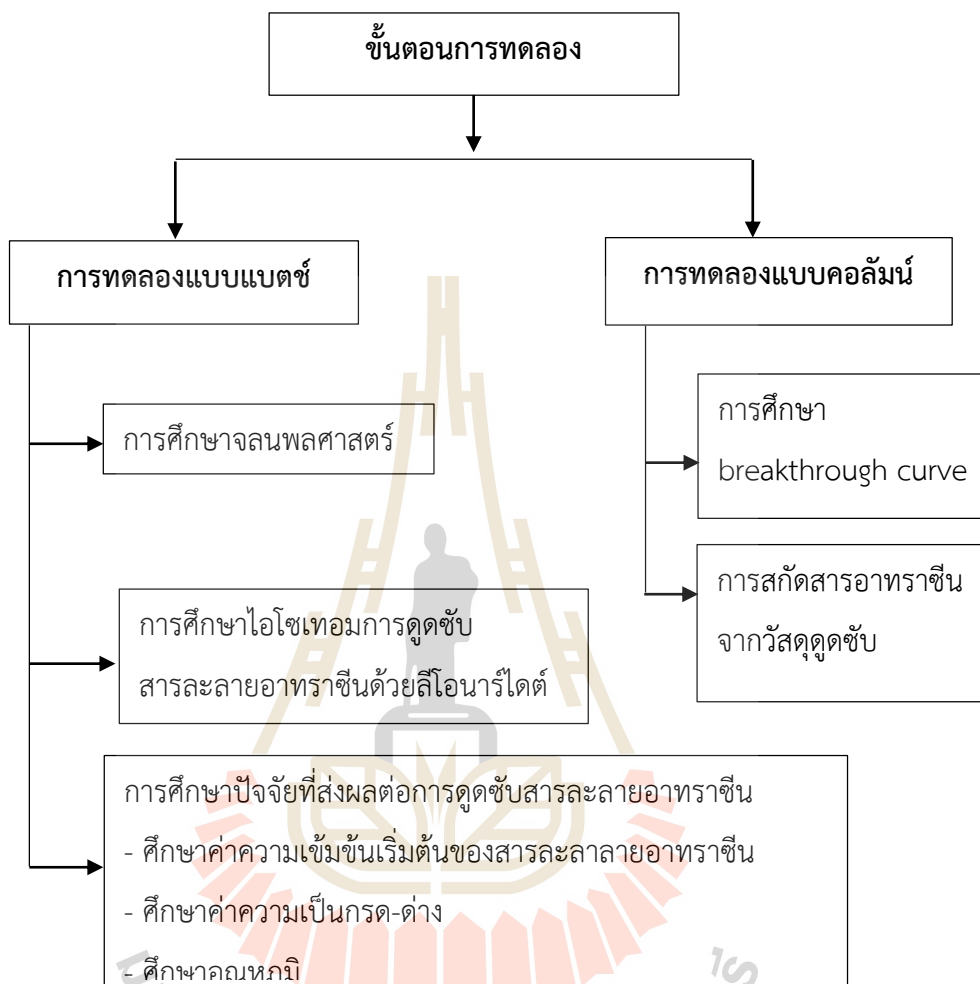
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคูดซึบ

คุณลักษณะ	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์/มาตรฐาน
1.ความชื้น (%)	เครื่องมือที่ใช้คือ Universal Oven (ภายใต้อุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส)	อ้างอิงมาตรฐานการวิเคราะห์ของ ASTM D 2216
2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คือ pH meter	อ้างอิงมาตรฐานการวิเคราะห์ของ ASTM 4972
3 ซี้เถ้า (Ash, %)	เครื่องมือวิเคราะห์ TGA /DSC 1 (ภายใต้ชั้นบรรยากาศของ N <sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 50-900 องศาเซลเซียส)	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ Thermogravimetric Analysis (TGA)
4.ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวในการคูดซึบ	เครื่องมือวิเคราะห์ Quantachrome autosorb automated (ภายใต้ชั้นบรรยากาศของ N <sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส)	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ Brunauer, Emmett and Teller (BET)
5. C, H, O, N (%)	เครื่องมือวิเคราะห์ 628S / CHN628 LECO	วิเคราะห์ปริมาณ Carbon, Hydrogen, Oxygen , Nitrogen , Sulfur
6.ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง	เครื่องมือวิเคราะห์ ED-XRF (XGT-5200 ,Horiba) ที่ x-ray tube volume เท่ากับ 50 KV	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)
7.โครงสร้างของผลึก และองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง	เครื่องมือวิเคราะห์ XRD D2 Phaser, Bruker ที่ $2\theta$ (15 <sup>o</sup> -80 <sup>o</sup> ) และ Cu Tube เท่ากับ 1.54184 อังสตรอม [A <sup>o</sup> ]	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ X-ray powder diffraction (XRD)

8.ภาพถ่ายอนุภาคของ Leonardite	เครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (JEOL/JSM-6010)	วิเคราะห์แบบ Scanning Electron Microscope (SEM)
9.CEC	ส่งตัวอย่างวิเคราะห์	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ Ammonium saturation method
10. อินทรีย์วัตถุในดิน (OM)	ส่งตัวอย่างวิเคราะห์	อ้างอิงวิธีวิเคราะห์ของ Walkey and Black ตามมาตรฐาน ASTM D 2974-87



สำหรับการศึกษาสภาวะแวดล้อม ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารขึ้นจะได้รับการทดลองแบบ batch studies จากนั้นจะนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ (column studies) ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 3.1



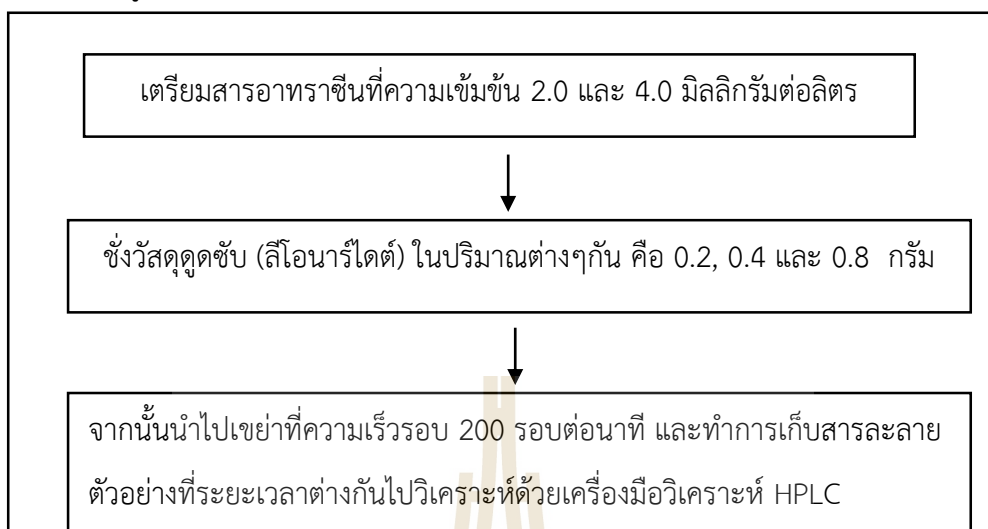
รูปที่ 3.1 รูปแบบและขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอน batch studies และ column studies

### 3.2 การทดลองแบบแบตช์ (Batch studies)

#### 3.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารขึ้น

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสารอาหารขึ้นมีวัตถุประสงค์ เพื่ออธิบายถึงแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการดูดซับระหว่างวัสดุดูดซับและสารอาหารขึ้น การทดลองนี้จะทำการทดลองที่ระยะเวลาตั้งแต่ 2 , 4 , 8 , 12 , 22 , 28 , 34 , 46 , 58 และ 73 ชั่วโมง โดยนำวัสดุดูดซับบรรจุลงในขวดชนิด EPA ขนาด 40 มิลลิลิตร ต่อปริมาตรสารอาหารขึ้น 25 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่อง reciprocating shaker ที่ 200 รอบต่อนาที ซึ่งการทดลองนี้จะทดลองที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการเก็บ

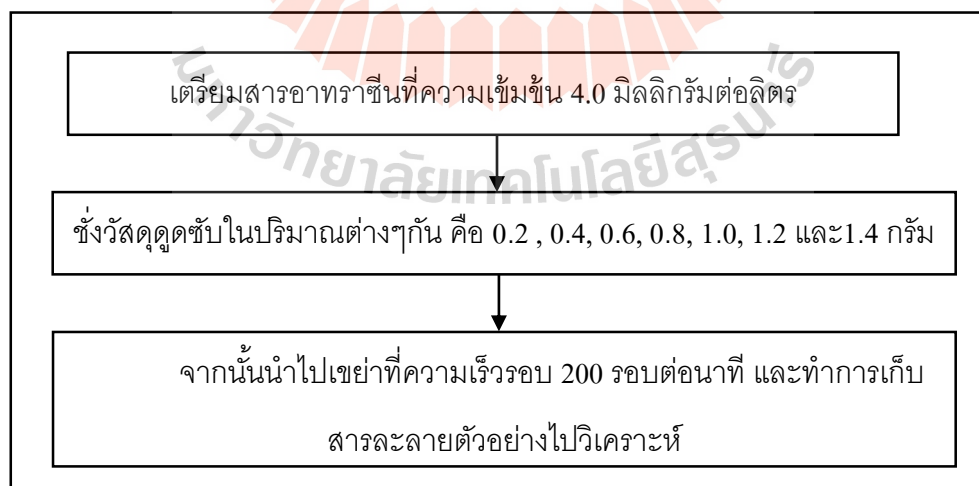
ตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC และทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ ซึ่งรายละเอียดการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารขึ้น

### 3.2.2 การศึกษาค่าไอโซเทอมในการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะและประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไต์ ซึ่งจะทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารขึ้นด้วยเครื่อง HPLC โดยทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ รายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไต์



### 3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน (effects of adsorption)

การทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหาราซีน ได้แก่ ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง และ ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหาราซีน ซึ่งทุก ๆ การทดลองจะทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ และเก็บสารละลายตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารละลายอาหาราซีนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1) การศึกษาค่าความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน

การศึกษาค่าความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีนจะศึกษาที่ความเข้มข้น 8.0, 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณวัสดุดูดซับที่ 0.4 กรัม จากนั้นทำการเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซีนต่อไป

#### 2) การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน

การทดลองนี้จะกำหนดค่าพีเอชในการทดลองเป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่อุณหภูมิห้อง โดยจะเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีนเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณสารดูดซับ 0.4 กรัม จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซีนต่อไป

#### 3) การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน

การศึกษาค่าความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีนจะศึกษาที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณวัสดุดูดซับที่ 0.4 กรัม ที่อุณหภูมิระหว่าง 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส โดยนำวัสดุดูดซับบรรจุลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตรโดยที่ปริมาตรของสารอาหาราซีนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าด้วยเครื่อง orbital shaker ที่ 200 รอบต่อนาที ตลอดการทดลอง จากนั้นทำการเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซีนต่อไป

### 3.3 การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบแบตช์ (Batch studies)

การเก็บสารตัวอย่างจากขวด EPA Vials และ Erlenmeyer flask ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC สามารถอธิบายได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

#### 1) ทำการดูดสารตัวอย่างจากขวด EPA vials หรือ Erlenmeyer flask ในปริมาตร

1 มิลลิลิตรสำหรับการวิเคราะห์ด้วย HPLC แล้วบรรจุสารตัวอย่างลง Micro centrifuge tube ขนาด 1 มิลลิลิตร

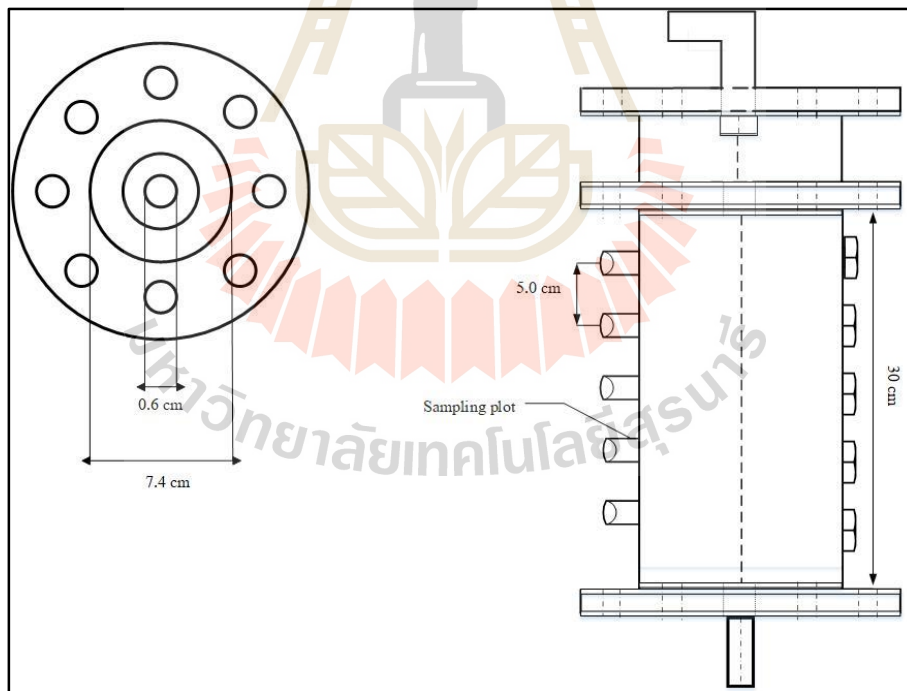
#### 2) นำสารตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที เป็น

ระยะเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนของวัสดุดูดซับออกจากสารละลายอาหาราซีน

3) เนื่องจากสารอาหารซึนจะไม่ถูกดูดซับกับวัสดุชนิด nylon (Ghosh et al., 2012) จึงทำการกรองสารตัวอย่างด้วย Nylon filter 0.45 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ผ่านทางกระบอกฉีดยา จากนั้นบรรจุลงขวด vials เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ต่อไป

### 3.4 การทดลองแบบคอลัมน์ (column studies)

การทดลองแบบคอลัมน์มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการนำลีโอนาร์โดต์มาประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ที่สารละลายอาหารซึนมีการปนเปื้อนกับดินในพื้นที่การเกษตร และป้องกันไม่ให้สารอาหารซึนเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำใต้ดิน รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารซึนด้วยวัสดุดูดซับชนิดที่ต่างกััน ซึ่งคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเป็นคอลัมน์ชนิดอะคริลิกเนื่องจากวัสดุประเภทอะคริลิกจะไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหารซึน (Topp et al., 1992) โดยคอลัมน์ที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.4 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตรระยะห่างระหว่าง sampling port 5 เซนติเมตร มีลักษณะการไหลแบบหนึ่งทิศทาง ดังรูปที่ 3.4 การทดลองแบบคอลัมน์จะใช้อุณหภูมิจำกัด และเก็บตัวอย่างสารละลายบริเวณช่องทางน้ำออกด้านล่าง โดยจะควบคุมการไหลของสารละลายด้วยปั๊มชนิดรีด (Peristaltic Pump)



รูปที่ 3.4 รายละเอียดชุดทดลอง column test

- สำหรับวัสดุชุดซัพที่ จะนำมาใช้ในการทดลองแบบ Column studies แบ่งออกเป็นดังนี้
- A และ AA คือ ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับลีโอเนาร์ไต์ในอัตรา 1.0 : 1.0 และ 1.0 : 0.5 ตามลำดับ
- B และ BB คือ ดินจากพื้นที่การเกษตรและลีโอเนาร์ไต์ ที่อัตรา 1.0 : 1.0 และ 1.0 : 0.5 ตามลำดับ (โดยมีลีโอเนาร์ไต์อยู่ระหว่างกลาง)
- C คือ ดินจากพื้นที่การเกษตร
- D คือ ทรายออกตตาวา (Ottawa sand)

### 3.4.1 การศึกษา Breakthrough curve

การศึกษา Breakthrough curve จะทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง สาร tracer สำหรับการทดลองนี้คือ สารโบรโมไนด์ (KBr) ที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ สารอะทราซีน (ATZ) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวัสดุชุดซัพที่ใช้คือ A, B, C และ D และปล่อยให้สารละลายไหลผ่านคอลัมน์แบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated) ด้วยอัตราไหล 2.4 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่บริเวณปลายท่อทุก ๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนการเตรียมการทดลองมีดังต่อไปนี้

- 1) บรรจุวัสดุชุดซัพที่ทราบความหนาแน่น (กรัมต่อ ลบ.ม) ลงในคอลัมน์
- 2) ทำการ equilibrate ด้วย electrolyte (สำหรับการทดลองนี้คือ แคลเซียมคลอไรด์;  $\text{CaCl}_2$ ) เป็นระยะเวลา 840 นาที
- 3) หลังจากนั้นทำการปล่อยสารละลายที่ต้องการศึกษา (ในการทดลองนี้คือโพแทสเซียมโบรไมด์; KBr หรือสารอะทราซีน; Atrazine) เป็นระยะเวลา 420 นาที เข้าสู่คอลัมน์
- 4) ทำชะสารออก (background solution) ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นระยะเวลา 1,260 นาที สำหรับการทดลองสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ และ 2,100 นาที สำหรับการทดลองสารละลายอะทราซีน
- 5) การวิเคราะห์สารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ Ion Chromatography (IC) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอะทราซีนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ HPLC

### 3.4.2 การสกัดสารอาหารขึ้นจากวัสดุดูดซับ

จากการทดลองแบบคอลัมน์ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารขึ้นที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุดูดซับด้วยเทคนิคแบบ liquid-liquid phase extraction ซึ่งดัดแปลงจากการทดลองของ Murphy (2009) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) วัสดุดูดซับที่ผ่านการทดลองแบบคอลัมน์ 85 กรัม นำมาสกัดด้วยสารเอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) 40 มิลลิลิตร และ เติมสาร Anhydrous sodium sulphate ในปริมาณ 1 กรัม

2) จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3) นำ ethyl acetate ไประเหยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

4) เติมสารละลาย Acetonitrile ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC

นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ค่า moisture content ด้วยเช่นกัน โดยหลังจากการทดลองคอลัมน์นำวัสดุดูดซับมาผสมกันและนำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักจนกว่าจะได้ค่าน้ำหนักที่คงที่ และคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น

### 3.5 การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบคอลัมน์

#### การศึกษา Breakthrough curve

เริ่มเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาตั้งแต่ 630 นาที เป็นต้นไป จากบริเวณปลายท่อน้ำออกทุก ๆ ชั่วโมงจนถึงระยะเวลา 2,520 นาที สำหรับสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์และ 3,360 นาที สำหรับสารละลายอาหารขึ้น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างสารละลายอาหารขึ้นและสาร tracer (สารโบรไมด์) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของการไหลของสารในวัสดุดูดซับต่างชนิดกัน

### 3.6 การวิเคราะห์สารละลายอาหารขึ้นด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

การวิเคราะห์ปริมาณสารละลายอาหารขึ้น ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยมีรายละเอียดที่เลือกใช้ตลอดทั้งการทดลอง ดังต่อไปนี้

#### สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับสารชะ (Mobile phase) จะใช้สารอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile ชนิด HPLC grade) และน้ำดีไอออน (DI Water) ในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 และใช้คอลัมน์ชนิด ACE C-18 (5 ไมครอน;  $\mu\text{m}$ ) ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร

### การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ HPLC

เมื่อเปิดเครื่องมือวิเคราะห์แล้วทำการตั้งค่าระบบ โดยให้สาร inject ที่ 20 ไมโครลิตร ( $\mu\text{L}$ ) เลือก UV-VIS Detector ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และทำการไล่อากาศในระบบโดยปรับอัตราการไหล (Flow rate) เป็น 5 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากนั้นปรับค่าอัตราการไหลที่จะทำการวิเคราะห์ ตัวอย่างเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที รอให้กราฟ baseline คงที่ จึงทำการฉีดสารละลายตัวอย่างเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารโดยเทียบกับค่ามาตรฐาน (standard curve)

### 3.7 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

#### 3.7.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

- 1) เครื่องร่อนคัดแยกขนาด (sieve shaker) ชนิด AS200 digit ความถี่ 50 Hz, 230 V  $\pm$  5 % รุ่น D-42781 ยี่ห้อ Retsch HAAN, Germany
- 2) เครื่องเขย่าสาร Orbital Shaker ยี่ห้อ Certomat, B.Braun Biotech Inter National
- 3) เครื่องเขย่าสาร Reciprocating Shaker ยี่ห้อ Heidolph UNIMAX 1010
- 4) เครื่องบดหยาบ ความถี่ 50 HZ กำลัง 750 W รุ่น Gmbh D-42781 ยี่ห้อ Retsch HAAN, Germany
- 5) เครื่องชั่งสารความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo
- 6) เครื่องเหวี่ยงตะกอน (Micro Centrifuge) สามารถเหวี่ยงตะกอนได้สูงสุด 14,000 รอบต่อนาที รุ่น NF 048 MC ยี่ห้อ NUVE
- 7) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 744 pH meter ยี่ห้อ Metrohm
- 8) ตู้อบลมร้อน (Universal Oven) ยี่ห้อ Memmert
- 9) เครื่องมือวิเคราะห์ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) รุ่น HPLC 1260 Infinity software ที่ใช้คือ chem station open lab ยี่ห้อ Agilent Technologies
- 10) เครื่องวิเคราะห์ X-ray powder diffraction (XRD) รุ่น D2 Phaser ยี่ห้อ Bruker
- 11) เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) รุ่น XGT5200 ยี่ห้อ Horiba
- 12) เครื่องวิเคราะห์ C, H, O, N และ S รุ่น CHN 628 และ 628 S ยี่ห้อ LECO
- 13) เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณ รุ่น TGA/DSC 1 ยี่ห้อ Mettler Toledo
- 14) เครื่อง Scanning Electron Microscope ใช้วิเคราะห์ธาตุและถ่ายภาพแบบ EDX รุ่น JSM-6010 ยี่ห้อ JEOL
- 15) เครื่อง Ion Chromatography (IC) รุ่น ICS-5000

### 3.7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) คอลัมน์อะคริลิก ขนาด 30 cm x 5.4 cm
- 2) HPLC Column ACE C-18 (5  $\mu$ m) ขนาด 4.6 x 250 mm ของ Advanced Chromatography Technologies Ltd. (ACE)
- 3) Micro Centrifuge Tube ขนาด 1.5 ml
- 4) EPA Vials ขนาด 40 ml
- 5) Nylon syringe filter ขนาด 0.45  $\mu$ m
- 6) กระบอกฉีดยา ขนาด 5 ml
- 7) Vials ขนาด 1.5 ml
- 8) อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ
- 9) Peristaltic Pump ชนิด Shenchen pump YZ 1515 X รุ่น BT 100 N
- 10) สายยางชนิด Viton ขนาด 1.6 mm

### 3.7.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สารปราบศัตรูพืชอะทราซีน (Atrazine) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98.1 ผลิตโดยบริษัท Chem service
- 2) Methanol (MeOH) ชนิด HPLC Grade ผลิตโดยบริษัท RCI labscan
- 3) Acetonitrile ชนิด HPLC Grade ผลิตโดยบริษัท RCI labscan
- 4) Sodium hydroxide (NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี
- 5) Sodium chloride (NaCl) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี
- 6) Hydrochloric Acid (HCl) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี
- 7) Potassium hydrogen phthalate (KHP) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี
- 8) Potassium dihydrogen phthalate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี
- 9) Sodium tetraborate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

10) Sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

11) Dichloromethane,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

12) Ethyl Acetate ( $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ ) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุดูดซับ

##### 4.1.1 คุณลักษณะของลีโอนาร์ไดต์ (LND)

การศึกษาองค์ประกอบของลีโอนาร์ไดต์ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบเคมี เพื่อนำข้อมูลต่าง ๆ มาใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้ลีโอนาร์ไดต์มาเป็นวัสดุดูดซับสารละลายอาหาราซิน โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite)

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าที่ได้
moisture	เปอร์เซ็นต์	7.11
pH (Lnd : น้ำ)	-	2.85
pH (Lnd : KCl)	-	2.34
% C	เปอร์เซ็นต์	16.54
% H	เปอร์เซ็นต์	3.12
% O	เปอร์เซ็นต์	26.67
% N	เปอร์เซ็นต์	0.88
% S	เปอร์เซ็นต์	4.35
Chemical composition		
- SiO <sub>2</sub>		43.89
- Si <sub>3</sub>		21.80
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	เปอร์เซ็นต์	19.18
- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		9.96
- CaO		2.76
CEC (Cation exchange capacity )	cmol/kg	59.89
OM (Organic matter)	เปอร์เซ็นต์	40.53
BET surface area	ตร.ม ต่อกรัม	13.59
Pore volume	ลบ.ม ต่อกรัม	7.5512x 10 <sup>-2</sup>
Pore dimeter	นาโนเมตร	21.648

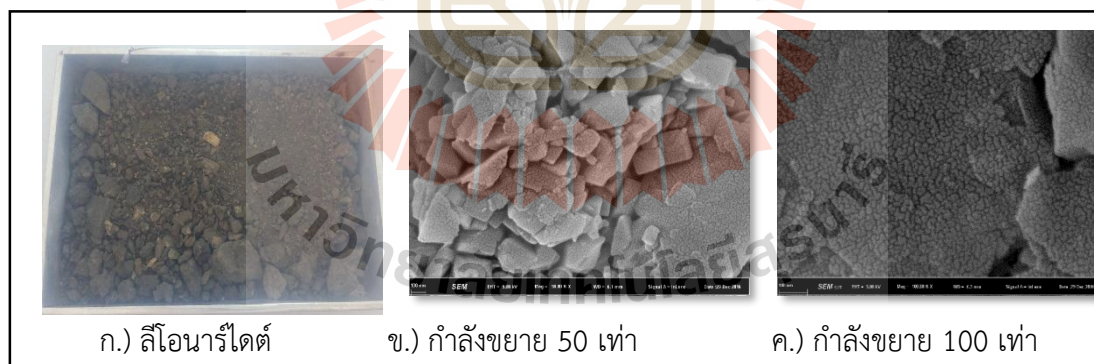


ซึ่งข้อมูลที่ได้จากจากรายการที่ 4.1 สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของลิโอนาร์ไต์กับค่ามาตรฐานจาก International Humic Substances Society (IHSS) และงานวิจัยอื่น ๆ ได้ดังตารางในภาคผนวก ข.1 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1.1.1 คุณลักษณะทางกายภาพ

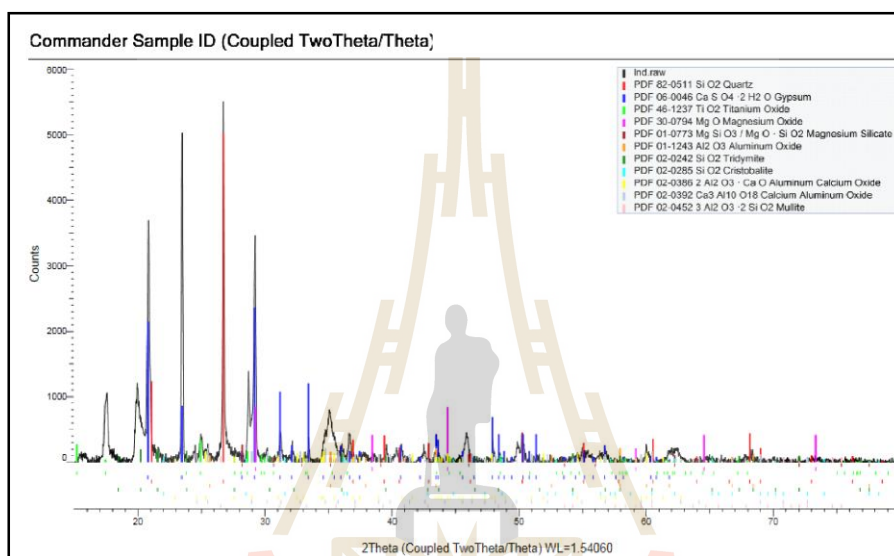
##### 1. ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไต์

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไต์ จะพบว่าลิโอนาร์ไต์มีพื้นที่ผิวประมาณ 13.59 ตร.ม ต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ  $7.5512 \times 10^{-2}$  ลบ.ม ต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเท่ากับ 21.648 นาโนเมตร และเมื่อจำแนกขนาดของรูพรุนจะพบว่าลิโอนาร์ไต์จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง คือมีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนกลางและขนาดใหญ่จะมีบทบาทต่อการดูดซับค่อนข้างน้อย แต่จะทำหน้าที่เป็นทางผ่าน (path way) ให้สารละลายอาหาราซินเข้าไปยังบริเวณโพรงด้านในของลิโอนาร์ไต์ ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในโครงสร้างภายในของอนุภาค (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) โดยที่พื้นที่ผิวและรูพรุนมีความสำคัญต่อการดูดซับของสารละลาย กล่าวคือ การดูดซับของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ดี ที่วัสดุดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับ ยังขึ้นกับ ขนาดการกระจายตัวของขนาดรูพรุน และ เคมีพื้นที่ผิวของสารดูดซับอีกด้วย ซึ่งจะรวมถึงคุณสมบัติของสารมีขั้ว และหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วย



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นฐานของลิโอนาร์ไต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM

จากลักษณะรูปถ่ายในรูปที่ 4.1 (ข.) ที่กำลังขยาย 50 เท่า ลีโอนาร์ไดต์มีลักษณะพื้นฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยม เรียงกันไม่เป็นระเบียบ และเมื่อทำการขยายรูปเป็น 100 เท่า จะพบว่าการรอยแตกในส่วนของบริเวณพื้นที่ผิวทั่วทั้งชิ้นงาน และมีช่องว่างจำนวนมากระหว่างรอยแตก ซึ่งการเกิดของรอยแตกอาจเกิดจากการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิต เนื่องจากลีโอนาร์ไดต์เป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการทำไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัสดุหลัก สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบ XRD (X-ray diffraction) พบว่าแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักได้แก่ควอตซ์ (Quartz) และ ยิปซัม (Gypsum) แสดงได้ดังรูปภาพที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของลีโอนาร์ไดต์จากเครื่องมือวิเคราะห์แบบ XRD

#### 4.1.1.2 คุณลักษณะทางเคมี

##### 1. ค่าความชื้น (moisture, %)

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า ค่าความชื้น (moisture, %) ของลีโอนาร์ไดต์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 7.11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดจะได้เท่ากับ 92.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ Thermogravimetric Analysis โดยพบว่า ลีโอนาร์ไดต์ที่ได้จากการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 50 - 105 องศาเซลเซียส ในปริมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียของน้ำที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของลีโอนาร์ไดต์ สำหรับอุณหภูมิ 103-180 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายบางส่วน และที่อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Ausavasukhi *et al* (2016) และ

Chammui *et al* (2014) คือที่อุณหภูมิประมาณ 300 – 900 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียของสารประกอบอินทรีย์และธาตุประกอบอื่น ๆ ประมาณ 40.55 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ว่าสารอินทรีย์วัตถุที่เป็นองค์ประกอบอย่าง กรดฮิวมิก ฟลูวิค และฮิวมินได้เปลี่ยนเป็นองค์ประกอบของคาร์บอนและเกิดการสลายตัวที่ความร้อนสูง ๆ ดังนั้นการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันจะทำให้โครงสร้างของสารอินทรีย์ในลีโออาร์ไดต์เกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจจะส่งผลต่อการดูดซับได้ เนื่องจากรพุนมีมากขึ้น (Ausavasukhi *et al.*, 2016)

## 2. ค่า pH

การวิเคราะห์ค่า pH ที่ได้จากวิธีการใช้ลีโออาร์ไดต์ต่อโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และน้ำที่อัตราส่วนเท่ากัน จะพบว่าค่า pH ที่ได้จากลีโออาร์ไดต์ต่อสารโพแทสเซียมคลอไรด์จะมีค่าความเป็นกรดที่ต่ำกว่าประมาณ 0.2-0.5 ของหน่วย pH ซึ่งการใช้โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) จะทำให้ทราบถึงปริมาณกรดจริงและกรดแฝง รวมถึงช่วยลดค่าแปรปรวนที่อาจเกิดจากปริมาณของเกลือที่สามารถละลายออกมาได้ จากงานวิจัยจะพบว่าค่า pH ของลีโออาร์ไดต์ต่อน้ำและโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) มีค่าเท่ากับ 2.85 และ 2.34 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าลีโออาร์ไดต์มีความเป็นกรดแก่ (strong acid) ( $\text{pH} < 4.5$ ) อาจเพราะลีโออาร์ไดต์เกิดการปลดปล่อยความเป็นกรดในรูปของสารละลายได้สูง โดยค่า pH จะส่งผลต่อการดูดซับของสารละลายอาหารซินได้ เนื่องจากค่า pH มีผลโดยตรงต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุดูดซับ และสภาพการละลายได้ของธาตุหลายชนิด ทำให้เกิดค่าการดูดซับสูงสุดเมื่อวัสดุดูดซับมีค่า pH ที่ต่ำ นอกจากนี้การทดลองที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุขาดา (2556) ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี จากเหมืองแม่เหาะ จังหวัดลำปาง โดยค่า pH ที่วิเคราะห์ได้จากการใช้ลีโออาร์ไดต์ต่อน้ำและโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) คือ 3.90 และ 3.58 ตามลำดับ และงานวิจัยของ ณธรรต สมจันทร์ (2557) จณิตตา สุกิจปาณินิจ (2557) และ Ratanaprommanee *et al.* (2014) ด้วย ซึ่งแสดงดังตารางที่ ข.2 อาจเนื่องมาจากลีโออาร์ไดต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแหล่งเดียวกัน ทำให้ค่า pH ที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้การนำลีโออาร์ไดต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดินจะต้องคำนึงถึงค่า pH ด้วยเนื่องจากค่า pH จะส่งผลกระทบต่อดินและพืชเพาะปลูกได้ สำหรับค่าที่เหมาะสมของปุ๋ยอินทรีย์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 5.5-8.5 (สุขาดา, 2556)

## 3. ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation exchange capacity, CEC)

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) ของลีโออาร์ไดต์ที่ได้จากงานวิจัยพบว่ามีความประมาณ 59.89 ซีโมลต่อกิโลกรัม ( $\text{cmol/kg}$ ) ซึ่งถือว่ามีค่า CEC ค่อนข้างสูง สอดคล้องกับงานวิจัยที่แสดงได้ดังตาราง ค.2 ค่า CEC ของลีโออาร์ไดต์ที่สูงจะบ่งบอกถึงปริมาณของสารฮิวมัสเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ และกำลังบัฟเฟอร์ที่สูง เช่นเดียวกับการทดลองของ Ratanaprommanee *et al.* (2014) ที่อธิบายถึงการปลดปล่อยโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) จากธาตุอะลูมิเนียม (Al) ของลีโออาร์ไดต์เมื่อถูกละลายในน้ำ และทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนดังสมการที่ 4.1



นอกจากนี้ค่า CEC ที่สูงขึ้นอาจทำให้การดูดซับของสารอาหารพืชจะลดลง เนื่องจากสารอาหารพืชมีลักษณะเป็นโปรโทเนต (protonated) กล่าวคือเกิดการเติมโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) ให้กับอะตอมบนพื้นที่ผิวของสารอาหารพืชแล้วทำให้เกิดคู่กรดขึ้น ซึ่งจะเกิดได้ในกรณีที่มีค่า pH น้อยกว่าค่า  $\text{pK}_a$  (Salavestrini *et al.*, 2010) ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันนอลของลีโอเนาร์ไดต์อาจมีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารพืชได้

#### 4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุในลีโอเนาร์ไดต์

จากการทดลองพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุของลีโอเนาร์ไดต์มีปริมาณค่อนข้างสูงถึง 40.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่วิเคราะห์ได้ก่อนหน้านี้ซึ่งค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุจะสอดคล้องกับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) กล่าวคือ ถ้าวัสดุดูดซับมีค่าอินทรีย์วัตถุในปริมาณมาก จะทำให้ค่า CEC ในวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการจะนำลีโอเนาร์ไดต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดิน อาจจะช่วยเพิ่มธาตุอาหารและทำให้คุณสมบัติของดินในพื้นที่การเกษตรได้ดีขึ้น โดยเฉพาะดินที่ไม่สามารถดูดซับน้ำได้อย่างเช่น ดินทราย หรือดินในพื้นที่แห้งแล้ง เป็นต้น

#### 4.1.2 คุณลักษณะของดินจากพื้นที่ทำการเกษตร

ดินที่นำมาใช้ทำการทดลองได้รับความอนุเคราะห์มาจากพื้นที่การเพาะปลูกอ้อย ในจังหวัดนครราชสีมาแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากนั้นนำดินที่ได้ไปศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 ดินจากพื้นที่ทำการเกษตร ในจังหวัดนครราชสีมา

## ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของดินจากพื้นที่การเกษตร

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าที่ได้
moisture	%	0.35
pH (lnd : น้ำ)	-	5.64
pH (lnd : KCl)	-	4.63
CEC (Cation exchange capacity )	cmol/kg	1.72
OM (Organic matter)	เปอร์เซ็นต์	1.73
Soil texture		
Sand	% w/w	88.47
Silt	% w/w	11.53
clay	% w/w	0.00

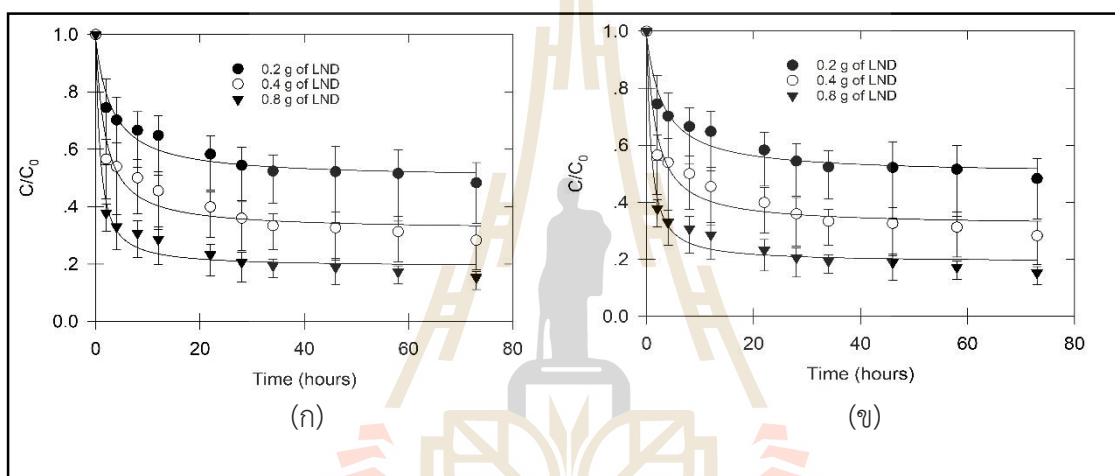
จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าค่าความชื้นของดินที่ตรวจพบได้มีค่าเท่ากับ 0.35 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.0035 กรัมต่อกรัม (โดยน้ำหนัก) แสดงว่ามีดินมีความแห้งค่อนข้างสูง (มีค่าต่ำกว่า 0.05 กรัมต่อกรัม) (Fares *et al.*, 2016) และเมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะของเนื้อดินจะพบว่าดินส่วนใหญ่เป็นแบบดินทราย เนื่องจากดินทรายจะมีความอุ้มน้ำที่ต่ำ และมีอนุภาคที่มีพื้นผิวจำเพาะ (specific area) น้อยที่สุด ประกอบกับมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนและปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่ำ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับสารจึงมีค่าน้อย (ศุภมาส, 2545) และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางเคมีจะพบว่าค่า pH ของดินมีค่าความเป็นกรดอ่อน (pH อยู่ระหว่าง 4 ถึง 6) ดังนั้นการทดลองนี้พอจะคาดคะเนในเบื้องต้นได้ว่าดินจากพื้นที่การเกษตรที่นำมาศึกษาอาจจะไม่เกิดการดูดซับสารอาหารขึ้นหรืออาจเกิดได้ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยมาก

## 4.2 ผลการศึกษาแบบแบชต์ (Batch studies)

### 4.2.1 ระยะเวลาสัมผัส (contact time)

จากการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วย ลีโอนาร์โดต์ (LND) ในปริมาณต่างกัน คือ 0.2 , 0.4 และ 0.8 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารอาหารขึ้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C/C_0$  และระยะเวลาสัมผัสแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากการทดลองพบว่าลีโอนาร์โดต์ มีการดูดซับได้ดีในช่วงแรก ๆ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 22 ชั่วโมงจนถึง 48 ชั่วโมง เกิดการดูดซับสารเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นเบื้องต้น พบว่าลักษณะแนวโน้มของระยะเวลาสมดุลในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นคือ 24 ชั่วโมง ดังภาคผนวก ค.1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeledon *et al.* (2005) ที่

ทำการศึกษาการดูดซับสาร PAHs ในน้ำด้วยลีโอนาร์ไคต์ พบว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลคือ 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Llado *et al.* (2015) ที่ได้ทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับสารละลายอาหารสีนด้วยถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาพบว่าสารละลายอาหารสีนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาสมดุล ที่ 1500 นาที หรือประมาณ 25 ชั่วโมง และงานวิจัยของ Jamil *et al.* (2011) ที่ศึกษาการดูดซับสารอาหารสีนด้วยซีโอไลต์ดัดแปรร่วมกับดินเหนียว จะพบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับคือ 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป และงานวิจัยของ Yue (2017) ที่ศึกษาการดูดซับสารอาหารสีนในดิน ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาในการสัมผัสสารเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาค่าไอโซเทอมของการดูดซับและปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับจะเลือกใช้ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 24 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.4** ระยะเวลาสัมผัสการดูดซับสารละลายอาหารสีนด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น (ก) และ (ข) คือ 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

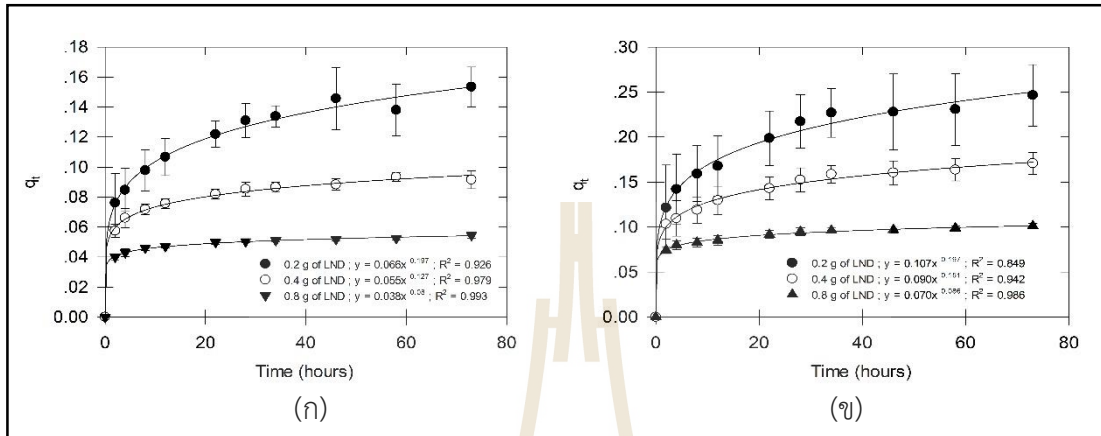
#### 4.2.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารสีน

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสามารถอธิบายได้ถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือการแพร่ของสารตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ยกตัวอย่างเช่น โมเดลแบบ Pseudo first order Pseudo second order และ intraparticle diffusion เป็นต้น ดังนั้นจากการทดลองที่ 4.2.1 จึงได้นำข้อมูลไปหาค่าจลนพลศาสตร์การดูดซับ ตามสมการในตารางที่ 2.6 ซึ่งกราฟแสดงอันดับการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแบบ Pseudo first order และ Pseudo second order อธิบายได้ดังนี้

จากผลการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสารอาหารสีนด้วยลีโอนาร์ไคต์และลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

## 4.2.2.1 Pseudo first order

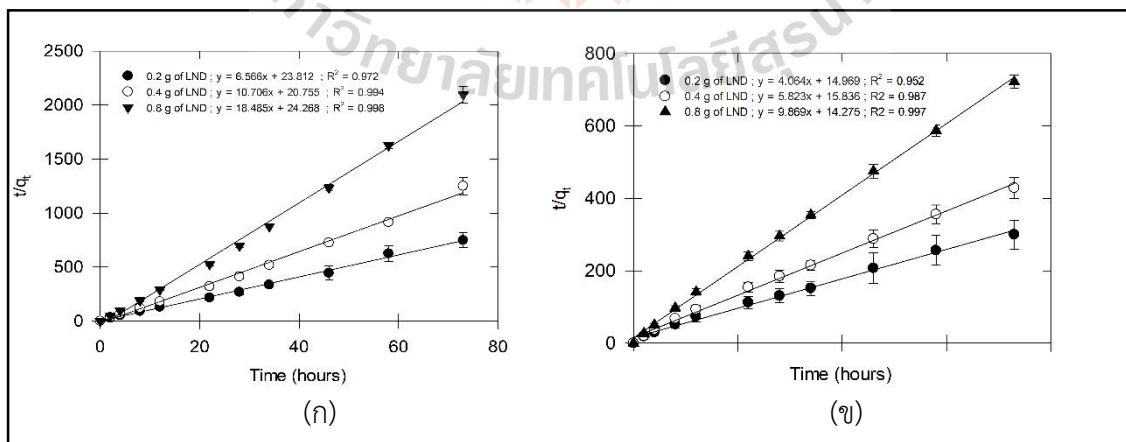
จากสมการในตารางที่ 2.6 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  กับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (non-linear) ได้ดังรูปที่ 4.5 โดยที่ค่า  $K_1$  คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (ต่อนาที)



รูปที่ 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order โดยที่ (ก) และ (ข) คือที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีน 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

## 4.2.2.2 Pseudo second order

จากสมการในตารางที่ 2.6 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $t/q_t$  กับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (non-linear) ได้ดังรูปที่ 4.6 โดยที่ค่า  $K_1$  คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)



รูปที่ 4.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order โดยที่ (ก) และ (ข) คือที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีน 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการเขียนกราฟข้างต้นไปหาค่าพารามิเตอร์ของเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแบบ Pseudo first order และ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้นเท่ากับ 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3** ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารขึ้นที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไต์ (LND)

parameter	ลิโอนาร์ไต์ 0.2 กรัม	ลิโอนาร์ไต์ 0.4 กรัม	ลิโอนาร์ไต์ 0.8 กรัม
Pseudo first order (non-linear form)			
$q_t$ (mg/g)	0.066	0.055	0.038
$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.197	0.127	0.080
$R^2$	0.926	0.979	0.993
Pseudo second order (linear form)			
$q_e$ (mg/g)	0.042	0.048	0.041
$K_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	3.626	1.946	1.319
$R^2$	0.972	0.994	0.998

**ตารางที่ 4.4** ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารขึ้นที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไต์ (LND)

parameter	ลิโอนาร์ไต์ 0.2 กรัม	ลิโอนาร์ไต์ 0.4 กรัม	ลิโอนาร์ไต์ 0.8 กรัม
Pseudo first order (non-linear form)			
$q_t$ (mg/g)	0.107	0.090	0.070
$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.197	0.151	0.086
$R^2$	0.849	0.942	0.986
Pseudo second order (linear form)			
$q_e$ (mg/g)	0.068	0.063	0.070
$K_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	3.618	2.726	0.691
$R^2$	0.952	0.987	0.997



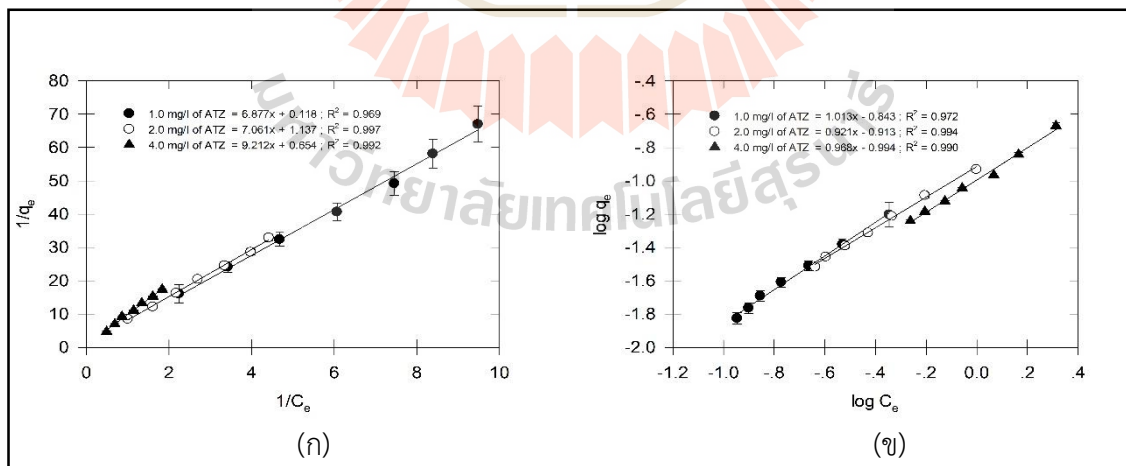
จากกราฟข้างต้นเมื่อพิจารณาจากค่าสัมพัทธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression,  $R^2$ ) จะพบว่าการดูดซับของสารละลายอาหารซินด้วยลีโอนาร์ไคต์ (LND) และลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียบ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาที่สมดุล การดูดซับสารอาหารซินด้วยวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการแพร่บนพื้นผิวภายในอนุภาค (surface diffusion) และอาจมีลักษณะการดูดซับเป็นแบบเคมี (Sakulthaew *et al.*, 2017) ซึ่งจะมีปัจจัยอื่น ๆ มาเกี่ยวข้องกับการดูดซับด้วย อาทิเช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

#### 4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลีโอนาร์ไคต์

4.2.3.1 การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลีโอนาร์ไคต์

จากการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุล ณ อุณหภูมิห้องได้ทำการเตรียมสารละลายอาหารซินที่ ความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณลีโอนาร์ไคต์ตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.4 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ค่าความสามารถในการดูดซับและลักษณะไอโซเทอมแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถนำมาศึกษาลักษณะไอโซเทอมสำหรับการดูดซับได้ทั้งแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) ดังสมการในตารางที่ 2.6 จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงจะได้ค่าคงที่ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.7 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ (ก) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ (ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วย ลีโอนาร์ไดต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$q_{max}$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	$K_L$ (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	$R^2$	$k_f$ (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	$1/n$ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	$R^2$
1	8.474	0.017	0.969	0.143	1.013	0.972
2	0.879	0.161	0.997	0.122	0.921	0.994
4	1.529	0.071	0.992	0.101	0.968	0.990

เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ ค่า  $R^2$  (ค่า  $R^2$  เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอมของแต่ละชนิดว่าแบบใดดีกว่ากัน โดยที่ค่า  $R^2$  ที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับชนิดนั้น ๆ เหมาะที่จะนำไอโซเทอมชนิดนั้นมาอธิบายลักษณะการดูดซับ) จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่า  $R^2$  ของทั้งสองไอโซเทอมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลีโอนาร์ไดต์ที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ได้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) พลังงานการดูดซับมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง และการดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) ส่วนที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่า แสดงได้ว่าการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลีโอนาร์ไดต์อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) และแรงดูดซับเป็นแบบแรงแวลเตอร์วาล โดยมีความจุสูงสุดในการดูดซับสารละลายเท่ากับ 0.879 และ 1.529 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุลของแลงเมียร์ (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) จากสมการที่ 4.2

$$R_L = 1/(1+bC_0) \quad (4.2)$$

จะพบว่าค่า  $R_L$  ของความเข้มข้นที่ 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าเท่ากับ 0.7623 และ 0.7788 ลิตรต่อมิลลิกรัมตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 0 และ 1 ( $0 < R_L < 1$ ) แสดงว่าลักษณะของการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ กล่าวคือ พื้นผิวการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวสามารถเกิดการผันกลับได้ และพลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของวัสดุ

ดูดซับ (homogeneous surface) (Sakulthaew *et al.*, 2017) จากตารางจะเห็นได้ว่าค่า  $R^2$  ของไอโซเทอมทั้งสองแบบแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยจะพบว่าค่าความหนาแน่นในการดูดซับ ( $n$ ) ระหว่างลิโอนาร์ไคด์กับสารละลายอาหารเสริมที่ความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า  $n$  เท่ากับ 0.9871, 1.0857 และ 1.033 ตามลำดับ ซึ่งค่า  $n$  จะอธิบายถึงความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการดูดซับกล่าวคือ ถ้าค่า  $n$  น้อย การดูดซับจะเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ ดังนั้นจึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ สำหรับค่า  $1/n$  ที่ได้จากการสมการมีค่าเท่ากับ 1.013, 0.921 และ 0.968 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะพบว่าที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้อยกว่า 1 (เมื่อค่า  $1/n > 1$ ) แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคด์มีปริมาณจำกัดที่จะใช้สำหรับดูดซับสารละลายอาหารเสริม ส่วนที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่า  $1/n$  มากกว่า 1 แสดงได้ว่า บริเวณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคด์มีปริมาณมากทำให้สามารถดูดซับสารละลายอาหารเสริมได้อีก

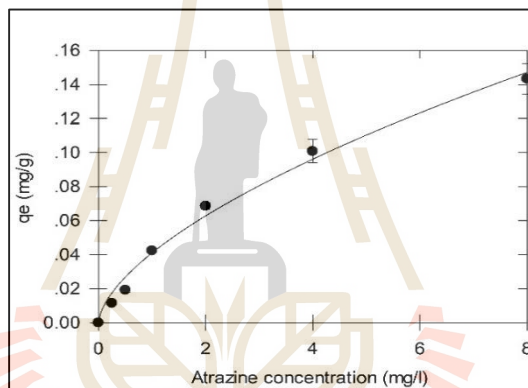
จากการศึกษาลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับสรุปได้ว่า ปริมาณของวัสดุดูดซับและค่าความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับ (อธิบายได้ดังหัวข้อที่ 4.2.4.1) กล่าวคือถ้าความเข้มข้นสูงแต่ปริมาณวัสดุดูดซับมีค่าน้อยกว่า ค่าความสามารถการดูดซับจะเกิดได้น้อยกว่า จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าค่า  $R^2$  ของสมการแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ไม่ได้แตกต่างกันมากนักอาจเป็นเพราะลิโอนาร์ไคด์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับไม่ได้ผ่านกระบวนการที่ทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งจะมีธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย จึงอาจทำให้ลักษณะของไอโซเทอมที่ได้นั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การกระจายตัว ขนาดของรูพรุน หมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และปริมาณธาตุที่อยู่ในวัสดุดูดซับ (Laldo *et al.*, 2015) มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารเสริม ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นอาจเป็นได้ทั้งการดูดซับสารร่วมกับการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุ โดยการดูดซับอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารเสริมผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบลิโอนาร์ไคด์ จากนั้นเกิดการแพร่กระจายของสารเข้าบริเวณรูพรุนของลิโอนาร์ไคด์ ซึ่งลิโอนาร์ไคด์มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 21 นาโนเมตร ส่วนสารละลายอาหารเสริมมีขนาดเท่ากับ 0.85 นาโนเมตร (Rambubu *et al.*, 2011) จะเห็นได้ว่าสารละลายอาหารเสริมมีขนาดเล็กกว่าลิโอนาร์ไคด์จึงอาจทำให้เกิดการแพร่ของรูพรุนของลิโอนาร์ไคด์ได้ สำหรับกลไกการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุอาจเกิดจากลิโอนาร์ไคด์มีขั้วหรือมีประจุลบบนพื้นผิวมีการทำปฏิกิริยาแบบพันธะพาย ( $\pi$ - bond) กับสารเกิดการทำปฏิกิริยาดัวยพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มอะมิโนของสารอาหารเสริมกับกลุ่มคาร์บอนิลของลิโอนาร์ไคด์ (Lapworth *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณพื้นผิวอนุภาคของลิโอนาร์ไคด์จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างสารกลุ่มหลัก เช่น กลุ่มคาร์บอกซิล กลุ่มคาร์บอนิล และไอออนของโลหะที่อยู่ในโครงสร้างของลิโอนาร์ไคด์ ประกอบกับลิโอนาร์ไคด์มีค่าความเป็นกรดค่อนข้างสูง จึงอาจส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดัวยเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง สูง จะทำให้ค่า CEC และมีพื้นที่ในการดูดซับไอออนของสารที่สูง จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบางส่วนระหว่างบนพื้นผิวของลิโอนาร์ไคด์กับโมเลกุลของสารละลายอาหารเสริมได้ (สุชาติดา กรุณา, 2548) ซึ่ง

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovaios *et al* (2011). ที่ทำการศึกษาการดูดซับสารอาหาราซิ่นด้วยกรดฮิวมิก จากงานวิจัยพบว่าอาจเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโมเลกุลของกรดฮิวมิกกับสารละลายอาหาราซิ่นได้

#### 4.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

##### 4.2.4.1 ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซิ่นเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอาหาราซิ่นโดยใช้ลิโอนาร์ไคต์เป็นวัสดุดูดซับ ได้ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณลิโอนาร์ไคต์ 0.4 กรัม ที่ความเข้มข้นต่างกันตั้งแต่ 0.25 ถึง 8.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถการดูดซับและค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซิ่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



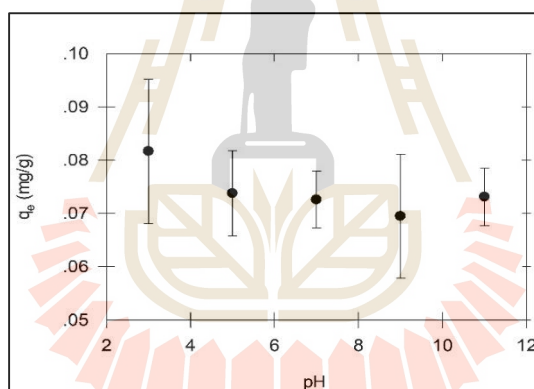
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซิ่นด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

ผลการทดลองพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม อธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะส่งผลต่อปริมาณการดูดซับ กล่าวคือ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าในช่วงแรก (ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ลักษณะการดูดซับเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากสารละลายอาหาราซิ่นได้แพร่เข้าสู่บริเวณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคต์ จนถึงที่ความเข้มข้นที่ 2.0-8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยลักษณะการดูดซับเริ่มจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเริ่มเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ความเข้มข้น 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laldo *et al* (2015) ที่ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอาหาราซิ่น จะพบว่าที่ความเข้มข้นสูง ๆ ค่าการดูดซับก็เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจาก

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีนเริ่มเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวดูดซับของลิโอนาร์ไต์เริ่มลดลง (สุชาติ กรุณา, 2548) ทำให้อัตราการดูดซับของลิโอนาร์ไต์ลดลง และเมื่อเกิดการดูดซับจนเต็มรูปพูนแล้ว ปริมาณการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่จนไม่สามารถเกิดการดูดซับขึ้นได้อีก เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jamil *et al* (2011) ที่พบว่าพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน ซึ่งการทดลองนี้คาดว่าถ้าเพิ่มปริมาณของความเข้มข้นขึ้นลักษณะของกราฟอาจมีแนวโน้มที่ค่าความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.2.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการหาค่า pH ที่แตกต่างกัน (pH = 3-11) ที่ปริมาณลิโอนาร์ไต์เท่ากับ 0.4 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีนเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถการดูดซับและค่า pH แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไต์ที่ pH ต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไต์มีประสิทธิภาพดีที่ค่าความเป็นกรดแก่ (pH = 3) เนื่องจากสารละลายอาหาราซีนมีค่าความเป็นเบสอ่อน (Shirmardi *et al.*, 2016) จึงทำให้ลิโอนาร์ไต์ที่มีค่าความเป็นกรดสูง (พิจารณาจากตารางที่ 4.1) สามารถดูดซับสารละลายอาหาราซีนที่ค่าความเป็นเบสอ่อนได้ ประกอบกับค่า pKa ของสารละลายอาหาราซีนที่มีค่าน้อย (pKa = 1.68) จึงทำให้เกิดการแตกตัวและให้โปรตอนได้ดี จากที่กล่าวมาข้างต้น ลิโอนาร์ไต์มีประจุลบจำนวนมาก จึงทำให้อาจเกิดการแตกตัว (dissociation) ได้บางส่วนจากสารประกอบกลุ่มคาร์บอกซิล ทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งกลไกการดูดซับอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (protonation) ของกลุ่มเอมีน (amine group) บนอนุภาค

ของลิโอนาร์ไดต์ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตยบนพื้นผิวของลิโอนาร์ไดต์ (Ausavasukhi *et al.*, 2015) ทำให้สารอาหารชั้นอยู่รูปของไอออนมากขึ้น เกิดประจุบวกที่มากขึ้น จึงเกิดการดูดซับได้มากขึ้น (Yue *et al.*, 2016) โดยกลไกดังกล่าวจะทำให้เกิดการดูดซับแคตไอออนของสารได้ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 และจากงานวิจัยของ Masset *et al.* (2000) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดฮิวมิคใน goethite ในการดูดซับสารโคบอลต์ (Co (II)), สตรอนเชียม (Sr (II)) และซีลีเนียม (Se (IV)) ได้อธิบายว่า กลไกการดูดซับอาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนลิแกนด์บนพื้นผิวของวัสดุ ได้มีการ coordinate (surface-coordinate) ทำให้กลุ่มแอนไอออน (anionic group) ของกรดฮิวมิคจะเข้าไปแทนที่หมู่ OH<sup>-</sup> บน goethite ซึ่งงานวิจัยนี้อาจมีลักษณะคล้ายกันกล่าวคือ มีการแลกเปลี่ยนและแทนที่ระหว่างหมู่คาร์บอนิลของลิโอนาร์ไดต์และหมู่อะมิโนของสารละลายอาหารชั้น (Wei *et al.*, 2017) นอกจากนี้โมเลกุลของอินทรีย์วัตถุในลิโอนาร์ไดต์ยังมีประจุบวกอยู่บางส่วนจึงอาจทำให้สามารถดูดซับแอนไอออนได้เช่นกัน (ไกรศรี ทองเสมียน, 2551) ประกอบกับโมเลกุลของกรดฮิวมิคจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (Carboxylic, -COOH group) และฟีนอลิก (Phenolic or Phynyl, -C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>OH group) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของลิโอนาร์ไดต์ได้ (วิวัฒน์ และคณะ, 2552)

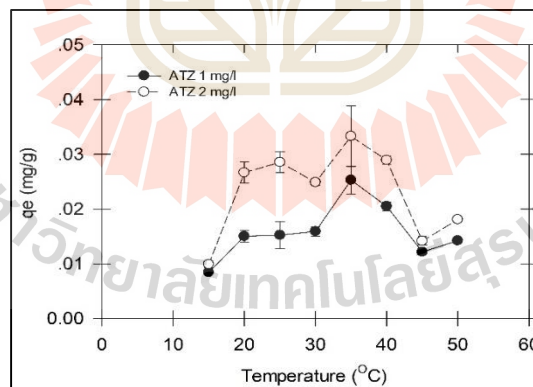


นอกจากนี้ยังพบว่าออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิลจะมีความเป็นลบ ส่วนหมู่คาร์บอนจะมีความเป็นบวกจึงทำให้สามารถเกิดการดึงดูดอิเล็กตรอนจากพันธะ C-H ของสารอาหารชั้นที่มีฤทธิ์เป็นเบสได้ ประกอบกับกรดฮิวมิคที่เป็นองค์ประกอบของลิโอนาร์ไดต์มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารละลายอาหารชั้นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ (Kovaios *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011) และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง จะทำให้ค่า CEC ที่ได้มีค่าสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้ลิโอนาร์ไดต์มีพื้นที่ผิวดูดซับไอออนของสารละลายอาหารชั้นได้ค่อนข้างสูง (สุชาติ กรุณา, 2548) และเมื่อค่า pH เป็นเบสจะพบว่าแนวโน้มของค่าการดูดซับมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะที่สภาวะเป็นเบสสารละลายอาหารชั้นมีประจุลบมากขึ้น (OH<sup>-</sup>) จึงทำให้อาจเกิดการแย่งชิงระหว่างประจุลบของสารละลายอาหารชั้นได้ (Ausavasukhi *et al.*, 2015)

#### 4.2.4.3 อุณหภูมิ

การทดลองหาค่าอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหาราซินด้วย ลีโอนาร์ไดต์ได้ทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของสารอาหาราซิน 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ ปริมาณลีโอนาร์ไดต์จำนวน 0.4 กรัม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 15 ถึง 50 องศาเซลเซียส ใช้ ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการ ดูดซับสารละลายอาหาราซินและอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 4.10

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ค่าการดูด ซับเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส และพบว่าค่าการดูดซับสารอาหาราซินดีที่สุด หลังจากนั้นค่าการดูดซับเริ่มลดต่ำลงที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มที่เริ่มสูงขึ้น อีกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อาจเป็นเพราะกระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน และเมื่อค่า ความร้อนสูงขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ อาจเกิดการคายซับของสารละลายอาหาราซินบางส่วนจึงทำให้ค่าการ ดูดซับสารลดลงเพียงเล็กน้อย (Kovaios *et al.*, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sebata *et al.* (2013) ที่ทำการดูดซับสารอาหาราซินด้วยเปลือกถั่วลิสงโดยจะพบว่าที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียสมี ค่าความจุในการดูดซับสารได้ดีที่สุด ซึ่งอธิบายว่าจะเกิดการคายซับสูงเมื่อค่าการดูดซับสารมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจจะส่งผลต่อโมเลกุลของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้าง ของกรดฮิวมิคในลีโอนาร์ไดต์ให้ลดลงได้ (Canieren *et al.*, 2017) จึงอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพดูดซับ สารละลายอาหาราซินที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหาราซินด้วยลีโอนาร์ไดต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

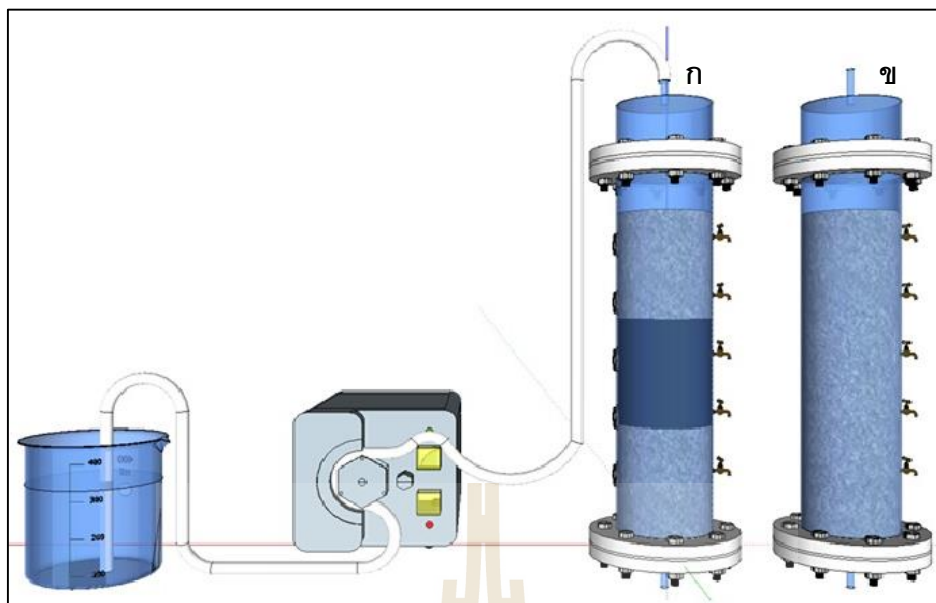
### 4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (column studies)

การทดลองแบบคอลัมน์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารซึ่งร่วมกับดินจากพื้นที่การเกษตรทั้งแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันและแบบแยกชั้น กล่าวคือเป็นการนำเอาลีโอนาร์ไดต์มาประยุกต์ใช้กับดินในพื้นที่การเกษตร ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated) โดยคาดว่าลีโอนาร์ไดต์จะทำหน้าที่ดูดซับสารละลายอาหารซึ่งไม่ให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำและแหล่งน้ำใต้ดินร่วมกับใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน สำหรับการศึกษาดูดซับในรูปแบบของคอลัมน์ จะทำการศึกษาลักษณะ breakthrough curve และการสกัดสารที่อยู่ในวัสดุดูดซับรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะ breakthrough curve ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ในขั้นตอนการศึกษานี้จะศึกษาความสามารถของวัสดุดูดซับในการดูดซับสารละลายอาหารซึ่งลักษณะการบรรจุวัสดุดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่หนึ่ง นำดินผสมกับลีโอนาร์ไดต์ในอัตราส่วน 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ส่วนแบบที่สองเป็นการนำลีโอนาร์ไดต์มาบรรจุถึงกลางชั้นระหว่างดินเพื่อจำลองลักษณะการดูดซับในพื้นที่จริงโดยใช้อัตราส่วนที่ 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซับสารละลายอาหารซึ่งกับดินจากพื้นที่การเกษตรด้วยเพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับของดินในสภาวะจริง และการดูดซับกับทรายออกตาวา เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ เนื่องจากทรายออกตาวามีขนาดเท่า ๆ กันทำให้ความหนาแน่นเท่ากันตลอดการทดลอง ลักษณะการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นทำการปล่อยสารละลายอาหารซึ่งให้ไหลผ่านคอลัมน์ตามแรงโน้มถ่วง กล่าวคือมีลักษณะการไหลเป็นแบบ down-flow ไม่มีการปรับค่า pH และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง สำหรับข้อมูลในการทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7





**รูปที่ 4.11** การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารพืชโดย ก.) ลิโอนาร์ไดต์อยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นดินจากพื้นที่การเกษตร และ ข.) ลิโอนาร์ไดต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินจากพื้นที่การเกษตร และการบรรจุดินจากพื้นที่การเกษตรและทรายออกตาวาเพียงอย่างเดียว

**ตารางที่ 4.6** ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดซับสารละลายอาหารพืชด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	หมายเหตุ
อัตราการไหล	มิลลิลิตรต่อนาที่	2.4	อ้างอิงจากภาคผนวก ข
ค่า pH	-	ไม่มีการปรับค่า pH	จำลองการทดลองสำหรับพื้นที่การเกษตร
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิห้อง	จำลองการทดลองสำหรับพื้นที่การเกษตร
ค่าความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10	อ้างอิงจากงานวิจัยของ Siripat <i>et al.</i> , 2009
น้ำหนักของวัสดุดูดซับ	กรัมต่อกรัม	0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0	อ้างอิงจากภาคผนวก ข

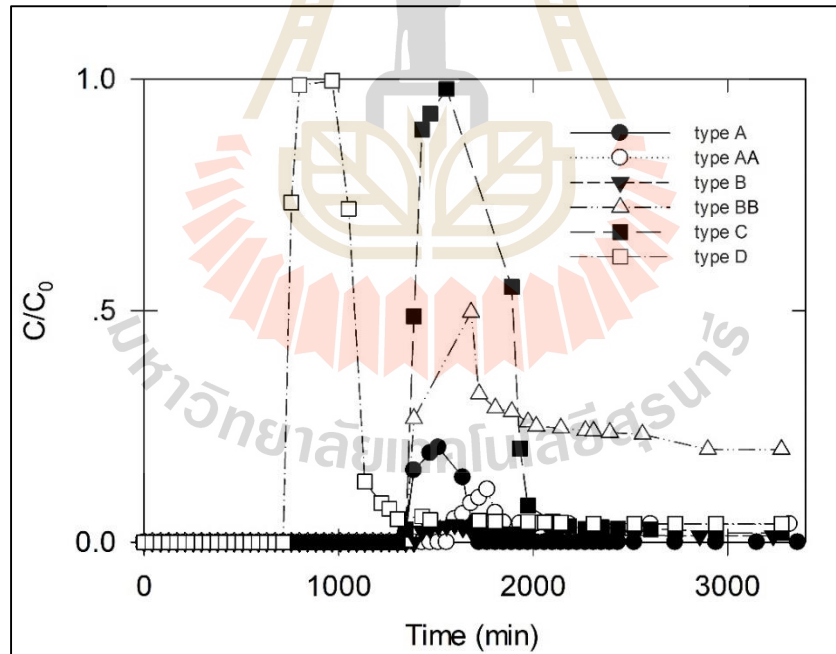
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดการเดินระบบการทดลองแบบคอลัมน์

สารละลาย	ลักษณะการเดินระบบ	ระยะเวลาทดลอง
สารติดตาม (KBr)	1. CaCl <sub>2</sub> – equilibrate	840 นาที
	2. KBr – tracer test	420 นาที
	3. CaCl <sub>2</sub> – leaching (สารชะละลาย)	840 นาที
รวมปริมาณที่ใช้		2,520 นาที
สารละลายอาหาราซีน (ATZ)	1. CaCl <sub>2</sub> – equilibrate	840 นาที
	2. ATZ – tracer test	420 นาที
	3. CaCl <sub>2</sub> – leaching (สารชะละลาย)	2,100 นาที
รวมปริมาณที่ใช้		3,360 นาที

เมื่อบรรจุวัสดุดูดซับลงในคอลัมน์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเดินระบบการดูดซับแบบคอลัมน์โดยทำการปล่อยให้สารละลายไหลไปเรื่อย ๆ จนครบปริมาตรที่กำหนด การทดลองนี้ได้ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เนื่องจากต้องการปรับสภาพของวัสดุดูดซับให้เหมือนกับสถานะของดินทั่วไป กล่าวคือทำให้วัสดุดูดซับมีความชื้น และใช้เป็นตัวพาสารละลายให้เคลื่อนที่ (advection) กล่าวคือ เมื่อทำการปล่อยสารละลายจะทำให้สารเกิดการแทนที่ในส่วนที่เป็นสารแคลเซียมคลอไรด์ โดยจะใช้สารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) เป็นสารติดตาม (tracer test) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) กับสารละลายอาหาราซีน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 1 ชั่วโมง ที่บริเวณปลายท่อเพื่อทำการศึกษาลักษณะกราฟเบรคทูร์ของสารละลายอาหาราซีน

สำหรับลักษณะ breakthrough curve ที่เปรียบเทียบระหว่างสารติดตามและสารละลายอาหาราซีนแสดงดังภาคผนวก ข และผลจากการศึกษาลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณสารละลายอาหาราซีนที่ผ่านวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับระยะเวลาที่ผ่านไป แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 จากผลการทดลองพบว่าการเคลื่อนตัวของสารละลายจะขึ้นกับค่า  $K_{oc}$  และ  $K_d$  กล่าวคือ ดินที่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงจะสามารถดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนได้มาก รวมถึงความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของวัสดุดูดซับก็ส่งผลต่อการทดลองเช่นกัน (Wang *et al.*, 2011) จากกราฟในภาคผนวก ข จะเห็นได้ว่าสารติดตาม (KBr) จะเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าสารละลายอาหาราซีน และเริ่มคงที่ที่กระบวนการชะสาร เนื่องจากสารติดตามส่วนใหญ่จะไม่เกิดการดูดซับในดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายอาหาราซีนจะพบว่า ที่วัสดุดูดซับเป็นทรายออกตาวา (type D) มีการเคลื่อนตัวออกมาก่อน เนื่องจากทรายออกตาวามีขนาดอนุภาคที่เท่า ๆ กัน และไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซีน จึงใช้เทียบเป็น Blank ของการทดลองนี้ ดังนั้น

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 จะพบว่าดินจากพื้นที่การเกษตร (type C) เกิดการดูดซับสารอาหารขึ้นได้ในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าดินที่ใช้ทดลองเป็นดินทราย ทำให้การอุ้มน้ำการดูดติดของสาร และการแลกเปลี่ยนประจุไอออนบวกเกิดได้น้อยกว่าชนิดดินเหนียว แต่สำหรับลีโอไนร์ไต์ที่มีกรดฮิวมิกในปริมาณมาก จะส่งผลให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง ดังนั้นจึงมีผลให้เกิดการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นจะพบว่าวัสดุดูดซับแบบบรรจุลีโอไนร์ไต์อยู่กึ่งกลางชั้นมีค่าการดูดซับที่ดีกว่าการนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งอัตราส่วนที่บรรจุก็ส่งผลต่อการดูดซับสารด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าอัตราส่วนของลีโอไนร์ไต์มีปริมาณที่มากกว่าดินจะทำให้เกิดการดูดซับสารได้มากกว่าอัตราส่วนที่น้อยกว่า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ วัสดุชนิด B (1.0 : 1.0) > BB (1.0 : 0.5) > AA (1.0 : 0.5) > A (1.0 : 1.0) > B (1.0 : 0.5) > C (ดินจากพื้นที่การเกษตร) > D (Ottawa sand) จากกราฟจะเห็นได้ว่าวัสดุดูดซับชนิด A มีค่ามากกว่าชนิด AA อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของสารละลายอาหารขึ้นในขณะนั้นสัมผัสกับดินมากกว่า จึงทำให้ค่าการดูดซับของสารมีค่าที่มาก เมื่อเปรียบเทียบวัสดุชนิด AA ที่มีอัตราส่วนน้อยกว่า สำหรับการทดลองที่มีลีโอไนร์ไต์บรรจุอยู่กึ่งกลางชั้นจะพบว่าในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 มีค่าการดูดซับที่มากกว่าในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 แสดงได้ว่าปริมาณลีโอไนร์ไต์ที่มากกว่าสามารถดูดซับสารอาหารขึ้นได้มาก



รูปที่ 4.12 ลักษณะ breakthrough curve ในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างกัน

หมายเหตุ วัสดุที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันคือ ชนิด A และ AA

วัสดุชนิดที่บรรจุลีโอไนร์ไต์อยู่กึ่งกลางคอลัมน์ คือ ชนิด B และ BB

#### 4.3.2 ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซึน

การสกัดสารละลายอาหาราซึนจากวัสดุดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของสารอาหาราซึนที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุดูดซับแต่ละชนิด โดยหลังจากกระบวนการดูดซับในชุดทดลองแบบคอลัมน์ จะนำวัสดุดูดซับแต่ละชนิดมาสกัดด้วยสารเอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) และอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซึนที่หลงเหลือจากการดูดซับในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับที่	วัสดุดูดซับ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
1	A – ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอนาร์ไต์เป็นเนื้อเดียวกัน ในอัตราส่วน 1.0 : 1.0	1.9809	
2	AA - ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอนาร์ไต์เป็นเนื้อ เดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 0.5	0.1250	
3	B – ดินจากพื้นที่การเกษตรโดยมี ลีโอนาร์ไต์อยู่กึ่งกลางชั้น ในอัตราส่วน 1.0 : 1.0	Top soil	0.0409
		LND	1.0138
		Bottom of soil	0.0292
4	BB - ดินจากพื้นที่การเกษตรโดยมี ลีโอนาร์ไต์อยู่กึ่งกลางชั้น ในอัตราส่วน 1.0 : 0.5	Top soil	0.0001
		LND	0.0013
		Bottom of soil	0.0000
5	C – ดินจากพื้นที่การเกษตร	0.0000	
6	D - ทรายออกตาวา (Ottawa sand)	0.0000	

จากตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นเฉลี่ยคิดจากสารอาหาราซึนที่อยู่ในวัสดุดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์จะพบว่า หลังจากกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ ดินจากพื้นที่การเกษตรและทรายออกตาวา ไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซึน สำหรับดินจากพื้นที่การเกษตรที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับลีโอนาร์ไต์ในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 (A) มีค่าสารละลายอาหาราซึนปนเปื้อนอยู่มากกว่าวัสดุดูดซับชนิดที่ผสมเป็นเนื้อเดียวในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 (AA) แสดงว่าปริมาณของลีโอนาร์ไต์ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซึนมากกว่าดินจากพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว สำหรับดินที่มีลีโอนาร์ไต์อยู่บริเวณกึ่งกลางชั้นในอัตราส่วนที่เท่ากัน (B) พบว่าบริเวณชั้นของลีโอนาร์ไต์มีสารละลายอาหาราซึนมากที่สุด รองลงมาคือ ดินชั้นบน และชั้นล่างตามลำดับ เช่นเดียวกับชนิดที่ใช้ในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 (BB) ที่พบว่าลีโอนาร์ไต์ดูดซับสารละลายอาหาราซึนได้มากที่สุด

จากการศึกษาปริมาณสารละลายอาหารอินทรีย์ที่ตกค้างในวัสดุดูดซับ จะพบว่าลีโอนาร์ไต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าดินจากพื้นที่การเกษตร และทรายออกตาวา เนื่องจากลีโอนาร์ไต์ประกอบด้วยกรดฮิวมิกจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของดินก็มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าเป็นดินประเภทดินทรายจะเกิดการดูดซับสารได้ค่อนข้างน้อยกว่าดินประเภทดินเหนียว เนื่องจากดินเหนียวจะมีองค์ประกอบของฮิวมัสซึ่งจะทำให้มีความสามารถดูดซับได้ดีกว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้สูงกว่า ประกอบกับดินที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นประเภทดินทราย ทำให้ไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์หรืออาจจะเกิดได้แต่ในปริมาณที่น้อยมาก สำหรับทรายออกตาวา (Ottawa sand) จัดเป็นดินทรายที่มีขนาดและพื้นที่ผิวเท่ากันทั้งหมดดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบระหว่างวัสดุดูดซับแต่ละชนิดซึ่งจะพบว่าทรายออกตาวาไม่ดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารสีในการทดลองแบบแบตช์ (batch) โดยทำการศึกษา ระยะเวลาสัมผัส จลนพลศาสตร์ ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ รวมทั้งศึกษาการนำลิโอนาร์ไคต์มาประยุกต์ใช้ในชุดทดลองแบบคอลัมน์เพื่อทดสอบการดูดซับสารละลายอาหารสีร่วมกับดินจากพื้นที่การเกษตร จากการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 การศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์

5.1.1 จากการศึกษาคุณสมบัติจะพบว่า ลิโอนาร์ไคต์มีสารอินทรีย์วัตถุและค่าการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange capacity) ที่ค่อนข้างสูง คือ 40.53 เปอร์เซ็นต์ และ 59.89 cmol ต่อกิโลกรัม และพบว่าลิโอนาร์ไคต์มีค่าความเป็นกรดที่สูง คืออยู่ระหว่าง 2.3 ถึง 2.8 เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนและพื้นผิวพบว่า เป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) คือมีค่าเท่ากับ 21.648 นาโนเมตร

#### 5.2 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายอาหารสี

5.2.1 ระยะเวลาสัมผัสสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไคต์ คือ ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

5.2.2 การดูดซับของสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไคต์ มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาที่สมดุล การดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการดูดซับแบบเคมี ที่มีปัจจัยอื่น ๆ มาเกี่ยวข้อง อาทิ เช่น ค่า pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสาร เป็นต้น

#### 5.3 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสี

จากการนำลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันมาทดสอบการดูดซับสารละลายอาหารสี พบว่าความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้จากลักษณะของไอโซเทอม ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

5.3.1 ความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไคต์พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยมีค่าความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.143 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.879 และ

1.529 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ จะพบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช ซึ่งปริมาณของวัสดุดูดซับและค่าความเข้มข้นมีผลต่อค่าความสามารถการดูดซับสารละลายอาหารเสริม

5.3.2 ลีโอนาร์ไดต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารเสริมได้ค่อนข้างดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณสารอินทรีย์วัตถุและค่า CEC ที่ค่อนข้างสูง คือ 21.648 นาโนเมตร และ 59.89 cmol ต่อ กิโลกรัมตามลำดับ

5.3.3 สำหรับกลไกการดูดซับแบบกายภาพ อาจเกิดจากการแพร่กระจายของสารเข้าบริเวณรูพรุนของลีโอนาร์ไดต์ ส่วนกลไกการดูดซับแบบเคมี อาจเกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอมคู่ร่วมพันธะระหว่างสารอาหารเสริมและหมู่คาร์บอนิลของลีโอนาร์ไดต์

#### 5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารเสริม

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารเสริมด้วยลีโอนาร์ไดต์ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหารเสริม ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิ โดยทำการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ อธิบายได้ดังนี้

##### 5.4.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาหารเสริม

จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอาหารเสริมมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับสารด้วยลีโอนาร์ไดต์มากขึ้น โดยจะพบว่าความสามารถในการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลที่ความเข้มข้นสูง ๆ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารเสริมที่ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

##### 5.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ลีโอนาร์ไดต์มีความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารเสริมได้ดีที่สภาวะเป็นกรด โดยจะพบว่าที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ค่าความสามารถการดูดซับเท่ากับ 0.082 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งกลไกการดูดซับอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (protonation) ของกลุ่มเอมีน (amine group) บนอนุภาคของลีโอนาร์ไดต์ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิวของลีโอนาร์ไดต์ ทำให้สารอาหารเสริมอยู่รูปของไอออนมากขึ้น เกิดประจุบวกที่มากขึ้น จึงเกิดการดูดซับได้มากขึ้น

##### 5.4.3 อุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับ

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ค่าการดูดซับเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.034 มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากนั้นค่าการดูดซับเริ่มลดต่ำลงที่ อาจเป็นเพราะเกิดจากการคายซับของสารละลาย





ส่วนของการกำจัดและทำลาย อาทิเช่น การใช้กระบวนการ Photocatalytic, Photolysis, Biodegradation และ Incineration ร่วมกับการดูดซับด้วย

5.6.6 ควรรีศึกษาการเปลี่ยนรูป (Metabolite) ของสารละลายอาหาราซีนที่ถูกดูดซับด้วย



## รายการอ้างอิง

- กนกวรรณ พาลูกา. (2553). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยธาตุอาหารของดินร่วนในพื้นที่ปลูกข้าวโตเลี้ยงสัตว์ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัด เพชรบูรณ์. ปรินญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไกรศรี ทองเสมียน (2551). ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2548). **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 หน้า.
- เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Thailand Pesticide Alert Network: Thai-PAN). รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรปี พ.ศ.2558 และ 2557 [ออนไลน์] ได้จาก : <http://www.thaipan.org/node/826>
- จณิตตา สุกิจปาณีนิจ. (2557). ผลของกรดฮิวมิกที่สกัดจากลีโอนาร์โดต่อการเติบโตและปริมาณธาตุอาหารของอ้อย. ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พฤกษศาสตร์) สาขาพฤกษศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จันทร์จรัส เรียวเดชะ. (2553). โอกาสและทางเลือกของเกษตรกรบนเส้นทางสายโซ่อุปทาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : กรุงเทพฯฝ่ายเกษตร สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, เอส เอ็ม ทาวเวอร์. 312 หน้า.
- ชัยยศ ตั้งสฤณีกุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 736 หน้า.
- ณรรต สมจันทร์. (2557). การปรับปรุงคุณภาพลีโอนาร์โดสำหรับการผลิตปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 226 หน้า.
- ทศพล พรพรม. (2545). สารกำจัดวัชพืช : หลักการและกลไกการทำลาย. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 274 หน้า.
- ธวัชชัย รัตน์ชเลศ.(2540). เทคโนโลยีสารกำจัดวัชพืช (herbicide technology). กรุงเทพฯ : ไร่เขียว.259 หน้า.
- นัทธีรา สรรมณี กนกพร สว่างแจ้ง มยุรา อารีกิจเสรี และ กมลชนก พาณิชการ. (2553). บทบาทของกรดฮิวมิกและฟัลวิกในดินของพื้นที่เกษตรกรรมต่อการดูดซับจุลธาตุอาหารในดิน

**และโลหะที่เป็นพิษ : กรณีศึกษาภูมิภาคตะวันตกของประเทศไทย.** สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปรินทร เต็มถาวรศิลป์ (2551). **การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ตอง และไม้หมาจู.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี ขนิษฐา แก้วอิน รวิรินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิท ปิยะมังคลา. (2557).

**การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบแบบตรึงในคอลัมน์.** วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24. 398-408.

พิมพ์ภาค หีบเงิน.(2551). **การย่อยสลายและการบำบัดทางชีวภาพของดินที่มีการปนเปื้อนสาร อาทราซีน.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย ธนพล เพ็ญรัตน์. (2557). **โครงการการย่อยสลาย พาราควอทในดินด้วยทรายซิลิกา-แลคเคส และประยุกต์ใช้กับถังกรองในระบบผลิตน้ำ สะอาด.** รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยนครสวรรค์.

วิวัฒน์ ไตรธิรกุล พลยุทธ ศุขสมิติ และ จินดารัตน์ ไทกมลธรรม. (2552). **เอกสารงานวิจัยการเตรียม สารประกอบเกลือฮิวเมตจากดินปนถ่านหิน จากเหมืองลิกไนต์ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง. สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3 (ภาคเหนือ) กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม.**

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 327 หน้า.

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูรณ์. (2552). **ระบบบำบัดน้ำเสีย wastewater treatment system.** กรุงเทพฯ : ท้อป. 560 หน้า.

สายรุ้ง นพขุนทด.(2554). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน.** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี.

สุกัญญา จันท์เจ๊ก. (2550). **การตกค้างของสารเอ็นโดซัลแฟน และสารอะทราซีนในน้ำและ ตะกอนดินในน้ำป่าสัก.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุชาดา กรุณา. (2548). **การดูดซับสารอะทราซีนและอะลาคลอร์ใน 4 ชุดดิน.** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา โภชาตม. (2556). **สมบัติทางเคมีและการแจกกระจายของอาร์ซีนิกในลีโอนาร์ไต์จาก เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.** ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา) สาขา ปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สุนา สิริพัฒนากุล. (2551). การกำจัดอาหาราซีนด้วยวิธีการทางชีววิทยาจากน้ำสำหรับ  
เกษตรกรรมซึมผ่านดินด้วยเซลล์อิสระและเซลล์ตรึง. ปรินญาวิทยาศาสตร์ดุสิต  
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- สำนักงานเศรษฐกิจและการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ . ปริมาณและการนำเข้าสู่สารกำจัด  
ศัตรูพืช. [ออนไลน์] ได้จาก : [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=146](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=146)
- อรอนงค์ ผิววิล ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา นพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ บงกชรัตน์ ปิதியนต์ และน้ำเย็น  
ศิริพัฒน์. (2554). การตกค้างและเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชอะทราซีนในดินปลูก  
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตะกอนดิน และน้ำทำบริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ อำเภอน้ำหนาว จังหวัด  
เพชรบูรณ์. การประชุมวิจัยวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 49, 1-4 กุมภาพันธ์,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ .
- อุษา จักรราช พรพนา โพธินาม และ ฤดี โคตรชารี. (2557). คุณสมบัติทางเคมี ชีวภาพและการสะสม  
กรดฮิวมิกในดินที่ได้รับพืชปุ๋ยสดในระบบการปลูกมันสำปะหลัง. แก่นเกษตร 42,  
693-699.
- Ausavasukhi, A., Kamposoen, C., & Kengnok, O. (2016). Adsorption characteristics of  
Congo red on carbonized leonardite. *Journal of Cleaner Production*. 143,  
506-514.
- Aslam, M., Alam, M. & Rais, S. (2013). Detection of atrazine and simazine in ground  
water of Delhi using high performance liquid chromatography with ultraviolet  
detector. *Current World Environmental*. 8, 323-329.
- Belhachemi, M. & Addoun. F. (2011). Comparative adsorption isotherms and modeling  
of methylene blue onto activated carbons. *Appl Water Sci*. 1, 111-117.
- Blanes, P., Sala, L., García, S., Gonzalez, J., Frascaroh, M., Harada, M., Cong, C., Niwa, Y.,  
Matulewicz, C., Prado H., Cortadi, A. & Gattuso, M. (2011). Biosorption of  
trivalentchromium from aqueous solution by red seaweed *Polysiphonia  
nigrescens*. *Journal of Water Resource and Protection*. 3, 832-843.
- Canieren, O., Karaguzwl, C. & Aydin, A. (2017). Effect of physical pre-enrichment on  
humic Substance recovery from leonardite. *Physicochem. Probl. Miner.  
Process*. 53, 502-514.
- Chammui, Y., Sooksamiti, P., Naksata, W., Thiansem, S., & Arqueropanyo, O. (2014).  
Removal of arsenic from aqueous solution by adsorption on Leonardite.  
*Chemical Engineering Journal*. 240, 202-210.
- Chingombe, P., Saha, B. & Wakeman, R.J. (2006). Sorption of atrazine on conventional  
and surface modified activated carbons. *Journal of Colloid and Interface  
Science*. 302, 408-416.

- Doulati, B. & Sozudogru OK, S. (2011). Comparison of kinetics desorption of heavy metals (Cd,Zn and Pb) in soils formed from different parent materials in the presence of leonardite. **Soil And Water Pollution**.
- Douglass, J., Radosevich, M. & Tuovinen, O.(2015). Molecular analysis of atrazine-degrading bacteria and catabolic genes in the water column and sediment of a created wetland in an agriculture /urban watershed. **Ecological Engineering**. 83, 405-412.
- Fares, A., Awal, R. & Bayabil, H. (2017). Soil water content sensor response to organic matter content under laboratory conditions. **Sensors**. 16, 1239, 1-11.
- Farruggia, F., Rossmeisl, C., Hetrick, J. & Biscoe, M.(2016). Refined ecological risk assessment for atrazine. United States Environmental Protection Agency. Washinton D.C. USA.
- Gibert, O. Hernandez, M. Vilanova, E. and Cornella, O. (2012). Guidelining protocol for soil column experiments assessing fate and transport of trace organics. The research from the European Union seventh framework programme under Grant Agreement no. 308339. DEMEAU.
- Ghosh, R. and Singh, N., (2012). Managing metolachlor and atrazine leaching losses using lignite fly ash. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 84, 243-248.
- Hayes, T., Haston, K., Tsui, M., Hoang, A., Haeffele, C. & Vonk, A. (2003). Atrazine-induced hermaphroditism at 0.1 ppb in American Leopard Frogs : Laboratory and field evidence. **Environmental Health Perspectives**. 111, 568-575.
- Jamil, T., Allah, T., Ibrahim, H. & Saleh, T. (2010). Adsorption and isothermal model of atrazine by zeolite prepared from Egyptian kaolin. **Solid State Sciences**. 13, 198-203.
- Kearney, P and Roberts, T. (1998). Pesticide remediation in soils and water. New York : Wiley.
- Katanyoo, S., Naksata, W., Sooksamiti, P., Thiansem, S. & Arquero, O. (2011). Adsorption of Zinc ion on leonardite prepared from coal waste. **Oriental Journal of Chemistry**. 28, 373-378.
- Khamdahsag, P. (2011). Improvement of ZnO by textural modification and metal doping for atrazine photocatalysis. Degree of doctor of Philosophy program in Environmental Management. Chulalongkorn University.

- Kovaios, L., Paraskeva, C., & Koutsoukos, P. (2011). Adsorption of atrazine from aqueous electrolyte solutions on humic acid and silica. **Journal of Colloid and Interface Science**, 356, 277-285.
- Lao, C., Zeledon, Z., Gamisans, X. & Sole, M. (2005). Sorption of Cd (II) and Pb (II) from aqueous solution by a low-rank coal (leonardite). **Separation and Purification Technology**. 45, 79-85.
- Lapworth, D., Goody, D., Harrison, I., Kim, A. & Vane, C. (2005). Collidal phase transport of pesticides : A review with special reference to major UK aquifers. British Geological Survey Internal Report, IR/05/131. 31 pp.
- Lesan, H. M. and Bhandari, A. (2000). Evolution of atrazine binding to surface soils. **Conference on Hazardous Waste Research**. 76-89.
- Llado, J., Lao-Luque, C., Ruiz, B. & Fuente, E. (2015). Role of activated carbon properties in atrazine and paracetamol adsorption equilibrium and kinetics. **Process safety and Environmental**. 95, 51-59.
- Lloyd, Dhania. (2000). Preparation of pH buffer solution. AnalChem Resources. Available from : <http://delloyd.50megs.com/>
- Lupul, I., Yperman, J., Carleer, R. & Gryglewicz, G. (2015). Adsorption of atrazine on hemp stem-based activated carbons with different surface chemistry. **Adsorption**. 21, 489-498.
- Markandeya., Shukla, S.P. & Kisku, G.C. (2015). Linear and non-linear kinetic modeling for adsorption of disperse dye in batch process. **Research Journal of Environmental Toxicology**, 9, 320-331.
- Masset, S., Monteil-Rivera, F., Dupont, L., Dumonceau, J. & Aplincourt, M. (2000). Influence of humic acid on sorption of Co (II), Sr (II), and Se (IV) on goethite. **Agronomie**, 20, 525-535.
- Metcalf and Eddy Inc. (2003). Waste water engineering: treatment and reuse. 4<sup>th</sup> edition. Boston, McGraw-Hill.
- Mishra, R., Mohammad, N. & Roychoudhary, N. (2015). Soil pollution: Causes, effects and control. P.O. RFRC, India. **Tropical Forest Research Institute**. 13.
- Murphy, I. (2009). Uptake and degradation of atrazine utilizing phytoremediation technology with Switchgrass (*Panicum virgatum*). Master thesis of science. Toxicology. Iowa State University.
- Olivella, M.A., Sole, M., Gorchs, R., Lao, C & Delasheras, F. (2011). Geochemical characterization of a spanish leonardite coal. **Arch.Min.Sci**, 56, 789-804.

- Piccin, J., Dotto, G. & Pinto, L. (2011). Adsorption isotherms and thermochemical data of FD&C red n° 40 binding by chitosan. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. 28, 295-304.
- Pelekani, C. and Snoeyink, V. (2001). A kinetic and equilibrium study of competitive adsorption between atrazine and congo red dye on activated carbon: the importance of pore size distribution. **Carbon** 39, 25-37.
- Price, A., Kelton, J. & Sarunaite, L. (2015). Herbicides, Physiology of Action, and Safety. **Intech chapters published**. 342 p. Available from : <http://www.intechopen.com/books/how-to-link/herbicides-physiology-of-action-and-safety>
- Qasem, J. (2013). Herbicide Resistant Weeds: The technology and weed Management, herbicides current Research and Case Studies in Use, Dr. Andrew Price (Ed.), **InTech**. Available from : <https://www.intechopen.com/books/herbicides-current-research-and-case-studies-in-use/herbicide-resistant-weeds-the-technology-and-weed-management>.
- Qian, S., Ding, W., Li, Y., Liu, G., Sun, J. & Ding, Q. (2016). Characterization of humic acids derived from Leonardite using a solid-state NMR spectroscopy and effects of humic acids on growth and nutrient uptake of snap bean. **Chemical Speciation & Bioavailability**. 27, 156-161.
- Rambabu, N., Guzman, C., Soltan, J., & Himabindu, V. (2011). Adsorption characteristics of atrazine on granulated activated carbon and carbon nanotubes. **Chem. Eng. Technol.** 35, 272-280.
- Ratanaprommanee, C. & Shutsrirung, A. (2014). X-ray and scanning electron microscopy characterization of leonardite. **iGRC**. 113-117.
- Ross, A. and Lembi, A. (2009). Applied weed science: including the ecology and management of invasive plants. 3<sup>rd</sup> edition. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall. 561 p.
- Sakulthaew, C., Chokeyaroenrat, C., Poapolathep, A., Satapanajaru, T. & poapolathep, S. (2017). **Chemosphere**. 184, 1168-1174.
- Salvestrini, S., Sagliano, P., Lovino, P., Capasso, S & Colella, C. (2010). Atrazine adsorption by acid-activated zeolite-rich tuffs. **Applied Clay Science**. 49, 330-335.

- Sardans, M., Gamisans, X., Dorado, A. & Luque, C. (2016). Exploring arsenic adsorption at low concentration onto modified leonardite. **Water Air Soil Pollutant.** 227:128.
- Sebata, E., Moyo, M., Guyo, U., Ngano, N.P., Nyamunda, B.C., Chigondo, F., Chitsa, V. & Shumba, M. (2013). Adsorptive removal of atrazine from aqueous solution using Bambara groundnut hulls (*Vigna Subterranean*). *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2, 312-321.
- Shirmardi, M., Alavi, N., Lima, E., Takdastan, A., Mahvi, A., & Babaei, A. (2016). Removal of Atrazine as an organic micro-pollutant from aqueous solutions: a comparative study. **Process Safety and Environmental Protection**, 103, 23-35.
- Shukla, M. & Kisku, G.C. (2015). Linear and non-linear kinetic modeling for adsorption of disperse dye in batch process. **Research Journal of Environmental Toxicology.** 9, 320-331.
- Topp, E. and Smith, W. (1992). Sorption of the herbicides atrazine and metolachlor to selected plastics and silicone rubber. **Journal of Environmental Quality.** 21, 316-317.
- Wabel, M., Nasser, G., Turki, A.M. & Saeid, M.H. (2010). Behavior of atrazine and malathion pesticides in soil : Sorption and Degradation process. **Journal of Applied Science.** 10, 1740-1747.
- Wang G. (2003). Temperature dependence on activated carbon adsorption of atrazine. **Journal of The Chinese institute of environmental engineering.** 13, 45-53.
- Wang G. (2005). Effects of natural organic matter on adsorption capacity for atrazine by activated carbon. **Journal of the Chinese institute of environmental engineering.** 15, 81-89.
- Wang, X., Guo, X., Yang, Y., Tao, S. & Xing, B. (2011). Sorption mechanisms of phenanthrene, lindane and atrazine with various humic acid fractions from a single soil sample. **Environ.Sci.Technol.** 45, 2124-2130.
- Wu, M., Quirindongo, M., Sass, J., & Wetzler, A. (2009). How the EPA is ignoring atrazine contamination in surface and drinking water in the central United States **Natural Resources Defense Council.**
- Xu, Z., Cai, J., & Pan, B. (2013). Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. **Journal of Zhejiang University- SCIENCE A ( Applied Physics & Engineering).** 14, 155-176.



- Yong, R., Pusch, R. & Nakano M. (2010). Containment of high-level radioactive and hazardous solid wastes with clay barriers. **Spon press**. USA and Canada.
- Yue, L., Ge, C., Feng, D., Yu, H., Deng, H. & Fu, B. (2017). Adsorption- desorption behavior of atrazine on agricultural soil in China. **Journal of Environmental Sciences**. 57, 180-189.
- Zadaka, D., Nir, S., Radain, A. & Mishael, Y. (2009). Atrazine removal from water by polycation-clay composites : Effect of dissolved organic matter and comparison to activated carbon. **Water Research**. 43, 677-683.
- Zeledon-Toruno, Z., Luque, C., Heras, F. & Sole-Sardans, M. (2007). Removal of PAHs from water using an immature coal (Ironardite). **Chemosphere**. 67, 505-512.
- Zengin G. (2013). Effective removal of zine from an aqueous solution using Turkish leonardite-clinoptiolite mixture as a sorbent. **Environ Earth Sci**. 70, 3031-3041.



ภาคผนวก ก

ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 5 อันดับแรก  
ของประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 5 อันดับแรกของประเทศไทย  
ในปี พ.ศ.2557 และ 2558

ปี/ลำดับที่ (Year/No.)	ชื่อสามัญ (Common name)	ปริมาณสาร (kg)	มูลค่า (ล้านบาท)
ปี 2559 :			
1	Glyphosate- isopropylammonium	63,166,211.70	4,531
2	Paraquat dichloride	21,325,348.00	2,712
3	2,4-D-dimethylammonium	6,790,052.00	466
4	atrazine	4,104,988.00	576
5	ametryn	3,597,009.00	583
ปี 2558 :			
1	Glyphosate- isopropylammonium	38,518,328.00	2,039
2	Paraquat dichloride	21,765,581.00	2,035
3	2,4-D-dimethylammonium	4,335,664.00	273
4	atrazine	3,391,209.00	444
5	ametryn	3,346,267.00	491

ที่มา : เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (Thailand Pesticide Alert Network: Thai-PAN)

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของลีโอนาร์โดต์กับค่ามาตรฐานและงานวิจัยอื่น ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลิโอนาร์ไตต์

ธาตุประกอบทางเคมี	งานวิจัยที่ใช้ลิโอนาร์ไตต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง							งานวิจัยที่ใช้ลิโอนาร์ไตต์จากแหล่งอื่น ๆ			ค่ามาตรฐานจาก IHSS
	จากการทดลอง	Ausavasukhi et al., 2015	Chammui et al., (2014)	Rattnarommanee <sup>(a)</sup> et al., (2014)	Tandon (2012)	Katanyoo et al., (2011)	สุชาติดา (2556)	Gordes Mining Company, Turkey อ้างอิงจาก Zengin (2013)	Balina,CZ อ้างอิงจาก Doulati et al (2011) (CZ ; Czech Republic)	Torrelapaja, Spain อ้างอิงจาก M.A Olivella et al (2011)	
% C	16.54	-	-	-	-	-	-	50-60	55.33	47.8	-
% H	3.12	-	-	-	-	-	-	2.5-5.0	4.66	3.0	-
% O	26.67	-	-	-	-	-	-	30-50	30.72	46.0	-
% N	0.88	-	-	-	-	-	0.59	2.0-3.0	1.14	0.8	1.11
% S	4.35	-	-	-	-	-	3.50	0.3-0.5	-	2.4	0.97
% P	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	0.004
% K	1.45	-	-	-	-	0.25	0.50	1.10 <sup>(b)</sup>	-	-	0.02
% Fe	6.97	-	-	-	-	0.62	10.55	0.86 <sup>(b)</sup>	-	-	0.48
% Ca	1.97	-	-	-	-	0.88	2.27	1.42 <sup>(b)</sup>	-	-	1.68
% Mg	-	-	-	-	-	0.36	0.39	-	-	-	0.36

ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลิโอนาร์ไตต์ (ต่อ)

ธาตุประกอบทางเคมี	งานวิจัยที่ใช้ลิโอนาร์ไตต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง							งานวิจัยที่ใช้ลิโอนาร์ไตต์จากแหล่งอื่น ๆ			ค่ามาตรฐานจาก IHSS
	จากการทดลอง	Ausavasukhi et al., 2015	Chammui et al., (2014)	Rattanarommanee <sup>(a)</sup> et al., (2014)	Tandon (2012)	Katanyoo et al., (2011)	สุชาติดา (2556)	Gordes Mining Company, Turkey อ้างอิงจาก Zengin (2013)	Balina,CZ อ้างอิงจาก Doulati et al (2011) (CZ ; Czech Republic)	Torrelapaja, Spain อ้างอิงจาก M.A Olivella et al (2011)	
SiO <sub>2</sub> (%)	<b>43.89</b>	19.13 ± 2.83	44.37	35.19	35.00	29.445	-	-	-	-	-
SO <sub>3</sub> (%)	<b>21.80</b>	9.65 ± 1.16	17.72	-	-	-	-	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<b>19.18</b>	9.73 ± 0.54	20.75	10.85	17.00	15.527	-	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	<b>9.96</b>	5.52 ± 0.33	10.62	7.00	3.00	4.528	-	-	-	-	-
CaO (%)	<b>2.76</b>	2.07 ± 0.87	2.24	4.77	1.00	2.561	-	-	-	-	-
TiO <sub>2</sub> (%)	0.61	0.38 ± 0.07	0.67	0.46	-	0.244	-	-	-	-	-
MgO (%)	-	0.88 ± 0.12	1.58	0.92	2.00	3.537	-	-	-	-	-

(a) ค่าเฉลี่ยของลิโอนาร์ไตต์จากแม่เมาะแหล่งที่ 2 และ 3

(b) ค่าที่ได้เกิดจากการนำลิโอนาร์ไตต์มาผสมกับ Clinoptilolite (แร่ธาตุชนิดหนึ่งในซีโอไลต์)

ค่ามาตรฐานจาก IHSS อ้างอิงจากงานวิจัยของ สุชาติดา (2556)

ตารางที่ ข. 2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลีโอนาร์ไต์กับค่ามาตรฐานจาก International Humic Substances Society (IHSS) และงานวิจัยอื่น ๆ

Leonardite source	Reference	Moisture (%)	pH <sup>(a)</sup>	CEC (meq/100 g)	Organic matter (%)
IHSS Standard	Pertuit et al. (2001) อ้างอิงงานวิจัยของ สุชาติ (2556)	11.85	3.58	95.51	65.68
New Maxico	Pertuit et al (2001)	12.41	4.18	63.78	27.53
Utha-mined	Dudley et al (2004) (อ้างอิง สุชาติ, 2556)	13.07	3.90	114.80	55.0
SEPHU <sup>®</sup> , Zaragoza , Spain	Lao et al (2005)	30	-	2.87	-
SEPHU <sup>®</sup> , Zaragoza , Spain	Zeledon et al (2007)	30	-	287	62
Torrelapaja ,Spain	Olivella et al (2011)	16.4	-	-	62
Gordes Mining Company, Manisa, Turkey	Zengon G (2013)	25-30	6-6.5	-	65
<b>งานวิจัยที่ใช้ลีโอนาร์ไต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง</b>					
การทดลอง		8.13	2.85	59.89	21.62
อ้างอิงจาก ณธรรศ , 2557		-	2.82	-	30.80
อ้างอิงจาก จณิตตา , 2557		-	2.91	57.00	38.10
อ้างอิงจาก สุชาติ, 2556		-	3.90	55.20	27.10
อ้างอิงจาก Ratanaprommanee et al., 2014		-	2.44 <sup>(b)</sup>	-	25.14 <sup>(b)</sup>
อ้างอิงจาก Chammui et al.,2014		8.47 – 8.72	-	-	31.68 <sup>(c)</sup>
อ้างอิงจาก Ausavasukhi et al ., 2015		9.44 ± 1.31	-	-	41.05 ± 1.16

(a) pH meter (Leonardite : H<sub>2</sub>O)

(b) ค่าเฉลี่ยของลีโอนาร์ไต์จากแม่เมาะแหล่งที่ 2 และ 3

(c) Organic matter and moisture



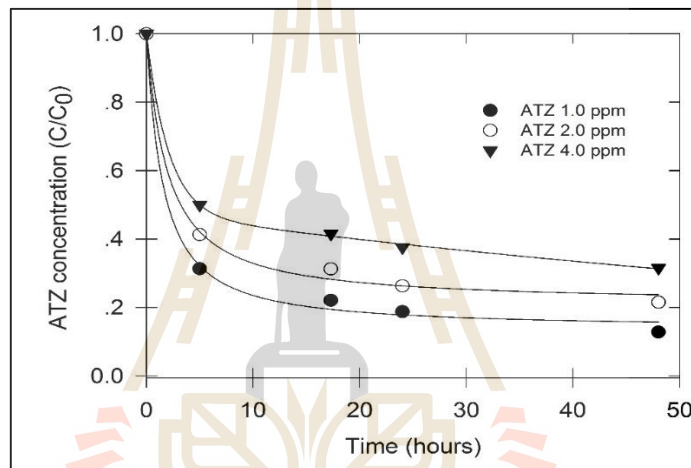
ภาคผนวก ค

การศึกษาระยะเวลาสมดุลงการดูดซับของสารละลายอาหารจีน  
(Preliminary test)



### การทดลองระยะเวลาสมดุลการดูดซับของสารละลายอาหาราซีน (preliminary test)

การศึกษาระยะเวลาสมดุลและเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับของสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์โดต์ได้ทำการทดลองที่ระยะเวลา 5 , 17.30 , 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นของสารอาหาราซีนที่ทดลองคือ 1.0 , 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณลีโอนาร์โดต์ที่ใช้ทดลองคือ 0.4 กรัม โดยทำการเขย่าด้วยเครื่อง reciprocating shaker ที่ความเร็วรอบ 200 rpm ภายใต้อุณหภูมิห้อง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ ค.1



รูปที่ ค.1 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสารละลายอาหาราซีนโดยใช้ลีโอนาร์โดต์เป็นวัสดุดูดซับ



ภาคผนวก ง

ข้อมูลและรายละเอียดจากการศึกษาแบบแบตช์  
(Batch experiments)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 1. จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลิโอนาร์ไต์ (LND)

ตาราง ง.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลาย

อาหารซิน 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ไต์ (LND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.0804	0.0544	0.0933	0.0600	0.0523	0.0600	0.0402	0.0381	0.0418
4	0.0877	0.0690	0.0973	0.0682	0.0587	0.0711	0.0440	0.0400	0.0448
8	0.1004	0.0829	0.1099	0.0723	0.0678	0.0749	0.0479	0.0444	0.0459
12	0.1085	0.0935	0.1181	0.0760	0.0722	0.0788	0.0480	0.0458	0.0474
22	0.1216	0.1135	0.1307	0.0822	0.0785	0.0852	0.0499	0.0486	0.0510
28	0.1348	0.1183	0.1399	0.0872	0.0801	0.0887	0.0501	0.0495	0.0513
34	0.1391	0.1257	0.1365	0.0881	0.0827	0.0888	0.0518	0.0504	0.0510
46	0.1629	0.1225	0.1516	0.0893	0.0841	0.0915	0.0523	0.0504	0.0527
58	0.1259	0.1302	0.1578	0.0944	0.0902	0.0954	0.0519	0.0520	0.0535
73	0.1594	0.1382	0.1626	0.0859	0.0908	0.0978	0.0564	0.0525	0.0545
ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)	$q_t$ (1)	$q_t$ (2)	$q_t$ (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.1296	0.0703	0.1643	0.1020	0.0876	0.1202	0.0740	0.0706	0.0784
4	0.1397	0.1047	0.1817	0.1109	0.0892	0.1284	0.0806	0.0748	0.0846
8	0.1644	0.1257	0.1874	0.1205	0.1033	0.1328	0.0840	0.0770	0.0870
12	0.1656	0.1354	0.2020	0.1263	0.1158	0.1468	0.0863	0.0795	0.0899
22	0.1935	0.1712	0.2312	0.1421	0.1310	0.1560	0.0940	0.0865	0.0944
28	0.2278	0.1837	0.2400	0.1579	0.1372	0.1621	0.0979	0.0901	0.0965
34	0.2406	0.1957	0.2443	0.1615	0.1479	0.1666	0.0981	0.0932	0.0973
46	0.2450	0.1798	0.2588	0.1659	0.1454	0.1700	0.0990	0.0926	0.0991
58	0.2158	0.2006	0.2760	0.1594	0.1540	0.1773	0.1001	0.0958	0.1006
73	0.2376	0.2175	0.2841	0.1687	0.1600	0.1835	0.1015	0.0984	0.1035

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

ตาราง ง.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลาย

อาหาราชีน 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ได์ที่ (LND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	24.87	36.74	21.44	33.33	38.23	33.31	49.75	52.49	47.83
4	47.49	60.43	42.82	61.14	71.00	58.64	94.64	104.05	92.93
8	86.58	104.95	79.14	120.21	128.22	116.14	181.64	195.85	189.62
12	125.63	145.78	115.44	179.34	188.79	173.12	283.82	297.73	287.76
22	215.36	230.76	200.34	318.64	333.64	307.23	525.34	539.07	513.79
28	259.61	295.78	250.25	401.35	437.04	394.58	698.09	706.89	682.22
34	321.73	355.84	327.80	507.60	540.87	503.65	862.87	888.11	877.27
46	392.16	521.33	421.46	715.74	759.31	698.59	1222.39	1267.49	1212.31
58	677.64	654.90	540.60	903.14	945.19	894.12	1644.17	1641.82	1595.39
73	715.39	825.64	701.46	1328.28	1255.81	1166.77	2020.79	2170.98	2093.47

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)	t/q <sub>t</sub> (1)	t/q <sub>t</sub> (2)	t/q <sub>t</sub> (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	15.43	28.45	12.18	19.61	22.83	16.63	27.04	28.31	25.52
4	28.62	38.19	22.01	36.06	44.83	31.14	49.61	53.45	47.28
8	48.66	63.64	42.70	66.37	77.46	60.26	95.20	103.88	91.95
12	72.47	88.66	59.39	94.98	103.67	81.76	139.03	150.90	133.42
22	113.67	128.49	95.16	154.84	168.00	141.02	233.92	254.25	232.99
28	122.90	152.43	116.68	177.27	204.15	172.69	286.14	310.92	290.03
34	141.29	173.74	139.15	210.46	229.88	204.02	346.70	364.76	349.48
46	187.78	255.89	177.74	277.27	316.43	270.51	464.66	496.95	464.02
58	268.77	289.18	210.12	363.89	376.61	327.09	579.68	605.18	576.81
73	307.22	335.57	256.94	432.80	456.16	397.80	719.10	741.89	705.03

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

## 2. ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไต์ (LND)

ตาราง ง.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไต์ (LND)

ความ เข้มข้น	$1/q_e$			$1/C_e$		
	1	2	3	1	2	3
1.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	14.0686	14.9858	19.2329	2.5455	2.3383	1.8330
	22.9182	23.4603	26.0099	3.7970	3.5779	2.8873
	31.2062	31.2538	34.8333	5.1969	5.1655	3.6697
	39.4973	38.8423	43.8070	6.6086	7.2645	4.3286
	47.1729	47.1585	53.3279	8.8062	8.8264	4.7299
	55.5190	55.7825	63.1870	10.3166	9.8995	4.9542
	63.8352	64.0417	73.2348	11.8707	11.4851	5.0804
2.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	8.7391	8.3914	8.4389	0.9801	1.0180	1.0125
	11.8219	12.1741	12.6321	1.7174	1.6092	1.4946
	16.0466	16.2519	16.5846	2.2725	2.1789	2.0468
	20.3999	20.1245	20.9076	2.7244	2.8936	2.4682
	24.1171	24.0120	25.5338	3.6086	3.7056	2.7090
	28.1189	28.1762	29.4742	4.3734	4.3080	3.2558
	32.2875	32.3468	34.1476	4.9684	4.8911	3.3812
4.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	4.8607	4.6582	4.5005	0.4712	0.4876	0.5024
	7.1386	6.9292	6.7558	0.6550	0.6854	0.7144
	9.1765	9.0054	9.5148	0.8675	0.9066	0.8028
	11.0161	11.1739	10.9988	1.1584	1.1058	1.1645
	13.1181	13.3776	13.2403	1.3911	1.2853	1.3386
	15.1405	15.4049	15.2532	1.6728	1.5332	1.6098
	17.1360	17.5163	17.5238	1.9995	1.7511	1.7469

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

ตาราง ง.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไต์ (LND)

ความ เข้มข้น	Log $q_e$			Log $C_e$		
	1	2	3	1	2	3
1.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	-1.1483	-1.1757	-1.2840	-0.4058	-0.3689	-0.2632
	-1.3602	-1.3703	-1.4151	-0.5794	-0.5536	-0.4605
	-1.4942	-1.4949	-1.5420	-0.7157	-0.7131	-0.5646
	-1.5966	-1.5893	-1.6415	-0.8201	-0.8612	-0.6363
	-1.6737	-1.6736	-1.7270	-0.9448	-0.9458	-0.6748
	-1.7444	-1.7465	-1.8006	-1.0135	-0.9956	-0.6950
	-1.8051	-1.8065	-1.8647	-1.0745	-1.0601	-0.7059
2.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	-0.9415	-0.9238	-0.9263	0.0087	-0.0077	-0.0054
	-1.0727	-1.0854	-1.1015	-0.2349	-0.2066	-0.1745
	-1.2054	-1.2109	-1.2197	-0.3565	-0.3382	-0.3111
	-1.3096	-1.3037	-1.3203	-0.4353	-0.4614	-0.3924
	-1.3823	-1.3804	-1.4071	-0.5573	-0.5689	-0.4328
	-1.4490	-1.4499	-1.4694	-0.6408	-0.6343	-0.5127
	-1.5090	-1.5098	-1.5334	-0.6962	-0.6894	-0.5291
4.0 มิลลิกรัมต่อ ลิตร	-0.6867	-0.6682	-0.6533	0.3268	0.3119	0.2990
	-0.8536	-0.8407	-0.8297	0.1838	0.1641	0.1461
	-0.9627	-0.9545	-0.9784	0.0617	0.0426	0.0954
	-1.0420	-1.0482	-1.0413	-0.0639	-0.0437	-0.0662
	-1.1179	-1.1264	-1.1219	-0.1433	-0.1090	-0.1267
	-1.1801	-1.1877	-1.1834	-0.2234	-0.1856	-0.2068
	-1.2339	-1.2434	-1.2436	-0.3009	-0.2433	-0.2423

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

### 3. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไต์

ตาราง ง.5 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$			$C_e$		
	1	2	3	1	2	3
0.25	0.0111	0.0118	0.0116	0.2252	0.2142	0.2175
0.5	0.0207	0.0179	0.0191	0.2958	0.3400	0.3216
1.0	0.0424	0.0425	0.0422	0.4631	0.4605	0.4647
2.0	0.0688	0.0704	0.0663	0.8515	0.8241	0.8911
4.0	0.1082	0.0947	0.0996	2.1589	2.3726	2.2942
8.0	0.1346	0.1523	0.1432	5.7406	5.4602	5.6088

ตาราง ง.6 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไป

pH	$q_e$			$C_e$		
	1	2	3	1	2	3
3	0.0625	0.0765	0.0695	0.7988	0.5741	0.6854
5	0.0684	0.0812	0.0954	0.7015	0.4983	0.2729
7	0.0665	0.0823	0.0725	0.7322	0.4825	0.6369
9	0.0691	0.0787	0.0700	0.6933	0.5325	0.6774
11	0.0575	0.0807	0.0702	0.8731	0.5035	0.6764

ตาราง ง.7 ค่า pH ทั้งก่อนและหลังดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วยลีโอนาร์ไคต์

pH	ก่อนการดูดซับ				หลังการดูดซับ			
	1	2	3	control	1	2	3	control
3	3.87	3.87	3.87	3.87	3.07	3.05	3.05	4.10
5	5.33	5.33	5.33	5.33	3.09	3.07	3.06	5.57
7	7.25	7.25	7.25	7.25	3.00	3.03	3.01	7.27
9	9.71	9.71	9.71	9.71	3.12	3.12	3.12	9.52
11	11.08	11.08	11.08	11.08	3.39	3.39	3.42	10.93

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

ตาราง ง.8 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ความเข้มข้นอาหารขึ้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร			ความเข้มข้นอาหารขึ้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร		
	1	2	3	1	2	3
15	13.3168	13.3721	13.4920	8.4783	7.7029	7.6146
20	23.7321	21.1207	23.0250	21.3552	20.5058	19.6366
25	24.4704	18.0830	24.1496	22.8430	19.9052	21.4940
30	33.2884	35.8255	37.0941	22.9305	23.8337	23.2198
35	28.5802	25.0432	30.4750	15.9100	20.7434	22.1363
40	14.4593	15.5366	14.1285	11.2302	11.4060	10.5268
45	20.0307	19.0557	19.4364	11.5190	10.7022	11.9624
50	22.5410	22.9930	22.2644	14.1939	14.5442	14.3783

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

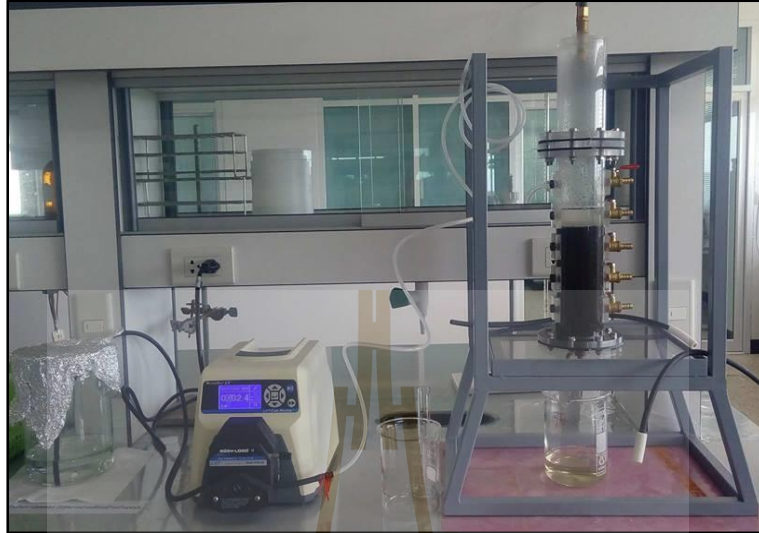




ภาคผนวก จ

ลักษณะการทดลองแบบคอลัมน์

ลักษณะการทดลองแบบคอลัมน์ด้วยวัสดุดูดซับแบบต่าง ๆ



รูปที่ จ.1 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีนโดยใช้ลิโอนาร์ไต้ผสมกับดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.2 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีนโดยใช้ลิโอนาร์ไต้อยู่ระหว่างกลางชั้นกับดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.3 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารซินด้วยดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.4 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารซินด้วยทรายออกตาวา



ภาคผนวก ฉ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอล์มน์

## ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอลัมน์

### 1. การบรรจุวัสดุดูดซับในคอลัมน์ทดลอง

ในการทดลองแบบคอลัมน์จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นรวมของวัสดุดูดซับค่า  $\rho_v$  (volumetric water content) และปริมาตรช่องว่างของรูพรุนเพื่อใช้ประกอบในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ ข้อมูลดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ ๑.1 โดยปริมาตรของรูพรุนสามารถหาได้จากสมการที่ ๑.1 และปริมาตรของคอลัมน์ที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับ 1,290 ลบ.ซม.

$$\text{ปริมาตรของรูพรุน} = \theta_v \times \text{ปริมาตรของคอลัมน์} \quad (๑.1)$$

ตารางที่ ๑.1 ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุดูดซับประเภทต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุดูดซับ	Bulk density	$\theta_v$	ปริมาตรของรูพรุน
	ค่าที่ได้ (กรัมต่อลบ.ซม.)	ค่าที่ได้ (กรัมต่อลบ.ซม.)	ค่าที่ได้ (ลบ.ซม.)
1. ลีโอนาร์ไดต์	0.7356	0.0930	119.970
2. ดินจากพื้นที่การเกษตร	0.6967	0.0956	123.324
3. ทรายออตตาวา (ottawa sand)	0.7048	0.0935	120.615

จากตาราง ๑.1 เมื่อเปรียบเทียบค่า bulk density และปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดจะพบว่าปริมาณของวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์แสดงได้ดังตาราง ๑.2

ตารางที่ ฉ.2 ปริมาณวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์

วัสดุดูดซับ	อัตราส่วน	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
ชนิด A	Soil : LND = 1.0 : 1.0	923.83
ชนิด AA	Soil : LND = 1.0 : 0.5	686.60
ชนิด B	Soil : LND : Soil = 0.5 : 1.0 : 0.5	923.83
ชนิด BB	Soil : LND : Soil = 0.5 : 0.5 : 0.5	699.15
ชนิด C	-	898.74
ชนิด D	-	909.19

หมายเหตุ ชนิด A และ AA คือ ดินในพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอนาร์ไคต์เป็นเนื้อเดียวกัน  
 ชนิด B และ BB คือ ดินในพื้นที่การเกษตรที่มีลีโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลาง  
 ชนิด C คือ ดินในพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว  
 ชนิด D คือ ทรายออกตาวา (ottawa sand) ในพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว

## 2. การหาอัตราไหล

การหาอัตราไหล หาได้จากสมการที่ ฉ.2 โดยอ้างอิงเวลาจะค่าการดูดซับที่สมดุลคือ 24 ชั่วโมงและปริมาตรของคอลัมน์เท่ากับ 1,290 ลบ.ซม.

$$HRT = V/Q$$

(ฉ.2)

เมื่อแทนค่าสมการจะได้ 1,290 (ลบ.ซม.) ต่อ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 53.75 ลบ.ซม.ต่อชั่วโมง หรือ 0.89 มิลลิลิตรต่อนาที แต่จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าวัสดุดูดซับชนิด A และ AA เกิดการอุดตันภายในบริเวณคอลัมน์ ประกอบกับงานวิจัยของ อรอนงค์และคณะ (2554) พบว่าค่าการซึมน้ำของดินที่ทำการเพาะปลูกข้าวโพดอยู่ระหว่าง 1.57 ถึง 6.05 เมตรต่อชั่วโมง สำหรับดินล่าง (15-30 เมตร) และดินบน (0-15 เมตร) ดังนั้นจึงเลือกอัตราไหลให้ครอบคลุมสำหรับการทดลองที่จะใช้ลีโอนาร์ไคต์อยู่บริเวณกึ่งกลางของคอลัมน์ด้วย ซึ่งอัตราไหลที่เลือกใช้ในการทดลองคือ 2.4 มิลลิลิตรต่อนาที



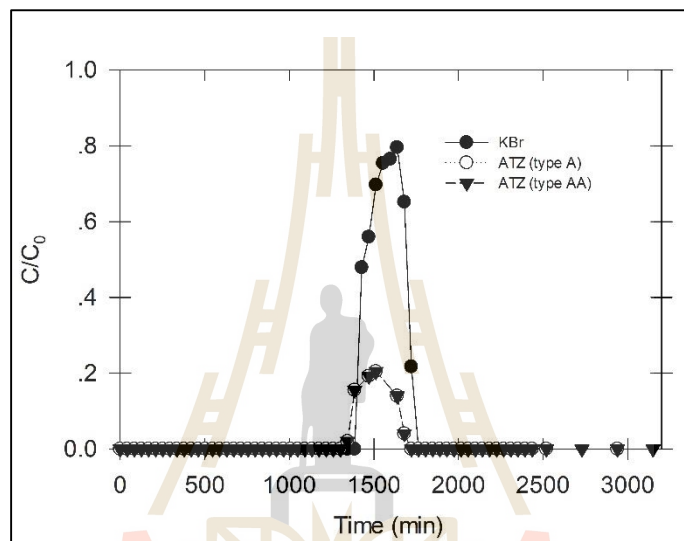
ภาคผนวก ข

ลักษณะของ Breakthrough

### ลักษณะของ Breakthrough curve ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

#### 1. ดินในพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอเนาร์ไต์เป็นเนื้อเดียวกัน

เป็นการผสมลีโอเนาร์ไต์กับดินจากพื้นที่การเกษตรให้เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 และ 1.0 : 1.0 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ช.1

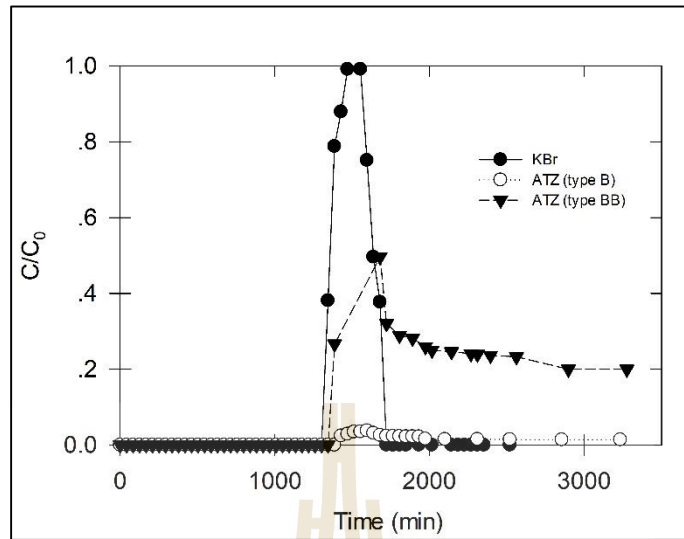


รูปที่ ช.1 ลักษณะของ breakthrough curve ที่ลีโอเนาร์ไต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินในพื้นที่การเกษตร

#### 2. ดินในพื้นที่การเกษตรที่มีลีโอเนาร์ไต์อยู่ระหว่างกลาง

เป็นการผสมลีโอเนาร์ไต์กับดินจากพื้นที่การเกษตรโดยให้ลีโอเนาร์ไต์อยู่บริเวณกึ่งกลางของชั้นคอลัมน์ทดลองในอัตราส่วน 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ช.2

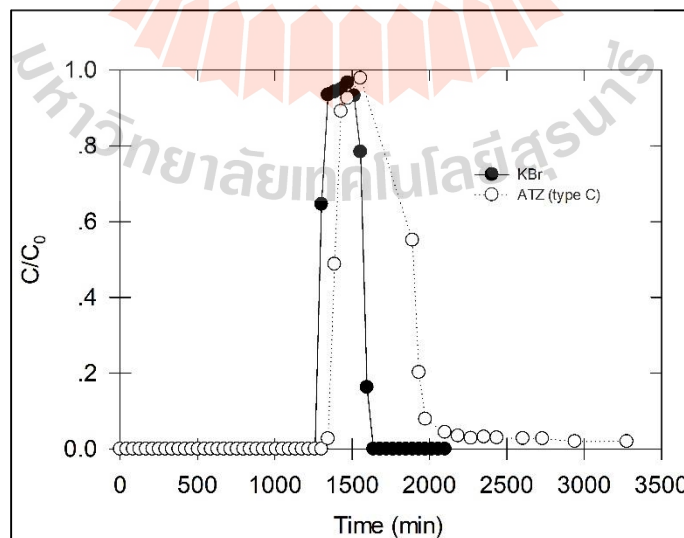




รูปที่ ข.2 ลักษณะของ breakthrough curve ที่ลิโอนาร์โดตอยู่กึ่งกลางชั้นระหว่างดินในพื้นที่การเกษตร

### 3. ดินในพื้นที่การเกษตร

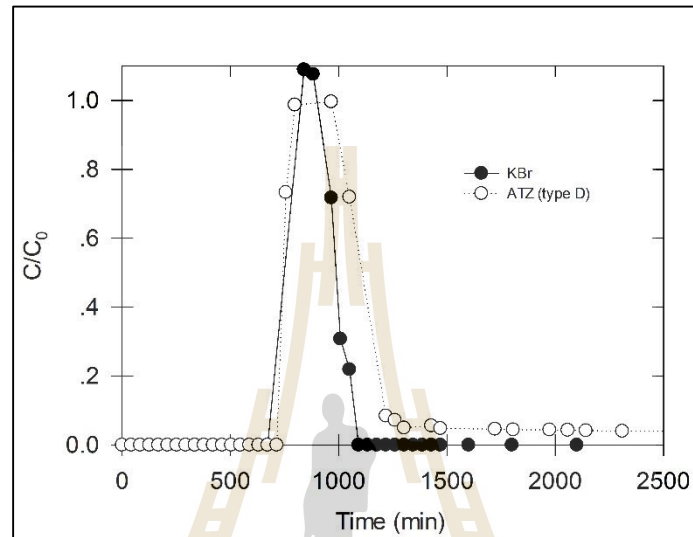
เป็นการบรรจุดินจากพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ลักษณะของ breakthrough curve ของดินจากพื้นที่การเกษตร

#### 4. ทรายออตตาวา (Ottawa sand)

เป็นการบรรจุทรายออตตาวา (Ottawa sand) เพียงอย่างเดียว กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ช.4



รูปที่ ช.4 ลักษณะของ breakthrough curve ของทรายออตตาวา (Ottawa sand)

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีผ่านวัสดุดูดซับชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน  
ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
1	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
2	42	0.0000	42	0.0000	42	0.0000
3	84	0.0000	84	0.0000	84	0.0000
4	126	0.0000	126	0.0000	126	0.0000
5	168	0.0000	168	0.0000	168	0.0000
6	210	0.0000	210	0.0000	210	0.0000
7	252	0.0000	252	0.0000	252	0.0000
8	294	0.0000	294	0.0000	294	0.0000
9	336	0.0000	336	0.0000	336	0.0000
10	378	0.0000	378	0.0000	378	0.0000
11	420	0.0000	420	0.0000	420	0.0000
12	462	0.0000	462	0.0000	462	0.0000
13	504	0.0000	504	0.0000	504	0.0000
14	546	0.0000	546	0.0000	546	0.0000
15	588	0.0000	588	0.0000	588	0.0000
16	630	0.0000	630	0.0000	630	0.0000
17	672	0.0000	672	0.0000	672	0.0000
18	714	0.0000	714	0.0000	714	0.0000
19	756	0.0000	756	0.0000	756	0.0000
20	798	0.0000	798	0.0000	798	0.0000
21	840	0.0000	840	0.0000	840	0.0000
22	882	0.0000	882	0.0000	882	0.0000
23	924	0.0000	924	0.0000	924	0.0000

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
24	966	0.0000	966	0.0000	966	0.0000
25	1008	0.0000	1008	0.0000	1008	0.0000
26	1050	0.0000	1050	0.0000	1050	0.0000
27	1092	0.0000	1092	0.0000	1092	0.0000
28	1134	0.0000	1134	0.0000	1134	0.0000
29	1176	0.0000	1176	0.0000	1176	0.0000
30	1218	0.0000	1218	0.0000	1218	0.0000
31	1260	0.0000	1260	0.0000	1260	0.0000
32	1302	0.0000	1302	0.0000	1302	0.0000
33	1344	0.0000	1344	0.0000	1344	0.0202
34	1386	0.0000	1386	0.0000	1386	0.1552
35	1428	0.4788	1428	0.0000	1470	0.1923
36	1470	0.5594	1470	0.0000	1512	0.2046
37	1512	0.6970	1512	0.0000	1638	0.1398
38	1554	0.7539	1554	0.0000	1680	0.0404
39	1596	0.7646	1596	0.0500	1722	0.0000
40	1638	0.7957	1638	0.0608	1764	0.0000
41	1680	0.6516	1680	0.0840	1806	0.0000
42	1722	0.2171	1722	0.0957	1848	0.0000
43	1764	0.0000	1764	0.1138	1890	0.0000
44	1806	0.0000	1806	0.0636	1932	0.0000
45	1848	0.0000	1848	0.0424	1974	0.0000
46	1890	0.0000	1932	0.0405	2016	0.0000
47	1932	0.0000	2016	0.0399	2058	0.0000
48	1974	0.0000	2142	0.0394	2100	0.0000
49	2016	0.0000	2184	0.0392	2142	0.0000

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
50	2058	0.0000	2604	0.0390	2184	0.0000
51	2100	0.0000	3318	0.0389	2226	0.0000
52	-	-	-	-	2268	0.0000
53	-	-	-	-	2310	0.0000
54	-	-	-	-	2352	0.0000
55	-	-	-	-	2394	0.0000
56	-	-	-	-	2436	0.0000
57	-	-	-	-	2520	0.0000
58	-	-	-	-	2730	0.0000
59	-	-	-	-	2940	0.0000
60	-	-	-	-	3150	0.0000
61	-	-	-	-	3360	0.0000

หมายเหตุ

KBr คือ สารติดตาม โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น = 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารละลายอาหารซีซีมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

วัสดุชนิด A คือ ดินจากการเกษตรและลีโอนาร์โดต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน

1.0 : 1.0

วัสดุชนิด A คือ ดินจากการเกษตรและลีโอนาร์โดต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน

1.0 : 0.5

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีผ่านวัสดุดูดซับชนิดมีลิโอนาร์ไดต์อยู่ระหว่างกลางชั้น ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		B		BB	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
1	0	0.0000	0	0.0000	0	0.0000
2	42	0.0000	42	0.0000	42	0.0000
3	84	0.0000	84	0.0000	84	0.0000
4	126	0.0000	126	0.0000	126	0.0000
5	168	0.0000	168	0.0000	168	0.0000
6	210	0.0000	210	0.0000	210	0.0000
7	252	0.0000	252	0.0000	252	0.0000
8	294	0.0000	294	0.0000	294	0.0000
9	336	0.0000	336	0.0000	336	0.0000
10	378	0.0000	378	0.0000	378	0.0000
11	420	0.0000	420	0.0000	420	0.0000
12	462	0.0000	462	0.0000	462	0.0000
13	504	0.0000	504	0.0000	504	0.0000
14	546	0.0000	546	0.0000	546	0.0000
15	588	0.0000	588	0.0000	588	0.0000
16	630	0.0000	630	0.0000	630	0.0000
17	672	0.0000	672	0.0000	672	0.0000
18	714	0.0000	714	0.0000	714	0.0000
19	756	0.0000	756	0.0000	756	0.0000
20	798	0.0000	798	0.0000	798	0.0000
21	840	0.0000	840	0.0000	840	0.0000
22	882	0.0000	882	0.0000	882	0.0000
23	924	0.0000	924	0.0000	924	0.0000

ลำดับ	KBr		B		BB	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
24	966	0.0000	966	0.0000	966	0.0000
25	1008	0.0000	1008	0.0000	1008	0
26	1050	0.0000	1050	0.0000	1050	0
27	1092	0.0000	1092	0.0000	1092	0
28	1134	0.0000	1134	0.0000	1134	0
29	1176	0.0000	1176	0.0000	1176	0
30	1218	0.0000	1218	0.0000	1218	0
31	1260	0.0000	1260	0.0000	1260	0
32	1302	0.0000	1302	0.0000	1302	0
33	1344	0.3811	1344	0.0000	1344	0
34	1386	0.7879	1386	0.0000	1386	0.2666
35	1428	0.8792	1428	0.0241	1680	0.4963
36	1470	0.9914	1470	0.0288	1806	0.2892
37	1512	1.0153	1512	0.0345	1890	0.2817
38	1554	0.9916	1554	0.0350	1974	0.2592
39	1596	0.7513	1596	0.0377	2016	0.2500
40	1638	0.4963	1638	0.0314	2142	0.2462
41	1680	0.3771	1680	0.0254	2268	0.2408
42	1722	0.0000	1722	0.0233	2310	0.2393
43	1764	0.0000	1764	0.0229	2394	0.2365
44	1806	0.0000	1806	0.0226	2562	0.2329
45	1848	0.0000	1848	0.0222	2898	0.2000
46	1932	0.0000	1890	0.0221	3276	0.2000
47	2016	0.0000	1932	0.0220	-	-
48	2142	0.0000	1974	0.0158	-	-
49	2184	0.0000	2100	0.0150	-	-

ลำดับ	KBr		B		BB	
	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$	Time (min)	$C_e/C_0$
50	2226	0.0000	2310	0.0149	-	-
51	2268	0.0000	2520	0.0145	-	-
52	2310	0.0000	2856	0.0140	-	-
53	2352	0.0000	3234	0.0140	-	-

หมายเหตุ KBr คือ สารติดตาม โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น = 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร  
 สารละลายอาหารซีซีมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร  
 วัสดุชนิด B คือ ดินจากการเกษตรและมีลีโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกึ่งกลางของคอลัมน์ที่  
 อัตราส่วน 1.0 : 1.0  
 วัสดุชนิด BB คือ ดินจากการเกษตรและมีลีโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกึ่งกลางของคอลัมน์ที่  
 อัตราส่วน 1.0 : 0.5



ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหาราซีนผ่านดินจากพื้นที่การเกษตรในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		C	
	Time (min)	Ce/C <sub>0</sub>	Time (min)	Ce/C <sub>0</sub>
1	0	0.0000	0	0.0000
2	42	0.0000	42	0.0000
3	84	0.0000	84	0.0000
4	126	0.0000	126	0.0000
5	168	0.0000	168	0.0000
6	210	0.0000	210	0.0000
7	252	0.0000	252	0.0000
8	294	0.0000	294	0.0000
9	336	0.0000	336	0.0000
10	378	0.0000	378	0.0000
11	420	0.0000	420	0.0000
12	462	0.0000	462	0.0000
13	504	0.0000	504	0.0000
14	546	0.0000	546	0.0000
15	588	0.0000	588	0.0000
16	630	0.0000	630	0.0000
17	672	0.0000	672	0.0000
18	714	0.0000	714	0.0000
19	756	0.0000	756	0.0000
20	798	0.0000	798	0.0000
21	840	0.0000	840	0.0000
22	882	0.0000	882	0.0000
23	924	0.0000	924	0.0000
24	966	0.0000	966	0.0000

22	1008	0.0000	1008	0.0000
23	1050	0.0000	1050	0.0000
24	1092	0.0000	1092	0.0000
25	1134	0.0000	1134	0.0000
26	1176	0.0000	1176	0.0000
27	1218	0.0000	1218	0.0000
28	1260	0.0000	1260	0.0000
29	1302	0.6458	1302	0.0000
30	1344	0.9343	1344	0.0274
31	1386	0.9424	1386	0.4878
32	1428	0.9490	1428	0.8912
33	1470	0.9665	1470	0.9254
34	1512	0.9322	1554	0.9783
35	1554	0.7840	1890	0.5512
36	1596	0.1627	1932	0.2021
37	1638	0.0000	1974	0.0788
38	1680	0.0000	2100	0.0441
39	1722	0.0000	2184	0.0347
40	1764	0.0000	2268	0.0285
41	1806	0.0000	2352	0.0318
42	1848	0.0000	2436	0.0294
43	1890	0.0000	2604	0.0279
44	1932	0.0000	2730	0.0273
45	1974	0.0000	2940	0.0200
46	2016	0.0000	3276	0.0200
47	2058	0.0000	-	-
48	2100	0.0000	-	-

หมายเหตุ KBr คือ สารติดตาม โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น = 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารละลายอาหารซีซีมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

วัสดุชนิด C คือ ดินจากการเกษตร

ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีผ่านทรายออกตัววาในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		D	
	Time (min)	Ce/C <sub>0</sub>	Time (min)	Ce/C <sub>0</sub>
1	0	0.0000	0	0.0000
2	42	0.0000	42	0.0000
3	84	0.0000	84	0.0000
4	126	0.0000	126	0.0000
5	168	0.0000	168	0.0000
6	210	0.0000	210	0.0000
7	252	0.0000	252	0.0000
8	294	0.0000	294	0.0000
9	336	0.0000	336	0.0000
10	378	0.0000	378	0.0000
11	420	0.0000	420	0.0000
12	462	0.0000	462	0.0000
13	504	0.0000	504	0.0000
14	546	0.0000	546	0.0000
15	588	0.0000	588	0.0000
16	630	0.0000	630	0.0000
17	672	0.0000	672	0.0000
18	714	1.1268	714	0.0000
19	756	1.2386	756	0.7332
20	798	1.2554	798	0.9871
21	840	1.0892	840	1.0843
22	882	1.0760	882	1.0690
23	924	1.0144	924	0.9962
24	966	0.7172	966	0.0000

25	1008	0.3074	1050	0.7196
26	1050	0.2187	1092	0.1986
27	1092	0.0000	1134	0.1304
28	1134	0.0000	1218	0.0845
29	1176	0.0000	1260	0.0717
30	1218	0.0000	1302	0.0495
31	1260	0.0000	1428	0.0557
32	1302	0.0000	1470	0.0480
33	1344	0.0000	1722	0.0460
34	1386	0.0000	1806	0.0441
35	1428	0.0000	1974	0.0437
36	1470	0.0000	2058	0.0428
37	1600	0.0000	2142	0.0417
38	1800	0.0000	-	-
39	2100	0.0000	-	-

**หมายเหตุ**

KBr คือ สารติดตาม โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น = 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

สารละลายอาหารซีซีมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

วัสดุชนิด D คือ ทรายออตตาวา (ottawa sand)



## การดูดซับสารอาหารอินทรีย์กับวัสดุที่ใช้ในการทดลองคอลัมน์

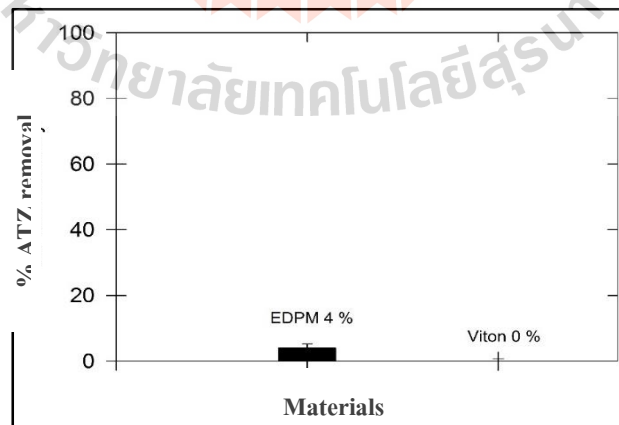
การทดลองนี้เป็นการทดสอบวัสดุดูดซับที่จะนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจสำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยการทดลองจะบรรจุสารดูดซับในคอลัมน์และปล่อยสารละลายที่ต้องการบำบัดให้ไหลผ่านบริเวณคอลัมน์ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องไม่ดูดซับกับสารละลายอาหารอินทรีย์เพราะอาจจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลองได้ ซึ่งการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดลองอธิบายได้ดังนี้

### 1. ชนิดของยาง EDPM และยาง Viton ที่ใช้ประกอบหน้าแปลนของคอลัมน์

จากการศึกษาวัสดุที่ใช้ในการทำคอลัมน์ที่อาจส่งผลต่อการดูดซับของสารละลายอาหารอินทรีย์ ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุสองชนิด ได้แก่ EDPM (ethylene propylene diene monomer rubber) และ Viton ที่ความเข้มข้นของสารอาหารอินทรีย์ 4 ppm และทำการเขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า วัสดุ EDPM มีการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ 4 % ส่วนวัสดุ Viton ไม่มีการดูดซับของสารละลายอาหารอินทรีย์ ดังแสดงในตารางและรูปที่ ซ.1

ตาราง ซ.1 ตารางการเปรียบเทียบวัสดุในการออกแบบการทดลองแบบคอลัมน์

Materials	Avg (%)	SD
EDPM	4.0	1.28
Viton	0.0	0.71

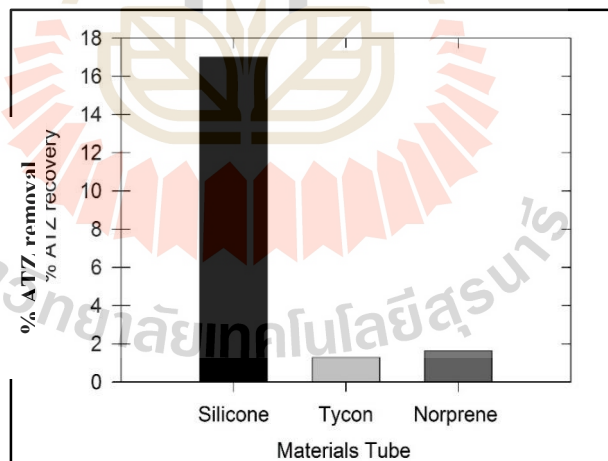


รูปที่ ซ.1 การเปรียบเทียบวัสดุหน้าแปลนในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์

จากการทดลองพบว่า วัสดุที่เลือกมาใช้ในการทำหน้าแปลนคอลัมน์ (หน้าแปลน คือบริเวณ ที่ต่อกับกระเปาะรับน้ำและบริเวณคอลัมน์) คือ ยางชนิดไวตัน (Viton) เนื่องจากไม่มีการดูดซับของสารละลายอาหารสีน ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาแบบ Column studies นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุชนิดนี้ยังสอดคล้องกับคำแนะนำของ Gibert *et al.*, (2012) ที่ได้อธิบายถึงการเลือกใช้วัสดุที่ทำการทดลองแบบ soil column กับสารอินทรีย์ สำหรับวัสดุที่ควรใช้ทดลองได้แก่ อะคริลิก, เทฟลอน (Polytetrafluoroethylene; PTFE), HDPE (High-density polyethylene) หรือ PEHD (polyethylene high-density) และ PP (Polypropylene or polypropene) เป็นต้น

## 2. สายยางดูดสาร

สำหรับการทดลองคอลัมน์นอกจากวัสดุที่ใช้ในการออกแบบจะส่งผลต่อการดูดซับของสารอาหารสีนแล้ว ชนิดของก็อาจส่งผลต่อการดูดซับในการทดลองได้เช่นกัน ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองทดสอบการดูดซับสารอาหารสีนเบื้องต้น โดยสายยางที่นำมาทดสอบมีทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ สายยางชนิด Silicone สายยางชนิด Norprene และสายยางชนิด Tycon โดยได้ทำการดูดซับกับสารละลายอาหารสีนที่ความเข้มข้น 1 ppm เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ซ.2



รูปที่ ซ.2 การดูดซับสารอาหารสีนของสายยางแต่ละชนิดที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

จากการทดลองที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสายยางชนิด silicone ดูดซับสารละลายอาหารสีนได้ 17.25 % เปอร์เซนต์ สายยางชนิด Tycon มีการดูดซับสารอาหารสีนได้ 1.29 เปอร์เซนต์ และ สายยางชนิด Norprene มีการดูดซับสารอาหารสีน 1.63 เปอร์เซนต์ ซึ่งวัสดุที่เป็นยางชนิดซิลิโคนมี

การดูดซับสารอาหารขึ้นได้มากที่สุด สอดคล้องกับคำแนะนำของ Gibert *et al.* (2012) และงานวิจัยของ Topp *et al.* (1992) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดซับของสารอาหารขึ้นและเมทาลอคอรัลกับวัสดุชนิดพลาสติก และยางที่เป็นชนิดซิลิโคน ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าสารกำจัดวัชพืชทั้งสองชนิดมีการดูดซับกับวัสดุกับยางชนิด ซิลิโคน (silicone) วัสดุชนิด Nalgene 180 และ Tygon R-3603 อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยดูดซับกับวัสดุ ชนิด อะคริลิก และ HDPE (High – density polyethylene)

ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ที่อาจจะส่งผลต่อดูดซับสารอาหารขึ้นในการทดลองแบบคอลัมน์ จึงจำเป็นต้องศึกษาวัสดุที่เป็นส่วนประกอบรวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งสายยางจัดเป็นวัสดุสำคัญเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีสารละลายไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวัสดุชนิดสายยางที่จะนำมาใช้กับปั๊มชนิดรีด ควรเป็นวัสดุชนิดอื่นที่ไม่ใช่สายซิลิโคน อย่างเช่น สายยางที่ทำจากวัสดุชนิด Norprene และ Tygon chemical เป็นต้น แต่เนื่องจากยาง Tygon มีราคาที่สูงกว่า การทดลองนี้จึงเลือกใช้ยางชนิด Norprene มาทดลอง





## ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

- การศึกษา/คุณวุฒิ : ปริญญาเอก :Ph.D. (Environmental management)  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปริญญาโท : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ปริญญาตรี : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ตำแหน่งปัจจุบัน : หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

### ประวัติการทำงาน

- เม.ย. 46 – ส.ค. 47 Research assistance of Assoc. Prof. Dr. Puangrat Kajitvichyanukul, King Mongkut' s University of Technology Thonburi, Bangkok,Thailand
- ก.พ. 49 - ส.ค. 50 Research Assistance, Center for Renewable Energy Science and Technology (CREST), Department of Chemistry & Biochemistry, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA.
- มี.ค. 51 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ผลงานทางวิชาการ /ผลงานวิจัย :

#### AWARDS

- Distinguished Research Award, Nanotechnology and Nanomaterial Safety Management, Thailand Research Fund (TRF), Thailand, 2014

#### A CHAPTER IN BOOK

- Puangrat Kajitvichyanukul, Jirapat Ananpattarachai, Apichon Watcharenwong, “Green Products: Production”, Encyclopedia of Environmental Management, Taylor and Francis: New York, Published online: 01 May 2013; 1253-1261.

## INTERNATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Chanrawangyot, S., Rattanachan, S.T., **Watcharenwong, A.** & Fangsuwannarak, T. (2017). Antibacterial Activity to ZnO Nanoparticles Coated on Ceramic Tiles Prepared by Sol-Gel Method. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2), 1-5.
- **Watcharenwong, A.**, Noguchi, S., Kawai, T., Ogata, T., Unuma, H., “Self-organized TiO<sub>2</sub> nanotubes and their photocatalytic performance measured using spin-trap ESR spectroscopy” , *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, Issue 43, 2013, Pages 91-97
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Anodic growth of nanoporous WO<sub>3</sub> films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion” , *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120, 2008
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Formation and Characterization of Self-Organized TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays by Pulse Anodization” *Journal of American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 965-974, 2008 (*impact factor = 9.907*)
- **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar, “Self-organized TiO<sub>2</sub> nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response” , *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195, 2007
- W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Titania nanotubes from pulse anodization of titanium foils” , *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149, 2007 (*impact factor = 3.388*)
- N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeewaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar, “Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process

Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response”, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355, 2006

#### BOOK SERIES

- Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 367-372, 2017
- Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 373-378, 2017
- Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Nanoporous Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization”, *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp 174-178, 2017

#### CONFERENCE SERIES

- A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammaroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 78 (2017) 012012 doi :10.1088/1755-1315/78/1/012012

#### RIGINAL AND NATIONAL JOURNAL PUBLICATIONS

- Apichon Watcharenwong, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae”, *Thai environmental engineering journal*, Vol. 31 No. 1, 2017
- P. Kajitvichyanukul, **A. Watcharenwong**, “Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using TiO<sub>2</sub> and Ultraviolet Light”, *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179, 2005

- P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface” *Songkhlanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53, 2005
- P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Structure and Photocatalytic characteristics of TiO<sub>2</sub> Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86, 2005
- P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai, “Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO<sub>2</sub> Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93, 2005
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) and Thallium (I)”. *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280, 2004
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface” *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95, 2004

#### REFEREED CONFERENCE PROCEEDINGS

- A Rittirat<sup>1</sup>, C Chokejaroenrat<sup>2</sup> and **A Watcharenwong<sup>1\*</sup>**, “Atrazine adsorption potential of Leonardite from Mae Moh power plant”, 2nd International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2017), Phuket, Thailand, 8-11 Dec, 2017.
- **A Watcharenwong**, A Kaeokan, R Rammroeng, P Upama and P Kajitvichyanukul, “Adsorption of paraquat dichloride by graphitic carbon nitride synthesized from melamine scraps” 8th International conference on Environmental Science and Technology, Madrid, Spain, 12 – 14 June, 2017
- **Apichon Watcharenwong**, Ariya Jindanant, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Characterization of Pulse Anodized Titanium Dioxide Nanotubes” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016

- **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Synthesis and Characterization of Monodisperse Magnetite Nanoparticles by Hydrothermal Method” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Narudon Saijaioup, Yotsapon Bailuang, and Puangrat Kajitvichyanukul, “Morphology and Wettability of Aluminium Oxide Film Prepared by Anodization” Proceeding of the International Conference on Material Science and Engineering Technology, Phuket, Thailand, 14-16 October, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Yotsapon Bailuang, Akira Rittirat, Patchapong Thamavate, and Supasan Chumjun, “Comparing the possibility of using cationic starch for removal of suspended particles and algae” Proceedings of the 15<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Bangkok, Thailand, 11-13 May, 2016
- **Apichon Watcharenwong**, Pimchanok Leuasongnoen, “Synthesis of rhombic ZnO rods using anodization technique and their properties”, GTSNN 2014 International Conference on “Safe and Sustainable Nanotechnology” (in conjunction with 4th German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology), Phitsanulok, Thailand, October 14<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>, 2014
- **Apichon Watcharenwong**, Shun Noguchi, Takahiro Kawai, Tateaki Ogata, and Hidero Unuma, “Self-Organized TiO<sub>2</sub> Nanotubes and Their Photocatalytic Performance Measured Using Spin-Trap ESR Spectroscopy”, Proceeding of 5<sup>th</sup> International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development, MECAHITECH’13, Bucharest, Romania, September 12<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>, 2013
- N. Bussabong, **A. Watcharenwong**, and S. Dararat, “Biogas Production from Ruzi grass in the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)”, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Agriculture and Environment Systems (ICAES'13), Pattaya (Thailand), April 23-24, 2013
- Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Preparation of TiO<sub>2</sub> Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International

- conference on Nanothailand 2012: Nanotechnology for the benefits of mankind, Khon Kaen, Thailand, April 9-11, 2012
- Arnanpapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “Photocatalytic Performance of Nanoporous  $WO_3$  for Carbon Monoxide Removal” Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) Penang, Malaysia, February 11-12, 2012
  - Arnanpapha Chuensab and **Apichon Watcharenwong** “Treatment of CO in Photocatalysis process using  $WO_3$ ” Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
  - Sarunya Tong-un and **Apichon Watcharenwong** “Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide” Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011
  - **Apichon Watcharenwong** , Wilaiwan Chanmanee , Norma R. de Tacconi, C. Ramannair Chenthamarakshan , Puangrat Kajitvichyanukul, Krishnan Rajeshwar, “Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite  $TiO_2-WO_3$  nanotubes obtained from pulse anodization using Ti foil”, Proceedings of the 1<sup>st</sup> international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008
  - **Watcharenwong Apichon**, Chanmanee Wilaiwan, Kajitvichyanukul Puangrat, Chenthamarakshan C. R., de Tacconi N. R., Rajeshwar Krishnan, “Anodic Growth of Nanoporous  $TiO_2$  and  $WO_3$  films: Influence of Process Variables on Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007
  - Krishnan Rajeshwar, Wilaiwan Chanmanee, **Apichon Watcharenwong**, C. Ramannair Chenthamarakshan, Puangrat Kajitvichyanukul, and Norma R. de Tacconi, “Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils”, Proceedings of the Twenty-

Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center  
Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007

- P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong** “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO<sub>2</sub> and ultraviolet light”, Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia- Pacific conference, Thailand, 2003
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Effect Of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension”, Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003
- P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface”, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003