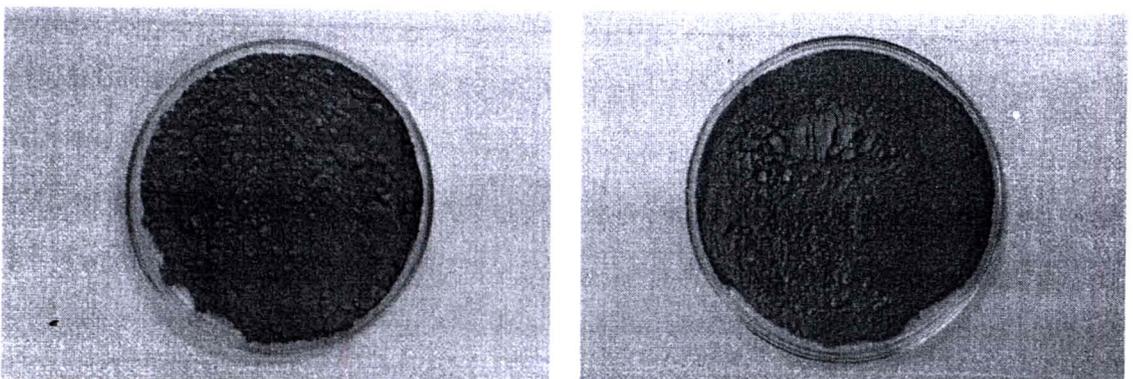


บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนประปา ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยการนำตะกอนประปามาบดละเอียดและร่อนแบบเปียกผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 Mesh โดยให้เหลือส่วนที่ค้างบนตะแกรงไม่เกิน 30% เพื่อเป็นตัวแทนของตะกอนประปาทั้งหมด จากการทดลองพบว่า ปริมาณตะกอนที่ค้างอยู่บนตะแกรง มีค่าเท่ากับ 20% จากนั้นนำตะกอนประปาที่ผ่านตะแกรงร่อนไปเผาที่อุณหภูมิ 700° C เป็นเวลา 3 h เมื่อเปรียบเทียบสีของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาพบว่า ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผามีสีน้ำตาลดำและเมื่อผ่านการเผาคะกอนประปาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องจาก การเผาทำให้ตะกอนประปาซึ่งมีเหล็กที่อยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 650-700° C [35; 36; 37] ในระหว่างการเผากเกิดการออกซิไดซ์เป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และองค์ประกอบของตะกอนประปาที่มีค่าออกไซด์มากกว่า 0.75% ทำให้สีของตะกอนประปาที่ผ่านการเผาเป็นสีน้ำตาลแดง [38; 39; 40] โดยลักษณะทางกายภาพของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา แสดงดังรูปที่ 4.1



(ก) ไม่ผ่านการเผา

(ข) ผ่านการเผา

รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมีของตะกอนประปา โดยการนำตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 จากการศึกษา พบว่า ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผา มีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 52.30 และ 29.90% ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบที่เหลืออยู่เป็นสารประกอบอื่นๆ และหลังจากการนำตะกอนประปาไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 3 h ทำให้ได้ปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 เพิ่มขึ้น เท่ากับ 52.50 และ 31.20% ตามลำดับ เนื่องจาก สารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในตะกอนประปา เมื่อผ่านการเผาเกิดการสลายตัว โดยดูได้จากค่า LOI ของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผา มีค่าสูงกว่าตะกอนประปาที่ผ่านการเผา เท่ากับ 1.70 และ 0.15 ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อนำปริมาณของ SiO_2 และ Al_2O_3 ของตะกอนประปาที่ผ่านการเผา มาทำการคำนวณโดยคิดเป็น % จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

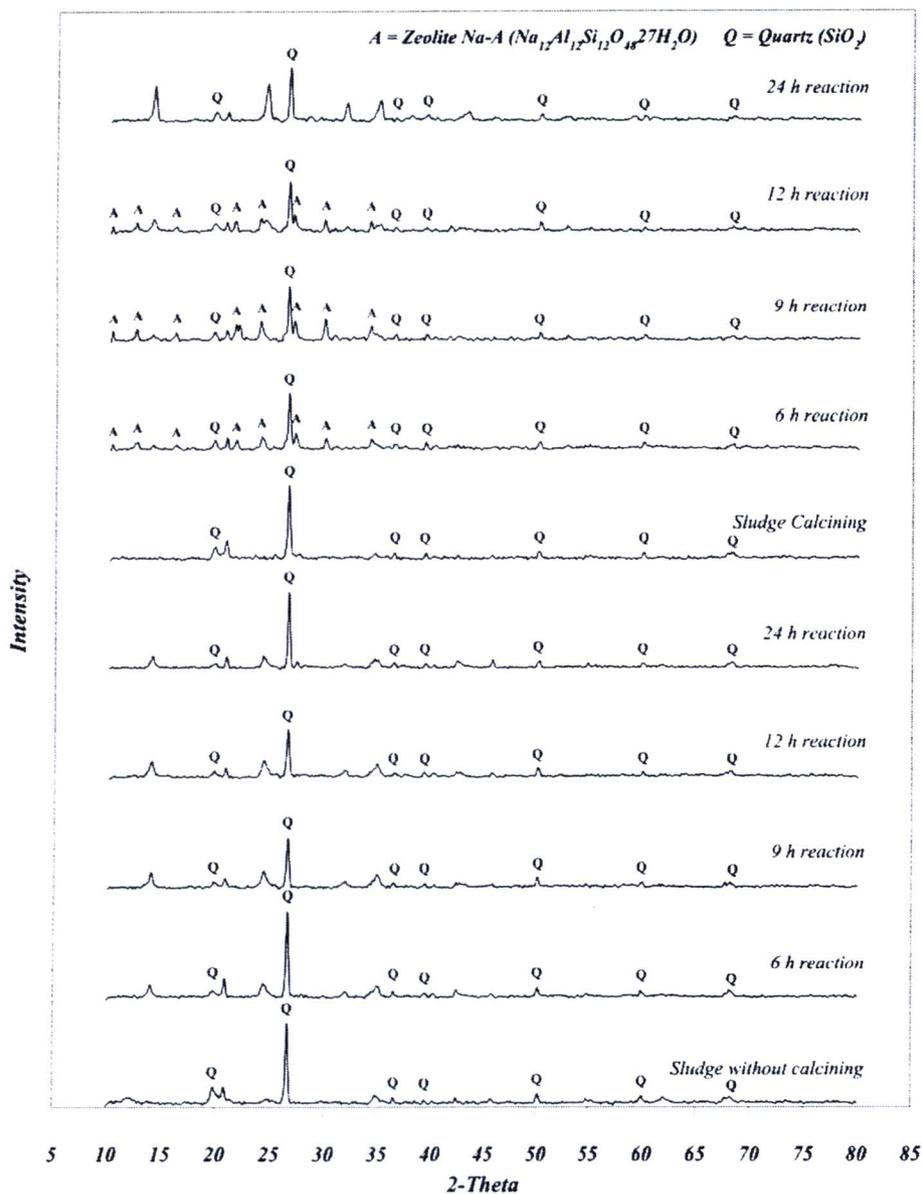
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณตะกอน (%)	
	ไม่ผ่านการเผา	ผ่านการเผา
SiO_2	52.30	52.50
Al_2O_3	29.90	31.20
Fe_2O_3	10.60	9.49
K_2O	2.60	2.51
CaO	1.11	1.00
MgO	0.95	1.04
TiO_2	0.94	0.86
SO_3	0.41	0.37
Na_2O	0.18	0.23
Other	0.86	0.80
Loss On Ignition (LOI)	1.70	0.15

นอกจากนี้ มีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา เท่ากับ 1.75 และ 1.68 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของขวัญศิริ ชัยลาภ [5] จากตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา โดยมีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.89 และ 1.86 ตามลำดับ โดยสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่กล่าวมา มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งถือ

ว่ามีความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A เนื่องจากซีโอไลต์ชนิด A มีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5-2.5 [13] ดังนั้น ตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้

4.1.3 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกและชนิดของซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

จากการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยนำตะกอนประปาที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ จากตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา ได้ผลการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ตะกอนประปาเริ่มต้นและซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ด้วยเทคนิค XRD

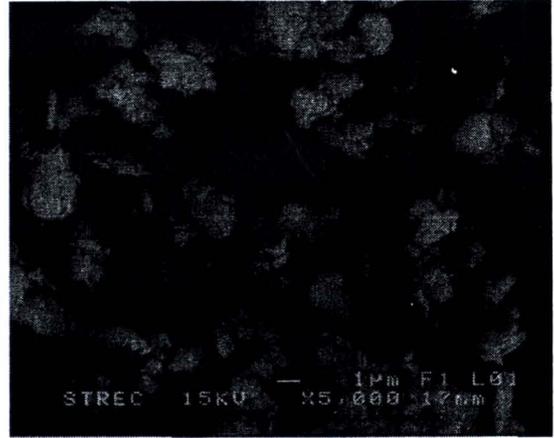
จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Intensity กับค่ามุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2-Theta นั้น พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏว่าไม่พบพีคของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ใช้ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาเป็นวัตถุดิบที่ทุกระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา ในขณะที่เมื่อใช้ตะกอนประปาที่ผ่านการเผาเป็นวัตถุดิบ สังเกตเห็นพีคของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีลักษณะความเป็นผลึกเกิดขึ้น โดยปรากฏเป็นพีคที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 10.158 12.449 16.093 21.649 23.966 27.092 29.916 และ 34.150 ที่ทุกระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ยกเว้นที่ระยะเวลา 24 h ไม่พบพีคของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ได้จากการสังเคราะห์ เนื่องจาก ที่ระยะเวลา 24 h เกิดการเปลี่ยนรูปของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ไปเป็นเฟสอื่น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tounsia et al., 2009 [20] ซึ่งทำการสังเคราะห์ Na Linde Type A Zeolite (Na-LTA Zeolite) จาก Tunisian Sand และเศษอะลูมิเนียม (Aluminum Scrap) ในสารละลาย NaOH 3 M อุณหภูมิ 90° C ที่ระยะเวลา 0-120 h พบว่า ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่น้อยกว่า 24 h เกิด Na-LTA Zeolite ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์และมีความเป็นผลึกสมบูรณ์ที่สุดที่ระยะเวลาเท่ากับ 7 h และผลึกของ Na-LTA Zeolite มีปริมาณลดน้อยลงที่ระยะเวลามากกว่า 24 h และมีการเปลี่ยนรูปจากเฟสกิ่งเสถียร ไปอยู่ในเฟสอื่นที่เสถียรกว่าอีกด้วย สำหรับตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่เกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีตำแหน่ง 2-Theta ที่ 29.916 มีพีคสูงสุด คือ ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 9 h รองลงมาที่ระยะเวลา 6 และ 12 h ตามลำดับ ทั้งนี้ที่ทุกระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ไม่ปรากฏพีคอาจเนื่องมาจากปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีอยู่น้อยจึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และที่ทุกระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผา และผ่านการเผา ปรากฏว่าพบพีคของสารประกอบอื่นๆ ได้แก่ Quartz โดยปรากฏเป็นพีคที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 20.860 26.640 36.544 50.139 59.960 และ 68.144 รวมอยู่ด้วย

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตะกอนโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนและซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาด้วยเทคนิค SEM พบว่า ตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผามีลักษณะไม่แตกต่างกัน คือ มีลักษณะรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอ ขนาดเล็กใหญ่คละกัน ไปและเกาะกันเป็นกลุ่ม แสดงดังรูปที่ 4.3



(ก) ไม่ผ่านการเผา

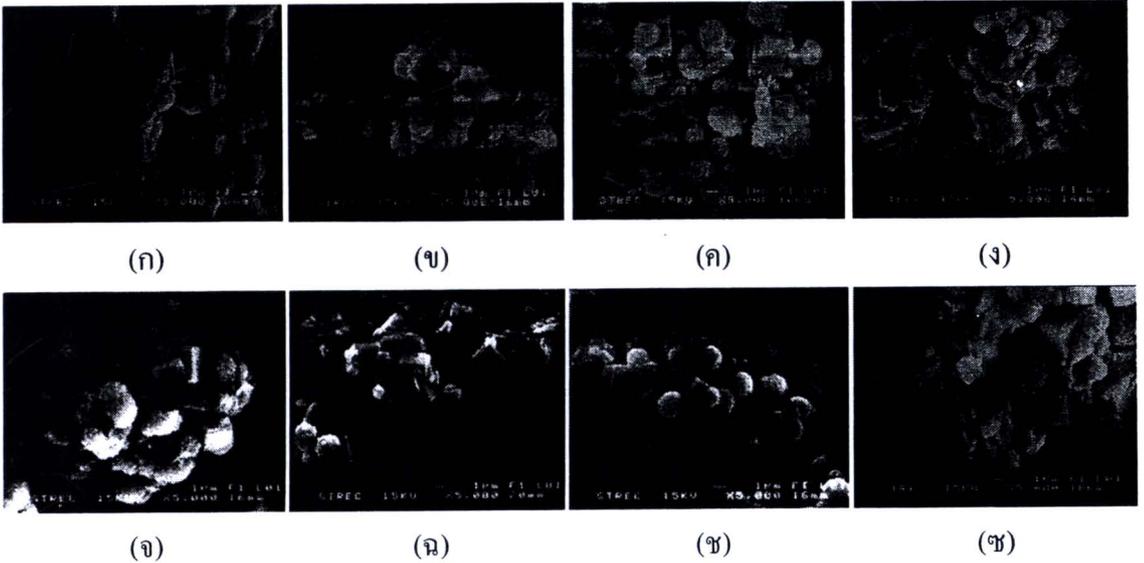


(ข) ผ่านการเผา

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของตะกอนประปาด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ จากตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผา ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM โดยสังเกตเห็นซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ซึ่งมีรูปร่างของผลึกเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ [15; 26] ที่ทุกสภาวะการทดลอง โดยพบค่อนข้างมากในตัวอย่างที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่ผ่านการเผา เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาเวลาทำปฏิกิริยาที่ 6 9 และ 12 h พบว่า ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 9 h ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้ประกอบด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่มีโครงสร้างผลึกค่อนข้างสมบูรณ์และเกิดขึ้นในปริมาณมากเมื่อเทียบกับภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ที่สภาวะอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.4 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 9 h พบว่า ได้ค่าพื้นที่ผิว (Surface Area) เท่ากับ $52.2 \text{ m}^2/\text{g}$ ค่าปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume) เท่ากับ $0.1632 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยรูพรุน (Mean Pore Diameter) เท่ากับ 12.501 nm แสดงดังตารางที่ 4.2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A กับ LTA Zeolite และ Commercial Zeolite A พบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมน้อยกว่า LTA Zeolite และ Commercial Zeolite A เนื่องจาก LTA Zeolite ที่ได้จากการทดลองของ Tanaka et al., 2009 [42] ทำการสังเคราะห์โดยใช้สารตั้งต้นที่มีแหล่งของซิลิกอน อะลูมิเนียม และสารอินทรีย์ที่เป็นสารโครงสร้างที่มีความบริสุทธิ์สูง ดังนั้น การสังเคราะห์จึงเกิดการทำให้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์และมีการจัดเรียงตัวให้อยู่ในรูปผลึกของ LTA ในปริมาณมาก ส่วน Commercial Zeolite A ที่ได้จากการทดลองของ Kim et al., 2009 [43] เลือกใช้วัสดุที่มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) สูงๆ มาใช้ในการทดลองเพื่อใช้ในการดูดซับ ดังนั้น ค่าพื้นที่ผิวจึงมีความสำคัญและเป็นพารามิเตอร์มาตรฐานที่ใช้

สำหรับศึกษาลักษณะพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับประสิทธิภาพในการดูดซับ [41]



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา (ก) 6 h (ข) 9 h (ค) 12 h และ (ง) 24 h และตะกอนประปาที่ผ่านการเผา ที่ระยะเวลา (จ) 6 h (ฉ) 9 h (ช) 12 h และ (ซ) 24 h ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

Absorbent	Surface Area (m^2/g)	Total Pore Volume (cm^3/g)	Mean Pore Diameter (nm)	Reference
Zeolite Na-A	52.2	0.16	12.50	This study
LTA Zeolite	470	0.56	6.40	42
Commercial Zeolite A	702	0.26	0.52	43

4.1.5 การวิเคราะห์ค่า CEC

ค่า CEC หรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน คือ การแสดงปริมาณประจุบวกทั้งหมดที่ซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้

ตารางที่ 4.3 ค่า CEC ของตะกอนประปาเริ่มต้นและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ

ตะกอนประปา ที่ไม่ผ่านการเผา	CEC (meq/g)	ตะกอนประปา ที่ผ่านการเผา	CEC (meq/g)
วัตถุดิบเริ่มต้น	0.06	วัตถุดิบเริ่มต้น	0.12
6 h	0.45	6 h	0.99
9 h	0.41	9 h	1.07
12 h	0.43	12 h	0.78
24 h	0.37	24 h	0.29

จากตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ค่า CEC ของตะกอนประปาเริ่มต้นและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการเผาและผ่านการเผาที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH 3 M ของตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 9 h มีค่า CEC มากที่สุด เท่ากับ 1.07 meq/g และตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 6 และ 12 h มีค่า CEC ร่องลงมา เท่ากับ 0.99 และ 0.78 meq/g ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างผลึกของตะกอนประปาที่ผ่านการเผาเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์จึงส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่ดีขึ้นเกิดเป็นซีโอไลต์ชนิด Na-A [13] ทำให้ค่า CEC ที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างสูงในตะกอนประปาที่ผ่านการเผา ซึ่งผลที่ได้มีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และเทคนิค SEM ดังนั้นจึงทำการเลือกใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 9 h เพื่อนำไปใช้ทำการศึกษาการดูดซับในขั้นตอนต่อไป

เมื่อนำตะกอนประปาเริ่มต้นที่ผ่านการเผาและซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ผ่านการเผาที่ระยะเวลา 9 h มาทำการเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับตัวอื่นๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4



ตารางที่ 4.4 ค่า CEC ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

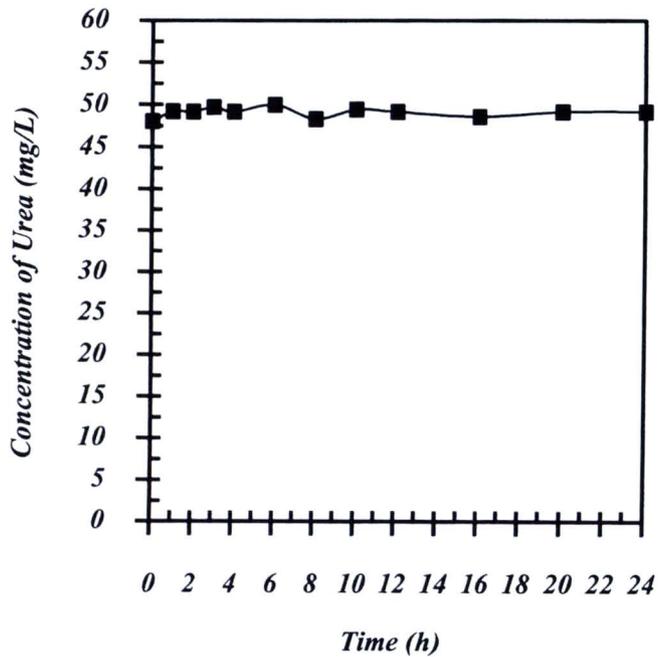
Absorbent Type	CEC (meq/g)	Reference
Sludge (Calcining)	0.06	This Study
Zeolite Na-A	1.07	This Study
Zeolite Linde F	1.90	[12]
Sodalite	0.30	[12]
Analcime	0.60	[12]
Original Paper Sludge Ash	0.50	[17]
Zeolite Na-P1	1.30	[17]
Sand	0-0.08	[44]
Loam	0.21-0.28	[44]
Clay	> 0.40	[44]
Organic Soils	0.50-1.00	[44]
Atomic Minerals	1.30-1.60	[45]

จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ระยะเวลา 9 h มีค่า CEC เท่ากับ 1.07 meq/g มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Atomic Minerals (แร่ธรรมชาติจากภูเขาไฟ) และซีโอไลต์ที่ผ่านการสังเคราะห์ เช่น Zeolite Na-P1 ซึ่งสังเคราะห์จากเถ้ากระดาษ และ Zeolite Linde F ซึ่งสังเคราะห์จากเถ้าและเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับประเภทดินที่อยู่ในธรรมชาติ เช่น Sand Loam Clay Organic Soil หรือ Original Paper Sludge Ash และตัวดูดซับที่ผ่านการสังเคราะห์จากเถ้าลอย เช่น Sodalite และ Analcime ยังมีค่ามากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A นี้ ยังมีค่าค่อนข้างสูงแต่อาจมีค่าน้อยกว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ขึ้นในบางชนิดของตัวดูดซับ การใช้ตะกอนประปามาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Na-A จึงมีความเป็นไปได้อย่างมากที่จะนำมาใช้ในด้าน การดูดซับต่อไป

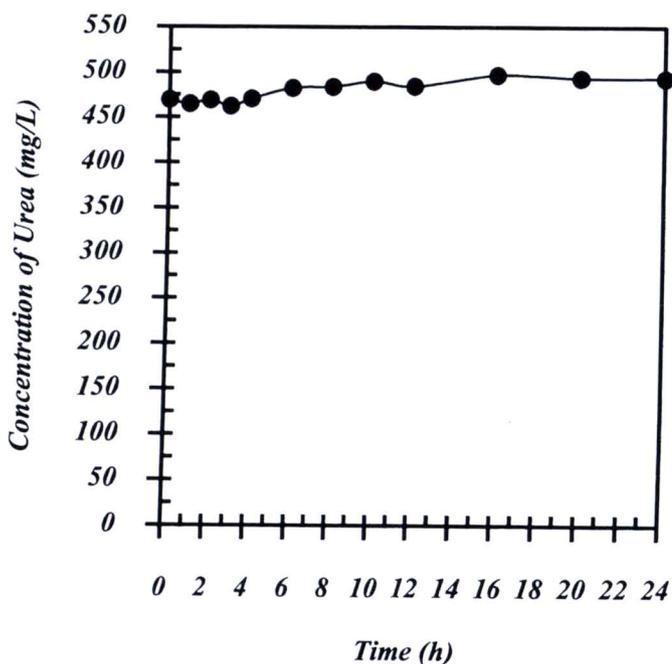
4.2 การดูดซับปฏิกิริยาและปฏิกิริยาไอออนแลกเปลี่ยนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์

4.2.1 การดูดซับปฏิกิริยาด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMAB

การดูดซับปฏิกิริยาด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี DMAB ได้ผลทดลอง



รูปที่ 4.5 การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 50 mg/L



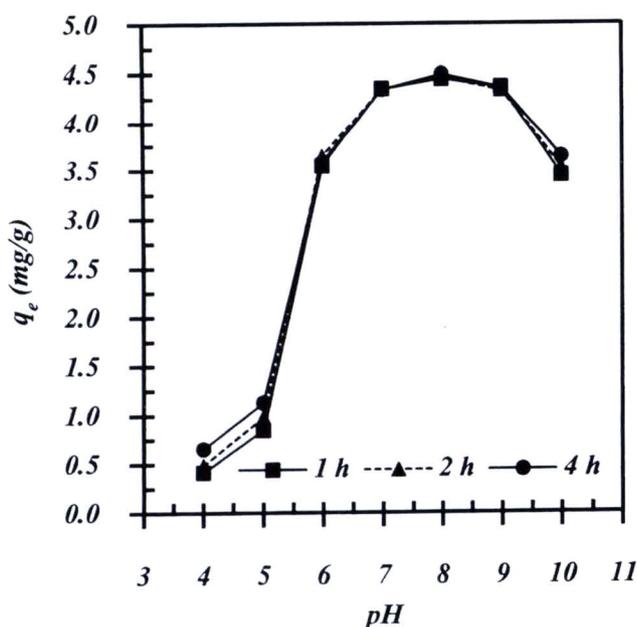
รูปที่ 4.6 การดูดซับสารละลายปุ๋ยยูเรียด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 500 mg/L

ผลการทดลองแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยยูเรียเริ่มต้นและสารละลายปุ๋ยยูเรียที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ ที่ความเข้มข้น 50 และ 500 mg/L ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พบว่า สารละลายปุ๋ยยูเรียที่ความเข้มข้น 50 และ 500 mg/L ที่ผ่านการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีค่าความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยยูเรียไม่ลดลง เนื่องจาก ปุ๋ยยูเรียเป็นสารประกอบประเภทสารอินทรีย์เคมี ดังนั้น เมื่อนำปุ๋ยยูเรียมาละลายน้ำจึงไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เพราะ ปุ๋ยยูเรียเป็นสารประเภท Nonelectrolytes ที่ไม่สามารถแตกตัวในรูปของไอออนได้ แต่สามารถละลายในน้ำได้ดีและยังคงรักษารูปร่างของโมเลกุลเอาไว้ [46; 47] ซึ่งถ้าต้องการให้ปุ๋ยยูเรียแตกตัว ต้องเกิดจากปฏิกิริยา Hydrolysis ของเอนไซม์ยูรีเอส (Urease or Urea Amidohydrolase) จากจุลินทรีย์ประเภท Heterotrophic Bacteria เป็นแอมโมเนียมคาร์บอเนต ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) ซึ่งไม่สามารถคงสภาพได้และแตกตัวต่อไปกลายเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ในที่สุด [48] ดังนั้น เพื่อให้งานวิจัยนี้ตรงตามวัตถุประสงค์ จึงทำการเปลี่ยนชนิดของปุ๋ยไปเป็นปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งสามารถแตกตัวเมื่อละลายน้ำ เพื่อนำไปใช้ศึกษาความสามารถของซีโอไลต์สังเคราะห์ในการดูดซับต่อไป

4.2.2 การดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์

การดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ มีผลการทดลองโดยอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

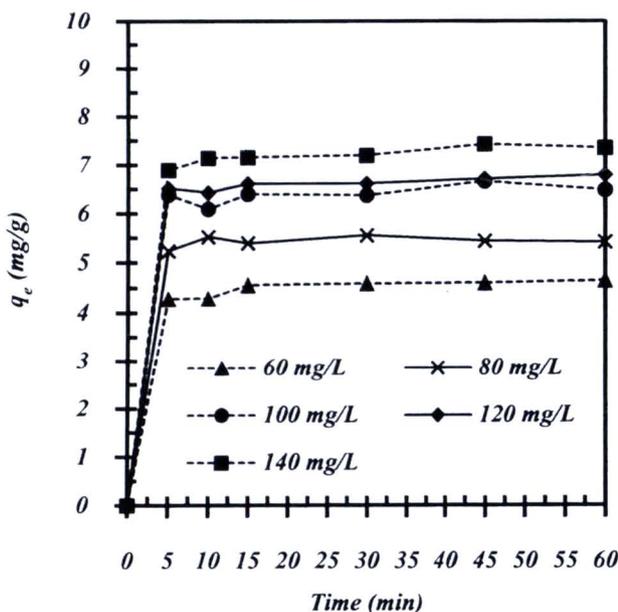
4.2.2.1 การหาค่า pH ที่เหมาะสมที่สุด ($\text{pH}_{\text{optimum}}$)



รูปที่ 4.7 ค่า $\text{pH}_{\text{optimum}}$ ที่ระยะเวลา 1 2 และ 4 h

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่เหลืออยู่ หลังจากผ่านการดูดซับด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ที่ค่า pH เท่ากับ 4 5 6 7 8 9 และ 10 โดยใช้ระยะเวลา ในการดูดซับเท่ากับ 1 2 และ 4 h จากการทดลอง พบว่า ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ ปริมาณของตัว ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_c) มีค่าเพิ่มขึ้นที่ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 4-8 เนื่องจาก ที่ค่า pH น้อยกว่า 8 ประจุบวกของไฮโดรเจนไอออน (H^+) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง ดังนั้น การดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A จึงเกิดการแย่งชิง ระหว่างแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และ H^+ จึงทำให้การดูดซับ NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ดูดซับได้ไม่ดี [49; 50] การดูดซับ NH_4^+ ที่ค่า pH เท่ากับ 8 พบว่า มีค่าความเข้มข้นของ สารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตค่าที่สุด เท่ากับ 7.33 7.20 และ 6.88 mg/g ที่ระยะเวลาการดูดซับ 1 2 และ 4 h ตามลำดับ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al., 2010 [51] พบว่า การดูดซับ NH_4^+ โดยใช้ ซีโอไลต์ธรรมชาติจากจีน (Chende) โดยทำการควบคุมค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 4-9 พบว่า พบว่า ผลของค่า pH ที่มีความสามารถในการดูดซับ NH_4^+ สูงสุด มีค่าเท่ากับ 8 เช่นกัน และการดูดซับ NH_4^+ มีค่า q_c ลดลงที่ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 8-10 เนื่องจาก เกิดการเปลี่ยนรูปของ NH_4^+ ไปอยู่ในรูปของ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) จึงทำให้การดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีการดูดซับในรูปของ NH_4^+ ได้น้อยลงและแอมโมเนียไม่สามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดูดซับ [52] ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า $pH_{optimum}$ ที่มีความเหมาะสมที่สุด เท่ากับ 8 และระยะเวลาที่ 1 2 และ 4 h ไม่มีผลต่อการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจาก เป็นเวลาที่เกินจุดสมดุลการดูดซับ ซึ่งจะได้ศึกษาหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับใน ขั้นตอนต่อไป

4.2.2.2 การหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ (ค่า $t_{equilibrium}$)



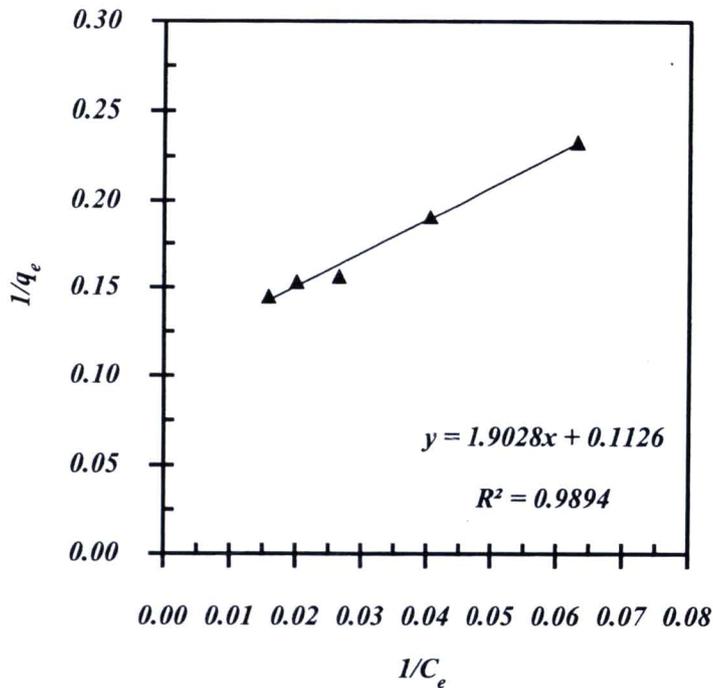
รูปที่ 4.8 ค่า $t_{equilibrium}$ ของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_e (mg/g) ที่ระยะเวลาต่างๆ จากการทดลอง พบว่าค่า q_e ที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ถูกดูดซับเป็นไปในทิศทางเดียวกันที่ทุกระยะเวลาการทดลอง โดยการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 60 80 100 120 และ 140 mg/L เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาการดูดซับเท่ากับ 5 min และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 15 min ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต เท่ากับ 4.56 5.40 6.40 6.62 และ 7.16 mg/g ตามลำดับ และหลังจากระยะเวลา 15 min มีค่าการดูดซับคงที่จนถึง 60 min ที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัย Zhao et al., 2010 [32] ใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A เช่นกัน มาทำการดูดซับ NH_4^+ พบว่า การดูดซับ NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 15 min เช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า $t_{\text{equilibrium}}$ มีค่าเท่ากับ 15 min และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป

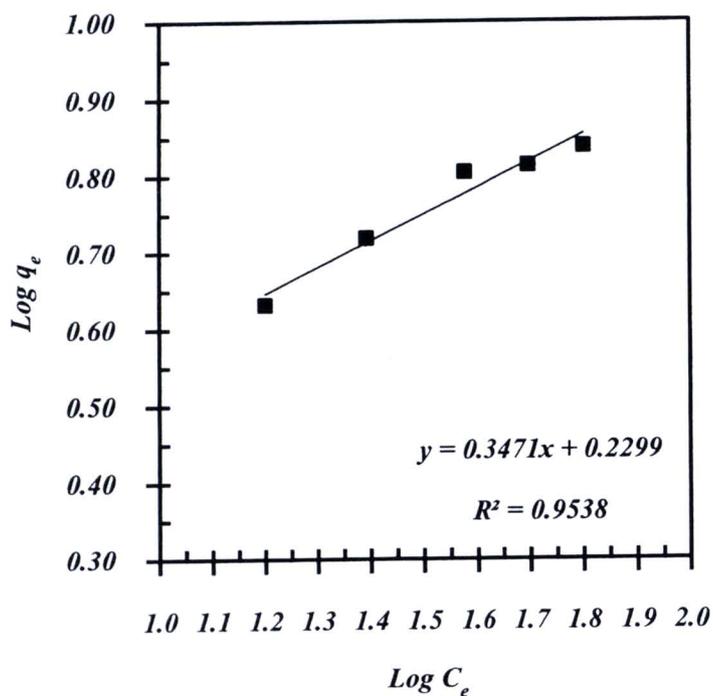
4.2.2.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับจากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมดูดซับระหว่างค่าความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ผลที่ได้จากการศึกษานำมาทำการเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับระหว่างสมการ Langmuir และสมการ Freundlich โดยพิจารณาความน่าเชื่อถือและความสอดคล้องของไอโซเทอมจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) จากทั้ง 2 สมการ โดยทำการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ที่มีค่า R^2 ถ้าสมการใดมีค่า R^2 มากกว่าหรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด แสดงว่ามีผลสอดคล้องกับสมการนั้น ในกรณีที่มีผลสอดคล้องกับสมการ Langmuir ควรคำนวณหาปัจจัยการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation Factor or Equilibrium Parameter, R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับการดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการ $R_L = 1/(1+(K_L C_0))$ [23; 53; 54] โดยค่า C_0 หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (mg/L) ถ้าค่า $R_L = 0$ เป็นพฤติกรรมดูดซับของวัสดุดูดซับที่ไม่ขึ้นชอบตัวถูกดูดซับชนิดนั้น ค่า R_L อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ เป็นพฤติกรรมดูดซับของวัสดุดูดซับที่ขึ้นชอบตัวถูกดูดซับชนิดนั้น ค่า $R_L = 1$ เป็นพฤติกรรมดูดซับแบบเป็นเส้นตรง และถ้าค่า $R_L > 1$ เป็นพฤติกรรมดูดซับที่ไม่สามารถผันกลับได้

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยการนำค่า $t_{\text{equilibrium}}$ (จากข้อ 4.2.2.2) ที่ได้จากการทดลองมาทำการสร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir และสมการ Freundlich แสดงดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 เพื่อนำค่าต่างๆ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ตามสมการไอโซเทอมการดูดซับ โดยไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C_e$ เป็นแกน x และค่า $1/q_e$ เป็นแกน y กำหนดให้ค่า K_L เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับของสมการ Langmuir (L/mg) ค่า q_m เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับสูงสุด (mg/g) และจากไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich เป็นกราฟความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm) ระหว่างค่า $\text{Log } C_e$ เป็นแกน x และค่า $\text{Log } q_e$ เป็นแกน y จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ $\text{Log } K_f$ โดยกำหนดให้ค่า K_f เป็นค่าคงที่ของสมการ Freundlich แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (L/g) และค่า n (Correction Factor) เป็นค่าคงที่ที่แสดงถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (ไม่มีหน่วย) จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับค่า $1/n$ อยู่ในช่วง $0 < 1/n < 1$ สามารถอธิบายถึงการดูดซับหรือเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 สามารถอธิบายได้ว่า วัสดุดูดซับมีความชื่นชอบตัวถูกดูดซับหรือวัสดุดูดซับสามารถดูดซับได้ดี [31; 33; 41]



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มี NH_4^+ เป็นองค์ประกอบและค่า CEC ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

Absorbent	Initial concentration (mg/L)	CEC (meq/g)	Reference
Zeolite Na-A	50-140	1.07	This study
NaA Zeolite	10-300	-	32
Natural Chinese Zeolite	50-300	0.82	51
Turkish Clinoptilolite	25-150	0.95	55

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับจากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich

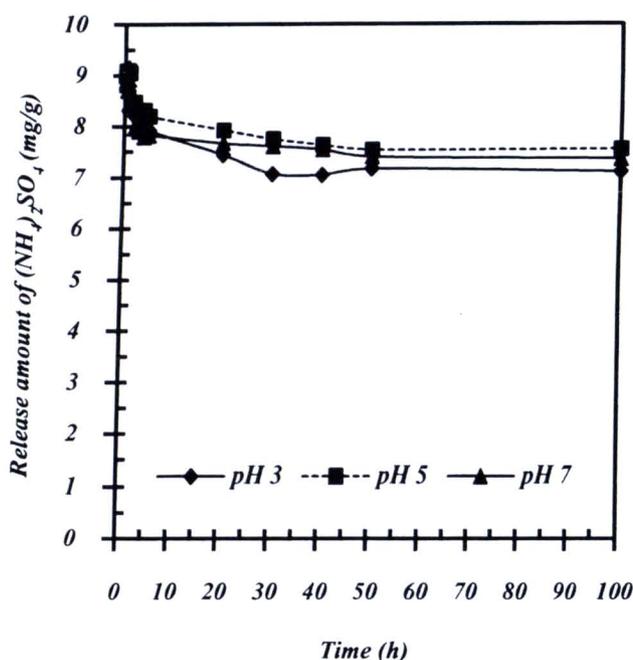
Absorbent	Langmuir Isotherm				Freundlich Isotherm			Reference
	K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R_L	R^2	K_F (L/g)	1/n	R^2	
Zeolite Na-A	0.06	8.88	0.11-0.22	0.989	1.70	0.35	0.954	This study
NaA Zeolite	0.02	44.3	0.16-0.85	0.960	1.57	0.63	0.990	32
Natural Chinese Zeolite	0.06	6.47	-	0.985	0.64	0.53	0.995	51
Turkish Clinophtholite	0.03	8.12	0.17-0.60	0.927	0.61	0.52	0.952	55

จากตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มี NH_4^+ เป็นองค์ประกอบและค่า CEC ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีค่าความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วงระหว่าง 25-300 mg/L และเมื่อเปรียบเทียบค่า CEC ของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด พบว่า ค่า CEC ของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีค่ามากกว่า Turkish Clinophtholite และ Natural Chinese Zeolite และจากตารางที่ 4.6 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และสมการ Freundlich โดยค่าความเข้มข้นสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเริ่มต้น อยู่ในช่วงระหว่าง 50-140 mg/L จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A โดยทำการพิจารณาความน่าเชื่อถือและความสอดคล้องของไอโซเทอมการดูดซับจากค่า R^2 พบว่า การดูดซับสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A จากสมการ Langmuir และสมการ Freundlich มีค่าเท่ากับ 0.989 และ 0.954 ตามลำดับ ซึ่งค่า R^2 ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความสอดคล้องกับทั้ง 2 สมการ โดยการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเกิดการดูดซับที่พื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้นร่วมกัน ในกรณีที่มีค่า R^2 สอดคล้องกับสมการ Langmuir ต้องหาค่า R_L ซึ่งมีค่าที่ได้จากการคำนวณอยู่ในช่วงระหว่าง 0.11-0.22 ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง $0 < R_L < 1$ ดังนั้นจากพฤติกรรมการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีความชื่นชอบในการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ส่วนค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสมการ Langmuir และค่า K_F ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสมการ Freundlich มีค่าเท่ากับ 0.06 L/mg และ 1.70 L/g ตามลำดับ และจากค่า q_m ของสมการ Langmuir สามารถบอกปริมาณของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตต่อปริมาณของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ดูดซับได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ 8.88 mg/g และ

จากค่า $1/n$ ของสมการ Freundlich บ่งบอกถึงความสามารถของการดูดซับ โดย $1/n$ จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 จากการทดลองมีค่า $1/n$ เท่ากับ 0.35 แสดงว่า ความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถดูดซับได้มากหรืออาจกล่าวได้ว่าบริเวณพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีปริมาณมากและจากการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ NH_4^+ โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A กับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีค่า q_m มากกว่า Turkish Clinoptilolite และ Natural Chinese Zeolite แต่มีค่า q_m น้อยกว่า NaA Zeolite เนื่องจากว่า NaA Zeolite ที่ได้จากการทดลองของ Zhao et al., 2010 [32] ทำการสังเคราะห์มาจากแร่ Halloysite หรือแร่ที่เป็นองค์ประกอบของดินขาว ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์เป็น NaA Zeolite ดังนั้น เมื่อทำการศึกษากการดูดซับจึงทำให้ได้ค่า q_m ที่สูงกว่าซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ซึ่งได้จากการสังเคราะห์จาก Waste ที่มาจากตะกอนประปา และจากค่า $1/n$ และค่า R_L ของวัสดุทั้ง 4 ชนิด พบว่า มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของสมการไอโซเทอมการดูดซับ จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้น มีความชื่นชอบและสามารถดูดซับสารละลายที่มีองค์ประกอบของ NH_4^+ ได้ดี

4.3 การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์

การศึกษากการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ที่ค่า pH เท่ากับ 3 5 และ 7 ตามลำดับ แล้วทำซ้ำเพื่อศึกษากการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา เท่ากับ 0.83 0.17 0.25 0.50 0.75 1 2 3 4 5 20 30 40 50 และ 100 h



รูปที่ 4.11 การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตจากซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ระยะเวลาต่างๆ โดยในการทดลองทำการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 3-7 เนื่องจากว่า ในการใช้ปุ๋ย NH_4^+ มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในช่วงของค่า pH ที่มีสภาพความเป็นกรดเท่านั้นและมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำในช่วงของค่า pH ที่มีสภาพเป็นด่างสูงๆ โดยปุ๋ยที่อยู่ในรูปของ NH_4^+ จะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของก๊าซ NH_3 ซึ่งสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วและไม่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช [24] เมื่อทำการศึกษาปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่า ที่ค่า pH 3 5 และ 7 มีการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 0-2 h เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นการปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตมีแนวโน้มเริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 50 h ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.17 7.54 และ 7.40 mg/g ที่ค่า pH 3 5 และ 7 ตามลำดับ และที่ระยะเวลามากกว่า 50 h การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเริ่มเข้าสู่สถานะสมดุล เนื่องจาก ค่าความเข้มข้นของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ปลดปล่อยจากซีโอไลต์ชนิด Na-A ทำการปลดปล่อยในน้ำที่จำกัดปริมาณ ดังนั้น หากนำปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ถูกดูดซับด้วยซีโอไลต์ชนิด Na-A มาใช้ในพื้นที่จริง การปลดปล่อยปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตอาจถูกชะด้วยการรด น้ำฝนหรือปัจจัยภายนอกอื่นๆ ทำให้ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตมีความสามารถในการปลดปล่อยได้สูงขึ้นที่ระยะเวลามากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Ma et al., 2011 [56] ได้ทำการศึกษาการดูดซับและควบคุมการปลดปล่อย NH_4^+ และ PO_4^{3-} ในน้ำด้วยฟางข้าวสาเลี พบว่า ค่าการปลดปล่อย NH_4^+ และ PO_4^{3-} เริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 5 h และ 4 h ซึ่งมีค่าการปลดปล่อยเท่ากับ 2.73 mg/g เท่ากับ 0.17 mg/g ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาในการปลดปล่อย NH_4^+ จากฟางข้าวสาเลีมีระยะเวลาน้อยกว่าการปลดปล่อย NH_4^+ ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ดังนั้น การนำซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มาทำการดูดซับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมและผลิตเป็นปุ๋ยละลายช้าเพื่อใช้งานได้จริงในอนาคต