

การลดความเป็นพิษของควีนจากการเผากระดาษไหว้เจ้า



นางสาวปิยรัตน์ดา จันทราพานิชกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TOXICITY REDUCTION OF SMOKE FROM JOSS PAPER BURNING

Miss Piyaratda Chantrapanichgul



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Department of Imaging and Printing Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University



ปิยรัตน์ดา จันทราพานิชกุล : การลดความเป็นพิษของควันจากการเผากระดาษไหว้เจ้า (TOXICITY REDUCTION OF SMOKE FROM JOSS PAPER BURNING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. กุณิณี สุวรรณกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี, 110 หน้า.

งานวิจัยศึกษาความเป็นพิษของควันจากการเผากระดาษไหว้เจ้า เพื่อหาแนวทางหรือวิธีการในการลดความเป็นพิษนั้น ผลการศึกษาพบว่า กระดาษไหว้เจ้าที่มีการใช้กันมากและมีตะกั่วเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่ากระดาษชนิดอื่นคือ กระดาษกิมจั้วซึ่งมีตะกั่วอยู่ 2.8 ppm นอกจากนี้ยังพบซัลไฟด์ซึ่งอาจทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อนำกระดาษไปเผา จากการนำวัสดุดิบที่ใช้ผลิตกระดาษมาวิเคราะห์ พบว่ามีการปนเปื้อนของตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ แต่พบในปริมาณที่ต่ำกว่าในกระดาษที่ผลิตแล้ว จึงสันนิษฐานว่ามีการสะสมของตะกั่วและซัลไฟด์ในกระบวนการผลิตกระดาษที่มีการนำน้ำมาหมวนเวียนใช้ใหม่ในระบบ ดังนั้นการจัดการน้ำหมวนเวียนในกระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้การเผากระดาษไหว้เจ้าเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงทดลองใช้แอมมอนด์มอร์ริลโลไนในการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำที่หมวนเวียนในระบบ เนื่องจากแอมมอนด์มอร์ริลโลไนในการดูดซับทั้งไอออนบวก ( $Pb^{2+}$ ) และไอออนลบ ( $S^{2-}$ ) ซึ่งพบว่าในน้ำที่มีตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส pH 4.6 เมื่อปริมาณแอมมอนด์มอร์ริลโลไนต์มากขึ้นความสามารถดูดซับตะกั่วลดลง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์เพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ผลการทดสอบทางด้านเทอร์โมไดนามิกการดูดซับแอมมอนด์มอร์ริลโลไนต์จะสามารถดูดซับสารตะกั่วและซัลไฟด์ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองเสมอ และในการทดลองขึ้นเยื่อกระดาษที่จำลองการปนเปื้อนสารตะกั่วและการกำจัดสารตะกั่วด้วยแอมมอนด์มอร์ริลโลไนต์พบว่า กระดาษและซี้ได้จากเยื่อกระดาษที่จำลองการกำจัดตะกั่วจะมีปริมาณที่ลดลง ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าแอมมอนด์มอร์ริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ได้จริง

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5572047223 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS: JOSS PAPER / MONTMORILLONITE / LEAD / ADSORPTION / SULFIDE

PIYARATDA CHANTRAPANICHGUL: TOXICITY REDUCTION OF SMOKE FROM JOSS PAPER BURNING. ADVISOR: DR. KUNTINEE SUVARNAKICH, CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. NUTTAYA PONGSTABODEE, 110 pp.

This research studied the toxicity of smoke from joss paper burning to achieve guideline or methods for toxicity reduction. It was found that Kim-Chua which was widely used contained the highest amount of lead at 2.8 ppm. Sulfur which can turn into sulfur dioxide was also found in this type of paper. Lead and sulfur were also found in pulp which was used as a raw material, though at a smaller amount. It was possible that lead and sulfur accumulated in the white water circulation system. Therefore, waste water management is very important in making environmental-friendly joss paper. In this research, montmorillonite was used to remove lead and sulfur in whitewater as it is a good adsorbent for cation ( $Pb^{2+}$ ) and anion ( $S^{2-}$ ). In the solution contained 10 mg/l lead and 400 mg/l sulfur at 25°C, pH 4.6, it was found that an increased amount of montmorillonite resulted in a decrease of adsorption capacity of lead and increased adsorption capacity of sulfur. From the thermodynamic studies, it was found that the adsorption process was endothermic and spontaneous. When the pulp contaminated with lead and sulfur was treated with montmorillonite and formed into paper, the amount of lead in the paper and its ash after burning was reduced.

Department: Imaging and Printing Student's Signature .....

Technology Advisor's Signature .....

Field of Study: Pulp and Paper Co-Advisor's Signature .....

Technology

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างสูง จากอาจารย์ ดร. กุณทีนี สุวรรณกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี ซึ่งเป็นที่ปรึกษาการค้นคว้า โดยให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตั้งแต่เริ่มทำงานวิจัยจนจบ ทั้งให้คำแนะนำด้านภาษาไทย การเขียนเล่ม การดำเนินงานวิจัย การแก้ไข ปัญหา และกำลังใจในการทำงาน จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณารับเป็นที่แนะนำแนวคิดที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย จนดำเนินการแล้วเสร็จ

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบคุณกำลังใจจากทุกคนในครอบครัว

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ฮวงฮั้ว จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท

ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย และบริษัท ฮวงฮั้ว จำกัด ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เทศกาลไหว้เจ้า.....	4
2.2 การขึ้นรูปกระดาษ.....	5
2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ.....	5
2.2.2 การตีกระจาย (Pulping).....	6
2.2.3 การบดเยื่อ (Refining).....	7
2.2.4 ระบบไหลเวียนเยื่อและน้ำในกระบวนการผลิต.....	9
2.2.5 การขึ้นรูปกระดาษ (Sheet forming).....	11
2.2.6 การตกแต่งผิวกระดาษ.....	12
2.3 การเผาไหม้.....	13
2.4 ตัวดูดซับ.....	15
2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm).....	17

2.4.2 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics) .....	20
2.4.3 ความร้อนการดูดซับ (Adsorption thermodynamic) .....	21
2.5 ดิน หิน แร่ และมอนต์โมริลโลไนต์ .....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2 วัสดุและสารเคมีสำหรับการวิจัย .....	31
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	31
3.3.1 การศึกษาตลาดกระดาษไหว้เจ้า.....	31
3.3.2 การวิเคราะห์ความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้าและแหล่งที่มาของความเป็นพิษ... 31	
3.3.3 การศึกษาเพื่อลดความเป็นพิษ.....	33
3.3.4 การทดลองใช้มอนต์โมริลโลไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ .....	37
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ข้อมูล .....	39
4.1 ผลการสำรวจตลาดกระดาษไหว้เจ้า .....	39
4.2 การวิเคราะห์ความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้าและแหล่งที่มาของความเป็นพิษ .....	41
4.2.1 ความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้า.....	41
4.2.2 แหล่งที่มาของความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้า .....	42
4.3 การศึกษาเพื่อลดความเป็นพิษโดยการกำจัดตะกั่วหรือ/และซัลไฟด์ในสารละลายด้วย การดูดซับบนแรมมอนต์โมริลโลไนต์ .....	46
4.3.1 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์บนมอนต์โมริลโล ไนต์ .....	46
4.3.2 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์.. 48	
4.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ .....	51



4.3.4	จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ .....	55
4.3.5	เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์.....	59
4.4	ผลการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษโดยใช้แร่มอนต์โมริลโลไนต์ .....	64
4.4.1	การทดสอบปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ ต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์.....	64
4.4.2	การทดสอบเวลาต่อความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ .....	68
4.4.3	การทดสอบเพื่อหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์.....	74
4.5	ผลการทดลองใช้มอนต์โมริลโลไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ .....	80
บทที่ 5	สรุป.....	81
	รายการอ้างอิง.....	83
	ภาคผนวก.....	1
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	เทศกาลต่างๆ และการไหว้เจ้า.....	4
ตารางที่ 2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน.....	6
ตารางที่ 3	เปรียบเทียบการดูดซับแบบกายภาพและการดูดซับแบบเคมี.....	16
ตารางที่ 4	ค่าบวก/ลบของเอนทัลปี เอนโทรปี และกิบส์ต่อรูปแบบการเกิดปฏิกิริยา.....	24
ตารางที่ 5	แร่ดินเหนียวกลุ่มต่างๆ.....	25
ตารางที่ 6	ประเภทของกระดาษไหว้เจ้า และสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภค.....	40
ตารางที่ 7	ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้า.....	41
ตารางที่ 8	ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ปนเปื้อนในวัตถุแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว.....	43
ตารางที่ 9	เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วก่อนการเผา และหลังการเผา.....	44
ตารางที่ 10	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วและเยื่อกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว.....	45
ตารางที่ 11	ความชันและจุดตัดแกนของกราฟการหาสมดุลการดูดซับจาก.....	54
ตารางที่ 12	ค่าคงที่การดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์แบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช.....	55
ตารางที่ 13	ความชันและจุดตัดแกนของกราฟจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์สำหรับการดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง.....	58
ตารางที่ 14	ผลการคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	59
ตารางที่ 15	ความชันและจุดตัดแกนของกราฟเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์.....	62
ตารางที่ 16	ค่าคงที่เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์โดยแรมอนต์โมริลไอไนต์.....	63
ตารางที่ 17	ความชันกราฟและจุดตัดแกนจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองจากกราฟรูปที่ 28 ..	73
ตารางที่ 18	ผลการคำนวณหาค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง.....	73

ตารางที่ 19 ความชันกราฟและจุดตัดกราฟในรูปที่ 29 และ รูปที่ 30.....	77
ตารางที่ 20 ผลการคำนวณค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และกิบป์จากกระบวนการดูดซับตะกั่วและ ซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ .....	78
ตารางที่ 21 ผลการทดลองใช้มอนิโอมิไรโอไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ .....	80



## สารบัญภาพ

รูปที่ 1 ลำดับการตีและบดเยื่อ .....	7
รูปที่ 2 สภาพเส้นใยก่อนบดและหลังบด .....	8
รูปที่ 3 กลไกการบดเยื่อ .....	8
รูปที่ 4 ตัวอย่างระบบน้ำในโรงงานกระดาษ .....	10
รูปที่ 5 การกรองน้ำออกจากเส้นใยเพื่อขึ้นรูปกระดาษ .....	11
รูปที่ 6 การกีดน้ำออกโดยลูกกลิ้ง .....	11
รูปที่ 7 การอบกระดาษด้วยลูกอบ .....	12
รูปที่ 8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ .....	18
รูปที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช .....	19
รูปที่ 10 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง .....	20
รูปที่ 11 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง.....	21
รูปที่ 12 ความร้อนการดูดซับ (Adsorption thermodynamic) .....	23
รูปที่ 13 โครงสร้างของแรมอนต์โมริลโลไนต์ (T: tetrahedral sheet; O: octahedral sheet).....	26
รูปที่ 14 การเตรียมกระดาษให้เจ้าประเภทกิมजू (ก) ก่อนการเผา และ (ข) หลังการเผาเพื่อวิเคราะห์ตะกั่ว.....	32
รูปที่ 15 วัตถุประสงค์ในการผลิตกระดาษกิมजू ได้แก่ (ก) สี (ข) กาว (ค) เยื่อกระดาษ และ (ง) ฟอยล์ ตามลำดับ.....	32
รูปที่ 16 ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6.....	47
รูปที่ 17 ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ต่อแรมอนต์โมริลโลไนต์เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6.....	48

รูปที่ 18 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว โดยใช้ใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.035 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 .....	49
รูปที่ 19 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์โดยใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์ปริมาณ 0.07 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 .....	50
รูปที่ 20 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของมอนต์โมริลโลไนต์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 (a) สมดุลดูดซับแบบแลงมัวร์ (b) สมดุลดูดซับแบบฟรุนดิช .....	52
รูปที่ 21 ไอโซเทอมการดูดซับซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 (a) สมดุลดูดซับแบบแลงมัวร์ (b) สมดุลดูดซับแบบฟรุนดิช .....	53
รูปที่ 22 จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์ (a) การดูดซับอันดับหนึ่ง (b) และ การดูดซับอันดับสอง .....	56
รูปที่ 23 จลนศาสตร์การดูดซับซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ (a) การดูดซับอันดับหนึ่ง และ (b) การดูดซับอันดับสอง.....	57
รูปที่ 24 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่วโดยแรมอนต์โมริลโลไนต์ สารละลายตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แรมอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.035 กรัม เวลาใน การดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6.....	60
รูปที่ 25 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ โดยใช้สารละลายซัลไฟด์ เริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แรมอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.5 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด- ด่างเท่ากับ 4.6 .....	61
รูปที่ 26 ผลการดูดซับสารในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษในปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ ต่างๆกัน การทดลองใช้สารละลายที่มีตะกั่ว 10 และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่ากับมอนต์โมริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0.05 0.1 0.15 0.20 และ 0.25 กรัม เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 (a) ผล	

การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมียีออกระดาศ (b) ผลการดูดซับซัลไฟด์ใน สารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ (c) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ.....	67
รูปที่ 27 ผลการดูดซับสารในสารละลายที่ไม่มีและมียีออกระดาศตามระยะเวลา การทดลองใช้ สารละลายที่มีตะกั่ว 10 และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่ากับ มอนตม์อริลโลไนต์ปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 (a) ผลการดูดซับตะกั่วใน สารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ (b) ผลการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ (c) ผล การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ (d) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มี เยื่อกระดาศ.....	70
รูปที่ 28 ผลการคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง (a) ตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมียี ออกระดาศ (b) ซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ และ (c) ซัลไฟด์ในสารละลายที่มี เยื่อกระดาศ.....	72
รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (a) ของการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อ กระดาศ (b) ของการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ.....	75
รูปที่ 30 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (a) ของการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อ กระดาศ (b) ของการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ.....	76

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหว้เจ้าเป็นวัฒนธรรมของคนไทยเชื้อสายจีนที่ยังคงมีอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในทุกๆ ปี ปริมาณการใช้กระดาษไหว้เจ้ายังคงมีการขยายตัวของการใช้งานอย่างต่อเนื่อง จากศูนย์วิจัยของ กสิกรพบว่าปริมาณกระดาษไหว้เจ้าทั้งปีมีประมาณ 40,000 ตัน หรือคิดเป็นมูลค่า 500 ล้านบาท และยังมีการส่งออกกระดาษไหว้เจ้าจากประเทศไทยไปยังต่างประเทศอีกด้วย เนื่องจากคุณภาพ เป็นที่ยอมรับจากหลายประเทศ [1] แปรเทศกาลสำคัญๆ ที่ใช้กระดาษไหว้เจ้า ได้แก่ ตรุษจีน หงววงเซียวโจย เซงเม้ง ไหว้บ๊ะจ่าง สารทจีน ไหว้พระจันทร์ ไหว้ต้งโจย และไหว้ลี้หนี เป็นต้น เพื่อเป็นการสักการะบูชาเทพเจ้า และระลึกถึงบรรพบุรุษผู้ล่วงลับเพื่อสืบทอดวัฒนธรรมและควมมีตัวตนของคนนั้นๆ กระดาษไหว้เจ้ามักจะตกแต่งสำเร็จรูปด้วยหมึกพิมพ์ กาว สีย้อม และสารเคมีต่างๆ ให้มีสีสัน และรูปร่างเสมือนของจริง จึงกลายเป็นที่นิยมในการใช้เป็นหนึ่งในเครื่องบูชาในพิธีสักการะบูชาของศาสนาพุทธนิกายมหายานและลัทธิเต๋า ได้แก่ ตัวกิม อวงแซ่จี้ กิมจั่ว เตี้ย เป็นต้น แต่บางครั้งที่ผู้ใช้งานต้องการกระดาษไหว้เจ้าแบบที่นำไปพับเพื่อเกิดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ด้วยตนเอง เมื่อเสร็จพิธีสักการะบูชาแล้วกระดาษไหว้เจ้าเหล่านี้จะถูกเผาเพื่อเสมือนเป็นการส่งสิ่งที่สักการะบูชาดังกล่าวไปให้ถึงเทพเจ้าหรือบรรพบุรุษผู้ล่วงลับไป [2] ปกติการเผากระดาษไหว้เจ้าทั่วไปก่อให้เกิดก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกทั้งยังมีควันและเขม่า นอกจากนี้ผู้ที่สัมผัสกับกระดาษไหว้เจ้าโดยตรงมักมีความกังวลเกี่ยวกับการได้รับสารโลหะหนัก เช่น สารตะกั่ว ที่อาจซึมผ่านเข้าร่างกายระหว่างการสัมผัส

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นพิษของการเผากระดาษไหว้เจ้าที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งาน โดยหาค่าโลหะหนักที่เกิดจากการเผาไหม้กระดาษไหว้เจ้า และวิเคราะห์วัตถุพิษเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นพิษ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพกระดาษไหว้เจ้าให้เป็นมิตรต่อมนุษย์ จากการทำการวิจัยขั้นต้นที่กระบวนการผลิตและเตรียมเยื่อเพื่อขึ้นรูปเป็นกระดาษไหว้เจ้าพบว่า ระบบของน้ำที่หมุนเวียนอยู่ในเครื่องผลิตกระดาษ (White water circulation system) เป็นระบบปิด จึงเกิดการสะสมของสารเคมี และโลหะหนักประเภทต่างๆ ที่อาจปะปนมากับวัตถุดิบในปริมาณน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาการจัดการระบบน้ำให้มีความสะอาดมากขึ้นเพื่อกำจัดความเป็นพิษในกระดาษไหว้เจ้าและควันของกระดาษไหว้เจ้าโดยไม่ต้องหาวัตถุดิบทดแทน ในงานนี้เลือกใช้การดูดซับสำหรับการกำจัดสารพิษในกระบวนการผลิตกระดาษสำหรับกระดาษไหว้เจ้า โดยเลือกตัวดูดซับแรมอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นแร่ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อหาระดับความเป็นพิษและปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นพิษของควัน
2. เพื่อหาแนวทางในการลดความเป็นพิษที่เกิดจากการเผากระดาษไหว้เจ้า

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สสำรวจประเภทของกระดาษไหว้เจ้าและปริมาณการใช้กระดาษไหว้เจ้าแต่ละชนิดในประเทศไทย
2. ศึกษาปัญหาที่ทำให้เกิดความเป็นพิษในควันจากการเผากระดาษไหว้เจ้า เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น และวิเคราะห์การก่อเกิดมลพิษจากการเผากระดาษไหว้เจ้าแต่ละประเภท
3. ประเมินจากระดับความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้าแต่ละชนิด และปริมาณที่ใช้เพื่อเลือกตัวอย่างสำหรับวิจัย
4. ผลการวิเคราะห์แหล่งที่มาของตะกั่วและซัลไฟด์ในกระดาษไหว้เจ้ามาจากการสะสมในน้ำของกระบวนการผลิตกระดาษ จึงเลือกสารดูดซับมอนต์โมริลโลไนต์เพื่อดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ จากนั้นจึงทำการทดสอบในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้
  - การทดสอบปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ ต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์



- การทดสอบเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์
- การทดสอบเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์
- การทดสอบเพื่อหาจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์
- การทดสอบเพื่อหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเป็นพิษและปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นพิษของควีน
2. ได้แนวทางในการลดความเป็นพิษที่เกิดจากการเผากระดาษให้แล้ว



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทศกาลไหว้เจ้า

วัฒนธรรมการไหว้เจ้าเป็นวัฒนธรรมของคนไทยเชื้อสายจีน ความถี่ในการไหว้เจ้าขึ้นอยู่กับความเชื่อ บางครอบครัวจะถวายน้ำชาให้กับเจ้าที่เจ้าทางทุกวัน และอาจมีการไหว้เจ้าในวันกลางเดือนและสิ้นเดือนในระบบปฏิทินจันทรคติด้วย นอกจากนี้ยังมีเทศกาลสำคัญๆ ที่จะมีการไหว้เจ้า ซึ่งการเตรียมของไหว้เจ้าในแต่ละเทศกาลจะมีความใกล้เคียงกัน เช่น การเตรียมผลไม้ การเตรียมอาหารคาว ขนมหวาน และกระดาษไหว้เจ้า นอกจากนี้ในแต่ละเทศกาล การไหว้ยังแบ่งเป็นการไหว้เจ้า ไหว้บรรพบุรุษ และการไหว้เจ้าที่ดังตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 เทศกาลต่างๆ และการไหว้เจ้า

เทศกาล	ไหว้เจ้า	ไหว้บรรพบุรุษ	ไหว้เจ้าที่	อื่นๆ
ตรุษจีน		√	√	ไหว้ผีไม่มีญาติ
ห้วงเชียวโจ้ย	√	√		
เซ่งเม้ง		√	√	ไหว้เจ้าที่แปะกง
ไหว้ปะจ่าง		√	√	
สารทจีน		√	√	ไหว้ผีไม่มีญาติ
ไหว้พระจันทร์	√	√		ไหว้อาเนี้ย
ไหว้ตั้งโจ้ย	√	√		
ไหว้สิ้นปี		√	√	ไหว้ผีไม่มีญาติ

ในปฏิทินจันทรคติไทยครั้งแรกของปี คือวันที่ 1 เดือน 1 เรียกว่าวันตรุษจีนหรือวันปีใหม่ ของจีนซึ่งจะอยู่ประมาณเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ ไทยครั้งที่สองคือวันที่ 15 เดือน 1 เรียกว่าหง วงเสียวใจหรืองานฉลองโคมไฟ ไทยครั้งที่สามคือวันที่ 4 เดือน 3 เรียกว่า ไทยเซ็งเม้งเป็นประเพณี ที่ถูกหลานไปไหว้บรรพบุรุษที่ฮวงซุ้ยจะอยู่ประมาณเดือนเมษายน ไทยครั้งที่สี่คือวันที่ 5 เดือน 5 เรียกว่าวันไหว้บะจ่างประมาณเดือนมิถุนายน ไทยครั้งที่ห้าคือวันที่ 15 เดือน 7 เรียกว่าวันสารท จีนหรือการไหว้กลางปีอยู่ประมาณเดือนสิงหาคม ไทยครั้งที่หกคือวันที่ 15 เดือน 8 เรียกว่าวันไหว้ พระจันทร์อยู่ประมาณเดือนกันยายน ครั้งที่เจ็ดเดือน 11 ไม่กำหนดวันแน่นอน เรียกว่าไหว้ตั้งใจย ครั้งสุดท้ายของปีไหว้เดือน 12 วันสิ้นปี เรียกว่า ไหว้สิ้นปี [3]

## 2.2 การขึ้นรูปกระดาษ

### 2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ

เยื่อที่นำมาใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้ามาจากเยื่อกระดาษเก่า ได้แก่ กระดาษหนังสือเก่า กระดาษเอกสารในสำนักงาน กระดาษเอกสารที่ใช้ในธนาคาร เศษกระดาษกล่องขาวจากโรงพิมพ์ และเศษกระดาษหรือกระดาษที่เสียภายในโรงงาน เป็นต้น โดยผ่านขั้นตอนการตีกระดาษให้ กระจายในน้ำ การปรับสภาพเยื่อให้อยู่ในภาวะที่เหมาะสมกับการผลิต การขึ้นรูปกระดาษ และการอบให้ความร้อน [4]

ชนิดของกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่แต่ละชนิดจะมีสมบัติแตกต่างกัน เนื่องด้วยที่มาของ เยื่อที่นำมาผลิตเป็นกระดาษซึ่งมีลักษณะของเส้นใยและวิธีการแปรรูปให้เป็นเยื่อกระดาษที่ แตกต่างกัน สารเติมแต่งในเยื่อกระดาษระหว่างกระบวนการผลิตกระดาษ และสิ่งที่ติดมากับผิว กระดาษเพื่อการใช้งานและเพื่อความสวยงาม เป็นต้น โดยแหล่งที่มาของเยื่อกระดาษสามารถ แบ่งออกเป็นเยื่อใยสั้น (ไม้เนื้อแข็ง) และเยื่อใยยาว (ไม้เนื้ออ่อน)

องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อไม้ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกอื่นๆ พืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณสัดส่วนของสารดังกล่าวแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2 [5] ซึ่งจะ ส่งผลให้กระดาษมีสมบัติต่างกัน เช่น กระดาษจากไม้เนื้ออ่อนจะมีผิวที่หยาบกว่า แต่มีความ แข็งแรงมากกว่า

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน

	เซลลูโลส %	เฮมิเซลลูโลส %	ลิกนิน %	สารแทรก %
ไม้เนื้ออ่อน	40-45	20	25-35	<10
ไม้เนื้อแข็ง	40-45	15-35	17-25	<10

นอกจากนี้ประเภทของกระดาษหากแบ่งตามกรรมวิธีผลิตเยื่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ กระดาษจากเยื่อเคมีและกระดาษจากเยื่อเชิงกล โดยที่กระดาษที่ได้จากเยื่อเชิงกลเป็นกระบวนการทำเยื่อที่มีการกำจัดลิกนินออกไปน้อยมาก ในขณะที่เยื่อเคมีจะมีการใช้สารเคมี อาทิ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเยื่อเคมีแบบกรดหรือซัลเฟตในเยื่อคราฟท์เพื่อละลายเอาลิกนินออกไป ซึ่งจะมีผลทำให้จำนวนโมเลกุลในสายโซ่ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสั้นลง กระดาษที่กรรมวิธีการผลิตที่แตกต่างกันจะมีคุณสมบัติต่างกัน เช่น กระดาษที่ได้จากเยื่อเคมีจะมีความขาวกว่า เป็นต้น ทั้งนี้การเลือกชนิดของเส้นใยมาใช้งานขึ้นอยู่กับความสะดวกในการหาประเภทของไม้ในแต่ละท้องถิ่นเป็นหลัก

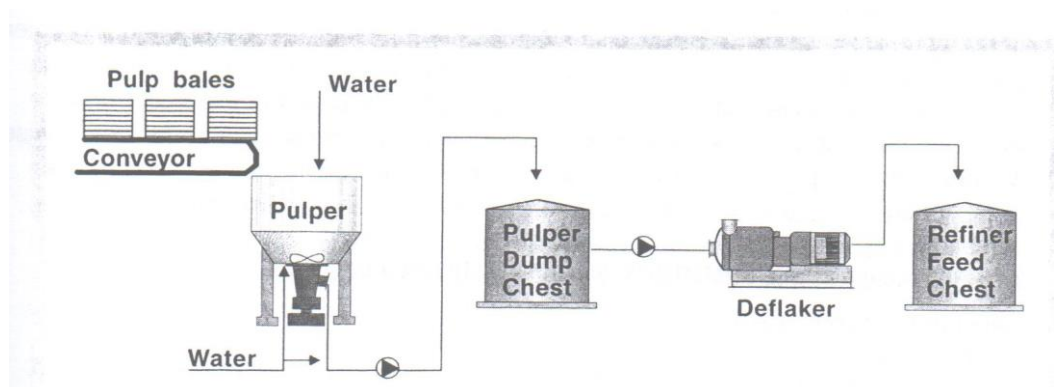
ในกระบวนการผลิตกระดาษจะมีการใส่สารเติมแต่งในกระดาษเพื่อมีหน้าที่ปรับปรุงสมบัติกระดาษ และเพิ่มประสิทธิภาพด้านการผลิตและการบำรุงรักษาเครื่องจักร ซึ่งได้แก่ สารเพิ่มการตกค้าง สารต้านทานการซึม

## 2.2.2 การตีกระดาษ (Pulping)

วัตถุดิบที่นำมาตีกระดาษที่ส่วนต้นของกระบวนการผลิตก่อนทำกระดาษจะอยู่ในรูปแบบที่ถูกอัดเป็นก้อนพร้อมเคลื่อนย้ายโดยสายพานมายังเครื่องตีกระดาษ (Pulper) ขณะที่ทำการตีกระดาษกระดาษในเครื่องตีกระดาษ เยื่อกระดาษจะมีความเข้มข้นร้อยละ 6-8 โดยน้ำหนักการตีกระดาษกระดาษจะทำให้เส้นใยแต่ละเส้นในกระดาษเป็ยกและแยกตัวออกจากกัน และเกิดความยืดหยุ่นก่อนจะเข้าสู่กระบวนการบดเยื่อ (Refining) ช่วงสุดท้ายของการตีกระดาษเยื่อกระดาษที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนักจะสามารถถูกส่งโดยท่อลำเลียงจากเครื่องตีกระดาษไปสู่บ่อพักเยื่อ โดยปรกติแล้วเครื่องตีกระดาษจะมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องตีกระดาษประมาณ 4 เท่า ทั้งนี้เยื่อเป็ยกใช้พลังงานและเวลาในการตีกระดาษน้อยกว่าเยื่อแห้ง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเยื่อกระดาษ ความชื้นในกระดาษ ประเภทของเครื่องตีกระดาษ และวิธีการผลิตของกระดาษที่นำมาใช้ใหม่ เช่น การใช้สารกันซึม สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเป็ยก

การเคลือบผิวกระดาษ และการปรับผิวกระดาษ (Calendaring) เป็นต้น ที่ส่งผลต่อการตีกระจายเยื่อกระดาษ

เครื่องตีกระจายเยื่อกระดาษแรงสูง (Deflaker) อาจจะมีหรือไม่มีในกระบวนการก็ได้ เนื่องจากเครื่องดังกล่าวจะใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษที่วัตถุประสงค์ของการตีกระจาย อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่ไม่ผ่านเครื่องตีกระจายเยื่อกระดาษแรงสูงมักจะได้คุณภาพเยื่อกระดาษที่ดีกว่า เพราะโอกาสที่เส้นใยถูกทำลายน้อยลง [6] รูปที่ 1 แสดงลำดับการตีและบดเยื่อในโรงงานผลิตกระดาษทั่วไป



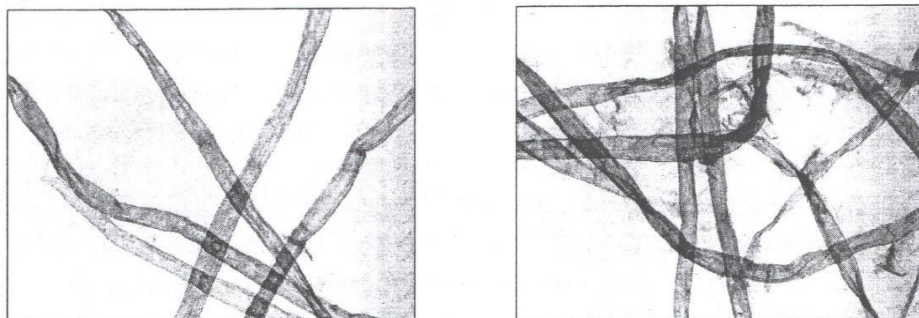
รูปที่ 1 ลำดับการตีและบดเยื่อ

### 2.2.3 การบดเยื่อ (Refining)

เส้นใยกระดาษจากเครื่องตีกระจายจะถูกปรับปรุงที่กระบวนการบดเยื่อซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อให้ได้สมบัติของกระดาษที่ต้องการ จุดประสงค์หลักของการปรับปรุงเส้นใยด้วยการบดคือการเพิ่มความสามารถในการเชื่อมและสัมผัสเส้นใยเส้นอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงด้านการต้านทานแรงดึงของกระดาษ ดังรูปที่ 2 สภาพเส้นใยจะมีความความยืดหยุ่นมากขึ้น สามารถแนบตัวกับเส้นใยเส้นอื่นๆมากขึ้น และมีนอกจากยังมีผลทำให้สมบัติอื่นๆ ของกระดาษเปลี่ยนไป เช่น ทำให้ผิวกระดาษเรียบขึ้นซึ่งส่งผลให้การพิมพ์ที่ดี ปรับปรุงสมบัติการดูดซับ รูปทรงในกระดาษ และสมบัติเชิงแสงในเนื้อกระดาษอีกด้วย [6]

งานบดเยื่อมีลักษณะที่มีแท่งเหล็กเป็นซี่ๆ วางเรียงกันอยู่ โดยระยะห่างแต่ละซี่ต้องเพียงพอที่เส้นใยจะไหลเข้าและออกได้ รูปที่ 3 แสดงกลไกการบดเยื่อ โดยในจังหวะที่หนึ่งของการบด เส้นใยจะถูกรวมที่บริเวณขอบของแท่งโลหะทั้งบนตัวสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ความเข้มข้นเยื่อกระดาษร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนักในจังหวะที่สองที่ขอบของแท่งโลหะทั้งสองมาใกล้กัน กลุ่มของเส้นใยกระดาษจะถูกอัดแน่นและน้ำในกลุ่มเส้นใยจะถูกบีบให้ออกพร้อมกับเส้นใยที่มีขนาดเล็ก

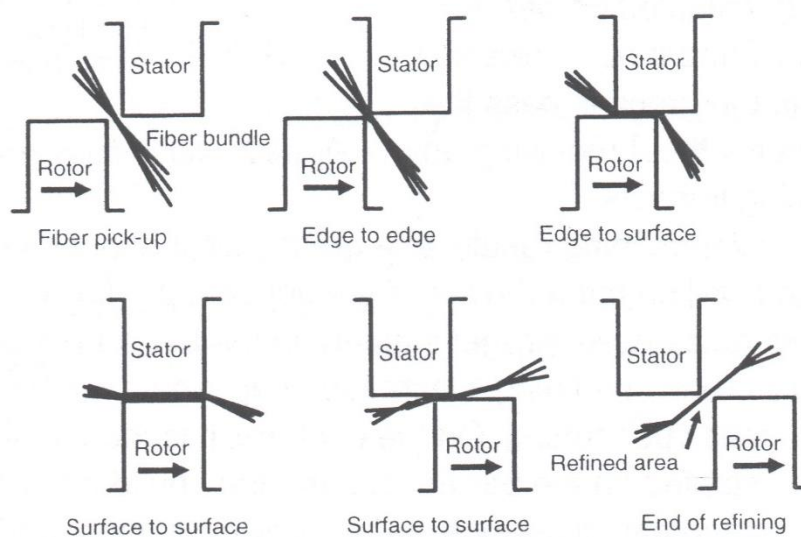
ในจังหวะที่ 3 เป็นจังหวะที่เส้นใยจะเกิดการบิดเนื่องจากกลุ่มเส้นใยที่อยู่ระหว่างขอบของแท่งเหล็กและระนาบเหล็กจะมีชั้นของเส้นใยเพียง 3-4 เส้นเกิดการเบียดเสียดกันเอง โดยเหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นจนกว่าแท่งเหล็กสองอันจะแยกจากกัน [6]



a) สภาพเส้นใยก่อนบิด

b) สภาพเส้นใยหลังบิด

รูปที่ 2 สภาพเส้นใยก่อนบิดและหลังบิด

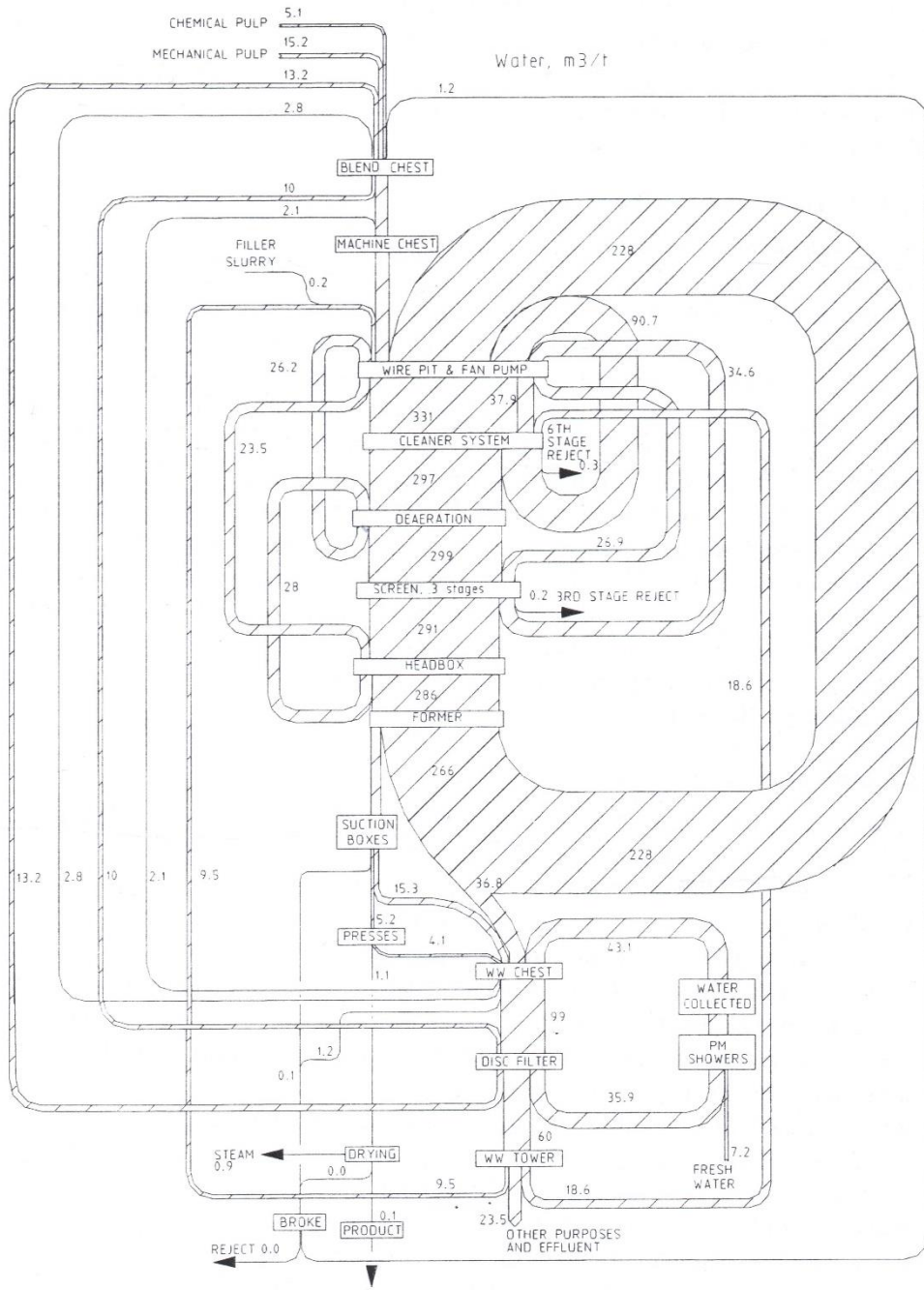


รูปที่ 3 กลไกการบิดเยื่อ

#### 2.2.4 ระบบไหลเวียนเยื่อและน้ำในกระบวนการผลิต

การออกแบบระบบน้ำที่ไหลเวียนในเครื่องผลิตกระดาษจะต้องคำนึงถึงปริมาณเยื่อกระดาษที่เพียงพอและความสม่ำเสมอในการผลิตกระดาษ เนื่องจากการผลิตกระดาษเป็นการผลิตที่ต่อเนื่อง นอกจากนี้การออกแบบระบบการผลิตให้มีประสิทธิภาพ เช่น การจัดการพลังงาน ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม ปริมาณและคุณภาพน้ำที่ใช้ในระบบ ก็เป็นส่วนที่จำเป็นเพื่อบริหารต้นทุนในการผลิตกระดาษ

ระบบน้ำและเยื่อกระดาษในกระบวนการผลิตเป็นจุดตั้งต้นของการออกแบบกระบวนการผลิตใหม่หรือการวิเคราะห์กระบวนการผลิตเดิมในโรงงานกระดาษ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างระบบน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษ น้ำในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่เป็นน้ำหมุนเวียน ปริมาณน้ำหรือเยื่อกระดาษที่เพิ่มในระบบได้แก่ การใส่เยื่อกระดาษและการเติมสารเคมีที่ต้นกระบวนการ และน้ำสะอาดสำหรับล้างตะแกรงที่บริเวณเครื่องผลิตกระดาษ ปริมาณน้ำหรือเยื่อกระดาษที่ลดลงในระบบได้แก่ น้ำที่กำจัดทิ้งหลังจากบริเวณขึ้นแผ่น ใอน้ำจากการอบกระดาษ และผลผลิตกระดาษที่ได้ สำหรับกรณีในรูปจะเห็นว่าการทิ้งน้ำในกระบวนการผลิตมีเพียง 23.5 ตัน ในขณะที่มีน้ำหมุนเวียนในกระบวนการสูงสุด 331 ตัน [6]

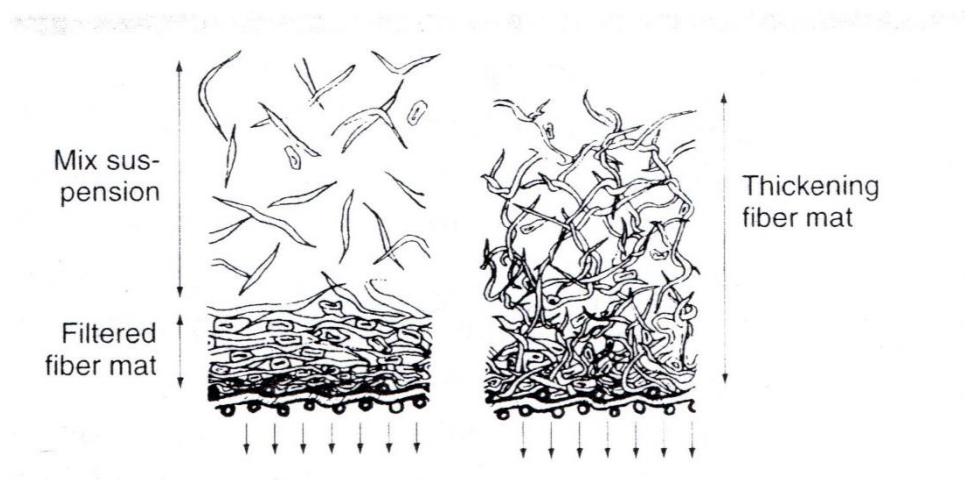


รูปที่ 4 ตัวอย่างระบบน้ำในโรงงานกระดาษ



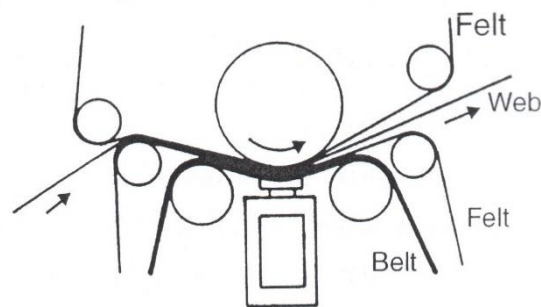
## 2.2.5 การขึ้นรูปกระดาษ (Sheet forming)

เมื่อความเข้มข้นของเส้นใยอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นแผ่นกระดาษแล้ว น้ำเยื่อจะถูกนำมาที่เฮดบ็อกซ์ (HeadBox) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อลงตะแกรง (Wire) ที่ใช้ขึ้นเยื่อกระดาษ (ทั้งนี้ความเข้มข้นของเส้นใยขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องจักรและชนิดของเยื่อกระดาษ) การขึ้นรูปแผ่นกระดาษจะใช้วิธีที่คล้ายกับการกรอง น้ำจะออกจากเส้นใยและสารเติมแต่งให้เหลือปริมาณของแข็งร้อยละ 20 ในขณะที่เส้นใยยังอยู่บนตะแกรง [6] ดังรูปที่ 5



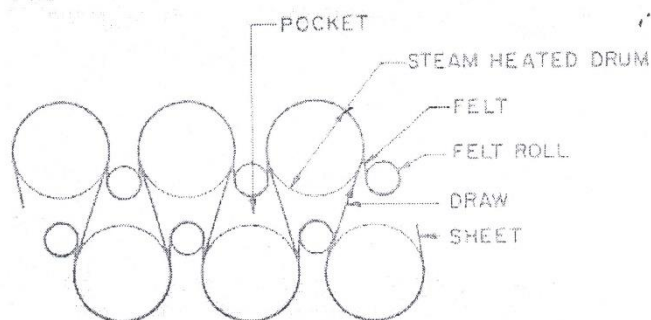
รูปที่ 5 การกรองน้ำออกจากเส้นใยเพื่อขึ้นรูปกระดาษ

จากนั้นแผ่นกระดาษจะถูกส่งต่อไปยังสายพานผ้า (Felt) เพื่อจะนำกระดาษไปกดรีดน้ำออกให้เหลือปริมาณของแข็งร้อยละ 35-45 โดยลูกกลิ้ง [6] ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกดรีดน้ำออกโดยลูกกลิ้ง

เพื่อทำให้กระดาษแห้งสนิท (ความชื้นประมาณร้อยละ 5) กระดาษจะถูกนำไปตามชุดลูกอบ (Dryers) ซึ่งมีความร้อนประมาณ 80 – 120 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดกระดาษที่ผลิตและความเร็วเครื่อง [6] ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การอบกระดาษด้วยลูกอบ

## 2.2.6 การตกแต่งผิวกระดาษ

กระดาษที่ได้จากการขึ้นแผ่นจะนำมาตกแต่งผิวเพื่อความสวยงามตามแต่ละชนิดของกระดาษให้ดูเ้า โดยมีขั้นตอนย่อย ๆ ดังนี้

### 2.2.6.1 การตกแต่งด้วยการเคลือบกระดาษ

วัตถุประสงค์ของสารเคลือบผิว เพื่อให้กระดาษรับหมึกได้ดีขึ้น กระดาษมีสมบัติการขวางกัน กระดาษมีความมันวาว หมึกไม่จมน ผิวหน้ากระดาษแข็งแรง ซึ่งองค์ประกอบของสารเคลือบผิว [7] มีดังนี้

1. สารสี ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 ในสูตรเคลือบ เน้นปรับปรุงสมบัติการรับหมึกของกระดาษ สีสดและความมันวาว ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต โทเทเนียมไดออกไซด์และดินขาว เป็นต้น
2. สารยึด เพื่อยึดสารสีให้ติดกับกระดาษ ซึ่งมีทั้งแบบสังเคราะห์และแบบธรรมชาติ ได้แก่ พอลิเมอร์ แป้ง และโปรตีน เป็นต้น
3. สารเพิ่มความหนืด เพื่อปรับสมบัติการไหล และปรับสภาพการซึมของสารเคลือบลงในผิวกระดาษ
4. สารเติมแต่ง เพื่อช่วยการกระจายสี ช่วยในการหล่อลื่น เพิ่มความขาวสว่าง การกระจายตัวของสารสี ความยืดหยุ่น ลดความเป็นฟอง และกันเชื้อรา
5. น้ำ เพื่อให้สารเคลือบเข้ากัน และกระจายสารสี

### 2.2.6.2 การตกแต่งด้วยหมึกพิมพ์

วัตถุประสงค์ของการพิมพ์คือการตกแต่งผิวกระดาษและการถ่ายทอดข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันหมึกที่ใช้ในอุตสาหกรรมหรือหมึกพิมพ์มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน [8] ดังนี้

1. สารให้สี (colorant) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ
  - สารสี (pigment) เป็นสารสีที่แขวนลอยอยู่ในเนื้อหมึก เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับสีขาว คาร์บอนแบล็กสำหรับสีดำ โครเมียมไดออกไซด์สำหรับสีเขียว แคดเมียมซัลเฟตสำหรับสีเหลือง
  - สีย้อม (dye) เป็นสารสีที่สามารถละลายได้ในหมึก
2. ลื่นน้ำ (varnish) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมให้หมึกสามารถยึดติดกับวัสดุ
3. ตัวทำละลาย (solvent) ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายและปรับความข้นของหมึก
4. สารเติมแต่ง (additive) ทำหน้าที่ปรับสมบัติต่าง ๆ ของหมึกพิมพ์ ได้แก่ สารเพิ่มความสว่างของสี สารที่ทำให้แห้งเร็ว สารลดแรงตึงผิว สารปรับค่าความเป็นกรดและด่าง สารลดฟอง สารป้องกันเชื้อรา สารกันเปียก และกลิ่นต่าง ๆ

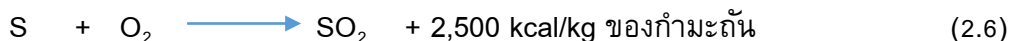
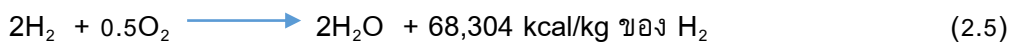
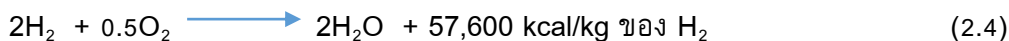
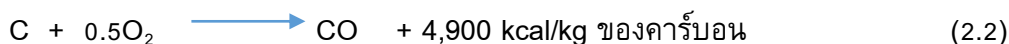
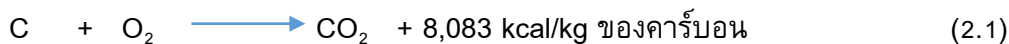
### 2.2.6.3 การตกแต่งผิวกระดาษด้วยวัสดุอื่นๆ

วัสดุประเภทอื่น ๆ ที่ใช้ในการตกแต่งกระดาษสำหรับกระดาษไหว้เจ้า นอกจากสารสีประเภทต่าง ๆ แล้วยังมีการประกอบฟอยล์ จุดประสงค์เพื่อให้กระดาษดูมีความมันวาว

## 2.3 การเผาไหม้

การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้แล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนและแสงสว่างออกมา ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้จากการเผา ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ น้ำ และเถ้า เป็นต้น โดยที่การติดไฟจะประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ เชื้อเพลิง ออกซิเจน และความร้อน [9]

ตัวอย่างปฏิกิริยาการเผาไหม้และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ แสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.6



### ประเภทของสารมลพิษที่ได้จากการเผาไหม้

1. จำพวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีววิทยา ได้แก่ สารปรอท ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม
2. สารมลพิษที่เป็นก๊าซ ได้แก่ ก๊าซพิษต่างๆ เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คลอรีน เป็นต้น

### มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม

ค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมหมายถึง ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำ อากาศ เสียง และสภาวะอื่น ๆ ของสิ่งแวดล้อม กำหนดเป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ซึ่งสำหรับกระดาษให้แล้วแต่ยังไม่มีความมาตรฐานใด ๆ มารองรับ แต่หากจะพิจารณาจากสินค้าที่ใกล้เคียงกัน เช่น วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้กล่าวถึงความสอดคล้องกับ CEN/CR 13695-1 ใ้ว่าปริมาณแคดเมียม ปรอท ตะกั่วและโครเมียมไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [10] และในมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอยมีการกำหนดมาตรฐานการควบคุมการปล่อยโลหะหนัก ได้แก่ สารปรอท และสารแคดเมียมสู่บรรยากาศจากการเผา (ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย, 2553) [11]

นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการเผาต่าง ๆ เช่น มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียงจากแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ซึ่งส่วนใหญ่จะมีการพิจารณาความเป็นมลพิษจาก ปริมาณฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ สารปรอท สารแคดเมียม สารตะกั่ว ค่าสารประกอบไดออกซิน และค่าความทึบแสง

## 2.4 ตัวดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (adsorbate) กับผิวตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนของแข็งโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมัน ตามชนิดของแรงที่ดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับจะสามารถแบ่งการดูดซับออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption) และการดูดซับแบบเคมี (chemisorption) [12]

การดูดซับแบบกายภาพ คือการดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวด้วยแรงกายภาพหนึ่งหรือหลายชนิด ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว เช่น การดูดซับความชื้นของผลึกดูดความชื้นด้วยพันธะไฮโดรเจน แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การกำจัดไอออนแคลเซียม และ ไอออนแมกนีเซียมในน้ำกระด้าง และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น การดูดซับกลิ่นของไอระเหยสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านดูดซับ

การดูดซับแบบเคมี คือการดูดซับที่เกิดพันธะเคมีหรือเกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของผิวของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ การเปรียบเทียบการดูดซับแบบกายภาพและการดูดซับแบบเคมีแสดงดังตารางที่ 3 [13]

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการดูดซับแบบกายภาพและการดูดซับแบบเคมี

การดูดซับแบบกายภาพ	การดูดซับแบบเคมี
เป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้ว แรงดึงดูดระหว่างประจุ หรือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ	เกิดเป็นพันธะเคมี
คายความร้อนน้อยกว่าการดูดซับแบบเคมี 2-3 เท่า	คายความร้อนมากกว่าการดูดซับแบบกายภาพ 2-3 เท่า
ไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน (multilayer)	จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารดูดซับที่ซ้อนทับกันเพียงหนึ่งชั้นเท่านั้น (monolayer)
ดูดซับได้ดีในอุณหภูมิต่ำ	มีความสามารถในการดูดซับได้ดีในทุกอุณหภูมิ
เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว ไม่ต้องใช้พลังงานกระตุ้น แต่อาจเกิดการคาย	ต้องมีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดการดูดซับ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ไม่มีการคายตัว
ไม่มีการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ	มีการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างตัวดูดซับและสารดูดซับ

### 2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแสดงถึงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ แบบจำลองการดูดซับมีหลายรูปแบบดังนี้

ก) สมดุลดูดซับของเหลวแบบเฮนรี (Henry adsorption isotherm)

สมดุลดูดซับของเหลวแบบเฮนรีจะมีลักษณะการดูดซับที่มีปริมาณสารถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย เช่น ไอออนโลหะในน้ำ หรือความชื้นในน้ำมัน สมดุลสารดูดซับจำเพาะแปรผันตรงกับความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลว ดังสมการ 2.7

$$q = K'_H C \quad (2.7)$$

เมื่อ  $q$  หมายถึง ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K'_H$  หมายถึง ค่าคงที่สมดุลดูดซับเฮนรี

$C$  หมายถึง ความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

ข) สมดุลดูดซับของเหลวแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมดุลดูดซับของเหลวแบบแลงมัวร์มีลักษณะโค้งคว่ำ ภายใต้สมมติฐานคือ โมเลกุลเพียงหนึ่งโมเลกุลถูกดูดซับในบริเวณที่แน่นอนของพื้นผิวของสารดูดซับ โดยพื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และพลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ ดังสมการ 2.8

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_0} + \frac{1}{b q_0} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $C_e$  หมายถึง ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_e$  หมายถึง ปริมาณตัวถูกละลายที่โดนดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$b$  หมายถึง ค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ

$q_0$  หมายถึง ปริมาณตัวถูกละลายสูงสุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสาร ( $q_e$ ) จากสมการ 2.9

$$q_e = V \frac{(C_0 - C_e)}{W} \quad (2.9)$$

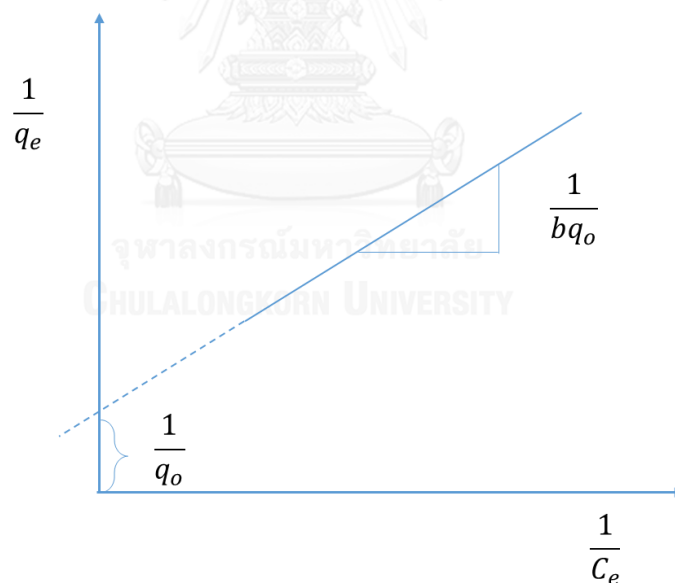
เมื่อ  $C_0$  หมายถึง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  หมายถึง ความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$V$  หมายถึง ปริมาตรของสารละลายของสารถูกดูดซับ (ลิตร)

$W$  หมายถึง น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

สามารถเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q_e}$  และ  $\frac{1}{C_e}$  จะมีความชัน  $\frac{1}{bq_0}$  และจุดตัดแกน  $y$  คือ  $\frac{1}{q_0}$  ดังรูปที่ 8 และดังสมการ 2.10



รูปที่ 8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_0}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right) \left(\frac{1}{bq_0}\right) \quad (2.10)$$



ค) สมดุลดูดซับของเหลวแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

แบบจำลองสมดุลแบบฟรุนดิชสามารถประยุกต์กับสมดุลดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือโค้งหงาย ซึ่งใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ตามสมการ 2.11

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2.11)$$

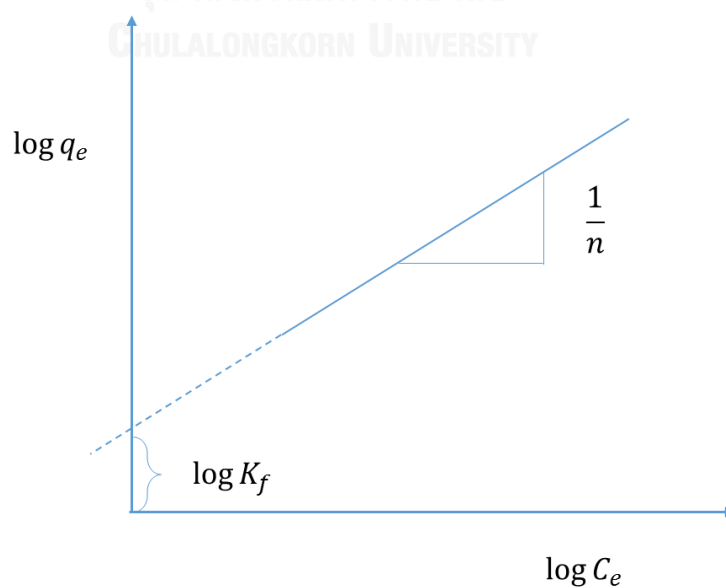
เมื่อ  $K_f$  หมายถึง ค่าคงที่ดูดซับของเหลวของฟรุนดิช

$n$  หมายถึง ดัชนีกำลัง มีค่ามากกว่า 1 เสมอ

สามารถเขียนสมการในรูปของล็อกกอริทึม สมการ 2.12

$$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (2.12)$$

กราฟระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะมีความชัน  $\frac{1}{n}$  และจุดตัดแกน  $y$  คือ  $\log K_f$   
ดัง รูปที่ 9



รูปที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช

#### 2.4.2 จลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

อัตราเร็วปฏิกิริยาสามารถอธิบายด้วยจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง ดังสมการ 2.13

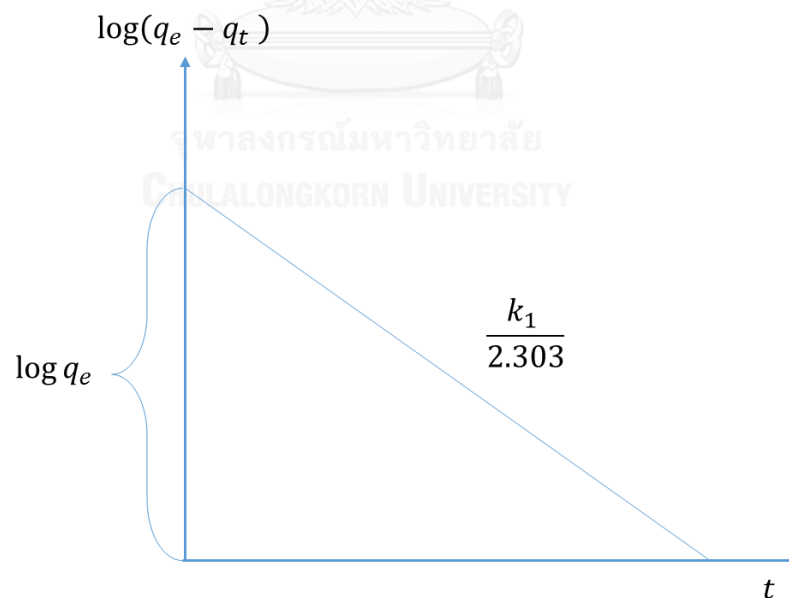
$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $q_t$  หมายถึง ความสามารถในการดูดซับสารถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับ ณ เวลา  $t$

$t$  หมายถึง ระยะเวลาการดูดซับ

$k_1$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (มิลลิกรัมต่อนาที)

และเขียนกราฟ ดังรูปที่ 10



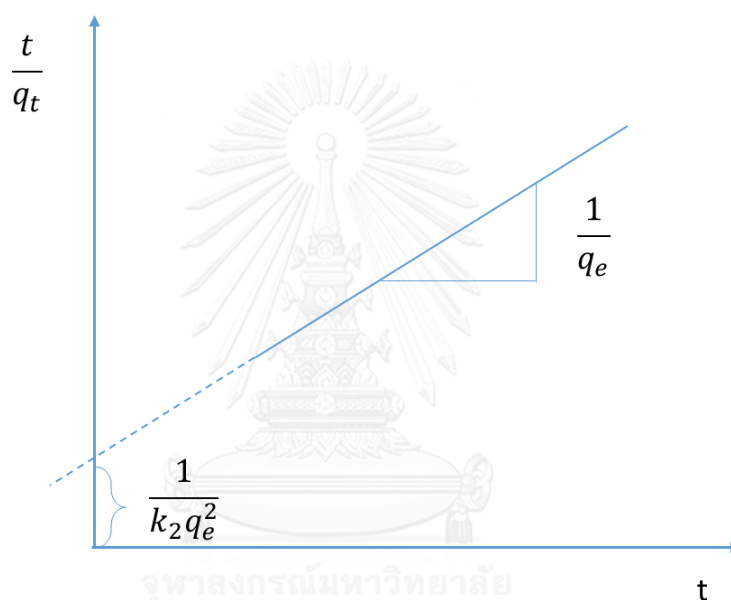
รูปที่ 10 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง ดังสมการ 2.14

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $k_2$  หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

และเขียนกราฟ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

### 2.4.3 ความร้อนการดูดซับ (Adsorption thermodynamic)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่แปรผันกลับได้ เมื่ออัตราการดูดซับสารดูดซับเท่ากับ อัตราการคายสารดูดซับของตัวดูดซับ ขณะนั้นระบบดูดซับจะมีค่าพลังงานกิบส์น้อยที่สุด (Gibbs' energy) ในระบบ สารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ และหมุนรอบตัวเองได้อย่างอิสระ เมื่อ สารถูกดูดซับถูกดูดติดที่ผิวตัวดูดซับ อิสระของการเคลื่อนที่ก็จะลดน้อยลง พลังงานเอนโทรปี (Entropy) ของสารถูกดูดซับจึงลดน้อยลง ซึ่งพลังงานเอนโทรปีจะแปรผันไปตามอุณหภูมิอีกด้วย

พลังงานเอนทัลปี (Enthalpy) หรือพลังงานรวมทั้งหมดของระบบคือผลรวมของพลังงานกิบส์ และพลังงานเอนโทรปีของระบบ การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับแสดงดังสมการ 2.15

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.15)$$

เมื่อ  $dH$  หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของพลังงานเอนทัลปี

$dG$  หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของพลังงานกิบส์

$T$  หมายถึง อุณหภูมิขณะใดขณะหนึ่ง

$dS$  หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของพลังงานเอนโทรปี

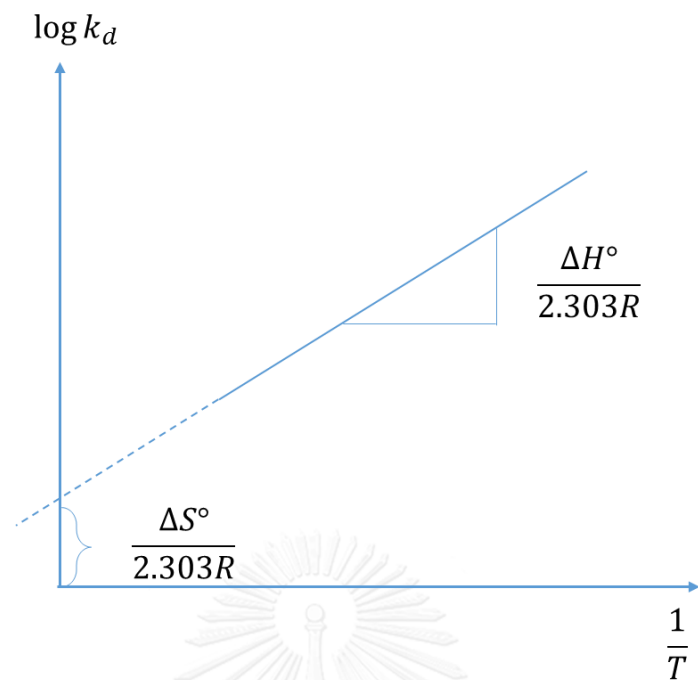
สามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ในรูปล็อกการิทึม ได้ดังสมการ 2.16 และ 2.17

$$\log k_d = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (2.16)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (2.17)$$

เมื่อ  $R$  หมายถึง ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol/K)

$K_d$  หมายถึง สัดส่วนระหว่างปริมาณตัวถูกละลายที่โดนดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และความเข้มข้นของสารดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) ( $a_e/C_e$ ) และเขียนกราฟ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความร้อนการดูดซับ (Adsorption thermodynamic)

กระบวนการดูดซับใดๆ ที่มีค่าพลังงานกิบส์เป็นค่าติดลบหมายถึงกระบวนการดูดซับดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เสมออย่างเป็นธรรมชาติ เมื่อพลังงานกิบส์เป็นค่าบวก หมายถึงกระบวนการดังกล่าวจะเป็นกระบวนการผันกลับหรือเป็นกระบวนการคายสารถูกดูดซับ และเมื่อพลังงานกิบส์เป็นศูนย์ หมายถึงกระบวนการนั้นๆ อยู่ในภาวะสมดุลอยู่แล้ว จะไม่เกิดการดูดซับหรือการคายตัวของสารถูกดูดซับ [14] ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าบวก/ลบของเอนทัลปี เอนโทรปี และกิบส์ต่อรูปแบบการเกิดปฏิกิริยา

พลังงานเอนทัลปี (dH)	พลังงานเอนโทรปี (dS)	พลังงานกิบส์	ลักษณะของ กระบวนการ
บวก	บวก	เป็นบวก/ลบ ขึ้นกับ อุณหภูมิ	กระบวนการดูดซับ สามารถเกิดได้เมื่อ อุณหภูมิสูงพอ
ลบ	บวก	เป็นลบเสมอ	กระบวนการดูดซับเกิดขึ้น เสมอ
ลบ	ลบ	เป็นบวก/ลบ ขึ้นกับ อุณหภูมิ	กระบวนการดูดซับ สามารถเกิดได้เมื่อ อุณหภูมิต่ำพอ
บวก	ลบ	เป็นบวกเสมอ	ไม่เกิดกระบวนการดูดซับ ใดๆ

## 2.5 ดิน หิน แร่ และมอนต์โมริลโลไนต์

ดิน หมายถึงวัตถุในธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลก เกิดจากการแปรสภาพของหินแร่ธาตุและอินทรีย์วัตถุ ดินมีส่วนประกอบ 4 ส่วน ได้แก่ อนินทรีย์สาร (ได้แก่ หิน ททราย) อินทรีย์สาร (เช่น ซากพืช ซากสัตว์ที่สลายตัว) น้ำ และ อากาศ

ดินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

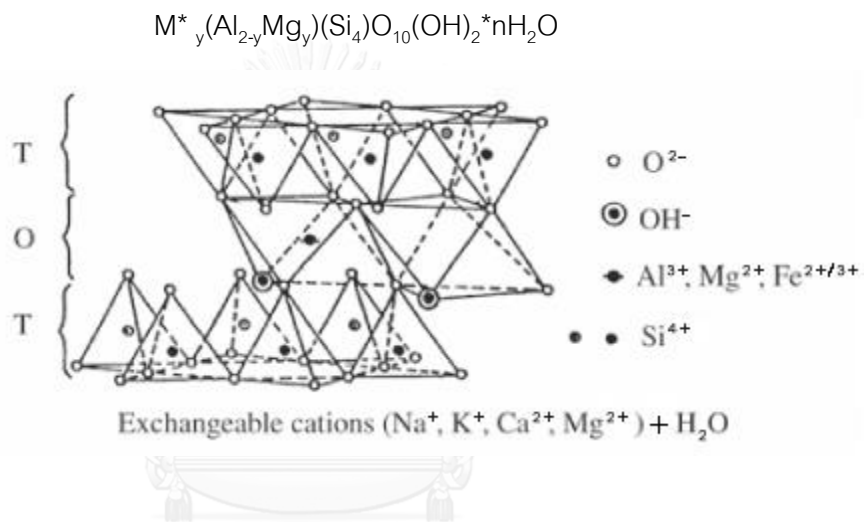
1. ดินเหนียว (Clay) คือดินที่มีเนื้อละเอียดที่สุด เหนียวติดมือเมื่อเปียกน้ำ สามารถปั้นเป็นก้อนได้
2. ดินทราย (Sand) คือดินที่เกาะตัวกันไม่แน่น ระบายน้ำและอากาศดีมาก
3. ดินร่วน (Loam) คือ ดินที่มีเนื้อค่อนข้างละเอียด เหมาะสำหรับการเพาะปลูก

แรมมอนต์โมริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่ง โดยลักษณะของดินเหนียวคือมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.001-0.004 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวสูง เช่น ในแร่ดินสเมคไทต์ 1 กรัมจะมีพื้นที่ผิวประมาณ 800 ตารางเมตร และพลังงานไฟฟ้าบนพื้นผิวซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบ สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite group) กลุ่มแร่สเมกไทต์ (Smectite group) กลุ่มแร่อีไลท์ (Illite group) และกลุ่มแร่คอลลอยท์ โดยที่แต่ละกลุ่มมีชั้นในโครงสร้างต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แร่ดินเหนียวกลุ่มต่างๆ

ชื่อกลุ่ม	ได้แก่	หมายเหตุ
กลุ่มแร่เคโอลิไนต์	เคโอลิไนต์ ดิกโคต และแนคโคท	สูตรโมเลกุลโดยทั่วไปคือ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
กลุ่มแร่สเมกไทต์	มอนต์โมริลโลไนต์ ไพโรฟิล ไรท์ ทัลก์ เวอร์มิคูไลท์ แซพ โพไนต์ นอนโทรไนต์	สูตรโมเลกุลโดยทั่วไปคือ $(Ca,Na,H)(Al,Mg,Fe,Zn)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_{2x}H_2O$
กลุ่มแร่อีไลท์	อีไลท์	สูตรโมเลกุลโดยทั่วไปคือ $(K,H)Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_{2x}H_2O$
กลุ่มแร่คอลลอยท์	คาโมไซต์	

แร่มอนต์โมริลโลไนต์ อยู่ในกลุ่มกลุ่มแร่สเมกไทต์ โครงสร้างมีลักษณะเป็นแผ่นเล็กๆ ซ้อนกัน ในหนึ่งชั้นหินของแร่มอนต์โมริลโลไนต์ จะประกอบไปด้วยระนาบของของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 1 ชั้น (Aluminum oxide/Hydroxide layer) ขนาบข้างด้วยระนาบของซิลิเกต (Silicate layer) เป็นโครงสร้าง 2:1 ตามรูปที่ 13 [15] โดยบางตำแหน่งในโครงสร้างหลักของแร่มอนต์โมริลโลไนต์ อะตอมของอลูมิเนียม (Al) จะถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม (Mg) ดังนั้นแร่มอนต์โมริลโลไนต์ จึงมีสูตรโมเลกุลดังนี้คือ [16]



รูปที่ 13 โครงสร้างของแร่มอนต์โมริลโลไนต์ (T: tetrahedral sheet; O: octahedral sheet)

ส่วนใหญ่แล้วแร่สเมกไทต์ มักมีตำหนิจากการแทนที่ด้วยประจุบวกในชั้น คือ การที่บางตำแหน่งของอลูมิเนียมในแร่มอนต์โมริลโลไนต์ อาจจะถูกแทนที่ด้วยแคลเซียม โซเดียม เหล็กหรือแมกนีเซียม ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในช่วงที่แร่มอนต์โมริลโลไนต์ก่อตัว ทำให้เกิดประจุลบเหลือในระหว่างชั้น ดังนั้นธรรมชาติของมอนต์โมริลโลไนต์ เป็นประจุลบ และการแทนที่ด้วยประจุลบ คือ การที่บางตำแหน่งของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ถูกแทนที่ด้วยฟลูออไรด์ ( $\text{F}^-$ )



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเผากระดาษไหว้เจ้าทั่วไปก่อให้เกิดก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกทั้งยังมีควันและเขม่า ทั้งนี้เนื่องจากกระดาษไหว้เจ้าจะมีการตกแต่งด้วยหมึกพิมพ์ กาว สีย้อม และสารเคมีต่างๆ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษในกระดาษไหว้เจ้า โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นพิษของการเผากระดาษไหว้เจ้า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งาน โดยจะหาค่าโลหะหนักและความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้กระดาษไหว้เจ้า และวิเคราะห์วัตถุติดเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นพิษ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพกระดาษไหว้เจ้าให้เป็นมิตรต่อมนุษย์ มีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผากระดาษไหว้เจ้าดังนี้

DerLin และคณะ [17] ศึกษาควันที่ได้จากการเผากระดาษไหว้เจ้า โดยทดลองหาค่าฝุ่นละอองในอากาศและค่าพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbon-PAH) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่สองวงขึ้นไปในการเผากระดาษไหว้เจ้าในช่วงเทศกาลสำคัญในวัด Ling-Sing ที่ประเทศไต้หวัน ศึกษาโดยเก็บค่าจากการเผากระดาษไหว้เจ้าในเวลาปกติช่วงที่ไม่มีมีการเผาและช่วงเทศกาลไหว้เจ้า Zhong Yuan Jie ในบริเวณวัดที่มีการเผากระดาษไหว้เจ้าแบบไม่มีเตาเผาและนอกบริเวณวัด ซึ่งบริเวณรอบวัดไม่มีแหล่งกำเนิดค่าฝุ่นละอองและ PAH ที่สำคัญเช่น โรงงาน หรือรถยนต์ เป็นต้น โดยอากาศที่เก็บในแต่ละส่วนนั้นสกัดโดยวิธีซอกซ์เลทสำหรับทั้งก๊าซและฝุ่นละอองและทดสอบด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟีสำหรับการทดสอบก๊าซ

จากการเก็บข้อมูลพบว่าค่าฝุ่นละอองสูงสุดในช่วงเทศกาลที่ได้จากการเผากระดาษไหว้เจ้าภายในวัดเท่ากับ 582 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและภายนอกวัดเท่ากับ 346 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (150-230 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และยังพบว่าปริมาณความเข้มข้นของค่าฝุ่นละอองในช่วงเทศกาลมีมากกว่าช่วงที่ไม่ใช่เทศกาลถึง 4.2 เท่า

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PAH สูงสุดในช่วงเทศกาลที่ได้จากการเผากระดาษไหว้เจ้าภายในวัดเท่ากับ 2684 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและภายนอกวัดเท่ากับ 1885 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ PAH ในรูปก๊าซ (g-PAH) มีจำนวนมากกว่า PAH ในรูปของแข็ง (s-PAH) ซึ่งหมายความว่าค่า PAH ที่ได้จากการเผากระดาษไหว้เจ้าส่วนมากอยู่ในรูปของ g-PAH นอกจากนี้งานวิจัยยังสรุปได้อีกว่าการเผากระดาษไหว้เจ้าในที่โล่งทำให้เกิดค่าฝุ่นละอองและ PAH มากกว่าการเผากระดาษไหว้เจ้าในเตาเผาอีกด้วย

Tsan และคณะ [18] ได้ศึกษาสาร PCDD/F (Polychlorinated dibenzo-p-dioxin/dibenzofuran) และ TEQ (toxic equivalent quantity) ที่เกิดขึ้นจากเตาเผากระดาษไหว้เจ้าที่มีการติดตั้งระบบควบคุมคุณภาพอากาศ เปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาเผาก่อนและหลังติดตั้งระบบสครับเบอร์ งานวิจัยได้ศึกษาที่วัดแห่งหนึ่งซึ่งสร้างตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 ทางตอนใต้ของประเทศ อุณหภูมิภายในเตาขณะเผาสูงสุด 420 องศาเซลเซียส จากนั้นติดตั้งระบบสครับเบอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำจัดก๊าซและไอตลอดจนอนุภาคที่มีขนาดเล็กโดยใช้ของเหลว กระดาษไหว้เจ้าที่ใช้ในการวิจัยเป็นกระดาษไหว้เจ้าประเภทที่ผลิตจากกระดาษรีไซเคิลที่มีองค์ประกอบของความชื้น ชี้อัด คอลรีน และส่วนที่เผาไหม้ร้อยละ 8.08 4.69 0.093 และ 87.2 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าค่า PCDD/F และ TEQ หลังการติดตั้งระบบสครับเบอร์มีค่าลดลงถึงร้อยละ 24.5 และ 36.7 ตามลำดับ

Yang และคณะ [19] ได้ศึกษาการปล่อยสาร PAH เข้าสู่ชั้นบรรยากาศโดยเปรียบเทียบผลจากการเผากระดาษไหว้เจ้า 2 ประเภท ได้แก่ กระดาษไหว้เจ้าจากกระดาษรีไซเคิล และกระดาษไหว้เจ้าจากกระดาษเยื่อไม้ไผ่ เตาเผาที่ใช้เพื่อเป็นตัวอย่างในการศึกษามีทั้งหมด 2 เตาที่เหมือนกัน และอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันในวัดเดียวกัน เตาแรกเป็นเตาที่มีอุปกรณ์ควบคุมมลพิษในอากาศคือไซโคลน (Cyclone) และเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber) โดยทั้งสองอุปกรณ์นี้จะติดตั้งต่อเนื่องกันเข้ากับเตาเผาในวัด ส่วนเตาเผาที่สองนั้นไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมมลพิษใดๆ งานวิจัยทำการทดลองตั้งแต่เดือนมกราคมถึง เดือนเมษายน ปีค. 2004 โดยการเก็บค่าฝุ่นละอองและค่า PAH จากการเผาจริงในวัด ผลการศึกษาพบว่ากระดาษไหว้เจ้าที่ผลิตจากเยื่อไม้ไผ่มีค่า PAH และค่าฝุ่นละอองต่ำกว่ากระดาษไหว้เจ้าที่ทำจากกระดาษรีไซเคิล และเตาเผาที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษในอากาศสามารถลดค่าฝุ่นละอองในอากาศและ PAH ลงร้อยละ 42.5 และ 11.7 ตามลำดับ และในช่วงที่ความเร็วลมสูงมีค่า PAH ต่ำกว่าช่วงที่ความเร็วลมต่ำ

ในงานวิจัยได้ศึกษาวัตถุที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้า พบว่าแหล่งที่มาของความชื้นคือตะกั่วและซัลไฟด์นั้นล้วนมาจากการสะสมของสารดังกล่าวในน้ำล้างเยื่อกระดาษที่เป็นระบบปิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jidong และ คณะ [20] ที่พบว่ามักมีสารละลายหรือไอออนโลหะหนักต่างๆ สะสมอยู่ในน้ำตามจำนวนครั้งที่นำน้ำมาใช้ใหม่ ผลการวิจัยของน้ำที่ใช้ในโรงงานกระดาษประเภทที่เป็นระบบปิดเพื่อหาปริมาณสารละลายและคอลลอยด์ (dissolved and colloidal substances: DCS) ที่สะสมอยู่ในน้ำที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกระดาษที่ผลิตได้ ได้พบว่าค่า DCS เพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของน้ำที่นำมาใช้ใหม่ ปริมาณคอลลอยด์และสารละลายลิกนินเป็นสิ่งที่ปะปนในน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษมากที่สุด ในขณะที่อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al^{3+}$ )

เป็นไอออนโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในน้ำจำนวนมากที่สุดโดยมากกว่าไอออนโลหะอื่นๆ ถึง 20 เท่า ดังนั้นหากสามารถจัดการระบบน้ำให้มีความสะอาดมากขึ้นก็จะสามารถกำจัดความเป็นพิษในควันของกระดาษให้เข้าได้โดยไม่ต้องหาวัตถุดิบทดแทน โดยตัวดูดซับที่นำมาใช้กำจัดสารพิษในกระบวนการผลิตกระดาษสำหรับกระดาษให้เข้าคือ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ซึ่งเป็นแร่ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี

Bhattacharyya และคณะ [21] ทำการศึกษาเรื่องการดูดซับไอออนโลหะหนักในสารละลายได้แก่ สารหนู แคดเมียม โครเมียม โคบอล ดีบุก เหล็ก ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสี โดยใช้ดินขาวและแร่มอนต์มอริลโลไนต์ทำการดัดแปร การดัดแปรใช้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการร่วมระหว่างการสอดแทรก (Intercalation) ของไอออนโลหะในโครงสร้างระหว่างชั้นของออร์แกนอเคลย์และวิธีฟิลลาร์ (Pillaring) โดยไอออนโลหะ และวิธีการดัดแปรด้วยกรด การกำจัดไอออนโลหะมีหลายวิธีเช่นการตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออนโลหะ การสกัดด้วยตัวทำละลาย รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) และการดูดซับ เป็นต้น โดยงานวิจัยครั้งนี้เลือกวิธีการกำจัดไอออนโลหะในสารละลายโดยวิธีการดูดซับเนื่องจากได้พิจารณาจากความคุ้มค่าในการลงทุน การใช้งานง่าย สามารถใช้ได้ทั้งในกระบวนการต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ในงานวิจัยเพื่อกำจัดไอออนตะกั่ว สารละลายที่ใช้ในการทดลองได้เตรียมสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อแรมดัดแปร 1 กรัม ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.4 เมื่อทดลองแล้วได้ข้อสรุปว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรและดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักดีกว่าดินขาวที่ดัดแปรและไม่ดัดแปร นอกจากนี้ปริมาณการดูดซับยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และความสามารถของการดูดซับของประเภทของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรยังขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนโลหะที่ดูดซับอีกด้วย

Mambrini และคณะ [16] ทำการวิจัยเพื่อกำจัดสารประกอบซัลไฟด์และไนโตรเจนโดยดินขาวที่ผ่านกระบวนการดัดแปร โดยนำดินขาวที่มีธาตุเหล็กปริมาณต่างๆ กันจำนวน 500 มิลลิกรัม แช่และเขย่าในสารละลายเฟอร์ริกไนเตรต ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นอบผงดินขาวที่ได้ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ในกระบวนการดูดซับนำดินขาวแต่ละชนิดสัมผัสกับสารละลายไดเบนโซไทโอเฟน (dibenzothiophene) ผลการทดลองจากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) พบว่าดินขาวดัดแปรสามารถกำจัดซัลไฟด์ออกจากสารละลาย (qe) ได้มากที่สุดคือ 54.5 mg/g การดัดแปรดินขาวทำให้ดินขาวมีความเกลียดน้ำและมีความเป็นขี้ผึ้งมากขึ้นเนื่องจากการยึดเกาะของไอออนเหล็กทำให้สามารถกำจัดดินขาวออกหลังการใช้งานได้สะดวกขึ้น

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrometer เพื่อหาปริมาณโลหะหนักในกระดาศและซีไ้ถ้ำกระดาศ
2. เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O ANALYZER: PE2400 SeriesII Perkin Elmer, USA เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในกระดาศและซีไ้ถ้ำกระดาศ
3. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer, AAnalyst 200 Perkin Elmer, USA เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว
4. เครื่องขึ้นแผ่น Sheetformer รุ่น RK-2AKWT Rapid Kothen, PTI, Austria
5. เครื่องบดเยื่อ Lab valley beater รุ่น UEC-2018 Universal Engineering Corporation, India
6. เครื่องตีกระจายเยื่อกระดาศ Laboratory Disintegrator รุ่น T-100 FORMAX, USA
7. เครื่องวัดค่า freeness รุ่น CF/A REGMED, Brazil
8. พีเอชมิเตอร์ (pH meter) รุ่น 701 A Orion Research Inc., USA
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก: PJ3600 Diethelm, Thailand
10. เครื่องชั่งสาร: PG1003-S Mettler Toledo, USA
11. เต้าไฟฟ้าหัว 1 หัวเต้า: HW-HP01 houseworth, Thailand
12. เครื่องเขย่าสาร (Orbital Shaker): OS-10 Biosan, Latvia
13. เครื่องกวนสายละลายพร้อมฮอตเพลท (Magnetic Stirrer) IKA C-MAG HS7, China
14. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven): Venticell, Medcenter Einrichtungen GmbH, Germany
15. เต้าเผาความร้อนสูง (Electric Muffle Furnace): EF11/8B Lenton, United Kingdom
16. กระดาศกรอง whatman เบอร์ 93 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร, Whatman
17. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น DOA-P504-BN GAST, USA
18. ครูซีเปิล

19. โถป้องกันความชื้น

20. เครื่องแก้วต่างๆ

### 3.2 วัสดุและสารเคมีสำหรับการวิจัย

1. แร่มอนต์โมริลโลไนต์ จากบริษัท บัลลังค์สธรณ์ จำกัด
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์: Sodium Hydroxide (NaOH), Lab grade, Merck KGaA, Germany
3. กรดไฮโดรคลอริก: Hydrochloric acid fuming 37%, Lab grade, Merck KGaA, Germany
4. โซเดียมซัลเฟต: Sodium Sulphate anhydrous ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Lab grade, Ajax Finechem Pty Ltd, New Zealand
5. แบเรียมคลอไรด์: Barium Chloride ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Lab grade, Ajax Finechem Pty Ltd, New Zealand
6. เลดไนเตรด: ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Lab grade, Ajax Finechem Pty Ltd, New Zealand
7. เยื่อในเส้น: เยื่อยูคริลิปตัสฟอกขาว จาก บริษัท ฟินิกซ์ พัลพ แอนด์ เพเพอร์ จำกัด (มหาชน)
8. เยื่อใยยาว: เยื่อสนผสมฟอกขาว จาก บ. Crofton ประเทศแคนาดา

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การศึกษาตลาดกระดาษไหว้เจ้า

สำรวจตลาดกระดาษไหว้เจ้าซึ่งมีร้านขายส่งใหญ่อยู่บนถนนเยาวราช กรุงเทพมหานคร เพื่อหาข้อมูลของผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าที่จำหน่าย สุ่มซื้อสินค้าเพื่อนำมาทดสอบความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้า สำหรับข้อมูลร้อยละของปริมาณการใช้กระดาษไหว้เจ้าแต่ละชนิดได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ฮวงฮั้ว จำกัด

#### 3.3.2 การวิเคราะห์ความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้าและแหล่งที่มาของความเป็นพิษ

3.3.2.1 นำกระดาษไหว้เจ้าที่สุ่มตัวอย่างจากขั้นตอนที่ 3.3.1 มาวิเคราะห์ตรวจสอบโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้า ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท และแคดเมียม โดยใช้เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer และวิเคราะห์ธาตุ C H N S ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของกระดาษไหว้เจ้าที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย โดยพิจารณาจากความเป็นพิษสูงและปริมาณการใช้งานสูงเพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.2.2 นำกระดาษไหว้เจ้าที่เลือกมาจากข้อ 3.3.2.1 มาเผาและนำเถ้าไปวิเคราะห์ ตรวจสอบโลหะหนักโดยวิธี AAS อีกครั้งเพื่อศึกษาว่าความเป็นพิษในกระดาษจะคงเหลือในเถ้า หรือจะออกไปกับควันที่เกิดจากการเผา ดังรูปที่ 14



(ก) ก่อนการเผา

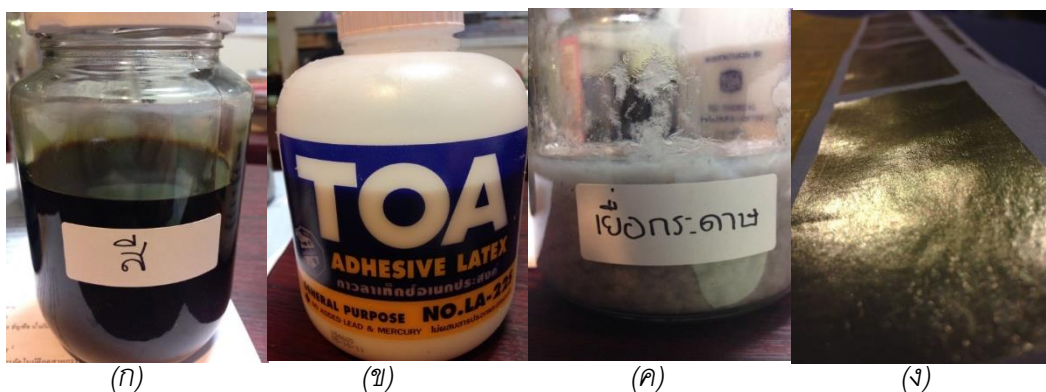


(ข) หลังการเผา

รูปที่ 14 การเตรียมกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว (ก) ก่อนการเผา และ (ข) หลังการเผาเพื่อวิเคราะห์ตะกั่ว

3.3.2.3 นำวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้า อาทิ เยื่อกระดาษ กาว สี และฟอยล์ มาตรวจสอบโลหะหนักโดยวิธี AAS เพื่อหาสาเหตุของความเป็นพิษในกระดาษดังรูปที่

15



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 15 วัตถุดิบในการผลิตกระดาษกิมจั้ว ได้แก่ (ก) สี (ข) กาว (ค) เยื่อกระดาษ และ (ง) ฟอยล์ ตามลำดับ

### 3.3.3 การศึกษาเพื่อลดความเป็นพิษ

เนื่องจากการทดลองขั้นที่ 3.3.2 พบว่าความเป็นพิษเกิดจากการที่ระบบน้ำที่หมุนเวียนในเครื่องผลิตกระดาษเป็นระบบปิด ทำให้เกิดการสะสมของสารพิษที่อาจปนเปื้อนมากับเยื่อกระดาษบางล๊อต ในขั้นตอนที่ 3.3.3 จึงทดลองใช้ตัวดูดซับ คือ มอนต์โมริลโลไนต์ เพื่อดูดซับสารพิษ โดยทำการทดลองดังนี้

- ก) การทดสอบปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์
- ข) การทดสอบเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์
- ค) การทดสอบเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์
- ง) การทดสอบเพื่อหาจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์
- จ) การทดสอบเพื่อหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและ/หรือซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

การศึกษาวิจัยเพื่อกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์แบ่งออกตามหัวข้อ ก) ถึง จ) ทำการทดสอบ ดังนี้

#### การทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์

1. การทดลองตามหัวข้อ ก) การทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณต่างๆ กันคือ 0.035 0.07 0.105 0.14 0.175 0.21 0.245 0.28 0.315 และ 0.35 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
2. การทดลองตามหัวข้อ ข) และ ง) การทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.07 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 60 90 120 150 180 210 240 270 และ 300 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
3. การทดลองตามหัวข้อ ค) การทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.07 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กันคือ 1 5 10 20 30 40

- 50 60 70 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
4. การทดลองตามหัวข้อ จ) การทดลองกำจัดตะกั่วโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร โดยกำหนดความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ กันคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องปั่นรักษาอุณหภูมิเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ที่อุณหภูมิต่างๆ 303 308 313 318 และ 323 K
  5. นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นตะกั่วที่หลงเหลืออยู่โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

#### การทดสอบเพื่อกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์

1. การทดลองตามหัวข้อ ก) ทดลองกำจัดซัลไฟด์โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณต่างๆ กันคือ 0.035 0.07 0.105 0.14 0.175 และ 0.21 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
2. การทดลองตามหัวข้อ ข) และ ง) ทดลองกำจัดซัลไฟด์โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.07 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
3. การทดลองตามหัวข้อ ค) ทดลองกำจัดซัลไฟด์โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.07 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นต่างๆ กันคือ 200 400 600 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
4. การทดลองตามหัวข้อ จ) ทดลองกำจัดซัลไฟด์โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.07 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นต่างๆ กันคือ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องปั่นรักษาอุณหภูมิเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ที่อุณหภูมิต่างๆ 303 308 313 318 และ 323K



5. ตกตะกอนซัลเฟตในรูปของแบเรียมซัลเฟตเพื่อหาค่าความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตที่จุดสมมูลตามวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตในสารตัวอย่างโดยการตกตะกอนในรูปแบเรียมซัลเฟตและชั่งน้ำหนักดังต่อไปนี้
  - i. ล้างและอบครุชชีเบลขนาดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพักในโถป้องกันความชื้นเป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการชั่งและจดน้ำหนักไว้
  - ii. ทำการอบครุชชีเบลซ้ำอีก จนกว่าจะได้น้ำหนักครุชชีเบลที่คงที่ (ต่างกันไม่เกิน 0.002 กรัม)
  - iii. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 25 มิลลิกรัมลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร และหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 20 หยด ทั้งนี้เพื่อป้องกันการตกตะกอนร่วมของ  $BaCO_3$ ,  $Ba(PO_4)_2$  และ  $Ba(OH)_2$
  - iv. ต้มสารละลายตัวอย่างจนเดือด จากนั้นเติมน้ำสารละลายแบเรียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 15 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้จนตกตะกอน จากนั้นจึงหยดสารละลายแบเรียมคลอไรด์เพื่อทดสอบการตกตะกอนสมบูรณ์หรือไม่
  - v. อุ่นสารละลายตัวอย่าง (ระวังไม่ให้เดือด) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้กระจกนาฬิกาปิดไว้
  - vi. ยกปิ๊กเกอร์สารละลายตัวอย่างลง ล้างกระจกนาฬิกาด้วยน้ำกลั่นที่ปิดปิ๊กเกอร์โดยใช้น้ำกลั่นฉีดให้สารละลายลงมารวมกับสารละลายในปิ๊กเกอร์
  - vii. กรองตะกอนโดยใช้ชุดสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 4
  - viii. นำกระดาษกรองใส่ครุชชีเบลที่น้ำหนักคงที่แล้ว จากนั้นนำครุชชีเบลใส่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
  - ix. ชั่งน้ำหนักครุชชีเบลเพื่อหาน้ำหนักตะกอนของแบเรียมซัลเฟต จากนั้นจึงคำนวณย้อนกลับมาเพื่อหาปริมาณซัลเฟตและซัลไฟด์ในสารละลาย

#### การทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายโดยมอนต์โมริลโลไนต์

1. การทดลองตามหัวข้อ ก) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณต่างๆ กันคือ 0.05 0.1 0.15 0.2 และ 0.25 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K

2. การทดลองตามหัวข้อ ข) และ ง) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.1 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
3. การทดลองตามหัวข้อ จ) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายโดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 1 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องปั่นรักษาอุณหภูมิเป็นเวลา 60 นาที กำหนดสารละลายให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ที่อุณหภูมิต่างๆ 303 308 313 318 และ 323 K
4. นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นตะกั่วที่หลงเหลืออยู่โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และตกตะกอนซัลเฟตในรูปของแบเรียมซัลเฟตเพื่อหาค่าความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตที่จุดสมดุล

#### การทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายโดยมอนต์โมริลโลไนต์ในน้ำเยื่อกระดาษ

1. การทดลอง ก) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณต่างๆ กันคือ 0.05 0.1 0.15 0.2 และ 0.25 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 60 นาที กำหนดน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
2. การทดลอง ข) และ ง) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.1 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 นาที กำหนดน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 และอุณหภูมิ 298 K
3. การทดลอง จ) ทดลองกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% โดยใช้สารดูดซับแรมมอนต์โมริลโลไนต์ ที่ปริมาณ 0.1 กรัม โดยกำหนดความเข้มข้นของซัลไฟด์เริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าด้วย

เครื่องปั่นรักษาอุณหภูมิเป็นเวลา 60 นาที กำหนดน้ำเยื่อกระดาษ 0.3% ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ที่อุณหภูมิต่าง 303 308 313 318 และ 323 K

4. นำน้ำในเยื่อกระดาษตัวอย่างที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นตะกั่วที่หลงเหลืออยู่โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และทำการตกตะกอนซัลเฟตในรูปของแบเรียมซัลเฟตเพื่อหาค่าความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตในน้ำเยื่อที่จุดสมดุล

### 3.3.4 การทดลองใช้มอนต์โมริลโลไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ

การทดลองใช้กระดาษน้ำหนักมาตรฐาน 400 กรัมต่อตารางเมตร โดยขึ้นรูปกระดาษจากน้ำเยื่อที่ปนเปื้อนตะกั่วและซัลไฟด์ที่ทดลองใช้และไม่ใช้มอนต์โมริลโลไนต์ในการลดสารพิษ จากนั้นแบ่งส่วนตัวอย่างไปเผาเพื่อหาตะกั่วและซัลไฟด์ในกระดาษอีกด้วย ตัวอย่างกระดาษและซีเถ้าที่นำไปทดสอบหาตะกั่วและซัลไฟด์มีดังนี้

- กระดาษที่ปนเปื้อนสารพิษ
- ซีเถ้ากระดาษที่ปนเปื้อนสารพิษ
- กระดาษที่ปนเปื้อนสารพิษ แต่มีการกำจัดโดยมอนต์โมริลโลไนต์
- ซีเถ้ากระดาษที่ปนเปื้อนสารพิษแต่มีการกำจัดโดยมอนต์โมริลโลไนต์

ในการขึ้นแผ่นกระดาษ โดยใช้มอนต์โมริลโลไนต์ในการลดตะกั่วและซัลไฟด์ที่ปนเปื้อนในกระดาษ มีขั้นตอนดังนี้

#### 3.3.4.1 เตรียมเยื่อกระดาษ

แช่เยื่อกระดาษน้ำหนัก 360 กรัม แบ่งเป็นเยื่อใยสั้นร้อยละ 60 และเยื่อใยยาวร้อยละ 40 ในน้ำ 3 ลิตร พร้อมจำลองการปนเปื้อนตะกั่วและซัลไฟด์โดยเติมเลดไนเตรต 5.76 กรัม (มีตะกั่ว 10 กรัมต่อกระดาษ 1 กิโลกรัม) และโซเดียมซัลเฟต 15.9 กรัม (มีซัลไฟด์ 10 กรัมต่อกระดาษ 1 กิโลกรัม) เป็นเวลา 1 คืน

#### 3.3.4.2 แช่เยื่อกระดาษด้วยมอนต์โมริลโลไนต์

นำเยื่อกระดาษจากขั้นตอน 3.3.4.1 ไปตีกระจายด้วยเครื่องตีกระจาย (Disintegrator) 20,000 รอบ จากนั้นเติมน้ำ 20 กิโลกรัมเพื่อบดด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) เป็นเวลา 90 นาที เมื่อบดเยื่อเสร็จแล้วแบ่งเยื่อออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปขึ้นแผ่นต่อตามขั้นตอนที่ 3.3.4.3

อีกส่วนหนึ่งนำไปกำจัดสารพิษ โดยนำมอดโมริลไอไนต์ 150 กรัม ใส่ในถุงผ้าที่มีการเย็บมิดชิดไป แช่ในน้ำเยื่อกระดาษที่มีการปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 3.3.4.3 ขึ้นแผ่นและเผากระดาษ และการหาปริมาณตะกั่วและซัลไฟด์ในกระดาษ

ขึ้นแผ่นกระดาษด้วยเครื่องขึ้นแผ่น (Sheet Former) ที่น้ำหนักมาตรฐาน 400 กรัมต่อตารางเมตร ให้ได้กระดาษที่ปั่นเปื้อนสารพิษที่ได้และไม่ได้ทำการกำจัดพิษด้วยมอดโมริลไอไนต์ อย่างน้อยอย่างละ 42 แผ่น จากนั้นแบ่งกระดาษทั้งสองชนิดออกเป็น 2 กอง กองแรกมี 7 แผ่นเพื่อนำไปตรวจสอบหาสารพิษในกระดาษ และกองที่สองมี 35 แผ่นเพื่อนำไปเผาและทดสอบหาสารพิษในซีเถ้า ด้วยเครื่อง Flame Atomic Adsorption Spectrometer และ CHNS/O ANALYZER: PE2400 SeriesII Perkin Elmer, USA



## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการสำรวจตลาดกระดาษไหว้เจ้า

จากการสำรวจประเภทของกระดาษไหว้เจ้าที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย โดยสำรวจตลาดกระดาษไหว้เจ้าจากร้านขายขนาดใหญ่ที่เป็นตัวแทนการจำหน่ายกระดาษไหว้เจ้าทั้งที่ขายภายในประเทศและที่ส่งออกต่างประเทศ ซึ่งตั้งอยู่บนถนนเยาวราช จังหวัดกรุงเทพมหานคร จำนวน 4 ร้านค้าใหญ่ โดยมีผลการสำรวจแสดงดังตารางที่ 6 พบว่า กระดาษไหว้เจ้าที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายมี 4 ประเภท เรียงตามลำดับสัดส่วนร้อยละการซื้อของผู้บริโภค ดังนี้

ตัวกิมซึ่งใช้ประกอบพิธีกรรมสำหรับทำความเคารพไหว้ต่อเทพเจ้า บรรพบุรุษ และเจ้าที่เจ้าทาง มีปริมาณการซื้อของผู้บริโภคคิดเทียบเป็นร้อยละ 28 ของปริมาณการซื้อกระดาษไหว้เจ้าทั้งหมดของผู้บริโภค


กิมจั่วซึ่งใช้ประกอบพิธีกรรมการไหว้บรรพบุรุษที่ล่วงลับ เนื่องจากกิมจั่วเปรียบเสมือนเป็นใบเบิกทางสำหรับบรรพบุรุษในการเดินทางท่องเที่ยวไปในที่ต่าง ๆ มีสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภคคิดเทียบเป็นร้อยละ 22 ของปริมาณการซื้อกระดาษไหว้เจ้าทั้งหมดของผู้บริโภค

เทียนเก้าอี้ซึ่งใช้ประกอบพิธีกรรมสำหรับทำความเคารพไหว้ต่อเทพเจ้าเพื่อขอพรต่าง ๆ มีสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภคคิดเทียบเป็นร้อยละ 19 ของปริมาณการซื้อกระดาษไหว้เจ้าทั้งหมดของผู้บริโภค

เตี๋ยซึ่งใช้ประกอบพิธีกรรมสำหรับทำความเคารพไหว้ต่อเทพเจ้าและเจ้าที่ เพื่อขอพรต่าง ๆ มีสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภคคิดเทียบเป็นร้อยละ 15 ของปริมาณการซื้อกระดาษไหว้เจ้าทั้งหมดของผู้บริโภค

นอกนั้นจะเป็นกระดาษไหว้เจ้าประเภทอื่น ๆ เช่น ทองแท่ง กิมตุ้ง อั้งจี้ กิมเต้า เป็นต้น คิดรวมสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภคประมาณร้อยละ 16 ของปริมาณการซื้อกระดาษไหว้เจ้าทั้งหมดของผู้บริโภค

ตารางที่ 6 ประเภทของกระดาษไหว้เจ้า และสัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภค

ประเภท กระดาษไหว้เจ้า	รูป	การใช้งาน	สัดส่วนปริมาณ การซื้อของ ผู้บริโภค (ร้อยละ)
ตัวกิม		ใช้พับและประกอบให้เป็นรูป น้ำเต้าทรงกระบอกหรือรูปเรือเพื่อ ไหว้เทพเจ้า บรรพบุรุษ และเจ้าที่	28
กิมจั่ว		ใช้พับและประกอบขึ้นเพื่อไหว้เป็น ใบเบิกทางสำหรับบรรพบุรุษ	22
เทียนเต่าไข่		ใช้ปูเพื่อประดับตกแต่งโต๊ะบูชา สำหรับไหว้เทพเจ้า	19
เตี้ย		ใช้สำหรับทำพิธีในการไหว้เทพเจ้า แก้บน และเจ้าที่	15
อื่นๆ		ใช้ไหว้บรรพบุรุษและเทพเจ้าต่างๆ	16

จากผลสำรวจข้างต้น จึงได้เลือกกระดาษไหว้เจ้าที่ได้รับความนิยมสูงสุด 4 ประเภทแรก  
เพื่อทำการสุ่มกระดาษไหว้เจ้าทั้ง 4 ประเภทนี้จากร้านค้าตัวแทนจำหน่ายหนึ่งในสี่รายใหญ่ของ  
ประเทศ โดยเลือกกระดาษไหว้เจ้าแต่ละชนิดที่ผลิตจากบริษัท ฮวงฮั่ว จำกัด เพื่อวิเคราะห์  
ตรวจสอบโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้า ดังแสดงผลการศึกษาในตอนต่อไป

## 4.2 การวิเคราะห์ความเป็นพิษของกระดาศไขหัวเจ้าและแหล่งที่มาของความเป็นพิษ

### 4.2.1 ความเป็นพิษของกระดาศไขหัวเจ้า

เมื่อทำการสุ่มกระดาศไขหัวเจ้าที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย 4 ประเภทแล้ว นำมาวิเคราะห์ตรวจสอบโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาศไขหัวเจ้า ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท และแคดเมียม เนื่องจากข้อกำหนดเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและวัสดุสัมผัสสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไปจะต้องมีการทดสอบโลหะทั้ง 3 ชนิดนี้ [10] ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาศไขหัวเจ้า

ประเภทกระดาศไขหัวเจ้า	สัดส่วนปริมาณการซื้อของผู้บริโภค (ร้อยละ)	ความเข้มข้นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาศไขหัวเจ้า (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
		ตะกั่ว	ปรอท	แคดเมียม
ตัวกิม	28	0.68	ไม่พบ	ไม่พบ
กิมจั่ว	22	2.80	ไม่พบ	0.07
เทียนถ้ำจี้	19	0.76	ไม่พบ	0.03
เตี้ย	15	0.52	ไม่พบ	ไม่พบ
อื่นๆ ได้แก่ทองแท่งและกิมตุ้ง	16	1.40	ไม่พบ	ไม่พบ

ผลการการวิเคราะห์โลหะหนักที่ปนเปื้อนในกระดาศไขหัวเจ้า พบว่า กระดาศไขหัวเจ้าทุกชนิดไม่มีการปนเปื้อนด้วยปรอท แต่กระดาศไขหัวเจ้าประเภทกิมจั่วและเทียนถ้ำจี้มีการปนเปื้อนด้วยแคดเมียมปริมาณ 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่กระดาศไขหัวเจ้าประเภทตัวกิม เตี้ย และประเภทอื่น ๆ ไม่พบการปนเปื้อนของแคดเมียม แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ากระดาศไขหัวเจ้าทุกประเภทจะมีการปนเปื้อนของตะกั่ว เรียงตามลำดับ ดังนี้

กิมจั่วมีการปนเปื้อนของตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือกระดาษประเภทอื่นๆ มีการปนเปื้อนของตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 1.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตั๋วกิม เทียน ถ่านจี้ และเตี้ย มีการปนเปื้อนของตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.68 0.76 และ 0.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าโลหะที่ปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้าประเภทต่าง ๆ คือ ตะกั่ว อีกทั้งยังเป็นโลหะปนเปื้อนที่มีระดับความเข้มข้นสูงสุดในการปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้า จึงทำการเลือกที่จะศึกษาที่มาของตะกั่วในวัตถุบิตต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตกระดาษไหว้เจ้า ประเภทกิมจั่ว ดังแสดงผลการศึกษาในตอนต่อไป

#### 4.2.2 แหล่งที่มาของความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้า

หลังจากศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าประเภทต่างๆ จึงเน้นศึกษาการลดปริมาณโลหะตะกั่วในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั่ว เนื่องจากกิมจั่วมีส่วนปริมาณในตลาดเท่ากับร้อยละ 22 และมีปริมาณตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยหาปริมาณตะกั่วในวัตถุบิตที่ใช้ในการผลิตกระดาษไหว้เจ้าได้แก่ เยื่อกระดาษ อลูมิเนียม สี และ กาว พร้อมทั้งหาปริมาณโลหะหนักในซีเ็กจากการเผากิมจั่ว ดังแสดงตามตารางที่ 8



ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว

วัตถุดิบ	ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบ สำหรับผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม )
สีเคลือบพอยล์	0
สีเคลือบกระดาษ	0
กาวติดพอยล์	0
เยื่อกระดาษ	1.3
ลวดอลูมิเนียม	0

จากผลการวิเคราะห์นี้ จึงทำให้ทราบถึงแหล่งที่มาของตะกั่วที่ปนเปื้อนในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว โดยพบว่า ไม่มีตะกั่วปนเปื้อนในสีเคลือบพอยล์ สีเคลือบกระดาษไหว้เจ้า กาวติดพอยล์ และลวดอลูมิเนียม ในขณะที่มีตะกั่วที่ปนเปื้อนในเยื่อกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วที่มีระดับความเข้มข้นของตะกั่วในเยื่อกระดาษประมาณ 1.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พบการปนเปื้อนของตะกั่วในกระดาษไหว้เจ้าประเภทต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิจัยขั้นตอน 4.2

นอกจากนี้ เมื่อพบว่าตะกั่วปนเปื้อนผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว จึงวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วก่อนและหลังเผากระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว โดยอุณหภูมิเผาเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส และนำเอาที่ได้จากการเผากระดาษกิมจั้วทั้งหมดไปทดสอบหาปริมาณตะกั่วโดยเครื่อง AAS แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วก่อนการเผา  
และหลังการเผา

ผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว	ปริมาณตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
ก่อนการเผา	2.8
หลังการเผา	0

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ตะกั่วปนเปื้อนผลิตภัณฑ์กระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วมีระดับความเข้มข้นประมาณ 2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเผากระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วแล้ว นำเถ้าที่ได้จากการเผาไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในเถ้า กลับพบว่า ไม่มีตะกั่วหลงเหลือในเถ้ากระดาษหลังการเผาไหม้ แสดงให้ทราบว่า การเผาไหม้กระดาษไหว้เจ้ามีผลทำให้ตะกั่วในกระดาษไหว้เจ้าเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของควัน

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบซัลไฟด์ในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วและเยื่อกระดาษที่ใช้ทำกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลไฟด์โดยการสุ่ม 3 ครั้ง ได้ผลดังปรากฏผลในตารางที่ 10 พบว่า กระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วมีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1.58 ซึ่งหากนำกระดาษไหว้เจ้าไปเผา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม ไม่พบซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว ทั้งนี้คาดว่ากระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วที่ตรวจพบซัลไฟด์นั้นอาจมาจากเยื่อกระดาษที่ปนเปื้อนซัลไฟด์ ส่วนเยื่อกระดาษที่ทำการสุ่มตรวจซัลไฟด์ในล๊อตนี้ ไม่พบการปนเปื้อนซัลไฟด์ จึงกล่าวได้ว่าการปนเปื้อนของซัลไฟด์จะพบในบางล๊อตของเยื่อกระดาษเท่านั้น เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการผลิตกระดาษสำหรับการผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วเป็นน้ำที่หมุนเวียนในระบบปิด ซึ่งใช้วนตลอดเวลา และการผลิตกระดาษจะเป็นแบบ acid paper making ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเท่ากับ 4.6 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่ตะกั่วละลายน้ำได้ดี ดังนั้นตะกั่วจะละลายจากเยื่อกระดาษและถูกสะสมอยู่ในน้ำ หากเยื่อกระดาษล๊อตใดที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วหรือซัลไฟด์ย่อมส่งผลให้น้ำในระบบปิดสะสมตะกั่วหรือซัลไฟด์ในน้ำ

มากขึ้น แล้วนำไปสู่การปนเปื้อนในเยื่อกระดาษลีดอื่น ๆ ต่อไป น้ำในระบบปิดนี้ไม่มีการถ่ายออกจากระบบ มีแต่การเติมน้ำใหม่เข้าไปในระบบเพื่อรักษาระดับน้ำในระบบให้คงที่เท่านั้น

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้วและเยื่อกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว

ส่วนประกอบ	ร้อยละของส่วนประกอบในกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว	ร้อยละของส่วนประกอบในเยื่อกระดาษที่ใช้ผลิตกระดาษไหว้เจ้าประเภทกิมจั้ว
C	37.89	38.55
H	6.09	5.48
N	-	0
S	1.58	0
Al	35.53	-
เถ้าและอื่น ๆ	19	56.01
<b>รวม</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

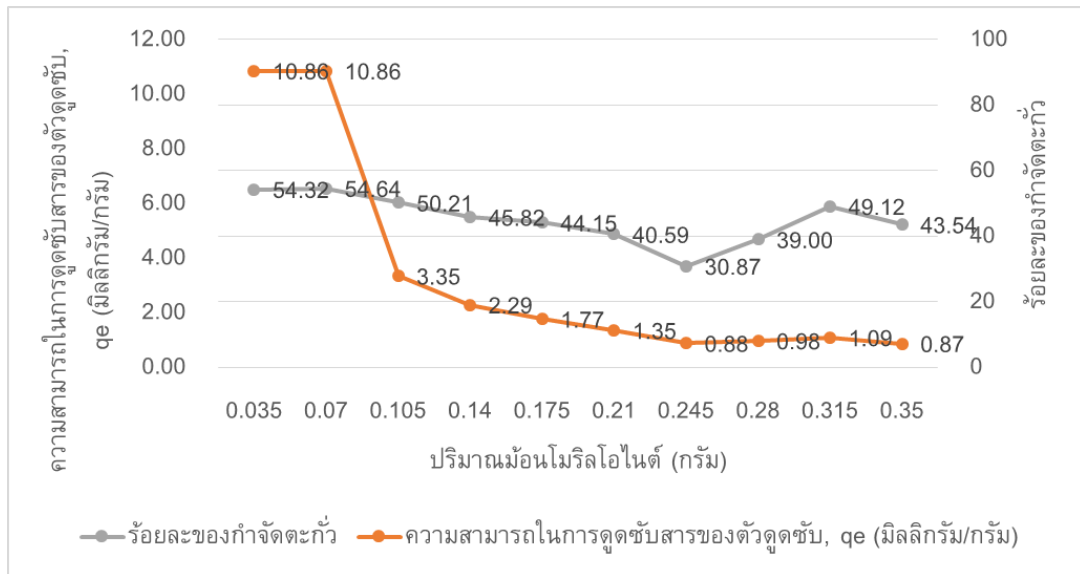
จากเหตุผลข้างต้น จึงกล่าวได้ว่า แหล่งการปนเปื้อนของตะกั่วและสารประกอบซัลเฟตในกระดาษไหว้เจ้ามาจากวัตถุดิบเยื่อกระดาษ และสะสมอยู่ในน้ำที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ จึงทำให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่วและซัลไฟด์สู่เยื่อกระดาษลีดอื่นต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงศึกษาการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ออกจากน้ำที่หมุนเวียนในระบบนี้โดยการดูดซับบนแรมอนต์โมริลไลไนต์ ดังแสดงในผลการทดลองตอนต่อไป

#### 4.3 การศึกษาเพื่อลดความเป็นพิษโดยการกำจัดตะกั่วหรือ/และซัลไฟด์ในสารละลายด้วยการดูดซับบนแรมอนต์โมริลโลไนต์

งานวิจัยเลือกใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์ ซึ่งเป็นแร่ที่มีสมบัติการดูดซับที่ดีในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำ โดยการทดลองแบ่งเป็นการดูดซับตะกั่วในสารละลาย การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ และการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษความเข้มข้น ร้อยละ 0.3 ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว/ซัลไฟด์ต่างๆ เวลาในการกำจัดต่างๆ ปริมาณแรมอนต์โมริลโลไนต์ ต่างๆ และอุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาผลของเวลาและปริมาณแรมอนต์โมริลโลไนต์ ต่อความสามารถในการดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วหรือซัลไฟด์บนแรมอนต์โมริลโลไนต์

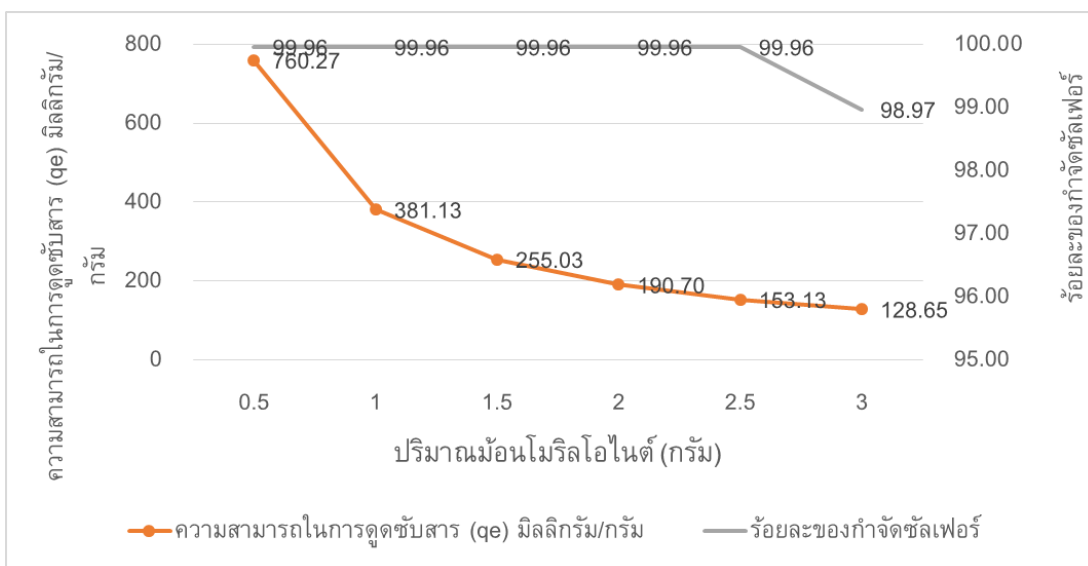
##### 4.3.1 ปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์บนมอนต์โมริลโลไนต์

ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0.035 0.07 0.105 0.14 0.175 0.21 0.245 0.28 0.315 และ 0.35 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 16 ความสามารถในการดูดซับสารสูงสุดที่ 5.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและร้อยละการกำจัดตะกั่วเท่ากับ 54.64 ที่ปริมาณแรมอนต์โมริลโลไนต์ 0.07 กรัม ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ปริมาณตัวดูดซับตั้งแต่ 0.035 จนถึง 0.21 กรัม เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่อปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ (qe) และร้อยละการกำจัดตะกั่ว ลดลง แต่เมื่อตัวดูดซับในสารละลายมีปริมาณ 0.245 จนถึง 0.35 กรัม เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่อปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ (qe) และร้อยละการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือการแทรกแซงระหว่างบริเวณที่เกิดการดูดซับ เป็นต้น



รูปที่ 16 ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6

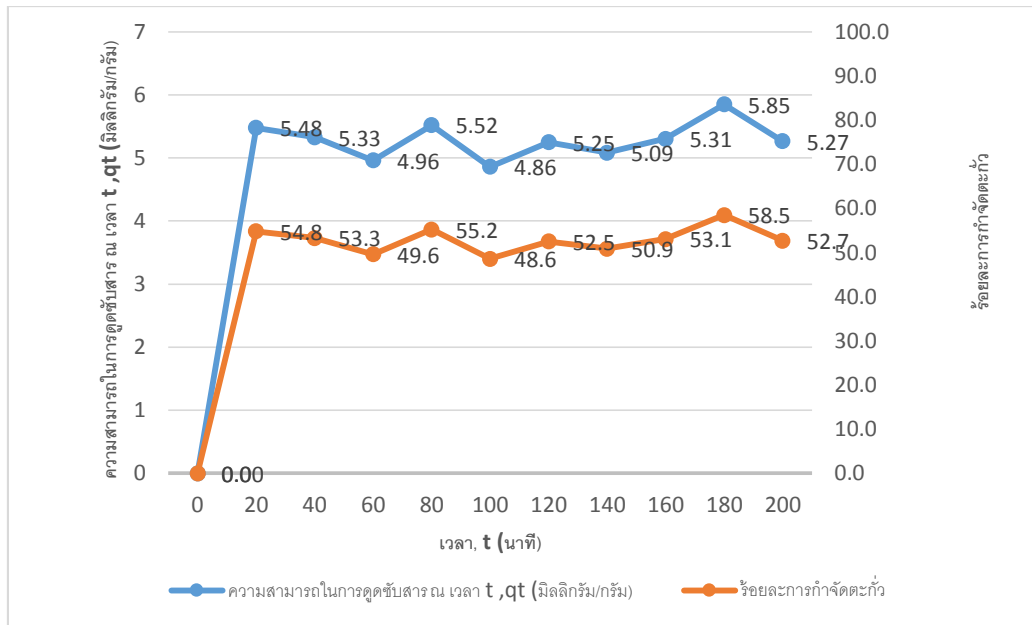
ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ใช้แอมอนิอัมไฮดรอกไซด์ปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0.035 0.07 0.105 0.14 0.175 และ 0.21 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 17 ความสามารถในการดูดซับสารสูงสุดที่ 760.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และร้อยละการก้ำจัดซัลไฟด์เท่ากับ 96.49 ที่ปริมาณมอนิโรริลไอไนต์ 0.07 กรัม ในช่วงปริมาณการดูดซับ 0.035 ถึง 0.21 กรัม เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ต่อปริมาณมอนิโรริลไอไนต์ (qe) จะลดลง แต่ร้อยละการก้ำจัดซัลไฟด์มากขึ้น



รูปที่ 17 ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ต่อแรมอนต์โมริลไลไนต์เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6

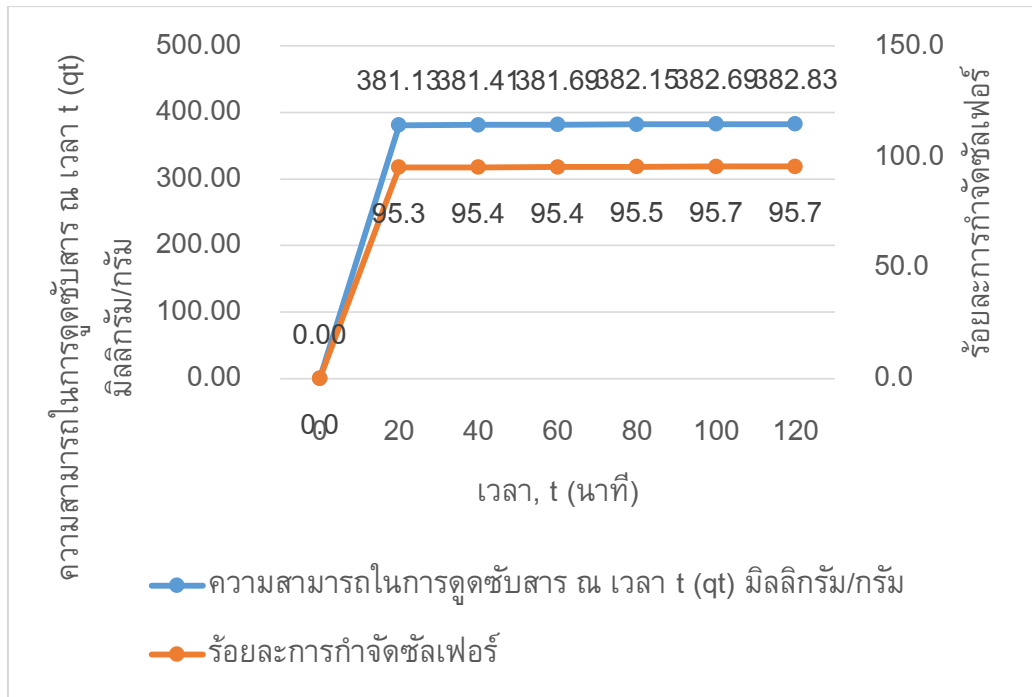
#### 4.3.2 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลไลไนต์

ผลของเวลาในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ใช้แรมอนต์โมริลไลไนต์ปริมาณ 0.07 กรัม เวลาในการดูดซับ 20 40 60 80 100 120 140 160 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 18 ความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับตะกั่ว (qe) สูงสุดที่ 5.85 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 200 นาที และมีร้อยละการกำจัดตะกั่วสูงสุดที่ 58.5 ที่เวลา 180 นาที นอกจากนี้กราฟยังแสดงให้เห็นว่าภายในเวลา 20 นาทีแรกอัตราการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการกำจัดค่อยๆ เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 18 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกัว โดยใช้ใช้แรมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.035 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6

ผลของเวลาในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย เมื่อใช้สารละลายซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิตร ใช้แรมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.07 กรัม เวลาในการดูดซับ 20 40 60 80 100 และ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 19 ความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับซัลไฟด์สูงสุดที่ 382.83 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 120 นาที และมีร้อยละการกำจัดซัลไฟด์สูงสุดที่ 95.7 ตั้งแต่เวลาที่ 120 จนถึง 200 นอกจากนี้กราฟยังแสดงให้เห็นว่าภายในเวลา 20 นาทีแรกอัตราการกำจัดซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการกำจัดค่อยๆ เพิ่มขึ้น



รูปที่ 19 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ใช้แรมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.07 กรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6

ดังนั้นจากการทดลองผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอริลโลไนต์พบว่าภายในเวลา 20 นาทีเป็นเวลาที่เพียงพอสำหรับสารดูดซับที่ใช้ในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์แล้ว

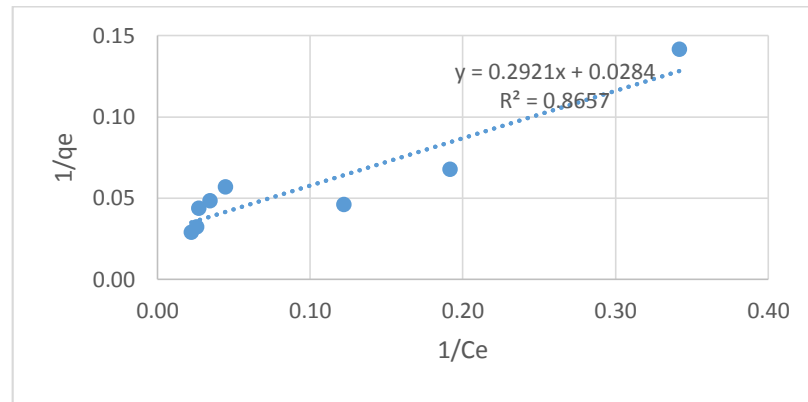


#### 4.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

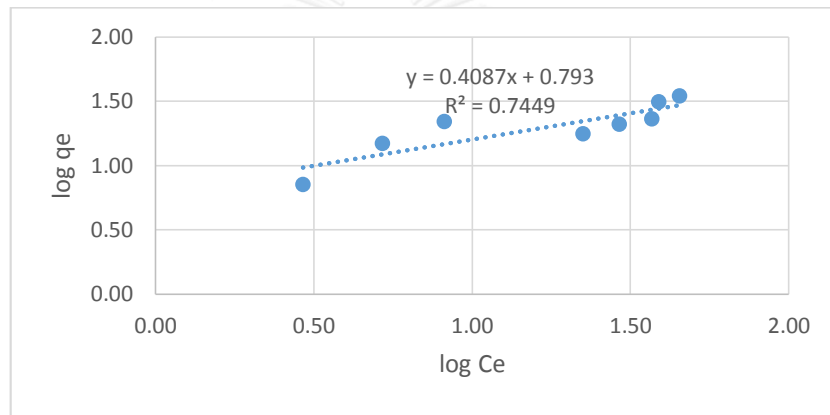
การหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมเพื่อหาสมมุติฐานที่เหมาะสมในการดูดซับสารตะกั่ว/ซัลไฟด์บนมอนต์โมริลโลไนต์ รูปแบบของแบบจำลองที่สอดคล้องกับกระบวนการดูดซับของผลการทดลองสามารถอ้างอิงได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วในสารละลาย การทดลองใช้สารละลายตะกั่ว เริ่มต้น 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แร่มอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.07 กรัม เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 20 ดังนี้





(a)

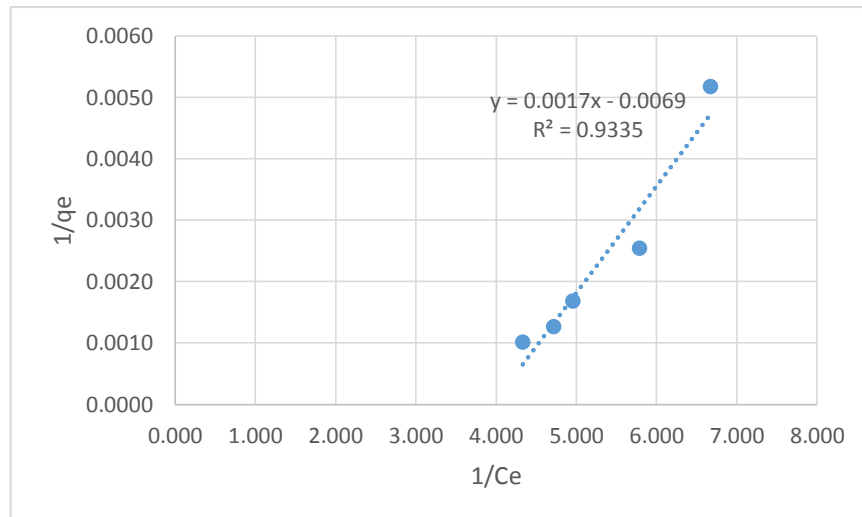


(b)

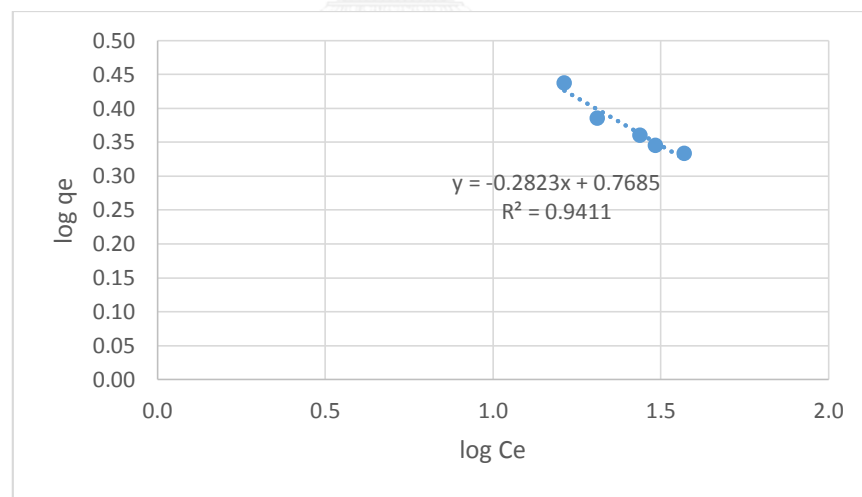
รูปที่ 20 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของมอนต์โมริลโลไนต์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 (a) สมดุลดูดซับแบบแลงมัวร์ (b)

สมดุลดูดซับแบบฟรุนดิช

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย การทดลองใช้สารละลายซัลไฟด์ เริ่มต้น 200 400 600 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แร่มอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.07 กรัม เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 21 ดังนี้



(a)



(b)

รูปที่ 21 ไอโซเทอมการดูดซับซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 60 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.6 (a) สมดุลดูดซับแบบแลงมัวร์ (b)

สมดุลดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากกราฟรูปที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของการดูดซับของมีค่าเท่ากับ 0.865 และ 0.745 ตามลำดับ ในขณะที่กราฟรูปที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) จากการดูดซับเท่ากับ 0.934 และ 0.941 ตามลำดับ พบว่ารูปแบบการดูดซับตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์ มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบแลงมัวร์มากกว่าการดูดซับแบบฟรุนดิช ส่วนการดูดซับซัลไฟด์ โดยมอนต์โมริลโลไนต์มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่า ซึ่งทำให้สรุปได้ว่า กระบวนการดูดซับตะกั่วน่าจะเป็นการดูดซับแบบผกกลับได้ และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ในขณะที่การดูดซับซัลไฟด์ไม่เพียงแต่เป็นการดูดซับหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ หากแต่ยังเป็นการดูดซับเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับอีกด้วย

ตารางที่ 11 ความชันและจุดตัดแกนของกราฟการหาสมมูลการดูดซับจาก

รูปที่ 20 และรูปที่ 21

	ความชันกราฟ	จุดตัดแกน
กราฟสมมูลดูดซับตะกั่ว แบบแลงมัวร์	0.2921	0.0284
กราฟสมมูลดูดซับตะกั่ว แบบฟรุนดิช	0.4087	0.793
กราฟสมมูลดูดซับซัลไฟด์ แบบแลงมัวร์	0.0017	-0.0069
กราฟสมมูลดูดซับซัลไฟด์ แบบฟรุนดิช	-0.2823	0.7689

ตารางที่ 12 ค่าคงที่การดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์แบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช

	ค่าคงที่	ตะกั่ว	ซัลไฟด์
ค่าคงที่แลงมัวร์	$K_L$	3.416	588.27
	b	0.097	-4.059
	$Q_{max}$	35.211	-144.92
	$R^2$	0.8657	0.9335
ค่าคงที่ฟรุนดลิช	$K_F$	6.209	5.868
	n	2.447	3.542
	$R^2$	0.744	0.9411

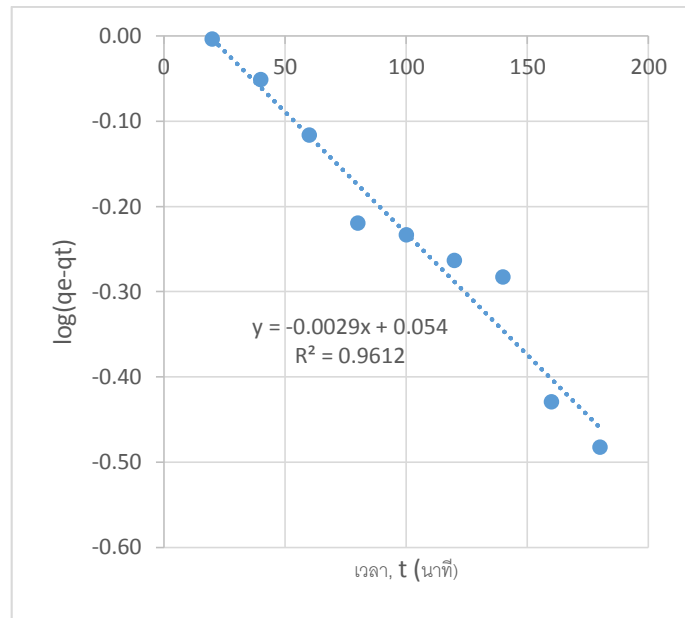
การดูดซับตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์ที่มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบแลงมัวร์มากกว่า พบว่ามีค่า  $K$  ของการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 3.416 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ค่า  $1/b$  มีค่าน้อยกว่า 1 ในการดูดซับตะกั่ว นั่นคือ กราฟมีความชันต่ำนั่นเอง แสดงว่าค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วของมอนต์โมริลโลไนต์ไม่มากนัก

สำหรับการดูดซับซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ที่มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบฟรุนดลิช มากกว่า พบว่ามีค่า  $K$  ของการดูดซับซัลไฟด์เท่ากับ 5.868 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ค่า  $1/n$  เมื่อคำนวณกำลังของการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าน้อยกว่า 1 แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิชมีลักษณะโค้งคว่ำแสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์ไม่มากนัก

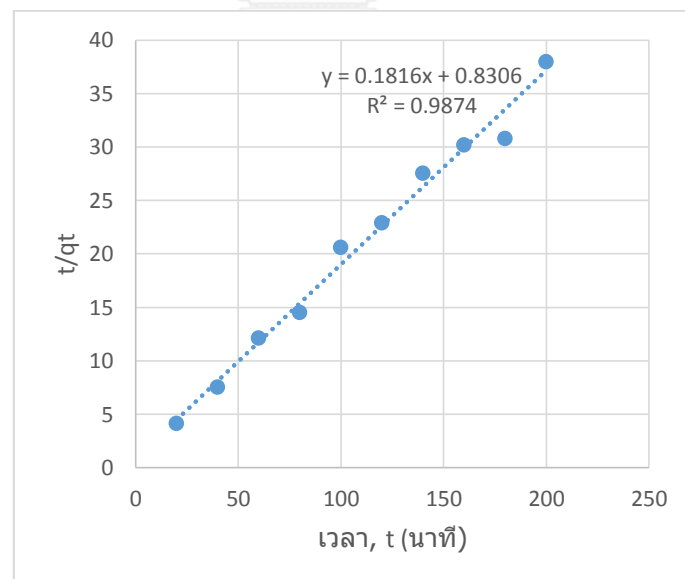
#### 4.3.4 จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

ทำการหาจลนศาสตร์การดูดซับเพื่อหาสมมติฐานการดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับสารตะกั่วหรือซัลไฟด์จากสารละลายหรือน้ำล้างเยื่อกระดาษ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณในการเพิ่มสเกลการดูดซับในภายหลัง รูปแบบของแบบจำลองที่สอดคล้องกับกระบวนการดูดซับของผลการทดลองสามารถอ้างอิงได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )

การคำนวณเพื่อหาจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วในสารละลาย สามารถนำข้อมูลจากหัวข้อ  
 4.3.2 เพื่อคำนวณหาค่าคงที่สำหรับสร้างกราฟจลนศาสตร์การดูดซับตามรูปที่ 22 ดังนี้

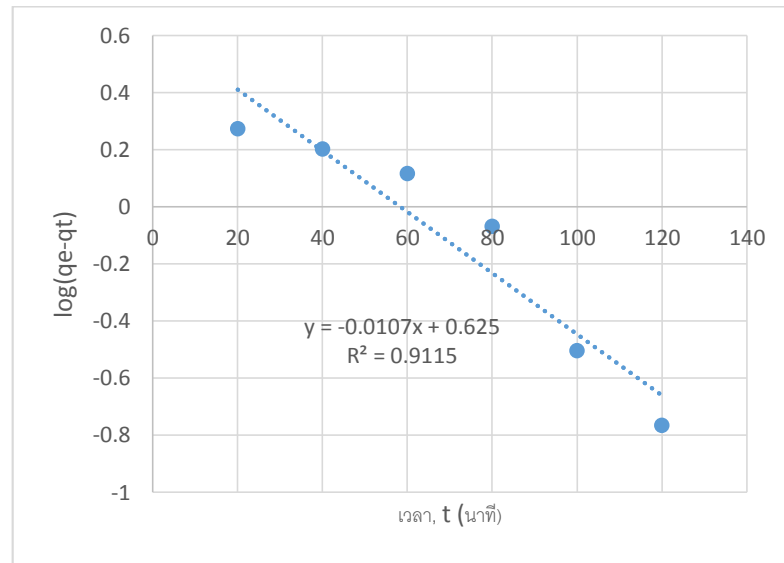


(a)

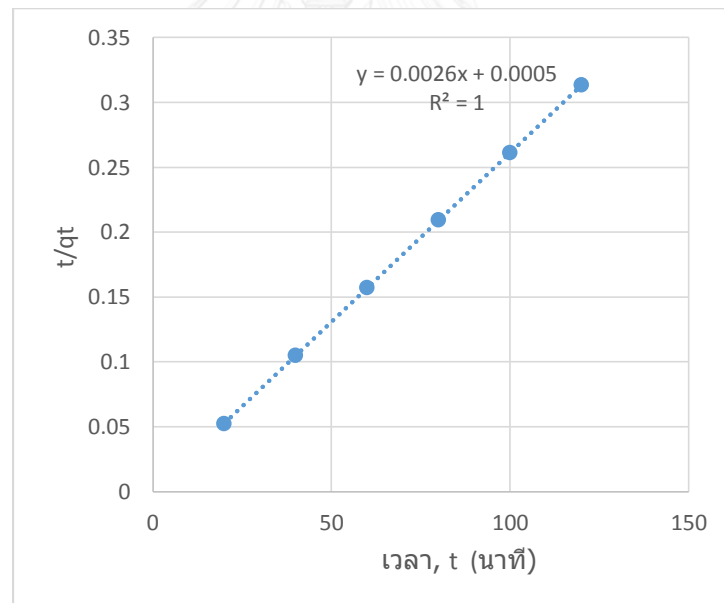


(b)

รูปที่ 22 จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์ (a) การดูดซับอันดับหนึ่ง (b) และการดูดซับอันดับสอง



(a)



(b)

รูปที่ 23 จลนศาสตร์การดูดซับซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ (a) การดูดซับอันดับหนึ่ง และ (b) การดูดซับอันดับสอง

ตารางที่ 13 ความชันและจุดตัดแกนของกราฟจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์สำหรับการดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง

	ความชันกราฟ	จุดตัดแกน
กราฟจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งของตะกั่ว	0.0029	0.054
กราฟจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองของตะกั่ว	0.1816	0.8306
กราฟจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งของซัลไฟด์	0.0107	0.625
กราฟจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองของซัลไฟด์	0.0026	0.0005

จากรูปที่ 22 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.961 และ 0.987 ตามลำดับ และจากรูปที่ 23 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.912 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองของการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า จึงสรุปได้ว่าการดูดซับทั้งตะกั่วและซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ มีความสอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองมากกว่า ดังตารางที่ 14



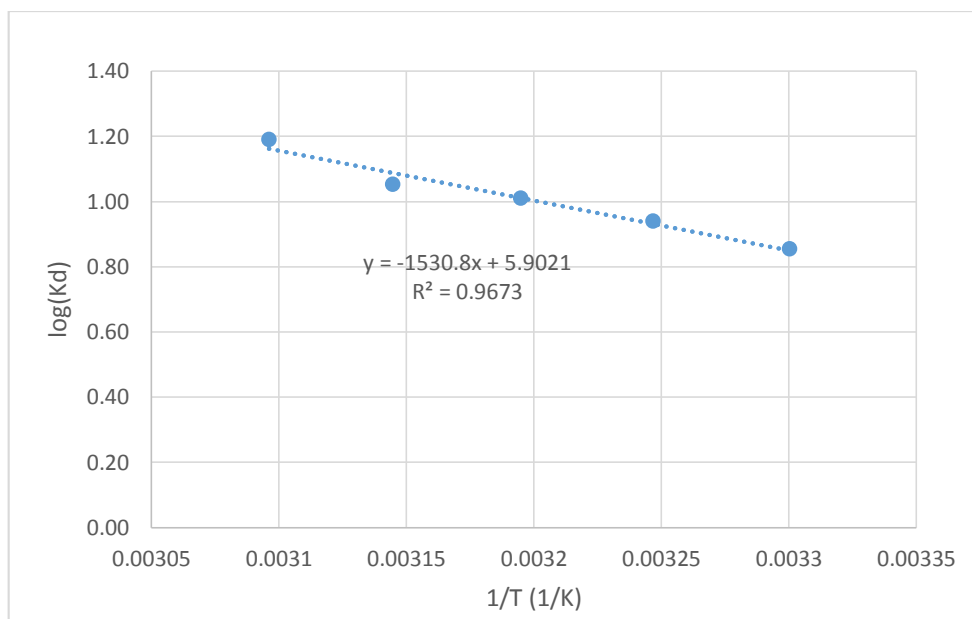
ตารางที่ 14 ผลการคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

	จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง			จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง		
	$k_1$	$q_e$ (mg/g)	$R^2$	$k_2$	$q_e$ (mg/g)	$R^2$
การดูดซับตะกั่ว	0.1315	1.132	0.961	15.89	0.28	0.987
การดูดซับซัลไฟด์	0.4935	4.217	0.912	8.76	12.77	1

จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลไลไนต์สอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองมากกว่า ซึ่งหมายความว่าอัตราการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นของสารดูดซับกำลังสองดังสมการ  $d(q_t) = k_2(q_e - q_t)^2$  และมีค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับอันดับสอง ( $k_2$ ) เท่ากับ 15.89 และ 8.76 มิลลิกรัมต่อเวลาที่ตามลำดับ

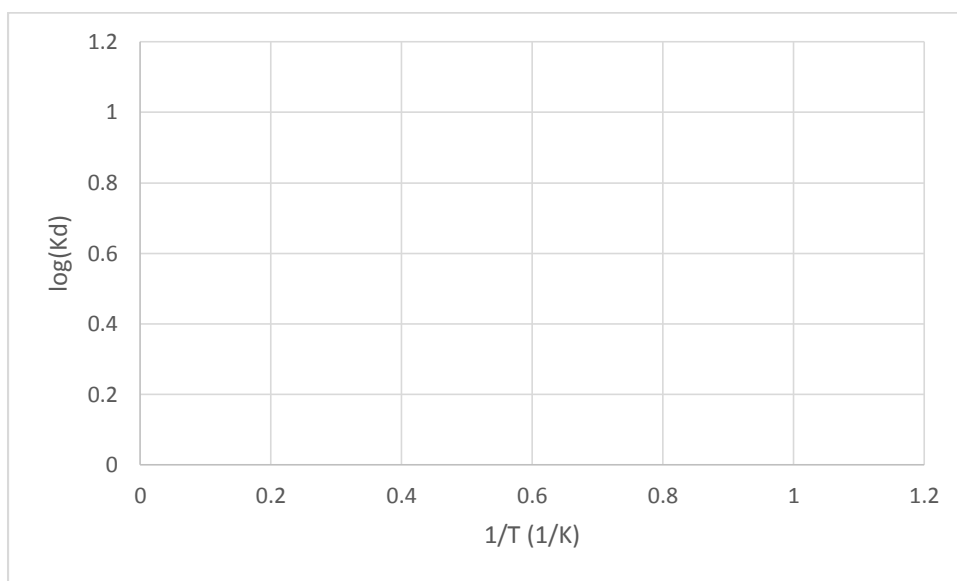
#### 4.3.5 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์

เพื่อทำการทดลองหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วในสารละลาย การทดลองใช้สารละลายตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แร่มอนต์โมริลไลไนต์ ปริมาณ 0.07 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกการดูดซับจะสามารถบอกว่ากระบวนการดูดซับใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติหรือไม่ โดยดูจากค่าความเป็นบวกและลบของค่าพลังงานกิบบส์ (dG) พลังค่าเอนโทรปี (dS) และเอนทัลปี (dH) ผลตามรูปที่ 24 ดังนี้



รูปที่ 24 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่วโดยแรมอนโมริลโลไนต์ สารละลายตะกั่วเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แรมอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.035 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6

เพื่อทดลองหาเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย การทดลองใช้สารละลายซัลไฟด์เริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แร่มอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.5 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6 ได้ผลตามรูปที่ 25 ดังนี้



รูปที่ 25 เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ โดยใช้สารละลายซัลไฟด์เริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร แร่มอนต์โมริลโลไนต์ ปริมาณ 0.5 กรัม เวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.6

สมการเทอร์โมไดนามิกการดูดซับ สามารถสรุปค่าความชื้นและจุดตัดแกนได้ดังตารางที่ 15 จากนั้นจึงคำนวณค่าดังกล่าวตามสมการไอโซเทอมการดูดซับแลงมัวร์และฟรุนดิชได้ดังนี้

ตารางที่ 15 ความชื้นและจุดตัดแกนของกราฟเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์

	ความชื้นกราฟ	จุดตัดแกน
กราฟเทอร์โมไดนามิกการดูดซับอันดับหนึ่งของตะกั่ว	0.0029	0.054
กราฟเทอร์โมไดนามิกการดูดซับอันดับหนึ่งของซัลไฟด์	0.0107	0.625

จากตารางที่ 16 ค่าพลังงานกิบบส์ของการดูดซับตะกั่วด้วยแรมอนต์โมริลโลไนต์ เป็นค่าติดลบ (dG) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าเอนโทรปี (dS) และเอนทัลปี (dH) มีค่าเป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการการดูดซับดังกล่าวเป็นไปตามธรรมชาติได้เมื่ออุณหภูมิเหมาะสมเท่านั้น สำหรับการดูดซับซัลไฟด์ด้วยแรมอนต์โมริลโลไนต์ ค่าพลังงานกิบบส์ (dG) และค่าเอนทัลปี (dH) มีค่าติดลบ ส่วนค่าเอนโทรปี (dS) มีค่าเป็นบวกซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับดังกล่าวจะสามารถเป็นไปได้ในธรรมชาติเสมอ

ตารางที่ 16 ค่าคงที่เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับตะกั่ว/ซัลไฟด์โดยแรมอนต์โมริลไอไนต์

อุณหภูมิ (เคลวิน, K )	Thermodynamic parameters			R <sup>2</sup>
	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (J/mol/K)	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	
<b>การดูดซับตะกั่ว</b>				
303	-4,947.31	113	29,295	0.9673
308	-5,532.51			
313	-6,043.05			
318	-6,398.05			
323	-7,344.27			
<b>การดูดซับซัลไฟด์</b>				
303	-7,703.44	6.734	-5,654	0.9803
308	-7,685.64			
313	-7,749.53			
318	-7,798.08			
323	-7,816.26			

ผลของการทดสอบการดูดซับสารตะกั่วหรือซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลไอไนต์ เมื่อพิจารณาจากค่าเทอร์โมไดนามิกการดูดซับสามารถสรุปได้ว่าแร่ดังกล่าวสามารถใช้เพื่อลดการปนเปื้อนของตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำที่วนอยู่ในระบบการผลิตกระดาษให้ลดลงได้ เนื่องจากกระบวนการดูดซับทั้งสองสามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาจากเวลาที่ใช้จ่าย ค่าจลนศาสตร์การดูดซับแสดงให้เห็นว่าเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์เท่ากับ 20 นาทีหรือน้อยกว่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับเวลาพักน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษของบริษัท ฮวงฮัว จำกัด โดยการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์สอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองมากกว่าอันดับหนึ่ง ซึ่งหมายความว่าอัตราการดูดซับแปรผันตรงกับกำลังสองของความเข้มข้นของตะกั่วหรือซัลไฟด์

ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วโดยมอนต์มอริลโลไนต์จะมีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบแลงมัวร์ ซึ่งหมายความว่าตะกั่วถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์เพียงชั้นเดียวเท่านั้น ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดซับซัลไฟด์มีความใกล้เคียงกับการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่า ซึ่งหมายถึงซัลไฟด์สามารถเกาะกับผิวแรมมอนต์มอริลโลไนต์ได้ในหลายๆ ชั้น

#### 4.4 ผลการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษโดยใช้แรมมอนต์มอริลโลไนต์

##### 4.4.1 การทดสอบปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ ต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์

เพื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างๆ กัน การทดลองใช้สารละลายที่มีตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่ากับมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0.05 0.1 0.15 0.20 และ 0.25 กรัม เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6

จากรูปที่ 26 (a) ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับสารตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษสูงสุดที่ 19.49 และ 14.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.05 กรัม อันดับสองคือ 9.73 และ 7.0 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.1 กรัม อันดับ 3 คือ 6.49 และ 4.72 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.15 กรัม

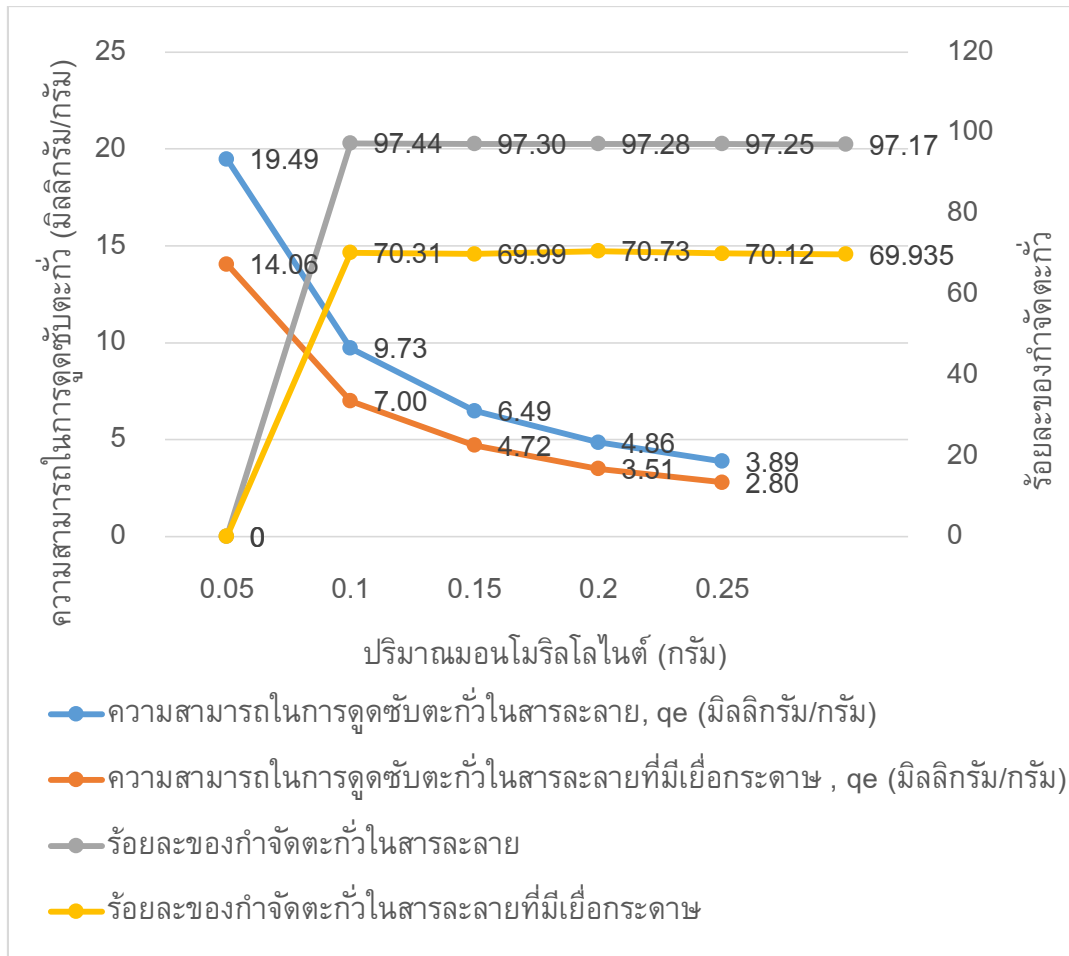
ร้อยละการกำจัดตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษลดลงตั้งแต่ร้อยละ 97.44 ถึง 97.17 เมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 2.5 กรัมต่อลิตร และ ร้อยละกำจัดตะกั่ว

ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษอยู่ที่ช่วง 69.935 ถึง 70.73 ในช่วงของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.5 ถึง 2.5 กรัมต่อลิตร

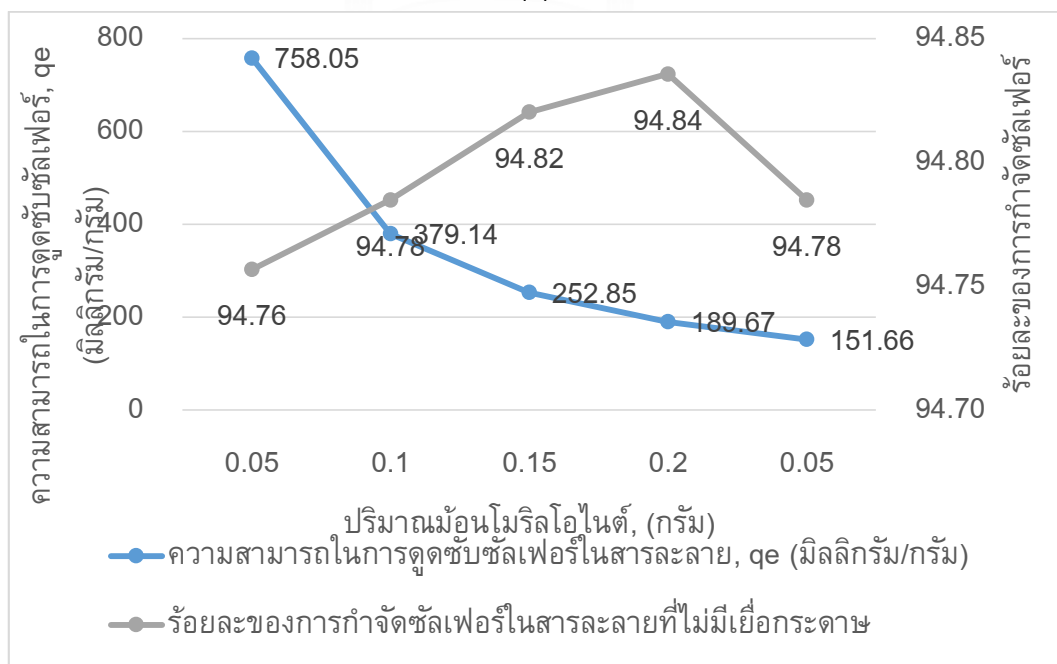
จากรูปที่ 26 (b) และ (c) ความสามารถในการดูดซับสารซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษสูงสุดที่ 768.05 และ 761.97 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.05 กรัม อันดับสองคือ 379.14 และ 381.13 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.1 กรัม อันดับ 3 คือ 252.85 และ 254.75 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.15 กรัม

ร้อยละการกำจัดซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษอยู่ที่ช่วง 94.76 ถึง 94.84 และ 94.86 ถึง 95.53 ตามลำดับ ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 0.05 ถึง 0.25 กรัม จะสังเกตเห็นว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับ (qe) และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ลดลง ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือการแทรกแซงระหว่างบริเวณที่เกิดการดูดซับ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษจะถูกดูดซับได้มากกว่า สารละลายที่มีเยื่อกระดาษ ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีความเยื่อกระดาษมีปริมาณใกล้เคียงกัน

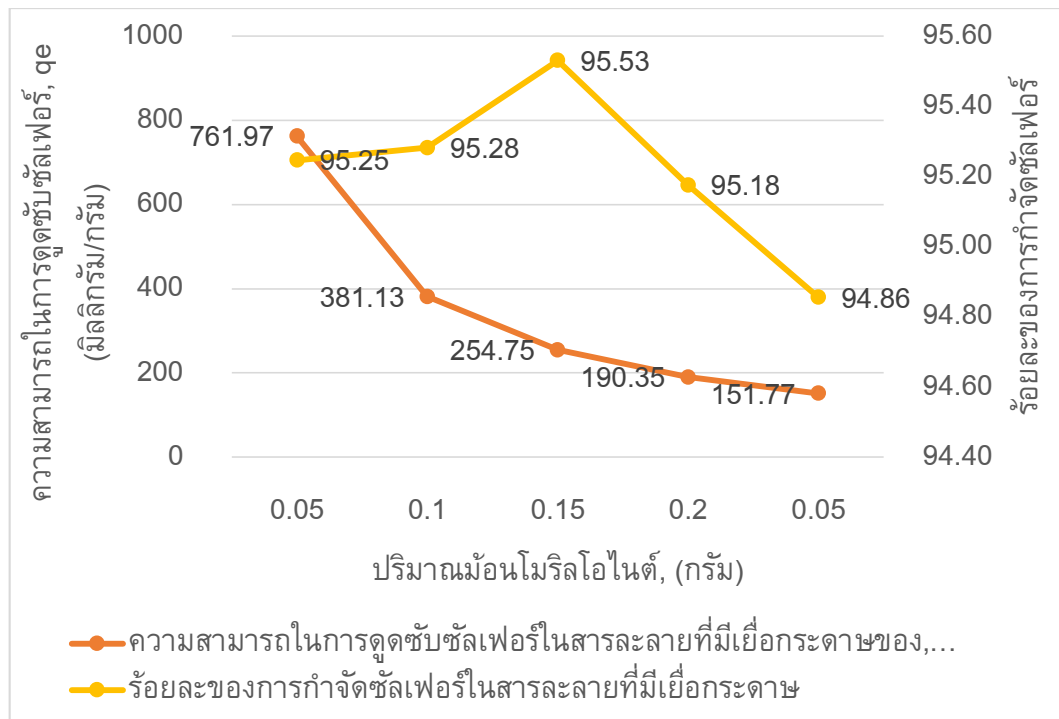


(a)



(b)





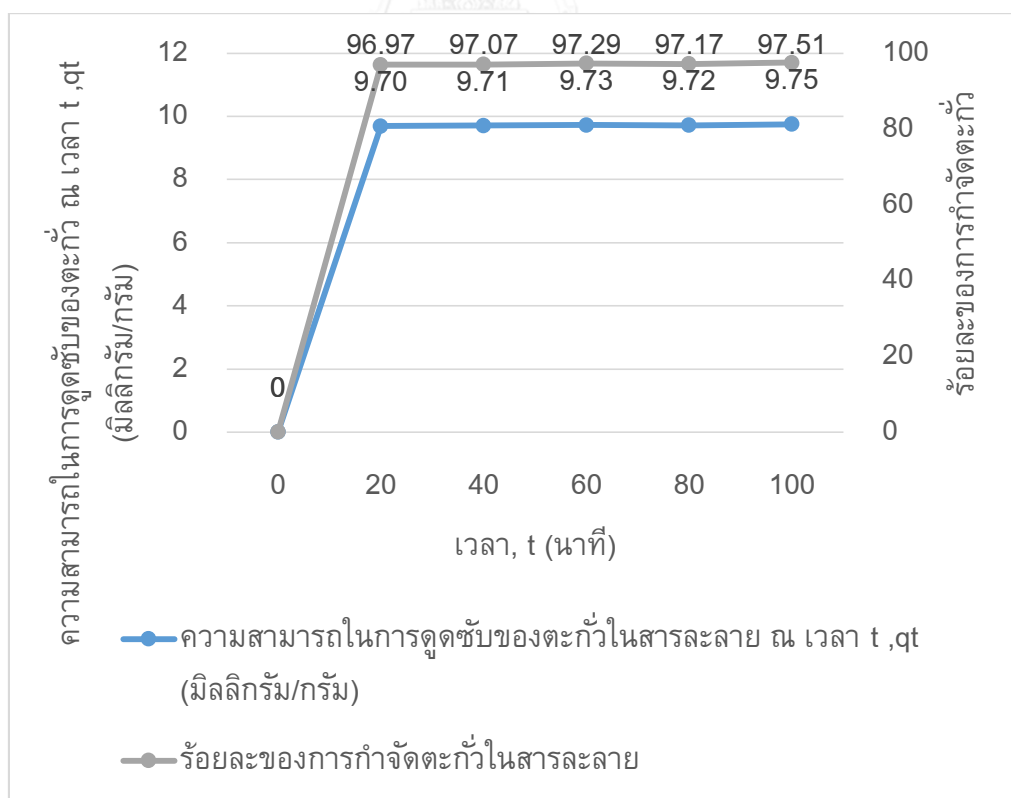
(c)

รูปที่ 26 ผลการดูดซับสารในสารละลายที่ไม่มีและมียีื่อกระดาษในปริมาณมอนอเมอร์โมริลโลไนต์ ต่างๆกัน การทดลองใช้สารละลายที่มีตะกั่ว 10 และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 100 มิลลิตร เขย่ากับมอนอเมอร์โมริลโลไนต์ปริมาณต่างๆ กัน ได้แก่ 0.05 0.1 0.15 0.20 และ 0.25 กรัม เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 (a) ผลการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมียีื่อกระดาษ (b) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ (c) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ

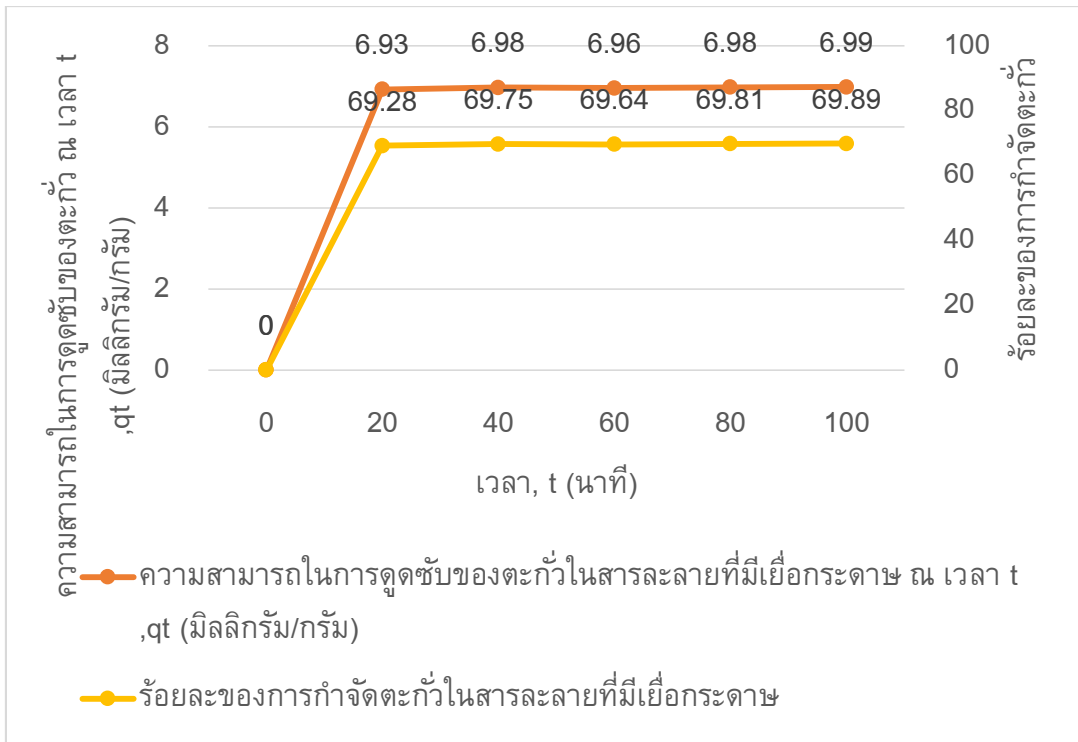
#### 4.4.2 การทดสอบเวลาต่อความสามารถในการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ของมอนต์โมริลโลไนต์

เพื่อทำการทดสอบปัจจัยเวลาต่อความสามารถในการดูดซับและหาจลนศาสตร์การดูดซับของมอนต์โมริลโลไนต์ต่อตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษและไม่มีเยื่อกระดาษ การทดลองใช้สารละลายที่มีตะกั่ว 10 และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่ากับมอนต์โมริลโลไนต์ปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6

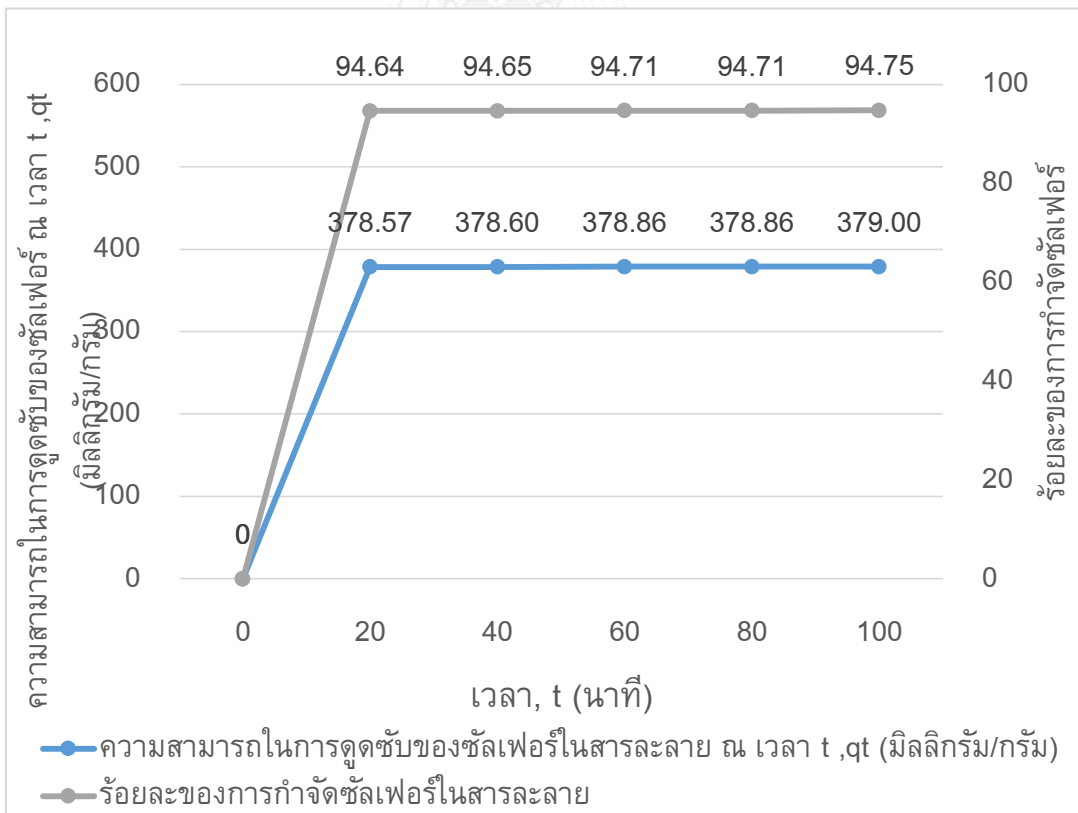
จากรูปที่ 27 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษเมื่อผ่านไป 20 นาทีแรกเท่ากับ 9.70 และ 6.93 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษเมื่อผ่านไป 20 นาทีแรกเท่ากับ 378.57 และ 378.57 ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



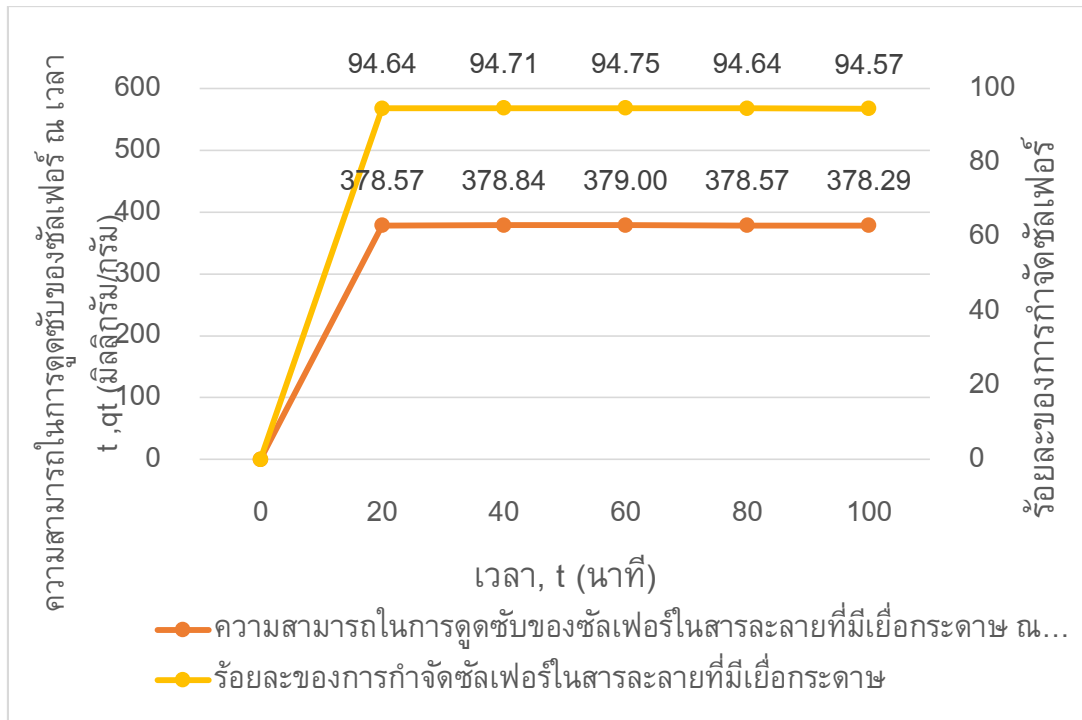
(a)



(b)



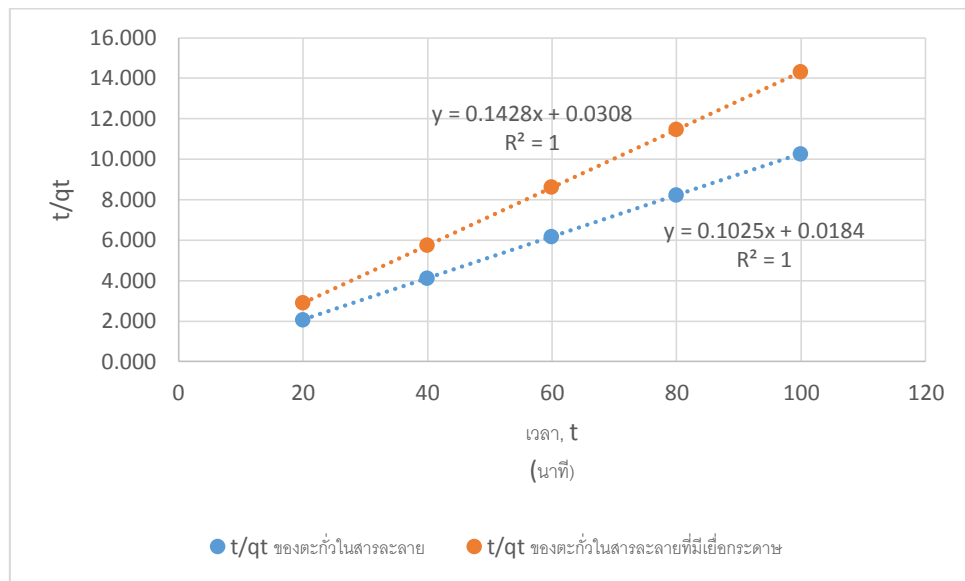
(c)



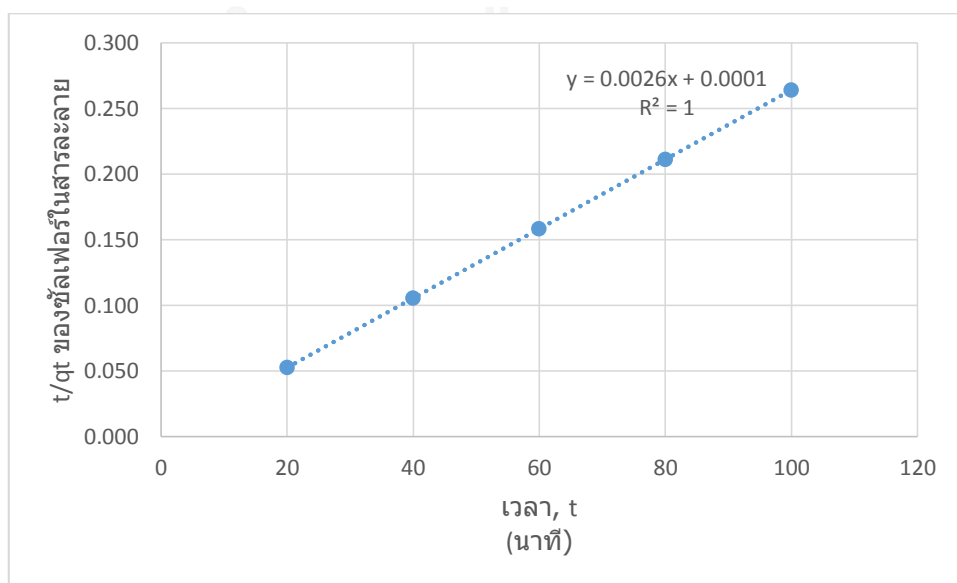
(d)

รูปที่ 27 ผลการดูดซับสารในสารละลายที่ไม่มีและมียีอกระดาศตามระยะเวลา การทดลองใช้สารละลายที่มีตะกั่ว 10 และซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่ากับมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 (a) ผลการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ (b) ผลการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ (c) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ (d) ผลการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ

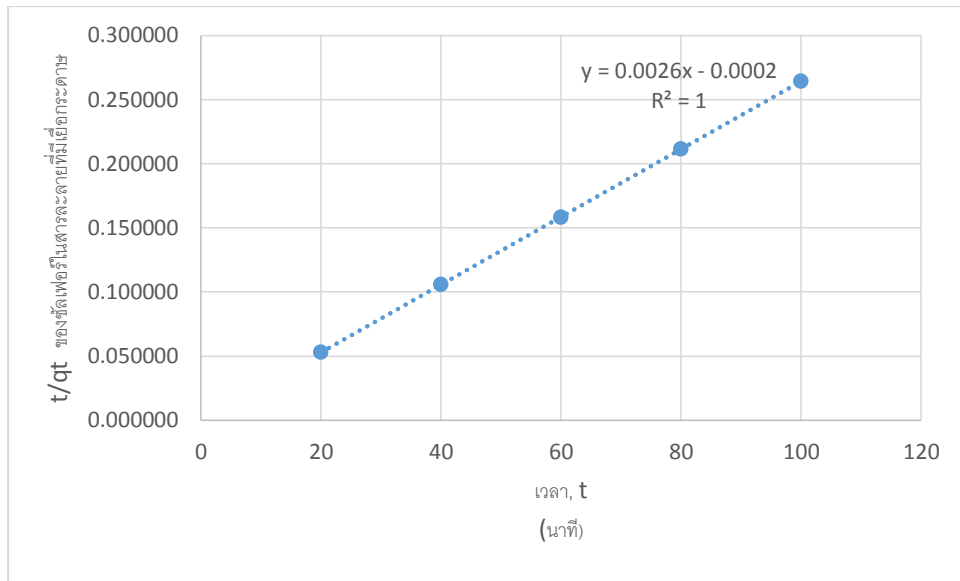
เพื่อการหาสมมติฐานด้านการดูดซับที่ดีที่สุดในการกำจัดสารตะกั่วและซัลไฟด์ออกจากสารละลายหรือน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษ เพื่อการเพิ่มสเกลในการผลิตภายหลัง รูปแบบของแบบจำลองที่สอดคล้องกับกระบวนการดูดซับตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ตามรูปที่ 28 กราฟแสดงสมการการดูดซับจากการคำนวณ เวลาส่วนความสามารถในการดูดซับ,  $t/qt$  (เวลา/(มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อเวลา,  $t$  เพื่อสร้างกราฟจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองของการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่มีและไม่มีเยื่อกระดาษ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 28 ผลการคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง (a) ตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ (b) ซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ และ (c) ซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ

สมการจลนศาสตร์การดูดซับจากรูปที่ 28 สามารถสรุปค่าความชันและจุดตัดแกนได้ดังตารางที่ 17 จากนั้นจึงคำนวณค่าดังกล่าวตามจลนศาสตร์การดูดซับได้ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 17 ความชันกราฟและจุดตัดแกนจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองจากกราฟรูปที่ 28

จลนศาสตร์การดูดซับ อันดับสองของ	ความชันกราฟ	จุดตัดแกน
การดูดซับตะกั่วในสารละลาย ที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	0.1025	0.0184
การดูดซับตะกั่วในสารละลาย ที่มีเยื่อกระดาษ	0.1428	0.0308
การดูดซับซัลไฟด์ใน สารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	0.0026	0.0001
การดูดซับซัลไฟด์ใน สารละลายที่มีเยื่อกระดาษ	0.0026	0.0002

ตารางที่ 18 ผลการคำนวณหาค่าคงที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

การดูดซับ	จลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง		
	$k_2$	$q_e$ (mg/g)	$R^2$
การดูดซับตะกั่วในสารละลาย ที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	1.75	9.76	1
การดูดซับตะกั่วในสารละลาย ที่มีเยื่อกระดาษ	1.51	7.00	1
การดูดซับซัลไฟด์ใน สารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	14.79	384.62	1
การดูดซับซัลไฟด์ใน สารละลายที่มีเยื่อกระดาษ	29.59	384.62	1

จลนศาสตร์การดูดซับของสารละลายที่มีทั้งตะกั่วและซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลไอน์ต์ สอดคล้องกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสอง ดังนั้นอัตราการดูดซับขึ้นความเข้มข้นของสารถูกดูดซับกำลังสองดังสมการ  $d(q_t) = k_2(q_e - q_t)^2$  และมีค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับอันดับสอง ( $k_2$ ) เท่ากับ 1.75 และ 1.51 มิลลิกรัมต่อนาที่สำหรับการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ และมีค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับอันดับสอง ( $k_2$ ) เท่ากับ 14.79 และ 29.59 มิลลิกรัมต่อนาที่ ตามลำดับสำหรับการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ

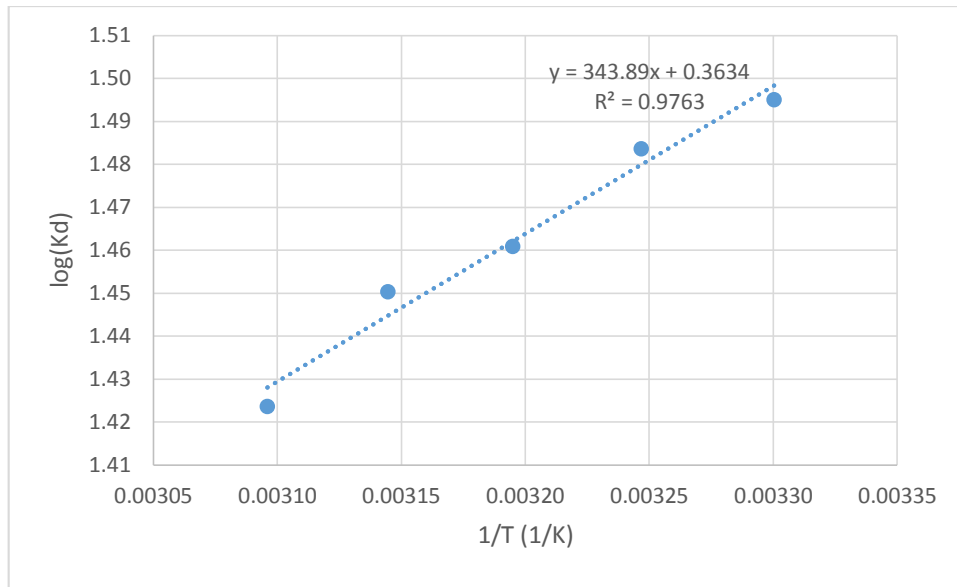
เนื่องจากค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับอันดับสองของการดูดซับซัลไฟด์มากกว่าตะกั่วจึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับซัลไฟด์เกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการดูดซับตะกั่ว

#### 4.4.3 การทดสอบเพื่อหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ของมอนต์โมริลไอน์ต์

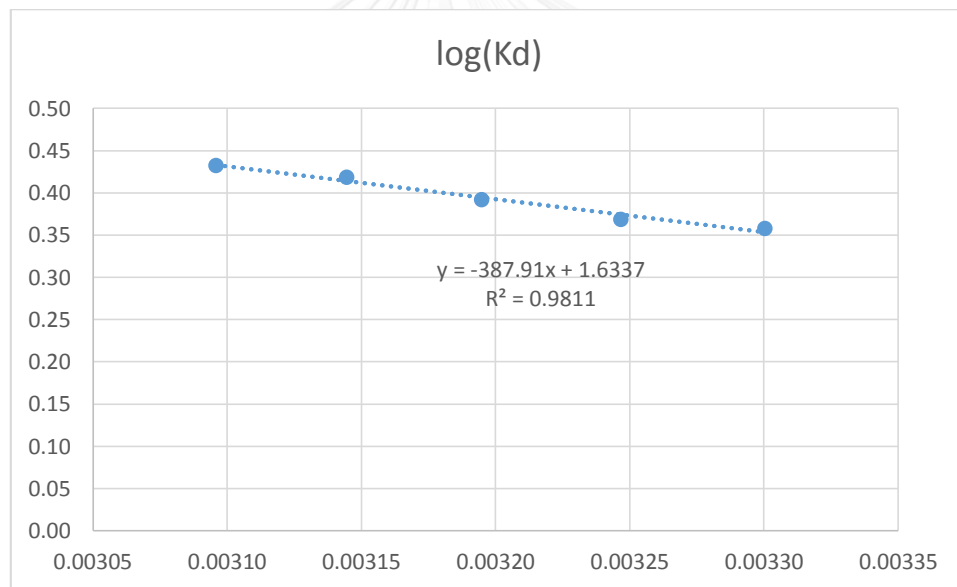
เพื่อทำการทดลองหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ การทดลองใช้สารละลายตะกั่วและซัลไฟด์ 10 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่ากับมอนต์โมริลไอน์ต์ปริมาณ 0.1 กรัม เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.6 โดยข้อมูลเทอร์โมไดนามิกการดูดซับจะสามารถบอกว่กระบวนการดูดซับใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติหรือไม่ โดยดูจากค่าความเป็นบวกและลบของค่าพลังงานกิบบส์ (dG) พลังค่าเอนโทรปี (dS) และเอนทัลปี (dH)

จากตารางที่ 18 การดูดซับสารตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษ พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 50 องศาเซลเซียสช่วงความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.31 ถึง 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 6.95 ถึง 7.30 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยทั้งสองกรณีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามลำดับในช่วงอุณหภูมิที่ได้ทำการทดลอง





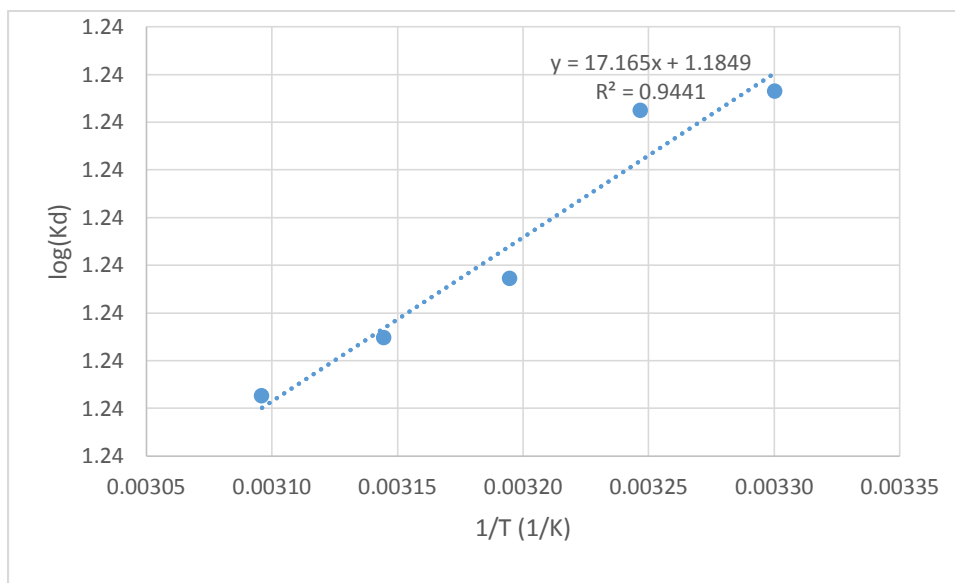
(a)



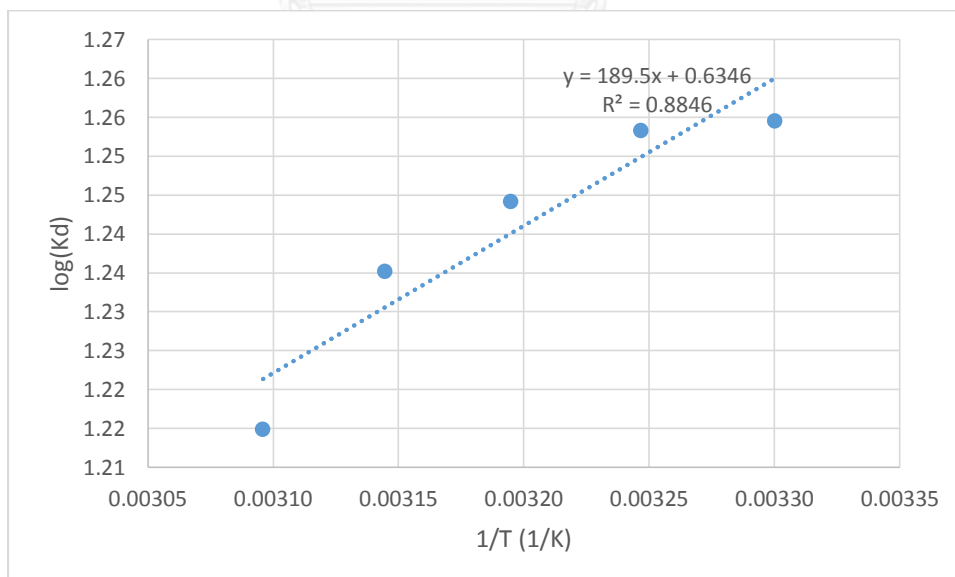
(b)

รูปที่ 29 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (a) ของการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ (b) ของการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ

การดูดซับซัลเฟอร์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษและมีเยื่อกระดาษ พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส ช่วงความสามารถในการดูดซับลดลงตั้งแต่ 378.30 ถึง 378.15 และ 378.91 ถึง 377.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยทั้งสองกรณีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงตามในช่วงอุณหภูมิที่ได้ทำการทดลอง



(a)



(b)

รูปที่ 30 การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปี (a) ของการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ (b) ของการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ

สมการเทอร์โมไดนามิกการดูดซับจากรูปที่ 29 และรูปที่ 30 สามารถสรุปค่าความชันและจุดตัดแกนได้ดังตารางที่ 19 จากนั้นจึงคำนวณค่าดังกล่าวตามสมการเทอร์โมไดนามิกการดูดซับได้ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 19 ความชันกราฟและจุดตัดกราฟในรูปที่ 29 และ รูปที่ 30

เทอร์โมไดนามิกการดูดซับ	ความชันกราฟ	จุดตัดแกน
การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	343.89	0.3634
การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ	-387.91	1.6337
การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ	17.165	1.1849
การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ	189.5	0.6346

ค่าพลังงานกิบบส์ (dG) ของการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ด้วยแร่มอนต์โมริลโลไนต์เป็นค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อทำการคำนวณหาค่าพลังงานเอนทัลปี (dH) และเอนโทรปี (dS) ในกระบวนการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ และการดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษ พบทั้งพลังงานเอนทัลปีและเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงกระบวนการดังกล่าวจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงมากพอ ซึ่งในช่วงอุณหภูมิที่ทดลอง (30 – 50 องศาเซลเซียส) กระบวนการดูดซับดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เสมอ

และในกระบวนการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ ค่าเอนทัลปี (dH) ติดลบ และเอนโทรปี (dS) เป็นบวก ซึ่งหมายถึงว่ากระบวนการดูดซับดังกล่าวจะสามารถเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงสามารถสรุปจากการทดลองดังกล่าวได้ว่า มอนต์โมริลโลไนต์สามารถดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมีเยื่อกระดาษได้ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 50 องศาเซลเซียสเสมอ

ตารางที่ 20 ผลการคำนวณค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และกิบปีจากกระบวนการดูดซับตะกั่วและ  
ซัลไฟด์ในสารละลายที่ไม่มีและมียีเอกระดาษ

อุณหภูมิ (เคลวิน, K )	Thermodynamic parameters			R <sup>2</sup>
	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (J/mol/K)	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	
<b>การดูดซับตะกั่วในสารละลาย</b>				
303	-8,671.74	6.96	6584.51	0.98
308	-8,747.61			
313	-8,753.66			
318	-8,828.67			
323	-8,802.54			
<b>การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ</b>				
303	-2,076.21	31.28	-7427.37	0.98
308	-2,176.99			
313	-2,342.47			
318	-2,546.49			
323	-2,667.30			
<b>การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลาย</b>				
303	-7,200.19	22.69	328.66	0.94
308	-7,317.54			

313	-7,425.85			
318	-7,541.43			
323	-7,655.34.55			
<b>การดูดซับซัลไฟด์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ</b>				
303	-7,277.05			
308	-7,390.00			
313	-7,454.20	12.15	3628.38	0.83
318	-7,519.98			
323	-7,511.88			

#### 4.5 ผลการทดลองใช้มอนด์โมริลโลไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ

ตารางที่ 21 ผลการทดลองใช้มอนด์โมริลโลไนต์เพื่อลดตะกั่วและซัลไฟด์ในเยื่อกระดาษ

	กระดาษที่ไม่ผ่านการปรับปรุง เยื่อกำจัดสารพิษด้วยมอนด์โม ริลโลไนต์เยื่อที่ไม่ผ่านการแช่ มอนด์โมริลโลไนต์		กระดาษที่ผ่านการกำจัด สารพิษด้วยมอนด์โมริล โลไนต์	
	ร้อยละของ ตะกั่ว	ร้อยละของ ซัลไฟด์	ร้อยละ ของตะกั่ว	ร้อยละของ ซัลไฟด์
ก่อนเผา	0.018	0	0.015	0
หลังเผา	0.39	0	0.21	0

ผลการทดลอง ปริมาณตะกั่วในซีเถ้าและกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับปรุงโดยมอนด์โมริลโลไนต์มีปริมาณตะกั่วในกระดาษมากกว่ากระดาษที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ทั้งนี้กรณีที่มีปริมาณตะกั่วในซีเถ้ามากกว่ากระดาษ คาดว่าเนื่องจากน้ำหนักรีดซีเถ้าหลังเผาจะมีอยู่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักกระดาษเดิม จึงทำให้มีปริมาณตะกั่วในซีเถ้ามากกว่ากระดาษ

ทั้งนี้ในกรณีของซัลไฟด์ที่ไม่ขึ้นค่าใดๆ คาดว่าเป็นเพราะปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ในการจำลองการปนเปื้อนซัลไฟด์มีน้อยเกินไป

## บทที่ 5

### สรุป

ความเป็นพิษของกระดาษไหว้เจ้าที่พบได้แก่ ตะกั่วและซัลไฟด์ ซึ่งสาเหตุของความเป็นพิษในกระดาษไหว้เจ้ามาจากกระดาษรีไซเคิล เมื่อนำกระดาษรีไซเคิลที่เป็นวัตถุที่ใช้ในการผลิตกระดาษมาตีกระจาย หมึกหรือสิ่งปนเปื้อนในกระดาษจะกระจายและสะสมในน้ำ และเนื่องจากน้ำในระบบการผลิตกระดาษส่วนใหญ่จะเป็นระบบปิด ดังนั้นจึงคาดว่าหากทำการกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำจะทำให้สามารถลดความเป็นพิษในควันจากการเผากระดาษไหว้เจ้าได้

งานวิจัยใช้แรมอนต์โมริลโลไนต์ในการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ออกจากน้ำที่วนอยู่ในระบบ ผลการทดลองพบว่ามอริลโลไนต์สามารถลดปริมาณตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำได้

จากผลการทดลองทดสอบปริมาณมอริลโลไนต์ต่อการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำพบว่าช่วงปริมาณมอริลโลไนต์ที่ไม่มากเกินไปจะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพ โดยการทดลองที่ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.035 กรัม ในสารละลาย 70 มิลลิลิตร ให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่ดีที่สุดทั้งในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษและไม่มีเยื่อกระดาษ

จากข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับของทุกการทดลองในหัวข้อ 4.4.2 และหัวข้อ 4.5.2 มอริลโลไนต์สามารถกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก จากนั้นการกำจัดจะคงที่ โดยที่รูปแบบการดูดซับของทั้งตะกั่วและซัลไฟด์จะใกล้เคียงกับจลนศาสตร์การดูดซับอันดับสองมากกว่าจลนศาสตร์ดูดซับอันดับหนึ่ง ซึ่งหมายถึงความเร็วการดูดซับแปรผันตรงกับกำลังสองของความเข้มข้นของตะกั่วและซัลไฟด์

จากข้อมูลผลการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับ การดูดซับตะกั่วจะมีความใกล้เคียงกับรูปแบบการดูดซับแบบแลงมัวร์มากกว่า ในขณะที่การดูดซับซัลไฟด์มีรูปแบบการดูดซับที่ใกล้เคียงการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการดูดซับของตะกั่วและซัลไฟด์ในมอริลโลไนต์ต่างกัน ตะกั่วดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับมากกว่า ส่วนซัลไฟด์สามารถดูดซับเข้าไปในโพรงของมอริลโลไนต์และซัลไฟด์สามารถซ้อนกันหลายๆ ชั้นเพื่อที่ยึดติดกับตัวดูดซับ

การดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์โดยมอนต์โมริลโลไนต์ ค่าพลังงานกิบบส์ (dG) ต่างมีค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงการหาเทอร์โมไดนามิกการดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ ซึ่งหมายถึง ช่วงอุณหภูมิ (303 – 323 องศาเซลเซียส) ที่ทำการทดลอง แร่มอนต์โมริลโลไนต์สามารถทำหน้าที่ดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ ได้เสมอ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนในเครื่องผลิตกระดาษจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเสมอ

นอกจากนี้ยังมีการทดลองหาปริมาณตะกั่วในซีเมนต์และกระดาษที่ไม่ผ่านการปรับปรุงโดย มอนต์โมริลโลไนต์มีปริมาณตะกั่วในกระดาษมากกว่ากระดาษที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ามอนต์โมริลโลไนต์สามารถช่วยดูดซับตะกั่วและซัลไฟด์ของน้ำ ในกระบวนการผลิตกระดาษ กระดาษที่ผลิตได้จึงน่าจะเป็นพิษที่ลดลง ส่งผลให้ควันที่เกิด จากการเผากระดาษมีความปลอดภัยมากขึ้น

#### ข้อเสนอแนะ

การทดลองในหัวข้อ 4.5 ปัญหาที่พบคือ ไม่เจอซัลไฟด์ในกระดาษที่ขึ้นแผ่นกระดาษจาก เยื่อที่จำลองการปนเปื้อน คาดว่าเนื่องจากการใช้ปริมาณไซเดียมซัลเฟตที่น้อยเกินไป จึงควรที่จะ ลองเพิ่มความเข้มข้นของซัลไฟด์

นอกจากนี้ในงานวิจัยต่อไป ควรจะวัดค่า PAH และฝุ่นละอองในควัน และหาวิธีลดค่า ดังกล่าว



### รายการอ้างอิง

1. กระดาษให้วีเจ้า. 2553 [cited 2557 7 กรกฎาคม ]; Available from: <https://www.kasikornresearch.com/TH/K-EconAnalysis/Pages/ViewSummary.aspx?docid=30497>.
2. จิตรา ก่อนนทเกียรติ, คู่มือให้วีเจ้ายุคใหม่ ให้วีอย่างไรให้โชคดี. 2544, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จิตรา.
3. ของให้วีตรุษจีน 2558 ของให้วีตรุษจีนให้วีเจ้าที่ มีอะไรบ้าง. [cited 2557 7 กรกฎาคม ]; Available from: <http://health.kapook.com/view21160.html>.
4. Gullichsen, J. and H. Paulapuro, *Papermaking Part 3, Finishing*. 1999, Helsinki, Finland Fapet Oy.
5. Macdonald, R.G., *Pulp and Paper Manufacture, The pulping of wood VOLUME I*. 1970, New York: McGraw-Hill Book Company.
6. Gullichsen, J. and H. Paulapuro, *Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End*. 2000, Helsinki Finland: Fapet Oy.
7. Gullichsen, J. and H. Paulapuro, *Pigment Coating and Surface Sizing of Paper*. 2000, Helsinki Finland: Fapet Oy.
8. Leach, R.H., et al., *The Printing Ink Manual*. 1988, New York: Van Nostrand Reinhold (International).
9. K., K., *Principles of combustion*. 2005, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
10. skill, D.o.B.a.I., *PACKAGING (ESSENTIAL REQUIREMENTS) REGULATIONS*. 2013, Government Guidance Notes: London: Department of Business and Innovation skill.
11. กรมควบคุมมลพิษ, ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย. . 2553, กรมควบคุมมลพิษ: กรุงเทพมหานคร.
12. เดชา ฉัตรศิริเวช, กระบวนการดูดซับ, *Adsorption processes*. 2552, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

13. ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, กระบวนการดูดซับสาร 2554, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
14. วัลลภ คงนะ, สมบัติการดูดซับและการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์สำหรับกรดซัลฟูริกและกรดฮิวมิกที่ละลายในน้ำ. . 2553, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
15. Jaber, M., S. Komarneni, and C. Zhou, *Synthesis of Clay Minerals*. . Developments in Clay Science, 2013.
16. Mambrini, R., et al., *Adsorption of sulfur and nitrogen compounds on hydrophobic bentonite*. . Applied Clay Science, 2014: p. 286-293.
17. Lin, M., et al., *Characterizing PAH emission concentration in ambient air during a large-scale joss paper open-burning event*. Journal of Hazardous Material, , 2008: p. 223-229.
18. Hu, T., Chen, SJ., Huang, KL., Lin, YC., Chang-Chien GP., and Tsai JH., *Characterization of polychlorinated dibenzo-p-dioxin/dibenzofuran emissions from joss paper burned in a furnace with air pollution control devices*. . Science of the Total Environment, , 2009: p. 3290–3294.
19. Yang, H., et al., *Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from joss paper furnaces*. Atmospheric Environment, , 2005: p. 3305-3312, .
20. Liang, J., et al., *Accumulation of dissolved and colloidal substances in water recycled during papermaking*. Chemical Engineering Journal, , 2011: p. 604–609.
21. Gupta, S. and K. Bhattacharyya, *Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite*. Advances in Colloid and Interface Science, , 2008: p. 114-131.

ภาคผนวก



มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย

เตาเผามูลฝอยเก่า				
สารมลพิษ	หน่วย	เตาเผามูลฝอย ที่มีกำลังการ เผาไหม้ในการ กำจัดมูลฝอย ตั้งแต่ 1 ตัน แต่ ไม่เกิน 50 ตัน ต่อวัน	เตาเผามูลฝอย ที่มีกำลังการ เผาไหม้ในการ กำจัดมูลฝอย เกินกว่า 50 ตัน ต่อวัน	วิธีตรวจวัด
1. ปริมาณฝุ่นละออง (TSP)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 120	Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources
2. ก๊าซซัลไฟด์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> )	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 30	Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือ Determination of Sulfur Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources
3. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 250	ไม่เกิน 180	Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources
4. ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCL)	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 136	ไม่เกิน 25	Determination of Hydrogen Chloride Emissions from Stationary Sources
5. สารปรอท (Hg)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 0.05	ไม่เกิน 0.05	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
6. สารแคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.05	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
7. สารตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 1.5	ไม่เกิน 0.5	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
8. ค่าสารประกอบไดออกซิน (PCDD/PCDFs)	นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คำนวณผลในรูปของหน่วยความเข้มข้นเทียบเคียงความเป็นพิษต่อมนุษย์ (PCDD/Fs as	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.5	Determination of Polychlorinated Dibenzofurans from Stationary Sources

	Toxic Equivalent ; I-TEQ)			
9. ค่าความทึบแสง (Opacity)	ร้อยละ	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 10	ด้วยแผนภูมิเขม่าควันของริงเกิล มานันท์ ทั้งนี้แบบบันทึกผลการตรวจวัด ค่าความทึบแสง และแบบ สรุปผลการตรวจวัดค่าความทึบ แสงจากปล่อง ปล่อยทิ้งอากาศเสียของเตาเผา มูลฝอย รวมทั้ง ลักษณะและ หน่วยวัดค่าความทึบแสงของ แผนภูมิ เขม่าควันของริงเกิลมานันท์
9. ค่าความทึบแสง (Opacity)	ร้อยละ	ไม่เกิน 10	ไม่เกิน 10	ด้วยแผนภูมิเขม่าควันของริงเกิล มานันท์ ทั้งนี้แบบบันทึกผลการตรวจวัด ค่าความทึบแสง และแบบ สรุปผลการตรวจวัดค่าความทึบ แสงจากปล่อง ปล่อยทิ้งอากาศเสียของเตาเผา มูลฝอย รวมทั้ง ลักษณะและ หน่วยวัดค่าความทึบแสงของ แผนภูมิ เขม่าควันของริงเกิลมานันท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
Chulalongkorn University

เตาเผามูลฝอยใหม่ และเตาเผามูลฝอยเก่าเฉพาะส่วนที่มีการขยายกิจการหลังจากวันที่ประกาศนี้มีผลใช้บังคับไว้				
สารมลพิษ	หน่วย	เตาเผามูลฝอย ที่มีกำลังการเผา ใหม่ ในการ กำจัดมูลฝอย ตั้งแต่ 1 ตัน แต่ ไม่เกิน 50 ตัน ต่อวัน	เตาเผามูลฝอย ที่มีกำลังการเผา ใหม่ ในการ กำจัดมูลฝอย เกินกว่า 50 ตัน ต่อวัน	วิธีตรวจวัด
1.ปริมาณฝุ่นละออง (TSP)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร	ไม่เกิน 320	ไม่เกิน 70	Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources

2. ก๊าซซัลไฟต์ไดออกไซด์ (SO <sub>2</sub> )	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 30	Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือ Determination of Sulfur Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources
3. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 250	ไม่เกิน 180	Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources
4. ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCL)	ส่วนในล้านส่วน	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 25	Determination of Hydrogen Chloride Emissions from Stationary Sources
5. สารปรอท (Hg)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 0.05	ไม่เกิน 0.05	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
6. สารแคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.05	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
7. สารตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่เกิน 1.5	ไม่เกิน 0.5	Determination of Metals Emissions from Stationary Sources
8. ค่าสารประกอบไดออกซิน (PCDD/PCDFs)	นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คำนวณผลในรูปของหน่วยความเข้มข้นเทียบเคียงความเป็นพิษต่อ มนุษย์ (PCDD/Fs as Toxic Equivalent ; I-TEQ)	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.1	Determination of Polychlorinated Dibenzofurans from Stationary Sources

### การเตรียมรีเอเจนต์

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N  
 ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ใส่ลงในปิ๊งเกอร์ จากนั้นตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิกรัมเพื่อละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้สารละลายเบส จากนั้นจึงเทสารละลายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
2. สารละลายไฮโดรคลอริก 0.1 N  
 ชั่งสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 จำนวน 50 มิลลิลิตร นำกรดที่เตรียมไว้ค่อยๆ เทลงในน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตรเพื่อเจือจางแล้วพักไว้เพื่อให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นเทสารละลายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
3. สารละลายเลตไนเตรด
  - เตรียมสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยทำการชั่งน้ำหนักเลตไนเตรดจำนวน 399 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิกรัม จากนั้นเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
  - เตรียมสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 160 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
  - เตรียมสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 437 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
  - เตรียมสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 428 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
  - เตรียมสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายเลตไนเตรดที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 416 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร





มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 187.5 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร

- เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีซัลไฟด์เข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 67 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร
- เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีซัลไฟด์เข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการตวงสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร



การทดสอบ ก), ข), ค), ง) และ จ) ของการทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วในสารละลายตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์

การทดลอง	ปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ (กรัม)	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	pH
ก)	0.035    0.07 0.105    0.14 0.175    0.21 0.245    0.28 0.315 และ 0.	10	60	298	4.6
ข) และ ง)	0.07	10	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200	298	4.6
ค)	0.07	1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80		298	4.6
จ)	0.07	10		303, 308, 313, 318, 323	4.6

การทดสอบ ก), ข), ค), ง) และ จ) ของการทดสอบเพื่อกำจัดซัลไฟต์ในสารละลายซัลไฟต์มอนต์  
โมริลโลไนต์

การ ทดลอง	ปริมาณมอนต์ โมริลโลไนต์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น สารละลายซัลเฟต เริ่มต้น (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (เคลวิน, K )	pH
ก)	0.035    0.07 0.105    0.14 0.175 และ 0.21	400	60	298	4.6
ข) และ ง)	0.07	400	20, 40, 60, 80, 100 และ 120	298	4.6
ค)	0.07	200, 400, 600, 800 และ 1000	60	298	4.6
จ)	0.07	400	60	303, 308, 313, 318, 323	4.6

การทดสอบ ก), ข), ค), ง) และ จ) ของการทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วและซัลไฟต์ในสารละลายโดยมอนต์โมริลโลไนต์

การทดลอง	ปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสารละลายซัลเฟตเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	pH
ก)	0.05 0.1 0.15 0.2 และ 0.25 กรัม	400	10	60	298	4.6
ข) และ ง)	0.1	400	10	20, 40, 60, 80, 100 และ 120	298	4.6
จ)	0.1	400	10		303 308 313 318 และ 323K	4.6

การทดสอบ ก), ข), ค), ง) และ จ) ของการทดสอบเพื่อกำจัดตะกั่วและซัลไฟด์ในน้ำเยื่อกระดาษ  
โดยมอนต์โมริลโลไนต์

การ ทดลอง	ปริมาณ มอนต์โมริล โลไนต์ (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ซัลเฟตเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้น สารละลาย ตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	pH
ก)	0.05 0.1 0.15 0.2 และ 0.25 กรัม	400	10	60	289	4.6
ข) และ ง)	0.1	400	10	20, 40, 60, 80, 100 และ 120	298	4.6
จ)	0.1	400	10	60	303 308 313 318 และ 323K	4.6

ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วต่อมอนด์โมริลไลไนต์

ปริมาณมอนด์โมริลไลไนต์ (กรัม)	ความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับ, qe (มิลลิกรัม/กรัม)	ร้อยละของกำจัดตะกั่ว
0.035	4.568	10.86	54.32
0.07	4.536	10.86	54.64
0.105	4.979	3.347	50.21
0.14	5.418	2.291	45.82
0.175	5.585	1.766	44.15
0.21	5.941	1.353	40.59
0.245	6.913	0.88	30.87
0.28	6.1	0.975	39.00
0.315	5.088	1.09	49.12
0.35	5.646	0.87	43.54

ผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟด์ต่อมอนต์โมริลโลไนต์

ปริมาณมอนต์โมริลโลไนต์ (กรัม)	ความเข้มข้นสมมูลของสารถูกดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับ, qe (มิลลิกรัม/กรัม)	ร้อยละของกำจัดซัลไฟด์
0.035	0.14	760.27	95.03
0.07	0.133	381.13	95.28
0.105	0.123	255.03	95.64
0.14	0.131	190.70	95.35
0.175	0.121	153.13	95.71
0.21	0.099	128.65	96.49



## ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

เวลา, t (นาที)	ความเข้มข้นสมดุล ของสารถูกดูดซับ ณ เวลา t, Ct (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถใน การดูดซับสาร ณ เวลา t, qt (มิลลิกรัม/กรัม)	ร้อยละการกำจัด ตะกั่ว
0	10	0.00	0.0
20	4.522	5.48	54.8
40	4.671	5.33	53.3
60	5.038	4.96	49.6
80	4.479	5.52	55.2
100	5.141	4.86	48.6
120	4.753	5.25	52.5
140	4.915	5.09	50.9
160	4.695	5.31	53.1
180	4.15	5.85	58.5
200	4.734	5.27	52.7



## ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับซัลไฟต์

เวลา, t (นาที)	ความเข้มข้นสมดุล ของสารถูกดูดซับ ณ เวลา t, Ct (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการ ดูดซับสาร ณ เวลา t (qt) มิลลิกรัม/กรัม	ร้อยละการกำจัด ซัลไฟต์
0	400.00	0.00	0.0
20	18.87	381.13	95.3
40	18.59	381.41	95.4
60	18.31	381.69	95.4
80	17.85	382.15	95.5
100	17.31	382.69	95.7
120	17.17	382.83	95.7



ผลการทดลองและคำนวณเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของม่อนริลโอไนต์

ความเข้มข้น สารละลายตะกั่ว เริ่มต้น, Co (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น สมดุลของสาร ถูกดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	1/qe	1/Ce	log qe	log Ce
10	2.926	0.14	0.34	0.85	0.47
20	5.22	0.07	0.19	1.17	0.72
30	8.184	0.05	0.12	1.34	0.91
40	22.39	0.06	0.04	1.25	1.35
50	29.16	0.05	0.03	1.32	1.46
60	36.95	0.04	0.03	1.36	1.57
70	38.92	0.03	0.03	1.49	1.59
80	45.26	0.03	0.02	1.54	1.66

ผลการทดลองและคำนวณเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับซัลไฟต์ของม่อนริลโอไนต์

ความเข้มข้น สารละลายซัลเฟต เริ่มต้น, $C_0$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น สมดุลของสารถูก ดูดซับ, $C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1/q_e$	$1/C_e$	$\log q_e$	$\log C_e$
200	6.67	0.0052	6.670	0.437	1.213
400	5.79	0.0025	5.790	0.385	1.311
600	4.95	0.0017	4.954	0.360	1.439
800	4.72	0.0013	4.719	0.345	1.484
1000	4.33	0.0010	4.332	0.334	1.571



ผลการคำนวณเพื่อหาจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งและสองของตะกั่วโดยมอนต์โมริลโลไนต์

เวลา, t (นาที)	$q_e - qt$	$\log(q_e - qt)$	$t/qt$
20	0.99	-0.004	4.116
40	0.89	-0.052	7.506
60	0.77	-0.116	12.092
80	0.60	-0.220	14.490
100	0.58	-0.234	20.580
120	0.55	-0.264	22.870
140	0.52	-0.283	27.532
160	0.37	-0.429	30.160
180	0.33	-0.483	30.769
200	0.00	0.000	37.979

ผลการคำนวณเพื่อหาจลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งและสองของซัลไฟต์โดยมอนต์โมริลโลไนต์

เวลา, t (นาที)	qe-qt	log(qe-qt)	t/qt
20	1.87	0.27	0.05
40	1.59	0.20	0.10
60	1.31	0.12	0.16
80	0.85	-0.07	0.21
100	0.31	-0.50	0.26
120	0.17	-0.77	0.31

เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่ว

อุณหภูมิ, T (เซลเซียส)	ความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับสาร (qe) มิลลิกรัม/กรัม	Kd = qe/Ce	log(Kd)	1/T (1/K)
30	3.683	26.32	7.15	0.85	0.00330
35	3.608	31.39	8.70	0.94	0.00325
40	3.562	36.44	10.23	1.01	0.00319
45	3.664	41.34	11.28	1.05	0.00314
50	3.037	46.96	15.46	1.19	0.00310

เทอร์โมไดนามิกของการดูดซับซัลไฟด์

อุณหภูมิ, T (เคลวิน )	ความเข้มข้น สมดุลของสารถูก ดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถใน การดูดซับสาร, qe (มิลลิกรัม/กรัม)	Kd = qe/Ce	log(Kd)	1/T
303	17.88	382.12	21.37	1.33	0.003300
308	18.87	381.13	20.19	1.31	0.003247
313	19.30	380.70	19.73	1.30	0.003195
318	19.83	380.17	19.17	1.28	0.003145
323	20.58	379.42	18.44	1.27	0.003096



ผลการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีและมียีอกระดาศในปริมาณมอดต์โมริลโลไนต์ต่าง ๆ กัน

ปริมาณมอดต์ โมริลโลไนต์ (กรัม)	ตะกั่วในสารละลาย			ตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาศ		
	ความ เข้มข้น สมดุขของ สารถูกดูด ซับ, Ce (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความสามารถ ในการดูดซับ ตะกั่วใน สารละลาย, qe (มิลลิกรัม/ กรัม)	ร้อยละของ การกำจัด ตะกั่วใน สารละลาย	ความ เข้มข้น สมดุขของ สารถูกดูด ซับ, Ce (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความสามารถ ในการดูดซับ ตะกั่วใน สารละลายที่มี เยื่อกระดาศ, qe (มิลลิกรัม/ กรัม)	ร้อยละของ การกำจัด ตะกั่วใน สารละลาย ที่มีเยื่อ กระดาศ
0.05	0.26	19.49	97.44	2.97	14.06	70.31
0.1	0.27	9.73	97.30	3.00	7.00	69.99
0.15	0.27	6.49	97.28	2.93	4.72	70.73
0.2	0.28	4.86	97.25	2.99	3.51	70.12
0.25	0.28	3.89	97.17	3.01	2.80	69.935

ผลการคำนวณค่า  $t/qt$  ของการดูดซับตะกั่วและซัลไฟต์ในสารละลายที่ไม่มีและมียีออกระดาศ

เวลา, t (นาที)	ค่า $t/qt$			
	ตะกั่วใน สารละลาย	ตะกั่วใน สารละลายที่มีเยื่อ กระดาศ	ซัลไฟต์ใน สารละลาย	ซัลไฟต์ใน สารละลายที่มีเยื่อ กระดาศ
20	2.062	0.298	0.053	0.052830
40	4.121	0.591	0.106	0.105587
60	6.167	0.886	0.158	0.158312
80	8.233	1.179	0.211	0.211321
100	10.255	1.467	0.264	0.264349

ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และทำการ  
คำนวณหาค่า  $\log(Kd)$  และ  $1/T$

อุณหภูมิ, T (เซลเซียส )	การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาศ				
	ความเข้มข้น สมดุลของสารถูก ดูดซับ, $C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถ ในการดูดซับ สาร ( $q_e$ ) มิลลิกรัม/กรัม	$Kd =$ $q_e/C_e$	$\log(Kd)$	$1/T$ (1/K)
30	0.31	9.69	31.26	1.49	0.00330
35	0.32	9.68	30.45	1.48	0.00325
40	0.33	9.67	28.90	1.46	0.00319
45	0.34	9.66	28.20	1.45	0.00314
50	0.36	9.64	26.52	1.42	0.00310



ผลการทดลองการดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และทำการ  
คำนวณหาค่า  $\log(K_d)$  และ  $1/T$

การดูดซับตะกั่วในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ					
อุณหภูมิ, T (เซลเซียส )	ความเข้มข้น สมดุลของสารถูก ดูดซับ, Ce (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถใน การดูดซับสาร, qe (มิลลิกรัม/กรัม)	Kd = qe/Ce	log(Kd)	1/T (1/K)
30	3.05	6.95	2.28	0.36	0.00330
35	3.00	7.00	2.34	0.37	0.00325
40	2.89	7.11	2.46	0.39	0.00319
45	2.76	7.24	2.62	0.42	0.00314
50	2.70	7.30	2.70	0.43	0.00310

ผลการทดลองการดูดซับซัลไฟต์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และทำการ  
คำนวณหาค่า  $\log(K_d)$  และ  $1/T$

การดูดซับซัลไฟต์ในสารละลายที่ไม่มีเยื่อกระดาษ					
อุณหภูมิ, T (เซลเซียส )	Ce	ความสามารถใน การดูดซับสาร (qe) มิลลิกรัม/ กรัม	$K_d = q_e/C_e$	$\log(K_d)$	$1/T$ (1/K)
30	21.70	378.30	17.43	1.24	0.00330
35	21.71	378.29	17.42	1.24	0.00325
40	21.80	378.20	17.35	1.24	0.00319
45	21.82	378.18	17.33	1.24	0.00314
50	21.85	378.15	17.30	1.24	0.00310

ผลการทดลองการดูดซับซัลไฟต์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และทำการ  
คำนวณหาค่า  $\log(K_d)$  และ  $1/T$

การดูดซับซัลไฟต์ในสารละลายที่มีเยื่อกระดาษ					
อุณหภูมิ, T (เซลเซียส )	Ce	ความสามารถใน การดูดซับสาร (qe) มิลลิกรัม/ กรัม	$K_d = q_e/C_e$	$\log(K_d)$	$1/T$ (1/K)
30	21.09	378.91	17.97	1.25	0.00330
35	21.14	378.86	17.92	1.25	0.00325
40	21.57	378.43	17.54	1.24	0.00319
45	22.00	378.00	17.19	1.24	0.00314
50	22.99	377.01	16.40	1.21	0.00310

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ปิยรัตน์ดา จันทราพานิชกุล

เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน 2527

จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จบการศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและสิ่งพิมพ์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัย "การลดความเป็นพิษในควันจากการเผากระดาษไหว้เจ้า"

