

การศึกษาและใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน
(Leonardite) ในการดูดซับอาหารจีน



นางสาวอศิราภ์ ฤทธิรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**STUDY OF THE USE OF THE COAL POWER PLANT
BY – PRODUCT (LEONARDITE) TO ADSORB
ATRAZINE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

อภिरักษ์ ฤทธิรัตน์ : การศึกษาและใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Leonardite) ในการดูดซับอาหาราซีน (STUDY OF THE USE OF THE COAL POWER PLANT BY-PRODUCT (LEONARDITE) TO ADSORB ATRAZINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์, 135 หน้า

ลีโอนาร์ไคต์จัดเป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำเหมืองถ่านหินที่มีปริมาณมากและยากต่อการจัดการซึ่งในปัจจุบันนิยมนำลีโอนาร์ไคต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เพราะมีปริมาณกรดฮิวมิกที่สูง รวมถึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำลีโอนาร์ไคต์มาดูดซับสารละลายอาหาราซีนร่วมกับเป็นสารปรับปรุงดินในพื้นที่การเกษตร เนื่องจากปัจจุบันสารอาหาราซีนยังคงได้รับความนิยมในการกำจัดวัชพืชอยู่ ซึ่งสารอาหาราซีนจะส่งผลกระทบต่อดินและสามารถปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำและน้ำใต้ดินได้ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองได้แก่ (1) การศึกษาคุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์ (2) การทดลองแบบแบตช์ (batch studies) ประกอบไปด้วย การศึกษาระยะเวลาสัมผัส ค่าความสามารถในการดูดซับ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน และ (3) การทดลองแบบคอลัมน์ (column studies) ผลจากการศึกษาคุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์พบว่า ลีโอนาร์ไคต์มีสารอินทรีย์วัตถุและค่าการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกสูง มีค่าความเป็นกรดที่สูง สำหรับการศึกษาระยะเวลาสัมผัสพบว่า ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 24 ชั่วโมง สารละลายอาหาราซีนถูกดูดซับได้ดีที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ (8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในสถานะที่เป็นกรด (pH = 3) และที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งกลไกของการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไคต์อาจเป็นได้ทั้งสองกลไกคือ แบบทางกายภาพ และแบบเคมี สำหรับการศึกษาระยะเวลาสัมผัสพบว่าลีโอนาร์ไคต์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นดินในอัตราส่วน 1.0: 1.0 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาหาราซีน ได้ดีที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (รวม)

colrat
ด.ช. 985
donat.

AKIRA RITTIRAT : STUDY OF THE USE OF THE COAL POWER
PLANT BY-PRODUCT (LEONARDITE) TO ADSORB ATRAZINE.


THESIS ADVISOR : PROF. APICHON WATCHARENWONG, Ph.D.,
135 PP.

LEONARDITE/ADSORPTION/ATRAZINE/COLUMN STUDIES


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 it's 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.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature _____ 

Advisor's Signature _____ 

Advisor's Signature (co-Advisor) _____ 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร่ววงศ์ และ อาจารย์ ดร.ชนัดต์ โชคเจริญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ สกุกแห้ว ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตน์บวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราโช และ อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมถึงบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ คุณจรรยา วังศ์วัฒนา คุณสุชาดา อุดมพร คุณมานพ จรโคกกรวด และคุณสินีนากู นอกกระโทก (เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณนารี กลิ่นกลาง และคุณอลิษา ศรีคราม ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาศาखाวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก อบรมเลี้ยงดู และคอยเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

อภิรักษ์ ฤทธิรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 สมมติฐานงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชษฐ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลีโอนาร์โดต์ (Leonardite).....	4
2.2 สารฮิวมิก	6
2.3 กระบวนการคาร์โบไนเซชัน	7
2.4 สารกำจัดวัชพืช	7
2.4.1. ภาวะมลพิษของดิน	7
2.4.2 อนุภาคของดินและคุณสมบัติของสารละลายในดิน	8
2.4.3 พฤติกรรมและปฏิกิริยาของสารกำจัดวัชพืชในดิน	9
2.2.4. ความสัมพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ.....	10
2.4.5. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน	10
2.4.6. การเคลื่อนที่ และคงทนของสารในดิน	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 สารอาทราซีน (Atrazine)	12
2.5.1 การใช้สารอาทราซีนในการเกษตร	15
2.5.2 พฤติกรรมในพืช	15
2.5.3 สารอาทราซีนกับพฤติกรรมในดิน.....	15
2.5.4 การสลายตัวของสารอาทราซีน	16
2.5.5 ความเป็นพิษของสารอาทราซีน	16
2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	18
2.6.1 ลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	19
2.6.2 สมดุลการดูดซับสาร	21
2.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	21
2.6.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	28
2.6.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ	30
2.6.5.1 วัสดุดูดซับ.....	30
2.6.5.1 สารที่ถูกดูดซับ.....	31
3 ระเบียบวิธีศึกษา.....	32
3.1 การเตรียมสารละลายอาทราซีนและวัสดุดูดซับ	32
3.1.1 การเตรียมสารละลายอาทราซีน	32
3.1.2 การเตรียมวัสดุดูดซับ	32
3.2 การทดลองแบบแบตช์ (Batch studies)	35
3.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาทราซีน	35
3.2.2 การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ	36
3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาทราซีน	37
3.2.3.1 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารละลายอาทราซีนเริ่มต้น	37
3.2.3.2 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	37
3.2.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ.....	38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบแบตช์.....	38
3.4	การทดลองแบบคอลัมน์ (Column studies)	39
3.4.1	การศึกษา breakthrough curve	40
3.4.2	การสกัดวัสดุคูดซับ.....	40
3.5	การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบคอลัมน์	41
3.5.1	การศึกษา breakthrough curve	41
3.6	การวิเคราะห์สารละลายอาหาราจีนด้วยเทคนิค HPLC	41
3.7	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	42
3.7.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	42
3.7.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.7.3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล	45
4.1	การศึกษาคคุณลักษณะของวัสดุคูดซับ	45
4.1.1	คุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์ (LND)	45
4.1.2	คุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND).....	49
4.1.3	คุณลักษณะของดินจากพื้นที่การเกษตร	50
4.2	ผลการศึกษาแบบแบตช์ (Batch studies)	51
4.2.1	ระยะเวลาสัมพัทธ์	51
4.2.2	จลนพลศาสตร์การคูดซับสารละลายอาหาราจีน.....	53
4.2.3	ผลการศึกษาไอโซเทอมในการคูดซับสารละลายอาหาราจีน	58
4.2.4	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการคูดซับ.....	63
4.2.4.1	ค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหาราจีนเริ่มต้น	63
4.2.4.2	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	64
4.2.4.3	อุณหภูมิ	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column studies)	66
4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะ Breakthrough curve ในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	67
4.3.2 ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหารจีน	70
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	73
5.1 คุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการโโบโนเซนชัน.....	73
5.2 การศึกษาระยะเวลาสัมผัสและจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารจีน	73
5.3 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารจีน.....	74
5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ.....	74
5.4.1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหารจีนเริ่มต้น	74
5.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง	74
5.4.3 อุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับ	75
5.5 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายอาหารจีนในชุดทดลองคอลัมน์	75
5.5.1 การศึกษา Breakthrough curve ของสารละลายอาหารจีน	75
5.5.2 การศึกษาการสกัดสารอาหารจีนในวัตดูดซับ.....	75
5.6 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย	75
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุดในประเทศไทย.....	85
ภาคผนวก ข. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของลิโอนาร์ไคต์กับงานวิจัยอื่น ๆ	87
ภาคผนวก ค. การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับสารละลายอาหารจีน.....	91
ภาคผนวก ง. ข้อมูลและรายละเอียดการศึกษาแบบเบตซ์	93
ภาคผนวก จ. ลักษณะการทดลองแบบคอลัมน์.....	103
ภาคผนวก ฉ. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอลัมน์	106
ภาคผนวก ช. ลักษณะของ Breakthrough curve	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. การทดสอบวัสดุคูดซ์บ.....	124
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	128
ประวัติผู้เขียน	135



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะของสารอาหารพืช..... 13
2.2	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและเคมี..... 21
2.3	สมการไอโซเทอมแบบต่าง ๆ..... 27
3.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุดูดซับ 33
4.1	ตารางแสดงคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์..... 45
4.2	คุณลักษณะของดินจากพื้นที่การเกษตร..... 51
4.3	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 56
4.4	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 56
4.5	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการ คาร์บอนในเซชันที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร 57
4.6	ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการ คาร์บอนในเซชันที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร 57
4.7	ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ 59
4.8	ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ 61
4.9	ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่าน กระบวนการคาร์บอนในชั้น 62
4.10	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดซับสารละลายอาหารพืชด้วย วัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ..... 68
4.11	รายละเอียดการเดินระบบการทดลองแบบคอลัมน์..... 68
4.12	ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหารพืชที่หลงเหลือในชุดทดลองแบบคอลัมน์ 71
ก.1	ปริมาณและมูลค่าสารกำจัดวัชพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 5 อันดับแรกของประเทศไทย..... 86
ข.1	ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลิโอนาร์ไคต์ 88
ข.2	ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลิโอนาร์ไคต์กับค่ามาตรฐานและงานวิจัยอื่น ๆ 90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.1-4 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo first order และ pseudo second order	94
ง.5-8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช.....	98
ง.9 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารจีนกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป.....	101
ง.10 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารจีนกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไป	101
ง.11 ค่า pH ทั้งก่อนและหลังดูดซับสารละลายอาหารจีน.....	102
ง.12 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารจีนกับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป	102
ฉ.1 ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุดูดซับประเภทต่าง ๆ	107
ฉ.2 ปริมาณวัสดุดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์.....	108
ช.1-4 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารจีนผ่านวัสดุดูดซับในชุดทดลองแบบคอลัมน์.....	113
ช.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบวัสดุในการออกแบบการทดลองคอลัมน์	125

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะลิโอนาร์ไคต์4
2.2	กระบวนการการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช9
2.3	สารกำจัดวัชพืชในกลุ่ม S-triazine..... 13
2.4	แผนภาพแสดงกระบวนการดูดซับสารที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ.....20
2.5	แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ 23
3.1	รูปแบบและขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย..... 35
3.2	ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราจีน36
3.3	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารอาหาราจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์37
3.4	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารอาหาราจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่าน กระบวนการคาร์โบไนเซชัน 37
3.5	รายละเอียดชุดทดลอง column test..... 39
4.1	ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไคต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM 46
4.2	แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของลิโอนาร์ไคต์จากเครื่องมือวิเคราะห์แบบ XRD 47
4.3	ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันด้วย เครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM 50
4.4	ลักษณะดินจากพื้นที่ทำการเกษตร ในจังหวัดนครราชสีมา..... 50
4.5	ระยะเวลาสัมพัทธ์การดูดซับสารละลายอาหาราจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์..... 52
4.6	ระยะเวลาสัมพัทธ์การดูดซับสารละลายอาหาราจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการ คาร์โบไนเซชัน 53
4.7	จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo first order ในการดูดซับสารละลายอาหาราจีนที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 54
4.8	จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo first order ในการดูดซับสารละลายอาหาราจีนที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร 54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.9	จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo second order ในการดูดซับสารละลายอาหารสีที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	55
4.10	จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo first order ในการดูดซับสารละลายอาหารสีที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	55
4.11	ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์.....	58
4.12	ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์.....	60
4.13	ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน.....	61
4.14	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	63
4.15	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์ที่ pH ต่างกัน.....	64
4.16	ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไดต์ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	66
4.17	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสี.....	67
4.18	ลักษณะ breakthrough curve ในการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างกัน 70	
ค.1	ระยะเวลาสมมูลของการทดลองแบบ preliminary test.....	92
จ.1	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสี โดยใช้ลิโอนาร์ไดต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินในพื้นที่การเกษตร	104
จ.2	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสี โดยใช้ลิโอนาร์ไดต์อยู่กึ่งกลางชั้นระหว่างดินในพื้นที่การเกษตร.....	104
จ.3	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีของดินในพื้นที่การเกษตร	105
จ.4	การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสีของทรายออกตาวา	105
ช.1-4	ลักษณะ Breakthrough curve ของการทดลองแบบคอลัมน์.....	110
ช.1	กราฟการเปรียบเทียบวัสดุหน้าแปลนในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์	125
ช.2	กราฟการดูดซับสารอาหารสีของยางแต่ละชนิดที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อาชีพเกษตรกรรมนับว่าเป็นอาชีพหลักที่สำคัญของประเทศไทย โดยวัตถุดิบทางการเกษตรที่ส่งออกเป็นลำดับต้นๆ ได้แก่กลุ่มพืชไร่ อาทิเช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อยและน้ำตาล เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาผลผลิตทางการเกษตรให้เพียงพอและเพิ่มมากขึ้น เกษตรกรส่วนใหญ่จึงนิยมใช้สารเคมีในพื้นที่ทำการเกษตร (จันทร์จรัส และคณะ, 2553) ยกตัวอย่างเช่น การใช้สารอาหารซีนในการกำจัดวัชพืชของอ้อยและข้าวโพด ซึ่งสารอาหารซีนจัดเป็นสารเลือกทำลายชนิดใช้ทางดิน โดยใช้ฉีดพ่นคลุมดินทั้งก่อนและหลังปลูกพืช (Jamil et al., 2011 ; Wu et al., 2009) ซึ่งผลกระทบของสารอาหารซีนในสิ่งแวดล้อมคือ มีความคงทนในดินปานกลาง (1-2 ปี) สลายตัวยาก ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน และสามารถปนเปื้อนในแหล่งน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินได้ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเคมีของสมอง หัวใจ ตับ และระบบสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำและครึ่งบกครึ่งน้ำ รวมทั้งอาจก่อให้เกิดมะเร็งแก่มนุษย์ได้ (ทศพล พรพรหม, 2545) ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ US.EPA และ EU ได้ระงับใช้สารอาหารซีนในพื้นที่ทำการเกษตรและกำหนดเกณฑ์ความปลอดภัยสำหรับน้ำดื่ม (Maximum contaminant level , MCL) ให้มีการปนเปื้อนของสารอาหารซีนได้ไม่เกิน 3 และ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Ghosh et al., 2012 ; Zadaka et al., 2009 ; Wang, 2003) จากที่กล่าวมาในข้างต้นสารอาหารซีนสามารถเคลื่อนที่ในดินได้ง่ายและสามารถเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดินค่อนข้างสูง ดังนั้นควรหาแนวทางในการลดการปนเปื้อนและวิธีการป้องกันของสารอาหารซีนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นอีกหนึ่งวิธีที่อาจจะช่วยลดการปนเปื้อนของสารอาหารซีนในสิ่งแวดล้อมได้ (Jamil et al., 2011)

ลีโอนาร์ไคต์ หรือ low rank coal เป็นชั้นดินปนถ่านหินที่ถูกลอกซีไคต์ตามธรรมชาติ มีลักษณะนุ่มไม่แข็งตัว มีสีน้ำตาลอ่อนถึงดำ (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของถ่านหินลิกไนต์ตามธรรมชาติ และการแปรสภาพของถ่านหินลิกไนต์เป็นมูลแร่ลีโอนาร์ไคต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่พบได้ที่แหล่งถ่านหินลิกไนต์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการทำเหมืองและมีปริมาณค่อนข้างมาก ยากต่อการจัดการและกำจัด แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำลีโอนาร์ไคต์มาใช้ประโยชน์มากขึ้น 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 และการดูดซับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon; PAHs) จากแหล่งน้ำ (Zeledon-Toruno et al., 2007) รวมทั้งการนำลีโอนาร์ไคต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดินให้กับพื้นที่การเกษตรอีกด้วย

เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของลิกนินเป็นสารฮิวมิก (Humic acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง ภายในองค์ประกอบของลิกนินมีธาตุคาร์บอน 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนหลายกลุ่มฟังก์ชัน ได้แก่ กลุ่ม carboxyl, hydroxyl และ carbonyl ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง โดยคุณสมบัติของกรดฮิวมิกจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์แก่พืช และทำหน้าที่รักษาโครงสร้างของดินให้อุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) จากงานวิจัยของ จมิตตา (2557) พบว่าการนำลิกนินผสมกับปุ๋ยเคมีจะช่วยเพิ่มผลผลิตให้กับอ้อย นอกจากนี้ยังพบว่าลิกนินเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้ว และมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) (Zeledon-Toruno et al., 2007; Lao et al., 2005) รวมถึงภายในโครงสร้างหลักของลิกนินมีลักษณะเป็นอะโรมาติกส์พอลิเมอร์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งจากงานวิจัยของ Asavasukhi และ คณะ (2016) พบว่าลิกนินจัดเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีวงแหวนอะโรมาติกส์เป็นส่วนประกอบสามารถนำมาดูดซับสารอินทรีย์ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลิกนินนอกจากจะนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินแล้วยังสามารถดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำได้อีกด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการดูดซับสารอาหารอินทรีย์ด้วยลิกนิน เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นวิธีการที่ดำเนินการง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติของลิกนิน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ระหว่างลิกนินและลิกนินที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Carbonization) รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับ และปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายอาหารอินทรีย์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบำบัดสารอาหารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลิกนินและลิกนินที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพทางความร้อน (Carbonization) ในการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ด้วยลิกนิน

1.2.3 เพื่อทดสอบการใช้ประโยชน์ของลิกนินในการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์โดยการทดลองแบบคอลัมน์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสารอาหารอินทรีย์ด้วยลิกนิน และวิเคราะห์สารอาหารอินทรีย์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

(1) การเตรียมวัสดุดูดซับ โดยวัสดุดูดซับที่เลือกใช้ คือ ลีโอนาร์ไคต์ ดินจากพื้นที่การเกษตร และ ลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ และคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ

(2) การทดลองแบบ batch studies ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษา batch adsorption isotherm, kinetics experiments และการศึกษาปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับสารอาหารไนโตรเจน อาทิเช่น ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอาหารไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับ

(3) การทดลองแบบ column studies จะศึกษาลักษณะ breakthrough curve และประสิทธิภาพการดูดซับสารอาหารไนโตรเจน โดยวัสดุดูดซับที่ใช้ทดลองคือ ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมกับกับลีโอนาร์ไคต์ ทั้งแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันและแบบแยกชั้น ดินจากพื้นที่การเกษตร และทรายออกตาว่า เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดและใช้เป็นแนวทางในการบำบัดการปนเปื้อนของสารอาหารไนโตรเจนผู้แหล่งดินและน้ำใต้ดิน

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

ลีโอนาร์ไคต์สามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินร่วมกับการดูดซับสารอาหารไนโตรเจนที่ปนเปื้อนในแหล่งดินทางการเกษตรได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของลีโอนาร์ไคต์

1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพของลีโอนาร์ไคต์ และ ลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันในการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจน

1.5.3 ทราบถึงสภาวะแวดล้อมและปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนโดยใช้ ลีโอนาร์ไคต์เป็นวัสดุดูดซับ

1.5.4 ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารไนโตรเจนโดยการทดลองแบบ Column studies ในสภาวะที่มีลีโอนาร์ไคต์แบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดิน และแบบแยกชั้น

บทที่ 2

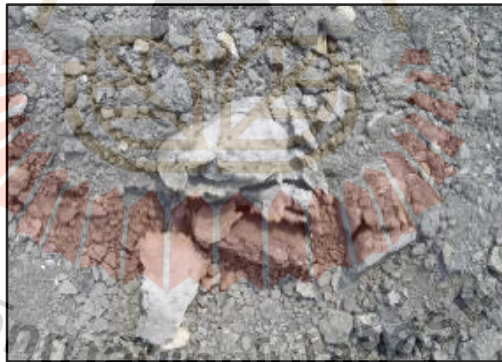
ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite)

ลีโอนาร์ไดต์ คือดินปนถ่านหินที่เกิดจากสองกรณี คือ

- (1) การสะสมตามธรรมชาติของถ่านหินพีช และ
- (2) ผลผลิตที่มาจากกระบวนการทำเหมืองของแร่ลิกไนต์

ลีโอนาร์ไดต์มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนถึงดำ ประกอบไปด้วยกรดฮิวมิก และกรดอินทรีย์อื่น ๆ (Ausavasukhi et al., 2016) ซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด แหล่งลีโอนาร์ไดต์ขนาดใหญ่ถูกพบที่มลรัฐดาตาเหนือ และไวโอมิง ประเทศสหรัฐอเมริกา และ บริทริช โคลัมเบีย ประเทศแคนาดา สำหรับลีโอนาร์ไดต์ในประเทศไทย พบได้ที่แอ่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีปริมาณถ่านหินลิกไนต์สำรอง 1,139 ล้านตันโดยประมาณ และอยู่ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (วิวัฒน์ และ คณะ, 2552) ลักษณะของลีโอนาร์ไดต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะลีโอนาร์ไดต์ (อ้างอิงจาก วิวัฒน์ และ คณะ, 2552)

จากการศึกษาของ Robert (1997) ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของลีโอนาร์ไดต์ประกอบไปด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) ออกซิเจน (O) และเถ้าถ่าน (ash) เป็นต้น (Robert (1997) อ้างจาก ณชรรส, 2557) รวมถึงยังประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca), โซเดียม (Na), แมกนีเซียม (Mg) และโพแทสเซียม (K) และแร่ธาตุอีกหลายชนิด อาทิเช่น แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) แร่แคลไซต์ (CaCO_3) แร่เกาลีไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ไอออนซัลไฟต์ (FeS_2) และแร่ควอตซ์ (SiO_2) เป็นต้น

จากข้อมูลข้างต้น พบว่าลิโอนาร์ไคต์มีองค์ประกอบที่เป็นประโยชน์ต่อการเกษตรค่อนข้างมาก อีกทั้งยังมีธาตุอาหารที่พืชต้องการด้วยเช่น ฮอร์โมนออกซิน (auxin) ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงนิยมนำลิโอนาร์ไคต์ไปประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงดินและฟื้นฟูพื้นที่ทางการเกษตร เนื่องจากลิโอนาร์ไคต์มีสารประกอบของฮิวมัส (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 กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) กลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และกลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) ที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง แต่มีรายงานว่าลิโอนาร์ไคต์ก็มีธาตุโลหะอันตรายหลายชนิดเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ได้แก่ สตรอนเทียม โครเมียม อาร์เซนิก นิกเกิล และ แบเรียม รวมทั้งค่าความเป็นกรดที่สูง (pH เท่ากับ 2 ถึง 4 โดยประมาณ) (สุชาดา โกชาคม, 2556)

จากที่กล่าวมาข้างต้นลิโอนาร์ไคต์นอกจากจะนิยมนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินแล้วยังมีการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำอีกด้วย อาทิเช่น งานวิจัยของ Zeledón-Toruno et al (2007) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัด PAHs ออกจากน้ำโดยใช้ลิโอนาร์ไคต์เป็นสารดูดซับ และพบว่าลิโอนาร์ไคต์สามารถใช้เป็นสารดูดซับ PAHs ในสิ่งแวดล้อมได้ จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการดูดซับของ PAHs แต่อย่างไรก็ตามหนึ่งใน PAHs ที่ Zeledón และคณะได้ศึกษา พบว่า Fluorene แสดงพฤติกรรมการดูดซับที่ต่างออกไปเมื่อสารละลายมีความเป็นกรดสูง กล่าวคือดูดซับได้มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงและดูดซับได้น้อยลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของ Fluorene นั้นสูงกว่า PAHs ชนิดอื่นๆ ประกอบกับความมีขั้วของลิโอนาร์ไคต์จะลดลงมากกว่าเดิมเมื่อค่าพีเอชลดลง ขณะเดียวกันการดูดซับของสาร PAHs ด้วยลิโอนาร์ไคต์นั้นถูกพบว่าเกิดขึ้นรวดเร็วภายใน 2 ชั่วโมงแรก และเข้าสู่สมดุลอย่างสมบูรณ์ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และพบว่าพฤติกรรมการดูดซับของสารทั้งสองชนิดนั้นอธิบายได้ด้วยไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิช ซึ่งการทดลองนี้สรุปได้ว่าปริมาณสารฮิวมิกที่อยู่ภายในลิโอนาร์ไคต์เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และงานวิจัยของ Ausavasukhi et al (2016) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับสีของโกเรดในน้ำเสียด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและดินแดง พบว่าการทดลองแบบ batch studies ภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยการเปลี่ยนตัวแปรเช่นพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น และเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของสีย้อมบนตัวดูดซับ ลิโอนาร์ไคต์และดินแดงที่คำนวณได้มีค่า 13.2 - 70.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 7.9-58.5 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ เมื่อนำลิโอนาร์ไคต์มากระตุ้นด้วยความร้อนผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ทำให้สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนถูกเผา และพบว่าการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวทางเคมีของลิโอนาร์ไคต์ที่ได้จากการกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) จะส่งผลต่อคุณลักษณะการดูดซับ

จากการวิจัยนี้พบว่า Leo 900 (การคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส) ที่ค่า pH ในช่วง กว้าง มีการดูดซับสารละลายของ โครเมียมได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีการนำลิโอนาร์ไคต์มาดูดซับสารอนินทรีย์ อีกด้วย อาทิเช่น งานวิจัยของ Chamhui et al (2014) ที่ทำการศึกษาการกำจัดสารอาร์เซนิก (As^{+3} และ As^{+5}) ด้วยการใส่ลิโอนาร์ไคต์เป็นวัสดุดูดซับ โดยทำการเปลี่ยนสภาพทางกายภาพของลิโอนาร์ไคต์ด้วย กระบวนการคาร์โบไนเซชัน (carbonization) ที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองแบบ batch adsorption พบว่าลิโอนาร์ไคต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีการดูดซับสาร As^{+3} ได้ดีที่สุด คือ สามารถกำจัดสารละลายอาร์เซนิกในน้ำได้เกือบจะ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช รวมถึงงานวิจัยของ Lao et al (2005) ที่นำลิโอนาร์ไคต์มาดูดซับโลหะหนัก คือ Cd (II) และ Pb (II) พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และมีความจุในการดูดซับสาร Cd (II) และ Pb (II) เท่ากับ 50.6 และ 250.7 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งกลไกการดูดซับอาจเกิดจากแรงของไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนของสารละลาย Pb (II) กับพื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไคต์ นอกจากนี้ยังมี ปัจจัยอื่นๆ เกี่ยวข้องด้วย เช่น ขนาดพื้นที่ผิวและรูพรุนลิโอนาร์ไคต์ และความมีขั้วของไอออนของ สารละลายโลหะ เป็นต้น

2.2 สารฮิวมิก

อินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) หรือ ฮิวมัส (humus) มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลปนดำ เกิดจาก การทับถมของซากพืชซากสัตว์ที่ผ่านกระบวนการของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป อินทรีย์สารลงสู่ดิน จัดเป็นสารอินทรีย์ที่เสถียร และเป็นกลุ่มที่ให้สารประกอบฮิวมิก (humic substance) ซึ่ง สารฮิวมิกจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน รูปร่างไม่แน่นอน และคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มาก โครงสร้างหลักจะประกอบด้วยสารประกอบ aromatic compound ซึ่งเป็นแกนทำให้สลายตัวได้ยาก นอกจากนี้สารฮิวมิกยังมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลประมาณ 30×10^{-10} ถึง 100×10^{-10} เมตร ซึ่งการจำแนกสารฮิวมิกจะจำแนกตามคุณสมบัติการละลายในกรดและในด่างที่ ต่างกันดังนี้ ฮิวมิน (humic) จะไม่ละลายทั้งในกรดและด่าง กรดฟุลวิก (fulvic) จะมีลักษณะเป็น โมเลกุลที่ เล็กและละลายได้ดีในกรด สำหรับกรดฮิวมิก (humic) จะมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ละลายน้ำได้น้อยมากแต่ สามารถละลายได้บางส่วนในสารละลายที่เป็นกรดและด่าง (จณิตตา, 2557 ; นัทธีรา และคณะ, 2553)

กรดฮิวมิกประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นส่วนใหญ่ (ร้อยละ 90 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้กรดฮิวมิกยังมีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ฟีนอล (phenol group) และหมู่ คาร์บอนิล (carbonyl group) รวมถึงหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ด้วย ซึ่งสูตรโครงสร้างอย่างง่ายของกรดฮิวมิก คือ $C_{10}H_{12}O_5N$ (ไม่รวมธาตุซัลเฟอร์; S) คุณสมบัติของกรดฮิวมิกคือ สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดี เนื่องจากมีค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนสูง (CEC) และทำให้อนุภาคจับตัวกันเป็น โครงสร้างที่แข็งแรง เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวก-ลบที่สูง รวมทั้งช่วยป้องกันการระเหยของน้ำด้วย เนื่องจากเกิด

การสร้างพันธะระหว่างประจุบวกของกรดอิมิกที่ดูดซับไว้กับประจุลบของน้ำ ส่วนประจุบวกที่หลงเหลืออยู่คือ ไฮโดรเจน (hydrogen, H₂) ก็สร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจนในน้ำ (Oxygen, O₂) ต่อไปเรื่อย ๆ จึงทำให้เกิดการอุ้มน้ำได้มากขึ้น (ฉรรรศ, 2557 ; อุษา และคณะ, 2557)

2.3 กระบวนการคาร์โบไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์โบไนเซชันเป็นขั้นตอนแรกของการพัฒนารูพรุนในวัสดุคิบ เหมาะสำหรับการผลิตถ่านแบบถ่าน กล่าวคือมีความต้องการรูพรุน ความแข็ง และความหนาแน่นของวัสดุคิบ ซึ่งอาศัยความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ออกมาในรูปของแก๊ส และของเหลว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นถ่านชาร์ที่มีสัดส่วนคาร์บอนสูงกว่าวัสดุคิบตั้งต้น (ชัยยศ ตั้งสฤตย์กุลชัย, 2554) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์โบไนเซชันมีสองประเภทคือ

(1) ส่วนที่เป็นก๊าซ ประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลเบา ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และน้ำมันดิน เป็นต้น

(2) ส่วนที่เป็นของแข็ง ประกอบไปด้วย ถ่านที่มีคาร์บอนในปริมาณสูง (มีความเป็นอะโรมาติกส์ที่สูงขึ้น และรูพรุนที่มีขนาดเล็กขึ้น)

ปัจจัยหลักของการเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการคาร์โบไนเซชัน คือ ระยะเวลาและอุณหภูมิ รวมถึงสารตั้งต้นด้วย อาทิเช่น การเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซ น้ำมันชีวภาพ สารละลายน้ำและถ่าน ส่วนที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะเกิดสารประกอบโพลีอะโรมาติกที่เสถียร (เขม่า) ร่วมกับโอลิฟิน ไฮโดรเจน น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ประเภท มีเทน (CH₄) ไฮโดรเจน และเขม่า เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าทำให้อัตราการความร้อนที่เร็ว จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายง่ายขึ้น ซึ่งการตกตะกอนของเขม่าอาจทำให้เกิดการปิดรูพรุนบนพื้นที่ผิวของถ่านได้ ถ้าในกรณีที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะทำให้ได้คาร์บอนที่มีโครงสร้างของรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่จำนวนมาก มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงต่ำทำให้สีกร่อนได้ง่าย แต่ในกรณีที่ให้ความร้อนกับถ่านในอัตราเร็วที่ต่ำ จะทำให้มีค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นสูงกว่าในกรณีแรก (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558)

2.4 สารกำจัดวัชพืช (Herbicides)

สารกำจัดวัชพืช (herbicides) หมายถึง สารป้องกันและกำจัดศัตรูพืชกลุ่มที่ใช้ฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช ทั้งขณะวัชพืชงอกและที่ยังเป็นเมล็ดอยู่ ตลอดจนขึ้นส่วนต่าง ๆ ของวัชพืชที่ขยายพันธุ์ได้ โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อพืชที่ปลูก (Qasem, 2013) เนื่องจากการใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคการเกษตรจึงทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำดื่มค่อนข้างมาก ประกอบกับสารเหล่านี้สามารถตกค้างได้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้นการแยกแยะส่วนประกอบทางสารเคมีและหาปริมาณสารเคมีที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตและ

คาดการณ์ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ (Aslam et al., 2013) จากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างดินและสารกำจัดวัชพืชได้ดังนี้

2.4.1 ภาวะมลพิษของดิน

ภาวะมลพิษของดิน (soil pollution) หมายถึง การปนเปื้อนของดินด้วยสารมลพิษ (soil pollutant) ที่เกิดจากอัตราการเพิ่มขึ้นของสารมลพิษมากกว่าการเสื่อมสลายตัวของสารมลพิษ จนทำให้เกิดการสะสมของสารมลพิษที่มากขึ้นและก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดภาวะมลพิษในดิน ได้แก่ สารกำจัดศัตรูพืชและวัชพืช ปุ๋ยอินทรีย์เคมี ของเสียจากสารกัมมันตรังสี และสารเคมีจากกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้สารกำจัดวัชพืชประเภท ไชมาซีน อาหารจีน คาร์บาริล และไดนอร์อน ในอัตราที่สูงจะส่งผลกระทบต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ประเภทย่อยสลายเซลลูโลส อย่างในกรณีที่มีการใช้สารอาหารจีนติดต่อกันเกิน 15 ปี จะส่งผลกระทบต่อเชื้อราประเภท *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* และ *Sclerotium rolfsii* ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของเชื้อราพวกเส้นใยและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากวัฏจักรคาร์บอนลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การสลายตัวของอินทรีย์สารในดินลดลง (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2541; ศุภมาส, 2545) สำหรับการใช้สารกำจัดศัตรูพืชและวัชพืชในพื้นที่การเกษตรหรือพื้นที่ว่างเปล่า จะทำให้สารเคมีเกิดการตกค้างสู่สิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อวัฏจักรชีวภาพของดิน รวมถึงส่งผลกระทบต่อระบบห่วงโซ่อาหารด้วย ซึ่งความคงทนของสารเคมีในดินอาจอยู่ได้เพียง 20-30 ปี แต่การฟื้นตัวและการปรับปรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์นั้นต้องใช้เวลาที่ยาวนาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการสะสมและการแพร่กระจายของสารมลพิษในดิน เนื่องจากการพา และสภาพการเคลื่อนตัวได้ (mobility) ของสารมลพิษซึ่งจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยต่าง ๆ ในดิน เนื่องจากน้ำคือพาหะในการแพร่กระจายของสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม (Mishra et al., 2015)

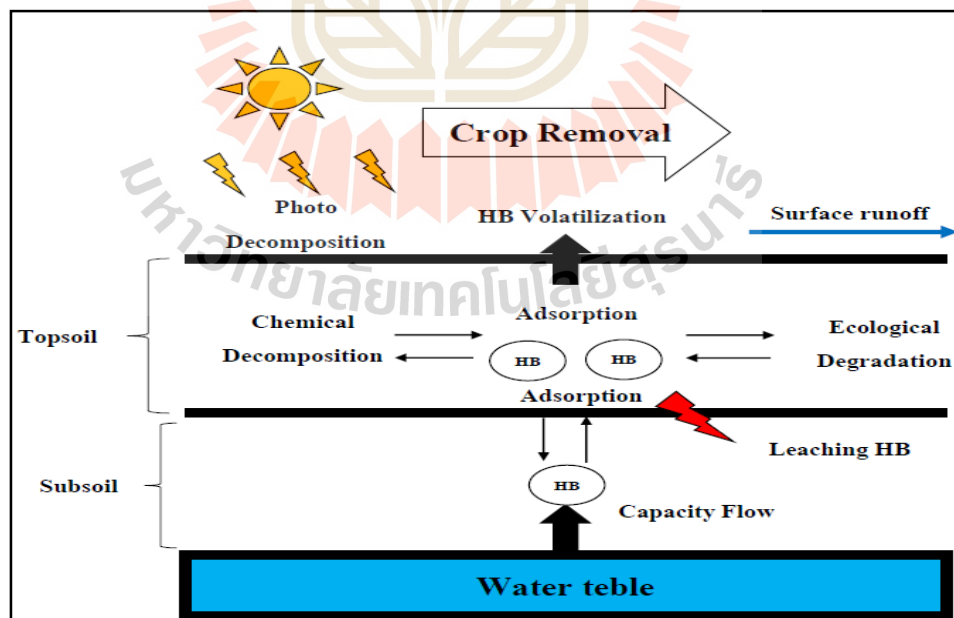
2.4.2 อนุภาคของดินและคุณสมบัติของสารละลายในดิน

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 เนื่องจากมีศักยภาพของการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างสูง เพราะมีสัดส่วนของปริมาณต่อพื้นที่ผิวและมีอัตราการ

แลกเปลี่ยนประจุสูง โดยที่บริเวณพื้นที่ผิวของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุจะเป็นประจุลบ (anion) หมายความว่าถ้าประจุหรือ โมเลกุลของสารที่เป็นประจุลบมาเกาะจะเกิดการผลักกันของประจุ (repell) แต่ ถ้าในดินเป็นประจุบวก (cation) โมเลกุลของสารที่มีประจุบวกจะถูกดูดซับ (absorb) ไว้ในสารละลาย คอลลอยด์ของดิน (colloids) (Yong et al., 2010) เนื่องจากอนุภาคของดินและ โมเลกุลของสารละลายมี ประจุที่ต่างกัน นอกจากนี้อนุภาคที่เป็นประจุลบจะมีแนวโน้มว่าจะถูกชะออกจากดินได้ ในขณะที่ อนุภาคที่เป็นประจุบวกจะยังคงอยู่ในสารละลายในดิน และจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกภายในช่องว่าง ของดิน หรือ cation exchange capacity (CEC) ซึ่งเป็นความจุของดินที่จะสามารถดูดซับ ไอออนที่มีประจุ ไฟฟ้าที่เป็นประจุบวกได้ ซึ่งค่าที่วัดได้คิดเป็น meq (milliequivalennts) ต่อ 100 กรัมของดิน (ทศพล, 2545; คณาจารย์ภาควิชา, 2541)

2.4.3 พฤติกรรมและปฏิกิริยาของสารกำจัดวัชพืชในดิน

สารกำจัดวัชพืชมีการสะสมในแหล่งดิน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมและการสลายตัวของสารกำจัดวัชพืช เพื่อให้ทราบถึงระยะทางของการเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชที่จะเกิดปฏิกิริยา และความคงทนที่อยู่ในดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของดิน เนื่องจากสารกำจัดวัชพืชสามารถเกิดการดูดซึม (adsorption) เกิดการเคลื่อนย้าย (transport / movement) และการย่อยสลาย (degradation) ได้ โดยกระบวนการสลายตัวของสารวัชพืชดังกล่าวสามารถอธิบายดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการสลายตัวในสิ่งแวดล้อมของสารกำจัดวัชพืช (HB : herbicides)
(ที่มา : คัดแปลงจาก Ross and Lembi, 2009)

คุณสมบัติที่สำคัญของสารกำจัดวัชพืชในดิน คือ สภาพการละลายได้ (solubility) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารในน้ำและดิน ความดันไอ (vapor pressure) จะบอกถึงศักยภาพในการระเหยของสารกำจัดวัชพืชออกไปจากดิน ความสามารถในการดูดซับ (sorption to adsorb) จะบ่งบอกถึงความสามารถในการถูกดูดซับของสารละลายกับสารอินทรีย์ในดิน สภาพที่มีขั้ว (polarity) ประจุ (charge) และค่า pH ในสารละลาย รวมทั้งอัตราการใช้สารวัชพืช ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการตกค้างของสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปเกินเกณฑ์ที่กำหนด หรือใช้ในระยะเวลาที่นาน ๆ ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Henson et al. (1997) (อ้างอิงงานวิจัยของ สุชาติกร ฤๅณา, 2548) พบว่า เมื่อทำการวัดสารอาหารในน้ำที่ระบายออกมาจาก soil column ความเข้มข้นของสารอาหารจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ที่สูงขึ้น และปริมาณสารอาหารที่ถูกดูดซับในดินจะเพิ่มตามอัตราการใช้งานที่สูงขึ้น ส่วนระยะเวลาที่ตรวจพบสารจะต่างกันตามอัตราที่ใช้ โดยที่ระยะเวลาการตรวจพบสารอาหารเร็วขึ้น ที่อัตราการใช้สารสูง ๆ

2.4.4 ความสัมพันธ์ของสารกำจัดวัชพืชในดินและกลไกการดูดซับ

การดูดซับสารชนิดหนึ่ง ๆ ในดินส่วนใหญ่จะเกิดจากการดูดซับน้ำ และไอออนในสารละลายดิน โดยการที่ดินเกิดการดูดซับสารได้มากหรือน้อยจะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งสิ่งที่เป็นปัจจัยในการดูดซับสารของดินคือ อนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับสูง ประกอบกับการที่มีประจุลบจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับไอออนที่เป็นประจุบวกได้ดี ดังนั้นในกรณีที่น้ำถูกดูดซับในดินจึงอาจเกิดในกระบวนการนี้ได้ เนื่องจากน้ำเป็นสารประกอบที่มีขั้ว (polar compound) การดูดซับของสารกำจัดวัชพืชในดินแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการทางฟิสิกส์ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณผิวนอกของอนุภาคดิน อย่างเช่นการดูดซับแบบแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงดูดซับทางประจุไฟฟ้า สำหรับกระบวนการทางเคมี จะเกิดจากปฏิกิริยาร่วมของหลายกระบวนการที่บริเวณพื้นที่ผิวภายในที่ซับซ้อนของอนุภาคดิน โดยจะเกิดในช่วงระยะเวลาที่สั้น ๆ ได้แก่ การเกิดพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน และ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุภายใน เป็นต้น (สุกมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย, 2554)

2.4.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดิน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืชในดินอธิบายได้ดังต่อไปนี้

(1) ชนิดและปริมาณของรูปสารละลายคอลลอยด์ในดิน เช่น ชนิดของแร่ดินเหนียว ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุด มีความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคที่สูง และมีประจุลบจำนวนมากทำให้เกิด ionic double layer กล่าวคือดินเหนียวจะมีประจุสองชั้น ได้แก่ชั้นในที่เป็นประจุลบที่ผิว และชั้นนอกที่เป็นประจุบวกของแคตไอออนที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของดินเหนียว ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ สำหรับคอลลอยด์อินทรีย์ (organic colloidal) ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส (humus) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำ

ได้สูง และมีประจุลบมาก โดยเกิดจากหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ที่มีการแตกตัวของ H^+ นอกจากนี้ค่า pH ก็ส่งผลต่อการดูดซับด้วย คือถ้าค่า pH สูงจะเกิดการแตกตัวของกรดสูงทำให้ปริมาณประจุลบของคอลลอยด์อินทรีย์สูงขึ้น นอกจากนี้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุหรือมีสาร humic acid เป็นองค์ประกอบจะมีความสามารถในการจับตัวหรือยึดเกาะได้ดีกว่า และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้สูงกว่าดินเหนียว เนื่องจากบนพื้นที่ผิวที่ผิวของอินทรีย์วัตถุมีประจุลบอยู่จำนวนมาก ทำให้เกิดการดึงดูดสารกำจัดวัชพืชในดินได้ ดังนั้นองค์ประกอบของดินจึงมีความสำคัญต่อการดูดซับสารกำจัดวัชพืช และการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในดิน (สุชาติกรรณา, 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 ซึ่งจะคล้ายกับการแตกตัวของกรดอ่อน สำหรับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ไม่ถูกดูดซับจะเรียกว่า สภาพกรดจริง (activity acidity) โดยค่า pH ที่วัดได้คือเป็นกรดจริง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสภาพการละลายได้ (solubility) ของธาตุ การเจริญเติบโตของพืช และจุลินทรีย์ในดิน

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

(4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นในดินจะรบกวนการดูดซับโมเลกุลของสารกำจัดวัชพืชเพราะน้ำเป็นตัวแข่งขันในการยึดเกาะของสารในดิน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการระเหยของสารกำจัดวัชพืช ซึ่งการวิเคราะห์จำนวนน้ำในดินได้จากระดับความชื้น (water content) คือสัดส่วนระหว่างปริมาณของน้ำกับปริมาณของดินที่มีน้ำอยู่ ซึ่งหาได้จากการคำนวณระดับความชื้นโดยมวล (mass water content) และ ระดับความชื้น โดยปริมาตร (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 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม มอนต์มอริลโลไนต์ มีค่า CEC เท่ากับ 100 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม และ ไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม มีค่า CEC เท่ากับ 4 มิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม เป็นต้น (Ross and Lembi, 2009; ทศพลพรพรหม, 2545; ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; คณาจารย์รัฐพิทยาศาสตร์, 2541; ธวัชชัย รัตนชเลศ, 2540)

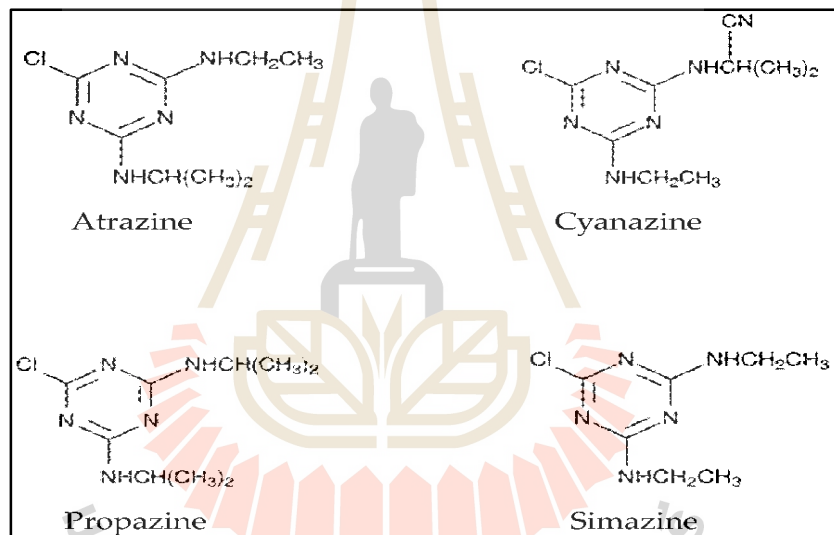
2.4.6 การเคลื่อนที่ได้ และความคงทนของสารในดิน

การเคลื่อนที่ของสารกำจัดศัตรูพืชในดินจะเกิดจากการพาของน้ำผ่านดิน ซึ่งระหว่างการไหลผ่านในช่องดินจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาได้ อาทิเช่น การดูดซับ การเสื่อมสลายทางชีวและเคมี การดูดซึมโดยพืช เป็นต้น สารเคมีที่เคลื่อนที่ได้จะเข้าสู่และสะสมอยู่ในบริเวณผิวดิน ส่วนสารเคมีอย่างพวกไตรอะซีนจะถูกพาจนเคลื่อนที่เลยชั้นของรากพืช จึงทำให้ดินเกิดการดูดซับไว้ในปริมาณน้อยและเกิดการชะละลายได้ ซึ่งการชะละลาย และการไหลบ่าของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สารกำจัดศัตรูพืชถูกเคลื่อนย้ายออกจากดิน สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ได้ของสารในดินได้แก่ ความชื้นในดิน สภาพการละลายได้ของสาร และสภาพการดูดซับได้ของดิน เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการชะละลายได้ของสาร ได้แก่ ศักยภาพและพลวัตของการดูดซับ สภาพการละลายได้ของสาร การไหลของน้ำในช่องดิน การฟุ้งกระจายของอนุภาคดินเหนียว และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดิน เป็นต้น การเคลื่อนย้ายของสารละลายหรือสารแขวนลอย (ขนาดมากกว่า 0.45 ไมครอน) จะขึ้นกับสภาพการละลายได้ของสารเป็นหลัก และสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการแพร่ (diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่ไปกับการไหลของมวล (mass flow) จะเกี่ยวข้องกับโมเลกุลของน้ำหรือสารลิแกนด์ (ligand) โดยเฉพาะสารลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น กรดฟุลวิก (fulvic acid) และกรดฮิวมิก (humic acid) เป็นหลัก (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

2.5 สารอะทราซีน (Atrazine)

สารอะทราซีนเป็นสารกำจัดวัชพืชที่จัดอยู่ในกลุ่มของสารไตรอะซีน (Triazines) โดยเกิดจากสารกำจัดวัชพืชกลุ่มซิมเมตริกอลไตรอะซีน (symmetrical triazine) หรือเอสไตรอะซีน (S-triazine) (ศุภมาส, 2550) สารอะทราซีนมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยวงแหวนของไนโตรเจนสามอะตอมสลับกับอะตอมคาร์บอน เนื่องจากการที่วงแหวนมีไนโตรเจนอยู่ 2-3 อะตอมจึงเรียกว่าอะซีน (azine) และการจัดตำแหน่งของไนโตรเจนที่สมมูลกันจึงเรียกว่าเอสไตรอะซีน (S-triazine) ซึ่งสารในกลุ่มนี้จะต่างกันที่การแทนที่ในตำแหน่งที่ 2 4 และ 6 ด้วยหมู่คลอรีน เมทอกซิล และเมทิลไซโอ ดังรูป 2.3 (พิมพ์ภัท หีบเงิน, 2551) สาร

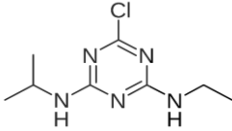
อาทราซีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1955 โดย Gast Antognini และ Day จากนั้นได้ถูกนำมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ในปี ค.ศ. 1958 และจัดเป็นสารกำจัดวัชพืชที่นิยมใช้กันมากสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา และอีก 70 ประเทศทั่วโลก เนื่องจากการดูดซึมของสารอาทราซีนที่เข้าสู่บริเวณรากของวัชพืชทำให้เกิดการตกค้างในดิน รวมทั้งยังทำให้เกิดความคงทนในดินและเมื่อเกิดการชะละลายสู่แหล่งน้ำและแหล่งน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย (Douglass et al, 2015) จึงทำให้สารอาทราซีนถูกระงับใช้ในปีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991 ในประเทศแถบยุโรป เช่น ประเทศเยอรมัน และอิตาลี และปี ค.ศ. 1994 โดย US.EPA (Environment Protection Agency) (Wang, 2003) แต่สำหรับในประเทศไทยในปัจจุบันสารอาทราซีนยังคงได้รับความนิยมอยู่ ซึ่งอ้างอิงได้จากการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชของประเทศไทย ดังตารางที่ ก. 1 ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของสารอาทราซีนสามารถอธิบายได้ดังตาราง 2.1



รูปที่ 2.3 สารกำจัดวัชพืชในกลุ่ม Symmetrical triazine (S-triazine)

ที่มา : Price et al., 2015

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารอาหาราซีน (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 และไม่เป็นสารกัดกร่อน
จุดเดือดและจุดหลอมเหลว (Melting point and boiling point)	จุดหลอมเหลว 173-175 องศาเซลเซียส ไม่ทราบจุดเดือด
Log K_{ow}	2.71
$K_{oc}^{(a)}$	100
Log $K_{ow}^{(b)}$	2.43
$pK_a^{(c)}$	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 MPa ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ^(c)
ปริมาตรและขนาด ^(d) (Molar volume)	$169.8 \text{ cm}^3/\text{mol}$ Width 9.6 อังสตรอม (A°) Depth 8.4 อังสตรอม (A°) Thickness ~ 3 อังสตรอม (A°)

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของสารอะทราซีน (Atrazine)

<p>สภาพการละลาย (solubility)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ละลายน้ำ 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส, 32 มิลลิกรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 320 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส - ละลายใน N-pentane 360 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส - ละลายใน Petroleum ether 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส - ละลายใน Methanol 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส - ละลายใน Ethyl acetate 28,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส - ละลายใน Chloroform 52,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส - ละลายใน Dimethyl sulfoxide 183,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส
<p>LD₅₀</p>	<p>3,080 mg/kg</p>

ที่มา : ทศพล พรพรม, 2545

Source^(a) : Kearney et al. (1998), Source^(b) : Llado et al. (2015)

Source^(c) : Lesan and Bhandari (2000), Source^(d) : Pelekani et al. (2001)

หมายเหตุ : ค่า LD₅₀ คือ ปริมาณของสารพิษคิดเป็นมิลลิกรัม (mg) ต่อกิโลกรัมของน้ำหนักสัตว์ทดลอง ที่สามารถทำให้สัตว์ทดลองได้ร้อยละ 50 ของสัตว์ทดลองทั้งหมด

2.5.1 การใช้สารอะทราซีนในการเกษตร

สารอะทราซีนสามารถใช้ควบคุมวัชพืชทั้งแบบก่อนปลูกพืชหลัก (pre-plant) ก่อนวัชพืชงอก (pre emergence) หรือแบบหลังวัชพืชงอก (post emergence) (พิมพ์ภัทท์ หีบเงิน, 2551) และจัดเป็นสารเลือกทำลายชนิดใช้ทางดิน ซึ่งจะควบคุมวัชพืชใบกว้างและวัชพืชวงศ์หญ้า เช่น หญ้านกสีชมพู และหญ้าหางจิ้งจอก เป็นต้น และนิยมใช้กับพืชปลูกประเภท อ้อย ข้าวโพด ข้าวฟ่าง สับปะรด หน่อไม้ฝรั่ง พืชวงศ์ส้ม ถั่วฝักยาว กาแฟ น้ำมันปาล์ม และกุหลาบ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารไม่เลือกทำลายในพื้นที่ว่างเปล่า

ร่วมด้วย (ทศพล พรพรหม, 2545) จากที่กล่าวมาข้างต้นพืชไร่ที่นิยมใช้สารอาหารจีนจะสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ แต่สารอาหารจีนอาจจะไปทำลายสำหรับพืชปลูกบางชนิดได้ เช่น ผัก มันฝรั่งและพืชตระกูลถั่ว โดยจะเข้าไปยับยั้งการสังเคราะห์แสงของพืช (Farruggia et al., 2016) ซึ่งอัตราการใช้สารอาหารจีนโดยเฉลี่ยประมาณ 2.24-4.48 กิโลกรัมสารออกฤทธิ์ต่อเฮกตาร์ (hectare; ha) หรือประมาณ 160-716 กรัมสารออกฤทธิ์ต่อไร่ (กนกวรรณ พาลูกา, 2553; พิมพ์ภัท หีบเงิน, 2551)

2.5.2 พฤติกรรมในพืช

การใช้สารผ่านทางดินทำให้สารอาหารจีนสามารถเข้าสู่พืชโดยผ่านทางราก และสามารถผ่านเข้าสู่ทางใบได้เล็กน้อย จากนั้นจะเคลื่อนย้ายไปสู่ยอดและสะสมในบริเวณเนื้อเยื่อเจริญของพืช ซึ่งกลไกการทำลายพืชของสารอาหารจีนจะไปยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชทำให้พืชมีใบซีดเหลือง เหี่ยวแห้ง และตายในที่สุด (ทศพล พรพรหม, 2545)

2.5.3 สารอาหารจีนกับพฤติกรรมในดิน

จากที่กล่าวมาในข้างต้นสารอาหารจีนสามารถเคลื่อนที่ในดินได้ และสามารถเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดินค่อนข้างสูง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอาหารจีนในแหล่งน้ำและแหล่งน้ำใต้ดิน คือ การชะละลายและการไหลบ่าของน้ำ ซึ่งปริมาณของสารอาหารจีนที่สูญเสียจากน้ำไหลบ่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.2 – 18 เปอร์เซ็นต์ของสารทั้งหมด แต่ในสภาพที่มีน้ำไหลไม่มาก เช่น ฝนตกเป็นครั้งคราวจะมีค่าน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ (Wang et al., 2005) สำหรับค่าครึ่งชีวิตของสารอาหารจีนโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 60 วัน และมีความคงทนในดินได้เกิน 1 ปีหรือมากกว่าในสภาพที่แห้งและเย็นและดินที่มีสภาพเป็นกรด ถ้าหากมีการใช้สารอาหารจีนในพื้นที่เดิมเป็นระยะเวลานาน เช่น ประมาณ 8 - 9 ปีก็อาจพบการตกค้างของ สารอาหารจีนได้ถึงสามปี การเคลื่อนที่ของสารอาหารจีนในดินจะเกี่ยวข้องกับการดูดซับของคอลลอยด์ในดินด้วย ถ้าปริมาณสารอินทรีย์วัตถุและอนุภาคดินเหนียวมีค่าสูงจะส่งผลให้สามารถดูดซับสารอาหารจีนไว้ได้มาก แต่การดูดซับสารอาหารจีนไม่ใช่การดูดซับถาวร เนื่องจากดินสามารถปล่อยสารที่ดูดซับออกมาได้ ซึ่งจะขึ้นกับปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณการใช้สารอาหารจีนและคุณลักษณะของดิน อาทิเช่น ถ้าลักษณะของดินเป็นชนิด clay loam จะเกิดการยึดเกาะสารอาหารจีนได้แน่นกว่าชนิด fine sandy loam รวมไปถึง อุณหภูมิ ความชื้น ค่า pH ของดิน ค่าการละลายน้ำ (ค่าการละลายน้ำสูงสุดคือ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดยึดของสาร (sorption coefficient, K_{oc}) ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง (100 มิลลิกรัมต่อกรัม) เป็นต้น (Farruggia et al., 2016 ; Ross and Lembi, 2009) ดังนั้นกระบวนการดูดซับและคายซับของดินจึงมีผลต่อสารอาหารจีนในสิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำใต้ดิน (Jamil et al., 2010 ; Wabel et al., 2010) ผลจากการศึกษาในปี ค.ศ. 1995-1998 ได้มีการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน จำนวน 131 ตัวอย่าง ที่รัฐไอโอวา ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีอย่างน้อย 44 บ่อที่มีการปนเปื้อนของสารอาหารจีน จากข้อมูลสรุปได้ว่าอาจเป็นเพราะความคงทนในดินของสารอาหารจีนที่มากกว่าสารกำจัดวัชพืชชนิด

อื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน เช่น ไซมาซีน โพรพรซีน และไซยานาซีน ทำให้เกิดการตรวจพบได้มากกว่า (Price et al., 2015) นอกจากนี้งานวิจัยของ อรอนงค์และคณะ (2554) ยังพบว่า มีการตกค้างของสารอาทราซีนในดินของพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ ในปริมาณ 0.13-0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และบริเวณน้ำท่า 4.7 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าสารอาทราซีนสามารถเคลื่อนย้ายจากบริเวณดินสู่แหล่งน้ำได้จากการดูดซับกับตะกอนของดิน

2.5.4 การสลายตัวของสารอาทราซีน

สารอาทราซีนสามารถสลายตัวได้จากกระบวนการทางกายภาพได้ เช่น การสลายตัวด้วยแสงภายใต้แสงธรรมชาติ ที่ค่าความคงทนในดินปานกลาง ($t_{1/2} = 45$ วัน) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของสารเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบของ 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 ซึ่งการเพิ่มอินทรีย์วัตถุจะช่วยเพิ่มการย่อยสลายของสารอาทราซีนได้ (สุชาติ กรูณา, 2548) นอกจากนี้สารอาทราซีนยังสามารถย่อยสลายทางเคมีและชีวภาพได้อีกด้วย โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิด *Rhodococcus corallinus* ที่ทำการเปลี่ยนรูปของสารประกอบภายในของสารกลุ่มเอสไตรอะซีน (S-triazine) แต่จุลินทรีย์กลุ่มพวกนี้ไม่สามารถเปลี่ยนรูปของสารอาทราซีนได้ (พิมพ์ภัค หีบเงิน, 2551)

2.5.5 ความเป็นพิษของสารอาทราซีน

จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าสารอาทราซีนส่งผลกระทบต่อพืช สิ่งมีชีวิตในดิน (กลุ่มฟังไจและแบคทีเรียบางชนิดในดิน) และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (ดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน) ดังนั้นทาง Environmental Protection Agency (EPA) จึงได้ระงับใช้สารอาทราซีนสำหรับพื้นที่ทางการเกษตร และจัดสารอาทราซีนให้อยู่ในระดับความเป็นพิษประเภท C คืออาจเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งแก่มนุษย์ได้ (Ghosh et al., 2012) ซึ่งรายละเอียดความเป็นพิษของสารอาทราซีน อธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.5.5.1 ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ และสัตว์สะเทินบกสะเทินน้ำ

เนื่องจากการไหลบ่าและการชะละลายทำให้สารอาทราซีนสามารถแพร่สู่แหล่งน้ำได้ง่าย ดังนั้นอาจทำให้สารอาทราซีนส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำได้ เช่น แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ หอยกาบ และปลา โดยจะส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ และระบบการเจริญเติบโต อย่างในกรณีศึกษาการวางไข่ของปลาเทราต์ (rainbow trout) เมื่อได้รับสารอาทราซีนในปริมาณ 5 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าการวางไข่ลดจำนวนลง ทำให้ปริมาณไข่ปลาที่ได้ลดน้อยลงไปด้วย (Farruggia et al., 2016) นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของกบอีกด้วย โดยจากการศึกษา

กบชนิด American Leopard Frogs พบว่าเมื่อให้สารอาหารซินในปริมาณ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้กบมีการเปลี่ยนแปลงทางอวัยวะสืบพันธุ์เป็นแบบสองเพศในตัวเดียว (Hayes et al., 2003)

2.3.5.2 ผลกระทบต่อมนุษย์

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

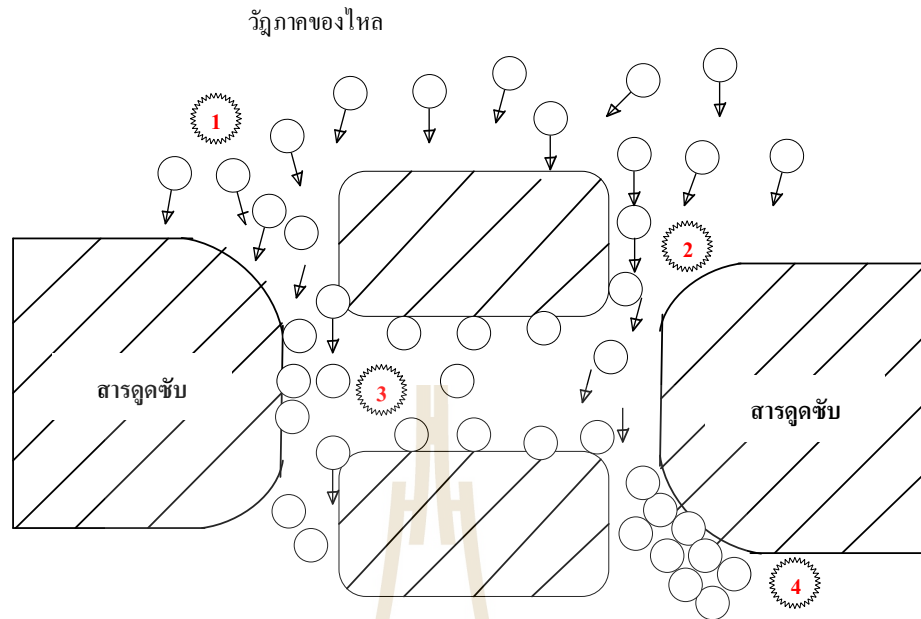
ดังนั้นทาง Environmental Protection Agency (EPA) จึงได้กำหนดค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนสารอาหารซินในแหล่งน้ำให้ไม่เกิน 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (Wu et al., 2009) และทางสหภาพยุโรป (European Community; EU directive) ได้กำหนดค่าสูงสุดของสารกำจัดวัชพืชชนิดที่ยอมรับได้ไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร (Lupul et al., 2015;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

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบจากการใช้สารอาหารซินในพื้นที่การเกษตรนั้นทำให้เกิดการปนเปื้อนในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติได้ จึงมีการคิดค้นวิธีการกำจัดสารอาหารซินไม่ให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม อาทิเช่น การกำจัดอาหารซินโดยใช้แบคทีเรียเซลล์อิสระและเซลล์ตรึงด้วยสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (สุมนา สิริพัฒนากุล, 2551) การใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ ADB ในการย่อยสลายสารอาหารซิน (พิมพ์ภัก ทิบบเงิน, 2551) การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเคลือบเชิงกลเพื่อใช้ย่อยสลายสารอาหารซินที่ปนเปื้อนในน้ำภายใต้สภาวะแสงขาว (photocatalysis) (Khamdahsag, P. 2011) เป็นต้น แต่วิธีการส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือ การดูดซับ เนื่องจาก ค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง โดยจะทำการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ กัน อาทิเช่น งานวิจัยของ Wang (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ในธรรมชาติต่อการดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon; GAC) จากการทดลองในสภาวะแบบแบตช์ (batch) จากการทดลองพบว่า ปริมาณของ GAC ที่ 10 ไมโครกรัมต่อกรัม มีประสิทธิภาพดูดซับสูงสุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chingombe et al (2006) ที่ได้ศึกษาการดูดซับสารอาหารซินด้วยถ่านกัมมันต์ และ ถ่านกัมมันต์สังเคราะห์ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิและสารเคมีเข้าไป ได้ตัวอย่างดังนี้ F400 , F400 AN และ F400 NH₂ ซึ่งในขั้นตอนการดูดซับแบบแบตช์ (batch adsorption) พบว่าสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิช และ F400 AN สามารถดูดซับสารละลายอาหารซินได้ดีที่สุด สำหรับงานวิจัยของ Wabel et al (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมของสารอาหารซินและมาลาโทออนในดิน ด้วยกระบวนการดูดซับ (Sorption) และการย่อยสลาย (Degradation) ในการทดลองแบบ batch experiment ได้ทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอาหารซินและมาลาโทออนที่ 600

ไมโครกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 50 ไมโครโมลต่อลิตรของสารละลาย CaCl_2 และวิเคราะห์ด้วยวิธี Extraction technique (MAE) โดยใช้สารละลาย acetone : hexane ที่อัตรา 3:2 (v/v) เป็นสารละลาย ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับสมการแบบ Exponential isotherm มากกว่าแบบไอโซเทอร์มของ แลงเมียร์ และฟรุนดลิช เนื่องจากค่า R^2 เข้าใกล้ 1 และค่า SSE ไม่สูง และสรุปผลได้ว่าสารละลายอาหารซีนมีการตกค้างในดินมากกว่าสารมาลาไทออนต่อวัน (d^{-1}) เท่ากับ 0.1053 และมีค่าครึ่งชีวิต 68.1 วัน ส่วนงานวิจัยของ Jamil et al (2011) ได้ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของสารละลายอาหารซีนโดยการเตรียมซีโอไลต์จากดินเหนียวอียิปต์ (Egyptian kaolin) โดยทำการคัดแปรซีโอไลต์เป็น 2 ชนิดคือ zeolite x และ zeolite A ในการดูดซับสารอาหารซีนพบว่า zeolite x มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายอาหารซีนได้ดีกว่า zeolite A และสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบ Dublin-Radushkevich model เป็นต้น

2.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับสารเป็นหนึ่งในกระบวนการแยกสาร (separation process) โดยจะแยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ไอ, ของเหลว) การดูดซับเกิดจากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของวัสดุดูดซับ (adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) แบ่งออกเป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่มีลักษณะเป็นแรงดึงดูดอ่อน ๆ และการดูดซับทางเคมี ที่เกิดจากการสร้างพันธะทางเคมีที่แข็งแรงกว่า ซึ่งกลไกของการดูดซับเกิดจากการแพร่ของสารที่ถูกดูดซับสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวภายในของวัสดุดูดซับ ทำให้ความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล อธิบายได้ดังรูปที่ 2.4 โดยที่หมายเลข 1 แสดงถึงการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของอนุภาค 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
(ที่มา ; ชัยยศ ตั้งสติกัญกุลชัย, 2554)

2.6.1 ลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (interaction force)

จากที่กล่าวมาข้างต้น การดูดซับเกิดจากแรงระหว่าง โมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับ สามารถจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

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

นอกจากนี้ถ้าสารดูดซับแสดงความมีขั้วหรือมีประจุบนพื้นผิวของแข็งก็ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) แผล่ออกจากพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้ ซึ่งแรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำส่งผลให้เกิดสภาพมีขั้วใน โมเลกุลของสารถูกดูดซับ และทำให้แรงของการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น โดยลักษณะของวัสดุดูดซับสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทดังนี้

- (1) กลุ่มที่ไม่มีไอออน ไม่มีประจุหรือไม่มีขั้ว เช่น แกร์ไฟต์
- (2) สารที่มีประจุบวก เช่น สารที่มีหมู่ OH เป็นองค์ประกอบ
- (3) สารที่มีประจุลบ เช่น สารที่มีหมู่ =O หรือ =CO แบ่งเป็น 4 ประเภทดังนี้

- อิมตัว
- ลักษณะพันธะแบบซิกม่า (σ bonds) ได้แก่ กลุ่มของก๊าซเฉื่อย ไฮโดรคาร์บอน
 - พันธะแบบพาย (π bonds) ได้แก่ สารอะโรมาติก สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว สารอีเทอร์ สารเอมีน
 - แสดงประจุบวกบริเวณด้านนอกของโมเลกุล
 - มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและแสดงประจุบวก ได้แก่ โมเลกุลที่มีหมู่ $-OH$ หรือ $=NH$ เป็นต้น

ข้อสังเกตสำหรับลักษณะของการดูดซับแบบกายภาพ คือ เกิดการดูดซับขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของวัสดุดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption) และที่สำคัญการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่เมื่อสารดูดซับที่ใช้เกิดการอิมตัว

2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

การดูดซับทางเคมี คือ การเกิดพันธะทางเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน นำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างสารที่ถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ 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 และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารที่ถูกดูดซับ)	สูง (มากกว่า 80 กิโลจูลต่อโมล เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความจำเพาะเจาะจงสูง (เลือกดูดซับสารบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)

ตารางที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี (ชัยยศ, 2554) (ต่อ)

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แม้อาจเกิดสภาพมีขั้วของสารดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานของการกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

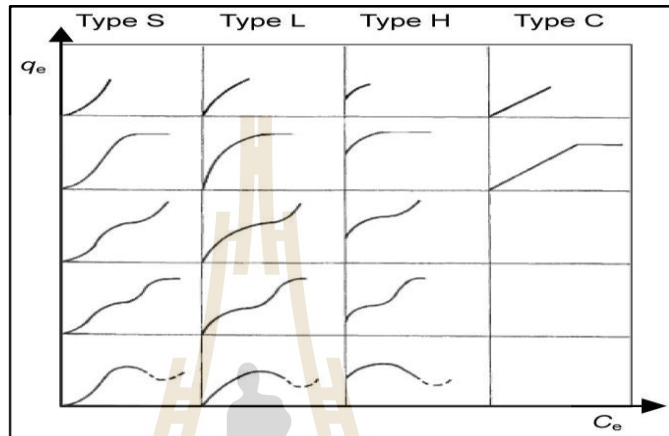
2.6.2 สมดุลการดูดซับสาร (Adsorption Equilibria)

สมดุลการดูดซับสารบ่งบอกถึงลักษณะไอโซเทอมของความสามารถในการดูดซับสารที่สถานะสมดุล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับในสารละลายที่สัมผัส และมีความสมดุลกับสารดูดซับ หรือกล่าวได้ว่าสมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในน้ำเท่ากับค่าความเข้มข้นในวัสดุดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ และลักษณะไอโซเทอมเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

2.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับในสถานะสมดุล 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 ใน

การจำแนกลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซตามลำดับ 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 ดังนั้นจึงมีการปรับเปลี่ยนสมการเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในการอธิบายหรือทำนายสมการการดูดซับภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.6.3.1 สมการไอโซเทอมแบบวิธีจลนพลศาสตร์ มีดังนี้

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

- โมเลกุลจะถูกจับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิววัสดุดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของวัสดุดูดซับเหมาะสมกับโมเลกุลที่เป็น 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

2.6.3.2 สมการไอโซเทอมแบบวิธีอุณหพลศาสตร์ มีดังนี้

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

(2) ไอโซเทอมเส้นตรง (linear isotherm) เป็นการดูดซับบริเวณพื้นผิวในแบบอุดมคติ คือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีขนาด และความเข้มข้นมีค่าน้อยทำให้ไม่มีแรงกระทำต่อกัน ซึ่งความดันของชั้นดูดซับจะผันตรงกับจำนวนโมล หรือ โมเลกุลของสารถูกดูดซับบนพื้นที่รวมของการดูดซับ

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

2.6.3.3 สมการไอโซเทอมแบบทฤษฎีศักย์พลังงาน เป็นการนำแนวคิดเกี่ยวกับสนามแรงดึงดูดมาประยุกต์ใช้กับระบบดูดซับแบบแก๊ส โดยที่ชั้นคอนทัวร์ของพลังงานการดูดซับ (adsorption potential contour) นำมาแทนที่กับชั้นของการดูดซับ และปริมาตรสะสมของชั้นดูดซับจะขึ้นกับศักย์ หรือ พลังงานการดูดซับ เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้เป็น กราฟคุณลักษณะ (characteristics curve) ซึ่งจะแปรผันตรงกับระบบดูดซับของแก๊สและสารดูดซับคู่หนึ่ง ๆ ไอโซเทอมแบบทฤษฎีพลังงาน ได้แก่ ไอโซเทอมแบบดูบินิน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich ; DR) สามารถบ่งบอกถึงประเภทลักษณะการดูดซับได้ว่าเป็นแบบกายภาพหรือแบบเคมี พิจารณาได้จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ และ \mathcal{E}^2 จะได้สมการเส้นตรง ซึ่งค่า \mathcal{E} หาได้จากสมการที่ 2.1

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

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 $8-16 \text{ KJ/mol}$ แสดงว่าการดูดซับนั้นเป็นแบบเคมี (chemical adsorption) (Blanes et al., 2011)

2.6.3.4 สมการไอโซเทอมแบบสทัมพ์สัน มีดังนี้

(1) สมการฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ใช้อธิบายข้อมูลของการดูดซับในช่วงความเข้มข้นปานกลาง และไม่สามารถใช้อธิบายไอโซเทอมแบบเส้นตรงที่มีความดันต่ำได้ ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชจะมีพลังงานการดูดซับบนพื้นผิวมีค่าไม่คงที่ (heterogeneous surface) ซึ่งสามารถแบ่งพื้นที่ผิวของการดูดซับได้ตามระดับของพลังงาน 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 พาตุกา, 2553)

(2) สมการชิปส์ (Sips isotherm) หรือสมการแบบแลงเมียร์-ฟรุนดลิช เป็นการนำไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมาดัดแปลง เนื่องจากสมการแบบฟรุนดลิชไม่สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับที่ความดันหรือความเข้มข้นสูงๆ ได้ ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แต่จะมีการเพิ่มค่า n เข้าไปในสมการ จึงเป็นสมการแบบ 3 ตัวแปร แต่ข้อจำกัดของสมการแบบชิปส์คือไม่สามารถอธิบายไอโซเทอมเส้นตรงที่ความดันต่ำๆ ได้ จากสมการในตารางที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_e และ C_e จะได้สมการแบบ non linear และค่าคงที่ Q_s , n_s และ K_s ซึ่งค่าคงที่ที่สามารถบ่งบอกถึงลักษณะของไอโซเทอมได้กล่าวคือ ถ้าค่า n_s มีค่ามากกว่าแสดงว่ามีความสอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ และถ้าค่า Q_s หรือ K_s มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 กราฟที่ได้จะสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิช (Belhachemi and Addoun, 2011)

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

(4) สมการแบบแทมกิน (Tampkin isotherm) วัสดุดูดซับจะมีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งค่าเฉพาะจะขึ้นกับชนิดของวัสดุดูดซับ (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554; เศษนา ฉัตรศิริ เวช, 2552)

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะของไอโซเทอมชนิดต่าง ๆ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (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	
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 $\frac{1}{q_m K_{BET}}$	q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
DR	$\ln(q_e) = \ln(q_s) - K_{ad} \mathcal{E}^2$	$\ln(q_e)$ กับ \mathcal{E}^2	C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\log q_e$ กับ $\log C_e$	
Sips	$q_e = \frac{q_m (K_L C_e)^{1/n}}{1 + (K_L C_e)^{1/n}}$	q/q_m กับ $K_L C_e$	b คือ ค่าคงที่กับพลังงานในการดูดซับ
Toth	$q_e = \frac{q_m (K_L C_e)}{\{1 + (K_L C_e)^t\}^{1/t}}$	q/q_m กับ $K_L C_e$	K_L คือ ค่าคงที่ของระบบ n คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
Tempkin	$q_e = (RT/b_T) \ln A_T + (RT/b_T) \ln C_e$	q_e กับ $\ln C_e$	q_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร) K_{BET} คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของ BET \mathcal{E} คือ ศักย์การดูดซับ t คือ ค่าพารามิเตอร์ของสมการ (มีค่าน้อยกว่า 1)

ที่มา : ชัยยศ , 2554 ; เดชา, 2552

2.6.4 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

2.6.4.1 แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption reaction model)

(1) สมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (pseudo-first order)

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมใช้อธิบายอัตราการดูดซับของเหลว – ของแข็ง โดยที่จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่งอยู่ในสภาวะการดูดซับที่สมดุล ความเข้มข้นของสารละลายจะแปรผันตรงกับเวลาของการดูดซับ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงสมดุลการผันกลับของโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับระหว่างพื้นผิวของเหลวและของแข็งด้วย รวมทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับการดูดซับในระบบที่ซับซ้อนได้ สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้จากสมการที่ 2.3

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

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

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

จากสมการที่ 2.4 เมื่อจัดให้อยู่ในสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ 2.5

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

เมื่อ q_t คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลา t (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_c คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_1 คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเทียมอันดับที่ 1 (นาที⁻¹)

t คือ เวลาใด ๆ (นาที)

จากสมการที่ 2.5 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_t และ t จะได้ค่าคงที่ q_c และ K_1 โดยค่า K_1 จะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มขึ้น

(2) สมการปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (pseudo-second order)

แบบจำลองอันดับสองเทียมใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับภายใต้สมมติฐาน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับบนวัสดุดูดซับจะคงที่ และจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่เกิดพันธะทั้งหมดจะขึ้นกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลสมการปฏิบัติการอันดับสองเทียมแสดงได้ดังสมการที่ 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 $1/t = (k_2 q_e^2) / q_t - (k q_e^2 / q_e) \quad (2.10)$

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

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

จากสมการที่ 2.11 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(q_t - q_e)$ และ t

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

2.6.4.2 แบบจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับในวัสดุดูดซับ (intraparticle diffusion model)

กลไกการแพร่ของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรก เป็นการแพร่ของโมเลกุลไปยังบริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ (external diffusion) ขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปยังภายในรูพรุนของวัสดุดูดซับ (internal diffusion, intra-particle diffusion) และ

ขั้นตอนที่สาม จะเกิดการดูดซับ (adsorption process) แบบจำลองนี้อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าไปยังรูพรุนและเกิดการดูดซับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.12

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

เมื่อ K_d คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ในรูพรุน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที)

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

2.6.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งอธิบาย ได้ดังนี้

2.6.5.1 วัสดุดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังนี้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการดูดซับสารในปริมาณที่มาก จำเป็นต้องใช้วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากโครงสร้างของรูพรุนจะส่งผลต่อการดูดซับแล้ว เคมีพื้นผิวของสารดูดซับ สมบัติความเป็นขั้วและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ก็ส่งผลเช่นกัน ซึ่งลักษณะของวัสดุดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับอธิบายได้ดังนี้

(1) พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุน เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของ โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น นอกจากนี้ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับได้เพิ่มขึ้น เพราะ ถ้าขนาด โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของ โมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

(2) ขนาดของวัตถุ ในกรณีที่มีโมเลกุลเป็นตัวดูดซับ ไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

(3) เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันนอลเฉพาะที่อยู่บนผิวของ โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ จะมีคุณสมบัติ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ

2.6.5.2 สารที่ถูกดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังนี้

(1.) ความสามารถในการละลาย ถ้าสารละลายมีความสามารถในการละลายได้สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องเกิดการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

(2.) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักของโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

(3.) ความมีขี้ของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขี้เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขี้จะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

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

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

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน (Leonardite) ในการดูดซับอาหารจีน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ รวมถึงการใช้ประโยชน์ของลิโอนาร์ไคต์ในการดูดซับสารละลายอาหารจีนในการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งรายละเอียดการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 การเตรียมสารละลายอาหารจีนและวัสดุดูดซับ

3.1.1 การเตรียมสารละลายอาหารจีน

การเตรียมสารละลายมาตรฐานอาหารจีนจะเตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยทำการชั่งผงอาหารจีน ปริมาณ 0.1 กรัม และนำมาละลายในสารอะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร และเก็บ stock solution ของสารละลายอาหารจีนไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.1.2 การเตรียมวัสดุดูดซับ วัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วย

3.1.2.1 ลิโอนาร์ไคต์ (LND)

ลิโอนาร์ไคต์ที่จะนำมาใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าเหมืองถ่านหินแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง โดยนำตัวอย่างลิโอนาร์ไคต์ไปอบให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทำการบดลิโอนาร์ไคต์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดไฟฟ้า แล้วทำการใส่ตัวอย่างลิโอนาร์ไคต์ ประมาณ 50 กรัม ในเครื่องร่อนคัดขนาด (Sieve size) ปรับความเร็วเครื่องเขย่าเท่ากับ 60 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที ซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ตะแกรงเบอร์ 40, 60, 80, 100 และถาดรอง (pan) จากนั้นทำการคัดเลือกและเก็บตัวอย่างลิโอนาร์ไคต์ที่ได้จากการคัดขนาดไว้ที่ที่ปราศจากความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะเฉพาะของลิโอนาร์ไคต์ สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3.1

3.1.2.2 ลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน (CLND)

การปรับสภาพทางความร้อนด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันจะทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1 จากนั้นนำลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านการคัดขนาดจำนวน 40 กรัม เข้าเตาเผาและให้ความร้อนแก่ลิโอนาร์ไคต์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้น

ทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บไว้ที่ที่ปราศจากความชื้น และนำลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันไปวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติพื้นฐาน ดังตารางที่ 3.1

3.1.2.3 ดินจากพื้นที่การเกษตร

ลุ่มเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ทำการเกษตร และนำดินทั้งหมดมาผสมกัน จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และนำดินที่ปราศจากความชื้นมาคัดขนาด ซึ่งขนาดที่เลือกใช้จะอยู่ในช่วง 10 เมช (mesh) (ขนาด 2 มิลลิเมตร) จากนั้นทำเก็บตัวอย่างดินไว้ที่ที่ปราศจากความชื้นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของดินประกอบไปด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ร้อยละความชื้น (% moisture) ชนิดของดิน (soil texture) อินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter; OM) และการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity ; CEC) ซึ่งวิธีวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

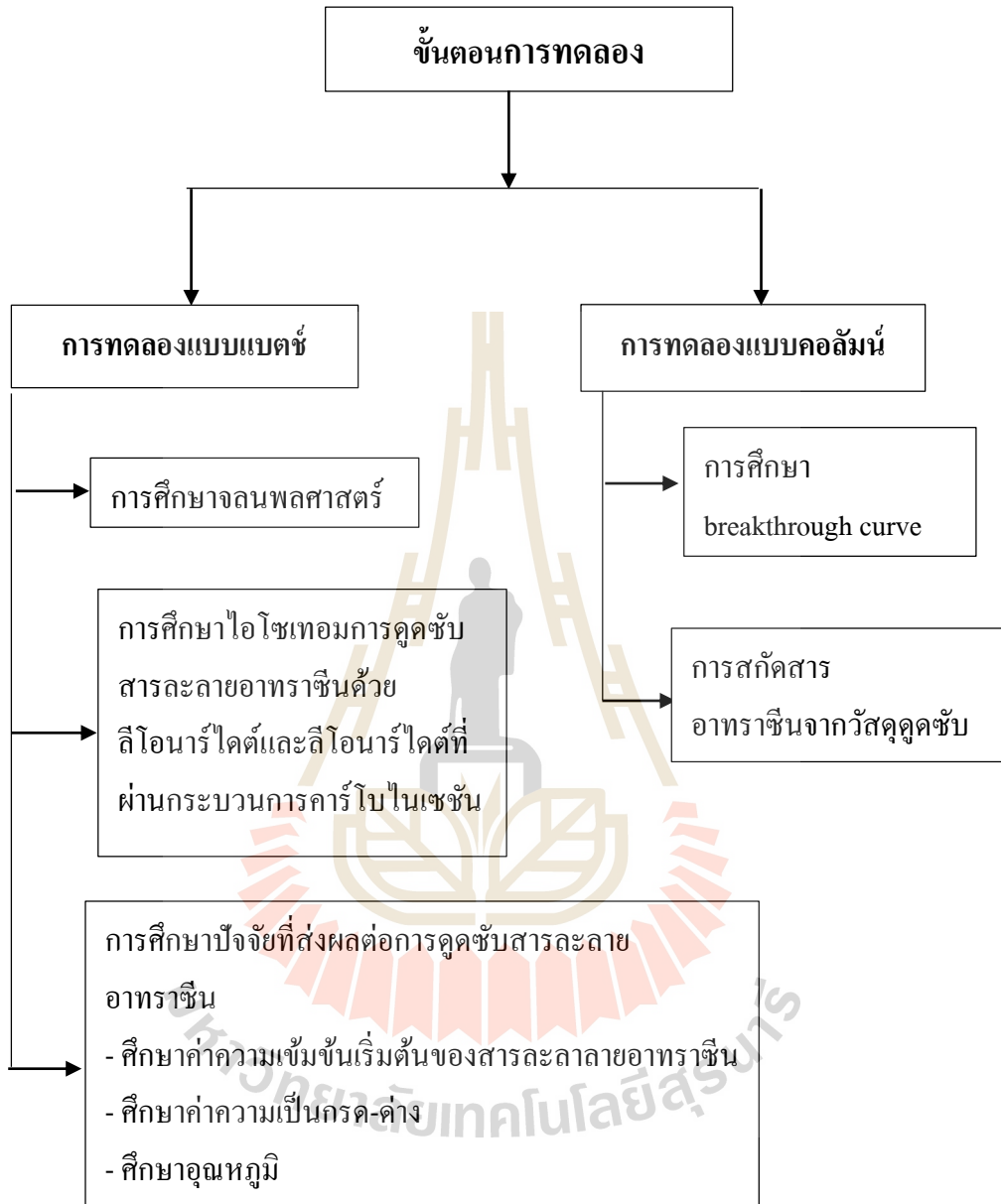
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคูดซับ

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. ชี้อา (Ash, %)	เครื่องมือวิเคราะห์ TGA /DSC 1 (ภายใต้ชั้นบรรยากาศของ N ₂ ที่อุณหภูมิ 50-900 องศาเซลเซียส)	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ Thermogravimetric Analysis (TGA)
4. ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวในการดูดซับ	เครื่องมือวิเคราะห์ Quantachrome autosorb automated (ภายใต้ชั้นบรรยากาศของ N ₂ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส)	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ Brunauer, Emmett and Teller (BET)
5. C, H, O, N (%)	เครื่องมือวิเคราะห์ 628S / CHN628 LECO	วิเคราะห์ปริมาณ Carbon, Hydrogen, Oxygen , Nitrogen , Sulfer

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคูดซับ (ต่อ)

คุณลักษณะ	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์/มาตรฐาน
6.ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง	เครื่องมือวิเคราะห์ ED-XRF (XGT-5200 ,Horiba) ที่ x-ray tube voltage เท่ากับ 50 KV	อ้างอิงการวิเคราะห์ของ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)
7. โครงสร้างของผลึกและองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง	เครื่องมือวิเคราะห์ XRD D2 Phaser, Bruker ที่ 2θ ($15^\circ - 80^\circ$) และ Cu Tube เท่ากับ 1.54184 อังสตรอม [\AA]	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 ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการคูดซับ และประสิทธิภาพในการคูดซับสารอาหารขึ้นจะได้อาจจากการทดลองแบบ batch studies จากนั้นจะนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์ (column studies) ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 3.1



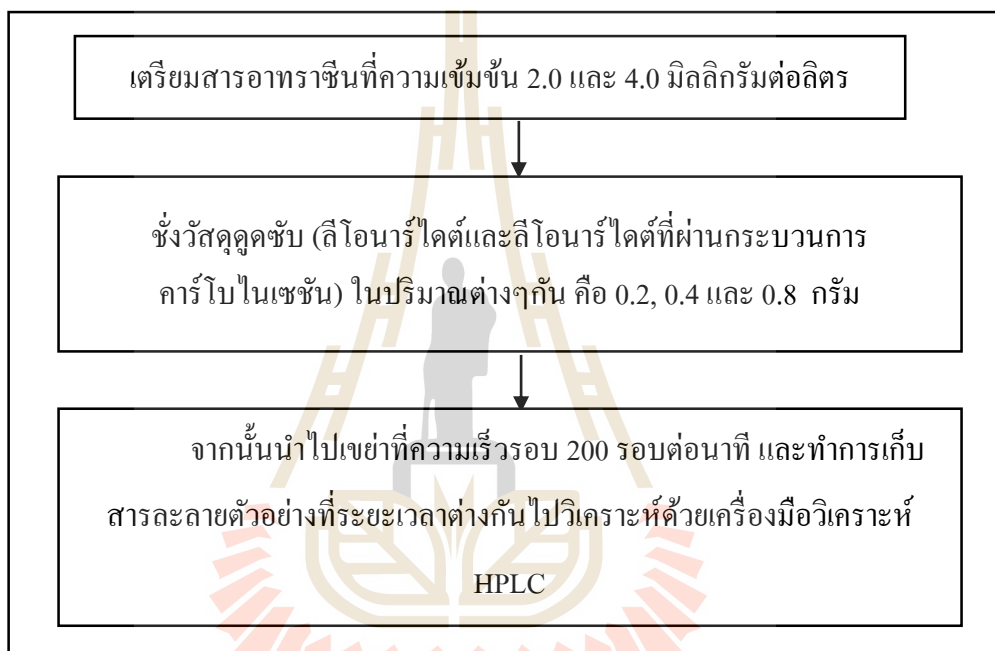
รูปที่ 3.1 รูปแบบและขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอน batch studies และ column studies

3.2 การทดลองแบบแบตช์ (Batch studies)

3.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารจีน

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของสารอาหารจีนมีวัตถุประสงค์ เพื่ออธิบายถึงแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการดูดซับระหว่างวัสดุดูดซับและสารอาหารจีน

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 จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC และทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ ซึ่งรายละเอียดการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

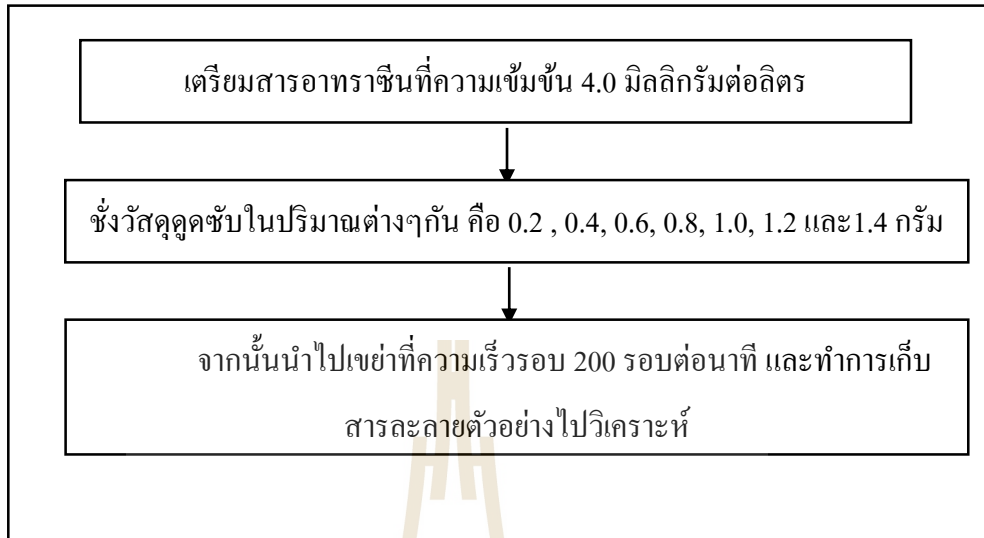


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารขึ้น

3.2.2 การศึกษาค่าไอโซเทอมในการดูดซับ

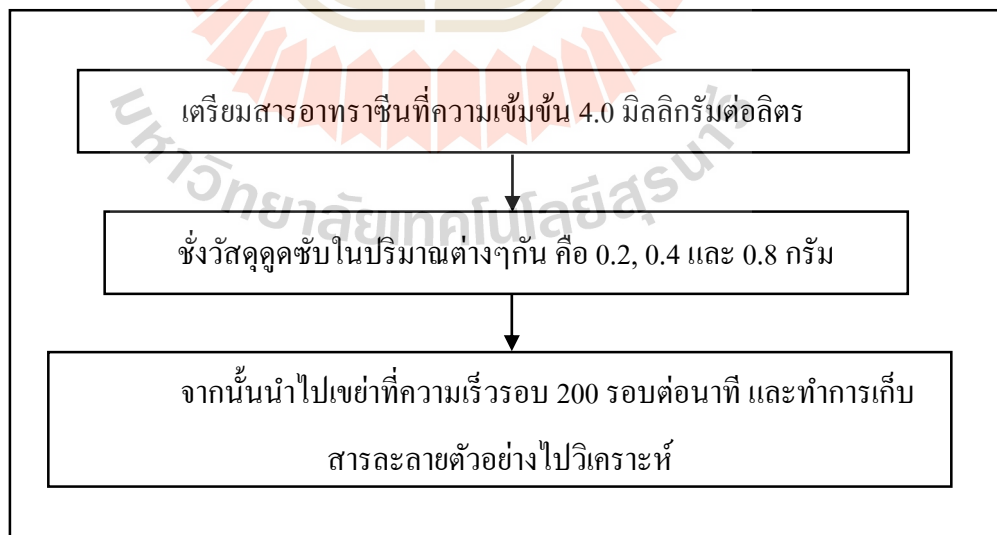
การศึกษาไอโซเทอมมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการดูดซับของสารอาหารขึ้นด้วยลีโอนาร์ไคต์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างลีโอนาร์ไคต์และลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน ซึ่งจะทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารขึ้นด้วยเครื่อง HPLC โดยทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ รายละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

3.2.2.1 การศึกษาลักษณะ ไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหารขึ้นด้วยลีโอนาร์ไคต์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการคูดซั้บสารอาหารซีนด้วยลิไออนาร์ไคต์

3.2.2.2 การศึกษาลักษณะไอโซเทอมของการคูดซั้บสารละลายอาหารซีนด้วยลิไออนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะไอโซเทอมการคูดซั้บสารอาหารซีนด้วยลิไออนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน

3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซิน (effects of adsorption)

การทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหาราซิน ได้แก่ ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้น ศึกษาความเป็นกรด-ด่าง และ ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหาราซิน ซึ่งทุก ๆ การทดลองจะทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ และเก็บสารละลายตัวอย่างที่ 24 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซินด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การศึกษาค่าความเข้มข้นที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซิน

การศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซินจะศึกษาที่ความเข้มข้น 8.0, 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณวัสดุดูดซับที่ 0.4 กรัม จากนั้นทำการเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซินต่อไป

3.2.3.2 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซิน

การทดลองนี้จะกำหนดค่าพีเอชในการทดลองเป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 ที่อุณหภูมิห้อง โดยจะเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซินเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณสารดูดซับ 0.4 กรัม จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอาหาราซินต่อไป

3.2.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซิน

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

3.3 การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบแบตช์ (Batch studies)

การเก็บสารตัวอย่างจากขวด EPA Vials และ Erlenmeyer flask ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ HPLC สามารถอธิบายได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

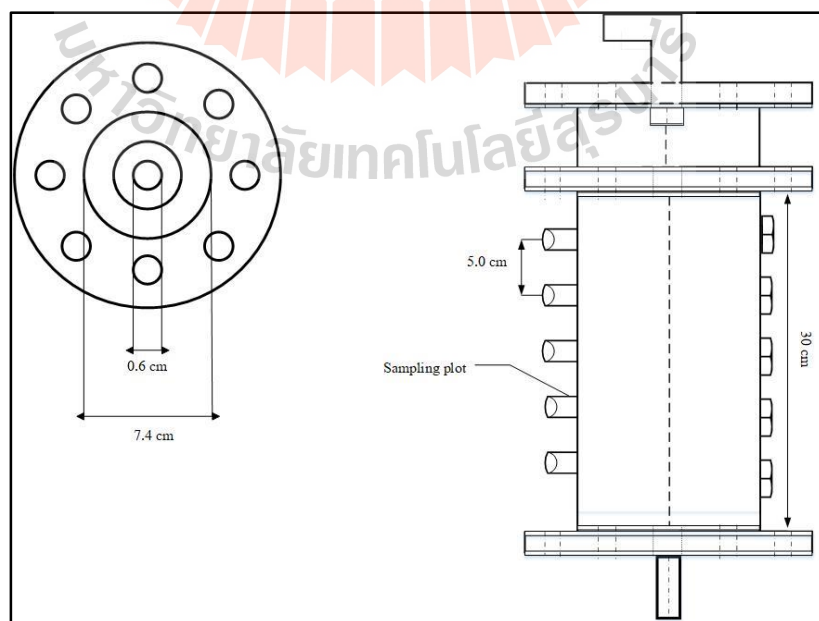
3.3.1. ทำการดูดสารตัวอย่างจากขวด EPA vials หรือ Erlenmeyer flask ในปริมาตร 1 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์ด้วย HPLC แล้วบรรจุสารตัวอย่างลง Micro centrifuge tube ขนาด 1 มิลลิลิตร

3.3.2. นำสารตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนของวัสดุคูดซั้บออกจากสารละลายอาหาราซีน

3.3.3. เนื่องจากสารอาหาราซีนจะไม่ถูกคูดซั้บกับวัสดุชนิด nylon (Ghosh et al., 2012) จึงทำการกรองสารตัวอย่างด้วย Nylon filter 0.45 ไมครอน (μm) ผ่านทางกระบอกกีดยา จากนั้นบรรจุลงขวด vials เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ต่อไป

3.4 การทดลองแบบคอลัมน์ (column studies)

การทดลองแบบคอลัมน์มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการนำลีโอนาร์ไคต์มาประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ที่สารละลายอาหาราซีนมีการปนเปื้อนกับดินในพื้นที่การเกษตร และป้องกันไม่ให้สารอาหาราซีนเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำใต้ดิน รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการคูดซั้บสารอาหาราซีนด้วยวัสดุคูดซั้บชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองเป็นคอลัมน์ชนิดอะคริลิกเนื่องจากวัสดุประเภทอะคริลิกจะไม่เกิดการคูดซั้บสารละลายอาหาราซีน (Topp et al., 1992) โดยคอลัมน์ที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.4 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตรระยะห่างระหว่าง sampling port 5 เซนติเมตร มีลักษณะการไหลแบบหนึ่งทิศทาง ดังรูปที่ 3.5 การทดลองแบบคอลัมน์จะใช้อุณหภูมิจำกัด และเก็บตัวอย่างสารละลายบริเวณช่องทางน้ำออกด้านล่าง โดยจะควบคุมการไหลของสารละลายด้วยปั๊มชนิดรีด (Peristaltic Pump)



รูปที่ 3.5 รายละเอียดชุดทดลอง column test

สำหรับวัสดุดูดซับที่จะนำมาใช้ในการทดลองแบบ Column studies แบ่งออกเป็นดังนี้

A และ AA คือ ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับลีโอนาร์ไคต์ในอัตรา 1.0 : 1.0 และ 1.0 : 0.5 ตามลำดับ

B และ BB คือ ดินจากพื้นที่การเกษตรและลีโอนาร์ไคต์ ที่อัตรา 1.0 : 1.0 และ 1.0 : 0.5 ตามลำดับ (โดยมีลีโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลาง)

C คือ ดินจากพื้นที่การเกษตร

D คือ ทรายออกตาวา (Ottawa sand)

3.4.1 การศึกษา Breakthrough curve

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

3.4.1.1 บรรจุวัสดุดูดซับที่ทราบความหนาแน่น (กรัมต่อ ลบ.ม) ลงในคอลัมน์

3.4.1.2 ทำการ equilibrate ด้วย electrolyte (สำหรับการทดลองนี้คือ แคลเซียมคลอไรด์; CaCl_2) เป็นระยะเวลา 840 นาที

3.4.1.3 หลังจากนั้นทำการปล่อยสารละลายที่ต้องการศึกษา (ในการทดลองนี้คือ โฟแทสเซียมโบรไมด์; KBr หรือสารอะทราซีน; Atrazine) เป็นระยะเวลา 420 นาที เข้าสู่คอลัมน์

3.4.1.4 ทำหะสารออก (background solution) ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นระยะเวลา 1,260 นาที สำหรับการทดลองสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ และ 2,100 นาที สำหรับการทดลองสารละลายอะทราซีน

3.4.1.5 การวิเคราะห์สารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ Ion Chromatography (IC) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอะทราซีนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ HPLC

3.4.2 การสกัดสารอะทราซีนจากวัสดุดูดซับ

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

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

3.4.2.2 จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.2.3 นำ ethyl acetate ไประเหยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.4.2.4 เติมสารละลาย Acetonitrile ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ผลด้วย เครื่องมือวิเคราะห์ HPLC

นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ค่า moisture content ด้วยเช่นกัน โดยหลังจากการทดลอง คอลัมน์นำวัสดุดูดซับมาผสมกันและนำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักจนกว่า จะได้น้ำหนักที่คงที่ และคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น

3.5 การเก็บสารตัวอย่างจากการทดลองแบบคอลัมน์

3.5.1 การศึกษา Breakthrough curve

เริ่มเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาตั้งแต่ 630 นาที เป็นต้นไป จากบริเวณปลายท่อน้ำออก ทุก ๆ ชั่วโมงจนถึงระยะเวลา 2,520 นาที สำหรับสารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์และ 3,360 นาที สำหรับ สารละลายอาหารจีน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างสารอาหารจีนและสาร tracer (สารโบรไมด์) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของการไหลของสารในวัสดุดูดซับต่างชนิดกัน

3.6 การวิเคราะห์สารละลายอาหารจีนด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

การวิเคราะห์ปริมาณสารละลายอาหารจีน ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยมีรายละเอียดที่เลือกใช้ตลอดทั้งการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.6.1 สภาพที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับสารชะ (Mobile phase) จะใช้สารอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile ชนิด HPLC grade) และน้ำดีไอออน (DI Water) ในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 และใช้คอลัมน์ชนิด ACE C-18 (5 ไมครอน; μm) ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร

3.6.2 การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ HPLC

เมื่อเปิดเครื่องมือวิเคราะห์แล้วทำการตั้งค่าระบบ โดยให้สาร inject ที่ 20 ไมโครลิตร (μl) เลือก UV-VIS Detector ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และทำการไล่อากาศในระบบโดยปรับอัตราไหล (Flow rate) เป็น 5 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากนั้นปรับค่าอัตราการไหลที่จะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเท่ากับ 1

มีผลิตภัณฑ์ร่อนที่ รอให้กราฟ baseline คงที่ จึงทำการนิตสารละลายตัวอย่างเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสาร โดยเทียบกับค่ามาตรฐาน (standard curve)

3.7 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.7.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.7.1.1 เครื่องร่อนคัดแยกขนาด (sieve shaker) ชนิด AS200 digit ความถี่ 50 Hz, 230 V \pm 5 % รุ่น D-42781 ยี่ห้อ Retsch HAAN, Germany

3.7.1.2 เครื่องเขย่าสาร Orbital Shaker ยี่ห้อ Certomat, B.Braun Biotech Inter National

3.7.1.3 เครื่องเขย่าสาร Reciprocating Shaker ยี่ห้อ Heidolph UNIMAX 1010

3.7.1.4 เครื่องบดหยาบ ความถี่ 50 HZ กำลัง 750 W รุ่น Gmbh D-42781 ยี่ห้อ Retsch HAAN, Germany

3.7.1.5 เครื่องชั่งสารความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.7.1.6 เครื่องเหวี่ยงตะกอน (Micro Centrifuge) สามารถเหวี่ยงตะกอน ได้สูงสุด 14,000 รอบต่อนาที รุ่น NF 048 MC ยี่ห้อ NUVE

3.7.1.7 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 744 pH meter ยี่ห้อ Metrohm

3.7.1.8 ตู้อบลมร้อน (Universal Oven) ยี่ห้อ Memmert

3.7.1.9 เครื่องมือวิเคราะห์ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) รุ่น HPLC 1260 Infinity software ที่ใช้คือ chem station open lab ยี่ห้อ Agilent Technologies

3.7.1.10 เครื่องวิเคราะห์ X-ray powder diffraction (XRD) รุ่น D2 Phaser ยี่ห้อ Bruker

3.7.1.11 เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) รุ่น XGT5200 ยี่ห้อ Horiba

3.7.1.12 เครื่องวิเคราะห์ C, H, O, N และ S รุ่น CHN 628 และ 628 S ยี่ห้อ LECO

3.7.1.13 เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณ รุ่น TGA/DSC 1 ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.7.1.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope ใช้วิเคราะห์ธาตุและถ่ายภาพแบบ EDX รุ่น JSM-6010 ยี่ห้อ JEOL

3.7.1.14 เครื่อง Ion Chromatography (IC) รุ่น ICS-5000

3.7.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.7.2.1 คอลัมน์อะคริลิก ขนาด 30 cm x 5.4 cm

3.7.2.2 HPLC Column ACE C-18 (5 μ m) ขนาด 4.6 x 250 mm ของ Advanced Chromatography Technologies Ltd. (ACE)

3.7.2.3 Micro Centrifuge Tube ขนาด 1.5 ml

3.7.2.4 EPA Vials ขนาด 40 ml

3.7.2.5 Nylon syringe filter ขนาด 0.45 μ m

3.7.2.6 กระจกน็ดชา ขนาด 5 ml

3.7.2.7 Vials ขนาด 1.5 ml

3.7.2.8 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.7.2.9 Peristaltic Pump ชนิด Shenchen pump YZ 1515 X รุ่น BT 100 N

3.7.2.10 สายยางชนิด Viton ขนาด 1.6 mm

3.7.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.7.3.1 สารปราบศัตรูพืชอะทราซีน (Atrazine) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98.1 ผลิตโดย บริษัท Chem service

3.7.3.2 Methanol (MeOH) ชนิด HPLC Grade ผลิตโดยบริษัท RCI labscan

3.7.3.3 Acetonitrile ชนิด HPLC Grade ผลิตโดยบริษัท RCI labscan

3.7.3.4 Sodium hydroxide (NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.5 Sodium chloride (NaCl) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.6 Hydrochloric Acid (HCl) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.7 Potassium hydrogen phthalate (KHP) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.8 Potassium dihydrogen phthalate (KH_2PO_4) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.9 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

3.7.3.10 Sodium bicarbonate (NaHCO_3) ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.11 Dichloromethane, CH_2Cl_2 ยี่ห้อ Carlo ERBA Reagents จากบริษัท Integration in Dasit Group S.P.A. จากประเทศ อิตาลี

3.7.3.12 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

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุดูดซับ

4.1.1 คุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์ (LND)

การศึกษาองค์ประกอบของลีโอนาร์ไคต์ ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบเคมี เพื่อนำข้อมูลต่าง ๆ มาใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้ลีโอนาร์ไคต์มาเป็นวัสดุดูดซับสารละลายอาหารจีน โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของลีโอนาร์ไคต์ (Leonardite)

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าที่ได้
moisture	เปอร์เซ็นต์	7.11
pH (Ind : น้ำ)	-	2.85
pH (Ind : 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 ₂		43.89
- Si ₃		21.80
- Al ₂ O ₃	เปอร์เซ็นต์	19.18
- Fe ₂ O ₃		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

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของลีโอนาร์ไคต์ (Leonardite) (ต่อ)

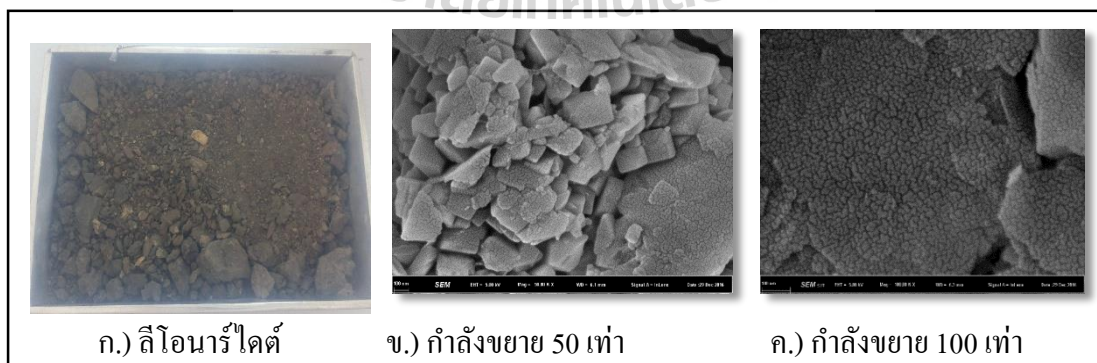
คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าที่ได้
Pore volume	ลบ.ม ต่อกรัม	7.5512×10^{-2}
Pore dimeter	นาโนเมตร	21.648

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของลีโอนาร์ไคต์กับค่ามาตรฐานจาก International Humic Substances Society (IHSS) และงานวิจัยอื่น ๆ ได้ดังตารางในภาคผนวก ข.1 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1.1.1 คุณลักษณะทางกายภาพ

1. ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลีโอนาร์ไคต์

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลีโอนาร์ไคต์ จะพบว่าลีโอนาร์ไคต์มีพื้นที่ผิวประมาณ 13.59 ตร.ม ต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 7.5512×10^{-2} ลบ.ม ต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเท่ากับ 21.648 นาโนเมตร และเมื่อจำแนกขนาดของรูพรุนจะพบว่าลีโอนาร์ไคต์จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง คือมีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนกลางและขนาดใหญ่จะมีบทบาทต่อการดูดซับค่อนข้างน้อย แต่จะทำหน้าที่เป็นทางผ่าน (path way) ให้สารละลายอาหารพืชเข้าไปยังบริเวณโพรงด้านในของลีโอนาร์ไคต์ ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในโครงสร้างภายในของอนุภาค (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) โดยที่พื้นที่ผิวและรูพรุนมีความสำคัญต่อการดูดซับของสารละลาย กล่าวคือ การดูดซับของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ดีที่วัสดุดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับ ยังขึ้นกับ ขนาดการกระจายตัวของขนาดรูพรุน และ เคมิพื้นผิวของสารดูดซับอีกด้วย ซึ่งจะรวมถึงคุณสมบัติของสารมีขั้ว และหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วย



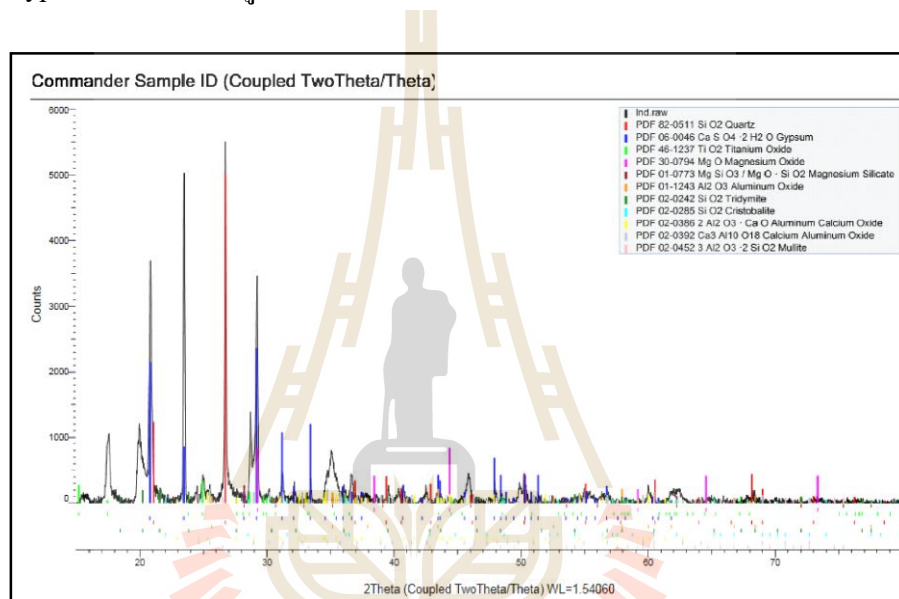
ก.) ลีโอนาร์ไคต์

ข.) กำลังขยาย 50 เท่า

ค.) กำลังขยาย 100 เท่า

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นฐานของลีโอนาร์ไคต์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM

จากลักษณะรูปถ่ายในรูปที่ 4.1 (จ.) ที่กำลังขยาย 50 เท่า ลีโอนาร์ไดต์มีลักษณะพื้นฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยม เรียงกันไม่เป็นระเบียบ และเมื่อทำการขยายรูปเป็น 100 เท่า จะพบว่าเกิดรอยแตกในส่วนขอบบริเวณพื้นที่ผิวทั่วทั้งชิ้นงาน และมีช่องว่างจำนวนมากระหว่างรอยแตก ซึ่งการเกิดของรอยแตกอาจเกิดจากการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิต เนื่องจากลีโอนาร์ไดต์เป็นวัสดุเคลือบที่ใช้ที่ได้จากการทำไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัสดุหลัก 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 โดยพบว่าลีโอนาร์ไดต์ที่ได้จากการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 50 - 105 องศาเซลเซียส ในปริมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียของน้ำที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของลีโอนาร์ไดต์ สำหรับอุณหภูมิ 103-180 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ 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 ฟลูวิก และฮิวมินได้เปลี่ยนเป็นองค์ประกอบของคาร์บอนและเกิดการสลายตัวที่ความร้อนสูง ๆ ดังนั้นการเปลี่ยนสภาพด้วยความร้อนโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันจะทำให้โครงสร้างของสารอินทรีย์ในลิโอนาร์ไคต์เกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจจะส่งผลต่อการดูดซับได้ เนื่องจากรพรมมีมากขึ้น (Ausavasukhi et al., 2016)

2. ค่า pH

การวิเคราะห์ค่า pH ที่ได้จากวิธีการใช้ลิโอนาร์ไคต์ต่อ โปแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และน้ำที่อัตราส่วนเท่ากัน จะพบว่าค่า pH ที่ได้จากลิโอนาร์ไคต์ต่อสารโปแทสเซียมคลอไรด์จะมีค่าความเป็นกรดที่ต่ำกว่าประมาณ 0.2-0.5 ของหน่วย pH ซึ่งการใช้โปแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) จะทำให้ทราบถึงปริมาณกรดจริงและกรดแฝง รวมถึงช่วยลดค่าแปรปรวนที่อาจเกิดจากปริมาณของเกลือที่สามารถละลายออกมาได้ จากงานวิจัยจะพบว่าค่า pH ของลิโอนาร์ไคต์ต่อน้ำและโปแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) มีค่าเท่ากับ 2.85 และ 2.34 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าลิโอนาร์ไคต์มีความเป็นกรดแก่ (strong acid) ($\text{pH} < 4.5$) อาจเพราะลิโอนาร์ไคต์เกิดการปลดปล่อยความเป็นกรดในรูปของสารละลายได้สูง โดยค่า pH จะส่งผลต่อการดูดซับของสารละลายอาหาราซินได้ เนื่องจากค่า pH มีผลโดยตรงต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุดูดซับ และสภาพการละลายได้ของธาตุหลายชนิด ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุดเมื่อวัสดุดูดซับมีค่า pH ที่ต่ำ นอกจากนี้การทดลองที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุชาดา โภชาคม (2556) ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี จากเหมืองแม่เหาะ จังหวัดลำปาง โดยค่า pH ที่วิเคราะห์ได้จากการใช้ลิโอนาร์ไคต์ต่อน้ำและโปแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) คือ 3.90 และ 3.58 ตามลำดับ และงานวิจัยของ ณชรศ สมจันทร์(2557) จนิตดา สุกิจปานินิจ (2557) และ Ratanaprommanee et al (2014) ด้วย ซึ่งแสดงดังตารางที่ ข.2 อาจเนื่องมาจากลิโอนาร์ไคต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแหล่งเดียวกัน ทำให้ค่า pH ที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้การนำลิโอนาร์ไคต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดินจะต้องคำนึงถึงค่า pH ด้วยเนื่องจากค่า pH จะส่งผลกระทบต่อดินและพืชเพาะปลูกได้ สำหรับค่าที่เหมาะสมของปุ๋ยอินทรีย์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 5.5-8.5 (สุชาดา โภชาคม, 2556)

3. ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation exchange capacity, CEC)

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) ของลิโอนาร์ไคต์ที่ได้จากงานวิจัยพบว่า มีค่าประมาณ 59.89 ซีโมลต่อกิโลกรัม (cmol/kg) ซึ่งถือว่ามีค่า CEC ค่อนข้างสูง สอดคล้องกับงานวิจัยที่แสดงได้ดังตาราง ค.2 ค่า CEC ของลิโอนาร์ไคต์ที่สูงจะบ่งบอกถึงปริมาณของสารฮิวมัส เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ และกำลังบัฟเฟอร์ที่สูง เช่นเดียวกับการทดลองของ Ratanaprommanee et al (2014) ที่อธิบาย

ถึงการปลดปล่อยโปรตอน (H^+) จากธาตอะลูมิเนียม (Al) ของลิโอนาร์ไคต์เมื่อถูกละลายในน้ำ และทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนดังสมการที่ 4.1



นอกจากนี้ค่า CEC ที่สูงขึ้นอาจทำให้การดูดซับของสารอาหารอื่นจะลดลง เนื่องจากสารอาหารอื่นมีลักษณะเป็นโปรโทเนต (protonated) กล่าวคือเกิดการเติมโปรตอน (H^+) ให้กับอะตอมบนพื้นที่ผิวของสารอาหารอื่นแล้วทำให้เกิดคู่กรดขึ้น ซึ่งจะเกิดได้ในกรณีที่มีค่า pH น้อยกว่าค่า pK_a (Salavestrini et al., 2010) ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันนอลของลิโอนาร์ไคต์อาจมีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารอื่นได้

4. ปริมาณอินทรีย์วัตถุในลิโอนาร์ไคต์

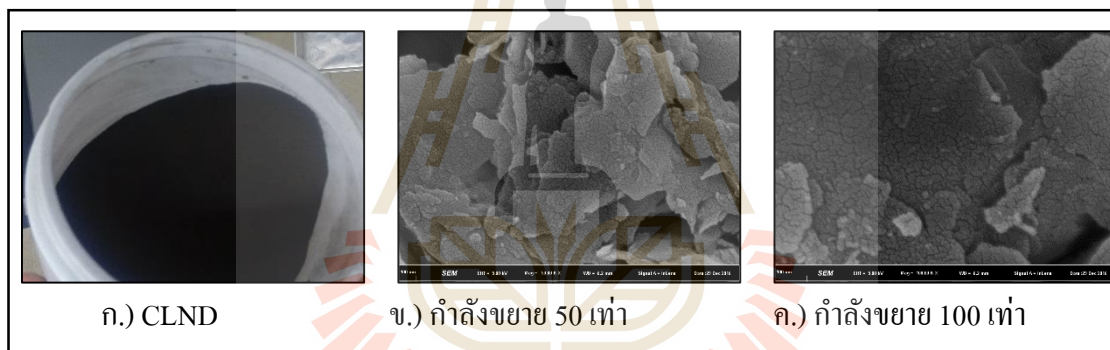
จากการทดลองพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุของลิโอนาร์ไคต์มีปริมาณค่อนข้างสูงถึง 40.53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนที่วิเคราะห์ได้ก่อนหน้าซึ่งค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุจะสอดคล้องกับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) กล่าวคือ ถ้าวัสดุดูดซับมีค่าอินทรีย์วัตถุในปริมาณมาก จะทำให้ค่า CEC ในวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการจะนำลิโอนาร์ไคต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงดิน อาจจะช่วยเพิ่มธาตุอาหารและทำให้คุณสมบัติของดินในพื้นที่การเกษตรได้ดีขึ้น โดยเฉพาะดินที่ไม่สามารถดูดซับน้ำได้อย่างเช่น ดินทราย หรือดินในพื้นที่แห้งแล้ง เป็นต้น

4.1.2 คุณสมบัติของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

จากผลการทดลองข้างต้นได้นำลิโอนาร์ไคต์บางส่วนไปผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ รวมถึงประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารอื่น ซึ่งลักษณะทางกายภาพของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน แสดงได้ดังต่อไปนี้

จากการทดลองพบว่าลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 7.5978 ตร.ม ต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.1495 ลบ.ม ต่อกรัมและขนาดของรูพรุนเท่ากับ 7.8732 นาโนเมตร จากข้อมูลข้างต้นพบว่าโครงสร้างรูพรุนของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันจัดอยู่ในประเภทรูพรุนขนาดเล็ก (< 2 นาโนเมตร) (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำ และวัตถุดิบประเภทคาร์บอนหรือ สารชีวมวล โดยจะมีการสลายตัวของโมเลกุลระเหยง่ายในระหว่างทำให้ความร้อนจึงทำให้ได้เป็นสารอะโรมาติกเพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือ เกิดการแตกตัวของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส ซึ่งคาร์บอนอิสระที่มีจะอยู่รวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ พร้อมกับเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก แต่ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์โบไนเซชันจะมีความสามารถในการดูดซับต่ำ อาจเป็นเพราะภายในช่องว่าง หรือพื้นผิวมีการตกค้างของน้ำมันทาร์อยู่ (ปริญทร เต็มชาญารศิลป์, 2551) นอกจากนี้อัตราเร็วการให้ความร้อนก็มีผลต่อขนาดของรูพรุนด้วย กล่าวคือ ถ้าอัตราเร็วการให้ความร้อนสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยา

การกำจัดสารระเหยง่ายที่เร็วมาก ทำให้ได้คาร์บอนที่ได้มีขนาดกลาง และขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งต่างจากการใช้อัตราเร็วการให้ความร้อนที่ต่ำ (สำหรับการทดลองนี้มีการใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที) ที่ส่งผลให้การกำจัดสารระเหยง่ายเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าและเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กมากกว่า (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) และจากการทดลองของ Ausavasukhi et al (2016) ที่ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) จะพบว่าค่าพีคของการสั่นของสารอินทรีย์อย่างพันธะ O-H, C-H, O=O และ C=C มีค่าลดลง แสดงได้ว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในลิโอนาร์ไคต์อย่างสารประกอบชีวโมเลกุลมีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ และเมื่อพิจารณาลักษณะภาพถ่ายสัณฐานของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันจะพบว่า ที่กำลังขยายมีลักษณะจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ มีการซ้อนกันหลายชั้น และเห็นรอยแตกที่บริเวณพื้นที่ผิวอย่างชัดเจน ซึ่งรอยแตก ที่เกิดขึ้นมาจากการเผาที่อุณหภูมิสูงและคงที่ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ SEM

4.1.3 คุณลักษณะของดินจากพื้นที่ทำการเกษตร

ดินที่นำมาใช้ทำการทดลองได้รับความอนุเคราะห์มาจากพื้นที่การเพาะปลูกอ้อย ในจังหวัดนครราชสีมาแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จากนั้นนำดินที่ได้ไปศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ดินจากพื้นที่ทำการเกษตร ในจังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของดินจากพื้นที่ทำการเกษตร

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าที่ได้
moisture	%	0.35
pH (Ind : น้ำ)	-	5.64
pH (Ind : 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 4.4 จะพบว่าค่าความชื้นของดินที่ตรวจพบได้มีค่าเท่ากับ 0.35 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.0035 กรัมต่อกรัม (โดยน้ำหนัก) แสดงว่ามีดินมีความแห้งค่อนข้างสูง (มีค่าต่ำกว่า 0.05 กรัมต่อกรัม) (Fares et al., 2016) และเมื่อพิจารณาพร้อมกับลักษณะของเนื้อดินจะพบว่าดินส่วนใหญ่เป็นแบบดินทราย เนื่องจากดินทรายจะมีความอุ้มน้ำที่ต่ำ และมีอนุภาคที่มีพื้นผิวจำเพาะ (specific area) น้อยที่สุด ประกอบกับมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนและปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่ำ ดังนั้นความสามารถในการดูดซับสารจึงมีค่าน้อย (สุกมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) และเมื่อพิจารณาค่าคุณลักษณะทางเคมีจะพบว่าค่า pH ของดินมี

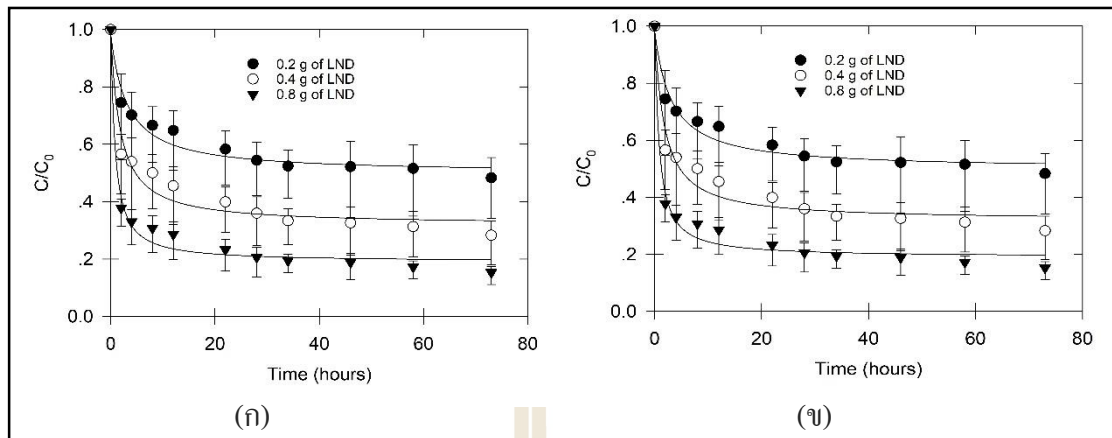
ค่าความเป็นกรดอ่อน (pH อยู่ระหว่าง 4 ถึง 6) ดังนั้นการทดลองนี้พอจะคาดคะเนในเบื้องต้นได้ว่าดินจากพื้นที่การเกษตรที่นำมาศึกษาอาจจะไม่เกิดการดูดซับสารอาหารไนโตรเจน หรืออาจเกิดได้ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยมาก

4.2 ผลการศึกษาแบบแบชต์ (Batch studies)

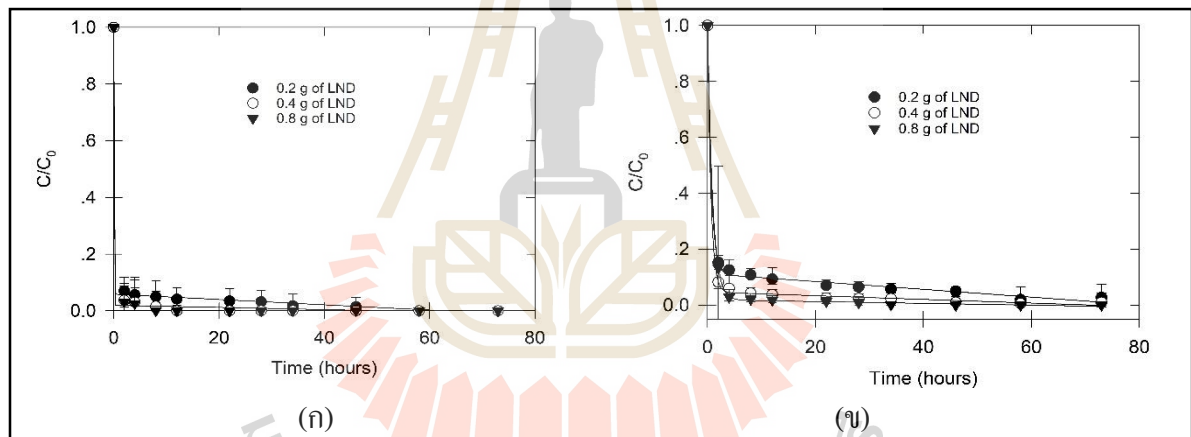
4.2.1 ระยะเวลาสัมผัส (contact time)

จากการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND) ในปริมาณต่างกัน คือ 0.2 , 0.4 และ 0.8 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารอาหารไนโตรเจน 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C/C₀ และระยะเวลาสัมผัสแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 จากการทดลองพบว่าลิโอนาร์ไคต์ มีการดูดซับได้ดีในช่วงแรก ๆ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 22 ชั่วโมงจนถึง 48 ชั่วโมง เกิดการดูดซับสารเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากผลการทดลองการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนเบื้องต้นพบว่าลักษณะแนวโน้มของระยะเวลาสมดุลในการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนคือ 24 ชั่วโมง ดังภาคผนวก ค.1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeledon et al (2005) ที่ทำการศึกษการดูดซับสาร PAHs ในน้ำด้วยลิโอนาร์ไคต์ พบว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลคือ 24 ชั่วโมง และงานวิจัยของ Yue (2017) ที่ศึกษาการดูดซับสารอาหารไนโตรเจนในดิน ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาในการสัมผัสสารเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเช่นกัน

สำหรับการทดลองการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) พบว่า ที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงเป็นต้นไปสารละลายอาหารไนโตรเจนเริ่มเกิดการดูดซับและเริ่มคงที่จนเข้าสู่จุดสมดุลที่ 22 ชั่วโมง จากนั้นเกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากการใช้ความร้อนในการตัดแปลงพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ ทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กขึ้นจึงเกิดการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนได้ดีกว่าลิโอนาร์ไคต์ที่ไม่ได้ตัดแปลงพื้นที่ผิว ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Llado et al (2015) ที่ได้ทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยจากการศึกษาพบว่าสารละลายอาหารไนโตรเจนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาสมดุล ที่ 1500 นาที หรือประมาณ 25 ชั่วโมง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jamil et al (2011) ที่ศึกษาการดูดซับสารอาหารไนโตรเจนด้วยซีโอไลต์ตัดแปรร่วมกับดินเหนียว จะพบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับคือ 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป ดังนั้นในการศึกษาค่าไอโซเทอมของการดูดซับและปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับจะเลือกใช้ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ระยะเวลาสัมพัทธ์การดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลิโอนาร์ไคด์ที่ความเข้มข้น โดยที่ (ก) และ (ข) คือ 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ระยะเวลาสัมพัทธ์การดูดซับสารละลายอาหารซินด้วยลิโอนาร์ไคด์ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันที่ความเข้มข้น (ก) และ (ข) คือ 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

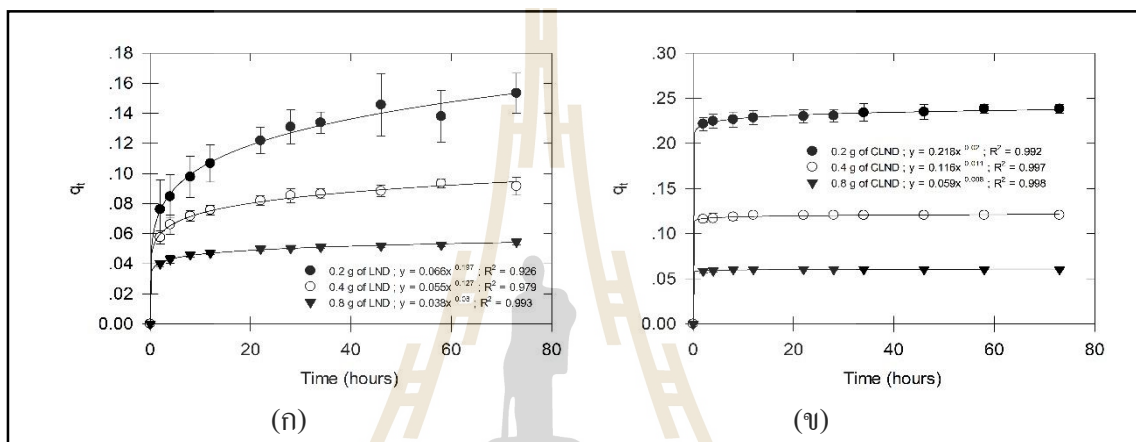
4.2.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารซิน

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

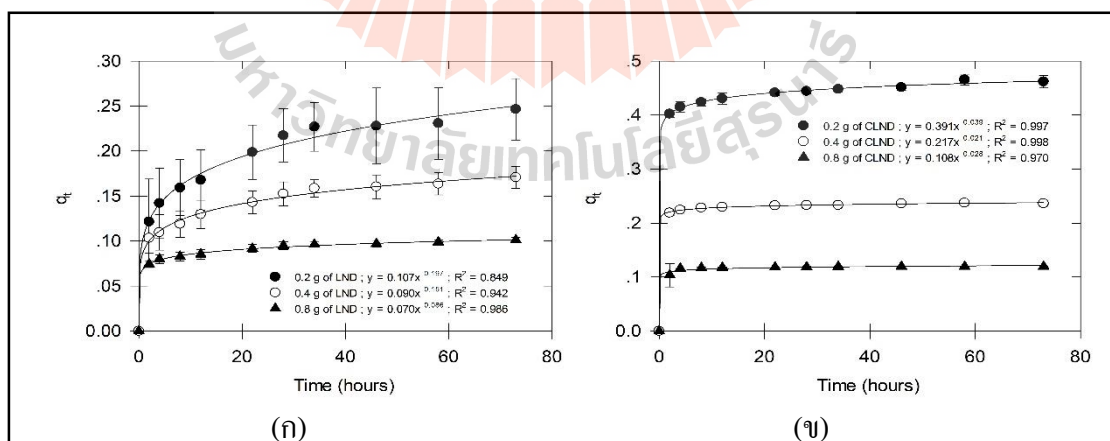
จากผลการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสารอาหารขึ้นด้วยลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน ที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

4.2.2.1 Pseudo first order

จากสมการในตารางที่ 2.6 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_t กับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (non-linear) ได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยที่ค่า K_1 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (ต่อนาที)



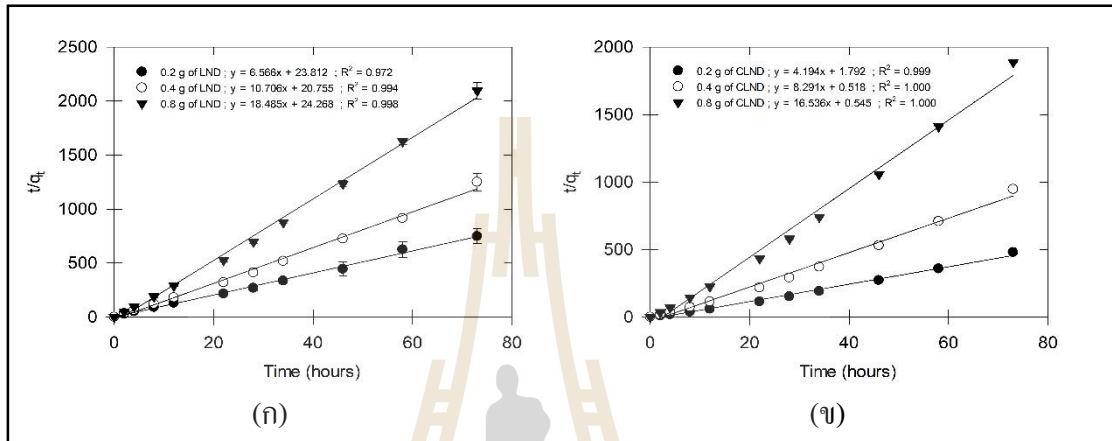
รูปที่ 4.7 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) และ (ข) คือ ลิโอนาร์ไคต์ (LND) และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ตามลำดับ



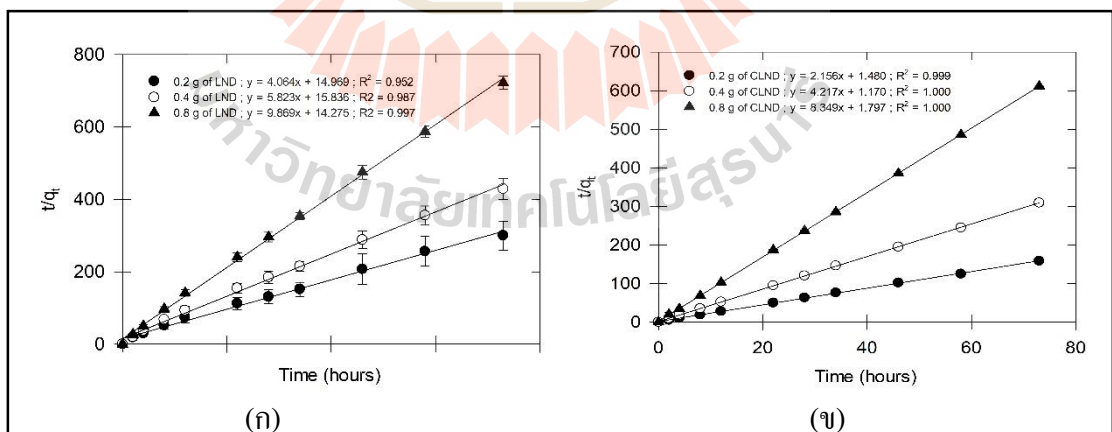
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) และ (ข) คือ ลิโอนาร์ไคต์ (LND) และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ตามลำดับ

4.2.2.2 Pseudo second order

จากสมการในตารางที่ 2.6 นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (non-linear) ได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 โดยที่ค่า K_1 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)



รูปที่ 4.9 จดผลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) และ (ข) คือ ลีโอนาร์โดต์ (LND) และลีโอนาร์โดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 จดผลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซิน 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ (ก) และ (ข) คือ ลีโอนาร์โดต์ (LND) และลีโอนาร์โดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ตามลำดับ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการเขียนกราฟข้างต้นไปหาค่าพารามิเตอร์ของเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแบบ Pseudo first order และ Pseudo second order สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3-4.6

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีนที่ความเข้มข้น 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 (min^{-1})	0.197	0.127	0.080
R^2	0.926	0.979	0.993
Pseudo second order (linear form)			
q_c (mg/g)	0.042	0.048	0.041
K_2 (min^{-1})	3.626	1.946	1.319
R^2	0.972	0.994	0.998

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีนที่ความเข้มข้น 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 (min^{-1})	0.197	0.151	0.086
R^2	0.849	0.942	0.986
Pseudo second order (linear form)			
q_c (mg/g)	0.068	0.063	0.070
K_2 (min^{-1})	3.618	2.726	0.691
R^2	0.952	0.987	0.997

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน ที่ความเข้มข้น 2.0 mg/l ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

parameter	0.2 g of CLND	0.4 g of CLND	0.8 g of CLND
Pseudo first order (non-linear form)			
q_t (mg/g)	0.218	0.116	0.059
K_1 (min ⁻¹)	0.020	0.011	0.008
R^2	0.992	0.997	0.998
Pseudo second order (linear form)			
q_e (mg/g)	0.558	1.931	1.835
K_2 (min ⁻¹)	0.427	0.062	0.033
R^2	0.999	1.0000	1.0000

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหาราซีน ที่ความเข้มข้น 4.0 mg/l ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

parameter	0.2 g of CLND	0.4 g of CLND	0.8 g of CLND
Pseudo first order (non-linear form)			
q_t (mg/g)	0.391	0.217	0.108
K_1 (min ⁻¹)	0.039	0.021	0.028
R^2	0.997	0.998	0.970
Pseudo second order (linear form)			
q_e (mg/g)	0.676	0.855	0.556
K_2 (min ⁻¹)	0.686	0.277	0.215
R^2	0.999	1.0000	1.0000

จากกราฟข้างต้นเมื่อพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression, R^2) จะพบว่าการดูดซับของสารละลายอาหาราซีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND) และ ลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND) ที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัม ต่อลิตร มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป จนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาที่สมดุล การดูดซับสารอาหาราซีนด้วยวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการแพร่บนพื้นผิว

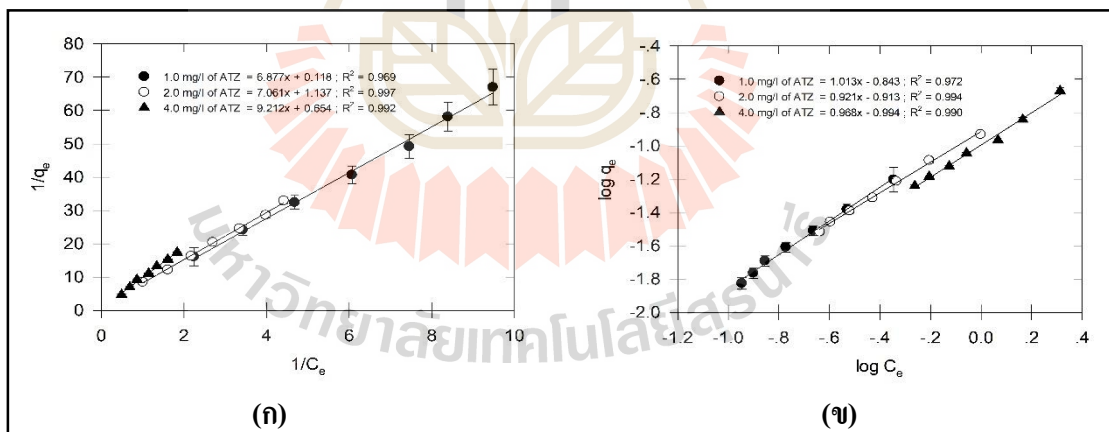
ภายในอนุภาค (surface diffusion) และอาจมีลักษณะการดูดซับเป็นแบบเคมี (Sakulthaew et al., 2017) ซึ่งจะมีปัจจัยอื่น ๆ มาเกี่ยวข้องกับการดูดซับด้วย อาทิเช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น

4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหาราซินด้วยลิโอนาร์ไคต์

4.2.3.1 การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหาราซินด้วยลิโอนาร์ไคต์

จากการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุล ณ อุณหภูมิห้องได้ทำการเตรียมสารละลายอาหาราซินที่ ความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณลิโอนาร์ไคต์ตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.4 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ค่าความสามารถในการดูดซับและลักษณะไอโซเทอมแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถนำมาศึกษาลักษณะไอโซเทอมสำหรับการดูดซับได้ทั้งแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) ดังสมการในตารางที่ 2.6 จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงจะได้ค่าคงที่ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.11 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหาราซินด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ (ก) คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ (ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วย ลีโอนาร์ไคต์

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	q_{max} (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	K_L (ลิตรต่อ มิลลิกรัม)	R^2	k_f (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	$1/n$ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	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

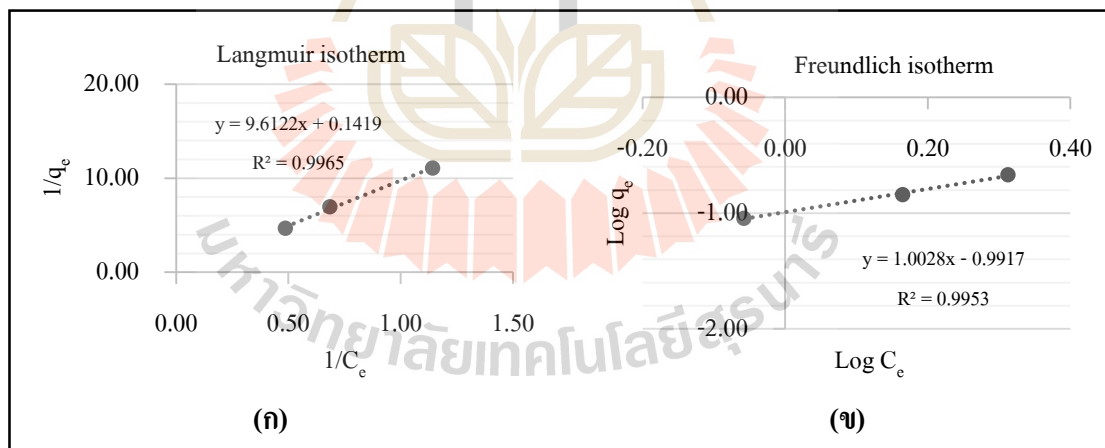
เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ ค่า R^2 (ค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอมของแต่ละชนิดว่าแบบใดดีกว่ากัน โดยที่ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับชนิดนั้น ๆ เหมาะที่จะนำไอโซเทอมชนิดนั้นมาอธิบายลักษณะการดูดซับ) จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่า R^2 ของทั้งสองไอโซเทอมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ได้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) พลังงานการดูดซับมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง และการดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) ส่วนที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่า แสดงได้ว่าการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไคต์อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) และแรงดูดซับเป็นแบบแรงแวลเดอร์วาล์ โดยมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับสารละลายเท่ากับ 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 พื้นผิวการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว สามารถเกิดการผันกลับได้ และพลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของวัสดุดูดซับ (homogeneous surface) (Sakulthaew et al., 2017) จากตารางจะเห็นได้ว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมสำหรับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยจะพบว่าค่าความหนาแน่น

ในการดูดซับ (n) ระหว่างลิโอนาร์ไคต์กับสารละลายอาหารสีที่ความเข้มข้น 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 $1/n$ ที่ได้จากการมีค่าเท่ากับ 1.013, 0.921 และ 0.968 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะพบว่าที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้อยกว่า 1 (เมื่อค่า $1/n > 1$) แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคต์มีปริมาณจำกัดที่จะใช้สำหรับดูดซับสารละลายอาหารสี ส่วนที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงได้ว่า บริเวณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคต์มีปริมาณมาก ทำให้สามารถดูดซับสารละลายอาหารสีได้อีก

และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารสีระหว่างลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน จึงได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของไอโซเทอมเพิ่มเติม โดยใช้ข้อมูลข้างต้นที่ปริมาณของลิโอนาร์ไคต์เท่ากับ 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมในการดูดซับสารละลายอาหารสีที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระยะเวลาสมดุล ซึ่งพบว่าการดูดซับสารละลายอาหารสีมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่า แสดงได้ว่าลักษณะการดูดซับเป็นแบบเคมี โดยผลจากการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ



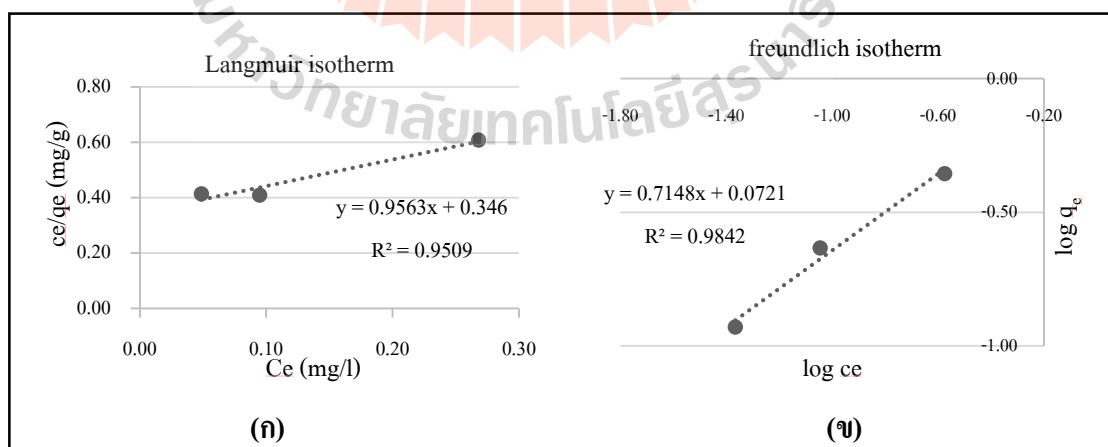
รูปที่ 4.12 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไคต์โดยที่ (ก) คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ (ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วย ลีโอนาร์ไคต์

Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
q_{\max} (mg/g)	K_L (l/mg)	R^2	k_f (mg/g)	$1/n$ (mg/l)	R^2
7.0472	0.0147	0.9965	0.1019	1.0028	0.9953

4.2.3.2 การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วย ลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีที่ระยะเวลาสมดุล (22 ชั่วโมง) โดยทดลองที่ความเข้มข้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันในปริมาณ 0.2, 0.4 ถึง 0.8 กรัม แสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้น หรือ ค่า R^2 ลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันเท่ากับ 0.9542 ซึ่งมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยจะพบว่าค่าคงที่ n มีค่าเท่ากับ 1.3990 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าเกิดการดูดซับได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าบริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีปริมาณจำกัดสำหรับการดูดซับสารละลาย ซึ่งค่าคงที่ที่ได้จากการ ไอโซเทอมแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณของวัสดุดูดซับและค่าความเข้มข้นมีผลต่อค่าความสามารถการดูดซับสารละลายอาหารสี



รูปที่ 4.13 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน โดยที่ (ก) คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และ (ข) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วย ลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน

Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
q_{\max} (mg/g)	K_L (l/mg)	R^2	k_f (mg/g)	$1/n$ (mg/l)	R^2
1.0457	2.7638	0.9509	1.1806	0.7148	0.9842

จากการศึกษาลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับสรุปได้ว่า ปริมาณของวัสดุดูดซับและค่าความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับ (อธิบายได้ดังหัวข้อที่ 4.2.4.1) กล่าวคือถ้าความเข้มข้นสูงแต่ปริมาณวัสดุดูดซับมีค่าน้อยกว่า ค่าความสามารถการดูดซับจะเกิดได้น้อยกว่า จากตารางที่ 4.8 จะพบว่าค่า R^2 ของสมการแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9965$) และฟรุนดลิช ($R^2 = 0.9953$) ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก อาจเป็นเพราะลีโอนาร์ไคต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับไม่ได้ผ่านกระบวนการที่ทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งจะมีธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย จึงอาจทำให้ลักษณะของไอโซเทอมที่ได้นั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการกระจายตัว ขนาดของรูพรุน หมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน และปริมาณธาตุที่อยู่ในวัสดุดูดซับ (Laldo et al., 2015) มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารสี สำหรับการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน เมื่อพิจารณาค่าคงที่จากสมการในตารางที่ 4.9 จะพบว่าค่า R^2 มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารจะพบว่าค่าความจุดูดซับสูงสุด (q_{\max}) ของลีโอนาร์ไคต์มีค่ามากกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 7.0472 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันมีค่าเท่ากับ 1.0457 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งอาจจะเป็นเพราะพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับมีค่าน้อย จึงทำให้เกิดการดูดซับสารได้น้อยกว่า ลีโอนาร์ไคต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน

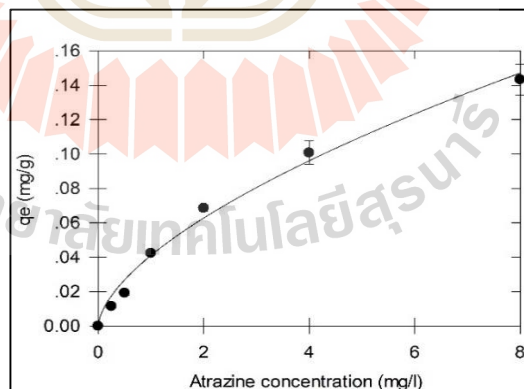
ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นอาจเป็นไปได้ทั้งการดูดซับสารร่วมกับการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุ โดยการดูดซับอาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบลีโอนาร์ไคต์ จากนั้นเกิดการแพร่กระจายของสารเข้าบริเวณรูพรุนของลีโอนาร์ไคต์ ซึ่งลีโอนาร์ไคต์มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 21 นาโนเมตร ส่วนสารละลายอาหารสีมีขนาดเท่ากับ 0.85 นาโนเมตร (Rambubu et al., 2011) จะเห็นได้ว่าสารละลายอาหารสีมีขนาดเล็กกว่าลีโอนาร์ไคต์จึงอาจทำให้เกิดการแพร่ของรูพรุนของลีโอนาร์ไคต์ได้ และเมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลีโอนาร์ไคต์และลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันจะพบว่า ลีโอนาร์ไคต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารมากกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า สำหรับกลไกการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุอาจเกิดจากลีโอนาร์ไคต์มีขั้วหรือมีประจุลบบนพื้นผิวมีการทำปฏิกิริยาแบบพันธะพาย (π -bond) กับสาร การทำปฏิกิริยา

ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มอะมิโนของสารอาหารซึนกับกลุ่มคาร์บอนิลของลิโอนาร์ไคด์ (Lapworth et al., 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณพื้นผิวอนุภาคของลิโอนาร์ไคด์จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างสารกลุ่มหลัก เช่น กลุ่มคาร์บอกซิล กลุ่มคาร์บอนิล และไอออนของโลหะที่อยู่ใน โครงสร้างของลิโอนาร์ไคด์ ประกอบกับลิโอนาร์ไคด์มีค่าความเป็นกรดค่อนข้างสูง จึงอาจส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดูดซับ เช่นกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง สูง จะทำให้ค่า CEC และมีพื้นที่ในการดูดซับไอออนของสารที่สูง จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบางส่วนระหว่างบนพื้นผิวของลิโอนาร์ไคด์กับโมเลกุลของสารละลายอาหารซึนได้ (สุชาดา กรุณา, 2548) ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovaios et al (2011). ที่ทำการศึกษาการดูดซับสารอาหารซึนด้วยกรดฮิวมิก จากงานวิจัยพบว่าอาจเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโมเลกุลของกรดฮิวมิกกับสารละลายอาหารซึนได้

4.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

4.2.4.1 ความเข้มข้นของสารละลายอาหารซึนเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอาหารซึนโดยใช้ลิโอนาร์ไคด์เป็นวัสดุดูดซับ ได้ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณลิโอนาร์ไคด์ 0.4 กรัม ที่ความเข้มข้นต่างกันตั้งแต่ 0.25 ถึง 8.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถการดูดซับและค่าความเข้มข้นของสารละลายอาหารซึน แสดงได้ดังรูปที่ 4.14



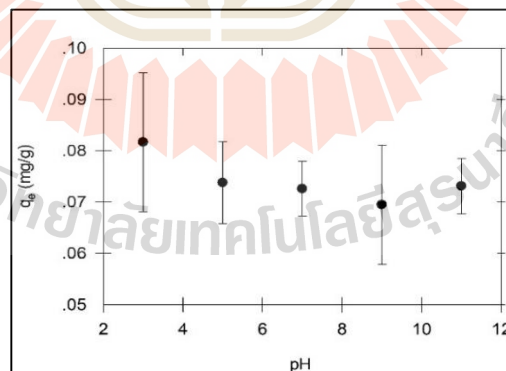
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารซึนด้วยลิโอนาร์ไคด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน

ผลการทดลองพบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม อธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะส่งผลต่อปริมาณการดูดซับ กล่าวคือ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าในช่วงแรก (ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ลักษณะการ

ดูดซับเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจเกิดจากสารละลายอาหารสีน้ำตาลได้แพร่เข้าสู่บริเวณพื้นผิวของลิโอนาร์ไคต์ จนถึงที่ความเข้มข้นที่ 2.0-8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยลักษณะการดูดซับเริ่มจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเริ่มเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ที่ความเข้มข้น 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Laldo et al (2015) ที่ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอาหารสีน้ำตาล จะพบว่าที่ความเข้มข้นสูง ๆ ค่าการดูดซับก็เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอาหารสีน้ำตาลเริ่มเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวดูดซับของลิโอนาร์ไคต์เริ่มลดลง (สุชาดา กรุณา, 2548) ทำให้อัตราการดูดซับของลิโอนาร์ไคต์ลดลง และเมื่อเกิดการดูดซับจนเต็มรูพรุนแล้ว ปริมาณการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่จนไม่สามารถเกิดการดูดซับขึ้นได้อีก เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jamil et al (2011) ที่พบว่าพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารสีน้ำตาล ซึ่งการทดลองนี้คาดว่าถ้าเพิ่มปริมาณของความเข้มข้นขึ้นลักษณะของกราฟอาจมีแนวโน้มที่ค่าความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.2.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

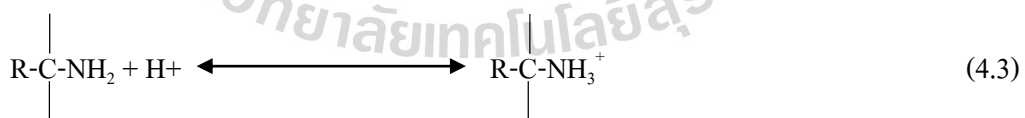
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดูดซับสารละลายอาหารสีน้ำตาล ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการหาค่า pH ที่แตกต่างกัน (pH = 3-11) ที่ปริมาณลิโอนาร์ไคต์เท่ากับ 0.4 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายอาหารสีน้ำตาลเท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตรทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถการดูดซับและค่า pH แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารสีน้ำตาลด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ pH ต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดซับสารละลายอาหารสีน้ำตาลด้วยลิโอนาร์ไคต์มีประสิทธิภาพดีที่ค่าความเป็นกรดแก่ (pH = 3) เนื่องจากสารละลายอาหารสีน้ำตาลมีค่าความเป็นเบสอ่อน (Shirmardi et al., 2016) จึงทำให้ลิโอนาร์ไคต์ที่มีค่าความเป็นกรดสูง (พิจารณาจากตารางที่ 4.1) สามารถดูดซับสารละลายอาหารสีน้ำตาลที่ค่าความเป็นเบสอ่อนได้ ประกอบกับค่า pKa ของสารละลาย

อาหาราซินที่มีค่า pKa = 1.68) จึงทำให้เกิดการแตกตัวและให้โปรตอนได้ดี จากที่กล่าวมาข้างต้น ลิโอนาร์ไคต์มีประจุลบจำนวนมาก จึงทำให้อาจเกิดการแตกตัว (dissociation) ได้บางส่วนจากสารประกอบกลุ่มคาร์บอกซิล ทำให้สารละลายที่ได้มีค่าความเป็นกรด ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งกลไกการดูดซับอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (protonation) ของกลุ่มเอมีน (amine group) บนอนุภาคของลิโอนาร์ไคต์ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตยบนพื้นผิวของลิโอนาร์ไคต์ (Ausavasukhi et al., 2015) ทำให้อาหาราซินอยู่รูปของไอออนมากขึ้น เกิดประจุบวกที่มากขึ้น จึงเกิดการดูดซับได้มากขึ้น (Yue et al., 2016) โดยกลไกดังกล่าวจะทำให้เกิดการดูดซับแคตไอออนของสารได้ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.3 และจากงานวิจัยของ Masset et al (2000) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดฮิวมิกใน goethite ในการดูดซับสารโคบอลต์ (Co (II)), สตรอนเชียม (Sr (II)) และ ซีลีเนียม (Se (IV)) ได้อธิบายว่า กลไกการดูดซับอาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนลิแกนด์บนพื้นผิวของวัสดุได้มีการ coordinate (surface-coordinate) ทำให้กลุ่มแอนไอออน (anionic group) ของกรดฮิวมิกจะเข้าไปแทนที่หมู่ OH⁻ บน goethite ซึ่งงานวิจัยนี้อาจมีลักษณะคล้ายกันกล่าวคือ มีการแลกเปลี่ยนและแทนที่ระหว่างหมู่คาร์บอนิลของลิโอนาร์ไคต์และหมู่อะมิโนของสารละลายอาหาราซิน (Wei et al., 2017) นอกจากนี้ โมเลกุลของอินทรีย์วัตถุในลิโอนาร์ไคต์ยังมีประจุบวกอยู่บางส่วนจึงอาจทำให้สามารถดูดซับแอนไอออนได้เช่นกัน (ไกรศรี ทองเสมียน, 2551) ประกอบกับโมเลกุลของกรดฮิวมิกจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (Carboxylic, -COOH group) และฟีนอลิก (Phenolic or Phynyl, -C₆H₃OH group) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของลิโอนาร์ไคต์ได้ (วิวัฒน์ และคณะ, 2552)



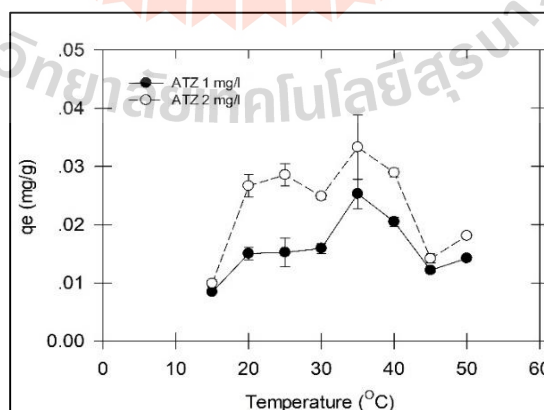
นอกจากนี้ยังพบว่าออกซิเจนของหมู่คาร์บอนิลจะมีความเป็นลบ ส่วนหมู่คาร์บอนจะมีความเป็นบวกจึงทำให้สามารถเกิดการดึงดูดอิเล็กตรอนจากพันธะ C-H ของสารอาหาราซินที่มีฤทธิ์เป็นเบสได้ ประกอบกับกรดฮิวมิกที่เป็นองค์ประกอบของลิโอนาร์ไคต์มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารละลายอาหาราซินได้ด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ (Kovaios et al., 2011; Wang et al., 2011) และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง จะทำให้ค่า CEC ที่ได้มีค่าสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้ลิโอนาร์ไคต์มีพื้นที่ผิวดูดซับไอออนของสารละลายอาหาราซินได้ค่อนข้างสูง (สุชาดา กรุณา, 2548) และเมื่อค่า pH เป็นเบสจะพบว่าแนวโน้มของค่าการดูดซับมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะที่

สภาวะเป็นเบสสารละลายอาหารจีนมีประจุลบมากขึ้น (OH) จึงทำให้เกิดการแย่งชิงระหว่างประจุลบของสารละลายอาหารจีนได้ (Ausavasukhi et al., 2015)

4.2.4.3 อุณหภูมิ

การทดลองหาค่าอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับสารอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ได้ทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของสารอาหารจีน 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณลิโอนาร์ไคต์จำนวน 0.4 กรัม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 15 ถึง 50 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารจีนและอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ค่าการดูดซับเริ่มเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส และพบว่าค่าการดูดซับสารอาหารจีนดีที่สุดหลังจากนั้นค่าการดูดซับเริ่มลดต่ำลงที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มที่เริ่มสูงขึ้นอีกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อาจเป็นเพราะกระบวนการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน และเมื่อค่าความร้อนสูงขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ อาจเกิดการคายซับของสารละลายอาหารจีนบางส่วนจึงทำให้ค่าการดูดซับสารลดลงเพียงเล็กน้อย (Kovaios et al., 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sebata et al. (2013) ที่ทำการดูดซับสารอาหารจีนด้วยเปลือกถั่วลิสง โดยจะพบว่าที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียสมีค่าความจุในการดูดซับสารได้ดีที่สุด ซึ่งอธิบายว่าจะเกิดการคายซับสูงเมื่อค่าการดูดซับสารมีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจจะส่งผลต่อโมเลกุลของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างของกรดฮิวมิคในลิโอนาร์ไคต์ให้ลดลงได้ (Canieren et al., 2017) จึงอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพดูดซับสารละลายอาหารจีนที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



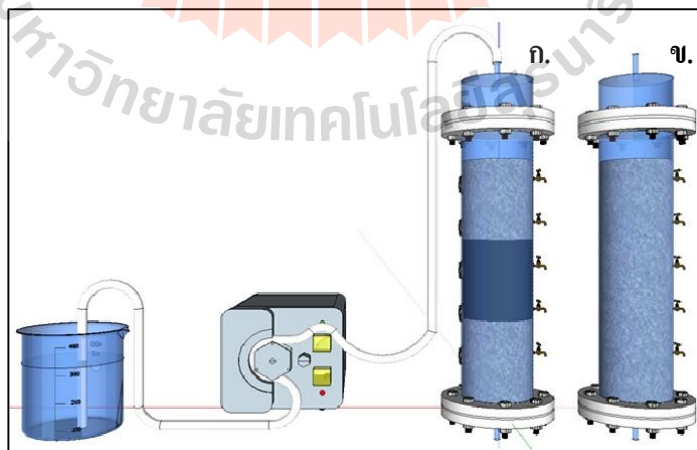
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์การดูดซับสารอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (column studies)

การทดลองแบบคอลัมน์มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหารไนโตรเจนร่วมกับดินจากพื้นที่การเกษตรทั้งแบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันและแบบแยกชั้น กล่าวคือเป็นการนำเอาลิโอนาร์ไคต์มาประยุกต์ใช้กับดินในพื้นที่การเกษตร ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated) โดยคาดว่าลิโอนาร์ไคต์จะทำหน้าที่ดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนไม่ให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำและแหล่งน้ำใต้ดินร่วมกับใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน สำหรับการศึกษากการดูดซับในรูปแบบของคอลัมน์ จะทำการศึกษาลักษณะ breakthrough curve และการสกัดสารที่อยู่ในวัสดุดูดซับ รายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะ breakthrough curve ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ในขั้นตอนการศึกษานี้จะศึกษาความสามารถของวัสดุดูดซับในการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนและเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสาร ซึ่งลักษณะการบรรจุวัสดุดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่หนึ่ง นำดินผสมกับลิโอนาร์ไคต์ในอัตราส่วน 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 ส่วนแบบที่สองเป็นการนำลิโอนาร์ไคต์มาบรรจุกึ่งกลางชั้นระหว่างดินเพื่อจำลองลักษณะการดูดซับในพื้นที่จริงโดยใช้อัตราส่วนที่ 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 นอกจากนี้ยังศึกษาการดูดซับสารละลายอาหารไนโตรเจนกับดินจากพื้นที่การเกษตร และทรายออกตาวา เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ (blank) เนื่องจากทรายออกตาวามีขนาดเท่า ๆ กันทำให้ความหนาแน่นเท่ากันตลอดการทดลอง และจัดเป็นทรายบริสุทธิ์ที่ไม่มีสาร หรือองค์ประกอบอื่น ๆ เจือปน จึงทำให้ทรายออกตาวาไม่เกิดการดูดซับกับทั้งสองชนิด จากนั้นทำการปล่อยสารละลายอาหารไนโตรเจนให้ไหลผ่านคอลัมน์ตามแรงโน้มถ่วง กล่าวคือมีลักษณะการไหลเป็นแบบ down-flow ไม่มีการปรับค่า pH และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 สำหรับข้อมูลในการทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.17 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารไนโตรเจน โดย ก.) ลิโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางระหว่างชั้นดินจากพื้นที่การเกษตร และ ข.) ลิโอนาร์ไคต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินจากพื้นที่การเกษตร และการบรรจุดินจากพื้นที่การเกษตรและทรายออกตาวาเพียงอย่างเดียว

หมายเหตุ : ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องจนคาดว่าปริมาณของสารละลายอาหารไนโตรเจนเหลือน้อยมากที่สุด

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	หมายเหตุ
อัตราการไหล	มิลลิลิตรต่อนาที	2.4	อ้างอิงจากภาคผนวก ช
ค่า pH	-	ไม่มีการปรับค่า pH	จำลองการทดลองสำหรับพื้นที่การเกษตร
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิห้อง	จำลองการทดลองสำหรับพื้นที่การเกษตร
ค่าความเข้มข้น	มิลลิกรัมต่อลิตร	10	อ้างอิงจากงานวิจัยของ Siripat et al., 2009
น้ำหนักรวมของวัสดุดูดซับ	กรัมต่อกรัม	0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0	อ้างอิงจากภาคผนวก ช

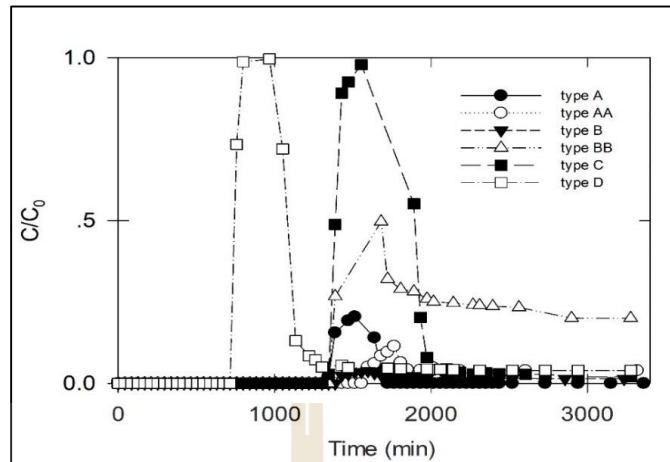
ตารางที่ 4.11 รายละเอียดการเดินระบบการทดลองแบบคอลัมน์

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

เมื่อบรรจุวัสดุดูดซับลงในคอลัมน์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเดินระบบการดูดซับแบบคอลัมน์โดยทำการปล่อยให้สารละลายไหลไปเรื่อย ๆ จนครบระยะเวลาที่กำหนด การทดลองนี้ได้ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เนื่องจากต้องการปรับสภาพของวัสดุดูดซับให้เหมือนกับสถานะของดินทั่วไป กล่าวคือทำให้วัสดุดูดซับมีความชื้น และใช้เป็นตัวพาสารละลายให้เคลื่อนที่ (advection) กล่าวคือ เมื่อทำการปล่อยสารละลายจะทำให้สารเกิดการแทนที่ในส่วน

ที่เป็นสารแคลเซียมคลอไรด์ โดยจะใช้สารละลายโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) เป็นสารติดตาม (tracer test) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) กับสารละลายอาหาราซิน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 1 ชั่วโมง ที่บริเวณปลายท่อเพื่อทำการศึกษาลักษณะกราฟเบรคทูร์ของสารละลายอาหาราซิน

สำหรับลักษณะ breakthrough curve ที่เปรียบเทียบระหว่างสารติดตามและสารละลายอาหาราซินแสดงดังภาคผนวก ซ และผลจากการศึกษาลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณสารละลายอาหาราซินที่ผ่านวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับระยะเวลาที่ผ่านไป แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 จากผลการทดลองพบว่า การเคลื่อนตัวของสารละลายจะขึ้นกับค่า K_{oc} และ K_d กล่าวคือ ดินที่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงจะสามารถดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนได้มาก รวมถึงความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของวัสดุดูดซับก็ส่งผลต่อการทดลองเช่นกัน (Wang et al., 2011) จากกราฟในภาคผนวก ซ จะเห็นได้ว่าสารติดตาม (KBr) จะเคลื่อนตัวออกมาเร็วกว่าสารละลายอาหาราซิน และเริ่มคงที่ที่กระบวนการชะสาร เนื่องจากสารติดตามส่วนใหญ่จะไม่เกิดการดูดซับในดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายอาหาราซินจะพบว่า ที่วัสดุดูดซับเป็นทรายออกตาวา (type D) มีการเคลื่อนตัวออกมาก่อน เนื่องจากทรายออกตาวามีขนาดอนุภาคที่เท่า ๆ กัน และไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซิน จึงใช้เทียบเป็น Blank ของการทดลองนี้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.18 จะพบว่าดินจากพื้นที่การเกษตร (type C) เกิดการดูดซับสารอาหาราซินได้ในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าดินที่ใช้ทดลองเป็นดินทราย ทำให้การอุ้มน้ำการดูดซับของสาร และการแลกเปลี่ยนประจุไอออนบวกเกิดได้น้อยกว่าชนิดดินเหนียว แต่สำหรับลิโอนาร์ไคต์ที่มีกรดฮิวมิกในปริมาณมาก จะส่งผลให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูง ดังนั้นจึงมีผลให้เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซินได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสารละลายอาหาราซินจะพบว่าวัสดุดูดซับแบบบรรจุลิโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางชั้น มีค่าการดูดซับที่ดีกว่าการนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งอัตราส่วนที่บรรจุก็ส่งผลต่อการดูดซับสารด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าอัตราส่วนของลิโอนาร์ไคต์มีปริมาณที่มากกว่าดินจะทำให้เกิดการดูดซับสารได้มากกว่าอัตราส่วนที่น้อยกว่า 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 อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของสารละลายอาหาราซินในขณะนั้นสัมพันธ์กับดินมากกว่า จึงทำให้ค่าการดูดซับของสารมีค่าที่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิด AA ที่มีอัตราส่วนน้อยกว่า สำหรับการทดลองที่มีลิโอนาร์ไคต์บรรจุอยู่กึ่งกลางชั้นจะพบว่าในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 มีค่าการดูดซับที่มากกว่าในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 แสดงได้ว่าปริมาณลิโอนาร์ไคต์ที่มากกว่าสามารถดูดซับสารอาหาราซินได้มาก



รูปที่ 4.18 ลักษณะ breakthrough curve ในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างกัน

หมายเหตุ วัสดุที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันคือ ชนิด A และ AA

วัสดุชนิดที่บรรจุลีโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางคอลัมน์ คือ ชนิด B และ BB

4.3.2 ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซีน

การสกัดสารละลายอาหาราซีนจากวัสดุดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของสารอาหาราซีนที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุดูดซับแต่ละชนิด และเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป โดยหลังจากกระบวนการดูดซับในแต่ละชุดทดลองแบบคอลัมน์ จะนำวัสดุดูดซับแต่ละชนิดมาสกัดด้วยสารอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) สำหรับวัสดุดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำการผสมให้เข้ากัน และนำตัวอย่าง 10 กรัม มาทำการวิเคราะห์หาสารละลาย ส่วนวัสดุที่เป็นแบบแยกชั้น จะทำการผสมวัสดุทั้งหมดของแต่ละชั้น (มีทั้งหมด 3 ชั้น) แยกกัน และสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์จำนวน 10 กรัมเช่นกัน โดยจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ HPLC ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซีนที่หลงเหลือจากการดูดซับในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับที่	วัสดุดูดซับ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	A – ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอนาร์ไคต์เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 1.0	1.9809
2	AA - ดินจากพื้นที่การเกษตรผสมกับลีโอนาร์ไคต์เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 0.5	0.1250

ตารางที่ 4.12 ผลการศึกษาการสกัดสารละลายอาหาราซึนที่หลงเหลือจากการดูดซับในชุดทดลองแบบคอลัมน์ (ต่อ)

3	B – ดินจากพื้นที่การเกษตร โดยมี ลิโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางชั้น ในอัตราส่วน 1.0 : 1.0	Top soil	0.0409
		LND	1.0138
		Bottom of soil	0.0292
4	BB - ดินจากพื้นที่การเกษตร โดยมี ลิโอนาร์ไคต์อยู่กึ่งกลางชั้น 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

หมายเหตุ : ความเข้มข้นเฉลี่ยคิดจากสารอาหาราซึนที่อยู่ในวัสดุดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์

จากตารางที่ 4.11 จะพบว่า หลังจากกระบวนการดูดซับแบบคอลัมน์ ดินจากพื้นที่การเกษตรและทรายออกตาวา ไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซึน สำหรับดินจากพื้นที่การเกษตรที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับลิโอนาร์ไคต์ในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 (A) มีค่าสารละลายอาหาราซึนปนเปื้อนอยู่มากกว่าวัสดุดูดซับชนิดที่ผสมเป็นเนื้อเดียวในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 (AA) แสดงว่าปริมาณของลิโอนาร์ไคต์ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซึนมากกว่าดินจากพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว สำหรับดินที่มีลิโอนาร์ไคต์อยู่บริเวณกึ่งกลางชั้นในอัตราส่วนที่เท่ากัน (B) พบว่าปริมาณชั้นของลิโอนาร์ไคต์มีสารละลายอาหาราซึนมากที่สุด รองลงมาคือ ดินชั้นบน และชั้นล่างตามลำดับ เช่นเดียวกับชนิดที่ใช้ในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 (BB) ที่พบว่าลิโอนาร์ไคต์ดูดซับสารละลายอาหาราซึนได้มากที่สุด

จากการศึกษาปริมาณสารละลายอาหาราซึนที่ตกค้างในวัสดุดูดซับ จะพบว่าลิโอนาร์ไคต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าดินจากพื้นที่การเกษตร และทรายออกตาวา เนื่องจากลิโอนาร์ไคต์ประกอบด้วยกรดฮิวมิกจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับสารละลายอาหาราซึนได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของดินก็มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซึนด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าเป็นดินประเภทดินทรายจะเกิดการดูดซับสารได้ค่อนข้างน้อยกว่าดินประเภทดินเหนียว เนื่องจากดินเหนียวจะมีองค์ประกอบของฮิวมัสซึ่งจะทำให้มีความสามารถดูดซับได้ดีกว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้สูงกว่า ประกอบกับดินที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นประเภทดินทราย ทำให้ไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซึนหรืออาจเกิดได้แต่ในปริมาณที่น้อยมาก สำหรับทรายออกตาวา (Ottawa sand) จัดเป็นดินทรายที่มีขนาดและพื้นที่ผิวเท่ากันทั้งหมดดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบระหว่างวัสดุดูดซับแต่ละชนิดซึ่งจะพบว่าทรายออกตาวาไม่ดูดซับสารละลายอาหาราซึน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอาหารสีในการทดลองแบบแบตช์ (batch) โดยทำการศึกษา ระยะเวลาสัมผัส จลนพลศาสตร์ ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับ และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับ รวมทั้งศึกษาการนำลิโอนาร์ไคต์มาประยุกต์ใช้ในชุดทดลองแบบคอลัมน์เพื่อทดสอบการดูดซับสารละลายอาหารสีร่วมกับดินจากพื้นที่การเกษตร จากการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาคคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน

5.1.1 จากการศึกษาคคุณสมบัตินี้จะพบว่า ลิโอนาร์ไคต์มีสารอินทรีย์วัตถุและค่าการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange capacity) ที่ค่อนข้างสูง คือ 40.53 เปอร์เซ็นต์ และ 59.89 cmol ต่อ กิโลกรัม และพบว่าลิโอนาร์ไคต์มีค่าความเป็นกรดที่สูง คืออยู่ระหว่าง 2.3 ถึง 2.8 เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวพบว่า เป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) คือมีค่าเท่ากับ 21.648 นาโนเมตร

5.1.2 สำหรับลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสพบว่า ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวเล็กจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) คือมีขนาดเท่ากับ 7.8732 นาโนเมตร

5.2 สรุปผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายอาหารสี

5.2.1 ระยะเวลาสัมผัสสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน คือ ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ

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

5.3 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารสี

จากการนำลิโอนาร์ไคต์และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันมาทดสอบการดูดซับสารละลายอาหารสี พบว่าความสามารถในการดูดซับสามารถอธิบายได้จากลักษณะของไอโซเทอม ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

5.3.1 ความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย ลีโอนาร์ไคต์พบว่า สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยมีค่าความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.143 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนที่ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยมีค่าความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.879 และ 1.529 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ สำหรับการดูดซับสารอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันจะพบว่า มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ซึ่งปริมาณของวัสดุดูดซับและค่าความเข้มข้นมีผลต่อค่าความสามารถการดูดซับสารละลายอาหาราซีน

5.3.2 ลีโอนาร์ไคต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอาหาราซีนได้ดีกว่าลีโอนาร์ไคต์ที่ผ่าน กระบวนการคาร์โบไนเซชัน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า ประกอบกับมีปริมาณสารอินทรีย์วัตถุและ ค่า CEC ที่มากกว่า

5.3.3 สำหรับกลไกการดูดซับแบบกายภาพ อาจเกิดจากการแพร่กระจายของสารเข้าบริเวณ รูพรุนของลีโอนาร์ไคต์ ส่วนกลไกการดูดซับแบบเคมี อาจเกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอม คู่ร่วมพันธะระหว่างสารอาหาราซีนและหมู่คาร์บอนิลของลีโอนาร์ไคต์

5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีน

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายอาหาราซีนด้วยลีโอนาร์ไคต์ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของ สารละลายอาหาราซีน ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิ โดยทำการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการ ดูดซับ อธิบายได้ดังนี้

5.4.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาหาราซีน

จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีนมากขึ้น ทำให้ความสามารถ ในการดูดซับสารด้วยลีโอนาร์ไคต์มากขึ้น โดยจะพบว่าความสามารถในการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลที่ ความเข้มข้นสูง ๆ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนที่ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ลีโอนาร์ไคต์มีความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหาราซีนได้ดีที่สภาวะเป็นกรด โดย จะพบว่าที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ค่าความสามารถการดูดซับเท่ากับ 0.082 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งกลไก การดูดซับอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (protonation) ของกลุ่มเอมีน (amine group) บนอนุภาคของ ลีโอนาร์ไคต์ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิวของลีโอนาร์ไคต์ ทำให้สาร อาหาราซีนอยู่รูปของไอออนมากขึ้น เกิดประจุบวกที่มากขึ้น จึงเกิดการดูดซับได้มากขึ้น

5.4.3 อุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับ

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

5.5 ผลการศึกษาการดูดซับสารละลายอาหาราซินในชุดทดลองคอลัมน์

การศึกษาในชุดทดลองแบบคอลัมน์แบ่งออกเป็น 2 การทดลองได้แก่ ผลการศึกษา Breakthrough curve ของสารละลายอาหาราซินเทียบกับสารติดตาม (KBr) และการสกัดสารอาหาราซินในวัสดุดูดซับ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

5.5.1 การศึกษา Breakthrough curve ของสารละลายอาหาราซิน

ผลการศึกษาพบว่า สำหรับสารติดตามจะไม่เกิดการดูดซับในวัสดุดูดซับ และลักษณะการเคลื่อนตัวของสารติดตามจะออกมาเร็วกว่าสารละลายอาหาราซิน ส่วนสารอาหาราซินจะพบว่าวัสดุดูดซับชนิดที่นำลิโอนาร์ไคต์บรรจุกึ่งกลางระหว่างชั้นดินในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 มีค่าความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ดินที่ผสมกับลิโอนาร์ไคต์เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 วัสดุดูดซับชนิดที่นำลิโอนาร์ไคต์บรรจุกึ่งกลางระหว่างชั้นดินในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 และ 1.0 : 1.0 ตามลำดับ ส่วนดินจากพื้นที่การเกษตรเกิดการดูดซับสารได้แต่ในปริมาณที่น้อยมาก และในส่วนของทรายออกดากาไม่เกิดการดูดซับสารละลายอาหาราซิน

5.5.2 การศึกษาการสกัดสารอาหาราซินในวัสดุดูดซับ

จากการศึกษาพบว่า ดินจากพื้นที่การเกษตร และทรายออกดากาไม่มีตกค้างของสารอาหาราซิน แต่ในความเป็นจริงดินจากพื้นที่การเกษตรอาจเกิดการตกค้างได้แต่มีจำนวนที่น้อยมาก เนื่องจากการทดลองแบบ breakthrough curve จะพบว่ามีกระบวนการดูดซับสารเกิดขึ้น เนื่องจากดินมีปริมาณสารอินทรีย์วัตถุอยู่บ้าง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับลิโอนาร์ไคต์แล้วจะพบว่ามีในปริมาณที่น้อยกว่ามาก สำหรับดินที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับลิโอนาร์ไคต์และแบบที่มีลิโอนาร์ไคต์อยู่บริเวณกึ่งกลางชั้นในอัตราส่วน 1.0 : 1.0 มีสารอาหาราซินตกค้างมากที่สุด เนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุของลิโอนาร์ไคต์เป็นตัวแปรที่สำคัญในการดูดซับสารละลายอาหาราซินในคอลัมน์

5.6 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.6.1 ควรทำการศึกษาคุณลักษณะของลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชันเพิ่มเติม อาทิเช่น ค่าสารอินทรีย์วัตถุ และค่า CEC เป็นต้น

5.6.2 สำหรับการศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการดูดซับควรจะทำการศึกษาวิเคราะห์ตัวอย่างโดยทันที เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของการดูดซับ

5.6.3 ควรวิเคราะห์คุณลักษณะของลีโอนาร์โดต์เพิ่มเติมในด้านของการนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เนื่องจากลีโอนาร์โดต์มีค่าความเป็นกรดสูง จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน

5.6.4 อาจจะทำการศึกษาการดูดซับยาปราบศัตรูพืชชนิดอื่น ๆ โดยใช้ลีโอนาร์โดต์เป็นวัสดุดูดซับ

5.6.5 การดูดซับสารละลายอาหารซึ่งเป็นเพียงกระบวนการถ่ายย้ายสารจากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณวัสดุดูดซับ ซึ่งสารอาหารในยังคงสภาพอยู่ไม่ได้สลายไป ดังนั้นอาจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการกำจัดและทำลาย อาทิเช่น การใช้กระบวนการ Photocatalytic, Photolysis, Biodegradation และ Incineration ร่วมกับการดูดซับด้วย

5.6.6 ควรศึกษาการเปลี่ยนรูป (Metabolite) ของสารละลายอาหารที่ถูกลดดูดซับด้วย

5.6.7 ในการทดลองแบบคอลัมน์อาจจะทำการศึกษา percentage of atrazine recovery เพิ่มเติมเพื่อศึกษา mass balance ของสาร

รายการอ้างอิง

- กนกวรรณ พาลูกา. (2553). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยอาหารจีนของดินร่วนในพื้นที่ปลูกข้าวโคเลียงสัตว์ ตำบลหลักด่าน อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์. ปรินญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไกรศรี ทองเสมียน (2551). ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (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). ผลของกรดฮิวมิกที่สกัดจากลีโอนาร์ไคต์ต่อการเติบโตและปริมาณธาตุอาหารของอ้อย. ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พฤกษศาสตร์) สาขาพฤกษศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จันทร์จรัส เรียวเดชะ. (2553). **โอกาสและทางเลือกของเกษตรกรบนเส้นทางสายโซ่อุปทาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : กรุงเทพมหานคร สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, เอส เอ็ม ทาวเวอร์. 312 หน้า.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). **กระบวนการดูดซับสาร**. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 736 หน้า.
- ณรรศ สมจันทร์. (2557). **การปรับปรุงคุณภาพลีโอนาร์ไคต์สำหรับการผลิตปุ๋ยหมัก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). **กระบวนการดูดซับ**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 226 หน้า.
- ทศพล พรพรหม. (2545). **สารกำจัดวัชพืช : หลักการและกลไกการทำลาย**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 274 หน้า.
- ธวัชชัย รัตน์เลิศ. (2540). **เทคโนโลยีสารกำจัดวัชพืช (herbicide technology)**. กรุงเทพฯ : ไร่เขียว. 259 หน้า.

- นัทธีรา สรรพณี กนกพร สว่างแจ้ง มยุรา อารีกิจเสรี และ กมลชนก พานิชการ. (2553). **บทบาทของกรดอิมิกและฟัลวิกในดินของพื้นที่เกษตรกรรมต่อการดูดซับจุลธาตุอาหารในดินและโลหะที่เป็นพิษ : กรณีศึกษาภูมิภาคตะวันตกของประเทศไทย. สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยศิลปากร.**
- ปรีนทร เต็มญารศิลป์ (2551). **การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไฟตง และไฟหมางู. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**
- พัฒนศักดิ์ แดงบุตรี ขนิษฐา แก้วอิน รวิรินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิท ปิยะมังคลา. (2557). **การดูดซับสี ย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบแบบตรึงในคอลัมน์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 24. 398-408.**
- พิมพ์ภัค หีบเงิน.(2551). **การย่อยสลายและการบำบัดทางชีวภาพของดินที่มีการปนเปื้อนสารอาหารจีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**
- พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย ธนพล เพ็ญรัตน์. (2557). **โครงการการย่อยสลาย พาราควอทในดินด้วยทรายซิลิกา-แลคเคส และประยุกต์ใช้กับถังกรองในระบบผลิตน้ำสะอาด. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยนเรศวร.**
- วิวัฒน์ ไตรธิกุล พลยุทธ สุขสมิติ และ จินดารัตน์ โดกมลธรรม. (2552). **เอกสารงานวิจัยการเตรียมสารประกอบเกลืออิมิตจากดินปนถ่านหิน จากเหมืองลิกไนต์ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง. สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3 (ภาคเหนือ) กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม.**
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 327 หน้า.**
- สันทัต ศิริอนันต์ไพบรุณ. (2552). **ระบบบำบัดน้ำเสีย wastewater treatment system. กรุงเทพฯ ฯ : ท้อป. 560 หน้า.**
- สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). **คาร์บอนกัมมันต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร : พิษณุโลก. 188 หน้า.**
- สายรุ้ง นพขุนทด.(2554). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- สุกัญญา จันท์เจ็ก. (2550). **การตกค้างของสารเอ็นโดซัลเฟน และสารอะตราซีนในน้ำและตะกอนดินในน้ำป่าสัก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.**


- สุชาดา กรุณา. (2548). การดูดซับสารอาหารไนโตรเจนและอะลาคลอร์ใน 4 ชุดดิน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุชาดา โกชาดม. (2556). สมบัติทางเคมีและการแจกกระจายของอาร์ซีนิกในลีโอนาร์ไดต์จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ปฐพีวิทยา) สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุมนา สิริพัฒนากุล. (2551). การกำจัดอาหารไนโตรเจนด้วยวิธีการทางชีววิทยาจากน้ำสำหรับเกษตรกรรมข้ามผ่านดินด้วยเซลล์อิสระและเซลล์ตรึง. ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- สำนักงานเศรษฐกิจและการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ปริมาณและการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช. [ออนไลน์] ได้จาก : http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=146
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ ๑: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 327 หน้า.
- อรอนงค์ ผิวนิล ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา นพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ บงกชรัตน์ ปิทยนต์ และน้ำเย็นศิริวัฒน์. (2554). การตกค้างและเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชอะทราซีนในดินปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตะกอนดิน และน้ำทำบริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์. การประชุมวิจัยวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 49, 1-4 กุมภาพันธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ๑.
- อุษา จักรราช พรพนา โพธินาม และ ฤดี โคตรชาวี. (2557). คุณสมบัติทางเคมี ชีวภาพและการสะสมกรดอิมิโนในดินที่ได้รับพิษปุ๋ยสดในระบบการปลูกมันสำปะหลัง. เกษตร 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., Garcia, S., Gonzalez, J., Frascaroh, M., Harada, M., Cong, C., Niwa, Y., Matulewicz, C., Prado H., Cortadi, A. & Gattuso, M. (2011). Biosorption of trivalent chromium 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., Gooddy, 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, Dhanial. (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. 4th 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^o 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. 3rd edition. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall. 561 p.
- Sakulthaew, C., Chokejaroenrat, 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 is 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)

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a stylized lotus flower. Above the figure are several vertical lines of varying heights, resembling a traditional Thai architectural element. The entire logo is rendered in a light beige color.

ภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของดีไออาร์ไคต์กับค่ามาตรฐานและงานวิจัยอื่น ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลีโอนาร์ไดต์

ธาตุประกอบทางเคมี	งานวิจัยที่ใช้ลีโอนาร์ไดต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง							งานวิจัยที่ใช้ลีโอนาร์ไดต์จากแหล่งอื่น ๆ			ค่ามาตรฐานจาก IHSS
	จากการทดลอง	Ausavasukhi et al., 2015	Chammui et al., (2014)	Rattanarommanee ^(a) et al., (2014)	Tandon (2012)	Katanyoo et al., (2011)	สุชาติ (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 ^(b)	-	-	0.02
% Fe	6.97	-	-	-	-	0.62	10.55	0.86 ^(b)	-	-	0.48
% Ca	1.97	-	-	-	-	0.88	2.27	1.42 ^(b)	-	-	1.68
% Mg	-	-	-	-	-	0.36	0.39	-	-	-	0.36

ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของลีโอนาร์ไต์ (ต่อ)

ธาตุ ประกอบ ทางเคมี	งานวิจัยที่ลีโอนาร์ไต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง							งานวิจัยที่ลีโอนาร์ไต์จากแหล่งอื่น ๆ			ค่า มาตรฐาน จาก IHSS
	จากการ ทดลอง	Ausavasukhi et al., 2015	Chammui et al., (2014)	Rattnarommanee ^(a) et al., (2014)	Tandon (2012)	Katanyoo et al., (2011)	สุชาดา (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 ₂ (%)	43.89	19.13 ± 2.83	44.37	35.19	35.00	29.445	-	-	-	-	-
SO ₃ (%)	21.80	9.65 ± 1.16	17.72	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃ (%)	19.18	9.73 ± 0.54	20.75	10.85	17.00	15.527	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃ (%)	9.96	5.52 ± 0.33	10.62	7.00	3.00	4.528	-	-	-	-	-
CaO (%)	2.76	2.07 ± 0.87	2.24	4.77	1.00	2.561	-	-	-	-	-
TiO ₂ (%)	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) ค่าเฉลี่ยของลีโอนาร์ไต์จากแม่เมาะแหล่งที่ 2 และ 3

(b) ค่าที่ได้เกิดจากการนำลีโอนาร์ไต์มาผสมกับ Clinoptilolite (แร่ธาตุชนิดหนึ่งในซีโอไลต์)

ค่ามาตรฐานจาก IHSS อ้างอิงจากงานวิจัยของ สุชาดา (2556)

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

Leonardite source	Reference	Moisture (%)	pH ^(a)	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 [®] , Zaragoza , Spain	Lao et al (2005)	30	-	2.87	-
SEPHU [®] , 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
งานวิจัยที่ใช้ลีโอนาร์ไต์ จาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง					
การทดลอง		8.13	2.85	59.89	21.62
อ้างอิงจาก ณชรพรศ , 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 ^(b)	-	25.14 ^(b)
อ้างอิงจาก Chammui et al., 2014		8.47 – 8.72	-	-	31.68 ^(c)
อ้างอิงจาก Ausavasukhi et al ., 2015		9.44 ± 1.31	-	-	41.05 ± 1.16

(a) pH meter (Leonardite : H₂O)

(b) ค่าเฉลี่ยของลีโอนาร์ไต์จากแม่เมาะแหล่งที่ 2 และ 3

(c) Organic matter and moisture



ภาคผนวก ค

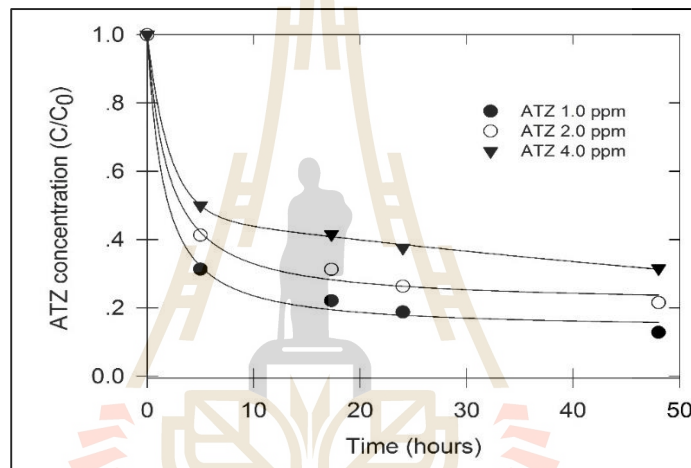
การศึกษาระยะเวลาสมดุการดูดซับของสารละลายอาหารจีน

(Preliminary test)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดลองระยะเวลาสมดุลการดูดซับของสารละลายอาหารสีน (preliminary test)

การศึกษาระยะเวลาสมดุลและเวลาที่ส่งผลต่อการดูดซับของสารละลายอาหารสีนด้วยลีโอนาร์โดต์ได้ทำการทดลองที่ระยะเวลา 5 , 17.30 , 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลในการดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นของสารอาหารสีนที่ทดลองคือ 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 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสารละลายอาหารสีนโดยใช้ลีโอนาร์โดต์เป็นวัสดุดูดซับ

จากรูปที่ ค.1 จะพบว่า ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เกิดสมดุลของการดูดซับสารละลายอาหารสีนสังเกตได้จากเมื่อระยะเวลาผ่านไปเริ่มเกิดการดูดซับได้น้อยลงและเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุล ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jordi et al (2015) ที่ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่สมดุลและ kinetics ในการดูดซับสารละลายอาหารสีนด้วยถ่านกัมมันต์ โดยจากการศึกษาพบว่าสารละลายอาหารสีนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่ 1500 นาที หรือ 25 ชั่วโมง และ งานวิจัยของ Shirmardi et al (2016) ที่ได้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ดัดแปรร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ซึ่งได้อธิบายการดูดซับสารอาหารสีนด้วยถ่านกัมมันต์ ว่าเกิดจาก 3 ขั้นตอนของการดูดซับดังนี้ 1.) เกิดการดูดซับที่บริเวณภายนอกของวัสดุดูดซับ ซึ่งเกิดอย่างรวดเร็ว 2.) เกิดการแพร่ของสารอาหารสีนเข้าสู่บริเวณภายในอนุภาคของวัสดุดูดซับ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และ 3.) หลังจากระยะเวลาสมดุล (equilibrium state) จะเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนขนาดเล็กของอนุภาควัสดุดูดซับ เช่นเดียวกับกลไกการดูดซับของงานวิจัยของ

Liu et al (2015) ที่ศึกษาการดูดซับของสารอาหารอินทรีย์ด้วยถ่านชีวภาพ (biochar) และยังได้อธิบายเพิ่มเติมว่า โดยปกติแล้วสารอาหารอินทรีย์จะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่ 24 ชั่วโมงแรกที่บริเวณพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านชีวภาพ เนื่องจากคุณลักษณะของถ่านชีวภาพจะประกอบด้วยกรดไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และกรดไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ที่จะมีส่วนช่วยให้เกิดการดูดซับทางพลศาสตร์ นอกจากนี้ความจุของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น และที่ระยะเวลานานขึ้นจะทำให้ค่าความจุในการดูดซับลดลง สำหรับงานวิจัยของ ดนุพงศ์ (2548) ที่ศึกษาการดูดซับของสารอาหารอินทรีย์ในดิน พบว่าระยะเวลาของการดูดซับที่เริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลคือที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงเช่นกัน ดังนั้นการทดลอง batch studies จึงเลือก ระยะเวลาที่ 24 ชั่วโมง มาทดลอง





ภาคผนวก ง

ข้อมูลและรายละเอียดจากการศึกษาแบบแบตช์
(Batch experiments)

1. จลนพลศาสตร์การดูดซับสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND) และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

ตาราง ง.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารจีน 2.0 มิลลิกรัม ด้วยลิโอนาร์ไคต์ (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

ตาราง ง.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารจีน 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ไคต์ (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	0.1296	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

ตาราง ง.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลีโอนาร์โดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

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	0.2300	0.2169	0.2179	0.1187	0.1167	0.1126	0.0604	0.0587	0.0565
4	0.2333	0.2203	0.2204	0.1191	0.1209	0.1105	0.0604	0.0591	0.0572
8	0.2362	0.2214	0.2218	0.1203	0.1209	0.1145	0.0604	0.0604	0.0605
12	0.2370	0.2217	0.2268	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
22	0.2383	0.2243	0.2274	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
28	0.2385	0.2249	0.2286	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
34	0.2386	0.2230	0.2408	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
46	0.2389	0.2251	0.2408	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
58	0.2414	0.2325	0.2408	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605
73	0.2414	0.2325	0.2408	0.1203	0.1209	0.1202	0.0604	0.0604	0.0605

ตาราง ง.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหาราซีน 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลีโอนาร์โดต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

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	0.4088	0.3956	0.4018	0.2254	0.2157	0.2159	0.1167	0.1155	0.0784
4	0.4257	0.4109	0.4086	0.2299	0.2254	0.2177	0.1176	0.1157	0.1145
8	0.4306	0.4176	0.4226	0.2309	0.2280	0.2263	0.1182	0.1166	0.1160
12	0.4417	0.4216	0.4282	0.2321	0.2290	0.2279	0.1183	0.1166	0.1169
22	0.4472	0.4383	0.4387	0.2348	0.2320	0.2308	0.1186	0.1181	0.1169
28	0.4502	0.4406	0.4418	0.2351	0.2326	0.2314	0.1188	0.1194	0.1169
34	0.4543	0.4447	0.4446	0.2355	0.2330	0.2308	0.1188	0.1194	0.1195
46	0.4556	0.4458	0.4521	0.2360	0.2336	0.2387	0.1193	0.1194	0.1195
58	0.4754	0.4661	0.4546	0.2384	0.2348	0.2387	0.1193	0.1194	0.1195
73	0.4754	0.4533	0.4567	0.2384	0.2315	0.2387	0.1193	0.1194	0.1195

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

ตาราง ง.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ (LND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (3)	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (3)	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (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

ตาราง ง.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ (LND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (3)	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (3)	t/q_t (1)	t/q_t (2)	t/q_t (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

ตาราง ง.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8.69	9.22	9.18	16.84	17.14	17.76	33.13	34.05	35.41
4	17.86	18.91	18.90	34.98	34.47	37.70	69.03	70.49	72.84
8	36.81	39.27	39.20	72.27	71.93	75.91	144.05	143.93	143.82
12	57.53	61.51	60.12	113.33	112.80	113.47	225.90	225.70	225.53
22	109.90	116.78	115.16	217.67	216.64	217.94	433.87	433.49	433.17
28	146.77	155.65	153.13	290.88	289.51	291.24	579.81	579.31	578.87
34	187.50	200.63	185.81	371.81	370.05	372.27	741.11	740.47	739.91
46	267.46	283.87	265.36	530.98	528.47	531.64	1058.39	1057.46	1056.67
58	353.38	366.78	354.26	708.87	705.52	709.76	1412.99	1411.75	1410.70
73	472.57	490.49	473.75	947.97	943.49	949.15	1889.57	1887.92	1886.50

ตาราง ง.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order ที่ความเข้มข้นของสารละลายอาหารขึ้น 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

ระยะเวลา (hours)	LND = 0.2 กรัม			LND = 0.4 กรัม			LND = 0.8 กรัม		
	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)	t/q _t (1)	t/q _t (2)	t/q _t (3)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4.89	5.06	4.98	8.87	9.27	9.26	17.14	17.32	25.52
4	9.40	9.73	9.79	17.40	17.75	18.38	34.00	34.56	34.93
8	18.58	19.16	18.93	34.65	35.08	35.35	67.70	68.63	68.97
12	27.17	28.46	28.02	51.71	52.41	52.66	101.44	102.88	102.61
22	49.20	50.19	50.15	93.68	94.81	95.31	185.53	186.25	188.13
28	62.19	63.55	63.38	119.09	120.39	120.99	235.73	234.45	239.43
34	74.84	76.45	76.47	144.34	145.89	147.34	286.29	284.69	284.62
46	100.96	103.19	101.74	194.89	196.90	192.70	385.51	385.17	385.07
58	122.00	124.44	127.58	243.28	247.06	242.98	486.07	485.65	485.53
73	153.56	161.04	159.83	306.20	315.29	305.81	611.78	611.25	611.09

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ซ้ำ

2. ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND) และลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชัน (CLND)

ตาราง ง.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND)

ความเข้มข้น	$1/q_e$			$1/C_e$		
	1	2	3	1	2	3
1.0 มิลลิกรัม ต่อลิตร	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 มิลลิกรัม ต่อลิตร	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 มิลลิกรัม ต่อลิตร	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.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ (LND)

ความเข้มข้น	Log q_e			Log C_e		
	1	2	3	1	2	3
1.0 มิลลิกรัม ต่อลิตร	-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 มิลลิกรัม ต่อลิตร	-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 มิลลิกรัม ต่อลิตร	-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

ตาราง ง.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

ความเข้มข้น	C_e/q_e			C_e		
	1	2	3	1	2	3
4.0	0.5072	0.6445	0.6731	0.2268	0.2825	0.2953
มิลลิกรัมต่อลิตร	0.2436	0.4365	0.5478	0.0572	0.1013	0.1264
	0.2007	0.3536	0.6886	0.0238	0.0418	0.0805

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ชั่วโมง

ตาราง ง.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของสารละลายอาหารจีนด้วยลิโอนาร์ไคต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์โบไนเซชัน (CLND)

ความเข้มข้น	$\text{Log } q_e$			$\text{Log } C_e$		
	1	2	3	1	2	3
4.0	-0.3495	-0.3582	-0.3578	-0.6443	-0.5490	-0.5298
มิลลิกรัมต่อลิตร	-0.6292	-0.6344	-0.6367	-1.2426	-0.9945	-0.8981
	-0.9260	-0.9277	-0.9320	-1.6234	-1.3792	-1.0941

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ชั่วโมง

3. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารสีด้วยลิโอนาร์ไคต์

ตาราง ง.9 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

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ชั่วโมง

ตาราง ง.10 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

หมายเหตุ : ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ชั่วโมง

ตาราง ง.11 ค่า pH ทั้งก่อนและหลังดูดซับสารละลายอาหารสีนด้วยลีโอนาร์ไคต์

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.12 ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายอาหารสีนกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ความเข้มข้นอาหารสีน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร			ความเข้มข้นอาหารสีน 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

ลักษณะการทดลองแบบคอถัมน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ลักษณะการทดลองแบบคอลัมน์ด้วยวัสดุดูดซับแบบต่าง ๆ



รูปที่ จ.1 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสี โดยใช้ลิโอนาร์ไคต์ผสมกับดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.2 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารสี โดยให้ลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลางชั้นกับดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.3 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารจีนด้วยดินจากพื้นที่การเกษตร



รูปที่ จ.4 การทดลองดูดซับแบบคอลัมน์ของสารละลายอาหารจีนด้วยทรายออกตาวา



ภาคผนวก จ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอลัมน์

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองแบบคอลัมน์

1. การบรรจุวัสดุคูดซับในคอลัมน์ทดลอง

ในการทดลองแบบคอลัมน์จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นรวมของวัสดุคูดซับค่า θ_v (volumetric water content) และปริมาตรช่องว่างของรูพรุนเพื่อใช้ประกอบในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ ข้อมูลดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ จ.1 โดยปริมาตรของรูพรุนสามารถหาได้จากสมการที่ จ.1 และปริมาตรของคอลัมน์ที่ใช้ทดลองมีค่าเท่ากับ 1,290 ลบ.ซม.

$$\text{ปริมาตรของรูพรุน} = \theta_v \times \text{ปริมาตรของคอลัมน์} \quad (\text{จ.1})$$

ตารางที่ จ.1 ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุคูดซับประเภทต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุคูดซับ	Bulk density	θ_v	ปริมาตรของรูพรุน
	ค่าที่ได้ (กรัมต่อลบ.ซม.)	ค่าที่ได้ (กรัมต่อลบ.ซม.)	ค่าที่ได้ (ลบ.ซม.)
1. ลีโอนาร์ไคต์	0.7356	0.0930	119.970
2. ดินจากพื้นที่การเกษตร	0.6967	0.0956	123.324
3. ทรายออกตาวา (ottawa sand)	0.7048	0.0935	120.615

จากตาราง จ.1 เมื่อเปรียบเทียบค่า bulk density และปริมาตรรูพรุนของวัสดุคูดซับแต่ละชนิดจะพบว่าปริมาณของวัสดุคูดซับที่บรรจุในคอลัมน์แสดงได้ดังตาราง จ.2

ตารางที่ จ.2 ปริมาณวัสดุคูดซับที่บรรจุในคอลัมน์

วัสดุคูดซับ	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 ซ.2 โดยอ้างอิงเวลาจะค่าการดูดซับที่สมดุลคือ 24 ชั่วโมงและปริมาตรของคอลัมน์เท่ากับ 1,290 ลบ.ซม.

$$\text{HRT} = V/Q$$

(ซ.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



ภาคนว ก ช

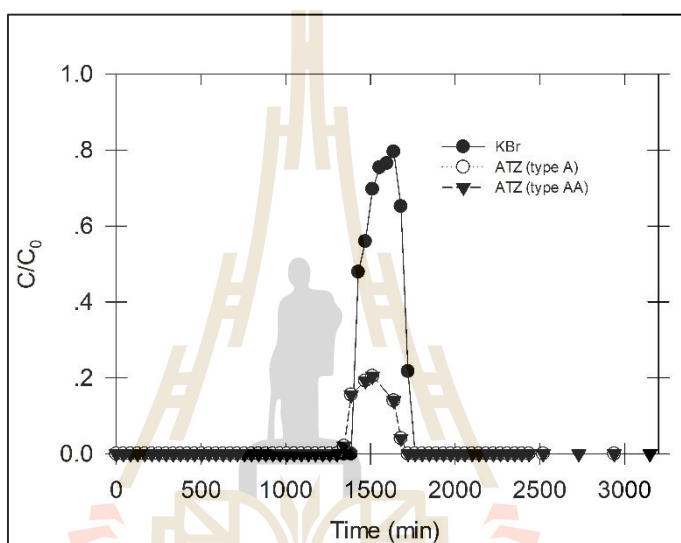
ลักษณะของ Breakthrough

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ลักษณะของ Breakthrough curve ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

1. ดินในพื้นที่การเกษตรผสมกับลิโอนาร์ไคต์เป็นเนื้อเดียวกัน

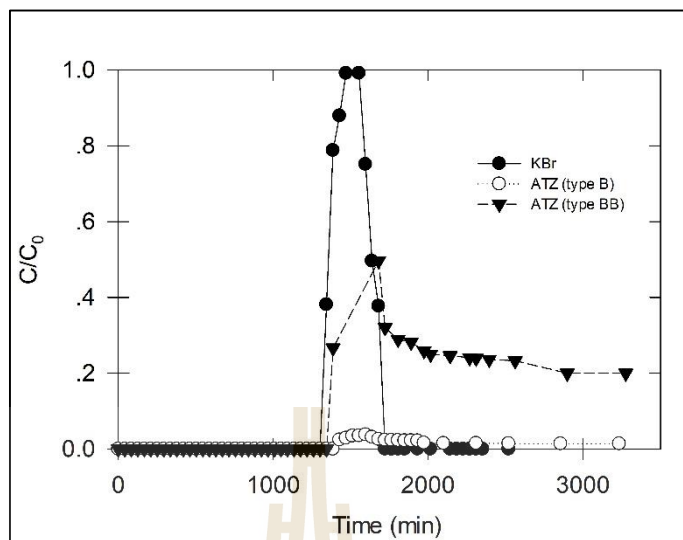
เป็นการผสมลิโอนาร์ไคต์กับดินจากพื้นที่การเกษตรให้เป็นเนื้อเดียวกันในอัตราส่วน 1.0 : 0.5 และ 1.0 : 1.0 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข 1 ลักษณะของ breakthrough curve ที่ลิโอนาร์ไคต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินในพื้นที่การเกษตร

2. ดินในพื้นที่การเกษตรที่มีลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลาง

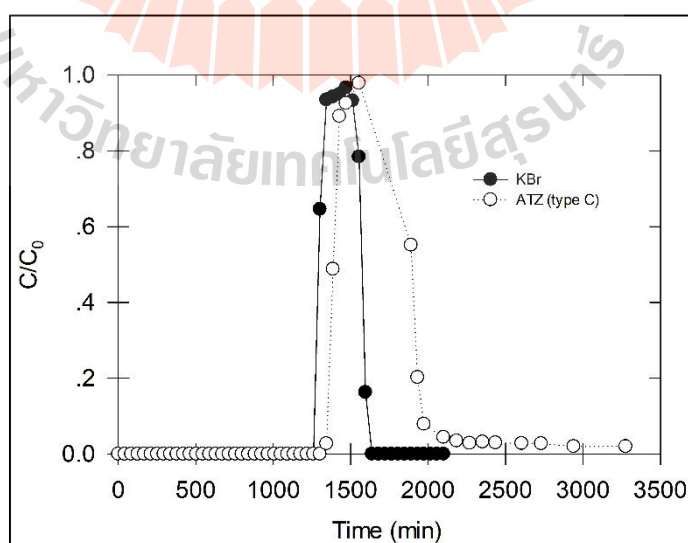
เป็นการผสมลิโอนาร์ไคต์กับดินจากพื้นที่การเกษตรโดยให้ลิโอนาร์ไคต์อยู่บริเวณกึ่งกลางของชั้นคอลัมน์ทดลองในอัตราส่วน 0.5 : 1.0 และ 1.0 : 1.0 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ๒ ลักษณะของ breakthrough curve ที่ลิโอนาร์ไดต์อยู่กึ่งกลางชั้นระหว่างดินในพื้นที่การเกษตร

3. ดินในพื้นที่การเกษตร

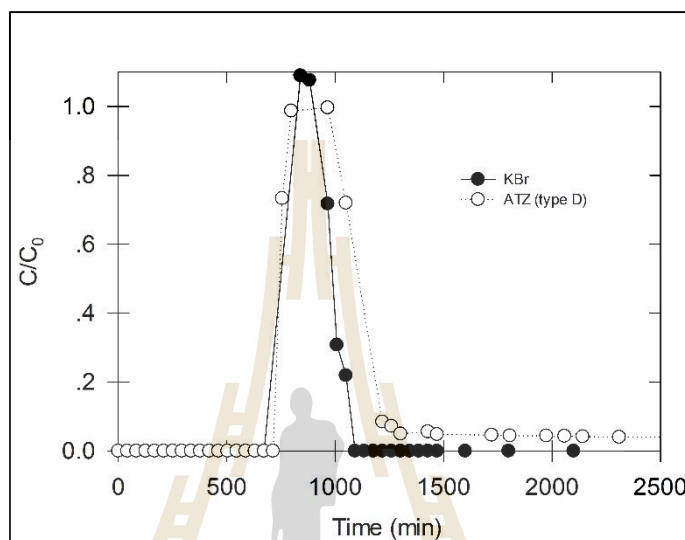
เป็นการบรรจุดินจากพื้นที่การเกษตรเพียงอย่างเดียว กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารอินทรีย์แสดงได้ดังรูปที่ ๒.๓



รูปที่ ๓ ลักษณะของ breakthrough curve ของดินจากพื้นที่การเกษตร

4. ทรายออกตาวา (Ottawa sand)

เป็นการบรรจุทรายออกตาวา (Ottawa sand) เพียงอย่างเดียว กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารติดตามและสารอาหารอินแสดงได้ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข 4 ลักษณะของ breakthrough curve ของทรายออกตาวา (Ottawa sand)

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านวัสดุดูดซับชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/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
24	966	0.0000	966	0.0000	966	0.0000

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	C_e/C_0	Time (min)	C_e/C_0	Time (min)	C_e/C_0
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
50	2058	0.0000	2604	0.0390	2184	0.0000

ลำดับ	KBr		A		AA	
	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/C_0
51	2100	0.0000	3318	0.0389	2226	0.0000
					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
 สารละลายอาหารซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
 วัสดุชนิด A คือ ดินจากการเกษตรและลีโอนาร์ไคต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันใน
 อัตราส่วน 1.0 : 1.0
 วัสดุชนิด A คือ ดินจากการเกษตรและลีโอนาร์ไคต์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันใน
 อัตราส่วน 1.0 : 0.5

ตารางที่ ช.2 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านวัสดุดูดซับชนิดมี
ลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกลางชั้น ในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		B		BB	
	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/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_t/C_0	Time (min)	C_t/C_0	Time (min)	C_t/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
 สารละลายอาหาราซีนมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
 วัสดุชนิด B คือ ดินจากการเกษตรและมีลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกึ่งกลางของ
 คอลัมน์ที่อัตราส่วน 1.0 : 1.0
 วัสดุชนิด BB คือ ดินจากการเกษตรและมีลิโอนาร์ไคต์อยู่ระหว่างกึ่งกลางของ
 คอลัมน์ที่อัตราส่วน 1.0 : 0.5

ตารางที่ ข.3 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านดินจากพื้นที่การเกษตรในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		C	
	Time (min)	Ce/C ₀	Time (min)	Ce/C ₀
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

ลำดับ	KBr		C	
	Time (min)	Ce/C ₀	Time (min)	Ce/C ₀
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		

ลำดับ	KBr		C	
	Time (min)	Ce/C ₀	Time (min)	Ce/C ₀
48	2100	0.0000		

หมายเหตุ KBr คือ สารติดตาม โดยที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น = 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
 สารละลายอาหารซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น = 10 มิลลิกรัมต่อลิตร
 วัสดุชนิด C คือ ดินจากการเกษตร



ตารางที่ ข.4 ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายอาหารสีนผ่านทรายออกตาในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลำดับ	KBr		D	
	Time (min)	Ce/C ₀	Time (min)	Ce/C ₀
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

ลำดับ	KBr		C	
	Time (min)	Ce/C ₀	Time (min)	Ce/C ₀
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 ทรายออกตาวา (ottawa sand)



ภาคผนวก ซ

การทดสอบวัสดุชุดข้อ ๑

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การดูดซับสารอาหารอินทรีย์กับวัสดุที่ใช้ในการทดลองคอลลัมน์

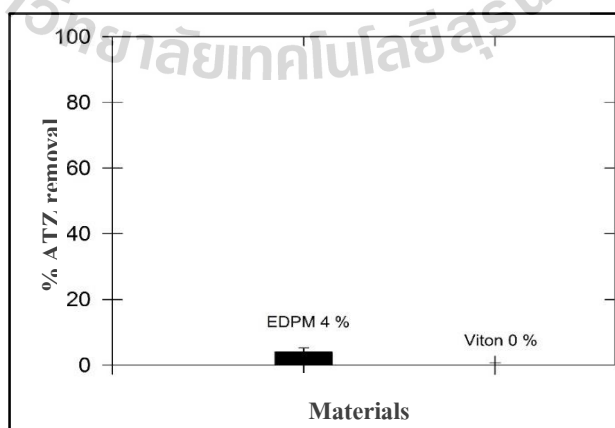
การทดลองนี้เป็นการทดสอบวัสดุดูดซับที่จะนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจสำหรับการทดลองแบบคอลลัมน์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการดูดซับสารละลายอาหารอินทรีย์ด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยการทดลองจะบรรจุสารดูดซับในคอลลัมน์และปล่อยสารละลายที่ต้องการบำบัดให้ไหลผ่านบริเวณคอลลัมน์ ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้จะต้องไม่ดูดซับกับสารละลายอาหารอินทรีย์เพราะอาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลองได้ ซึ่งการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดลองอธิบายได้ดังนี้

1. ชนิดของยาง EDPM และยาง Viton ที่ใช้ประกอบหน้าแปลนของคอลลัมน์

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

ตาราง ซ.1 ตารางการเปรียบเทียบวัสดุในการออกแบบการทดลองแบบคอลลัมน์

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

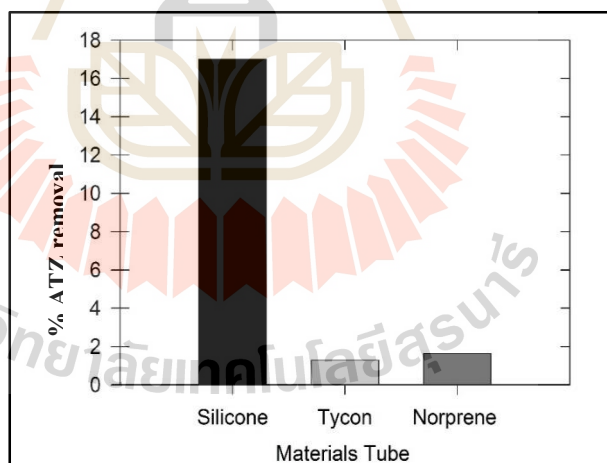


รูปที่ ซ.1 การเปรียบเทียบวัสดุหน้าแปลนในการออกแบบชุดทดลองแบบคอลลัมน์

จากการทดลองพบว่า วัสดุที่เลือกมาใช้ในการทำหน้าแปลนคอลัมน์ (หน้าแปลน คือบริเวณที่ต่อกับกระเปาะรับน้ำและบริเวณคอลัมน์) คือ ยางชนิดไวตัน (Viton) เนื่องจากไม่มีการดูดซับของสารละลายอาหารเสริม ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาแบบ Column studies นอกจากนี้ยังพบว่า วัสดุชนิดนี้ยังสอดคล้องกับคำแนะนำของ 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

สำหรับการทดลองคอลัมน์นอกจากวัสดุที่ใช้ในการออกแบบจะส่งผลต่อการดูดซับของสารอาหารเสริมแล้ว ชนิดของก็อาจจะส่งผลต่อการดูดซับในการทดลองได้เช่นกัน ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองทดสอบการดูดซับสารอาหารเสริมเบื้องต้น โดยสายยางที่นำมาทดสอบมีทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ สายยางชนิด Silicone สายยางชนิด Norprene และสายยางชนิด Tycon โดยได้ทำการดูดซับกับสารละลายอาหารเสริมที่ความเข้มข้น 1 ppm เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ๒.2



รูปที่ ๒.2 การดูดซับสารอาหารเสริมของสายยางแต่ละชนิดที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

จากการทดลองที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสายยางชนิด silicone ดูดซับสารละลายอาหารเสริมได้ 17.25 % เปอร์เซนต์ สายยางชนิด Tycon มีการดูดซับสารอาหารเสริมได้ 1.29 เปอร์เซนต์ และ สายยางชนิด Norprene มีการดูดซับสารอาหารเสริม 1.63 เปอร์เซนต์ ซึ่งวัสดุที่เป็น

ยางชนิดซิลิโคนมีการดูดซับสารอาหารจีนได้มากที่สุด สอดคล้องกับคำแนะนำของ Gibert, et al., (2012) และงานวิจัยของ Topp et al (1992) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดซับของสารอาหารจีนและเมทาลาคอรักับวัสดุชนิดพลาสติกและยางที่เป็นชนิดซิลิโคน ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าสารกำจัดวัชพืชทั้งสองชนิดมีการดูดซับกับวัสดุกับยางชนิดซิลิโคน (silicone) วัสดุชนิด Nalgene 180 และ Tygon R-3603 อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยดูดซับกับวัสดุชนิด อะคริลิก และ HDPE (High – density polyethylene)

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



ภาคผนวก ฉ.

บทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Rittirat, A., Chokeyaroenrat, C. & Watcharenwong, A. (2018). Atrazine adsorption potential of leonardite from Mae Moh power plant. **IOP Conf.** Earth and Environmental Science, 112, 1-5.



Atrazine Adsorption Potential of Leonardite from Mae Moh Power Plant

A Rittirat¹, C Chokejaroenrat² and A Watcharenwong^{1*}

¹ School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

² Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*E-mail: w.apichon@sut.ac.th

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 leonardite physical and chemical properties (e.g. cation exchange capacity, organic matter content, and electron microscope imaging), and (2) to quantify the adsorption efficiency of atrazine from the soil. We used varied amount of leonardite ranging from 0.05 to 1.60 g to adsorb 8 mg L⁻¹ of atrazine from aqueous solution in a batch experiment. This experiment was achieved within 48 hours so that the equilibrium time and isotherm parameters can be determined. The uncarbonized leonardite characteristic revealed that it could adsorb atrazine as its surface possesses mesopore type, relatively high cation exchange capacity (59.89 cmol Kg⁻¹), and high organic matter of 21.62 %. The isotherm study showed the equilibrium time of 24 hours and adsorption isotherm was Langmuir with q_{max} of 3.9683 mg g⁻¹. This study provides 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.

1. Introduction

Leonardite is an immature coal [1]. It is an oxidized form the lignite coal and the deposition of humus [2,3]. Leonardite consists of inorganic and humic substances around 40-80 % [1]. The humic substances in leonardite can be used as a soil conditioner to promote the plant growth [4]. Humic acid contained organic functional group such as hydroxyl, phenol and carboxyl, its affected for cation exchange in aqueous solution [2]. Moreover, leonardite can be used as the adsorbent for the organic and inorganic substance adsorption's studies. For example, some research group used carbonized-leonardite to remove the congo red in aqueous solution [3]. Some studies related to the removal of As (V) from aqueous solution by leonardite mixing a ferric ion (Fe-leonardite) and the leonardite mixing a clinoptilolite to removal Zn (II) ions from aqueous solution [5]. However, no such feasibility for the adsorption of herbicide as atrazine solution by leonardite have been reported.



Atrazine [2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-triazine] is commonly used for a pre- and post-emergent herbicides to control broadleaf weeds. Similarly, atrazine is normally used as herbicides for sugar cane and corn crops. Atrazine has high mobility and can contaminate surface and groundwater by runoff. Moreover, atrazine might be a human carcinogenic compound [6]. The regulation of European Commission No.396/2005 and United State environmental protection agency (US. EPA) has banned atrazine for the agriculture. The maximum atrazine levels in drinking water of these two regulations were at 0.1 ppb and 3 ppb respectively [6, 7]. Nowadays, atrazine has been intensively used in Thailand. Consequently, atrazine removal from the environment has essential importance for the protection of public health and water source.

The aim of this study was to investigate the atrazine adsorption using leonardite. The experiment starts from the characterization of leonardite adsorbent. The characteristic of leonardite such as the elements and components, cation exchange capacity (CEC), organic matter, pore size, and surface area were analyzed. Batch adsorption experiment was conducted to investigate the equilibrium time and batch adsorption isotherm. Throughout the studies, the atrazine solution has been analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC).

2. Methodology

2.1. Preparation and characterization of leonardite

The leonardite sample obtained from Mae Moh power plant in Lampang province, Thailand. The leonardite was dried in an oven at 105 °C, 3 hours for moisture removal. Then it was crushed (Gmbh D-42781, Retsch HAAN Germany) and sieved under 150-250 µm (60-100 mesh). Then, the leonardite was kept in a desiccator before use in the experiments. Elements contained in leonardite was characterized by X-ray fluorescence spectrometry (XRF) at 50 KV (XGT-5200, Horiba). The crystalline structure was observed by X-ray diffractometer (XRD) (XRD D2 Phaser, Bruker). The elemental composition (carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulfur) was analyzed by element analyzer (628S/CHN628 LECO). Scanning electron microscope (JSM-6010, JEOL) was used to analyze the morphologies of leonardite. Laser scattering particle size distribution analyzer (LA-950V2, Horiba) was determined surface area and pore size, this method applied by N₂ gas adsorption analysis and degradation at 110 °C for 11 hours.

2.2. Atrazine adsorption experiments

Atrazine (Chem service) with a purity of 98.1 % was used as obtained. The stock solution of atrazine 1,000 mg/l was prepared in DI water (18 mΩ).

2.2.1. The equilibrium time of atrazine adsorption. The atrazine concentrations of 1.0, 2.0 and 4.0 mg/l were studied. Leonardite of 0.4 g was added to 25 ml of each atrazine concentration into EPA vials. The vials were shaken in a shaker at 200 rpm. Samples were taken at various contact time at 0-48 hours. Adsorption experiments were performed at room temperature. Then, the samples were measured the atrazine concentrations by HPLC.

2.2.2. Batch adsorption isotherm experiments. Batch adsorption isotherm was using 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 and 1.6 g of leonardite in 25 ml of 8 mg/l atrazine solutions. Adsorption experiments were

performed at room temperature. Samples were collected after 24 hours of adsorption. The samples were determined atrazine concentrations by HPLC.

2.3. Analysis of atrazine concentration by HPLC

The collected sample was spun at 14,000 rpm for 10 min by centrifuge machine. Afterward, the separation of the adsorbent from atrazine solution was performed using nylon filter 0.45 μm . Adsorption experiments were conducted at room temperature. Determinations of atrazine concentration were carried out by HPLC instrument (Agilent 1260 infinite, USA). The UV/Vis detector was set at 220 nm. The column used was a C-18 ACE (5 μm , 4.6 x 250 mm). The mobile phase was acetonitrile: DI water (60:40) and the injection volume was set at 1 ml/min.

3. Results and discussion

3.1. characteristics of Leonardite

The results from chemical characterization of leonardite found that, the pH of leonardite is 2.85 (in H_2O) indicated high acidity. The pH affected the ion exchange capacity on the adsorbent. Ausavasukhi et al [2] reported that, the efficiency of organic adsorption (congo red; CR) by leonardite was increased at mostly acidity. The organic substance adsorption was decreased at pH increasing. Because the hydroxide ion (OH^-) and carboxyl group ($-\text{COOH}$) on the surface of leonardite can disturb the anionic adsorption of the functional groups of atrazine [2, 8, 9]. Leonardite consists of carbon around 16.54 % and oxygen around 26.67 % as indicated by XRF analysis. The XRD result showed the major phases of leonardite, it has most of the quartz (SiO_2) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Leonardite has a cation exchange capacity (CEC) of 59.98 %. The high CEC value imply that this material has high organic matter. Hence, it affected the adsorption of atrazine on negative site. Moreover, leonardite consists of humic acid and nutrient which can be used as a soil conditioner. The BET surface area and pore diameter of leonardite were 13.59 m^2/g and 21.65 nm respectively. Leonardite was classified as mesoporous material (2-50 nm) [10]. These pores serve as the path for the pollutant molecule move into a small pore of the particle. The pictures of leonardite were shown in the figure 1.

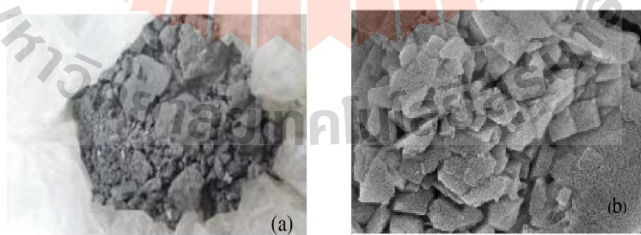


Figure 1. The leonardite at (a) Real picture of leonardite (b) SEM image of leonardite at 50 kx

3.2 Equilibrium time of adsorption

The equilibrium time of the atrazine adsorption on leonardite was around 24 hours. The adsorption efficiencies from 24 hours to 48 hours were similar.

3.3 Adsorption isotherm

The adsorption isotherm studies were conducted with 8 mg/l of atrazine concentration, and the amount of leonardite was varied at 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 and 1.6 g. All experiments were shaken with 200 rpm at room temperature for 24 hours. The Langmuir isotherm is practical to monolayer adsorption and homogeneous surface. While the Freundlich isotherm is widely for the surface heterogeneous and assumes to multilayer capacity [6]. The linear of Langmuir and Freundlich isotherm was expressed as equation (1) and (2), respectively.

$$1/q_e = 1/(q_{\max}K_L C_e) + (1/q_{\max}) \quad (1)$$

Where q_{\max} is the maximum adsorption capacity (mg/g) and K_L is the Langmuir constant (L/mg), determined from the slope and intercept of linearized plot of $1/q_e$ (q_e is the amount of atrazine adsorbed by leonardite at equilibrium; mg/g) and $1/C_e$ (C_e is concentrations of atrazine at equilibrium in solution; mg/L).

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

Where K_f is the Freundlich adsorption equilibrium constant (mg/g) and n is a constant indicative of adsorption intensity. Moreover, R^2 value has asserted the adsorption isotherm in a linear question. For the results followed a both of Langmuir and Freundlich isotherm were shown in Figure 2. The parameters of adsorption isotherm were shown in table 1.

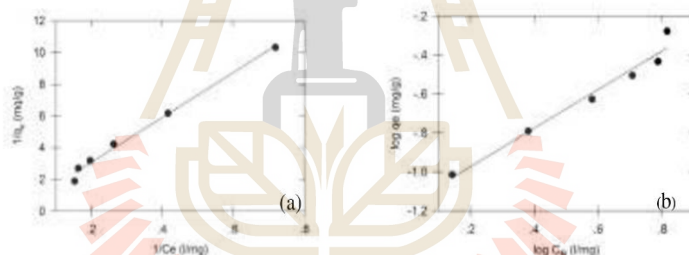


Figure 2. Adsorption isotherm of atrazine on leonardite by (a) Langmuir model and (b) Freundlich model

Table 1. Langmuir and Freundlich isotherm equation for atrazine adsorption by leonardite

Langmuir isotherm			Freundlich isotherm				
Equation	R^2	q_{\max} (mg/g)	K_d (L/mg)	equation	R^2	n	k_f
$Y = 14.1539x + 0.2520$	0.9917	3.9683	0.0178	$Y = 0.9923x - 1.1723$	0.9674	1.0077	0.0673

The atrazine adsorption isotherm by leonardite at equilibrium conditions followed a both of Langmuir and Freundlich isotherm. The maximum Langmuir adsorption capacity is 3.9683 mg/g, which is a monolayer of surface area to limit of molecules to adsorb atrazine. The mechanism of atrazine adsorption may be deepened on the leonardite's surface and it's binding with the functional group of atrazine [9]. Likewise, the atrazine adsorption depended on the pore size on the adsorbent, because the molecular size of atrazine is on around 0.80-0.85 nm [6]. So the mesopore of leonardite (2-50 nm) rendered an atrazine solution pass through into the inner surface of leonardite [7]. Moreover, hydroxyl and a carboxylic group from humic compounds in leonardite play a key role in atrazine adsorption [11]. Therefore, the functional group and surface area affected by atrazine adsorption by leonardite.

4. Conclusion

This study has shown that the leonardite can adsorb atrazine from aqueous solution. The equilibrium time of adsorption was around 24 hours. The Langmuir adsorption isotherm fitted well with atrazine adsorption by leonardite. The main factors affected atrazine adsorption by leonardite are the pore diameter and specific surface area. Moreover, the humic compounds in leonardite were dominated by the atrazine adsorption. Finally, leonardite could relieve the herbicides contaminate to the surface and groundwater by runoff. Moreover, the utilization of leonardite as the soil conditioner in agriculture area could be possible.

Acknowledgments

The authors are grateful to Suranaree university of technology for financial support. And authors would like to thank the faculty of veterinary technology and department of environmental technology and management, faculty of environment of Kasetsart university for experimental support.

References

- [1] 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.
- [2] Ausavasukhi, A., Kamposoen, C & Kengnok, O. (2015). Adsorption characteristics of congo red on carbonized leonardite. *Journal of Cleaner Production.* 134, 506-514.
- [3] 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.
- [4] Yolcu, H., Seker, H., Gullap, M., Lithourgidis, A & Gunes, A. (2011). Application of cattle manure, zeolite and leonardite improves hay yield and quality of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) under semiarid condition. *AJCS* 5, 926-931.
- [5] Znegin, G. (2013). Effective removal of zinc from an aqueous solution using Turkish leonardite-clinoptilolite mixture as a sorbent. *Environ Earth Sci* 70, 3031-3041.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Shiri, J., Keshavarzi, A., Kisi, O., Iturraran-Viveros, U., Bagherzadeh, A., Mousavi, R., & Karimi, S. (2017). Modeling soil cation exchange capacity using soil parameters: Assessing the heuristic models. *Computers and Electronics in Agriculture* 135, 242-251.
- [9] Lupul, I., Yperman, J., Carleer, R., & Gryglewicz, G. (2016). Adsorption of atrazine on hemp stem-based activated carbons with different surface chemistry. *Adsorption* 21, 489-498.
- [10] McCusker, L.B., Liebau, F., Engelhardt, G. (2001). Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts. *Pure Appl. Chem* 73, No.2, 381-394.
- [11] Llado J, Lao-Luque C, B Ruiz, E Fuente. (2015). Role of activated carbon properties in atrazine and paracetamol adsorption equilibrium and kinetics. *Process safety and Environmental Protection* 95, 51-59.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอศิราภ์ ฤทธิรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม 2536 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุบลรัตนราชกัญญาวิทยาลัย นครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี 2558 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร นารี ในขณะที่ทำการศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างที่ทำการศึกษาได้นำเสนอผลงานวิจัยแบบปากเปล่า เรื่อง **“Atrazine Adsorption Potential of Leonardite from Mae Moh Power Plant”** ในการประชุมวิชาการนานาชาติ 2017 2nd International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2017) ระหว่างวันที่ 8-10 ธันวาคม 2560 ณ โรงแรม Prana Resort Nandana เกาะสมุย จังหวัดสุ ราษฎร์ธานี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี