

การบำบัดผงตะกั่วและฝุ่นตะกั่วโดยการบำบัดน้ำ

นายดิษยพงศ์ หกสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

TREATMENT OF ALUMINUM DROSS AND ALUMINUM DUST BY INTERACTION
WITH WATER

Mr. Dissayapong Hoksuan

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดผดงตะกอนอลูมิเนียมและฟลูออรีนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ
โดย	นายดิษยพงศ์ หกสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สุวัฒน์ สูงเลิศสงฟ้า)

ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ : การบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ. (TREATMENT OF ALUMINUM DROSS AND ALUMINUM DUST BY INTERACTION WITH WATER.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. ภูมิภาณ ปัญญาพลกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 182 หน้า.

การบำบัดขั้นต้นของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเคมีและสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยา จากการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม พบว่ามีอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นสารประกอบหลักและเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดก๊าซแอมโมเนีย ในการศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะทำในถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท โดยนำผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมมาผสมกับน้ำ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วนต่างๆระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ โดยพิจารณาผลกระทบของความเร็วในการกวนผสม ผลกระทบจากความเป็นกรด-ด่าง ผลกระทบจากการเติมพลาสติกแขวนลอย ผลกระทบที่เกิดจากอุณหภูมิ และผลกระทบที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (TX-100) ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำ คือ อัตราส่วน 1:10 ความเร็วในการกวนผสม 300 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้น 26 วินาที⁻¹) อุณหภูมิ 45 °C ปริมาณพลาสติกแขวนลอย 25 กรัมต่อลิตร และปริมาณสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซแอมโมเนียร้อยละ 44.60 รวมถึงอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ที่ 0.75 และ 1.17 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ คือ อัตราส่วน 1:10 ความเร็วในการกวนผสม 300 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้น 26 วินาที⁻¹) อุณหภูมิ 25 °C และปริมาณสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซแอมโมเนียร้อยละ 8.82 รวมถึงอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ที่ 0.51 และ 2.38 วินาที⁻¹ ตามลำดับ

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270299421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ALUMINUM DROSS / ALUMINUM DUST / AMMONIA GAS / OPTIMAL
CONDITION / BATCH REACTOR

DISSAYAPONG HOKSUWAN : TREATMENT OF ALUMINUM DROSS AND
ALUMINUM DUST BY INTERACTION WITH WATER. ADVISOR : ASST. PROF.
PATIPARN PUNYAPALAKUL, CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. PISUT PAIN
MANAKUL, 182 pp.

The objective of this study was to investigate the preliminary treatment of aluminum dross/dust in order to reduce effects of by product gases when reacting with water (moisture content in environment). The physico-chemical characteristic of aluminum dross/dust were determined, as well as, its chemical reactions and the optimal reacting conditions in order to apply as the guideline for reactor design. The results showed that the aluminum dross/dust from the melting process of the aluminum industry contained high content of aluminum nitride (AlN), which produce the ammonia gas when react with water. The samples were then tested for their reactions by mixing with water in a batch reactor. Moreover, the effect of ratio between dross/dust to water, pH, mixing condition, temperature, surfactant (TX-100) and suspended plastic media was investigated in order to propose the optimal treatment condition. From the obtained results, the optimal reacting condition for treatment of the aluminum dross was the ratio of 1:10 to water, mixing speed at 300 rpm (velocity gradient 26 S^{-1}), suspended plastic concentration of 25 g/L, TX-100 of 0.1% by weight and temperature of $45 \text{ }^\circ\text{C}$. The ammonia gas production efficiency, order of reaction and reaction rate constant (k) were 44.60%, 0.75 and 1.17 s^{-1} , respectively. Moreover, the optimal reacting condition for treatment of the aluminum dust was the ratio of 1:10 to water, mixing speed at 300 rpm (velocity gradient 26 S^{-1}), TX-100 of 0.1% by weight and temperature of $45 \text{ }^\circ\text{C}$. The ammonia gas production efficiency, order of reaction and reaction rate constant (k) was 8.82%, 0.51 and 2.38 s^{-1} , respectively.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ และ ดร. สุวัฒน์ สูงเลิศสงฟ้า ที่กรุณาใช้เวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด รวมไปถึง พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนส่งเสริมการวิจัยจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุน เป็นกำลังใจและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ข้อมูลเบื้องต้น.....	6
2.2 มลพิษจากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม.....	10
2.3 ผงตะกั่วอลูมิเนียม (Aluminum dross).....	12
2.4 การออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้น.....	27
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 ตัวอย่างผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม.....	42
3.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	44
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	46

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	75
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันจากการหลอม อลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ.....	75
4.2 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา.....	87
4.3 ผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา.....	93
4.4 ผลการศึกษาการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้น.....	103
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดผงตะกรันและฝุ่น อลูมิเนียม.....	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	124
รายการอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	130
ภาคผนวก ก เอกสารผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	131
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์แอมโมเนียโดยวิธี Nesslerization และวิธีการ วิเคราะห์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธี Iodometric-Titration	134
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา.....	139
ภาคผนวก ง ข้อมูลการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นและตัวอย่างการคำนวณ.....	179
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	182

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1	สมบัติของอลูมิเนียม..... 6
ตารางที่ 2-2	อุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียม..... 8
ตารางที่ 2-3	การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษ อลูมิเนียม..... 15
ตารางที่ 2-4	การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมหลอมหล่อตะกั่ว อลูมิเนียม..... 16
ตารางที่ 2-5	ข้อมูลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำ.. 19
ตารางที่ 2-6	สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ A..... 24
ตารางที่ 2-7	วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์..... 25
ตารางที่ 2-8	องค์ประกอบเป็นร้อยละของผงตะกั่วอลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยของ Aydemir (2007)..... 27
ตารางที่ 2-9	การกระจายขนาดของผงตะกั่วอลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยของ Aydemir (2007)..... 27
ตารางที่ 2-10	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตะกั่วดำ ตะกั่วขาวและฝุ่น อลูมิเนียมของ Hwang และคณะ (2006)..... 37
ตารางที่ 2-11	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตะกั่วอลูมิเนียมของ David และ Kopac (2012)..... 38
ตารางที่ 3-1	สมบัติของสารลดแรงตึงผิว TX-100..... 45
ตารางที่ 3-2	วิธีวิเคราะห์ผงตะกั่วจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษ ทางอากาศ..... 47
ตารางที่ 3-3	สรุปตัวแปรในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา..... 53
ตารางที่ 3-4	สรุปตัวแปรในการทดสอบผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์..... 60
ตารางที่ 3-5	สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง..... 61
ตารางที่ 3-6	สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ..... 64
ตารางที่ 3-7	สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอย..... 65
ตารางที่ 3-8	สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิว..... 67

ตารางที่ 3-9	พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด เครื่องมือและวิธีการวัด.....	69
ตารางที่ 3-10	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม.....	71
ตารางที่ 3-11	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการออกแบบถังปฏิกริยา.....	74
ตารางที่ 4-1	องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม.....	76
ตารางที่ 4-2	ปริมาณอลูมิเนียมในผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม.....	76
ตารางที่ 4-3	ปริมาณโลหะและโลหะหนักในตัวอย่างผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม.....	83
ตารางที่ 4-4	ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม.....	85
ตารางที่ 4-5	สรุปข้อมูลทางกายภาพและเคมีของผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม..	86
ตารางที่ 4-6	สรุปผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกริยา.....	103
ตารางที่ 4-7	คุณภาพน้ำทิ้ง.....	107
ตารางที่ 4-8	ลักษณะสมบัติของผงตะกอนก่อนและหลังการเกิดปฏิกริยากับน้ำ.....	109
ตารางที่ 4-9	ลักษณะสมบัติของฝุ่นอลูมิเนียมก่อนและหลังการเกิดปฏิกริยากับน้ำ.....	109
ตารางที่ 4-10	สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม.....	114
ตารางที่ 4-11	การเดินระบบบำบัดแบบ SBR และระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วง.....	115
ตารางที่ 4-12	สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม.....	116
ตารางที่ 4-13	สรุปค่าจากการออกแบบถังปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียมกับน้ำ.....	116
ตารางที่ 4-14	ผลการคำนวณต้นทุนด้านพลังงาน.....	118
ตารางที่ 4-15	ผลการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมีและของแข็งแขวนลอย.....	118
ตารางที่ 5-1	สรุปข้อมูลทางกายภาพและเคมีของผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม..	120
ตารางที่ 5-2	สภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกริยาของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม.....	123
ตารางที่ 5-3	สรุปค่าจากการออกแบบถังปฏิกริยาของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม.....	123

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1-1	ปัญหาการลักลอบทิ้งฝังตะกรันอลูมิเนียม..... 2
ภาพที่ 2-1	กระบวนการหลอมหล่อเศษอลูมิเนียม..... 10
ภาพที่ 2-2	กระบวนการหลอมหล่อตะกรันอลูมิเนียม..... 11
ภาพที่ 2-3	(ก) ฝังตะกรันขาว (ข) ฝังตะกรันดำ และ (ค) ตะกรันเกลือจากการหลอม อลูมิเนียม..... 13
ภาพที่ 2-4	ป้ายแสดงสัญลักษณ์ในการขนส่ง (Placar) ของฝังตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม..... 17
ภาพที่ 2-5	หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill)..... 18
ภาพที่ 2-6	องค์ประกอบของซีโอไลต์..... 23
ภาพที่ 2-7	สมดุลมวล..... 27
ภาพที่ 2-8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาอันดับศูนย์..... 30
ภาพที่ 2-9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง..... 31
ภาพที่ 2-10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ กับเวลาของปฏิกิริยาอันดับสอง..... 32
ภาพที่ 2-11	กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k)..... 33
ภาพที่ 2-12	สมมติฐานในการออกแบบถังปฏิกิริยาแบบท่อไหล 34
ภาพที่ 2-13	ฝังตะกรันดำ (Black dross) และฝังตะกรันขาว (White dross)..... 36
ภาพที่ 2-14	แบบจำลองถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองของ Johansen และคณะ (2004).... 39
ภาพที่ 3-1	ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบที่ละเท..... 41
ภาพที่ 3-2	พลาสติกแขวนลอย (ก) ชนิดสี่เหลี่ยม (ข) ชนิดทรงกลม..... 42
ภาพที่ 3-3	วิธีการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินและกากของเสียตาม US EPA METHOD 9045D..... 49
ภาพที่ 3-4	วิธีการย่อยตัวอย่างด้วยกรดตามวิธีของ US EPA METHOD 3050B..... 51
ภาพที่ 3-5	ชุดทดลองแบบที่ละเท (Batch Reactor) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยรวม..... 55
ภาพที่ 3-6	ขั้นตอนการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม..... 55
ภาพที่ 3-7	ชุดทดลองแบบที่ละเท (Batch Reactor) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ แต่ละชนิด..... 56

ภาพที่ 3-8	ขั้นตอนการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด.....	56
ภาพที่ 3-9	ความสามารถในการละลายของก๊าซแอมโมเนียที่พีเอชต่างๆ.....	57
ภาพที่ 3-10	ความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พีเอชต่างๆ.....	58
ภาพที่ 3-11	ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา.....	59
ภาพที่ 3-12	ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์.....	60
ภาพที่ 3-13	ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง.....	62
ภาพที่ 3-14	ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	63
ภาพที่ 3-15	ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอย.....	66
ภาพที่ 3-16	ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิว.....	68
ภาพที่ 3-17	ขั้นตอนการศึกษาความเร็วในการตกตะกอน.....	70
ภาพที่ 3-18	ขั้นตอนการทดลองการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสม.....	72
ภาพที่ 3-19	กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k).....	73
ภาพที่ 4-1	องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกั่วจากการหลอมอลูมิเนียม (1).....	78
ภาพที่ 4-2	องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกั่วจากการหลอมอลูมิเนียม (2).....	79
ภาพที่ 4-3	องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (1).....	80
ภาพที่ 4-4	องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (2).....	81
ภาพที่ 4-5	องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (3).....	82
ภาพที่ 4-6	ปริมาตรก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวมสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ.....	88
ภาพที่ 4-7	ปริมาตรก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวมสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ.....	88
ภาพที่ 4-8	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ.....	91
ภาพที่ 4-9	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ.....	91
ภาพที่ 4-10	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ความเร็วเกรเดียนท์ต่างๆ.....	94

ภาพที่ 4-11	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ความเร็วเกรเดียนท์ต่างๆ.....	95
ภาพที่ 4-12	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	97
ภาพที่ 4-13	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	97
ภาพที่ 4-14	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดสี่เหลี่ยม.....	99
ภาพที่ 4-15	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดวงกลม.....	99
ภาพที่ 4-16	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดสี่เหลี่ยม.....	101
ภาพที่ 4-17	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดวงกลม.....	101
ภาพที่ 4-18	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมสารลดแรงตึงผิว.....	103
ภาพที่ 4-19	ถังปฏิกิริยาแบบเอสปีอาร์.....	104
ภาพที่ 4-20	ถังปฏิกิริยาแบบ CSTR.....	105
ภาพที่ 4-21	ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม.....	106
ภาพที่ 4-22	ปริมาณไนโตรเจนสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม.....	110
ภาพที่ 4-23	ปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในผงตะกั่วอลูมิเนียม ณ เวลาต่างๆ.....	111
ภาพที่ 4-24	ปริมาณไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ณ เวลาต่างๆ.....	112
ภาพที่ 4-25	ปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในฝุ่นอลูมิเนียม ณ เวลาต่างๆ.....	112
ภาพที่ 4-26	ถังปฏิกิริยาสำหรับบำบัดผงตะกั่วอลูมิเนียม.....	114

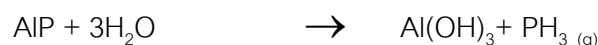
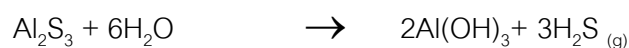
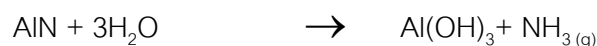
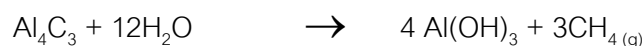
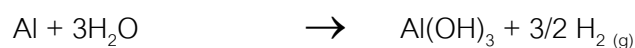
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวิธีการแก้ไขปัญหกากของเสียในอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ คือ วิธีการฝังกลบในหลุมฝังกลบ (Landfilling) กระบวนการฝังกลบในหลุมฝังกลบนั้น เป็นขั้นตอนลำดับสุดท้ายของกากของเสียทุกประเภทในโลกที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาว เช่น การปนเปื้อนของสารเคมีจากหลุมฝังกลบในดินและน้ำใต้ดิน การรั่วของก๊าซพิษหรือก๊าซเรือนกระจกจากหลุมฝังกลบเนื่องจากกากของเสียเกิดการทำปฏิกิริยา เป็นต้น นอกจากนี้ในการดูแลรักษาหลุมฝังกลบและติดตามตรวจสอบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมีค่าใช้จ่ายสูง รวมทั้งพื้นที่ในการก่อสร้างหลุมฝังกลบมีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากปัญหาการไม่ยอมรับหลุมฝังกลบของประชาชนในพื้นที่ล้อมรอบหลุมฝังกลบ (Not in my backyard: NIMBY) จากเหตุผลทั้งหมดนั้นทำให้ค่ากำจัดกากของเสียในหลุมฝังกลบนั้นมีราคาสูง ทำให้เกิดการลักลอบทิ้งกากของเสียในพื้นที่สาธารณะ (Midnight dumping) หรือฝังกลบกากของเสียในหลุมฝังกลบที่ไม่ได้มาตรฐานมากขึ้น ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีหรือสารพิษในสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อประชาชนและสิ่งมีชีวิตในพื้นที่นั้นได้

ผดุงตระหนักจากการหลอมอลูมิเนียมก็จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่มีปัญหาลักลอบทิ้ง(แสดงในภาพที่ 1-1) มากเช่นกัน ผดุงตระหนักอลูมิเนียมสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้รุนแรง และเมื่อสัมผัสกับน้ำอาจก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนและทำให้เกิดการลุกติดไฟได้ โดยที่ปฏิกิริยาทางเคมีที่สามารถเกิดขึ้นในขั้นต้นนั้น (Unger และ Beckmann, 1992) สามารถสรุปได้ดังนี้





ภาพที่ 1-1 ปัญหาการลักลอบทิ้งผงตะกรันอลูมิเนียม
(ที่มา : <http://www.mfssystems.com/cooler.php>)

ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในแต่ละปีมีปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียมประมาณ 30,000 ตันต่อปี จากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมากนี้ จึงทำให้ตะกรันจากเตาหลอมอลูมิเนียมและของเสียอื่นๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆดังที่ได้กล่าวไปแล้ว รวมไปถึงปัญหาการลักลอบทิ้งของเสียอย่างผิดกฎหมาย

จากการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆและสอบถามกับทางผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอลูมิเนียม พบว่าอุตสาหกรรมอลูมิเนียมแต่ละประเภทจะให้ผงตะกรันอลูมิเนียมที่มีสมบัติและลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ต่างกัน เนื่องจากการเติมสารเคมีที่ใช้ปรับสมบัติของอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของลูกค้า ทำให้องค์ประกอบและลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกและทางเคมีของผงตะกรันที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและความชื้นในอากาศมีความคล้ายคลึงกันและส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านมลพิษและการจัดเก็บและขนส่งเช่นเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษารลดผลกระทบของปฏิกิริยาระหว่างผงตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำที่ก่อให้เกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ต่างๆดังที่ได้กล่าวแล้วในขั้นต้น นอกจากนี้จากการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถระบุชนิดและปริมาณการเกิดก๊าซบางชนิดที่เป็นก๊าซพลังงานซึ่งถ้าเกิดขึ้นในปริมาณมากเพียงพอ อาจเป็นอีกหนทางหนึ่งในการเก็บรวบรวมนำก๊าซเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งเป็น การนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง ในงานวิจัยนี้

ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทั้งในแง่ของอัตราส่วนระหว่างน้ำกับของเสีย ความเร็วเกรเดียนท์ในการปั่นกววน และการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยคาดหวังว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจะช่วยกำจัดก๊าซพิษให้หมดไปได้อย่างรวดเร็วหรือเกิดก๊าซพลังงานในปริมาณมาก เพื่อที่จะนำผงตะกัณอลูมิเนียมไปใช้ประโยชน์หรือนำไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบแบบสุขาภิบาลได้อย่างปลอดภัย เป็นการลดปัญหาการลักลอบทิ้งและลดปัญหาที่จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของผงตะกัณได้ด้วย ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้น เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจจะทำการศึกษาต่อหรือผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมได้นำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.2.2 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีของผงตะกัณจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของผงตะกัณจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.2.4 ศึกษาแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยา เพื่อบำบัดพิษและกักเก็บก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของผงตะกัณจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.2.5 ศึกษาต้นทุนขั้นต้นของการบำบัดผงตะกัณจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัย ดังนี้

1.3.1 ผงตะกักรันจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากระบบการหลอมอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง ได้จากการเก็บตัวอย่างจากบริษัท ไดกิ อลูมิเนียม อินดัสทรี (ประเทศไทย) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร 700/99 หมู่ที่ 1 ตำบลบ้านเก่า อำเภอพานทองจังหวัดชลบุรี 20160 ประเทศไทย ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอลูมิเนียม

1.3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกักรันอลูมิเนียม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก ปริมาณโลหะหนัก องค์ประกอบซัลเฟอร์ และปริมาณผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างผงตะกักรันอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศกับน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย ปริมาณก๊าซมีเทน และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.3.4 การทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงตะกักรันจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศกับน้ำ โดยทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:5 1:10 และ 1:15 ตามลำดับ

1.3.5 การศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการปั่นกวนที่มีผลต่อการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา ศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอยที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา และศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้นี้หาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป

1.3.6 การศึกษาผลกระทบของความเร็วในการปั่นกวนที่มีผลต่อการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองในช่วงความเร็วเกเดียนท์ 0-50 วินาที¹ การศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา จะทำการทดลองโดยปรับสภาพน้ำให้มีค่าพีเอชเป็น 4 6 และ 8 ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา จะทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25 29 35 และ 45 °ซ ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอยที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา จะทำการทดลองโดยการใส่พลาสติกพีวีซี 2 ชนิดคือ ชนิดสีเหลืองและชนิดทรงกลมเข้าไปในถังปฏิกิริยา และการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการ

เกิดปฏิกิริยา จะทำการทดลองโดยเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมลงในถังปฏิกิริยา

1.3.7 ประเภทของถังปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในการนำมาใช้ออกแบบ มีดังนี้ ถังปฏิกิริยาชนิดเทแบบต่อเนื่อง (Sequencing Batch Reactor) และถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมที่ไหลสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor)

1.3.8 การคำนวณต้นทุนการบำบัดจะพิจารณาเฉพาะต้นทุนในการเดินระบบ (ไม่พิจารณาต้นทุนการก่อสร้างและต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย) และพิจารณาเฉพาะสภาวะที่บำบัดผงตะกอนและฟลูออไมเนียมได้ดีที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แนวทางการบำบัดกากอลูมิเนียมเบื้องต้นเพื่อส่งเสริมและพัฒนาการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียมและฟลูออไมเนียมจากระบบควบคุมมลพิษอากาศจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม

1.4.2 ทราบอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate) สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงตะกอนอลูมิเนียมและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยา

1.4.3 ทราบถึงต้นทุนเบื้องต้นในการเดินระบบ และสามารถเปรียบเทียบต้นทุนดังกล่าวกับกระบวนการบำบัดวิธีอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีสำหรับบำบัดของเสียได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลเบื้องต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552 : ออนไลน์)

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอลูมิเนียมได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย เพราะอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเด่น คือ มีความแข็งแรงทนทาน แต่น้ำหนักเบาและต่อต้านการออกซิเดชันได้ดี ทำให้อลูมิเนียมมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกเป็นอย่างมาก

2.1.1 แหล่งกำเนิดอลูมิเนียม

อลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 3 ที่อยู่ในเปลือกโลก แต่อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นได้ดี ดังนั้นเราจึงไม่พบอลูมิเนียมในรูปของโลหะบริสุทธิ์ในธรรมชาติ อลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ที่เป็นผงแร่ต่างๆ วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตอลูมิเนียม คือ สินแร่บ็อกไซต์ (Bauxite) มีลักษณะคล้ายดินแดงหรือดินลูกรัง แต่มีความแข็งกว่า แร่บ็อกไซต์เกิดจากการที่ซิลิกาในหินที่มีอลูมิเนียมอยู่มาก ถูกชะล้างออกไป ในสินแร่บ็อกไซต์จะมีดินเหนียวบริสุทธิ์ (Al_2O_3 = อลูมิเนียมออกไซด์) ปนอยู่ประมาณ 55-60% เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่เกิน 24% และน้ำในโมเลกุลสินแร่ประมาณ 12-31% แร่ซิลิกา (SiO_2) ไม่เกิน 4%

2.1.2 สมบัติของอลูมิเนียม

อลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท สมบัติต่างๆของอลูมิเนียมแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สมบัติของอลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552 : ออนไลน์)

สมบัติ	รายละเอียด	หมายเหตุ
1. ความหนาแน่น	มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาและมีกำลัง	2.70 กรัม/ซม. ³
2. ความยืดหยุ่น	วัสดุต่อหน่วย (Strength-to-weight ratio) สูง ยึดตัวได้ง่ายและมีความเหนียวมากทำให้สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆได้ง่ายโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก	Young's modulus = 70 กิโลปาสกาล (GPa)

ตารางที่ 2-1 สมบัติของอลูมิเนียม (ต่อ)

สมบัติ	รายละเอียด	หมายเหตุ
3. จุดหลอมเหลว	มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีคุณสมบัติการไหลของน้ำโลหะที่ดี ทำให้สามารถหล่อขึ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย	จุดหลอมเหลว 660.2 °ซ จุดเดือด 2,450 °ซ
4. ความทนทาน	ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในสภาพภูมิอากาศของการใช้งานทั่วไปได้ดีมาก	Brinell hardness test = 245 เมกะปาสกาล (MPa)
5. การสะท้อนแสง	ผิวหน้าของอลูมิเนียมบริสุทธิ์มีดัชนีการสะท้อนกลับของแสงสูง	การสะท้อนแสง - แสงจากหลอดทั้งสแตน 90% - แสง 2,000-2,500 °A 86-87%
6. การนำไฟฟ้า	ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงถูกนำไปใช้เป็นสายไฟแรงสูงขนาดใหญ่	- แสง 10,000 °A 96% 64.94% IACS
7. การนำความร้อน	มีค่าการนำความร้อนสูง	การนำความร้อน (ที่ 300 เคลวิน) = 237 W/(m•K)
8. ความเป็นพิษ	เป็นโลหะที่ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย ทำให้เหมาะสมกับการใช้ทำเป็นภาชนะหุงต้มหรือหีบห่อรองรับอาหาร	Oral MRL = 2 มก./กก./วัน Inhalation MRL = N/A LD ₅₀ = N/A
9. อื่นๆ	สามารถผสมกับโลหะอื่นๆได้ เช่น ทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียมหรือสังกะสี ซึ่งโลหะผสมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเลือกใช้งานได้อย่างกว้างขวาง	

2.1.3 การผลิตอลูมิเนียม

กระบวนการผลิตอลูมิเนียมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 อุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

ประเภทอุตสาหกรรม	รายละเอียด	ผลผลิต
1. อุตสาหกรรมต้นน้ำ	นำสินแร่บอกไซต์มาผ่านการถลุงแร่จนได้ผงอลูมิเนียม เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมขั้นต่อไป	ผงอลูมิเนียม
2. อุตสาหกรรมกลางน้ำ	แยกโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ออกจากผงอลูมิเนียม ด้วยกรรมวิธีถลุงแร่ด้วยไฟฟ้า (Electrolysis Process) ในเตาหลอมไฟฟ้าขนาดใหญ่	อลูมิเนียมบริสุทธิ์
2.1 การหลอมหล่ออลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิ	นำอลูมิเนียมแท่งที่ได้จากการถลุงแร่ขั้นปฐมภูมิ	แท่งอลูมิเนียม
2.2 การหลอมหล่ออลูมิเนียมขั้นทุติยภูมิ	นำอลูมิเนียมแท่งที่ได้มาจากการแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมที่ใช้แล้วหรือเศษอลูมิเนียมเก่ากลับมาผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรม แยกสิ่งปนเปื้อนออกไปมาทำการหลอม และหล่อแบบ โดยในขั้นตอนนี้อาจจะเติมสารเคมีหรือธาตุโลหะต่างๆ เพื่อปรับแต่งคุณภาพของอลูมิเนียมให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปและการใช้งานได้ดีขึ้น	ผลิตภัณฑ์อลูมิเนียม
3. อุตสาหกรรมปลายน้ำ	การนำแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากอุตสาหกรรมกลางน้ำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน	ผลิตภัณฑ์อลูมิเนียม
3.1 การหล่อแบบ	การขึ้นรูปโลหะโดยการทำให้น้ำโลหะแข็งตัวภายในแบบหล่อเป็นรูปทรงตามต้องการ นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ ล้อแม็กซ์ ลูกสูบ เป็นต้น	
3.2 การรีดตี	นำอลูมิเนียมแท่งยาว (Billet) มาอบจนได้อุณหภูมิตามต้องการ จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องอัดไฮดรอลิกซึ่งจะอัดแท่งโลหะผ่านรูของแม่พิมพ์ (Die) ออกมาเป็นเส้นรูปทรงหน้าตัดต่างๆ ตามลักษณะภาคตัดขวางของแม่พิมพ์ นิยมใช้ในการผลิตอลูมิเนียมเส้น หน้า	

ตารางที่ 2-2 อุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียม (ต่อ)

ประเภทอุตสาหกรรม	รายละเอียด	ผลผลิต
3.3 การรีดแผ่น	ตัดต่างๆ เช่น กรอบประตูหน้าต่าง เป็นต้น นำอลูมิเนียมแท่งแบน (Slab) มาอบในเตา จนได้ อุณหภูมิตามต้องการแล้ว จึงเข้าสู่เครื่องรีดเพื่อลด ขนาด นิยมใช้ในการผลิตแผ่นอลูมิเนียม	

หมายเหตุ ประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่บ็อกไซต์ (Bauxite) จึงไม่มีการผลิตอลูมิเนียมขั้นปฐมภูมิการผลิตภายในประเทศทั้งหมด เป็นการผลิตในขั้นทุติยภูมิ

2.1.4 การนำอลูมิเนียมไปใช้งาน

อลูมิเนียมถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท ดังนี้

2.1.4.1 อุตสาหกรรมการขนส่ง

อลูมิเนียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมขนส่งทั้งทางบก ทางน้ำและทางอากาศ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน (ร้อยละ 80 ของน้ำหนักเครื่องบิน) รถยนต์ เรือและรถไฟ เป็นต้น เนื่องจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักเบาจึงลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มประสิทธิภาพทางความเร็วได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทนทานไม่จับสนิม ยานพาหนะที่ใช้อลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบจึงสิ้นเปลืองค่าบำรุงรักษาน้อยกว่าและมีอายุการใช้งานที่นานกว่า

2.1.4.2 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

อลูมิเนียมถูกนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น กระจับองน้ำอัดลม อาหารกระป๋องต่างๆ เครื่องใช้ในครัวเรือน บรรจุภัณฑ์ของยาและเครื่องสำอาง เป็นต้น เนื่องจากสามารถรักษาคุณค่าของอาหารโดยไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสิ่งที่บรรจุและสามารถปกป้องสิ่งที่ถูกบรรจุให้พ้นการปนเปื้อนจากน้ำ อากาศ แสงแดด กลิ่นหรือแบคทีเรียต่างๆได้ ไม่ขึ้นสนิม อีกทั้งให้ความสะดวกในการขนส่งเนื่องจากความแข็งแรงและน้ำหนักเบา

2.1.4.3 อุตสาหกรรมก่อสร้าง

อลูมิเนียมได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุหลักของวัสดุใช้ในการก่อสร้างและตกแต่งบ้านแทบทุกประเภท เนื่องจากคุณสมบัติของความคงทนมีน้ำหนักเบา มีความสามารถสะท้อนแสงและความร้อนได้ดี

2.1.4.4 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้า

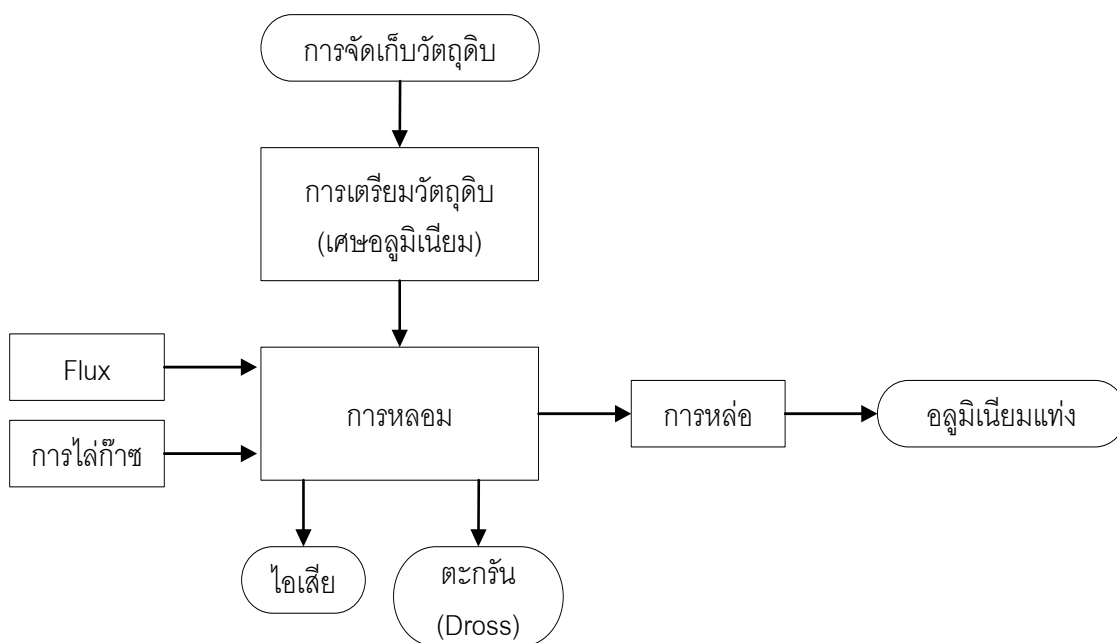
อลูมิเนียมถูกนำมาใช้เป็นสื่อไฟฟ้าทดแทนทองแดง เนื่องจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักเพียงหนึ่งในสามของทองแดง และเป็นสื่อนำไฟฟ้าที่ดีคงทนน้ำหนักเบาและไม่ขึ้นสนิม

2.1.4.5 อุตสาหกรรมยาและการบำบัดน้ำ

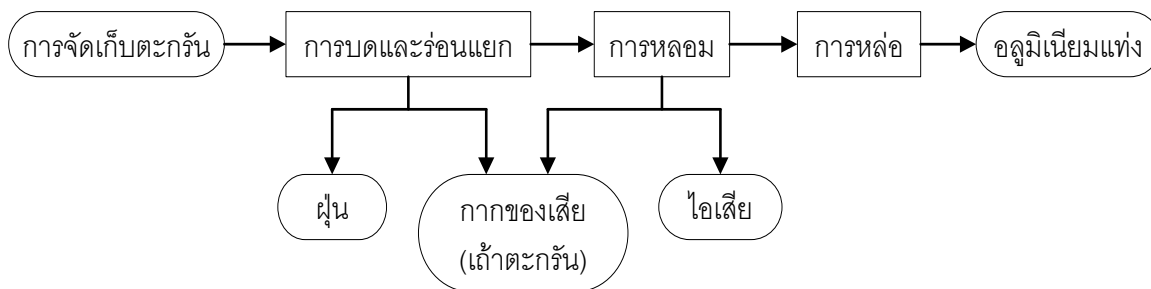
สารประกอบอลูมิเนียมถูกใช้เป็นส่วนประกอบเพื่อประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ในอุตสาหกรรมยาสารประกอบอลูมิเนียมที่เป็นยา ได้แก่ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และอลูมิเนียมคลอไรด์ ส่วนอลูมิเนียมซัลเฟตถูกใช้ในอุตสาหกรรมการบำบัดน้ำ เป็นต้น

2.2 มลพิษจากอุตสาหกรรมอลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552 : ออนไลน์)

ในปัจจุบันอลูมิเนียมได้ถูกนำไปใช้ในหลายๆ อุตสาหกรรมดังที่แสดงในหัวข้อที่ผ่านมา และจากการใช้อลูมิเนียมในปริมาณมากขึ้น ทำให้เกิดมลพิษจากอุตสาหกรรมอลูมิเนียมมากขึ้นเช่นกัน โดยเฉพาะกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอลูมิเนียมที่ก่อให้เกิดมลพิษต่างๆ ที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม ดังภาพที่ 2-1 และ 2-2 มลพิษที่เกิดขึ้นถูกแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้



ภาพที่ 2-1 กระบวนการหลอมหล่อเศษอลูมิเนียม



ภาพที่ 2-2 กระบวนการหลอมหล่อตะกั่วอลูมิเนียม

2.2.1 มลพิษทางน้ำ

น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นกรดและมีฝุ่นเจือปน หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และระบบนิเวศน์ แต่การหลอมหล่อเศษและตะกั่วอลูมิเนียมไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่จำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียไว้รองรับ ดังนั้นจะแก้ไขโดยเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำให้เป็นกลางและช่วยในการตกตะกอน

2.2.2 มลพิษทางอากาศ

1. เกิดฝุ่นที่เครื่องบดและตะแกรงร่อนตะกั่ว ส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกาย อาจเกิดโรคทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ฝุ่นละอองยังทำให้เกิดความสกปรกต่ออาคาร บ้านเรือนอีกด้วย ฝุ่นเหล่านี้กำจัดโดยใช้ระบบดักฝุ่นแบบถุงกรอง และใช้เครื่องดูดฝุ่นแบบเคลื่อนที่ได้ดูดฝุ่นรวมไว้แล้วนำไปกำจัด หรือใช้ตู้ดูดอากาศเสียแบบแขวนคลุมไว้ด้านบน (Canopy hood) ที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับดูดฝุ่นเข้าระบบบำบัด

2. เกิดฝุ่นและฟุ้ง (Fume) ของโลหะที่เตาหลอม ส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกาย อาจเกิดโรคทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ฝุ่นละอองยังทำให้เกิดความสกปรกต่ออาคาร บ้านเรือนอีกด้วย กำจัดโดยใช้ไซโคลนตามด้วยระบบดักฝุ่นแบบถุงกรอง หรือใช้สครับเบอร์แบบบรรจุวัสดุ

3. เกิดก๊าซต่างๆจากเตาหลอม ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ซึ่งเป็นก๊าซอันตรายที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพร่างกายและสิ่งแวดล้อม เช่น ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (จากก๊าซเรือนกระจก) และทำให้เกิดฝนกรด เป็นต้น แก้ไขโดยเลือกใช้เชื้อเพลิงที่ให้มลพิษน้อย เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาที่มีกำมะถันต่ำ เป็นต้น หลีกเลี่ยงการหลอมเศษอลูมิเนียมที่มีสีหรือน้ำมันติดอยู่ การไล่ก๊าซควรแทนที่ก๊าซที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น คลอรีน ฟลูออรีน ด้วยก๊าซ

เฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือส่วนผสมของก๊าซเฉื่อย และก๊าซที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อลดปริมาณมลพิษอากาศที่ระบายออกใช้ตู้ดูดอากาศเสียแบบแขวนคลุมไว้ด้านบน (Canopy hood) ที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับดูดก๊าซต่างๆเข้าระบบบำบัด

4. ตะกั่วอนุมิเนียมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดก๊าซแอมโมเนีย และก๊าซมีเทนขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย เมื่อสูดดมที่ความเข้มข้นสูงๆ นอกจากนี้มีเทนเป็นก๊าซที่ติดไฟได้ อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุจากการเกิดไฟไหม้หรือการระเบิดได้ และมีเทนยังเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลให้เกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย

2.2.3 มลพิษจากกากอุตสาหกรรม

1. เกิดตะกั่ว (Dross) ที่เตาหลอม สามารถนำไปแยกอนุมิเนียมกลับคืนมาใช้ใหม่ได้ ส่วนตะกั่วที่ใช้ไม่ได้แล้วจะกำจัดด้วยการฝังกลบอย่างปลอดภัยหรือส่งให้โรงงานผู้ให้บริการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม

2. เกิดกากตะกอนจากสครับเบอร์แบบบรรจุวัสดุ (Packed bed scrubber) กำจัดโดยฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลหรือฝังกลบอย่างปลอดภัย ขึ้นอยู่กับผลวิเคราะห์ว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่เป็นของเสียอันตราย หรือส่งให้โรงงานผู้ให้บริการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม

จากการเติบโตของอุตสาหกรรมอนุมิเนียมที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มลพิษต่างๆที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมีปริมาณมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะตะกั่วอนุมิเนียมที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ควรให้ความสนใจและศึกษา เพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมอีกครั้ง เพราะจะช่วยประหยัดทรัพยากรและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มค่าให้กับของเสียและลดปริมาณของเสียที่จะต้องกำจัดอีกด้วย

2.3 มงตะกั่วอนุมิเนียม (Aluminum dross)

ในประเทศไทยมีกฎหมายเกี่ยวกับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะต้องดำเนินการตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.

2.3.1 ประเภทของผงตะกรันอลูมิเนียม

ผงตะกรันอลูมิเนียมสามารถจำแนกประเภทได้ตามสัดส่วนปริมาณของอลูมิเนียมที่เป็นองค์ประกอบแบ่งเป็น 3 ประเภท (Manfredi และคณะ, 1997) ได้แก่

1. ผงตะกรันขาว (White หรือ Wet Dross) คือ ผงตะกรันที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมสูงประมาณมากกว่าร้อยละ 70 มักมีลักษณะอัดตัวกันแน่นเป็นแท่ง ตะกรันชนิดนี้เกิดจากอุตสาหกรรมการถลุงแร่อลูมินาจากสินแร่บ็อกไซต์ ซึ่งไม่มีอยู่ในประเทศไทย
2. ผงตะกรันดำ (Black หรือ Dry Dross) เป็นผงตะกรันที่มีองค์ประกอบของโลหะอิสระ (Free Metal) น้อย ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปเม็ดขนาดเล็ก (Granular) ส่วนประกอบที่เป็นโลหะมักจะอยู่ในรูปของออกไซด์ (Oxide) ตะกรันในส่วนนี้เกิดจากอุตสาหกรรมการหลอมแร่อลูมินา เพื่อขึ้นรูปเป็นอลูมิเนียมแท่ง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมต่างๆ ต่อไป
3. ตะกรันเกล็ดที่มักจะอยู่ในรูปของผงละเอียด (Fines) มีส่วนประกอบของอลูมิเนียมในสัดส่วนต่ำมาก ตะกรันเกล็ดนี้เกิดจากการนำผงตะกรันดำกลับมาหลอม เพื่อนำอลูมิเนียมที่เป็นส่วนประกอบในตะกรันดำกลับมาใช้ใหม่

ลักษณะของผงตะกรันขาว ตะกรันดำและตะกรันเกล็ด แสดงดังในภาพที่ 2-3



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2-3 (ก) ผงตะกรันขาว (ข) ผงตะกรันดำ และ (ค) ตะกรันเกล็ดจากการหลอมอลูมิเนียม

(ที่มา : Aluminum Recovery Technologies, 2008 : ออนไลน์)

2.3.2 วิธีการจัดการผงตะกรันอลูมิเนียมในปัจจุบัน

ในประเทศไทยมีกฎหมายเกี่ยวกับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะต้องดำเนินการตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ซึ่งแนวทางในการจัดการกากของเสียสำหรับอุตสาหกรรมหลอมหล่อโลหะและตะกรันอลูมิเนียม ดังตารางที่ 2-3 และ ตารางที่ 2-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-3 การจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษอลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548 : ออนไลน์)

ชนิดและประเภทของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว			การจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว			
รหัส	ชื่อ	ความเป็นอันตราย	วัตถุบิทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์	เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล	ปรับสภาพและฝังกลบอย่างปลอดภัย
10 03 09 (HM)	ตะกรันจากเตาหลอมเศษอลูมิเนียม	อันตราย	✓	✓		✓
10 03 23 (HM)	ฝุ่นที่ดักจับได้จากไซโคลนและระบบดักฝุ่นแบบถุงกรองที่มีสารอันตราย	อันตราย	✓			✓
10 03 24	ฝุ่นที่ดักจับได้จากไซโคลนและระบบดักฝุ่นแบบถุงกรอง	ไม่อันตราย	✓		✓	
10 03 25 (HM)	กากตะกอนในบ่อน้ำใช้หมุนเวียนของสกรับเบอร์ที่มีสารอันตราย	อันตราย				✓
10 03 26	กากตะกอนในบ่อน้ำใช้หมุนเวียนของสกรับเบอร์	ไม่อันตราย			✓	

ตารางที่ 2-4 การจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสำหรับอุตสาหกรรมหลอมหล่อตะกรันอลูมิเนียม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548 : ออนไลน์)

ชนิดและประเภทของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว			การจัดการสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว			
รหัส	ชื่อ	ความเป็นอันตราย	วัตถุติดทนแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์	เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล	ปรับสภาพและฝังกลบอย่างปลอดภัย
10 03 08 (HA)	กากตะกรันจากเตาหลอมตะกรัน	อันตราย	✓			✓
10 03 21 (HM)	กากที่ได้จากการบดและร่อนตะกรัน	อันตราย				✓
10 03 23 (HM)	ฝุ่นที่ดักจับได้จากไซโคลนและระบบดักฝุ่นแบบถุงกรองที่มีสารอันตราย	อันตราย	✓			✓
10 03 24	ฝุ่นที่ดักจับได้จากไซโคลนและระบบดักฝุ่นแบบถุงกรอง	ไม่อันตราย	✓		✓	
10 03 25 (HM)	กากตะกอนในบ่อน้ำใช้หมุนเวียนของสครับเบอร์ที่มีสารอันตราย	อันตราย				✓
10 03 26	กากตะกอนในบ่อน้ำใช้หมุนเวียนของสครับเบอร์	ไม่อันตราย			✓	

ในประเทศไทยได้มีการกำหนดไว้อย่างชัดเจนว่าของเสียในกลุ่มผงตะกอนจากการหลอมอลูมิเนียมนั้นเข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากเป็นของเสียที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้รุนแรง และก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีความชื้นสามารถลุกติดไฟได้ นอกจากนี้ผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมยังถูกจัดให้เป็นของเสียอันตรายตามข้อกำหนดขององค์การสหประชาชาติโดยมีหมายเลข UN (UN Number) คือ 3170 และมีประเภทความเป็นอันตราย (Hazard Class) จัดอยู่ในประเภทที่ 4.3 คือ วัสดุที่เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะเกิดก๊าซไวไฟหรือก๊าซพิษ อาจก่อให้เกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดได้ อาจก่อให้เกิดสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อร่างกายก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้ หากมีการสัมผัสหรือสูดดมในปริมาณมาก (PHMSA, 2008 : online) โดยมีป้ายแสดงสัญลักษณ์ในการขนส่ง (Placar) ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ป้ายแสดงสัญลักษณ์ในการขนส่ง (Placar) ของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม

(Kenneth L Barbalace (J.K. Barbalace, inc), 2001 : online)

การจัดการและกำจัดผงตะกอนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) ดังแสดงในภาพที่ 2-5 โดยในการฝังกลบ (Landfill) จะต้องนำของเสียไปปรับเสถียรหรือทำลายฤทธิ์และนำไปฝังกลบ ซึ่งการฝังกลบจะเป็นการกำจัดของเสียขั้นสุดท้าย มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างต่ำ แต่ต้องจัดหาพื้นที่เป็นบริเวณกว้างไว้รองรับ ต้องมีการดูแลและอาจต้องฟื้นฟูพื้นที่ในอนาคต (ค่าใช้จ่าย) และต้องมีการตรวจวัดและจัดการน้ำชะขยะ (Landfill Leachate) และก๊าซ (Landfill Gases) เช่น CO_2 , CH_4 และ VOCs เป็นต้น



ภาพที่ 2-5 หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill)

(Prasatha Pamunah Limbah Industry, 2008 : online)

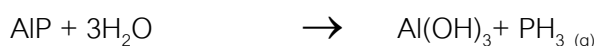
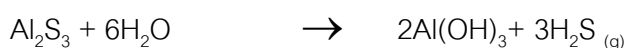
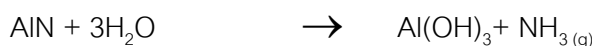
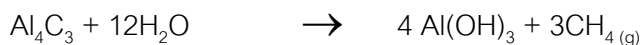
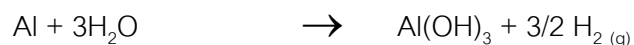
2.3.3 ปริมาณผงตะกอนจากการหลอมอลูมิเนียมในประเทศไทย

จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2553 มีปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียมประมาณ 30,000 ตันต่อปี จากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมากนี้ จึงทำให้ตะกอนจากเตาหลอมเศษอลูมิเนียมและของเสียอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว รวมไปถึงปัญหาการลักลอบทิ้งของเสียอย่างผิดกฎหมาย อย่างไรก็ตาม ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นมากในแต่ละปี ยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่จะมีปริมาณเพียงพอในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน เป็นต้น

2.3.4 ปัญหาของผงตะกอนอลูมิเนียมในปัจจุบัน

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้พูดถึงการกำจัดตะกอนอลูมิเนียมอย่างถูกวิธีไปแล้ว แต่ถ้ามีการจัดการตะกอนอลูมิเนียมไม่ถูกสุขลักษณะ เช่น การลักลอบทิ้งผงตะกอนอลูมิเนียมหรือนำตะกอนอลูมิเนียมไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) ที่ไม่มีการระบายก๊าซและระบายน้ำจากหลุมฝังกลบที่ดีจะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนอลูมิเนียมที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถคาดการณ์ปฏิกิริยาทางเคมีที่อาจเกิดขึ้น

ระหว่างองค์ประกอบของผงตะกั่วอะลูมิเนียมและน้ำ ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการได้ ดังนี้ (Shen และ Forsberg, 2003 และ Shinzato และ Hypolito, 2005)



จากสมการข้างต้นจะพบว่า การเกิดปฏิกิริยาของตะกั่วอะลูมิเนียมกับน้ำ จะเกิดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) และก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งจัดเป็นก๊าซอันตราย ดังแสดงข้อมูลจากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Material Safety Data Sheet, MSDS) ในตารางที่ 2-5



ตารางที่ 2-5 ข้อมูลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตะกั่วอะลูมิเนียมกับน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2540 : ออนไลน์)

ชื่อก๊าซ	ค่ามาตรฐานและความ เป็นพิษ	อันตรายต่อสุขภาพอนามัย	หมายเหตุ
1. ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)	$\text{LC}_{50} = 2,000 \text{ มก./ม.}^3$ $\text{IDLH} = 300 \text{ ppm}$ รหัส IMO :  	สัมผัสทางหายใจ : มากกว่า 25 พีพีเอ็ม ทำให้ ระคายเคืองจมูกและคอ หายใจติดขัด เจ็บหน้าอก หลอดลมบีบเกร็ง มีเสมหะ และปอดบวม สัมผัสทางผิวหนัง : เป็นผื่นแดง บวม เป็นแผล อาจทำให้ผิวหนังสเปกไหม้	<ul style="list-style-type: none"> ● ลูกติดไฟได้เองที่ 651°C ● จะเกิดก๊าซพิษที่ไวไฟ และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถระเบิด ถ้าผสม กับอากาศและสาร ออกซิไดซ์ ● เป็นสารมีฤทธิ์กัดกร่อน

ตารางที่ 2-5 ข้อมูลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตะกั่วออกไซด์กับน้ำ (ต่อ)

ชื่อก๊าซ	ค่ามาตรฐานและความ เป็นพิษ	อันตรายต่อสุขภาพอนามัย	หมายเหตุ
		<p>ความผิดปกติอื่นๆ :</p> <p>เป็นสารก่อมะเร็งและ ทำลายไต ตับ ปอด ระบบ ประสาทส่วนกลาง</p>	
2. ก๊าซไฮโดรเจน (H ₂)	<p>รหัส IMO :</p> 	<p><u>สัมผัสทางหายใจ :</u></p> <p>ไม่เป็นพิษที่อุณหภูมิและ ความดันปกติ สามารถ แทนที่ออกซิเจน ซึ่งทำให้มี ออกซิเจนไม่เพียงพอ</p> <p><u>สัมผัสทางผิวหนัง :</u></p> <p>ไม่ทราบผลกระทบ</p> <p><u>ความผิดปกติอื่นๆ :</u></p> <p>การสัมผัสกับสารอื่นๆ จะ ไม่มีผลต่อสุขภาพ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ลูกติดไฟได้เองที่ 571°ซ ● เป็นก๊าซไวไฟสามารถ เผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิ ห้องทั่วไป ● เกิดไฟไหม้หรือการ ระเบิด เมื่อสัมผัสกับ อากาศ ออกซิเจน และ คลอรีน
3. ก๊าซไฮโดรเจน ซัลไฟด์ (H ₂ S)	<p>รหัส IMO :</p>  	<p><u>สัมผัสทางหายใจ :</u></p> <p>ทำให้เวียนศีรษะ คลื่นไส้ ถ้าได้รับสารปริมาณมากจะ ทำให้หมดสติ อาจทำให้ เสียชีวิตได้</p> <p><u>สัมผัสทางผิวหนัง :</u></p> <p>ก่อให้เกิดการระคายเคือง ต่อผิวหนัง</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ลูกติดไฟได้เองที่ 290°ซ ● <u>สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง</u> : ความร้อน เปลวไฟ แหล่งจุดติดไฟอื่นๆ

ตารางที่ 2-5 ข้อมูลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตะกั่วอนุมูลิเนียมกับน้ำ (ต่อ)

ชื่อก๊าซ	ค่ามาตรฐานและความ เป็นพิษ	อันตรายต่อสุขภาพอนามัย	หมายเหตุ
		<p>ความผิดปกติอื่นๆ :</p> <p>ทำลายปอด ทรวงอก ระบบ หายใจ ทางเดินอาหาร ไต ท่อไต กระเพาะปัสสาวะ และเป็นอันตรายต่อทารก ในครรภ์</p>	
4. ก๊าซฟอสฟีน (PH ₃)	<p>IDLH = 50 ppm</p> <p>PEL-TWA = 0.3 ppm</p> <p>TLV-TWA = 0.3 ppm</p> <p>รหัส IMO :</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p><u>สัมผัสทางหายใจ :</u></p> <p>เกิดอาการปวดศีรษะ เวียนศีรษะ เจ็บหน้าอก และง่วงนอน</p> <p><u>สัมผัสทางผิวหนัง :</u></p> <p>ก่อให้เกิดอาการเนื้อเยื่อ ตาย เกิดผื่นแดง และปวด ได้</p> <p><u>ความผิดปกติอื่นๆ :</u></p> <p>ทำลายระบบหายใจ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ลุกติดไฟได้เองที่ 100°ซ ● สารนี้เป็นสารที่สามารถ ลุกติดไฟได้เอง เมื่อ สัมผัสกับอากาศ ● เมื่อมีการสะสมของสาร ในปริมาณมากสามารถ ระเบิดได้ โดยปราศจาก แหล่งจุดติดไฟ
5. ก๊าซมีเทน (CH ₄)	<p>รหัส IMO :</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p><u>สัมผัสทางหายใจ :</u></p> <p>เกิดอาการหายใจติดขัด อย่างรุนแรง ปวดศีรษะ เวียน และอาจหมดสติได้</p> <p><u>สัมผัสทางผิวหนัง :</u></p> <p>ไม่ปรากฏความอันตราย</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● ลุกติดไฟได้เองที่ 100°ซ ● เป็นสารไวไฟ ● อัตราส่วนที่เหมาะสม ระหว่าง สารนี้กับ อากาศจะก่อให้เกิดการ ระเบิดได้

จากปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากตะกอนอลูมิเนียม จึงมีการหาวิธีที่จะนำผงตะกอนไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปริมาณกากตะกอนและลดปัญหาที่จะเกิดจากกากตะกอน โดยการนำกากตะกอนกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) และการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ การผลิตคอนกรีตมวลเบา หรือการทำซีโอไลต์ เป็นต้น

การนำผงตะกอนอลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่โดยนำมาผ่านการแยกเหล็กออกแล้วนำไปบด ร่อนแยกส่วนที่มีขนาดใหญ่จะนำกลับไปหลอมอีกครั้งหรือหลอมรวมกับเศษอลูมิเนียมอื่นๆ ตามแต่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้น การรีไซเคิลจึงเป็นทางเลือกหรือแนวทางที่จะเพิ่มปริมาณวัตถุดิบในประเทศให้มากขึ้นเพราะการรีไซเคิลนอกจากจะไม่ทำให้อลูมิเนียมเสียคุณภาพแล้วยังประหยัดพลังงานมากกว่าการถลุงสินแร่ ลดการเพิ่มของเสียลงสู่ธรรมชาติ ซึ่งนับเป็นการทำธุรกิจในช่วงของการบรรณรักษ์ช่วยลดภาวะโลกร้อนที่ดีอีกทางหนึ่ง

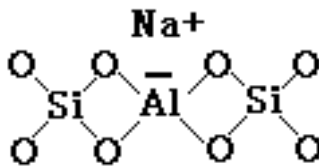
2.3.5 การนำผงตะกอนอลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

2.3.5.1 การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีโอไลต์ (Murayama และคณะ, 2006)

ซีโอไลต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการนำมาใช้งานได้ในหลายด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรม ด้านการเกษตร และด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ซีโอไลต์เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการดูดซับ (Adsorbent) การเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม การนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและผลิตน้ำประปา การใช้เป็นตัวลดแรงตึงผิว ในปัจจุบันการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นมีด้วยกันหลายวิธี ทำให้ซีโอไลต์ที่ได้มีสมบัติแตกต่างกัน โดยคุณสมบัติของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบของสาร โดยทั่วไปสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นนิยมใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมอลูมิเนต หรือสารอื่นที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมิเนียม จากการศึกษาผลงานวิจัยต่างๆ พบว่ามีการนำผงตะกอนอลูมิเนียมมาใช้เป็นสารทดแทนอลูมิเนียมสำหรับกระบวนการสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ในกลุ่มอลูมิโนซิลิเกต โดยใช้ถ้ำโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นสารทดแทนแทนซิลิกา

ซีโอไลต์คือสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Crystalline Aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) นอกจากซิลิคอน (หรืออลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ (ภาพที่

2-6) และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถทำให้ระเหยออกไปได้



ภาพที่ 2-6 องค์ประกอบของซีโอไลต์

(วิชาการดอทคอม, 2552 : ออนไลน์)

โดยสูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$

เมื่อ	M	คือ	อะตอมของแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท
	n	คือ	ประจุบวกของแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท โดยมากเท่ากับ 1 และ 2
	x	คือ	จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2
	y	คือ	จำนวนโมลของน้ำที่มีอยู่ในช่องว่างของผลึก

ซีโอไลต์นั้นมีมากกว่า 600 ชนิด แบ่งตามชนิดของซีโอไลต์ได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ ซีโอไลต์ธรรมชาติและซีโอไลต์สังเคราะห์ และสามารถแบ่งกลุ่มซีโอไลต์ตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้น อาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ทำนายซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันออกไป

ซีโอไลต์ A นับเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ปัจจุบันนิยมใช้ในอุตสาหกรรมสารซักฟอกหรือนำไปใช้ด้านการคัดแยกโมเลกุล สูตร unit cell ของซีโอไลต์ A คือ $Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}] \cdot 27H_2O$ โดยจะมีสัดส่วนโมล ของ Si / Al เท่ากับ 1 ซีโอไลต์ A มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Cubic) โดยขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 4.2 อังสตรอม (Å) ความหนาแน่นประมาณ 1.99 กรัม/มล. และความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน ประมาณ 5.5 - 7 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม (meq/g) แสดงดังตารางที่ 2-6 โดยทั่วไปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 150 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ประมาณ 2.5 ชั่วโมงถึง 14 วัน ความสามารถแลกเปลี่ยนแคทไอออนของซีโอไลต์ A จะมีลำดับความเลือกจำเพาะต่อ Univalent

Ion ดังนี้ $Ag > Ti > Na > K > NH_4 > Rb > Li > Cs$ และสำหรับ Divalent ion มีลำดับความเลือกจำเพาะดังนี้ $Zn > Sr > Ba > Ca > Co > Ni > Cd > Hg$

ตารางที่ 2-6 สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ A (Murayama และคณะ, 2006)

Properties	Zeolite A
Si / Al ratio	0.7 – 1.2
Symmetry	Cubic
Density	1.99 กรัม/มล.
Pore size	4.2 อังสตรอม

ในปัจจุบันซีโอไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใน ด้านอุตสาหกรรม เช่น การใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมสารซักฟอก ด้านเกษตรกรรม เช่น การใช้ในการปรับสภาพน้ำและดูดซับแอมโมเนียในบ่อกัก หรือใช้ในการปรับสภาพดิน และด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การนำมาใช้ในการดูดซับสารพิษในน้ำ หรืออากาศ โดยคุณสมบัติหลักของซีโอไลต์ในการนำมาประยุกต์ใช้นั้นมีสามด้านหลักๆ ได้แก่ เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) เป็นตัวดูดซับ (Adsorption) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

2.3.5.2 การนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ (Ewais และคณะ, 2009)

ปูนซีเมนต์ (Cement) หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง หรือมวลรวม เช่น หินหรือกรวด และทราย ให้แข็งติดเป็นชิ้นเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก โดยมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งาน ทั้งในรูปของ ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีบทบาทสำคัญและได้รับความนิยมในการก่อสร้างอย่างแพร่หลายทั่วโลก ทั้งนี้เพราะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น สามารถหล่อขึ้นรูปต่างๆ ตามที่ต้องการได้ มีความแข็งแรง และมีความทนทาน เป็นต้น จึงนิยมนำปูนซีเมนต์ไปประยุกต์ใช้งานตามลักษณะต่างๆ มากมาย ทั้งงานหล่อคอนกรีตและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ (เช่น อาคาร บ้านเรือน สะพาน ถนน และเขื่อน เป็นต้น) งานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตชนิดต่างๆ งานก่องานฉาบ และงานตกแต่งประเภทต่างๆ

วัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-7

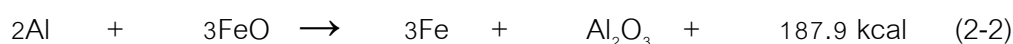
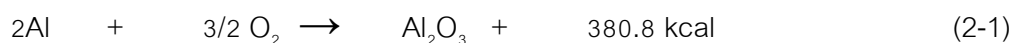
ตารางที่ 2-7 วัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ (Ewais และคณะ, 2009)

ประเภทของวัสดุ	รายละเอียด
วัสดุเนื้อปูน (Calcareous Materials)	เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate หรือ CaCO_3) มีปริมาณมากถึงร้อยละ 80 ในส่วนผสมก่อนเผา เช่น หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือดินมาร์ล (Marl) หินอ่อน (Marble) และหินชอล์ก (Chalk) เป็นต้น
วัสดุเนื้อดิน (Argillaceous Materials)	เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Silicon Dioxide หรือ SiO_2) อลูมินา (Aluminum Oxide หรือ Al_2O_3) และเหล็ก (Iron Oxide หรือ Fe_2O_3) มีปริมาณร้อยละ 15 – 18 ในส่วนผสมก่อนเผา เช่น หินดินดาน (Shale) และดินดำหรือดินเหนียว (Clay) เป็นต้น
วัสดุปรับปรุงคุณภาพ (Corrective Materials)	เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบที่มี แคลเซียมคาร์บอเนต ออกไซด์ของอลูมินา ออกไซด์ของซิลิกา หรือออกไซด์ของเหล็ก ใช้เติมส่วนผสมของวัสดุหลักสองตัวแรกในกรณีที่วัสดุทั้งสองมีองค์ประกอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
สารเติมแต่ง (Additive Materials)	เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สำคัญคือการเติมยิปซัม เพื่อช่วยยืดระยะเวลาการแข็งตัว ปรับปรุงคุณสมบัติการหดตัว และพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ กรณีปูนซีเมนต์ผสมมีการเติมหินปูน เพื่อช่วยลดการหดตัว ซึ่งจะช่วยลดการแตกร้าว นอกจากนี้ยังมีการผสมสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ เช่น สารปอซโซลาน สารลดน้ำ และสารกระจายกักฟองอากาศ เป็นต้น

ผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียมซึ่งมีสัดส่วนปริมาณอลูมินาสูงจึงถูกนำไปใช้เป็นวัสดุในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยนำมาใช้ในการทดแทนวัสดุหลักในกลุ่มซิลิกา อลูมิเนียม และ เหล็ก

3.3.5.3 การนำไปใช้ในกระบวนการหลอมเหล็ก

ผงตะกรันที่ได้จากกระบวนการหลอมอลูมิเนียมมีคุณสมบัติหลายประการซึ่งเอื้อต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการหลอมเหล็ก ในทางทฤษฎีอลูมิเนียมในผงตะกรันสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีชนิดคายความร้อน ดังแสดงในสมการที่ (2-1) เมื่อนำผงตะกรันอลูมิเนียมมาใช้ในกระบวนการหลอมเหล็กค่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะสามารถช่วยประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการหลอมเหล็กได้ นอกจากนี้อลูมิเนียมในผงตะกรันยังสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์ (FeO) และให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเหล็ก (Fe) ดังสมการที่ (2-2) ผงตะกรันอลูมิเนียมจึงสามารถช่วยลดปริมาณเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลอมเหล็ก หรืออีกนัยหนึ่งคือสามารถช่วยเพิ่มมวลผลิตภัณฑ์เหล็กที่ได้ (Yield)



จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้มีการทดลองศึกษาการนำผงตะกรันอลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการหลอมเหล็กโดยนำมาใช้ทดแทนแร่ฟลูออไรต์สปาร์ (Fluorspar) หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) จากการศึกษาโดย Jones (1944) พบว่าผงตะกรันอลูมิเนียมสามารถนำมาใช้ทดแทนแร่ฟลูออไรต์สปาร์ในกระบวนการหลอมเหล็กได้เป็นอย่างดี โดยลักษณะของผงตะกรันอลูมิเนียมที่ให้ผลดีที่สุดมีขนาดไม่เกิน 0.25 นิ้ว และมีปริมาณความชื้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการคิดค้นการแปรรูปผงตะกรันอลูมิเนียมให้เป็นแร่แคลเซียมอลูมิเนต (CaAlO₂) เพื่อใช้เป็นฟลักซ์ในกระบวนการหลอมเหล็กทดแทนแร่แคลเซียมฟลูออไรด์ CaF₂ ซึ่งพบว่าแร่แคลเซียมอลูมิเนตที่ผลิตได้จากผงตะกรันอลูมิเนียมสามารถให้อัตราการหลอมที่สูงและมีความสามารถในการกำจัดซัลเฟอร์ (Desulfurization capacity) ที่ดี (Mroueh และ คณะ, 2006)

งานวิจัยโดย Aydemir (2007) ได้ทดลองใช้ผงตะกรันอลูมิเนียมในการหลอมเหล็กโดยใช้เตาปรงน้ำเหล็ก (Ladle furnace) พบว่าผงตะกรันอลูมิเนียมสามารถช่วยลดปริมาณออกไซด์ของเหล็ก (FeO) และออกไซด์ของแมงกานีส (MnO₂) ตามลำดับ ในตะกรันจากการหลอมเหล็ก โดยการเติมผงตะกรันอลูมิเนียมประมาณ 100 กิโลกรัมจะสามารถลดปริมาณออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของแมงกานีสในตะกรันการหลอมเหล็กได้จากร้อยละ 12 – 13 เหลือร้อยละ 7 – 8 ใน

งานวิจัยดังกล่าวผงตะกั่วอลูมิเนียมที่ใช้มีขนาดและองค์ประกอบดังตารางที่ 2-8 และ 2-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-8 องค์ประกอบเป็นร้อยละของผงตะกั่วอลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยของ Aydemir (2007)

Al ₂ O ₃	Al	SiO ₂	Fe	C	K	Mg	Cu
55-60	30-35	5-10	0.5-1.0	0.10-0.20	0.5-1.0	0.5-1.0	0.10-0.20

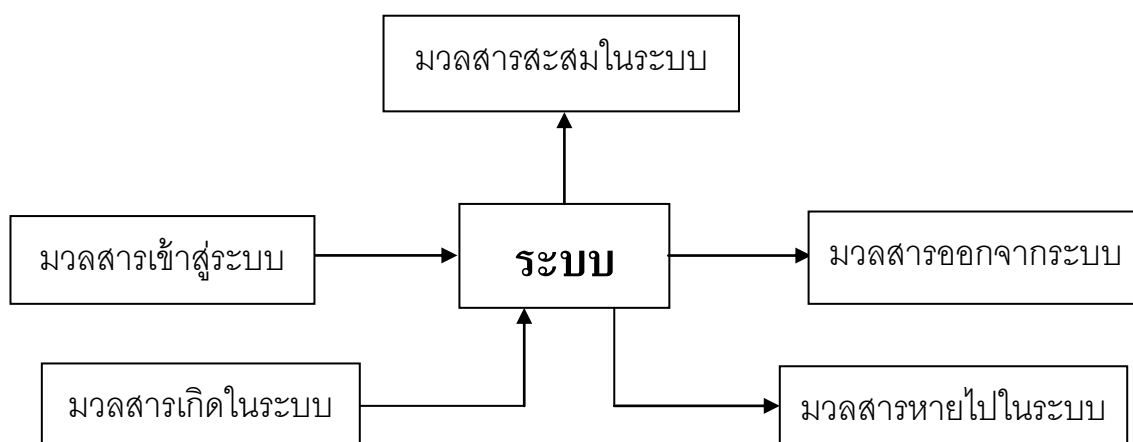
ตารางที่ 2-9 การกระจายขนาดของผงตะกั่วอลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยของ Aydemir (2007)

Size	<0.5 mm	0.5-30 mm	>30 mm
Weight (%)	4.8	91.1	4.1

นอกจากนี้เทคโนโลยีการนำผงตะกั่วอลูมิเนียมมาใช้ในกระบวนการหลอมเหล็กได้มีการศึกษาพัฒนาและจัดเป็นสิทธิบัตรเป็นจำนวนมากและได้มีการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมหลอมเหล็กในต่างประเทศ

2.4 การออกแบบถังปฏิริยาเบื้องต้น (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542 และ Metcalf & Eddy, 2004)

การออกแบบถังปฏิริยาเบื้องต้นจำเป็นที่จะต้องใช้สมดุลมวล(Mass Balance) ในการพิจารณาระบบทั้งหมดก่อน สมดุลมวลมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมผลผลิตของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้นในกระบวนการ จำเป็นต้องหาสมดุลของมวลที่เกิดขึ้นใหม่ด้วย สมดุลมวลสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 สมดุลมวล (ดัดแปลงจากมันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

สมมูลมวลสามารถแสดงในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

มวลเข้าขอบเขตระบบ – มวลออกจากขอบเขตระบบ = มวลที่สะสมภายในขอบเขตระบบ + (มวลที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตระบบ – มวลที่ใช้ไปภายในขอบเขตระบบ)

$$\text{Input} - \text{Output} = \text{Accumulation} - \text{Formation} \quad (2-3)$$

$$\text{มวลเข้าระบบ (Input)} = F_{A0} = Q_0 C_{A0} \quad (2-4)$$

$$\text{มวลออกจากระบบ (Output)} = F_A = Q_A C_A \quad (2-5)$$

$$\text{มวลสะสมในระบบ (Accumulation)} = \frac{dN_A}{dt} \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \text{มวลที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตระบบ} - \text{มวลที่ใช้ไปภายในขอบเขตระบบ (Formation)} &= G_A \\ &= \hat{R}_A V = \int_V r_A dV \end{aligned} \quad (2-7)$$

โดยที่	Q_0	=	อัตราการไหลที่เข้าสู่ระบบ
	Q_A	=	อัตราการไหลที่ออกจากระบบ
	C_{A0} และ C_A	=	ความเข้มข้นของสารที่เข้าสู่ระบบและออกจากระบบตามลำดับ
	N_A	=	มวลของสารภายในระบบ
	\hat{R}_A	=	อัตราในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสุทธิภายในระบบ
	r_A	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
	V	=	ปริมาตรของระบบ

แทนค่าสมการ (2-4) (2-5) (2-6) และ (2-7) ลงในสมการ (2-3) และจัดรูปใหม่จะได้ตั้งสมการ (2-8)

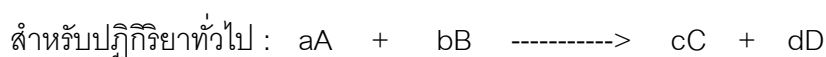
$$F_{A0} - F_A + \int_V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2-8)$$

การออกแบบถังปฏิกริยานอกจากต้องเข้าใจสมมูลมวลแล้ว จำเป็นต้องใช้ข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดลองการเกิดปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้

2.4.1 กฎอัตราและลำดับของปฏิกิริยา (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2542 และ Metcalf & Eddy, 2004)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในปฏิกริยามักจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งเราใช้กฎอัตรา (rate law) หรือสมการอัตรา (rate equation) แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้น การทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารต่างๆ โดยให้สารชนิดหนึ่งคงที่ แล้วเปลี่ยนความเข้มข้นของสารอีกชนิดหนึ่ง ก็จะทราบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยานี้ว่าขึ้นอยู่กับสารชนิดใด

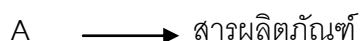


$$\text{กฎอัตราจะเป็นดังนี้ } r = k[A]^x[B]^y \quad ; \text{ เมื่อ } k \text{ เป็นค่าคงที่อัตรา}$$

ถ้าทราบค่าของ k , x และ y เราก็สามารถใช้กฎอัตราในการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความเข้มข้นของ A และ B ที่กำหนดให้ได้ ค่าของ x และ y จะหาได้จากการทดลอง ผลรวมของเลขชี้กำลังของความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกฎอัตรา ($x + y$) เรียกว่า อันดับรวมของปฏิกิริยา (overall reaction order)

กฎอัตราที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นกับเวลา ถ้ารู้ค่าคงที่อัตราและความเข้มข้นของสารตั้งต้นแล้วก็สามารถคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากกฎอัตราได้ ในทางกลับกันก็สามารถที่จะใช้สมการนี้ในการหาความเข้มข้นของสารตั้งต้น ณ เวลาใดๆ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาได้ ในหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์กฎอัตราของปฏิกิริยาอันดับต่างๆรวมทั้งวิธีการตรวจสอบอันดับของปฏิกิริยา

ในกรณีปฏิกิริยาอันดับศูนย์



$$\text{อัตราปฏิกิริยา } r = k[A]^0 = k$$

ดังนั้น ปฏิกิริยาชนิดนี้จึงมีอัตราการเกิดคงที่เสมอและไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น จึงสามารถเขียนเป็นกฎดิฟเฟอเรนเชียลได้ดังนี้

$$-d \frac{[A]}{dt} = k[A]^0 = k$$

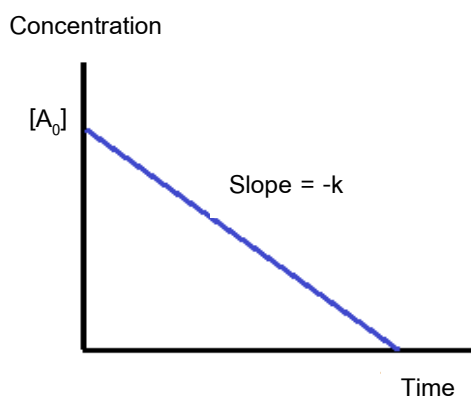
$$-d[A] = kdt$$

$$- \int_{[A]_0}^{[A]} d[A] = k \int_0^t dt$$

$$[A]_0 - [A] = kt$$

$$[A] = [A]_0 - kt \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-9) สามารถนำไปใช้หาความเข้มข้นของสาร A ณ เวลาใดๆได้ และเมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[A]$ กับ t ก็จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน $-k$ และจุดตัดบนแกน y มีค่าเท่ากับ $[A]_0$ ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ในกรณีปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง



อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$r = -d \frac{[A]}{dt} = k[A]$$

จัดสมการใหม่เป็น

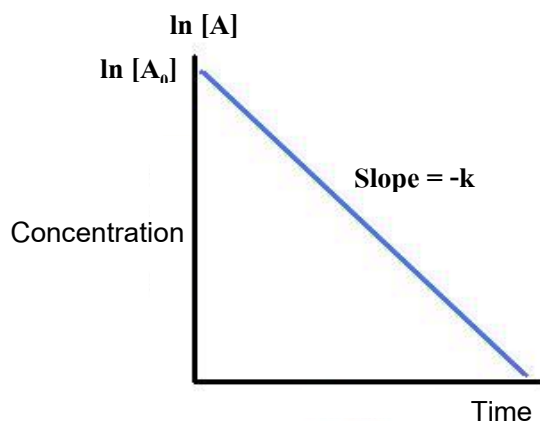
$$d \frac{[A]}{A} = -k dt$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ ถึง $t = t$

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{A} = -k \int_0^t dt$$

$$\ln[A] - \ln[A]_0 = -kt$$

เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $\ln [A]$ กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $-k$ และจุดตัดบนแกน y มีค่าเท่ากับ $\ln [A_0]$ ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเวลาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
ในกรณีปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (second-order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง



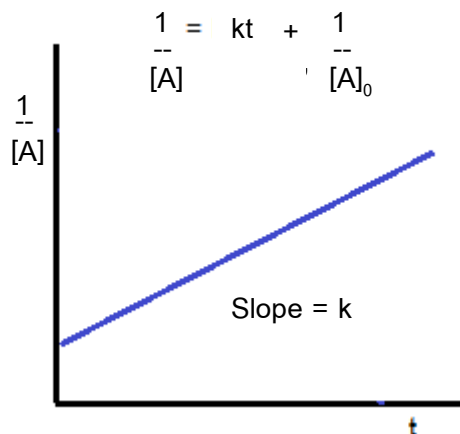
อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการด้านล่าง ดังนี้

$$r = -d \frac{[A]}{dt} = k[A]^2$$

จากวิธีทางแคลคูลัส จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -d \frac{[A]}{dt} &= k[A]^2 \\ -\frac{d[A]}{[A]^2} &= k dt \\ -\int_{[A]_0}^{[A]} d \frac{[A]}{[A]^2} &= k \int_0^t dt \\ \frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} &= kt \\ \frac{1}{[A]} &= \frac{1}{[A]_0} + kt \end{aligned}$$

เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $1/[A]$ กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ k และจุดตัดบนแกน y มีค่าเท่ากับ $1/[A]_0$ ดังแสดงในภาพที่ 2-10

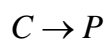


ภาพที่ 2-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ กับเวลาของปฏิกิริยาอันดับสอง

ในกรณีของ Differential Method

วิธีนี้สามารถหาค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยา (n) ได้ โดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการโดยตรง และสามารถคำนวณหาค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ โดยวิธีการหาอันดับปฏิกิริยาต่างๆ แสดงได้ดังนี้

ปฏิกิริยา:



สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปอนุพันธ์:

$$r = -\frac{dC}{dt} = kC^n$$

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปปริพันธ์:

$$\ln r = \ln k + n \ln C \quad (2-10)$$

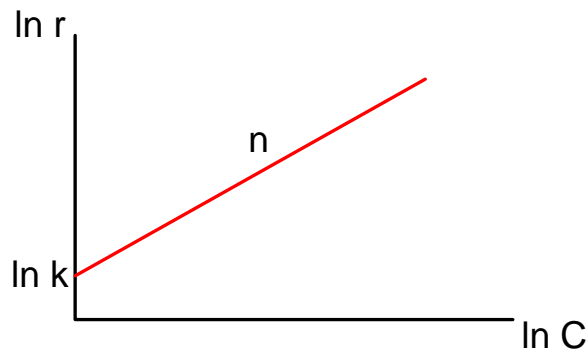
เมื่อ r = อัตราการเกิดปฏิกิริยา

C = ค่าความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ

k = ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วของปฏิกิริยา

n = อันดับการเกิดปฏิกิริยา

จากสมการที่ (2-10) สามารถสร้างกราฟเส้นตรงแสดงดังในภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k)

2.4.2 การออกแบบถังปฏิกิริยา (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2542 และ Metcalf & Eddy, 2004)

ในการออกแบบระบบในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมนั้นจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลของเวลาและอัตราการไหลเป็นหลัก ซึ่งรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยานั้นก็เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหล เวลาในการทำปฏิกิริยาและอื่นๆ โดยถังปฏิกริยาต่างๆ ที่ใช้ทั่วไปมีดังนี้

2.4.2.1 ถังปฏิกิริยาแบบกะ (Batch Reactor)

สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- ไม่มีอัตราการไหลเข้าและออกจากระบบ ($F_A = F_{A0} = 0$)
- มีการกวนผสมที่ดีและปริมาตรคงที่

จากสมการ (2-8)

$$F_{A0} - F_A + \int r_A dV = \frac{dN_A}{dt}$$

เมื่อนำมาใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาแบบกะจะได้

$$\frac{dN_A}{dt} = \int r_A dV$$

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V \quad ; \quad \text{ปริมาตรคงที่}$$

จัดรูปใหม่จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

$$\frac{d(N_A/V)}{dt} = \frac{dC_A}{dt} = r_A$$

2.4.2.2 ถังปฏิกริยาแบบกวนผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- เป็นสภาวะ steady-state จะไม่มีการสะสมของมวลเกิดขึ้นภายในขอบเขตของระบบ ($\frac{dN_A}{dt} = 0$)
- อัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออก
- เกิดการกวนผสมแบบสมบูรณ์ ($\int^V r_A dV = Vr_A$)

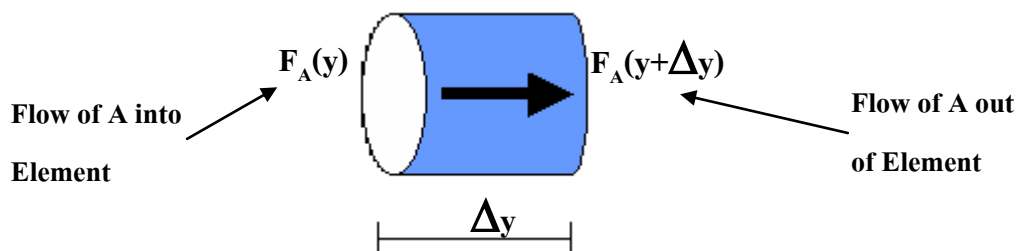
เมื่อแทนสมมติฐานต่างๆลงในสมการ (2-8) จะได้สมการที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้

$$F_{A0} - F_A + Vr_A = 0 \quad \text{หรือ} \quad V = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_A}$$

2.4.2.3 ถังปฏิกริยาแบบท่อไหล (Plug Flow Reactor)

สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ

- มีการกวนผสมที่ดีในพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน ($\int^V r_A dV = r_A \Delta V$)
- พิจารณาเฉพาะส่วนเล็กๆ ในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 2-12
- เป็นสภาวะ steady-state จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ($\frac{dN_A}{dt} = 0$)



ภาพที่ 2-12 สมมติฐานในการออกแบบถังปฏิกริยาแบบท่อไหล (Metcalf&Eddy,2004)

เมื่อแทนสมมติฐานต่างๆลงในสมการ (2-8) จะได้ ดังนี้

$$F_A(y) - F_A(y + \Delta y) + r_A \Delta V = 0 \quad \text{โดยที่} \quad \Delta V = A \Delta y$$

สมการที่ใช้ในการออกแบบ คือ
$$\left[\frac{F_A(y + \Delta y) - F_A(y)}{\Delta y} \right] = Ar_A$$

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

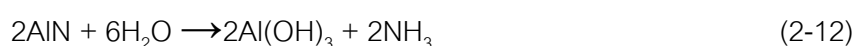
3.5.1 ผงตะกัรณอลูมิเนียมกับการเกิดปฏิกิริยา

Soto และ Toguri (1986) ได้ศึกษาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำตะกัรณอลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่ โดยการใช้กระบวนการทำให้ลอยตัว (Flotation) ในการแยกผงตะกัรณอลูมิเนียมออกจากขยะอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ปริมาณผงตะกัรณมากขึ้น และในน้ำต้องมีไอออนของทองแดง เพื่อให้เกิดทองแดงปกคลุมผิวของอลูมิเนียมดังสมการที่ 2-11



สารละลายที่เติมทองแดง 51 กิโลกรัมต่อตันให้เปอร์เซ็นต์การคัดแยกผงตะกัรณได้ดี (80%) และเร็วที่สุด ประสิทธิภาพในการคัดเลือกผงตะกัรณขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค กล่าวคือ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

Filleti (1995) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดจากผงตะกัรณอลูมิเนียมและพบว่าเกิดก๊าซแอมโมเนียดังสมการที่ (2-12) ขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของอลูมิเนียมไนไตรด์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียมและมีการทำปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนในอากาศและโลหะอลูมิเนียม



Manfredi และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของผงตะกัรณอลูมิเนียม พบว่าผงตะกัรณอลูมิเนียมส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารผสมหลายชนิดรวมกันเป็นก้อน เช่น Al_2O_3 , AlN , MgN , KCl , MgO , Fe_3O_4 , Al_2S_3 , Al_4C_3 เศษโลหะอลูมิเนียมและเกลือ เป็นต้น ผงตะกัรณแบ่งเป็น 2 ประเภท (ภาพที่ 2-13) ตามปริมาณโลหะที่พบ ได้แก่ ผงตะกัรณขาว (White dross) มีสีขาวหรือเทา มีปริมาณโลหะปนอยู่มาก สามารถนำมาแยกแล้วนำไปใช้ใหม่ได้ และผงตะกัรณดำ (Black dross) มีสีดำ เป็นกากตะกัรณที่มีปริมาณโลหะปนอยู่น้อย จากการทดลองจะได้คุณสมบัติของผงตะกัรณดังนี้ ความหนาแน่น 0.828-1.118 ตัน/ม³ ปริมาณโลหะที่ปนอยู่บนผงตะกัรณ 46.9-69.1% การกระจายตัวของผงตะกัรณ 0.08-0.452 มม.⁻¹ ปริมาณเกลือที่ปนอยู่บนผงตะกัรณ 0.18-6.21% พีเอชหลังการละลายน้ำ 9.52-10.14

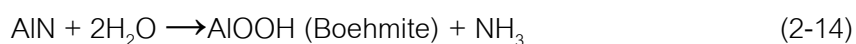
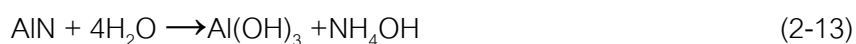


ภาพที่ 2-13 ผงตะกรันดำ (Black cross) และผงตะกรันขาว (White cross)

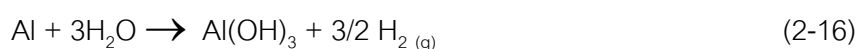
(JBMI Group Ltd., 2004 : online)

Fukumoto และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของผง AlN ในสารละลายกรด (HCl และ H₃PO₄) และสารละลายด่าง (NaOH) เปรียบเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาในน้ำกลั่น ในกรณีของสารละลาย HCl และ NaOH เกิดปฏิกิริยากับ AlN ขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิด Al(OH)₃ มากขึ้น เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาของ AlN ในน้ำกลั่น ส่วนในกรณีของสารละลาย H₃PO₄ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า สารละลาย HCl และ NaOH ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ของ AlN ดังสมการที่ (2-13) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเรื่องผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาการแตกตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ จะแตกต่างจากที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยที่อุณหภูมิสูงๆ (มากกว่า 351 เคลวิน) จะเกิดผลึกโบฮีไมต์ (Boehmite) ดังสมการที่ (2-14) ส่วนที่อุณหภูมิต่ำๆ (ต่ำกว่า 351 เคลวิน) จะเกิดผลึก Bayerite (Al(OH)₃) ดังสมการที่ (2-15) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูง AlN ที่มีผิวสัมผัสมาก จะมีประสิทธิภาพการแตกตัวเร็วขึ้น

(NaOH, HCl)



Araujo (2002) ได้พบว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของโลหะอลูมิเนียมกับน้ำ ดังสมการที่ (2-16)



Shinzato และ Hypolito (2005) ได้อ้างถึงงานวิจัยในปี 1999 โดยได้ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากผงตะกรันอลูมิเนียมและพบว่าจะเกิดก๊าซมีเทน ดังสมการที่ (2-17) ขึ้น โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับอลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Al_4C_3) ซึ่งคาร์ไบด์เกิดขึ้นจากน้ำมันของเศษอลูมิเนียมเก่าในระหว่างกระบวนการหลอม



Hwang และคณะ (2006) ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตะกรันดำ ตะกรันขาวและฝุ่นอลูมิเนียม โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตะกรันดำ ตะกรันขาวและฝุ่นอลูมิเนียมของ Hwang และคณะ (2006)

ตัวอย่าง	ปริมาณอลูมิเนียม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	โครงสร้างที่พบ
ตะกรันดำ (Black dross)	7.1	NaCl, KCl, Al, Al_2O_3 , SiO_2 , Si, $MgAl_2O_4$, $Ca_3Al_2O_6$
ตะกรันขาว (White dross)	43.4	NaCl, KCl, Al, Al_2O_3 , $MgAl_2O_4$, $Ca_3Al_2O_6$, $Ca_2Al_2SiO_7$
ฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษ ทางอากาศ (Baghouse dust)	18.6	NaCl, KCl, Al, Al_2O_3 , SiO_2 , Si, $MgAl_2O_4$, $Ca_3Al_2O_6$, $Ca_2Al_2SiO_7$

Jirang และ Lifeng (2008) ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันอลูมิเนียม พบว่าตะกรันขาวมีปริมาณโลหะอลูมิเนียมร้อยละ 15-70 และตะกรันดำมีปริมาณโลหะอลูมิเนียมร้อยละ 12-18 โดยสารประกอบส่วนใหญ่ที่พบจะอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์และเกลือ นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิกิริยาระหว่างตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย

David และ Kopac (2012) ทำการศึกษากปริมาณโลหะในตะกรันอลูมิเนียม โดยผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2-11 พบว่าตะกรันอลูมิเนียมมีปริมาณโลหะอลูมิเนียมสูง (ร้อยละ 43.3) ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก นอกจากนี้ยังพบซิลิกอน (Si) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) และแมกนีเซียม (Mg) ด้วย

ตารางที่ 2-11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตะกัณอลูมิเนียมของ David และ Kopac (2012)

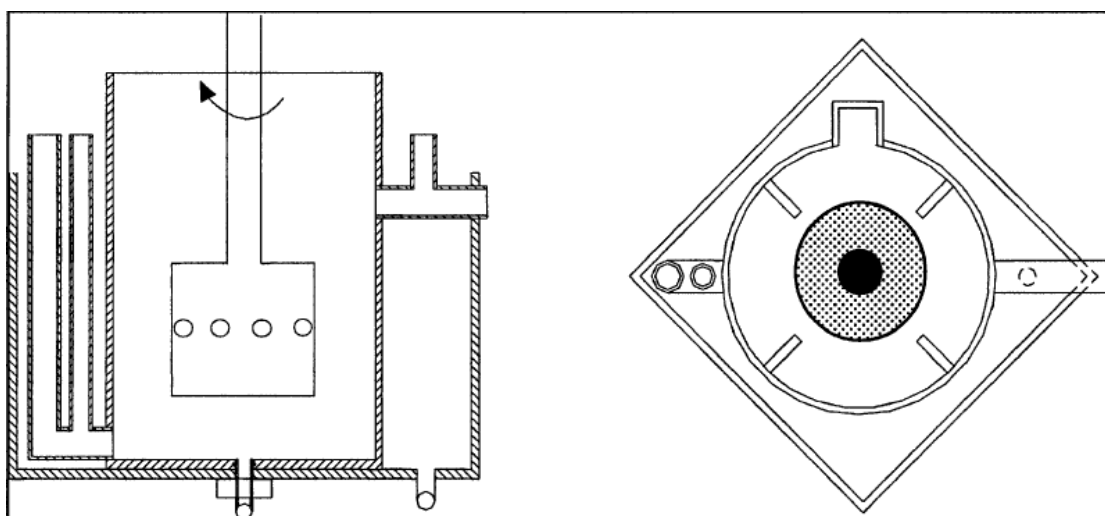
ธาตุ	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Al	43.3
Cr	0.088
Fe	4.32
Ca	0.45
Si	10.9
Na	0.8
K	0.21
Cu	1.17
Zn	0.9
Ni	0.87
Mg	1.85
Ti	0.27
Pb	0.053
Sn	-
Mn	0.2
B	-

Tsakiridis (2012) ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างตะกัณเกลืออลูมิเนียม (Aluminum salt slag) กับน้ำ พบว่าเกิดก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซฟอสฟีน (PH_3) เช่นเดียวกับที่พบในการทำปฏิกิริยาระหว่างตะกัณอลูมิเนียมกับน้ำ โดยก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซอันตรายที่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย และเป็นสาเหตุให้เกิดอัคคีภัยหรือเกิดการระเบิดได้

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อผงตะกัณอลูมิเนียมกับการเกิดปฏิกิริยาทำให้ทราบลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกัณอลูมิเนียมในเบื้องต้น อีกทั้งยังทราบถึงก๊าซผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นได้หากผงตะกัณอลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น นอกจากนี้ยังได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถนำไปปรับใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

2.5.2 ถังปฏิริยาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

Johansen และคณะ (2004) ได้ศึกษาแบบจำลองในการทำให้ผงตะกั่วโลหะหลอมรวมกันเพื่อให้ผงตะกั่วโลหะมีขนาดเหมาะสมสำหรับกระบวนการหลอมโลหะ โดยการทดลองนี้ได้เสนอการใช้ถังปฏิริยาที่มีการกวนผสมด้วยใบพัดดังแสดงในภาพที่ 2-14 และความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการปั่นกวนอยู่ระหว่าง 500-600 รอบต่อนาที (rpm)



ภาพที่ 2-14 แบบจำลองถังปฏิริยาที่ใช้ในการทดลองของ Johansen และคณะ (2004)

Dash และคณะ (2008) ได้ศึกษาเรื่องการสกัดอลูมินาจากผงตะกั่วอลูมิเนียมด้วยกรดโดยใช้ถังปฏิริยาแบบกะ ทำจากแก้วซึ่งภายในบรรจุกรดซัลฟิวริกและใช้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) ในการกวนผสม นอกจากนี้ยังควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิริยาให้อยู่ในช่วง 90 ± 5 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง พบว่าอลูมินาประมาณ 85% ถูกสกัดออกจากผงตะกั่วอลูมิเนียมได้โดยการใช้กรด

Yoo และคณะ (2011) ได้ศึกษาการแตกตัวของผงตะกั่วอลูมิเนียมในบิวทิลแอลกอฮอล์ (sec-butyl alcohol) เพื่อให้ได้ aluminum sec-butoxide ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิริยาแบบกะกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสจะใช้เวลาในการทำปฏิริยาจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดลอง อีกทั้งยังไม่สามารถทำลาย AIP ที่ผิวหน้าของผงตะกั่วอลูมิเนียมเพื่อที่จะเข้าไปทำปฏิริยาได้ จากงานวิจัยพบว่าเมื่อทำปฏิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะทำให้ผงตะกั่วอลูมิเนียมแตกตัวได้ 65%

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อถึงปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทำให้ได้แนวคิดต่างๆในการออกแบบถึงปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการทดลอง เช่น รูปแบบของถึงปฏิกิริยา ชนิดของใบพัด ความเร็วในการกวนผสม เป็นต้น โดยข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์ต่อการออกแบบถึงปฏิกิริยา เพื่อทำการทดลองการเกิดปฏิกิริยากับน้ำต่อไป

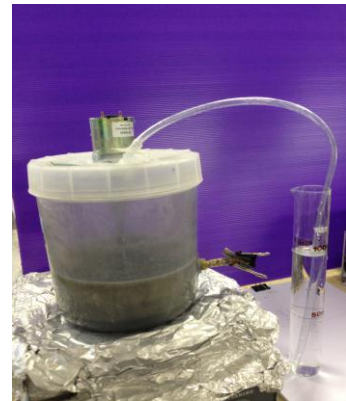
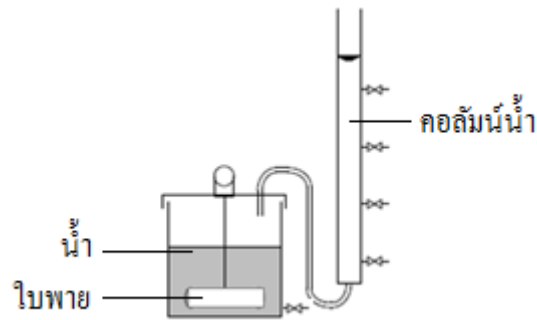
จากการศึกษาเอกสารวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและศึกษาตัวอย่างที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าข้อมูลที่ได้เกี่ยวกับผงตะกั่วอนุมิเนียมมีน้อยมาก โดยไม่ทราบลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียชนิดนี้เลย อีกทั้งงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับผงตะกั่วอนุมิเนียม จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยนี้ โดยเริ่มแรกจะต้องทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียก่อน เนื่องจากมีความสำคัญในการออกแบบการทดลองต่อไป เช่น ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF เพื่อระบุประเภทและสัดส่วนชนิดของสารประกอบอนุมิเนียมซึ่งช่วยในการประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ค่าพีเอช องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก และปริมาณโลหะหนัก เป็นต้น

ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ขั้นต้นนี้จะช่วยประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยาและคาดการณ์ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา ทั้งในด้านของชนิดของก๊าซและปริมาณที่จะเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการนำไปออกแบบการทดลอง เพื่อทดสอบการทำปฏิกิริยาของผงตะกั่วอนุมิเนียมกับน้ำและเป็นแนวทางในการออกแบบถึงปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการทดลองจะแสดงในบทถัดไป

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบที่ละเท

ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบที่ละเท (Batch reactor) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ซึ่งในชุดการทดลองนี้ประกอบด้วย

- 1) ถังปฏิกริยาแบบปิด ทำจากพลาสติกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 ซม. สูง 16 ซม.
- 2) ใบพายสำหรับกวนผสม (Paddle) ทำจากอลูมิเนียม ขนาด 1.5x8 ซม. เพราะไม่ก่อให้เกิดสนิมและมีน้ำหนักเบา
- 3) คอลัมน์น้ำ ทำจากวัสดุอะคริลิกใส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. และสูง 60 ซม. สำหรับดักจับก๊าซละลายน้ำที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
- 4) มอเตอร์สำหรับกวนผสมความเร็ว 150 200 และ 300 รอบต่อนาที
- 5) พลาสติกแขวนลอยประเภทพีวีซี 2 ชนิด คือ ชนิดสี่เหลี่ยม ซึ่งมีขนาด 0.5x0.5 ซม. ความหนาแน่น 1.42-1.48 กรัมต่อลบ.ซม. และชนิดทรงกลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1.35-1.45 กรัมต่อลบ.ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3-2
- 6) ท่อนำก๊าซ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. สำหรับนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกริยาเข้าสู่คอลัมน์น้ำ

ชุดการทดลองแบบที่ละเทนี้มีความเหมาะสมในการทดลอง เนื่องจากต้องการจะศึกษาปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งในรูปของก๊าซที่ละลายน้ำได้และก๊าซที่ละลายน้ำไม่ได้ โดยการทำปฏิกริยาจะเกิดขึ้นในถังปฏิกริยาแบบปิด และก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกดักจับด้วยน้ำในถังปฏิกริยา

และในคอลัมน์น้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซละลายน้ำต่อไป นอกจากนี้ยังมีการเก็บตัวอย่างก๊าซที่ไม่ละลายน้ำภายในถังปฏิกิริยาเพื่อนำไปวิเคราะห์อีกด้วย



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3-2 พลาสติกแขวนลอย (ก) ชนิดสีเหลือง (ข) ชนิดทรงกลม

3.2 ตัวอย่างผดุงครรภ์และฝู่นอลูมิเนียม

การคัดเลือกประเภทกากของเสียจากการหลอมเศษอลูมิเนียม จำเป็นที่จะต้องพิจารณากระบวนการผลิตรวมไปถึงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อสามารถคัดเลือกประเภทกากของเสียที่เป็นตัวแทนของของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมประเภทนี้

กระบวนการผลิตอลูมิเนียมที่มีอยู่ในประเทศไทยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมประเภทกลางน้ำ และประเภทปลายน้ำ อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดผดุงครรภ์อลูมิเนียมที่ก่อให้เกิดปัญหาในการศึกษานี้ คือ การผลิตประเภทกลางน้ำขั้นทุติยภูมิ กล่าวคือ การหลอมอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และเศษอลูมิเนียมที่ผ่านการใช้งานแล้ว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแท่งอลูมิเนียมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป โดยอาจมีความจำเป็นในการเติมโลหะผสม (Alloy) หรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ (Flux) เพื่อให้ได้แท่งอลูมิเนียมที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเพื่อใช้งานต่อไป โดยทั่วไป สารเติมแต่งที่เติมลงในกระบวนการหลอมอลูมิเนียมนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีโซเดียม เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมทั่วไป มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ในท้องตลาด และกลุ่มที่ปราศจากโซเดียม เป็นผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมที่ใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องทนการสึกกร่อน เช่น เครื่องยนต์หรือลูกสูบ มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ในท้องตลาด

จากการเข้าเยี่ยมชมโรงงานในอุตสาหกรรมอลูมิเนียมของ บริษัท ไตก อลูมิเนียม อินดัสทรี (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทขนาดใหญ่ที่ผลิตแท่งอลูมิเนียมจากการหลอม

อลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงและเศษอลูมิเนียม พบว่าในกระบวนการหลอมจะเกิดของเสีย 2 ประเภท คือ ตะกรัน (Dross) และฝุ่นควันจากการหลอมอลูมิเนียมที่ถูกดักจับโดยระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (Bag filter)

ตะกรันที่เกิดจากการหลอมอลูมิเนียมจะถูกนำไปคัดแยกขนาด โดยนำเข้าสู่เครื่อง Metal Recovery Machine (MRM) ซึ่งทำหน้าที่แยกอลูมิเนียมเหลวออกจากตะกรันที่เป็นของแข็งและส่งอลูมิเนียมเหลวที่แยกได้กลับเข้าสู่กระบวนการผลิต และของแข็งที่ถูกทำให้แห้งจาก MRM จะถูกส่งเข้าสู่เครื่อง Skim Cooler เพื่อทำให้ของแข็งที่ได้เย็นตัว จากนั้นจึงทำการคัดแยกขนาดเป็น 3 กลุ่ม คือ

- Big dross คือ ตะกรันอลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่กว่า 8 มิลลิเมตร
- M dross คือ ตะกรันอลูมิเนียมที่มีขนาดในช่วง 3 – 8 มิลลิเมตร
- S dross คือ ตะกรันอลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่า 3 มิลลิเมตร

ตะกรันทั้ง 3 กลุ่มที่เกิดจากกระบวนการผลิตนี้มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 500 ตัน/เดือน (ประมาณร้อยละ 5 ต่อมวลผลิตภัณฑ์) และมีสัดส่วนปริมาณอลูมิเนียมในตะกรันทั้ง 3 ขนาด ประมาณร้อยละ 40 – 50 โดยน้ำหนัก ตะกรันขนาดใหญ่ (Big dross) และขนาดกลาง (M dross) นั้น สามารถนำกลับไปหลอมในเตาหลอม เพื่อแยกอลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตได้ หรือส่งขายให้กับอุตสาหกรรมหลอมเหล็ก เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบที่ช่วยในการลดพลังงานที่ใช้ในการหลอม แต่สำหรับตะกรันขนาดเล็ก (S dross) ไม่สามารถนำกลับมาหลอมอีกครั้งได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กและเกิดการฟุ้งกระจายภายใน Burner ตะกรันขนาดเล็กนี้จึงถูกส่งกำจัดในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure Landfill) เพราะถูกจัดให้เป็นของเสียอันตรายรหัส 10 03 09 (HM) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ. 2548

สำหรับฝุ่นและควันที่เกิดจากระบบผลิต ซึ่งถูกดักจับในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ นั้น มีปริมาณประมาณ 10 ตัน/เดือน (ประมาณร้อยละ 1 ต่อมวลผลิตภัณฑ์) มีสัดส่วนของอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 10 และมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร) จึงไม่คุ้มค่าในการนำอลูมิเนียมกลับมาใช้ใหม่ ฝุ่นในส่วนนี้จึงต้องทำการกำจัดด้วยการฝังกลบในหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัยเช่นเดียวกัน เนื่องจากถูกจัดให้เป็นของเสียอันตรายรหัส 10 03 23 (HM) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ. 2548

จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูล กล่าวได้ว่า ผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียมที่ไม่สามารถนำมากลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตได้มาจาก 2 แหล่งกำเนิดหลัก ได้แก่ ตะกรัน

อลูมิเนียมขนาดเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 3 มิลลิเมตร) ซึ่งมีปริมาณอลูมิเนียมประมาณร้อยละ 40 – 50 โดยน้ำหนักและฝุ่นที่ดักจับได้จากถุงกรองฝุ่นในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (Bag filter) ซึ่งมีปริมาณอลูมิเนียมประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยที่ของเสียทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมการหลอมอลูมิเนียมที่มีการเติมสารปรุงแต่งกลุ่มที่มีโซเดียม

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากอุตสาหกรรมหลอมหล่ออลูมิเนียมในการศึกษาครั้งนี้จากทั้ง 2 แหล่งกำเนิดดังกล่าว เพื่อเป็นตัวแทนของของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียมแท่ง ซึ่งจะใช้ตัวอย่างในส่วนนี้ในการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมไปถึงศึกษาการเกิดปฏิกิริยากับน้ำและใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป

3.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1) เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี

1. เครื่องวัดพีเอช (pH meter, model PH900 pH/mV, Amtast)
2. เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer (model PW2400, Philips)
3. เครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (model D8-Discover, Bruker)
4. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP, model ICP-Plasma-1000, Perkin Elmer)
5. เครื่อง Elemental Analyzer (Sulfur determinator model SC-132)
6. เครื่อง Gas Chromatography/FID (model Trace GC, THERMO FINNIGAN)

2) อุปกรณ์ในการเก็บน้ำตัวอย่าง

1. กระบอกชั่งตวงขนาด 10 มิลลิลิตร
2. กระดาษกรอง GF/C
3. ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
4. หลอดเก็บน้ำตัวอย่างขนาด 16 x 150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียว

3) เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิธีวิเคราะห์ Nesslerization

1. ชุดหลอดเนสเลอร์
2. ขวดตีปิเปต
3. เครื่อง Spectrophotometer

4. ปีกเกอร์
5. คิวเวทท์ (Cuvette)
- 4) เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิธีวิเคราะห์ Iodometric
 1. ขวดรูปชมพู่
 2. บิวเรต
 3. ออโต้ปิเปต
 4. ปีกเกอร์
- 5) อุปกรณ์วิเคราะห์ปริมาณของแข็งละลายและสารแขวนลอย
 1. เครื่องอังไอน้ำ (water bath)
 2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
 3. ถ้วยระเหย (evaporating dish)
 4. กระดาษกรอง GF/C
 5. เครื่องดูดสูญญากาศ
 6. ชุดกรวยกรองบุคเนอ์
 7. เดซิเคเตอร์

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) Triton X-100 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ โดยมีสมบัติดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สมบัติของสารลดแรงตึงผิว TX-100

สมบัติ	ค่า
สี	ใส
พีเอช	6-8
มวลโมเลกุล	625
ความหนืด (cps)	240 (ที่ 25 °ซ)
แรงตึงผิว (mN/m)	47.02
ค่า CMC (mM)	0.22-0.24

- 2) น้ำยาเนสเลอร์
- 3) สารละลาย EDTA
- 4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.025 N
- 5) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
- 6) น้ำกลั่น
- 7) ฟีนอล์ฟธาไลน์อินดิเคเตอร์
- 8) ไฮโดรดีน
- 9) น้ำแป้ง

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองกับของเสีย 2 ชนิด คือ ผงตะกรันและฝุ่นจากกระบวนการหลอมอลูมิเนียม โดยในการศึกษานี้จะมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันจากการหลอมเศษอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก (Phase Identification) ปริมาณโลหะหนัก (Total Heavy Metal) ปริมาณซัลเฟอร์ (S Content) และปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา

การทดลองที่ 2 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาและสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเสียกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ รวมถึงศึกษาปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วย

การทดลองที่ 3 การศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา ได้แก่ ศึกษาผลกระทบของความเร็วเกเรเดียนท์ ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอย และศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิว เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาและหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาต่อไป

การทดลองที่ 4 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะที่ดีที่สุด และนำข้อมูลไปออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นและสรุปข้อมูลที่ได้จากการออกแบบต่อไป รวมถึงเสนอกรณีศึกษาสำหรับการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมปริมาณ 1 กิโลกรัมอีกด้วย

3.4.1 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันจากการหลอมเศษอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

วิธีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศจากอุตสาหกรรมอลูมิเนียมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-2 วิธีการดังกล่าวจะใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาใช้ประเมินการเกิดปฏิกิริยาตามสโตยชิโอเมตริก

ตารางที่ 3-2 วิธีวิเคราะห์ผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์	วัตถุประสงค์	วิธีการทดสอบ/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	น้ำชะผงตะกรันและเศษอลูมิเนียมต่างๆ	-ประเมินคุณภาพน้ำชะผงตะกรันและการใช้ประโยชน์เพื่อเป็นสารปรับ pH	pH meter
2. องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)	ผงตะกรันก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา	-ระบุประเภทและสัดส่วนชนิดของสารประกอบอลูมิเนียม -ประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยา	X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
3. องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก (Phase Identification)	ผงตะกรันก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา	-ยืนยันโครงสร้างผลึกของสารประกอบอลูมิเนียมชนิดต่างๆ -ประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยา	X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD)
4. ปริมาณโลหะหนัก (Total Heavy Metal)	ผงตะกรันก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา	-ทดสอบคุณภาพและปริมาณสารประกอบประเภทโลหะในผงตะกรัน -ประเมินความเป็นพิษเนื่องจากสารเจือปนประเภทโลหะหนัก	Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) -เตรียมตัวอย่างด้วยการสกัดด้วยกรด (Acid digestion)

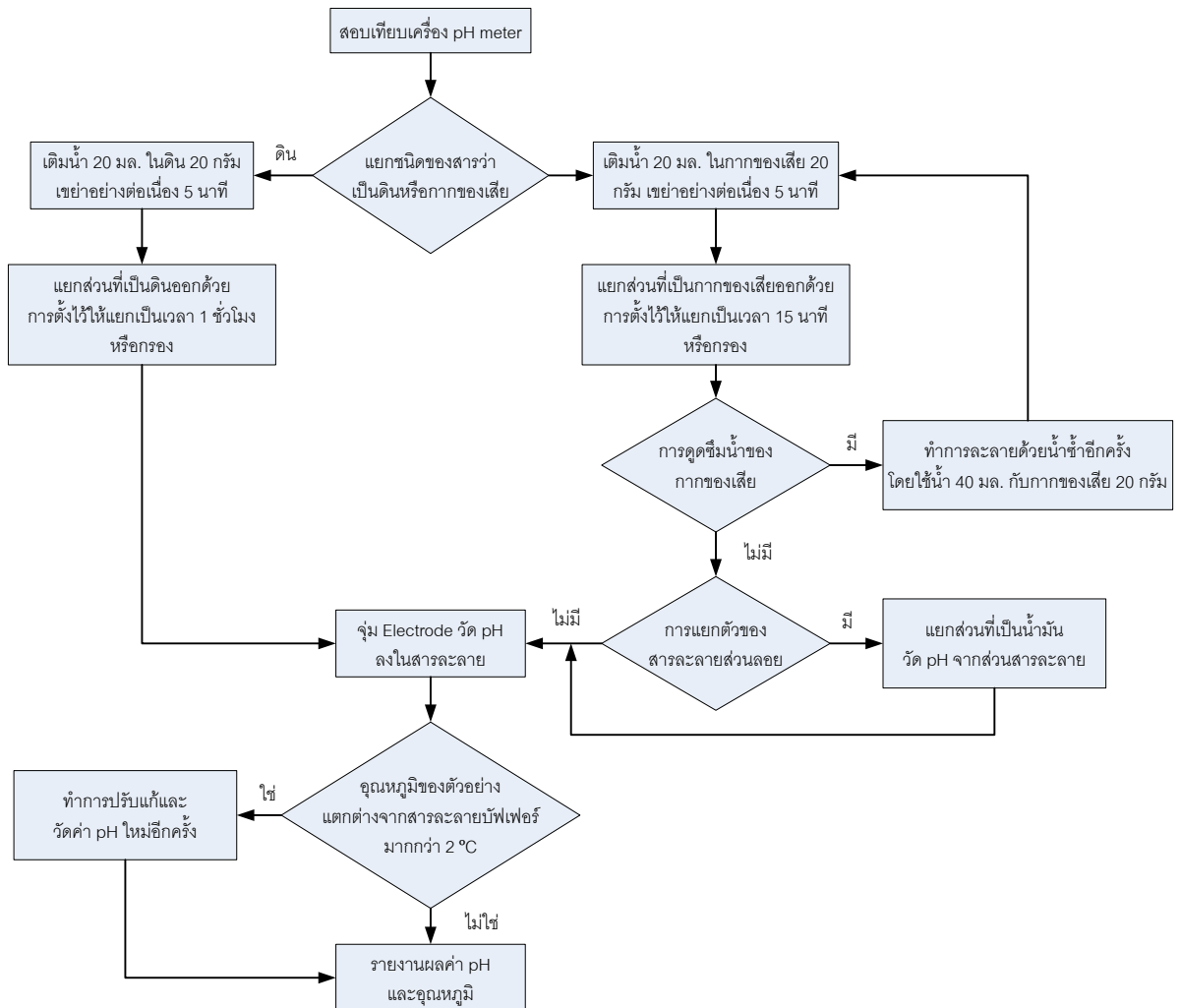
ตารางที่ 3-2 วิธีวิเคราะห์ผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม (ต่อ)

พารามิเตอร์	ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์	วัตถุประสงค์	วิธีการทดสอบ/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
5. ปริมาณซัลเฟอร์ (S content)	ผงตะกรันก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา	- เพื่อคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางสัดส่วนสตอยชิโอเมตริก - เพื่อทดสอบการสิ้นสุดปฏิกิริยา	Elemental Analyzer (CHNS/O Analyzer)
6. ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา (มีเทน ไฮโดรเจน และ แอมโมเนีย เป็นต้น)	ในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา	- เพื่อคำนวณปริมาณและสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้ - ประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ต่อไป	Gas Chromatography /FID และ Ion Chromatography

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและกายภาพต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพน้ำชะตัวอย่างและการใช้ประโยชน์เพื่อเป็นสารปรับ pH วิธีการวิเคราะห์ในการศึกษานี้อ้างอิงตามวิธีการวิเคราะห์ USEPA 9045D ซึ่งสามารถสรุปวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ดังภาพที่ 3-3 โดยทดสอบกับน้ำชะผงตะกรันและเศษอลูมิเนียมต่างๆ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ เครื่อง pH meter (Model PH900 pH/mV, Amtast)



รูปที่ 3-3 วิธีการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินและกากของเสียตาม

US EPA METHOD 9045D

(USEPA, 2001 : online)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

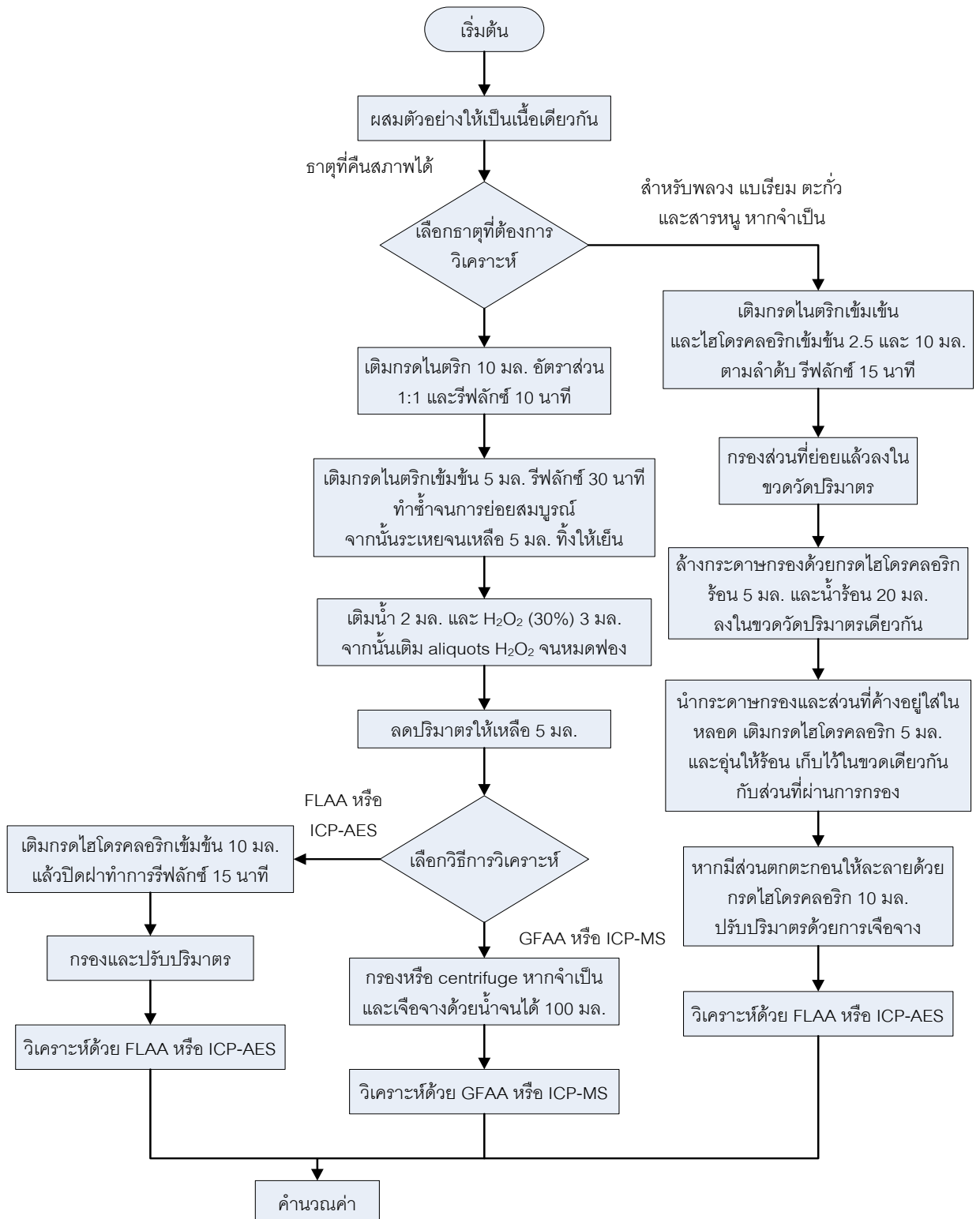
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition) ปรับปรุงวิธีจากการวิจัยของ Das และคณะ (2007) โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer (XRF, model PW2400, Philips) ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ คือ ผงตะกอนและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ เพื่อระบุประเภทและสัดส่วนของสารประกอบอลูมิเนียมแต่ละชนิด รวมทั้งประเมินความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยา

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก (Phase Identification)

การวิเคราะห์องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก (Phase Identification) มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกของสารประกอบอลูมิเนียมชนิดต่างๆ รวมถึงประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยาวิธีวิเคราะห์ได้ประยุกต์มาจากวิธีวิจัยของ Murayama และคณะ (2006) ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นผงตะกั่วและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction Spectrometer (XRD, model D8-Discover, Bruker) จากการวิเคราะห์นี้จะทราบองค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม และสามารถนำไปประเมินโอกาสในการเกิดปฏิกิริยารวมถึงก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้อีกด้วย

4. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (Total Heavy Metal)

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบปริมาณและคุณภาพของสารประกอบประเภทโลหะหนักในผงตะกั่วและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ และประเมินความเป็นพิษเนื่องจากสารเจือปนจำพวกโลหะหนัก โดยตัวอย่างที่วิเคราะห์คือ ผงตะกั่วและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำทำการวิเคราะห์โดยการเตรียมตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์โดยการย่อยด้วยกรด ตามวิธีของ USEPA METHOD 3050B (ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES AND SOILS) จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP, model ICP-Plasma-1000, Perkin Elmer) แผนผังสรุปวิธีการย่อยด้วยกรดแสดงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 วิธีการย่อยตัวอย่างด้วยกรดตามวิธีของ US EPA METHOD 3050B

(ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES AND SOILS)

(USEPA, 2001 : online)

5. การวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ (S Content)

การวิเคราะห์องค์ประกอบซัลเฟอร์ (S content) นั้นได้ดำเนินการวิเคราะห์ตามวิธีของ Das และคณะ (2007) เพื่อคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางสัดส่วนสโตยชิโอเมตริกระหว่างสารประกอบอลูมิเนียมที่มีซัลเฟอร์ที่เป็นส่วนประกอบของผงตะกรันกับน้ำและการสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวอย่างที่ทดสอบคือ ผงตะกรันและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องElemental Analyzer (Sulfur determinator model SC-132 (LECO, Corporation))

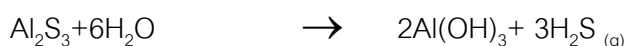
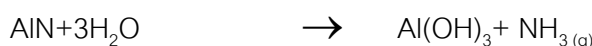
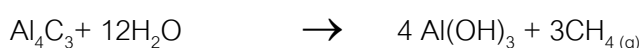
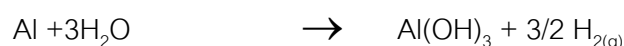
6. การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา

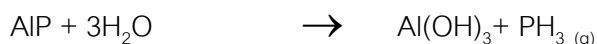
ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา เช่น มีเทน ไฮโดรเจน และแอมโมเนียโดยเก็บตัวอย่างจากก๊าซที่เกิดขึ้นในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำ ทั้งนี้ เพื่อคำนวณปริมาณและสัดส่วนก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้ และประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography/FID และ Ion Chromatography (model Trace GC, THERMO FINNIGAN)

3.4.2 วิธีการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาและสัดส่วนของก๊าซผลิตภัณฑ์

ผงตะกรันอลูมิเนียมที่เหลือจากกระบวนการผลิตนั้นหากสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นย่อมมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งก่อให้เกิดก๊าซต่างๆ ซึ่งอาจเป็นพิษหรือเป็นสารติดไฟก่อให้เกิดการลุกไหม้ได้ ปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อการนำผงตะกรันและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศมาใช้ประโยชน์ ดังนั้น การกำจัดพิษทางเคมีของผงตะกรันอลูมิเนียมจึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำ ก่อนที่จะนำผงตะกรันอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศมาใช้ประโยชน์ต่อไป

ปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างผงตะกรันอลูมิเนียมและน้ำนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายปฏิกิริยาขึ้นกับองค์ประกอบของผงตะกรันอลูมิเนียมเป็นสำคัญ ปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเกิดขึ้นได้จากสารประกอบอลูมิเนียมและน้ำ สามารถสรุปได้ดังนี้ (Shen และ Forssberg, 2003)





การจัดการให้ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในถังปฏิกิริยาซึ่งออกแบบและจัดเตรียมไว้นั้นเป็นแนวทางหนึ่งในการกำจัดพิษของตะกั่วอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป อย่างไรก็ตามการออกแบบถังปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศของตะกั่วอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศด้วยน้ำนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ชนิดและปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น รวมไปถึงลักษณะทางกายภาพและเคมีของมลพิษก่อนและหลังทำปฏิกิริยา ข้อมูลดังกล่าวสามารถทำให้ทราบถึงรูปแบบโดยรวมของการเกิดปฏิกิริยาของตะกั่วอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ รวมถึงสามารถประยุกต์เพื่อวิเคราะห์สมดุลมวลสารของตะกั่วอลูมิเนียมได้ (Mass balance) จากนั้นข้อมูลที่ได้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยา (Reactor Design)

การทดสอบการทำปฏิกิริยากับน้ำดำเนินการในระบบแบบที่ละเท (Batch Reactor) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม และการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีเทน (CH_4) และ ไฮโดรเจน (H_2) โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ	- 1:2, 1:5, 1:10 และ 1:15
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์	
- ก๊าซแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization (อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 2545 และ AOAC, 2000)
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration (APHA, 1998)
- ก๊าซมีเทน	- วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID
- ก๊าซไฮโดรเจน	- คำนวณจากสมดุลมวล
- ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย	- คำนวณจากสมการที่ (3-2)

ตารางที่ 3-3 สรุปตัวแปรในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความเร็วในการกวนผสม	- 150 รอบต่อนาที
- ปริมาตรน้ำ	- 600 มิลลิลิตร
- ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 3 ชั่วโมง

จากการทดลองจะนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียสะสม ($Total_{NH_3}$) ดังแสดงในสมการ (3-1) และค่าที่จะนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยา ได้แก่ ค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) อันดับปฏิกิริยา (n) และค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) ของใบพายในการกวนผสมต่อไป

$$Total\ NH_3 = \frac{C_R V_R + C_C V_C}{W_D} \quad (3-1)$$

เมื่อ C_R คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

C_C คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

V_R คือ ปริมาตรน้ำในถังปฏิกิริยา (ลิตร)

V_C คือ ปริมาตรน้ำในคอลัมน์น้ำ (ลิตร)

W_D คือ น้ำหนักของผงตะกั่วหรือฟลูออโรไมเนียม (กก.)

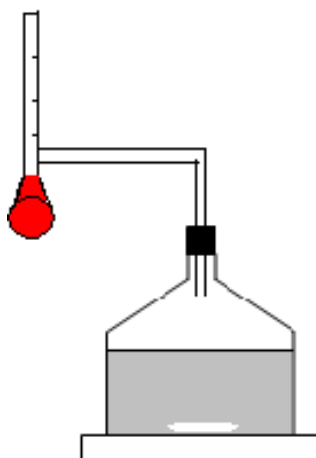
นอกจากนี้ จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดังสมการ (3-2)

$$Efficiency = \frac{TotalNH_3 \times 100}{NH_{3analysis}} \quad (3-2)$$

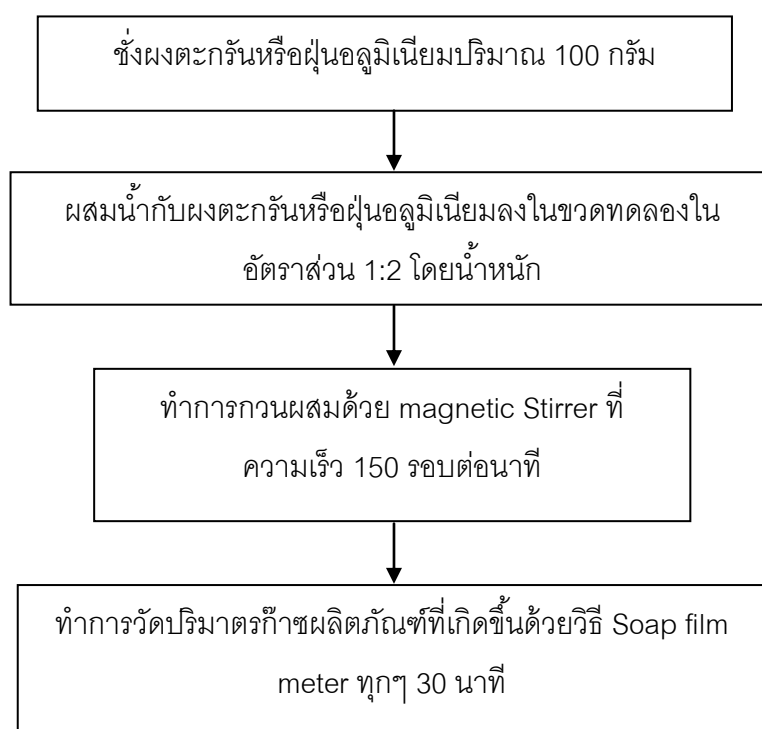
เมื่อ $NH_{3analysis}$ คือ ปริมาณแอมโมเนียที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3.4.1 มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.4.2.1 การศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม

ชุดอุปกรณ์การทดลองการศึกษาก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม แสดงดังภาพที่ 3-5 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-5 ชุดทดลองแบบที่ละเท (Batch Reactor) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์
โดยรวม

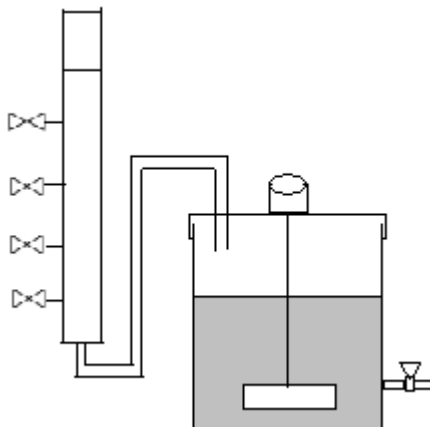


ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม

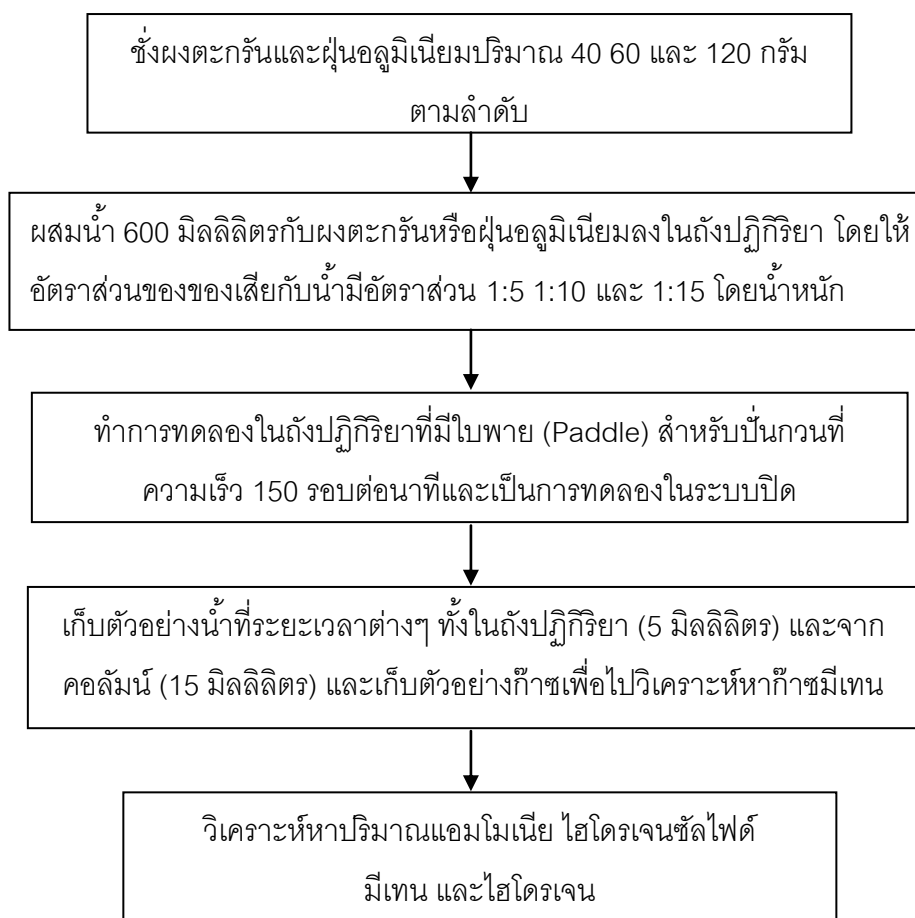
3.4.2.2 การศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

ชุดอุปกรณ์การศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 3-7 ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนต่างๆของของเสียและน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูแนวโน้มในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สัดส่วนต่างๆกันและดูความเหมาะสมของ

สัดส่วนระหว่างตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกรณ์ โดยวิธีการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3-8

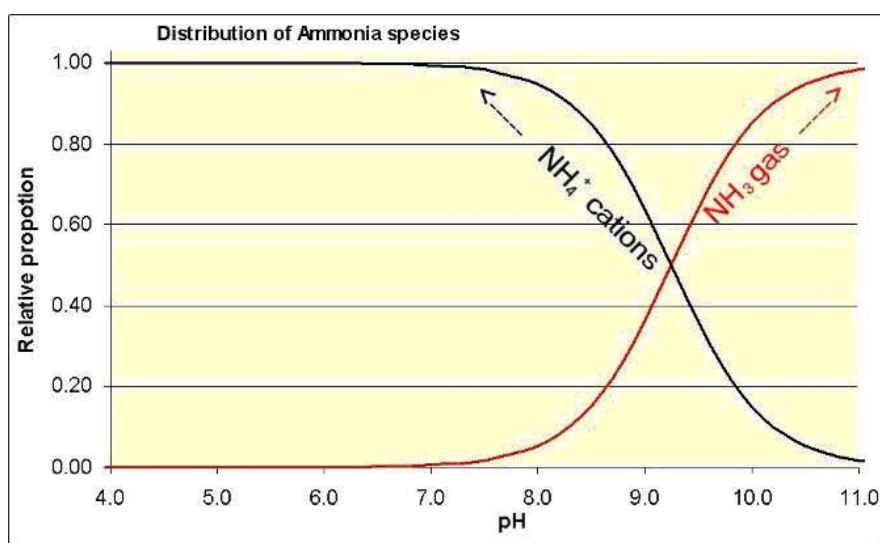


ภาพที่ 3-7 ชุดทดลองแบบที่ละเท (Batch Reactor) เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด



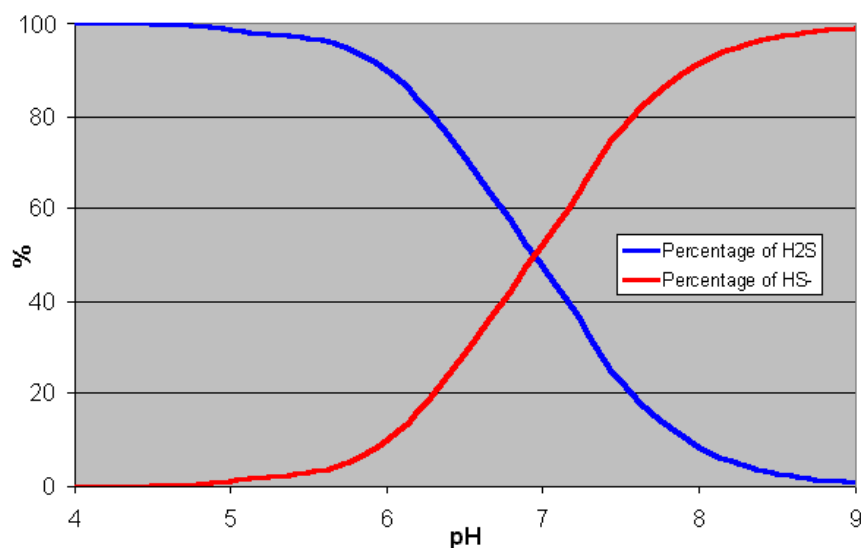
ภาพที่ 3-8 ขั้นตอนการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

หมายเหตุ : ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมพีเอชและอุณหภูมิในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ ผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกริยามีค่าพีเอชประมาณ 10 และมีอุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส โดยในคอลัมน์น้ำจะใช้น้ำกลั่น (พีเอชประมาณ 6-7) สำหรับดักจับก๊าซที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับภาพที่ 3-9 และ 3-10 พบว่าในถังปฏิกริยาที่มีสารละลายพีเอชประมาณ 10 จะทำให้ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่เกิดขึ้นละลายเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ได้ร้อยละ 20 ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาจะละลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 100 จึงไม่น่าจะมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หลุดออกไปจากถังปฏิกริยา แต่ถ้าหากหลุดออกมากก็จะถูกดักจับที่คอลัมน์น้ำอีกครั้ง โดยที่พีเอช 7 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะละลายน้ำได้ร้อยละ 50 ในขณะเดียวกันก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นและไม่ละลายในถังปฏิกริยาจะถูกดักจับที่คอลัมน์น้ำเช่นกัน โดยที่พีเอช 7 ก๊าซแอมโมเนียจะละลายในน้ำได้ร้อยละ 100 ดังนั้น ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถวิเคราะห์ได้จากผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่มีอยู่ทั้งในถังปฏิกริยาและคอลัมน์น้ำ



ภาพที่ 3-9 ความสามารถในการละลายของก๊าซแอมโมเนียที่พีเอชต่างๆ

(ALS Environmental, 2012 : Online)



ภาพที่ 3-10 ความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พีเอชต่างๆ

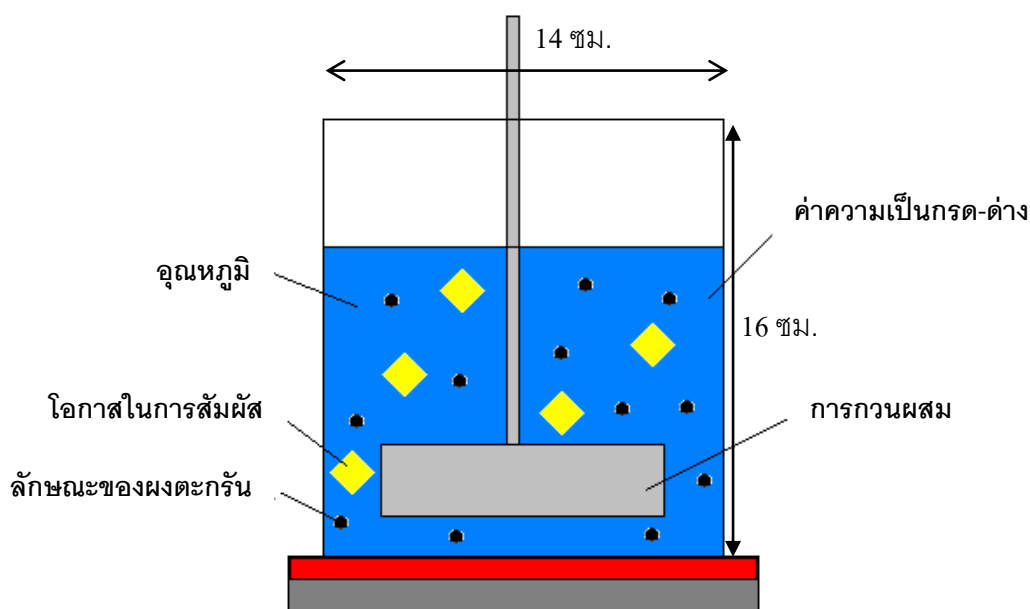
(Water Industry Association of Australia, 2008 : Online)

3.4.3 วิธีการวิเคราะห์แนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา

จากการศึกษาข้อมูลต่างๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศ พบว่าปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศกับน้ำสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้ (แสดงในภาพที่ 3-11)

- การกวนผสม (Mixing) : การกวนผสมจะช่วยให้ผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศมีโอกาสสัมผัสกับน้ำและทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นที่ความเร็วเกเรเดียนท์สูงๆ น่าจะช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ดีกว่าที่ความเร็วเกเรเดียนท์ต่ำๆ
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) : ผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศมีความเป็นด่างสูงมาก (พีเอชประมาณสิบ) ดังนั้น การทำการทดลองโดยเติมกรดหรือลดพีเอชของน้ำอาจจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นได้ (Fukumoto และคณะ, 2000)
- อุณหภูมิ (Temperature) : ปฏิกิริยาระหว่างผงตะกัณอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศกับน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ดังนั้น หากมีการลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้ต่ำลงอาจจะช่วยเร่งความเร็วของปฏิกิริยาได้

- โอกาสในการสัมผัส : พลาสต์ิกแขวนลอยที่ใส่เข้าไปในถังปฏิกริยาจะช่วยเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างน้ำและของเสียมมากขึ้น เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกริยาและช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกริยาได้อีกด้วย
- ลักษณะของผงตะกรัน : จากการวิเคราะห์สมบัติของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศพบว่า มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงทำให้เกิดปัญหาในการทำปฏิกริยา เนื่องจากไม่ชอบน้ำจึงทำปฏิกริยากับน้ำได้น้อย ดังนั้น หากมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เพื่อทำลายสภาพความไม่ชอบน้ำอาจจะทำให้เกิดปฏิกริยาได้ดีและเร็วขึ้น



ภาพที่ 3-11 ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งอัตราเร็วของปฏิกริยา

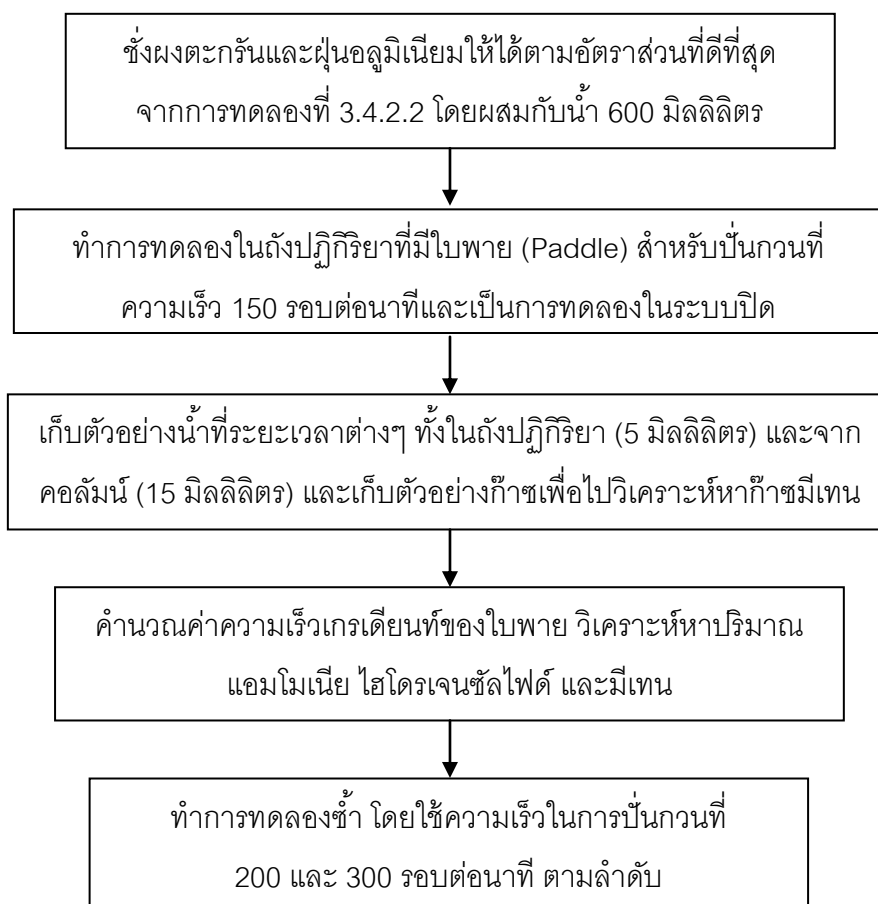
ดังนั้น จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งอัตราเร็วของปฏิกริยาระหว่างผงตะกรัน อลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศกับน้ำ สามารถนำมาออกแบบเพื่อทำการทดลองในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกริยา ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนต่างๆได้ ดังนี้

3.4.3.1 ศึกษาผลกระทบของความเร็วการเคลื่อนที่ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์

มีวัตถุประสงค์เพื่อดูแนวโน้มในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ต่างๆกันของการกวนผสม และหาความเหมาะสมของความเร็วการเคลื่อนที่ในการปั่นกวนเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกริยา โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของความเร็วการเคลื่อนที่แสดงในตารางที่ 3-4 และวิธีการทดลองในภาพที่ 3-12

ตารางที่ 3-4 สรุปตัวแปรในการทดสอบผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความเร็วในการกววนผสม	- 150 200 และ 300 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration
- ก๊าซมีเทน	- วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID
- ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย	- คำนวณจากสมการ (3-2)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ	- อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.2.2
- ปริมาตรน้ำ	- 600 มิลลิลิตร
- ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-12 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์

หมายเหตุ : 1. ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมพีเอชและอุณหภูมิในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกิริยากับผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกิริยามีค่าพีเอชประมาณ 10 และมีอุณหภูมิ 29 °ซ

2. สมการในการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ของใบพาย (Metcalf & Eddy, 2004) ดังแสดงในสมการด้านล่างนี้

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = F_D v_p = \frac{C_D A \rho v_p^3}{2}$$

เมื่อ	G	คือ	ความเร็วเกรเดียนท์ (s ⁻¹)
	P	คือ	กำลังที่ต้องการ (W)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) (N•s/m ²)
	V	คือ	ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (m ³)
	F _D	คือ	แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)
	C _D	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนไหวของใบพาย
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของใบพาย (m ²)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m ³)
	v _p	คือ	ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพายกับน้ำ (m/s)

3.4.3.2 ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

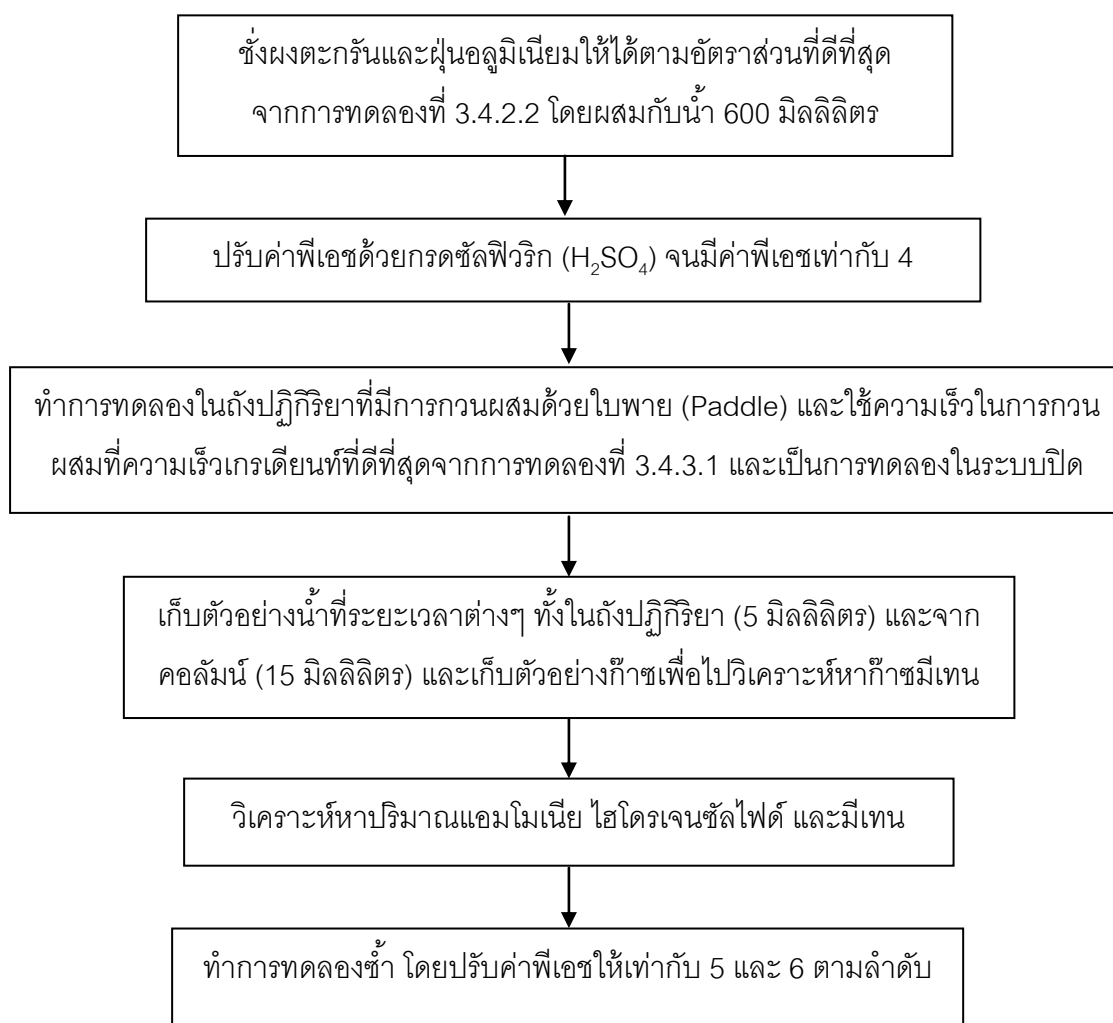
มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างแสดงในตารางที่ 3-5 และวิธีการทดลองในภาพที่ 3-13

ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ค่าพีเอช	- 4 5 และ 6
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration

ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง (ต่อ)

ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
<ul style="list-style-type: none"> - ก๊าซมีเทน - ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย 	<ul style="list-style-type: none"> - วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID - คำนวณจากสมการ (3-2)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ - ความเร็วในการปั่นกววน - ปริมาตรน้ำ - ระยะเวลาในการเดินระบบ 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.2.2 - ความเร็วเกเรเดียนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.3.1 - 600 มิลลิลิตร - 3 ชั่วโมง



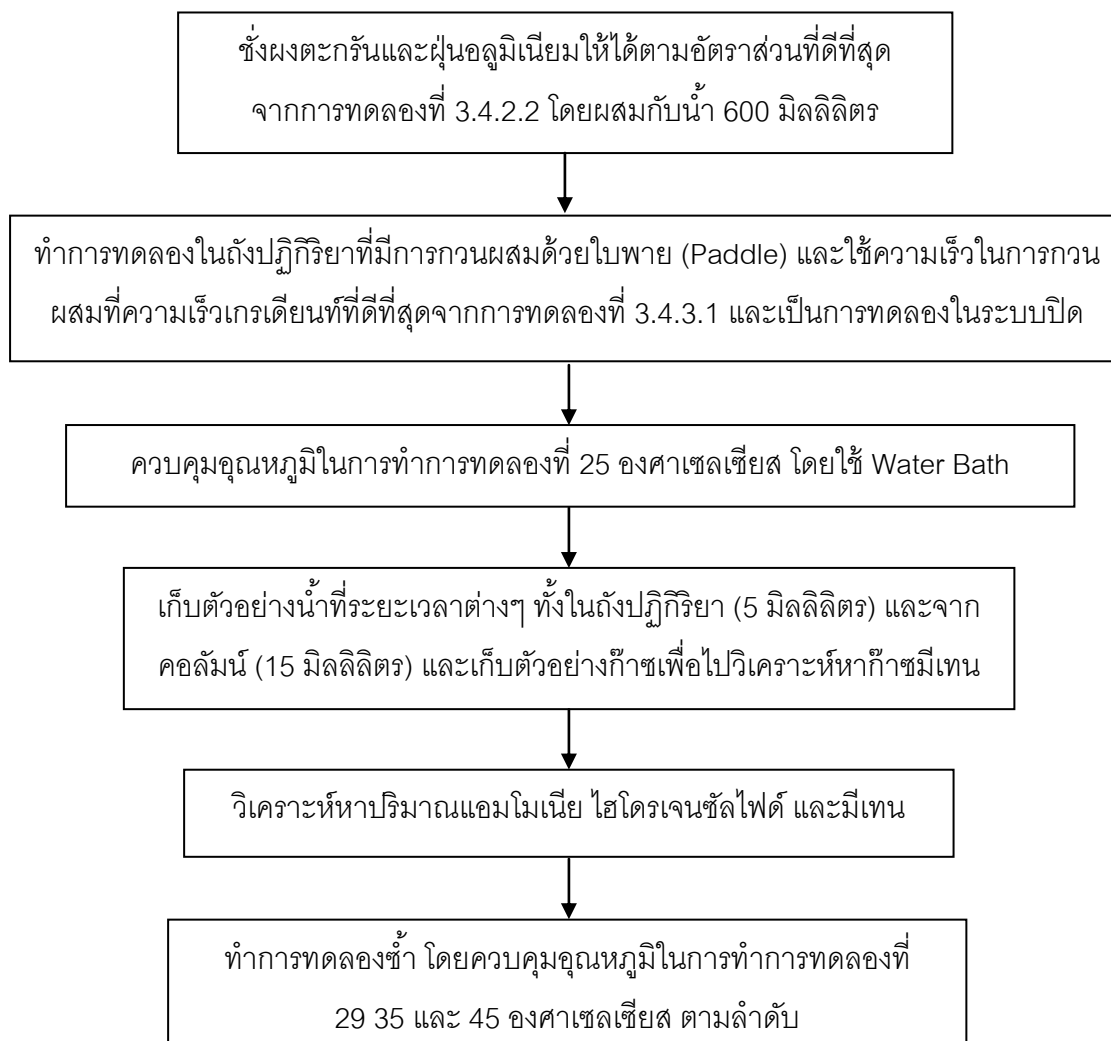
ภาพที่ 3-13 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง

หมายเหตุ : 1. ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกิริยากับผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกิริยามีอุณหภูมิ 29 °ซ

2. การทดลองนี้อาจจะไม่เหมาะสม ถ้าหากในน้ำมีค่า TDS และสภาพต่างสูง เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้และเพิ่มภาระบรรทุกให้กับน้ำมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้น้ำเสียกำจัดได้ยากขึ้น

3.4.3.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆกัน เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 3-6 และวิธีการทดลองในภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ตารางที่ 3-6 สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อุณหภูมิ	- 25 29 35 และ 45 องศาเซลเซียส
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration
- ก๊าซมีเทน	- วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID
- ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย	- คำนวณจากสมการ (3-2)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ	- อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.2.2
- ความเร็วในการปั่นกววน	- ความเร็วเกเรเดียนท์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.3.1
- ปริมาตรน้ำ	- 600 มิลลิลิตร
- ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 3 ชั่วโมง

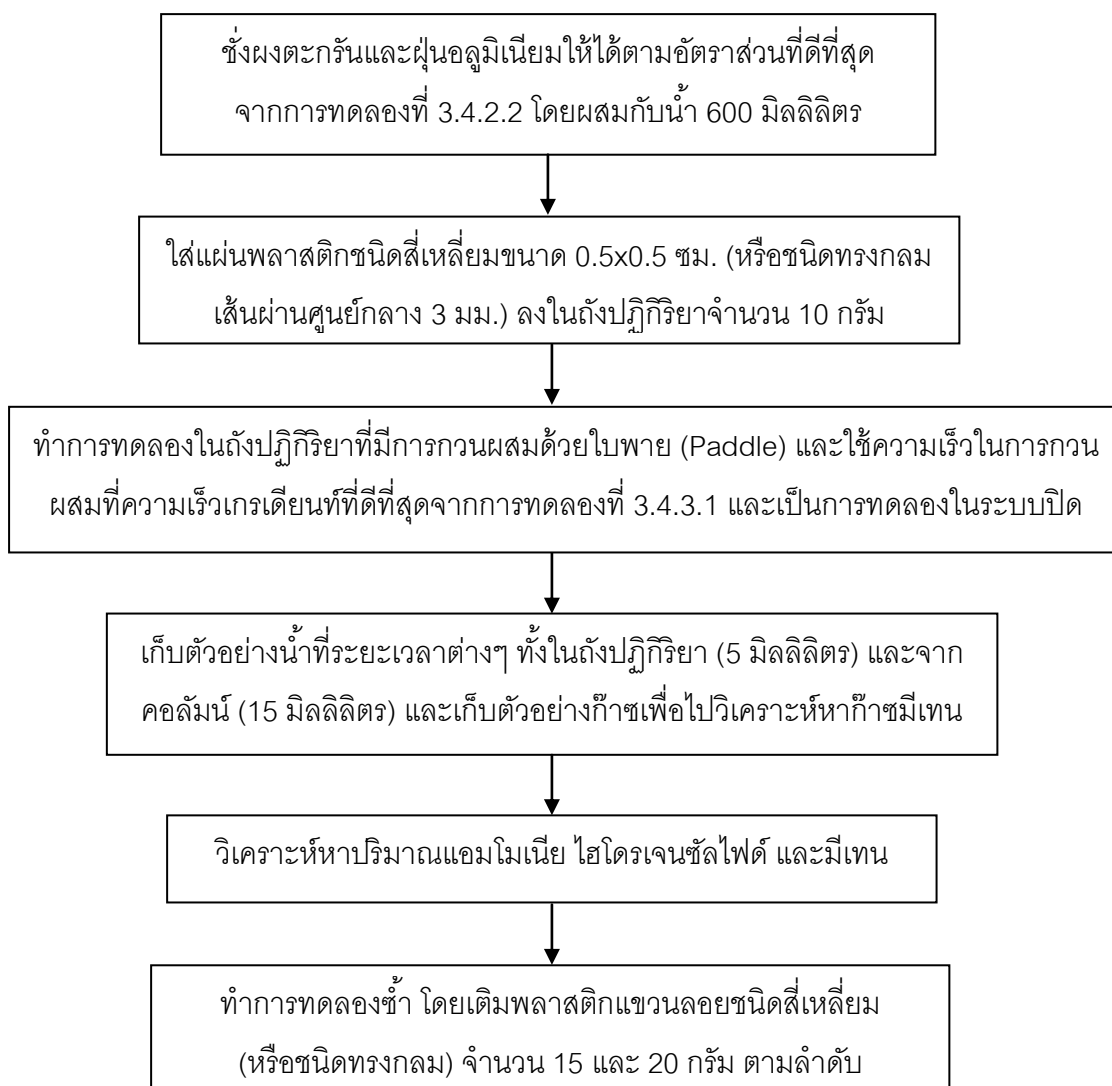
หมายเหตุ : ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมพีเอชในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกิริยากับผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกิริยามีค่าพีเอชประมาณ 10

3.4.3.4 ศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอยที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่เกิดจากการใช้พลาสติกแขวนลอยในการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการใส่วัสดุประเภทแผ่นพลาสติกเข้าไปในถังปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับเฟสน้ำได้มากขึ้น โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองใช้พลาสติกพีวีซีที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน 2 ชนิด คือ ชนิดสี่เหลี่ยมและชนิดทรงกลม เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้น โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอยแสดงในตารางที่ 3-7 และวิธีการทดลองในภาพที่ 3-15

ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษามลกระทบของพลาสติกแขวนลอย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- พลาสติกแขวนลอยชนิดสีเหลืองและทองกลม	- 10 15 และ 20 กรัมต่อปริมาตรน้ำ 600 มิลลิลิตร (16.7 25 และ 33.3 กรัมต่อลิตร)
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย - ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ - ก๊าซมีเทน - ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization - วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration - วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID - คำนวณจากสมการ (3-2)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ - ความเร็วในการปั่นกววน - ปริมาตรน้ำ - ระยะเวลาในการเดินระบบ	- อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.2.2 - ความเร็วเกวเดียนท์ที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.3.1 - 600 มิลลิลิตร - 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-15 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอย

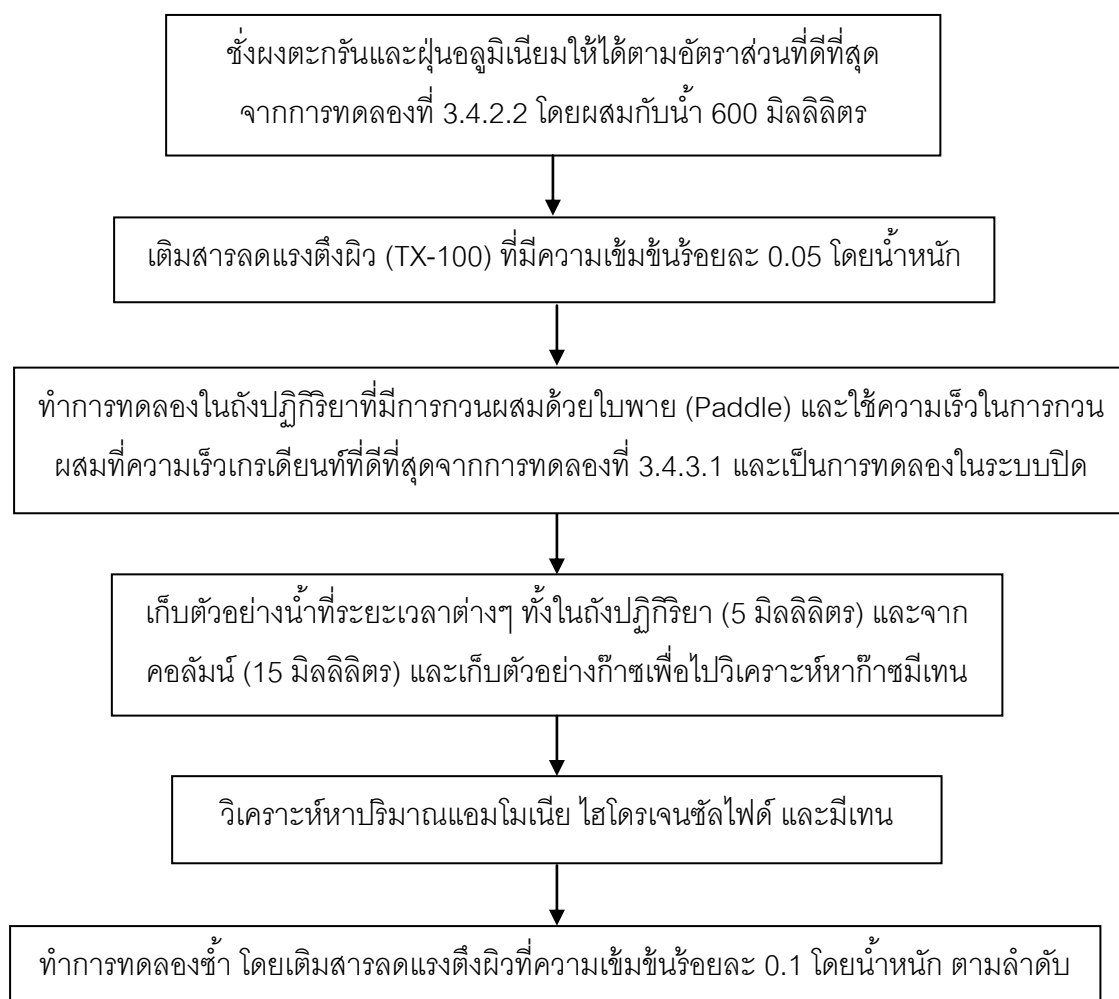
หมายเหตุ : ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมพีเอชและอุณหภูมิในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกิริยากับผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกิริยามีค่าพีเอชประมาณ 10 และมีอุณหภูมิ 29 °ซ

3.4.3.5 ศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิว โดยเฉพาะฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อให้ของเสียทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้นและได้สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลองคือ Triton X-100 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) โดยสรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวแสดงในตารางที่ 3-8 และวิธีการทดลองในภาพที่ 3-16

ตารางที่ 3-8 สรุปตัวแปรในการทดสอบการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิว

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- สารลดแรงตึงผิว (TX-100)	- ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 และ 0.1 โดยน้ำหนัก
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization
- ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	- วิเคราะห์ด้วยวิธี Iodometric-Titration
- ก๊าซมีเทน	- วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography/FID
- ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย	- คำนวณจากสมการ (3-2)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ	- อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.2.2
- ความเร็วในการปั่นกววน	- ความเร็วเกวเดียนที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.4.3.1
- ปริมาตรน้ำ	- 600 มิลลิลิตร
- ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-16 ขั้นตอนการศึกษามลกระทบของสารลดแรงตึงผิว

หมายเหตุ : 1. ในการทดลองนี้ไม่ได้ควบคุมพีเอชและอุณหภูมิในการทดลอง โดยน้ำที่ทำปฏิกรณ์กับผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมในถังปฏิกรณ์มีค่าพีเอชประมาณ 10 และมีอุณหภูมิ 29 °ซ

2. สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 มีค่า CMC 0.22-0.24 มิลลิโมลาร์ (mM) และสาเหตุที่ไม่ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเท่ากับค่า CMC เนื่องจากจะต้องใช้สารลดแรงตึงในปริมาณมาก อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มภาระบรรจุให้กับน้ำมากขึ้นอีกด้วย

3.4.4 แนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์เบื้องต้น

การออกแบบถังปฏิกรณ์ระหว่างผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศกับน้ำ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการ

ทดลองการเกิดปฏิกิริยา โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นนี้
 ดังแสดงในตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด เครื่องมือและวิธีการวัด

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวัด
ขนาดของผงตะกอนและฝุ่นอนุภาคนิยม	Image Analysis Software
ความเร็วในการตกตะกอน	Settling Test
ชนิดถังปฏิกิริยา	วิเคราะห์จากการทดลอง 3.4.4.1
ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k)	Differential method
ลำดับการเกิดปฏิกิริยา (n)	Differential method
ความเร็วเกรเดียนท์ (Gradient velocity)	คำนวณจากการทดลอง 3.4.3.1
ระยะเวลาที่กักน้ำ (Retention time)	วิเคราะห์จากการทดลอง
ประสิทธิภาพในการบำบัด	วิเคราะห์จากการทดลอง 3.4.4.2
ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (ต่อ 1 ต้นตัวอย่าง)	วิเคราะห์จากอัตราส่วนในการทดลองระหว่าง ตัวอย่างของเสียกับน้ำ

3.4.4.1 การวิเคราะห์การตกตะกอนและขนาดของอนุภาค

การตกตะกอนใช้หลักการแยกของแข็งออกจากน้ำโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและความแตกต่างของขนาดตะกอน ใช้ในหลายที่ในกระบวนการบำบัด เช่น การตกตะกอนแยกกรวด ดินทราย หรือใช้ในการแยกสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์หลังจากการทำ Coagulation/Flocculation เป็นต้น โดยทั่วไปการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยสามารถแบ่งได้เป็น 4 แบบ ตามระดับความเข้มข้นและลักษณะของของแข็งในน้ำ ได้แก่

- การจมตัวแบบโดด (Discrete settling)
- การจมตัวแบบสร้างฟล็อก (Flocculant settling)
- การจมตัวแบบเป็นชั้น (Zone settling)
- การจมตัวแบบอัด (Compression settling)

การตกตะกอนของผงตะกอนจากการหลอมอนุภาคนิยมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศก็เป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้สำหรับออกแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสม จากการทำการทดสอบเบื้องต้น พบว่าผงตะกอนจากการหลอมเศษอนุภาคนิยมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศมี

การจมตัวแบบโดด (discrete settling) ซึ่งถือได้ว่าในขณะที่อนุภาคของแข็งแขวนลอยกำลังจมตัวอยู่นั้น ของแข็งแขวนลอยจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาด (ไม่เหมือนกับการจมตัวแบบสร้างฟล็อก) และจะจมตัวอย่างอิสระ (ไม่เหมือนกับการจมตัวแบบเป็นชั้น)

ความเร็วในการจมตัวของอนุภาคแบบโดดขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเอง และลักษณะทางกายภาพของของเหลว ซึ่งสามารถคำนวณหาความเร็วในการจมตัวได้ด้วยกฎของสโตค (Stoke's law) ดังสมการที่ 3-3

$$V_s = gd^2(\rho_s - \rho) / (18\mu) \quad (3-3)$$

เมื่อ V_s = ความเร็วในการจมตัวแบบโดด (เมตร/วินาที)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

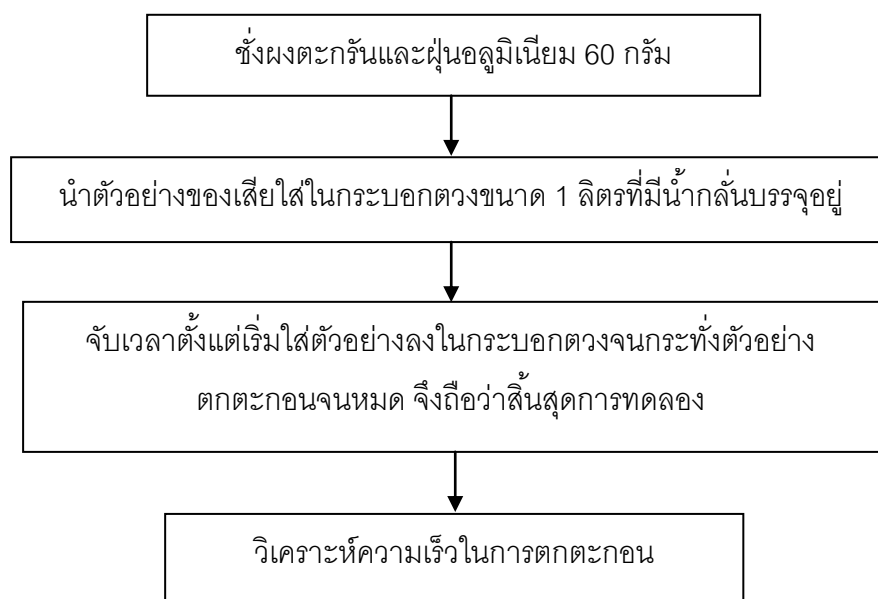
g = ค่าคงที่แรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที²)

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค (กก./ลบ.ม.)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (ของเหลว) (กก./ลบ.ม.)

μ = ความหนืดพลสัมบูรณ์ (absolute dynamic viscosity) ของน้ำ (กก./เมตร-วินาที)

การวิเคราะห์การตกตะกอนจะทำให้ทราบถึงความเร็วในการตกตะกอน ขนาดของอนุภาค และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนรวมถึงการเดินระบบที่จะต้องควบคุมอัตราการไหลและระยะเวลาที่เก็บน้ำให้เหมาะสมกับการตกตะกอนอีกด้วย โดยการวิเคราะห์การตกตะกอนมีวิธีการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 ขั้นตอนการศึกษาความเร็วในการตกตะกอน

สำหรับการหาขนาดอนุภาคของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ (software) ทางคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและมีประสิทธิภาพ โดย Image analysis เป็นกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้ Image analysis software จากภาพที่เป็น Image file ซึ่งได้จากการถ่ายโดยตรงจากกล้องดิจิทัลและประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์

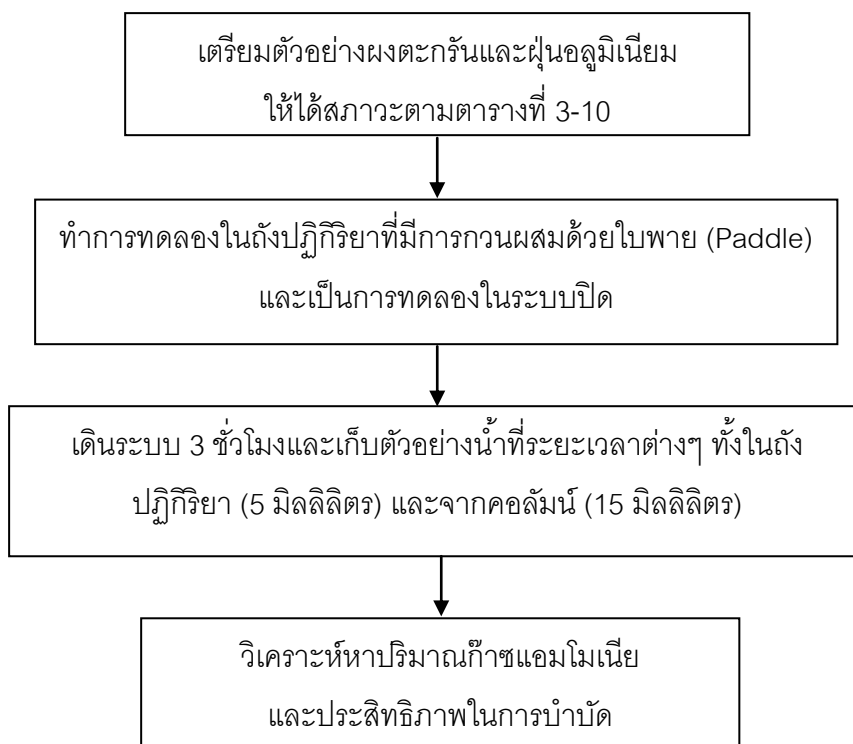
3.4.4.2 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมที่สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

จากการทดลองทดสอบการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (การทดลอง 3.4.2) และการศึกษาแนวทางในการเร่งปฏิกิริยา (การทดลอง 3.4.3) จะทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของของเสียทั้งสองชนิดกับน้ำ โดยข้อมูลที่จะได้จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	ค่าที่เหมาะสม	
	ผงตะกรัน	ฝุ่นอลูมิเนียม
อัตราส่วน (ของเสีย : น้ำ) ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹) พีเอช อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ปริมาณพลาสติกแขวนลอย (กรัม/ลิตร) สารลดแรงตึงผิว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		

ข้อมูลในตารางที่ 3-10 จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมที่สภาวะที่เหมาะสม เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้ยังนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป โดยวิธีการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 ขั้นตอนการทดลองการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสม

หมายเหตุ : น้ำทิ้งจากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ปริมาณสารแขวนลอย (SS) อุณหภูมิ ความเป็นด่าง (Alkalinity) และปริมาณโลหะหนัก เพื่อดูคุณภาพน้ำทิ้งและเสนอแนวทางในการบำบัดน้ำเสียต่อไป

3.4.4.3 การคำนวณหาลำดับของปฏิกิริยา

จากผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผงตะกรันจากการหลอมเศษอลูมิเนียมกับน้ำเป็นปฏิกิริยาประเภทผันกลับไม่ได้ ซึ่งสามารถคำนวณหาอันดับปฏิกิริยาสามารถหาได้จากวิธี Differential ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการหาอันดับปฏิกิริยา โดยใช้ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการโดยตรง และสามารถคำนวณหาค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วของปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ได้วิธีการหาอันดับปฏิกิริยาต่างๆ แสดงได้ดังนี้

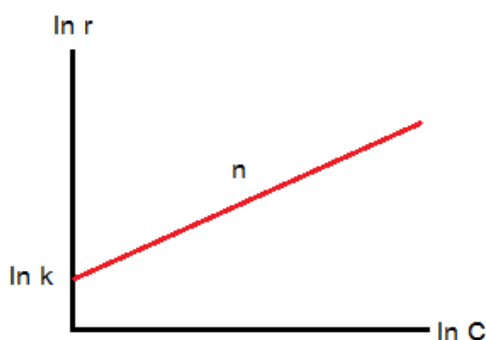
ปฏิกิริยา: $C \rightarrow P$

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปอนุพันธ์: $r = -\frac{dC}{dt} = kC^n$ (3-4)

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปปริพันธ์: $\ln r = \ln k + n \ln C$ (3-5)

เมื่อ r	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
C	=	ค่าความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ
k	=	ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วของปฏิกิริยา
n	=	อันดับการเกิดปฏิกิริยา

จากสมการที่ (3-5) สามารถสร้างกราฟเส้นตรงแสดงดังภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 กราฟแสดงการหาค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k)

3.4.4.4 การออกแบบถังปฏิกิริยา

ในการออกแบบระบบในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมนั้นจำเป็นอาศัยข้อมูลของเวลาและอัตราการไหลเป็นหลัก ซึ่งรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยานั้นก็เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหล เวลาในการทำปฏิกิริยาและอื่นๆ ถังปฏิกริยาต่างๆที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 4 ประเภท ดังนี้

- 1) ถังปฏิกริยาแบบเท (Batch Reactor)
- 2) ถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug-Flow Reactor)
- 3) ถังปฏิกริยาแบบกวนผสมบอรันที่ไหลต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)
- 4) ถังปฏิกริยาแบบฟลูอิดไรซ์ (Fluidized-Bed)

ทั้งนี้ ข้อมูลจากลักษณะของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม รวมทั้งการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบถังปฏิกริยาเบื้องต้น โดยจากการทดลองที่ 3.4.4 จะทำให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบถังปฏิกริยา ดังแสดงในตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการออกแบบถังปฏิกริยา

พารามิเตอร์	ชนิดของถังปฏิกริยา	
	ผงตะกั่วอนุโมเนียม	ฝุ่นอนุโมเนียม
<ul style="list-style-type: none"> - ชนิดถังปฏิกริยา - ความเร็วเกรเดียนท์ (G) - ค่าคงที่การเกิดปฏิกริยา (k) - ลำดับการเกิดปฏิกริยา (n) - ระยะเวลาพัก - ปริมาตรของถังปฏิกริยา (ต่อ 1 ตันกิโกรัม) - ประสิทธิภาพ 		

3.4.5 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

ต้นทุนการบำบัดในงานวิจัยนี้เป็นต้นทุนการบำบัดเบื้องต้นที่คำนวณภายใต้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากงานวิจัย และไม่ได้คิดรวมต้นทุนการก่อสร้างระบบและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งต้นทุนในการเดินระบบจะประกอบไปด้วยต้นทุนของพลังงานที่ใช้หรือค่าไฟฟ้า และต้นทุนของสารเคมี

จากการวิเคราะห์เหล่านี้จะทำให้ทราบข้อมูลของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงในแง่ของการขนส่งและการกำจัดผงตะกั่วจากการหลอมอนุโมเนียม และฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศของโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ การฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย การนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์ การใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และการนำไปใช้ในกระบวนการหลอมเหล็ก เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการกำจัดของเสียที่เหมาะสมต่อไป

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ผลการศึกษา ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม ผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยากับ น้ำรวมถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา แนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยา เบื้องต้น และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดของเสีย โดยข้อมูลต่างๆจะแสดงใน หัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียม และฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

ในส่วนนี้จะแสดงผลการศึกษการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงตะกรัน และฝุ่นอลูมิเนียม ข้อมูลต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์จะช่วยประเมินโอกาสการเกิดปฏิกิริยาและ คาดการณ์ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา ทั้งในด้านของชนิดของก๊าซและปริมาณที่ จะเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการนำไปออกแบบการทดลอง เพื่อทดสอบการทำปฏิกิริยา ของผงตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำและเป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป โดยผล การวิเคราะห์ดังแสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เมื่อนำตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด มาทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างโดยทดสอบกับน้ำชะผงตะกรัน และฝุ่นอลูมิเนียมพบว่ามีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 10 ซึ่งมากกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539) ซึ่งกำหนดให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.5-9.0 หมายความว่าตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดมีความเป็น ด่างสูง ซึ่งจะมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนวัสดุต่าง ๆ ตลอดจนเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์หรือสัตว์ นอกจากนี้การสูดดมไอระเหยจะทำให้ระคายเคืองจมูกและทำให้แสบตาได้

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ผงตะกรัน	ฝุ่น		ผงตะกรัน	ฝุ่น
Na ₂ O	0.37	0.46	TiO ₂	0.56	0.79
MgO	3.70	6.47	V ₂ O ₅	< 0.01	0.04
Al ₂ O ₃	48.04	55.50	Cr ₂ O	0.10	0.09
SiO ₂	8.58	4.54	MnO ₂	0.57	0.36
P ₂ O ₅	0.19	0.23	Fe ₂ O ₃	1.84	2.21
SO ₃	0.46	1.76	NiO	0.12	0.13
Cl	2.80	6.50	CuO	1.47	1.14
K ₂ O	1.62	5.25	ZnO	0.78	2.15
CaO	1.65	1.65	BaO	0.11	0.27

ตารางที่ 4-2 ปริมาณอลูมิเนียมในผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

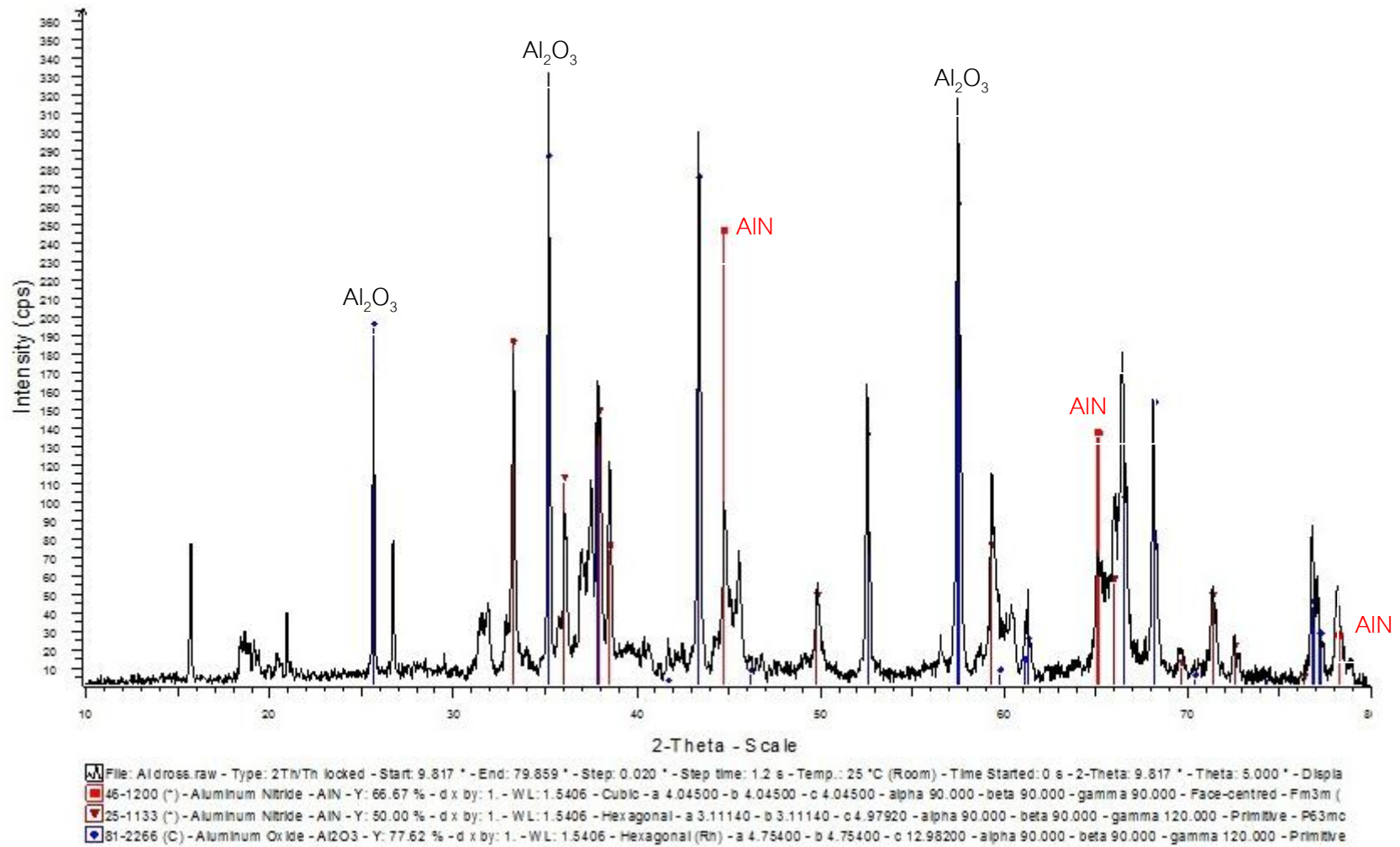
ตัวอย่าง	ปริมาณอลูมิเนียม (มก./กก.)	สัดส่วนโดยมวล (ร้อยละ)
ผงตะกรัน	556834	55.68
ฝุ่นอลูมิเนียม	142567	14.26

สำหรับการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันอลูมิเนียมจะศึกษาด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ผงตะกรันอลูมิเนียมที่แสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่า ผงตะกรันอลูมิเนียมมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบอลูมิเนียม แต่เมื่อ

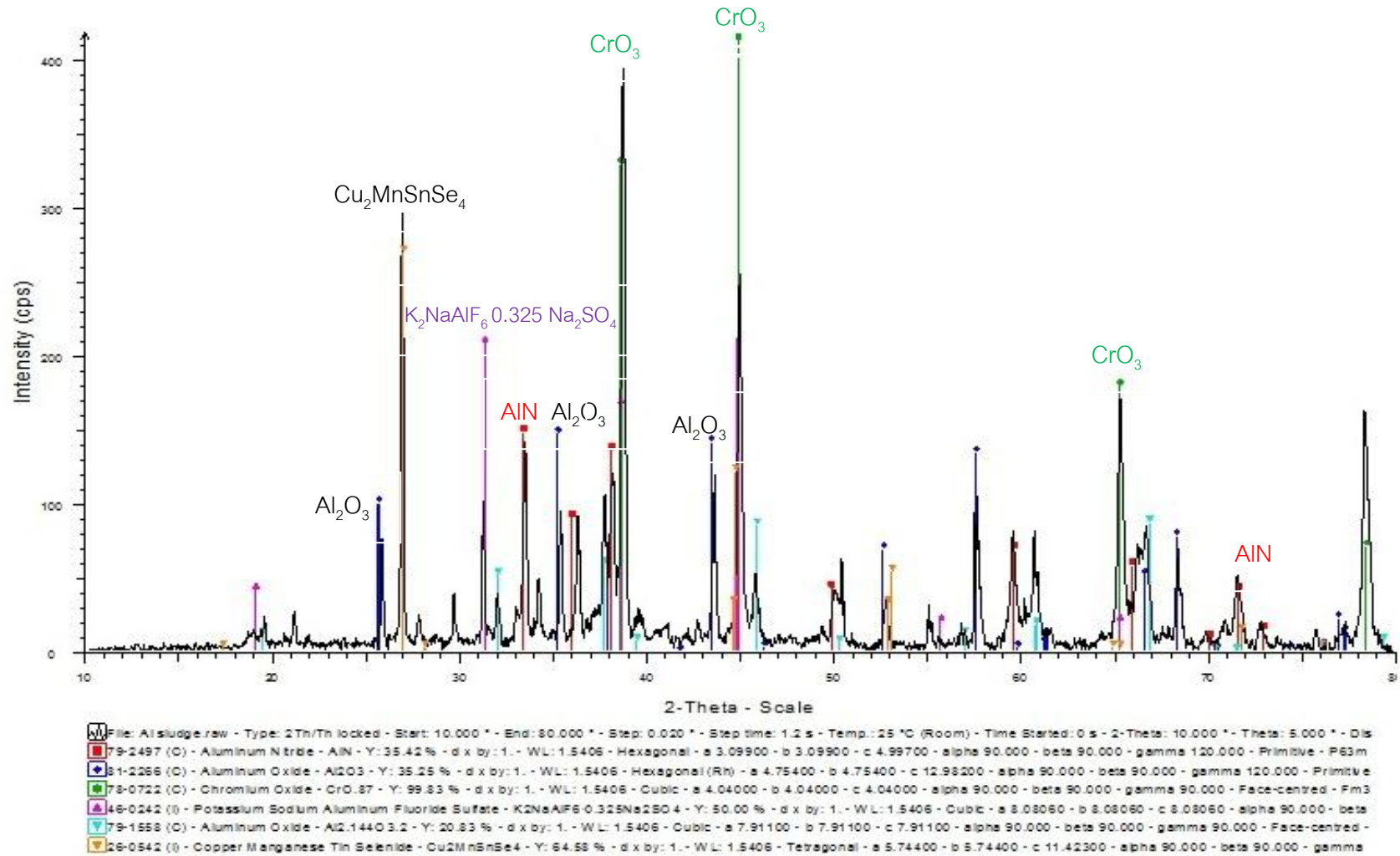
พิจารณาตามความเข้มข้นประมาณการที่ได้รับข้อมูลเบื้องต้นแล้วจะมีค่าไม่เท่ากัน ในกรณีนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการสุ่มเลือกตัวอย่าง เพราะในการวิเคราะห์ XRF นั้น จะใช้ตัวอย่างที่ปริมาณน้อยประมาณ 5-10 กรัม จึงอาจเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วย XRF พบว่าผลรวมความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมไม่ได้ร้อยละ 100 และคาดว่าองค์ประกอบทางเคมีที่หายไปน่าจะเป็นสารเคมีอินทรีย์ (Organic Compounds) อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความชัดเจนเกี่ยวกับปริมาณความเข้มข้นของอลูมิเนียมที่มีในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม นั้น จึงวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของอลูมิเนียมในตัวอย่างด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยกรดและตรวจสอบความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดปริมาณโลหะหนัก Inductively-Couple Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยกรดแสดงดังตารางที่ 4-2 จากตารางพบว่าความเข้มข้นของอลูมิเนียมในตัวอย่างผงตะกรันมีปริมาณสอดคล้องกับความเข้มข้นที่กำหนดไว้เบื้องต้นจากทางโรงงานอุตสาหกรรมหลอมอลูมิเนียมแต่ไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRF ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของอลูมิเนียมในตัวอย่างด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยกรดเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการทดลองอื่นๆต่อไป

4.1.3 องค์ประกอบด้านโครงสร้างผลึก (Phase Identification)

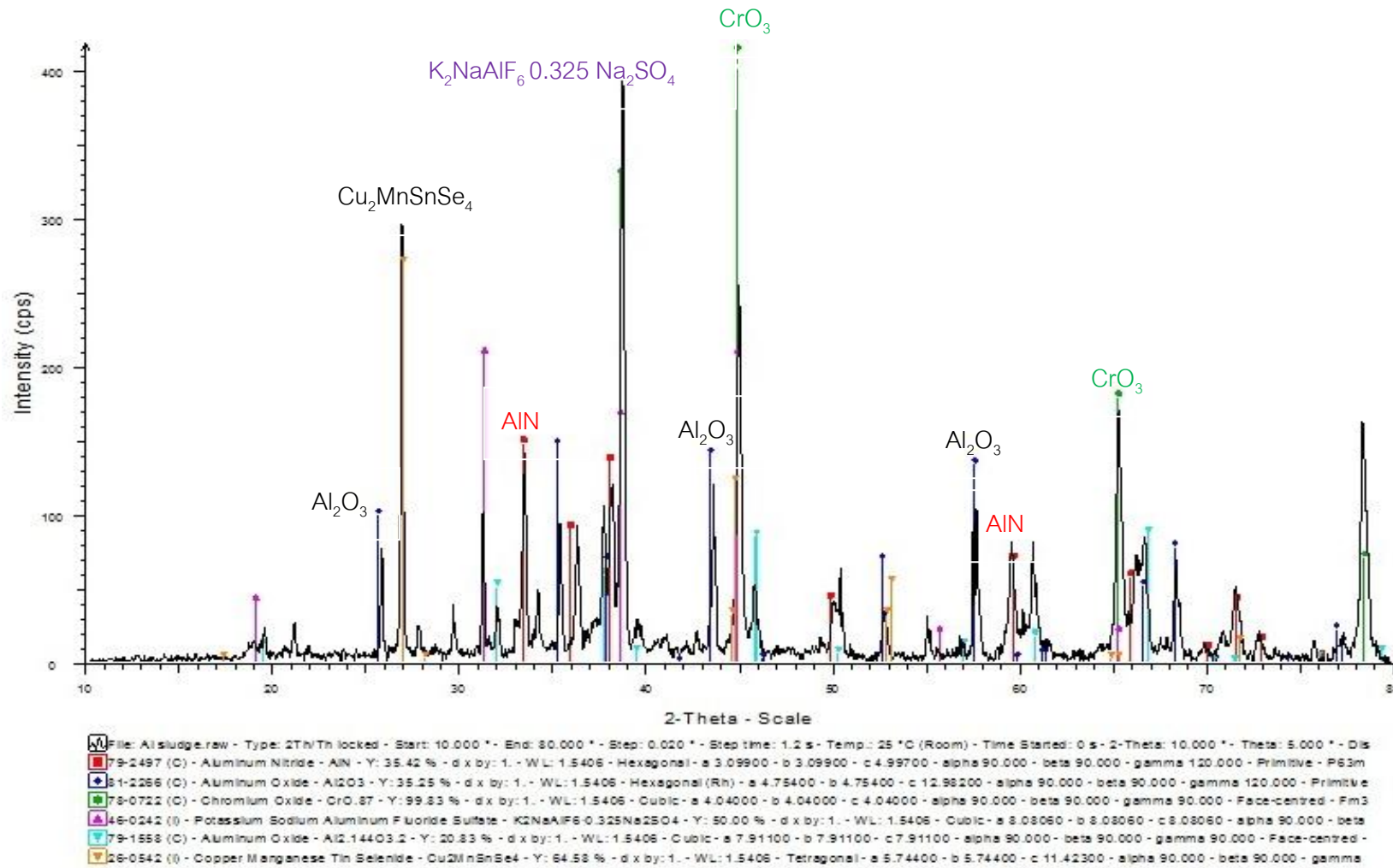
สำหรับการศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบสองกราด หรือ X-ray Diffraction Spectroscopy มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของสารประกอบเคมีของผงตะกรันอลูมิเนียม จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Manfredi และคณะ, 1997) พบว่าโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีของผงตะกรันอลูมิเนียมที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศได้ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) อลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Al_4C_3) และ อลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นต้น ทั้งนี้ผลการศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกรันจากการหลอมเศษอลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 4-1 และ รูปที่ 4-2 และผลการศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (Salt Slag) แสดงดังรูปที่ 4-1 ถึงรูปที่ 4-5



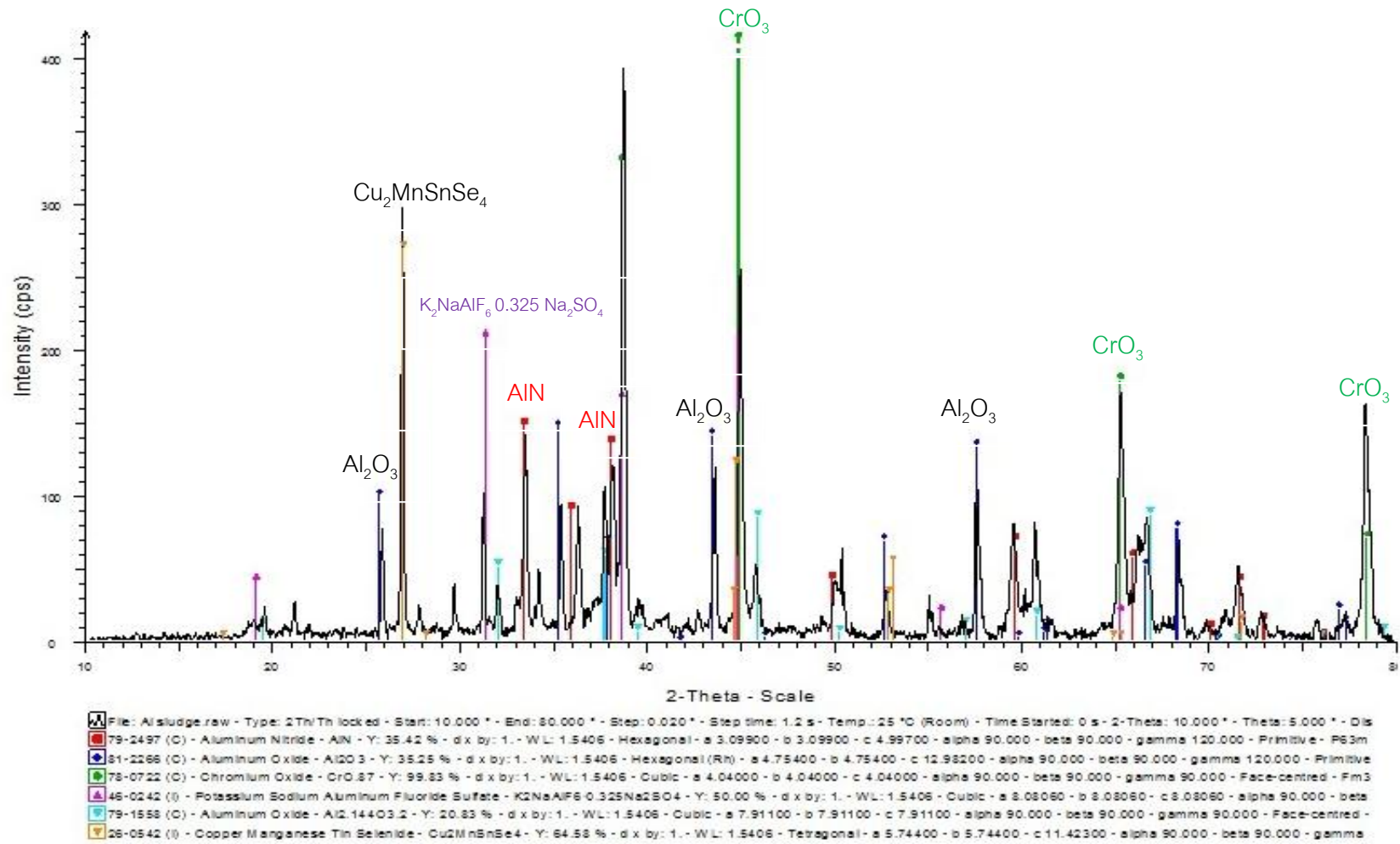
ภาพที่ 4-1 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกั่วจากการหลอมอลูมิเนียม (1)



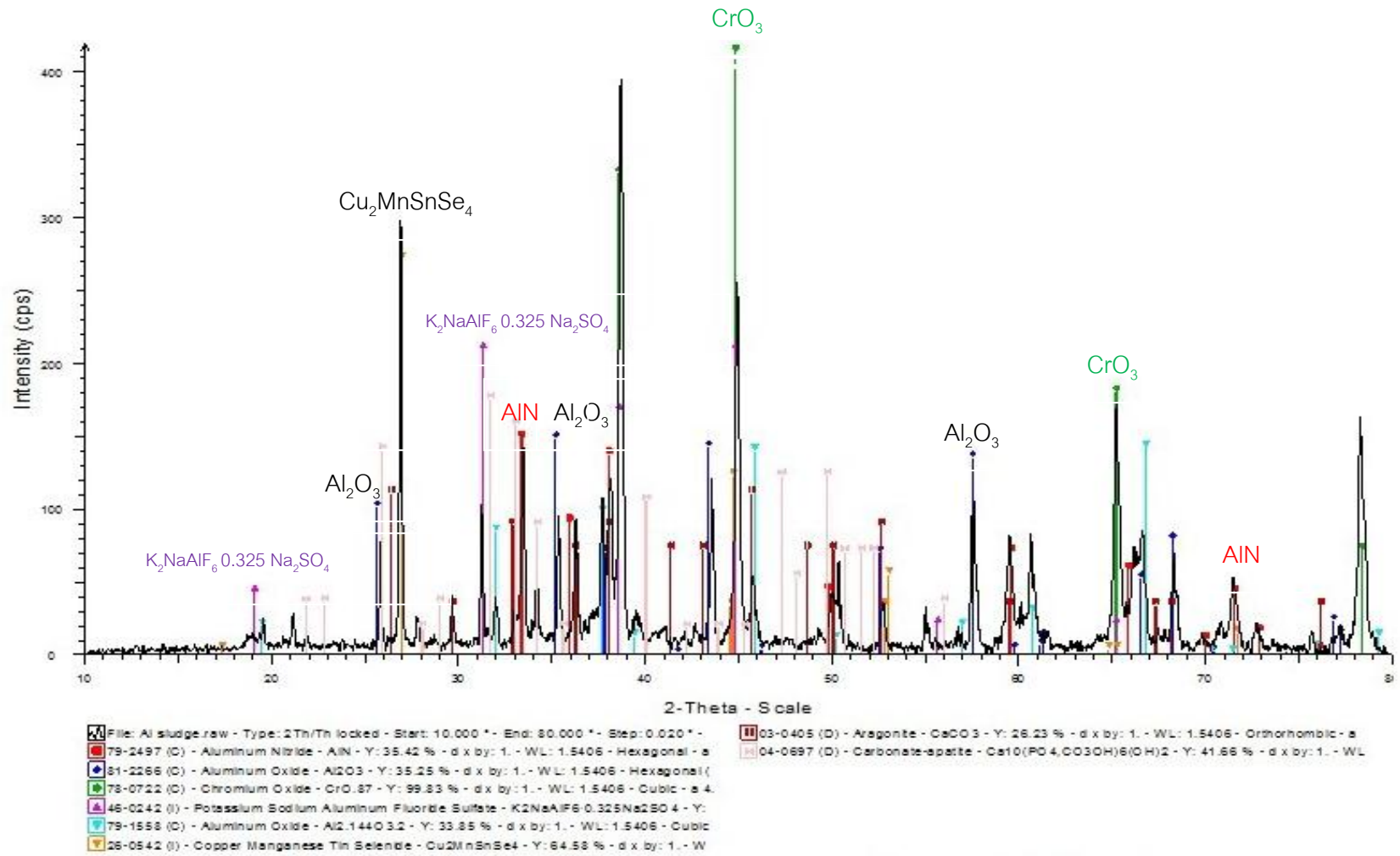
ภาพที่ 4-2 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียม (2)



ภาพที่ 4-3 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (1)



ภาพที่ 4-4 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (2)



ภาพที่ 4-5 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ (3)

จากผลการทดสอบพบว่าในตัวอย่างผงตะกรันทั้งสองชนิดมีโครงสร้างผลึกเป็น อลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ซึ่งสอดคล้องกับการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ ยังพบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบอื่นๆ เช่น โครเมียมออกไซด์ (CrO₃) โพแทสเซียม โซเดียม อลูมิเนียม ฟลูออไรด์ ซัลเฟต (K₂NaAlF₆ 0.325 Na₂SO₄) และคอปเปอร์แมงกานีส ทิน เซเลไนด์ (Cu₂MnSnSe₄) เป็นต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เกิดขึ้น จากการเติมสารเคมีที่จำเป็นในการควบคุมคุณภาพของอลูมิเนียมในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการนี้จัดเป็นการผลิตประเภทกลางน้ำขั้นทุติยภูมิ กล่าวคือ เป็นการนำอลูมิเนียมบริสุทธิ์และเศษอลูมิเนียมที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหลอมเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์อลูมิเนียม โดยอาจมีเติมโลหะผสม (Alloy) หรือสารเติมแต่งชนิดต่างๆ (Flux) เพื่อปรับสมบัติของแท่งอลูมิเนียมให้ได้คุณภาพตามความต้องการสำหรับงานที่จะใช้ โดยทั่วไปสารเติมแต่งที่เติมลงในกระบวนการหลอมอลูมิเนียมนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีโซเดียม เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมทั่วไป มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ในท้องตลาด และกลุ่มที่ปราศจากโซเดียม เป็นผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมที่ใช้สำหรับงานที่จำเป็นต้องทนการสึกกร่อน เช่น เครื่องยนต์หรือลูกสูบ มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ในท้องตลาด

4.1.4 ปริมาณโลหะและโลหะหนัก (Total Heavy Metal)

ตารางที่ 4-3 ปริมาณโลหะและโลหะหนักในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

โลหะ	ปริมาณ (มก./กก.)		ค่ามาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม (TTLC) (มก./กก.)
	ผงตะกรัน	ฝุ่น	
Ag	5.475	3.382	500
Ba	388.172	895.206	10,000
Cd	7.920	58.501	100
Co	31.764	18.027	8,000
Cr	407.875	187.894	2,500
Cu	6,980.821	2,775.028	2,500
Fe	7,160.520	4,265.055	N/A
K	5,329.026	15,447.170	N/A
Mg	14,608.465	4,1483.135	N/A
Mn	1,541.019	732.840	N/A

ตารางที่ 4-3 ปริมาณโลหะและโลหะหนักในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม (ต่อ)

โลหะ	ปริมาณ (มก./กก.)		ค่ามาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม (TTLC) (มก./กก.)
	ผงตะกรัน	ฝุ่น	
Na	3,858.124	4,847.472	N/A
Ni	562.139	322.981	2,000
Pb	237.816	419.613	1,000
Tl	9.039	5.239	700
Zn	2,793.199	3,595.130	5,000

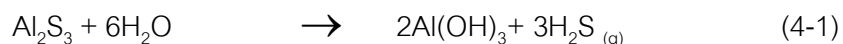
* N/A คือ ไม่ได้มีระบุค่าไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

** TTLC คือ Total Threshold Limit Concentration

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม ด้วยเครื่องวัดปริมาณโลหะหนัก ICP-AES แสดงดังตารางที่ 4-2 และ 4-3 พบว่า ตัวอย่างมีค่าปริมาณของอลูมิเนียมสูงมากประมาณ 140 และ 550 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับฝุ่นและผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียม ตามลำดับ ในส่วนของโลหะหนักกลุ่มอื่นๆที่พบว่ามีปริมาณสูงในตัวอย่างผงตะกรันอลูมิเนียม ได้แก่ เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) และโซเดียม (Na) โดยมีโลหะหนักบางชนิดที่มีการกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้น (Total Threshold Limit Concentration, TTLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เช่น แบเรียม (Ba) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และทองแดง (Cu) เป็นต้น ซึ่งพบว่าปริมาณของทองแดง (Cu) ในตัวอย่างทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่าที่กำหนด ดังนั้นจึงจัดเป็นของเสียตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

4.1.5 ปริมาณซัลเฟอร์ (S Content)

สำหรับการตรวจวัดปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Elemental Analyzer (Sulfur determinator model SC-132 (LECO, Corporation)) ผลการทดสอบไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่างทุกประเภท จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ชนิด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังสมการที่ (4-1)



4.1.6 ปริมาณไนโตรเจน (N Content)

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม ซึ่งพบองค์ประกอบของไนโตรเจนสูงมาก ดังนั้น ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้สูง ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย ดังแสดงในสมการที่ (4-2)



ตารางที่ 4-4 ผลวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

ตัวอย่าง	ปริมาณไนโตรเจน (มก./กก.)
ผงตะกรันอลูมิเนียม	6,260
ฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษอากาศ	18,855

4.1.7 ความหนาแน่น (Density)

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยวิธี ASTM D792 พบว่าผงตะกรันอลูมิเนียม มีความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 1,292 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร สำหรับฝุ่นอลูมิเนียมมีความหนาแน่น 337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผงตะกรันอลูมิเนียมมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ จึงมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ง่าย ในขณะที่ฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม นั้น มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมาก จึงมีแนวโน้มที่จะแขวนลอยในน้ำหรือบนผิวน้ำ และใช้เวลานานในการแยกออกจากน้ำ

4.1.8 สรุปลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียมข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 สรุปข้อมูลทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง	
	ผงตะกรัน	ฝุ่น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	≈ 10	≈ 10
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
• Al_2O_3	48.04	55.50
• Al_2S_3	-	-
• Al_4C_3	-	-
• SiO_2	8.58	4.54
ปริมาณโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
• Al	55.68	14.26
ปริมาณซัลเฟอร์	-	-
ปริมาณไนโตรเจน (มก./กก.)	6,260	18,855
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1,292	337
ขนาด	0.5 มม.	50 ไมครอน

จากตารางที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าผงตะกรันอลูมิเนียมมีปริมาณ Al และ Al_2O_3 สูง ซึ่งเหมาะที่จะนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนฝุ่นอลูมิเนียมมีปริมาณ Al ค่อนข้างต่ำซึ่งตรงกับข้อมูลที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมระบุไว้ นอกจากนี้ตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดนี้มีปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยากับความชื้นและเกิดก๊าซแอมโมเนียได้ แต่ในการทดลองนี้ไม่พบโครงสร้างของ Al_2S_3 และ Al_4C_3 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซมีเทน (CH_4) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ที่ไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่างทั้งสองชนิด จากการทดลองนี้พอที่จะคาดการณ์ได้ว่าก๊าซที่จะเกิดขึ้นในการทดลองการทดสอบปฏิกิริยาน่าจะเป็นก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจน ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซมีเทนไม่น่าจะเกิดขึ้นในการทดลอง

จากการที่ตัวอย่างทั้งสองชนิดมีโอกาที่จะเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและร่างกาย ทำให้ผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมถูกจัดเป็นของเสียอันตรายตามข้อกำหนดขององค์การสหประชาชาติโดยมีหมายเลข UN (UN Number) คือ 3170 และมีประเภทความเป็นอันตราย (Hazard Class) จัดอยู่ในประเภทที่ 4.3 คือ วัสดุที่เมื่อสัมผัสกับน้ำ

แล้วจะเกิดก๊าซไวไฟหรือก๊าซพิษ อาจก่อให้เกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดได้ อาจก่อให้เกิดสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและเป็นอันตรายต่อร่างกายก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้ หากมีการสัมผัสหรือสูดดมในปริมาณมาก นอกจากนี้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมถูกจัดให้เป็นของเสียอันตรายโดยมีรหัสของเสีย คือ 10 03 09 (HM) และ 10 03 23 (HM) ตามลำดับ เนื่องจากผงตะกั่วและฝุ่นนี้สามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นได้ง่ายและก่อให้เกิดก๊าซที่มีอันตรายต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น การเก็บกักและขนส่งของเสียอย่างถูกวิธีจะสามารถป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นและผลกระทบที่มีต่อผู้ปฏิบัติงานและบริเวณใกล้เคียงได้ โดยภาชนะที่เหมาะสมในการจัดเก็บผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมควรเป็นภาชนะปิดมิดชิด ทนทานต่อการกระแทก สถานที่เก็บกักควรเป็นอาคารปิดมิดชิด เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับความชื้น และควรมีสถานที่กว้างขวางเพียงพอที่จะให้พนักงานดับเพลิง หรือพนักงานความปลอดภัยเข้าไปแก้ไขปัญหาที่เก็บของเสียอันตรายในกรณีที่เกิดอันตรายได้

4.2 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโดยแบ่งเป็นการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม การศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด และศึกษาแนวทางในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ชนิดและปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถทำให้ทราบถึงรูปแบบโดยรวมของการเกิดปฏิกิริยาของผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม รวมถึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นได้

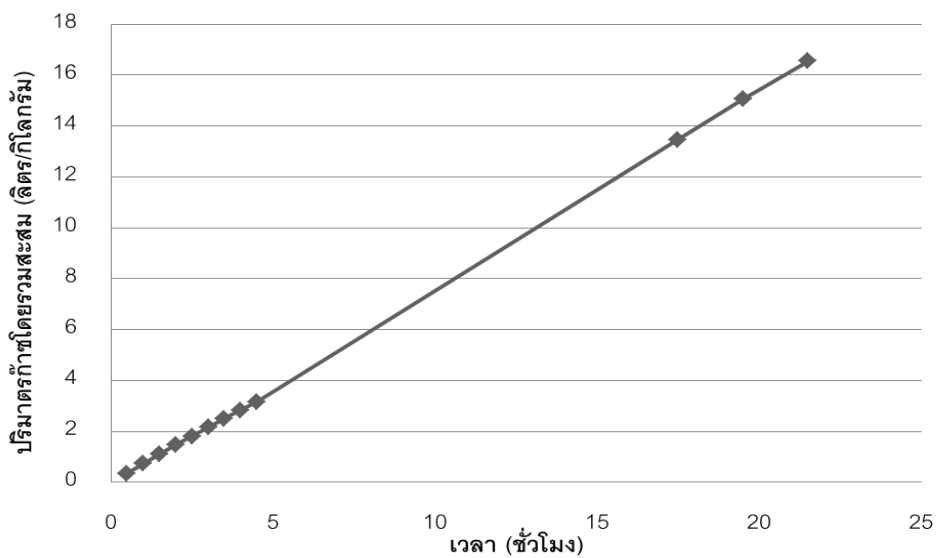
4.2.1 ผลการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์โดยรวม

จากการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ พบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น มีความสัมพันธ์กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และ 4-7 สำหรับผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม นั้น ก๊าซจะเกิดขึ้น โดยทันทีหลังจากสัมผัสและผสมกับน้ำ ซึ่งต่างจากการเกิดก๊าซของฝุ่นอลูมิเนียมซึ่งเริ่มต้นหลังจากระยะเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง

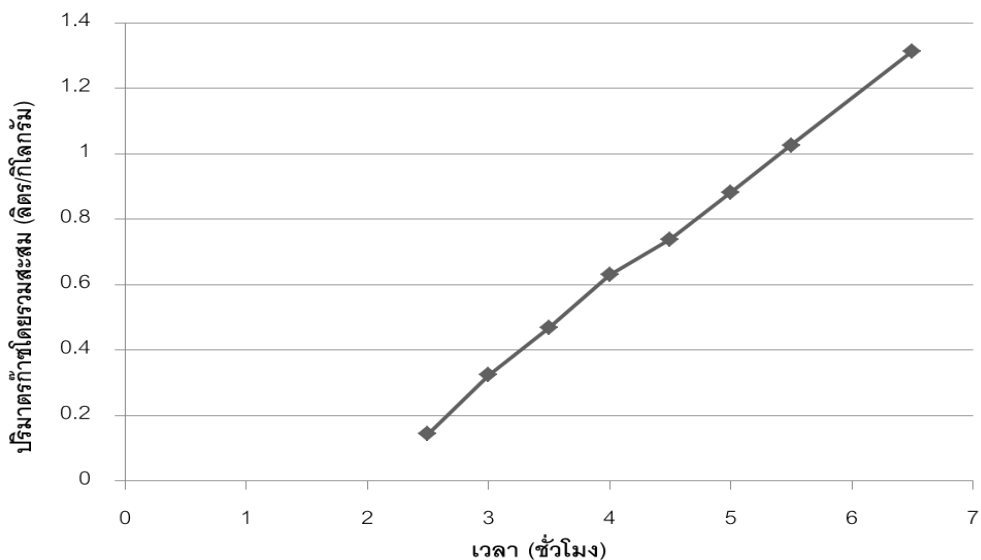
ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดได้หลายชนิด ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซมีเทน และ ก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ภายใต้ค่าพีเอชที่เหมาะสม แต่จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

และปริมาณซัลเฟอร์ในตัวอย่าง ไม่พบโครงสร้างผลึกของ Al_2S_3 และไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น จึงน่าจะพบก๊าซที่ละลายน้ำ ได้เพียงชนิดเดียว คือ ก๊าซแอมโมเนีย

ในส่วนของก๊าซที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ที่สามารถตรวจวัดปริมาณได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซจึงได้แก่ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาองค์ประกอบทางโครงสร้างผลึกโดยเครื่องมือ XRD ไม่พบโครงสร้างผลึกของ Al_4C_3 ซึ่งเป็นโครงสร้างต้นกำเนิดของปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน ดังนั้น ปริมาณก๊าซที่ตรวจวัดได้จึงมีแนวโน้มที่จะมีก๊าซไฮโดรเจน



ภาพที่ 4-6 ปริมาณก๊าซผลิตทันทีโดยรวมสะสมของผงตะกั่วออกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำ



ภาพที่ 4-7 ปริมาณก๊าซผลิตทันทีโดยรวมสะสมของฝุ่นออกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำ

4.2.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

การทดลองเพื่อศึกษาปริมาณและอัตราเร็วในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ดำเนินการโดยอาศัยคุณสมบัติการละลายน้ำของก๊าซผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด โดยในการทดลองนี้จะทำการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนต่างๆของของเสียและน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูแนวโน้มในการเกิดก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สัดส่วนต่างๆกันและดูความเหมาะสมของสัดส่วนระหว่างตะกอนลูมิเนียมน้ำกับน้ำ เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกรณ์เบื้องต้นต่อไป

ก๊าซแอมโมเนีย

ปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดที่เกิดขึ้น สามารถตรวจวัดได้โดยการดักจับโดยน้ำ ภายใต้ค่า pH ที่เหมาะสม ($\text{pH} = 10$) ซึ่งทำการดักจับก๊าซแอมโมเนียสองขั้นตอน (ถังปฏิกรณ์และคอลัมน์น้ำ) ผลรวมของก๊าซแอมโมเนียสะสมต่อกิโลกรัมผงตะกอน และฝุ่นลูมิเนียมที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4-8 และ 4-9 ซึ่งการทดลองนั้น ได้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างผงตะกอนและฝุ่นลูมิเนียมกับน้ำ 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:5 1:10 และ 1:15 ตามลำดับ โดยในการทดลองนี้สามารถหาปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสม ($\text{Total}_{\text{NH}_3}$) และประสิทธิภาพในการบำบัดได้จากสมการที่ (4-3) และ (4-4) ตามลำดับ

$$\text{Total NH}_3 = \frac{C_R V_R + C_C V_C}{W_D} \quad (4-3)$$

เมื่อ C_R คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

C_C คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

V_R คือ ปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์ (ลิตร)

V_C คือ ปริมาตรน้ำในคอลัมน์น้ำ (ลิตร)

W_D คือ น้ำหนักของผงตะกอนหรือฝุ่นลูมิเนียม (กก.)

นอกจากนี้ จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดังสมการ (4-4)

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{TotalNH}_3 \times 100}{\text{NH}_{3\text{analysis}}} \quad (4-4)$$

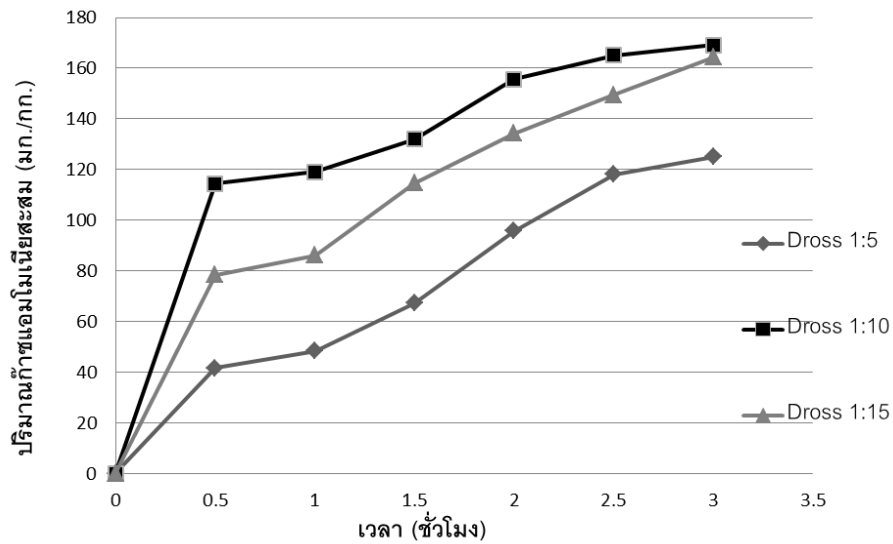
เมื่อ NH_3 analysis คือ ปริมาณแอมโมเนียที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3.4.1 (มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

จากการทดลองพบว่า ในกรณีของผงตะกอนอลูมิเนียมที่อัตราส่วน 1:5 1:10 และ 1:15 เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงพบว่าที่อัตราส่วน 1:10 มีปริมาณก๊าซแอมโมเนียเกิดขึ้นมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 2.23 ในขณะที่อัตราส่วน 1:15 และ 1:5 เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 2.16 และ 1.64 ตามลำดับ (โดยเทียบกับปริมาณไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4-4) กล่าวคือ ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่ดักจับได้ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำ ซึ่งปริมาณผงตะกอนอลูมิเนียมที่มากขึ้น ไม่ได้ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนักของผงตะกอนอลูมิเนียม สาเหตุที่อัตราส่วน 1:5 เกิดปริมาณก๊าซแอมโมเนียน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นอาจเกิดจากปริมาณของผงตะกอนที่มากจนเกินไปและความหนาแน่นของผงตะกอนอลูมิเนียมที่สูง (1,292 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ทำให้มีผงตะกอนอลูมิเนียมรวมตัวกันที่ก้นของถังปฏิกิริยาเป็นจำนวนมากขัดขวางการทำงานของใบพาย นอกจากนี้ยังเกิดการสะสมตัวที่ขอบของถังปฏิกิริยา (Dead zone) เป็นจำนวนมากและไม่ได้เกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำ

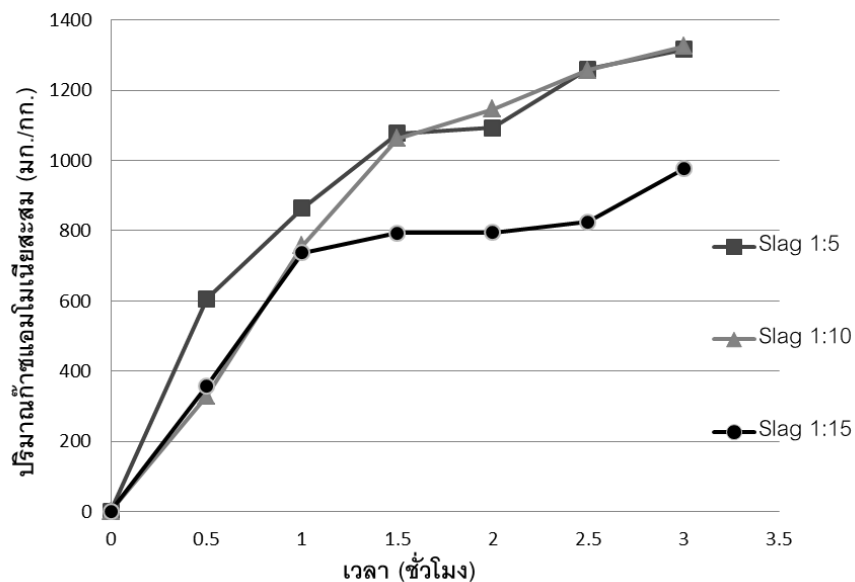
สำหรับกรณีของฝุ่นอลูมิเนียม ที่อัตราส่วน 1:5 1:10 และ 1:15 เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงพบว่าที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:10 เกิดก๊าซแอมโมเนียสูงและเร็วกว่าอัตราส่วน 1:15 โดยคิดเป็นร้อยละ 5.75 5.79 และ 4.26 ตามลำดับ กล่าวคือ ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่ดักจับได้ไม่ได้แปรผันตรงกับปริมาณฝุ่นตะกอน ซึ่งปริมาณฝุ่นอลูมิเนียมที่มากขึ้น ไม่ได้ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนักของฝุ่นอลูมิเนียม เนื่องจากฝุ่นอลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ทำให้ฝุ่นอลูมิเนียมมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของน้ำ ทำให้การกวนผสมเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ฝุ่นอลูมิเนียมมีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้เกิดการแยกชั้นจากน้ำโดยลอยอยู่เหนือน้ำส่วนหนึ่งและจมอยู่ที่ก้นถังปฏิกิริยาอีกส่วนหนึ่ง ทำให้การเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นไปได้ยาก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ พบว่าที่อัตราส่วน 1:10 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทดลอง ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำจะเกิดก๊าซแอมโมเนียมากกว่าปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำ (เมื่อเทียบกับสัดส่วนโดยน้ำหนัก) ที่เวลา 3 ชั่วโมงพบว่าปฏิกิริยาของฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำเกิดก๊าซแอมโมเนีย 1,325 มก./กก. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 5.79 และปฏิกิริยาของผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำเกิดก๊าซแอมโมเนีย 169 มก./กก. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2.22 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนจากการทดลองข้างต้น (ดังแสดงในตารางที่

4-4) จากการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนพบว่าฝุ่นอลูมิเนียมมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าผงตะกรันอลูมิเนียมมาก (18,855 และ 6260 มก./กก. ตามลำดับ)



ภาพที่ 4-8 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกรันอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 4-9 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างผลึกโดยเครื่องมือ XRD และการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุซัลเฟอร์ (S) ของตัวอย่างผงตะกอนและฝุ่นอะลูมิเนียมไม่พบโครงสร้าง Al_2S_3 ซึ่งเป็นสารต้นกำเนิดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไม่พบองค์ประกอบของธาตุ S ในตัวอย่างทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ไม่สามารถตรวจพบไอออนของ S^{2-} ในถังปฏิกริยาและในคอลัมน์น้ำที่ใช้ดักจับก๊าซแต่อย่างใด จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอะลูมิเนียมกับน้ำไม่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ก๊าซมีเทน (CH_4)

จากผลการเก็บตัวอย่างก๊าซที่ไม่ละลายน้ำจากการทดลองและนำไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน โดยเครื่องมือ GC-FID ไม่พบก๊าซมีเทน (ภายใต้ Detection Limit ของเครื่องมือวัด) ประกอบกับข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก XRD ดังกล่าวข้างต้น ไม่พบโครงสร้างของ Al_4C_3 จึงสามารถสรุปได้ว่า ปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอะลูมิเนียมกับน้ำไม่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน

ก๊าซไฮโดรเจน (H_2)

ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำที่ตรวจวัดปริมาณได้จากการเกิดปฏิกริยาไม่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนอยู่ ดังนั้นปริมาณก๊าซที่ไม่ละลายน้ำที่ตรวจวัดได้ในหัวข้อที่ 4.2.1 น่าจะเป็นปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอะลูมิเนียมกับน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ติดไฟได้ และเมื่อมีปริมาณมากอาจก่อให้เกิดการลุกติดไฟ เป็นสาเหตุของไฟไหม้ หรือเกิดการระเบิดขึ้นได้

จากการทดลองนี้จะเลือกใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุดเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกริยาเบื้องต้นและนำไปใช้กับการทดลองต่อไป ซึ่งในที่นี้คืออัตราส่วน 1:10 สำหรับผงตะกอนอะลูมิเนียม แต่ในกรณีฝุ่นอะลูมิเนียมที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:10 ให้ปริมาณก๊าซแอมโมเนียใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากสมบัติของฝุ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นต่ำ (337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ส่งผลกระทบให้เกิดการแยกชั้นจากน้ำ และเกิดการฟุ้งกระจายในการกวนผสม โดยเฉพาะอัตราส่วนที่ 1:5 เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นอะลูมิเนียมมากและอาจเกิดการปนเปื้อนไปกับท่อนำก๊าซสู่คอลัมน์น้ำได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอะลูมิเนียมกับน้ำที่ 1:10

นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (N) ในโครงสร้างของตัวอย่างผงตะกอน และฝุ่นอลูมิเนียมดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูงสุด ได้แก่ 7,601 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 22,895 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจากอัตราส่วนที่ดีที่สุดของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม (อัตราส่วน 1:10) พบว่าที่เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.23 และ 5.79 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซ้ำ และใช้เวลายาวนานมากในการทำให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้น

4.3 ผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา

ดังที่กล่าวในข้างต้น ปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซ้ำและใช้เวลานานกว่าปฏิกิริยาจะสิ้นสุด จึงหาแนวทางที่จะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้นและปัจจัยที่อาจมีผลต่อการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ได้แก่ ความเร็วเกรเดียนท์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ พลาสติกแชนลอย และการเติมสารลดแรงตึงผิว ซึ่งตัวแปรต่างๆจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันออกไป จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (Gradient Velocity, G) ที่มีผลต่อปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่ความเร็วรอบเตอร์ 150 200 และ 300 รอบต่อนาที ซึ่งคิดเป็นความเร็วเกรเดียนท์ 9 14 และ 26 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ความเร็วเกรเดียนท์ของไบพาย (Metcalf & Eddy, 2004) สามารถหาได้ดังแสดงในสมการด้านล่างนี้

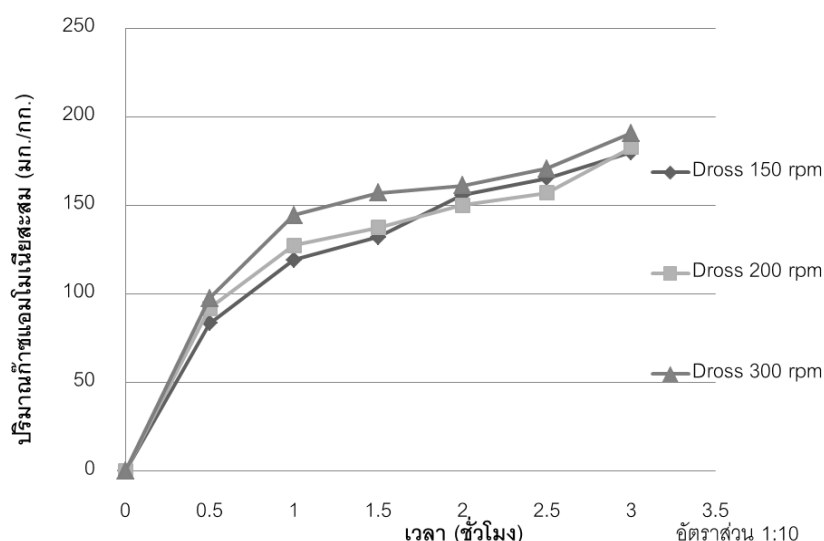
$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$P = F_D V_P = \frac{C_D A \rho v_P^3}{2}$$

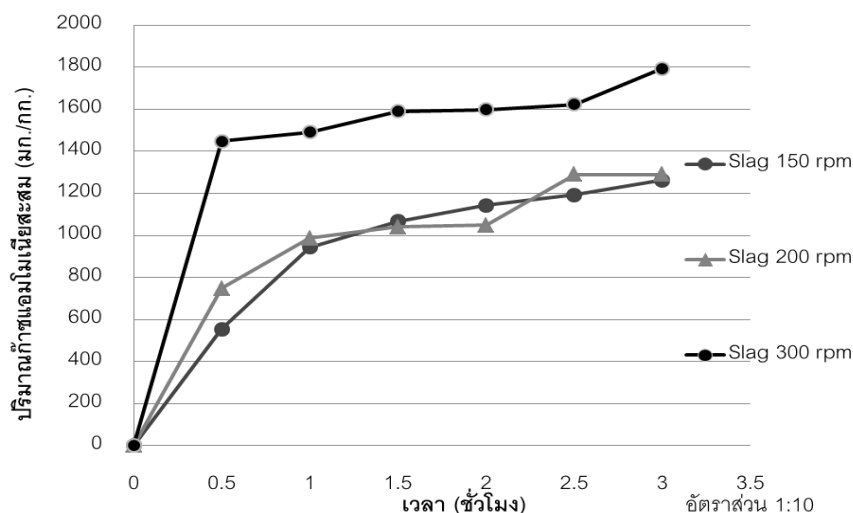
เมื่อ	G	คือ	ความเร็วเกรเดียนท์ (s ⁻¹)
	P	คือ	กำลังที่ต้องการ (W)
	μ	คือ	ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) (N•s/m ²)
	V	คือ	ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (m ³)
	F _D	คือ	แรงต้านการเคลื่อนที่ (N)
	C _D	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนไหวของไบพาย

A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของใบพาย (m^2)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
v_p	คือ	ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพายกับน้ำ (m/s)

จากการทดลองพบว่า ในกรณีผงตะกั่วอนุภาคนิยม ที่ความเร็วเกเรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ เกิดก๊าซแอมโมเนียปริมาณมากและเร็วกว่าความเร็วเกเรเดียนท์อื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 2.51 ของปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ในขณะที่ความเร็วเกเรเดียนท์ 9 และ 14 วินาที⁻¹ เกิดก๊าซแอมโมเนียปริมาณใกล้เคียงกันและเกิดขึ้นภายในเวลาไล่เลี่ยกัน (โดยคิดเป็นร้อยละ 2.40 และ 2.37 ตามลำดับ) ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ส่วนในกรณีของฝุ่นอนุภาคนิยม ที่ความเร็วเกเรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ จะเกิดปริมาณก๊าซแอมโมเนียมากที่สุด (คิดเป็นร้อยละ 7.83) ตามด้วยความเร็วเกเรเดียนท์ 14 และ 9 วินาที⁻¹ (ร้อยละ 5.63 และ 5.51) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-11 ทั้ง 2 กรณีนี้มีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ที่ค่าความเร็วเกเรเดียนท์หรือค่าความปั่นป่วนที่เพิ่มสูงขึ้นจะช่วยเร่งความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากความเร็วเกเรเดียนท์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างของเสียกับน้ำได้ดีขึ้น และเพิ่มความปั่นป่วนของน้ำทำให้การกวนผสมเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจากการทดลองนี้จะใช้ความเร็วเกเรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ ซึ่งเป็นความเร็วที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้ดีที่สุด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นและนำไปใช้กับการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4-10 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอนุภาคนิยมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ความเร็วเกเรเดียนท์ต่างๆ



ภาพที่ 4-11 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ความเร็ว เกรเดียนท์ต่างๆ

4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อปฏิกิริยา โดยที่พีเอชระหว่างผงดตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำมีค่าประมาณ 10 และต้องการปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกให้พีเอชลดลงเหลือ 4.5 และ 6 ตามลำดับ แต่เนื่องจากสภาพต่างที่มีค่าสูง (831 mg/l as CaCO₃) ทำให้ไม่สามารถปรับค่าพีเอชได้ตามที่ต้องการได้ แต่หากจะปรับพีเอชให้ได้ตามที่ต้องการจะต้องสิ้นเปลืองสารเคมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและอาจเพิ่มภาระบรรทุกให้กับน้ำมากขึ้น จึงไม่ทำการปรับพีเอชในการทำการทดลอง

4.3.3 ผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆกัน เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ในการทดลองนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิในการทดลองให้คงที่ที่ 25, 29 (อุณหภูมิปกติระหว่างของเสียกับน้ำ), 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-12 และ 4-13 ในกรณีของผงดตะกอนอลูมิเนียมพบว่า ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เกิดก๊าซแอมโมเนียปริมาณมากกว่าอุณหภูมิอื่นๆอย่างชัดเจน โดยคิดเป็นร้อยละ 17.19 ของปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ตามด้วยอุณหภูมิ 35, 29 และ 25 องศาเซลเซียส (คิดเป็นร้อยละ 4.58, 2.40 และ 2.08) ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาก็จะเกิดได้ดีขึ้นด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ จะแตกต่างจาก

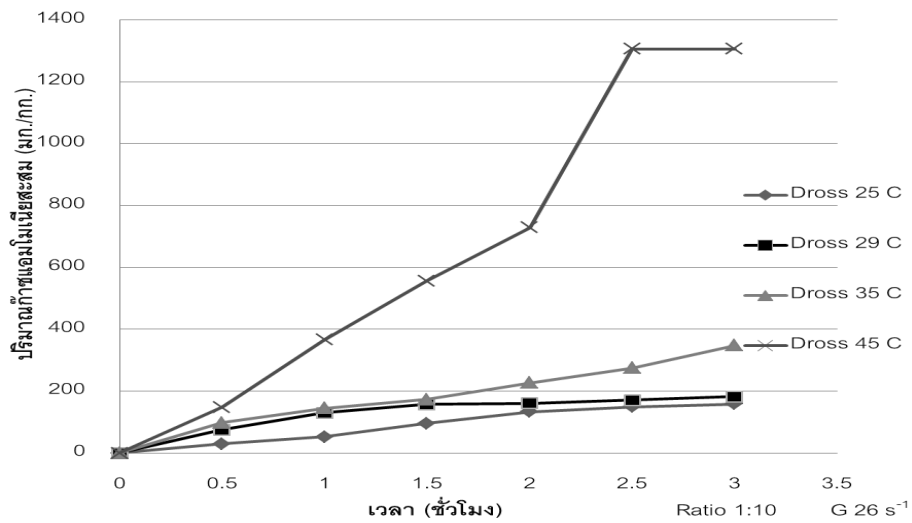
ที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยที่อุณหภูมิสูงๆมีแนวโน้มจะเกิดผลึกโบฮีไมต์ (Boehmite) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของผงตะกั่ว ดั่งสมการที่ (4-5) ส่วนที่อุณหภูมิต่ำๆมีแนวโน้มจะเกิดผลึก Bayerite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดั่งสมการที่ (4-6) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูง AIN ที่มีผิวสัมผัสมาก จะช่วยให้เพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างผงตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น (Fukumoto และคณะ, 2000)



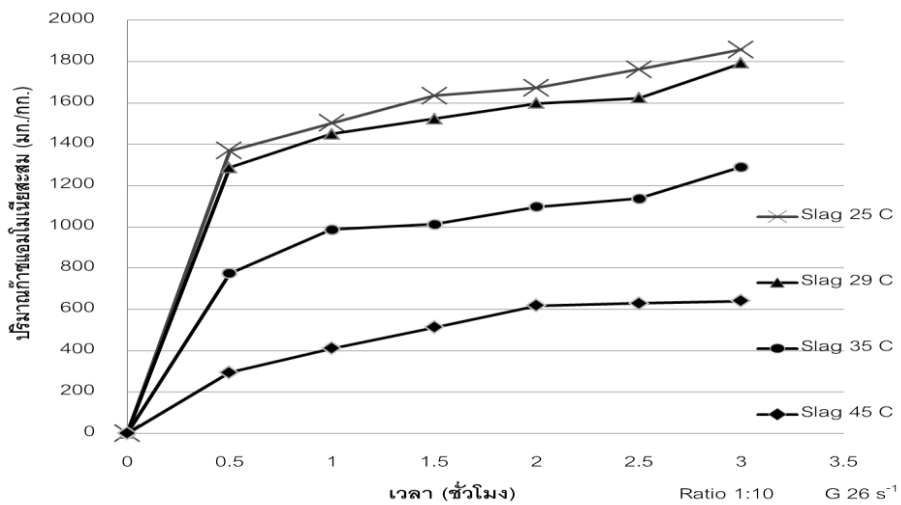
นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Emerson และคณะ (1975) พบว่าอุณหภูมิและพีเอชมีผลต่อการเกิดก๊าซแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิและพีเอชสูงขึ้นจะช่วยให้เกิดก๊าซแอมโมเนียสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาของผงตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำที่เกิดก๊าซแอมโมเนียสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในการทดลอง (พีเอชในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10)

ในกรณีของฝุ่นอลูมิเนียม จะเกิดก๊าซแอมโมเนียสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 8.12 ของปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ตามด้วยอุณหภูมิ 29 และ 35 องศาเซลเซียส ที่เกิดก๊าซแอมโมเนียใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็นร้อยละ 7.83 และ 5.63 ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เกิดปริมาณก๊าซแอมโมเนียน้อยที่สุด (ร้อยละ 2.80) เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อลดอุณหภูมิลง ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นด้วย (Slack และคณะ, 1976)

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม คือ 45 และ 25 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและออกแบบถึงปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป



ภาพที่ 4-12 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกั่วอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 4-13 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

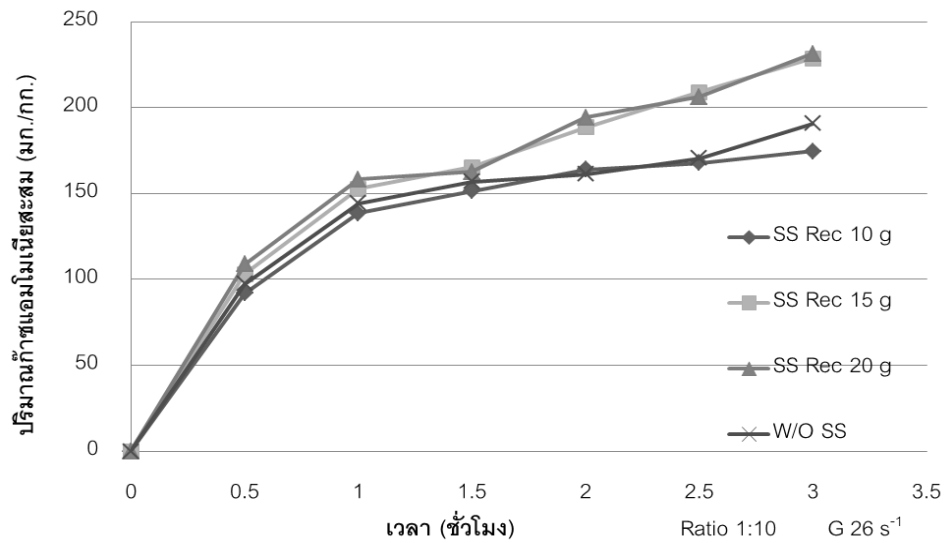
4.3.4 ผลการศึกษาผลกระทบของพลาสติกแขวนลอยที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่เกิดจากการใช้พลาสติกแขวนลอยในการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการใส่วัสดุประเภทแผ่นพลาสติกเข้าไปในถังปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับเฟสน้ำได้มากขึ้น ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้พลาสติก (PVC) ขนาดและรูปร่างต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ แบบสี่เหลี่ยม ซึ่งมี

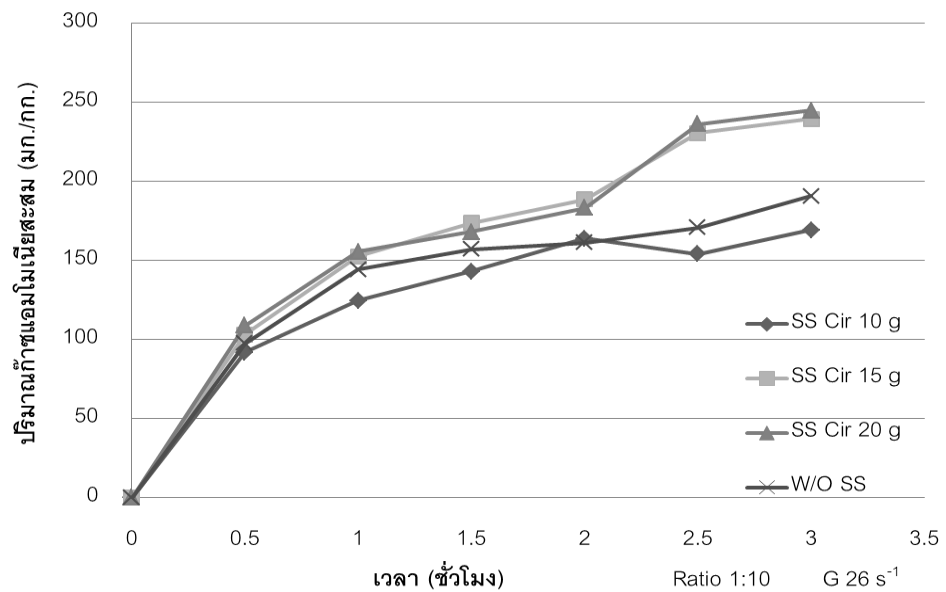
ขนาด 0.5x0.5 ซม. ความหนาแน่น 1.42-1.48 กรัมต่อลบ.ซม. และแบบทรงกลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความหนาแน่น 1.35-1.45 กรัมต่อลบ.ซม. เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-15 4-16 4-17 และ 4-18

ภาพที่ 4-14 แสดงผลการทดลองของปฏิกิริยาระหว่างผงตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำที่เติมพลาสติกแบบสีเหลืองลงไปเพื่อช่วยในการกวนผสม เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง พบว่าการเติมพลาสติกสีเหลือง 15 และ 20 กรัม (ต่อปริมาตรน้ำ 600 มล.) เกิดก๊าซแอมโมเนียมากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 3.01 และ 3.04 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะปกติ (อัตราส่วน 1:10 ไม่ควบคุมอุณหภูมิ และทำการปั่นกวนที่ความเร็วมอเตอร์ 300 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้น 26 วินาที⁻¹) ที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 2.51 (ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองด้วยพลาสติกสีเหลือง 10 กรัม ที่เกิดปริมาณก๊าซร้อยละ 2.3) พบว่าปริมาณก๊าซแอมโมเนียเกิดมากขึ้น แต่ก็ยังถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงถือว่าเป็นการเพิ่มขึ้นแบบไม่มีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการทดลองของปฏิกิริยาระหว่างผงตะกั่วกับน้ำที่เติมพลาสติกทรงกลมลงไป พบว่าการเติมพลาสติกทรงกลม 15 และ 20 กรัม จะเกิดก๊าซแอมโมเนียมากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 3.15 และ 3.22 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-15 ซึ่งมากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดที่สภาวะปกติและสภาวะที่เติมพลาสติกสีเหลืองอีกด้วย สาเหตุที่ทำให้การเติมพลาสติกแขวนลอยสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เนื่องจากพลาสติกแขวนลอยเหล่านี้จะช่วยในการกวนผสมให้เกิดการปั่นป่วนมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยกวนผสมในส่วนของ dead zone ที่ใบพัดไม่สามารถเข้าถึงได้ เนื่องจากผงตะกั่วอลูมิเนียมมีความหนาแน่นสูง (1,292 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ทำให้ตกตะกอนและจมอยู่ที่ก้นถังปฏิกิริยามาก นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้พลาสติกทรงกลมให้ประสิทธิภาพดีกว่าชนิดสีเหลืองเนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนัก ด้วยน้ำหนักที่เบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าจึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปรอบๆ ถึงปฏิกิริยาสร้างความปั่นป่วนของน้ำ และสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างผงตะกั่วอลูมิเนียมกับน้ำได้มากขึ้น โดยพลาสติกแขวนลอยแบบสีเหลืองมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ 3.3 ตร.ม.ต่อลบ.ม. และพลาสติกแขวนลอยทรงกลมมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ 3.5 ตร.ม.ต่อลบ.ม. โดยพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสามารถหาได้จากสมการด้านล่างนี้

$$\text{พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ} = \frac{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของพลาสติก}}{\text{ปริมาตรน้ำ}} = \frac{\text{จำนวนพลาสติก} \times \text{พื้นที่ผิว}}{\text{ปริมาตรน้ำ}}$$



ภาพที่ 4-14 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกรันอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดสี่เหลี่ยม

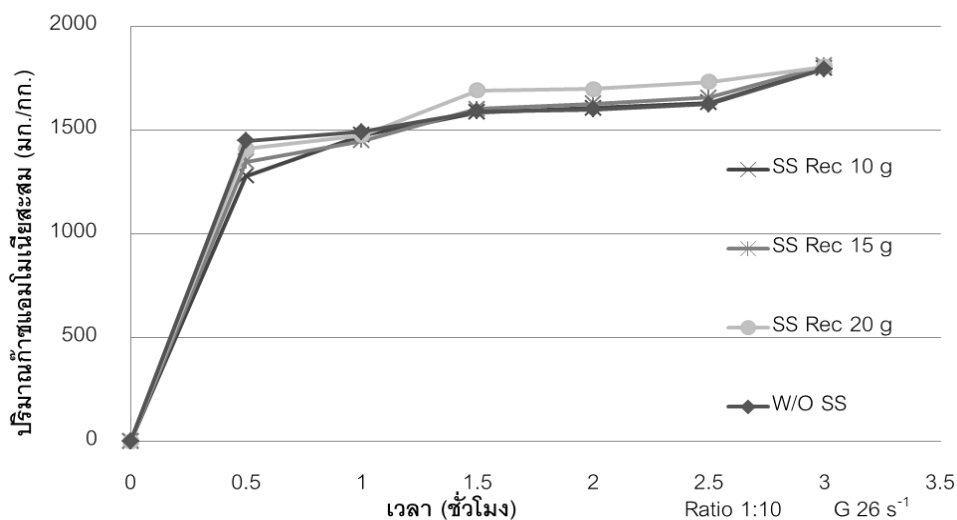


ภาพที่ 4-15 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกรันอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดทรงกลม

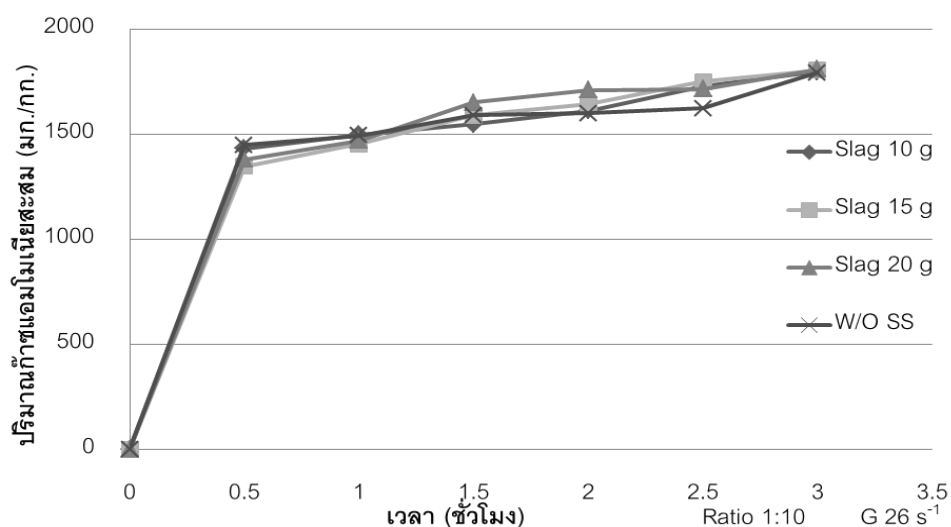
ภาพที่ 4-16 แสดงผลการทดลองของปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำที่เติมพลาสติกแบบสี่เหลี่ยมลงไปเพื่อช่วยในการกวนผสม เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง พบว่าการเติมพลาสติกสี่เหลี่ยมทั้ง 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 10 15 และ 20 กรัม เกิดก๊าซแอมโมเนียในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็นร้อยละ 7.86 7.9 และ 7.88 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาระหว่าง

ผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะปกติ (อัตราส่วน 1:10 ไม่ควบคุมอุณหภูมิ และทำการปั่นจนที่ความเร็วมอเตอร์ 300 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้น 26 วินาที⁻¹) ที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 7.83 พบว่าปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่นเดียวกับการทดลองของปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำที่เติมพลาสติกทรงกลมลงไป พบว่าผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับการเติมพลาสติกแบบสี่เหลี่ยม กล่าวคือ การเติมพลาสติกทรงกลม 10 15 และ 20 กรัม จะเกิดก๊าซแอมโมเนียใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็นร้อยละ 7.84 7.88 และ 7.90 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-17 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาที่เกิดที่สภาวะปกติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สาเหตุที่ทำให้การเติมพลาสติกแขวนลอยมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยมาก อาจเกิดจากฝุ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นต่ำ (337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งทำให้ฝุ่นอลูมิเนียมมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของน้ำ ทำให้การกวนผสมเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ฝุ่นอลูมิเนียมมีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้เกิดการแยกชั้นจากน้ำโดยลอยอยู่บนผิวน้ำส่วนหนึ่งและจมอยู่ที่ก้นถังปฏิกิริยาอีกส่วนหนึ่ง ทำให้การเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นไปได้ยาก

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า ปริมาณพลาสติกแขวนลอยที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของผงตะกอนอลูมิเนียม คือ 15 และ 20 กรัมต่อน้ำ 600 ลิตร (ความเข้มข้น 25 g/l และ 33.3 g/l) แต่เนื่องจากความเข้มข้นทั้ง 2 ค่านี้ก่อให้เกิดก๊าซแอมโมเนียในปริมาณใกล้เคียงกันมาก จึงเลือกใช้ปริมาณของพลาสติกแขวนลอยที่ 15 กรัม (25 g/l) เนื่องจากใช้ปริมาณน้อยกว่าแต่ให้ผลการทดลองใกล้เคียงกันจึงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เพราะจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า นอกจากนี้ประเภทของพลาสติกที่เลือกใช้ คือ แบบทรงกลม เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแบบสี่เหลี่ยม จึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปรอบๆ ถึงปฏิกิริยาสร้างความปั่นป่วนของน้ำและสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำได้ดีกว่า โดยข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป สำหรับกรณีของฝุ่นอลูมิเนียม พลาสติกแขวนลอยที่เติมเข้าไปมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากสิ้นเปลืองและก่อให้เกิดความยุ่งยากในการกำจัดอีกด้วย



ภาพที่ 4-16 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยชนิดสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 4-17 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมพลาสติกแขวนลอยทรงกลม

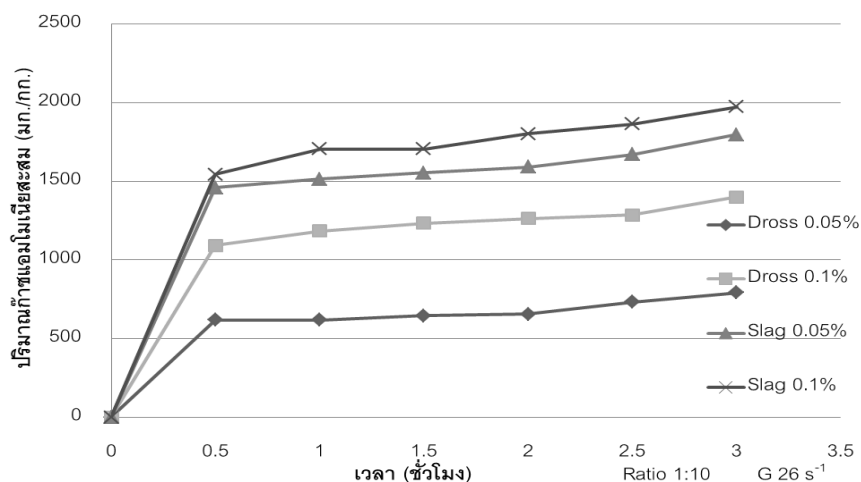
4.3.5 ผลการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

จากการทดลองข้างต้น พบว่าผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมมีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับน้ำทำได้ยาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงต้องการที่จะทำลายสภาพไม่ชอบน้ำของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม เพื่อให้ของเสียทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้นและได้สภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ใน

การทดลอง คือ Triton X-100 (TX-100) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 และ 0.1 โดยน้ำหนัก และผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-18

ในกรณีของผงตะแกรนอลูมิเนียม พบว่าการเติม TX-100 ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้ดีกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก โดยมีประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 18.42 และ 10.42 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะแกรนอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะปกติ (อัตราส่วน 1:10 ไม่ควบคุมอุณหภูมิ และทำการปั่นจนที่ความเร็วมอเตอร์ 300 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงมุม 26 วินาที⁻¹)) ที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 2.51 พบว่าปริมาณก๊าซแอมโมเนียเกิดขึ้นมากกว่าที่สภาวะปกติมาก เช่นเดียวกับกรณีของฝุ่นอลูมิเนียม พบว่าการเติม TX-100 ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้ดีกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก โดยมีประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 8.61 และ 7.84 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะปกติที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 7.83 พบว่ามีปริมาณก๊าซแอมโมเนียมากขึ้น การเติมสารลดแรงตึงผิวช่วยให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะไปช่วยลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ระหว่างของเสียกับน้ำทำให้มีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น โดยน้ำมีแรงตึงผิว 71.6 มิลลินิวตัน/เมตร (ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส) และเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงผิวลดลงเหลือ 30 มิลลินิวตัน/เมตร นอกจากนี้ยังไปสร้างสภาพชอบน้ำ (hydrophilic) บนพื้นผิวของผงตะแกรนและฝุ่นอลูมิเนียม ทำให้ปรับสภาพจากไม่ชอบน้ำกลายเป็นชอบน้ำและมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นด้วย

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่า ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (TX-100) ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของผงตะแกรนและฝุ่นอลูมิเนียม คือ ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก เพราะช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับน้ำให้เกิดขึ้นได้ดีขึ้น โดยข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป



ภาพที่ 4-18 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่เติมสารลดแรงตึงผิว

4.3.6 สรุปผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา

ตารางสรุปผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4-6 โดยข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและใช้ออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้นต่อไป

ตารางที่ 4-6 สรุปผลการศึกษาแนวทางการเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา

พารามิเตอร์	ค่าตัวแปร ณ สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม	
	ผงตะกรัน	ฝุ่นอลูมิเนียม
อัตราส่วน (ของเสีย : น้ำ)	1:10	1:10
ความเร็วเกเรเดียนท์ (วินาที ⁻¹)	26	26
พีเอช	10	10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	45	25
ปริมาณพลาสติกแขวนลอย (กรัม/ลิตร)	25	-
สารลดแรงตึงผิว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.1	0.1

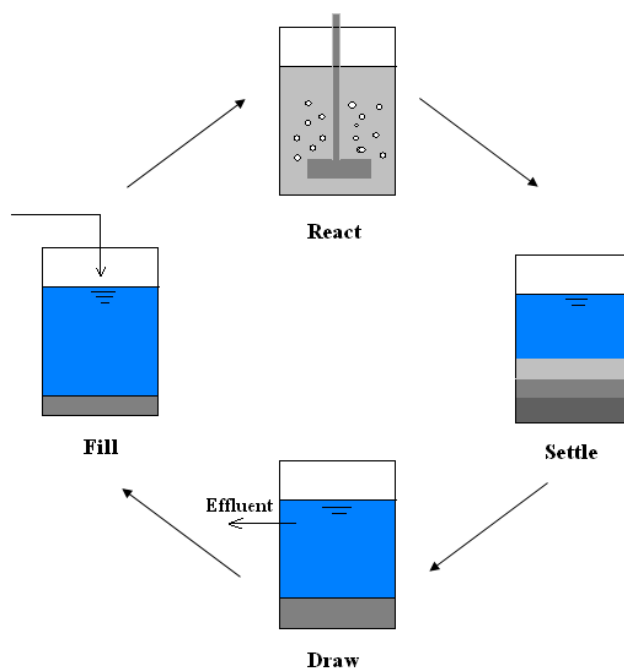
4.4 แนวทางการออกแบบถังปฏิกิริยาเบื้องต้น

จากผลการทดสอบปฏิกิริยาในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 พบว่าก๊าซผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีปริมาณสูงสุดที่เกิดขึ้นจาก

ปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ดังนั้น ก๊าซแอมโมเนียจะถูกใช้เป็นตัวแทนในการออกแบบถังปฏิกิริยา โดยที่ก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณธาตุไนโตรเจน (N) ที่มีอยู่ในผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม โดยผลการทดสอบจะสามารถถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์อัตราเร็ว และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียมกับน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

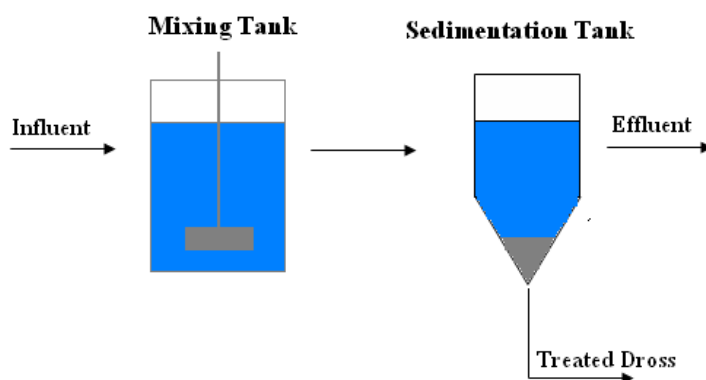
4.4.1 ผลการวิเคราะห์การตกตะกอนและขนาดอนุภาค

จากการวัดขนาดอนุภาคของผงตะกอนด้วย Image analysis software และการทดสอบการตกตะกอน (Settling Test) ของผงตะกอนอลูมิเนียมในน้ำ พบว่าผงตะกอนอลูมิเนียมมีขนาดและความหนาแน่นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรและ 1,292 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ และมีความเร็วเฉลี่ยในการตกตะกอน 8.90 เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้น จึงเลือกถังปฏิกิริยาชนิดเทแบบต่อเนื่อง (Sequencing Batch Reactor: SBR) ดังแสดงในภาพที่ 4-19 เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สะดวกในการถ่ายผงตะกอนอลูมิเนียมและน้ำเข้าและออกจากระบบ โดยเวลากักที่ถือการในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อลดปริมาณแอมโมเนียให้ได้ตามที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-7) ซึ่งจะสามารถคำนวณหาปริมาตร และขนาดของถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้ โดยเวลากักทั้งหมดของระบบจะเท่ากับผลรวมของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เวลาในการตกตะกอน และเวลาในการถ่ายผงตะกอนและน้ำเข้าและออกจากระบบ



ภาพที่ 4-19 ถังปฏิกิริยาแบบเอสบีอาร์

ในขณะที่การวัดขนาดอนุภาคและการทดสอบการตกตะกอนของฝุ่นอลูมิเนียมในน้ำพบว่าฝุ่นอลูมิเนียมนี้ไม่สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการตกตะกอน เนื่องจากฝุ่นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมาก (337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และมีขนาดเล็ก (เฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน) ฝุ่นอลูมิเนียมนี้มีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยความเร็วต่ำและใช้เวลานานในการแยกออกจากน้ำ ในกรณีนี้ ถึงปฏิบัติการประเภททวนสมบูรณ์ที่ไหลต่อเนื่อง (CSTR) เป็นชนิดที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 4-20 เนื่องจากถึงปฏิบัติการชนิดนี้จะแยกตกตะกอนหรือถึงแยกตะกอนกับถึงที่เกิดปฏิบัติการหรือถึงที่มีการทวนผสม ดังนั้น ถึงปฏิบัติการจึงมีขนาดไม่ใหญ่มากจนเกินไป นอกจากนี้ ฝุ่นที่มีขนาดเล็กสามารถถ่ายเข้าและออกจากระบบพร้อมกันน้ำได้ง่าย



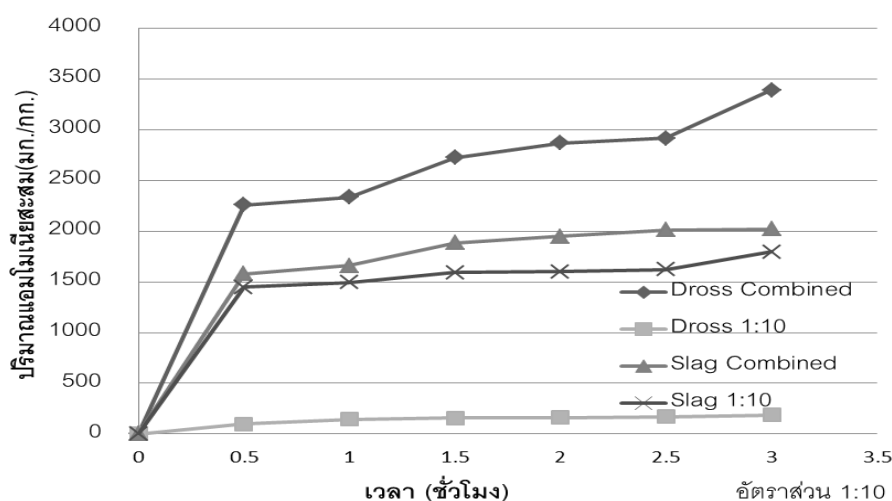
ภาพที่ 4-20 ถึงปฏิบัติการแบบ CSTR

4.4.2 ผลการศึกษาการเกิดปฏิบัติการที่สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

จากการทดลองที่ 4.2 และ 4.3 ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 4-6 โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิบัติการของผงตะกอนอลูมิเนียมจะทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 ความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณพลาสติกแขวนลอย 25 กรัม/ลิตร และสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิบัติการของฝุ่นอลูมิเนียมจะทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 ความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก โดยผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4-21

จากการทดลองพบว่า การทำปฏิบัติการระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสมจะช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิบัติการได้ดีขึ้นมากและปริมาณก๊าซแอมโมเนียก็เกิดขึ้นมากด้วย โดยคิดเป็นร้อยละ 44.60 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิบัติการระหว่างผงตะกอนอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะปกติ (อัตราส่วน 1:10 ไม่ควบคุมอุณหภูมิ และทำการปั่นกวนที่ความเร็วมอเตอร์

300 รอบต่อนาที (ความเร็วแรงแยง 26 วินาที¹) ที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 2.51 พบว่าประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสูงมาก ในกรณีของการทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสมเกิดก๊าซแอมโมเนียมากขึ้น โดยคิดเป็นร้อยละ 8.82 เมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นจากระบบบำบัดมลพิษทางอากาศกับน้ำที่สภาวะปกติที่เกิดก๊าซแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 7.83 ซึ่งพบว่าปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ โดยข้อมูลของผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศจากการทดลองนี้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณและเสนอข้อเสนอแนะในการออกแบบถังปฏิกิริยาต่อไป



ภาพที่ 4-21 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียสะสมของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมจากการเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม

นอกจากนี้ น้ำทิ้งจากการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ปริมาณสารแขวนลอย (SS) อุณหภูมิ และสภาพต่าง (Alkalinity) เพื่อคุณภาพน้ำทิ้งและเสนอแนวทางในการบำบัดน้ำเสียต่อไป โดยผลการวิเคราะห์น้ำทิ้งดังแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 คุณภาพน้ำทิ้ง

พารามิเตอร์	ค่า		มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง
	ผงตะกอน	ฝุ่น อลูมิเนียม	
ความเป็นกรดต่าง (pH)	10	10	5.5-9.0
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	45	25	ไม่เกิน 40
ของแข็งละลาย (TDS) (มก./ล.)	1828	1814	ไม่เกิน 3,000
ของแข็งแขวนลอย (SS) (มก./ล.)	138	163	ไม่เกิน 50
สภาพต่าง (Alkalinity) (มก./ล. as CaCO ₃)	1093	1064	-

จากการวิเคราะห์น้ำทิ้งของผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศพบว่าค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งทั้งค่าความเป็นกรด-ต่าง อุณหภูมิ (เฉพาะผงตะกอนอลูมิเนียม) และของแข็งแขวนลอย ถึงแม้ว่าสภาพต่างจะไม่มีกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง แต่ก็พบว่ามีปริมาณที่สูงมาก ทำให้น้ำทิ้งของผงตะกอนอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมไม่สามารถทิ้งลงสู่แหล่งน้ำได้ทันทีเพราะจะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ต้องนำไปผ่านการบำบัดก่อน เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

4.4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกอนและฝุ่นหลังเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4-8 และ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมบางประการก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ตามลำดับ ปริมาณธาตุอลูมิเนียมของผงตะกอนลดลงหลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งแตกต่างจากกรณีฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียมซึ่งปริมาณอลูมิเนียมไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างทั้งสองชนิดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4-8 พบว่าปริมาณไนโตรเจนในผงตะกอนลูมิเนียมที่วิเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา คือ 6,260 และ 3,494 มก./กก. ซึ่งหมายความว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนลูมิเนียมกับน้ำทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่เป็นต้นกำเนิดของก๊าซแอมโมเนียลดลง 2,766 มก./กก. หรือคิดเป็นร้อยละ 44.19 ในขณะที่การทดลองของผงตะกอนลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม สามารถบำบัดก๊าซแอมโมเนียได้ร้อยละ 44.60 พบว่าประสิทธิภาพที่บำบัดได้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หลังทำปฏิกิริยากับน้ำ

ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนในฝุ่นลูมิเนียมที่วิเคราะห์ได้ก่อนและหลังทำปฏิกิริยา คือ 18,855 และ 14,705 มก./กก. ซึ่งหมายความว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นลูมิเนียมกับน้ำทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่เป็นต้นกำเนิดของก๊าซแอมโมเนียลดลง 4,150 มก./กก. หรือคิดเป็นร้อยละ 22.01 ในขณะที่การทดลองของฝุ่นลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม สามารถบำบัดก๊าซแอมโมเนียได้ร้อยละ 8.82 พบว่าประสิทธิภาพที่บำบัดได้น้อยกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หลังทำปฏิกิริยากับน้ำมาก สาเหตุอาจเกิดจากการจัดเก็บตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ โดยอาจมีการปล่อยให้สัมผัสกับความชื้นหรือกำจัดความชื้นไม่หมดก่อนจัดเก็บก็ได้

ตารางที่ 4-8 ลักษณะสมบัติของผงตะกั่วอนุไมเนียมก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ

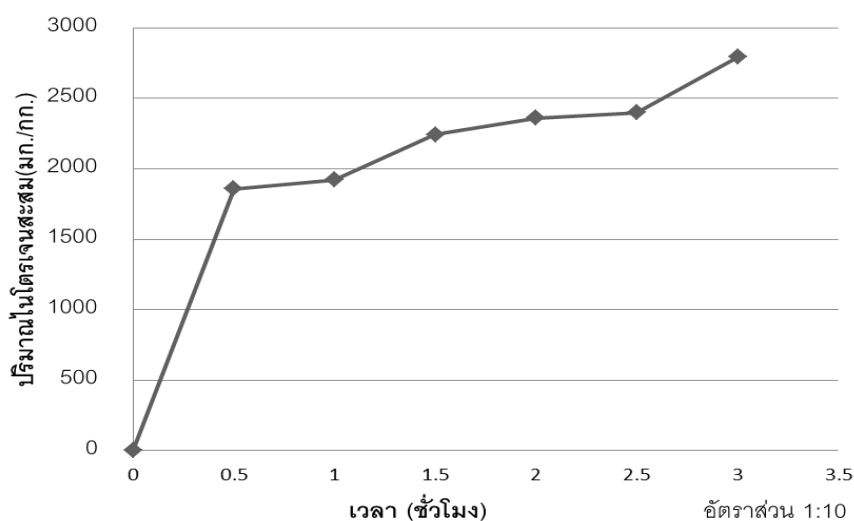
ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะและโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)											
	Ag	Al	B	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K
ก่อนเกิดปฏิกิริยา	5.475	556834.580	70.948	388.172	12.911	7.920	31.764	407.785	6980.821	7160.520	90.706	5329.026
หลังเกิดปฏิกิริยา	3.375	191893.388	55.559	354.795	0.000	7.729	31.094	372.461	6574.831	6714.852	69.820	2140.947
ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะและโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									ปริมาณไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn				
ก่อนเกิดปฏิกิริยา	0.125	24786.730	3202.357	18475.929	281.797	513.021	95.086	7972.686	6260			
หลังเกิดปฏิกิริยา	0.654	12186.761	2502.500	3352.447	711.821	201.487	46.907	3790.019	3494			

ตารางที่ 4-9 ลักษณะสมบัติของฝุ่นอนุไมเนียมก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ

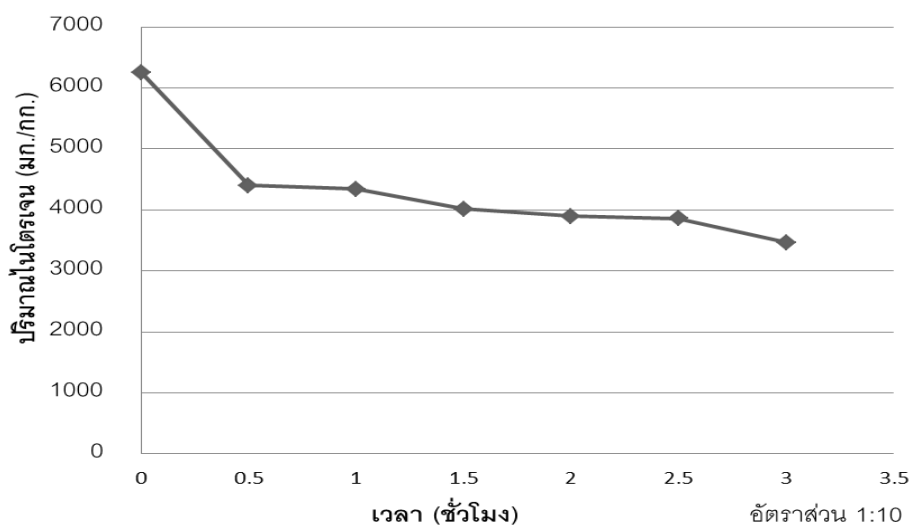
ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะและโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)											
	Ag	Al	B	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K
ก่อนเกิดปฏิกิริยา	332.512	142566.349	213.939	674.174	41.763	193.914	18.024	370.855	2775.028	7608.859	55.670	15447.170
หลังเกิดปฏิกิริยา	268.765	125417.949	177.170	626.075	42.906	190.487	18.574	299.428	2492.451	6557.178	48.818	11680.818
ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะและโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									ปริมาณไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Zn				
ก่อนเกิดปฏิกิริยา	7.772	3952.099	2469.196	11303.724	208.833	457.477	79.534	4373.311	18855			
หลังเกิดปฏิกิริยา	7.660	4003.446	2041.698	7927.822	166.574	484.278	73.383	4337.750	14705			

4.4.2.2 การออกแบบถังปฏิกริยาสำหรับผงตะกอนอูมิเนียม

ปริมาณไนโตรเจนในน้ำซึ่งเกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนอูมิเนียมกับน้ำภายในถังปฏิกริยาแสดงดังในภาพที่ 4-22 ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้ในคอลัมน์มีค่าน้อยมากและจัดว่าไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยา โดยพบว่าการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม ทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ โดยสามารถบำบัดก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นได้ร้อยละ 44.60 ซึ่งถือว่าดีพอสมควรหากเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ (3 ชั่วโมง) และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะปกติซึ่งปฏิกริยาเกิดได้ช้าและใช้เวลานานมาก ดังนั้น ถังปฏิกริยาแบบ SBR นี้ น่าจะเหมาะสมกับการบำบัดปฏิกริยาระหว่างผงตะกอนอูมิเนียมกับน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยนี้ อีกทั้งยังเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้หรือวิจัยเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้ดีขึ้นได้ และจากปริมาณของไนโตรเจนที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ (ภาพที่ 4-23) จะสามารถหาปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลือในผงตะกอนอูมิเนียมได้ เมื่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในผงตะกอนจากการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6,260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-22 ปริมาณไนโตรเจนสะสมของผงตะกอนอูมิเนียมจากการเกิดปฏิกริยากับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-23 ปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในผองตะกอนอคูมิเนียม ณ เวลาต่างๆ

จากปริมาณของไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในผองตะกอน (ภาพที่ 4-23) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไนโตรเจนในน้ำที่เปลี่ยนไปตามเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผองตะกอนอคูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม ได้ตั้งสมการที่ (4-7) และสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) ได้ตั้งสมการที่ (4-8)

$$C(t) = 5347e^{-0.15t} \quad (4-7)$$

$$r = -\frac{dC(t)}{dt} = 802.1e^{-0.15t} \quad (4-8)$$

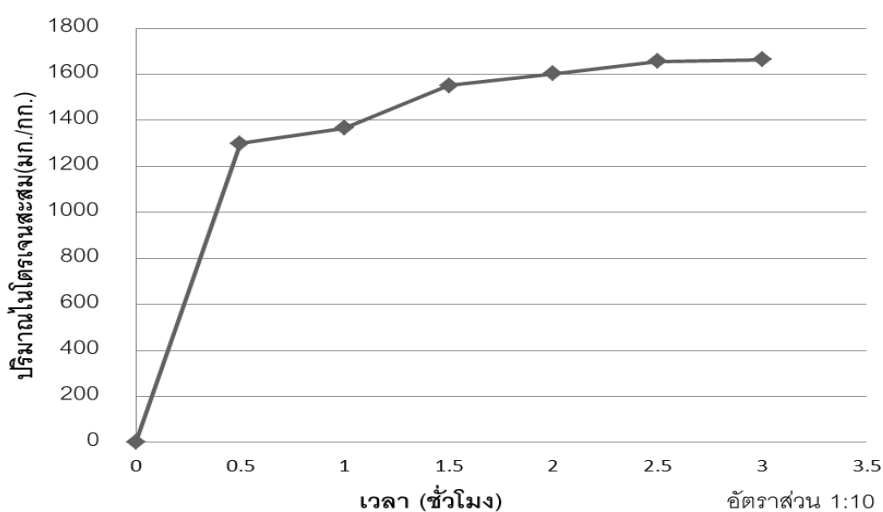
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของไนโตรเจนในทอม Logarithm จะสามารถคำนวณค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ได้เท่ากับ 0.75 และ 1.17 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ดังนั้น สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของผองตะกอนอคูมิเนียมกับน้ำ ที่สภาวะเหมาะสม สามารถเขียนได้ตั้งสมการที่ (4-9)

$$r = 1.17C^{0.75} \quad (4-9)$$

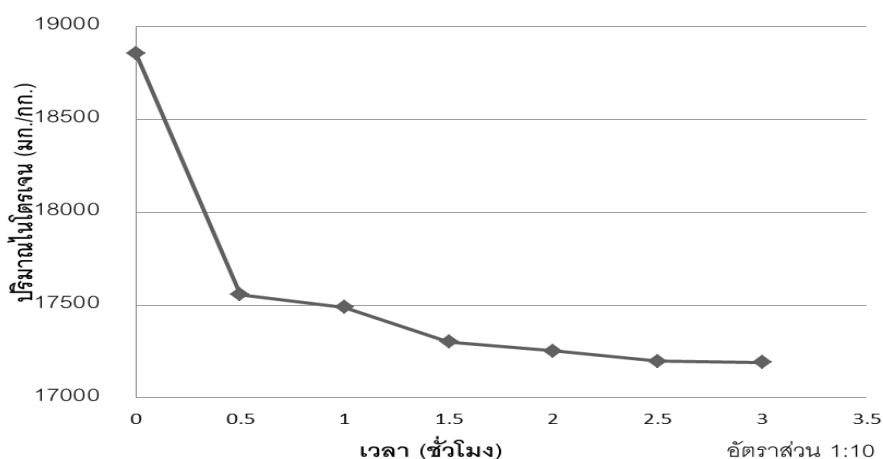
4.4.2.3 การออกแบบถังปฏิกิริยาสำหรับฝุ่นอคูมิเนียม

ปริมาณไนโตรเจนในน้ำซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอคูมิเนียมกับน้ำภายในถังปฏิกิริยาแสดงดังในภาพที่ 4-24 ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้ในคอลัมน์มีค่าน้อยมากและจัดว่าไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยา จากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ โดยสามารถบำบัดก๊าซแอมโมเนียที่จะเกิดขึ้นได้ร้อยละ 8.82 ซึ่งถือว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังคงเกิดได้ซ้ำ

และใช้เวลานานมาก ดังนั้น การบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยนี้อาจจะยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ แต่อาจนำไปศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้ดีขึ้นได้ และจากปริมาณของไนโตรเจนที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ (ภาพที่ 4-24) จะสามารถหาปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลือในฝุ่นอลูมิเนียมได้ เมื่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในฝุ่นอลูมิเนียมจากการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 18,855 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-24 ปริมาณไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ณ เวลาต่างๆ



ภาพที่ 4-25 ปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในฝุ่นอลูมิเนียม ณ เวลาต่างๆ

จากปริมาณของไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในฝุ่นอลูมิเนียม (ภาพที่ 4-26) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไนโตรเจนในน้ำที่เปลี่ยนไปตามเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม ได้ดังสมการที่ (4-10) และสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) ได้ดังสมการที่ (4-11)

$$C(t) = 18176e^{-0.02t} \quad (4-10)$$

$$r = -\frac{dC(t)}{dt} = 363.5e^{-0.02t} \quad (4-11)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของไนโตรเจนในทอม Logarithm จะสามารถคำนวณค่าอันดับปฏิกิริยา (n) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) ได้เท่ากับ 0.51 และ 2.38 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ดังนั้น สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ที่สภาวะที่เหมาะสม สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4-12)

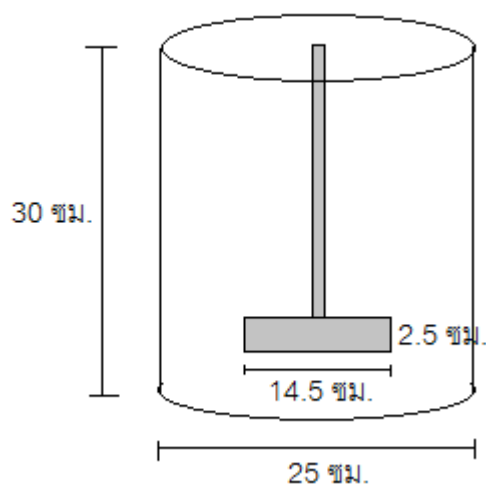
$$r = 2.38C^{0.51} \quad (4-12)$$

4.4.3 ผลการออกแบบถังปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้จะเสนอแนวทางที่เหมาะสมสำหรับบำบัดผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม โดยทำเป็นกรณีศึกษาสำหรับบำบัดของเสียทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 1 กิโลกรัม เพื่อนำเสนอข้อมูลของถังปฏิกิริยาและค่าที่แนะนำสำหรับการออกแบบถังปฏิกิริยาต่อไป

4.4.3.1 ผลการออกแบบถังปฏิกิริยาสำหรับบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม

จากผลการทดลองเบื้องต้นที่ผ่านมา พบว่าถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนกับน้ำคือ ถังปฏิกิริยาชนิดเทแบบต่อเนื่อง (Sequencing Batch Reactor: SBR) เพราะถังปฏิกิริยาชนิดนี้มีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนและเหมาะสมกับการใช้งานจริง เนื่องจากมีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์และใช้พื้นที่น้อย เพราะรวมเอาถังกวนผสมและถังตกตะกอนเข้าไว้ด้วยกัน ลักษณะสำคัญของระบบนี้คือ เป็นระบบประเภทเติมเข้าและถ่ายออก (Fill and Draw Aluminum Dross) โดยมีขั้นตอนในการบำบัดแตกต่างจากระบบอื่นๆ คือ การกวนผสม (Mixing) และการตกตะกอน (Sedimentation) จะดำเนินการเป็นไปตามลำดับภายในถังปฏิกิริยาเดียวกัน โดยการเดินระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ 1 รอบ จะมี 4 ช่วงตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4-11) โดยการเดินระบบสามารถเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในแต่ละช่วงได้ง่าย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ โดยขนาดของถังปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 4-26 และสภาวะในการเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4-10



รายละเอียดของถังปฏิกรณ์

- ถังปฏิกรณ์แบบปิด
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ซม. สูง 30 ซม.
- ปริมาตร 0.015 ลบ.ม.
- ขนาดใบพาย กว้าง 2.5 ซม. ยาว 14.5 ซม.
- อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพาย (D) กับเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของถัง (T_e) เท่ากับ 0.51

หมายเหตุ ค่าแนะนำสำหรับ D/T_e คือ 0.40-0.60 (Metcalf & Eddy, 2004)

ภาพที่ 4-26 ถังปฏิกรณ์สำหรับบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม

ตารางที่ 4-10 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
- อัตราส่วนระหว่างผงตะกอนกับน้ำ	1:10
- ปริมาณผงตะกอนอลูมิเนียม	1 กก.
- ปริมาตรน้ำ	10 ลิตร
- ความเร็วในการกวนผสม	300 รอบต่อนาที
- พีเอช	10
- อุณหภูมิ	45 องศาเซลเซียส
- ปริมาณพลาสติกแขวนลอย	250 กรัม
- ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (TX-100)	10 มิลลิลิตร

ตารางที่ 4-11 การเดินระบบบำบัดแบบ SBR และระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วง

ลำดับการเดินระบบ	ระยะเวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)
- ช่วงเติมน้ำและของเสียเข้าระบบ (Fill)	0.5
- ช่วงทำปฏิกิริยา (React)	4
- ช่วงตกตะกอน (Settle)	1
- ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw)	0.5
รวมระยะเวลาในการเดินระบบ 1 รอบ	6

จากตารางที่ 4-11 พบว่าในการเดินระบบ 1 รอบจะใช้เวลาทั้งหมด 6 ชั่วโมงในการบำบัด ผงตะกอนและมีประสิทธิภาพในการลดพิษได้ร้อยละ 50 โดยใน 1 วันจะสามารถเดินระบบได้ 4 รอบ และบำบัดผงตะกอนได้ 4 กิโลกรัม

4.4.3.2 ผลการออกแบบถังปฏิกิริยาสำหรับบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม

เนื่องจากการบำบัดพิษของฝุ่นอลูมิเนียมให้เหลือร้อยละ 50 ใช้เวลาประมาณ 33 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่นานมาก อาจไม่คุ้มค่างบกับการก่อสร้างและค่าเดินระบบ ในหัวข้อนี้จึงไม่ลงรายละเอียดของขนาดถังปฏิกิริยาและถังตกตะกอน แต่จะเสนอแนวคิดที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม เพื่อมีผู้สนใจจะนำไปพัฒนาและหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดต่อไป

จากการวัดขนาดอนุภาคและการทดสอบการตกตะกอนของฝุ่นอลูมิเนียมในน้ำ พบว่าฝุ่นอลูมิเนียมนี้ไม่สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการตกตะกอน เนื่องจากฝุ่นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมาก (337 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีขนาดเล็ก (เฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน) และมีสภาพไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ฝุ่นอลูมิเนียมจึงมีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสูผิวหน้าด้วยความเร็วต่ำและใช้เวลานานในการแยกออกจากน้ำ

ดังนั้น ถังปฏิกิริยาแบบ CSTR จึงเหมาะสมสำหรับบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม เนื่องจากเป็นระบบที่เหมาะสมกับการบำบัดของเสียที่มีปริมาณมาก และหลักการทำงานของระบบ CSTR ก็เหมือนกับระบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) ทั่วไป โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ถังกวนผสม (Mixing Tank) และถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) โดยน้ำจะถูกลำเลียงเข้าถังกวนผสมซึ่งมีฝุ่นอลูมิเนียมอยู่ และเกิดการกวนผสมตามสภาวะที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 4-12 โดยในการกวนผสมนี้จะมีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อปรับสภาพของฝุ่นอลูมิเนียมให้กลายเป็นชอบน้ำ เพื่อให้มีโอกาสทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้นและทำให้ฝุ่นอลูมิเนียม

ตกตะกอนได้อีกด้วย น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกฝุ่น
อลูมิเนียมออกจากน้ำใส ส่วนฝุ่นอลูมิเนียมที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอนจะถูกระบายออกเพื่อ
นำไปกำจัด ส่วนน้ำใสด้านบนจะเป็นน้ำทิ้งที่นำไปบำบัดต่อไป

ตารางที่ 4-12 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
- อัตราส่วนระหว่างผงตะกอนกับน้ำ	1:10
- ปริมาณฝุ่นอลูมิเนียม	1 กก.
- ปริมาตรน้ำ	10 ลิตร
- ความเร็วในการกวนผสม	300 รอบต่อนาที
- พีเอช	10
- อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส
- ปริมาณพลาสติกแขวนลอย	250 กรัม
- ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (TX-100)	10 มิลลิลิตร

4.4.4 สรุปข้อมูลการออกแบบถังปฏิบัติการ

จากข้อมูลการออกแบบถังปฏิบัติการทั้ง 2 กรณี สามารถสรุปค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-13
ตารางที่ 4-13 สรุปค่าจากการออกแบบถังปฏิบัติการระหว่างผงตะกอนและฝุ่นจากการหลอม
อลูมิเนียมกับน้ำ

พารามิเตอร์	ชนิดของถังปฏิบัติการ	
	ผงตะกอน	ฝุ่นอลูมิเนียม
ชนิดถังปฏิบัติการ	SBR	CSTR
ระยะเวลากักน้ำ (Detention time)	6 ชั่วโมง	-
ความเร็วเกรเดียนท์ (G)	26 วินาที ⁻¹	26 วินาที ⁻¹
ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k)	0.078	6x10 ⁻⁷
ลำดับการเกิดปฏิกิริยา (n)	0.75	2
ปริมาตรของถังปฏิบัติการ (ต่อตัวอย่าง 1 กิโลกรัม)	0.015 ลูกบาศก์เมตร	-
เวลาในการลดพิษเหลือร้อยละ 50	ประมาณ 4 ชั่วโมง	ประมาณ 33 ชั่วโมง

จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ยาวนาน ดังนั้นการกำจัดพิษหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ไม่คุ้มค่า นอกจากนี้ น้ำที่ทิ้งจากการบำบัดก็เป็นน้ำเสียที่เกินค่ามาตรฐานอีกด้วย การศึกษาการนำผง ตะกั่วและฝุ่นที่เกิดจากการหลอมเศษอลูมิเนียมไปใช้ประโยชน์โดยไม่จำเป็นต้องกำจัดปฏิกิริยาที่ เกิดก๊าซต่างๆก่อนจึงน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ควรได้รับการศึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการ จัดการของเสียที่เกิดขึ้นนี้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดผงตะกั่วและฝุ่นอลูมิเนียม

ในเบื้องต้นจะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของต้นทุนในการเดินระบบ (ไม่สนใจต้นทุนการ ก่อสร้างและต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย) และไม่คิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียม เนื่องจาก ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำและไม่เหมาะสมที่จะบำบัดด้วยวิธีการนี้ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการ คิดค่าใช้จ่ายเฉพาะผงตะกั่วเท่านั้น เพื่อบำบัดผงตะกั่วให้ได้ 1 กิโลกรัม โดยยึดตามการทดลอง 4.4.3.1 เพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดพิษ 50 เปอร์เซ็นต์ และทำการเดินระบบในสถานะที่ เหมาะสมและ คือ อัตราส่วนระหว่างผงตะกั่วกับน้ำ 1:10 ความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ปริมาณพลาสติกแขวนลอย (ชนิดกลม) 25 กรัมต่อลิตร และปริมาณ สารลดแรงตึงผิว (TX-100) ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งต้นทุนในการเดินระบบจะประกอบไปด้วย ต้นทุนของพลังงานที่ใช้หรือค่าไฟฟ้าและต้นทุนของสารเคมีและพลาสติกแขวนลอย โดยมี รายละเอียดดังนี้

4.5.1 ต้นทุนพลังงาน

ต้นทุนทางด้านพลังงานได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-13 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดัง ตารางที่ 4-14

$$Cost_{energy} = Power (kw) \times 2.8095 \left(\frac{baht}{unit} \right) \times time_{operate} (hr.) \times vat. (7\%) \quad (4-13)$$

ตารางที่ 4-14 ผลการคำนวณต้นทุนด้านพลังงาน

รายการ	กำลัง (kw)	Cost (บาทต่อยูนิต)	ระยะเวลา (ชม.)	ภาษี(7%)	ต้นทุนรวม (บาทต่อกิโลกรัม)
ใบพาย	0.05		4		
ปั๊มน้ำ	0.06	2.8095	1	1.07	27.23
เครื่องให้ความร้อน	2.2		4		

จากตารางที่ 4-14 ต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม 1 ตัน จะต้องใช้พลังงานซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 27.23 บาท

4.6.2 ต้นทุนทางด้านสารเคมีและพลาสติกแขวนลอย

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม ได้แก่ สารลดแรงตึงผิว TX-100 ซึ่งมีราคาตามท้องตลาด คือ 1550 บาทต่อลิตร และพลาสติกแขวนลอย (PVC ชนิดกลม) ราคา 63 บาทต่อกิโลกรัม โดยผลการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมีและพลาสติกแขวนลอยแสดงดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 ผลการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมีและพลาสติกแขวนลอย

รายการ	อัตราการใช้	ต้นทุน	ระยะเวลา (ชม.)	ภาษี (7%)	ต้นทุนรวม (บาทต่อลบ.ม.)
TX-100	10 มล.	1550 บาทต่อลิตร	3	1.07	33.44
พลาสติกแขวนลอย	250 กรัม	63 บาทต่อกก.	3		

จากตารางที่ 4-14 ต้นทุนทางด้านสารเคมีและพลาสติกแขวนลอยในการบำบัดน้ำเสียผงตะกอนอลูมิเนียม 1 กิโลกรัม จะต้องใช้สารเคมีและพลาสติกแขวนลอยซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 33.44 บาท

จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทั้งหมดพบว่า การบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียม 1 กิโลกรัม จะมีต้นทุนในการเดินระบบ ประมาณ 60.67 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับทางโรงงานอุตสาหกรรมหลอมอลูมิเนียมที่มีการจัดการกับผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการเก็บกักของเสีย

(Waste Storage) และส่งไปกำจัดที่หลุมฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure Landfill) โดยในการเก็บกักของเสีย ทางโรงงานจะมีการบรรจุของเสียในภาชนะที่ปิดมิดชิด และจัดเก็บในสถานที่ที่ปราศจากความชื้นและมีการระบายอากาศที่ดีไม่ร้อนอบอ้าว เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการระเบิดหรือไฟไหม้ได้ สำหรับการส่งผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียมไปกำจัดที่หลุมฝังกลบแบบปลอดภัยจะมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ 4,000 บาทต่อตัน (4 บาทต่อกิโลกรัม) โดยคิดเป็นค่าบริการในการกำจัด 2,600 บาทต่อตัน และค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 1,400 บาทต่อตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2540 : ออนไลน์)

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียมจากงานวิจัยกับการส่งไปกำจัดที่หลุมฝังกลบแบบปลอดภัย พบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียมจากงานวิจัยมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ามาก (ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น) และมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไม่สูง (ร้อยละ 50) จึงทำให้การบำบัดผงตะกอนอลูมิเนียมไม่คุ้มทุนในทางเศรษฐศาสตร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันจากการหลอมอลูมิเนียมและฝุ่นอลูมิเนียมจากระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

ตารางที่ 5-1 สรุปข้อมูลทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นจากการหลอมอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง	
	ผงตะกรัน	ฝุ่น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	≈ 10	≈ 10
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <ul style="list-style-type: none">• Al_2O_3• Al_2S_3• Al_4C_3• SiO_2	48.04 - - 8.58	55.50 - - 4.54
ปริมาณโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <ul style="list-style-type: none">• Al	55.68	14.26
ปริมาณซัลเฟต	-	-
ปริมาณไนโตรเจน (มก./กก.)	6,260	18,855
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1,292	337
ขนาด	0.5 มม.	50 ไมครอน

จากข้อมูลทางกายภาพและเคมีของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมดังสรุปในตารางที่ 5-1 พบว่าผงตะกรันอลูมิเนียมมีปริมาณ Al และ Al_2O_3 สูงถึงร้อยละ 55.68 และ 48.04 ตามลำดับ ซึ่งเหมาะที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ในขณะที่ฝุ่นอลูมิเนียมมีปริมาณ Al ค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 14.26 นอกจากนี้ตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดนี้มีปริมาณไนโตรเจนสูง และมีความเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับความชื้นและเกิดก๊าซแอมโมเนียขึ้นได้ แต่ในการทดลองนี้ไม่พบโครงสร้างของ Al_2S_3 และ Al_4C_3 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซมีเทน (CH_4) ตามลำดับ

ดังนั้น ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมได้แก่ ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และก๊าซมีเทนจะไม่เกิดขึ้นในการทดลอง

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ

งานวิจัยนี้พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้แก่

1) อัตราส่วนระหว่างของเสียกับน้ำ

งานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนของของเสียกับน้ำที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนของของเสียกับน้ำ เช่น ที่อัตราส่วนระหว่างผงตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำที่อัตราส่วน 1:10 ให้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าอัตราส่วน 1:5 ถึงแม้จะมีปริมาณผงตะกรันน้อยกว่าก็ตาม

2) ความเร็วเกรเดียนท์

งานวิจัยนี้พบว่าความเร็วเกรเดียนท์ที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยการปั่นกวนที่ความเร็วสูงๆจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วเกรเดียนท์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการปั่นป่วนในถังปฏิกิริยามากขึ้นและส่งผลต่อการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างของเสียกับน้ำมากขึ้นด้วย ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงขึ้น โดยความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹ เป็นค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

3) อุณหภูมิ

งานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยปฏิกิริยาระหว่างผงตะกรันอลูมิเนียมกับน้ำ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้ดีขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาระหว่างฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในการทดลอง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic reaction) จากการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมกับน้ำ ได้แก่ 45 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4) พลาสติกแขวนลอย

งานวิจัยนี้พบว่าปริมาณพลาสติกแขวนลอยที่แตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน เนื่องจากของแข็งแขวนลอยเหล่านี้จะช่วยในการกวนผสมให้เกิดการปั่นป่วนในถังปฏิกิริยามากขึ้น และยังช่วยกวนผสมในส่วนของ dead zone ที่ใบพัดไม่สามารถเข้าถึงได้ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้รูปทรงของของแข็งแขวนลอยที่ต่างกันก็ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันด้วย โดยของแข็งแขวนลอยที่มีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเมื่อเทียบกับหน่วยน้ำหนัก ด้วยน้ำหนักที่เบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าจึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปรอบๆถังปฏิกิริยาสร้างความปั่นป่วนของน้ำและสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างผงตะกอนลูมิเนียมกับน้ำได้มากขึ้น จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของพลาสติกแขวนลอย 25 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนลูมิเนียมกับน้ำ แต่ในกรณีของฝุ่นลูมิเนียม พลาสติกแขวนลอยไม่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา

5) สารลดแรงตึงผิว

งานวิจัยนี้พบว่าปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน โดยสารลดแรงตึงผิวจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะไปช่วยลดแรงตึงผิว (Surface Tension) ระหว่างของเสียกับน้ำ ทำให้มีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังไปสร้างสภาพชอบน้ำ (hydrophilic) บนพื้นผิวของผงตะกอนและฝุ่นลูมิเนียม ทำให้ปรับสภาพจากไม่ชอบน้ำกลายเป็นชอบน้ำและมีโอกาสทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ด้วย จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (TX-100) ร้อยละ 0.1 (โดยน้ำหนัก) เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นลูมิเนียมกับน้ำ

5.1.3 สภาวะที่เหมาะสม

จากการศึกษาและทดลองปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา งานวิจัยนี้พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนและฝุ่นลูมิเนียมกับน้ำสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ค่า	
	ผงตะกอน	ฝุ่นอลูมิเนียม
อัตราส่วน (ของเสีย : น้ำ)	1:10	1:10
ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹)	26	26
พีเอช	10	10
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	45	25
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (กรัม/ลิตร)	25	-
สารลดแรงตึงผิว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.1	0.1
ประสิทธิภาพ	44.60	8.82

5.1.4 สรุปข้อมูลการออกแบบถังปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุด พบว่าแนวทางการออกแบบถังปฏิกิริยาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถังปฏิกิริยามีขนาดใหญ่มาก และไม่คุ้มค่าในการออกแบบและก่อสร้างทางวิศวกรรม

ตาราง 5-3 สรุปค่าจากการออกแบบถังปฏิกิริยาของผงตะกอนและฝุ่นอลูมิเนียม

พารามิเตอร์	ชนิดของถังปฏิกิริยา	
	ผงตะกอน	ฝุ่นอลูมิเนียม
ชนิดถังปฏิกิริยา	SBR	CSTR
ระยะเวลากักน้ำ (Detention time)	6 ชั่วโมง	-
ความเร็วเกรเดียนท์ (G)	26 วินาที ⁻¹	26 วินาที ⁻¹
ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (k)	0.078	6×10^{-7}
ลำดับการเกิดปฏิกิริยา (n)	0.75	2
ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (ต่อตัวอย่าง 1 กิโลกรัม)	0.015 ลูกบาศก์เมตร	-
เวลาในการลดพิษเหลือร้อยละ 50	ประมาณ 4 ชั่วโมง	ประมาณ 33 ชั่วโมง

5.1.5 สรุปต้นทุนในการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม

งานวิจัยนี้พบว่าต้นทุนการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ เพื่อบำบัดความเป็นพิษของผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม โดยพิจารณาสถานะการเดินระบบที่ดีที่สุดที่สามารถบำบัดได้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมมีต้นทุนในการเดินระบบประมาณ 60.67 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการกำจัดด้วยวิธีการทิ้งในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยที่มีค่าใช้จ่ายในการจัดการ 4 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับกรณีฝุ่นอลูมิเนียม ไม่ได้นำมาคิดต้นทุนในการบำบัด เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำและไม่คุ้มค่าใช้จ่ายที่จะบำบัดด้วยวิธีการนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมโดยการทำปฏิกิริยากับน้ำ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่แท้จริงในการบำบัดผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียม เช่น ศึกษาค่าความเร็วการเดินท่ในช่วงต่างๆ หรือศึกษาค่าอุณหภูมิในช่วงต่างๆต่อไป สำหรับการเพิ่มโอกาสสัมผัสโดยการเติมพลาสติกแขวนลอย ควรทำการศึกษาโดยใช้พลาสติกแขวนลอยที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย อาจใช้พลาสติกที่มีความหนาแน่นแตกต่างจากผงตะกรันมากๆหรือใช้พลาสติกแขวนลอยที่มีการฝังแม่เหล็กไว้ที่แกนกลางของพลาสติก เพื่อให้ง่ายต่อการแยกออกจากผงตะกรันและน้ำเสีย นอกจากนี้ควรศึกษาการใช้ฟองอากาศในการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมซึ่งมีความหนาแน่นต่ำและลอยตัวอยู่ที่ผิวน้ำ โดยการใช้ฟองอากาศแบบละเอียด (Fine bubble) น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมได้ดียิ่งขึ้น และการศึกษา

5.2.2 การศึกษาการนำผงตะกรันและฝุ่นอลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่น

จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้า และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยายาวนาน ดังนั้น การกำจัดพิษหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์จึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ไม่คุ้มค่า การศึกษาการนำผงตะกรันและฝุ่นที่เกิดจากการหลอมเศษอลูมิเนียมไปใช้ประโยชน์โดยไม่จำเป็นต้องกำจัดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆก่อนจึงน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับการศึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นนี้อย่างเหมาะสม เช่น การผลิตซีโอไลต์ การผลิตปูนซีเมนต์ และการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการหลอมเหล็ก เป็นต้น โดยการนำผงตะกรันและฝุ่นไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่

น่าสนใจ เนื่องจากผงตะกั่วอนุมิเนียมมีสัดส่วนปริมาณอนุมิเนียมสูง โดยจะนำมาใช้ในการทดแทนวัตถุดิบหลักในกลุ่มซิลิกา อนุมิเนียม และเหล็ก แต่แนวคิดนี้ไม่ได้รับการยอมรับจากทางอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เนื่องจากทางโรงงานไม่อยากจะรับผิดชอบในการจัดเก็บของเสีย ซึ่งดูแลได้ลำบากและเพิ่มค่าใช้จ่ายให้กับทางโรงงานมากขึ้นด้วย

5.2.3 ต้นทุนในการบำบัดผงตะกั่วอนุมิเนียม

- ต้นทุนที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ไม่ได้รวมต้นทุนการก่อสร้างระบบและต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งต้นทุนดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของระบบ

- ต้นทุนการบำบัดในงานวิจัยนี้เป็นต้นทุนการบำบัดเบื้องต้นที่คำนวณภายใต้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากงานวิจัย ซึ่งอาจมีค่าลดลงในกรณีที่ค้นพบการเดินระบบที่เหมาะสมกว่างานวิจัยนี้

- ควรศึกษาต้นทุนในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การผลิตซีโอไลต์ การผลิตปูนซีเมนต์ และการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการหลอมเหล็ก เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนในการบำบัดผงตะกั่วอนุมิเนียมจากงานวิจัยและการทิ้งในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม. การจัดการของเสียอันตรายจากชุมชน. [ออนไลน์]. 2540. แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_community.html [25 เมษายน 2556]

ควบคุมมลพิษ, กรม. ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. [ออนไลน์]. 2540. แหล่งที่มา : <http://msds.pcd.go.th/name.asp> [25 เมษายน 2556]

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. อุตสาหกรรมหลอมหล่อเศษและตะกรันอลูมิเนียม. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry27.asp [25 มิถุนายน 2554]

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/PIC/law_01.html [18 กันยายน 2554]

วิชาการดอทคอม. ซีโอไซด์. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/vblog/38694> : [18 กันยายน 2554]

อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาษาอังกฤษ

ALS Environmental. Ammonia: All You've Ever Wanted To Know. [Online]. 2012. Available from: <http://www.caslab.com/News/ammonia-all-youve-ever-wanted-to-know.html> [2 March 2013]

- Aluminum Recovery Technologies. Materials. [Online]. 2008. Available from: <http://www.aluminumrt.com/index-3.html> [18 September 2011]
- AOAC INTERNATIONAL. 2000. Official Methods of Analysis. 17th ed. Methods 967.25-967.28, 978.24, 989.12, 991.13, 994.04, and 995.20. AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard method for the examination of water and wastewater. 20th ed. Baltimore, US: United Book Press.
- Araújo, E. G. 2002. Desenvolvimento de Agente Expansor à Base de Escórias de Alumínio para a Produção de Concretos Celulares Autoclavados Ou Moldados "in Loco". Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas - PIPE . 128-136.
- Aydemir, O. Use of aluminium dross for slag treatment in secondary steelmaking to decrease amount of reducible oxides in ladle furnace. M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2007.
- Das, B.R., Dash, B., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C. 2007. Production of η -alumina from waste aluminium dross. Mineral Engineering. 20: 252-258.
- Dash, B., Das, B. R., Tripathy, B. C., Bhattacharya, I. N. and Das, S. C. 2008. Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross. Hydrometallurgy. 92(1-2): 48-53.
- David, E. and Kopac, J. 2012. Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste. Journal of Hazardous Materials. 209: 501-509.
- Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E. and Thurston, R. V. 1975. Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. Journal of Fisheries Research Board of Canada. 32: 2379-2383.
- Ewais, E. M. M., Khalil, N. M., Amin, M.S., Ahmed, Y. M. Z. and Barakat, M. A. 2009. Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement. Ceramics International. 35: 3381–3388.
- Filleti, A. 1995. Aspectos ambientais na fundição de alumínio. V Seminário de Tecnologia Da Indústria Do Alumínio. 339-533.

- Fukumoto, S., Hookabe, T. and Tsubakino, H. 2000. Hydrolysis behavior of aluminum nitride in various solutions. Journal of Materials Science. 35(11): 2743-2748.
- Hwang, J. Y., Huang, X. and Xu, Z. 2006. Recovery of metals from aluminium dross and salt cake. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 5(1): 47-62.
- JBMI Group Ltd. Powder Metallurgy. [Online]. 2004. Available from: <http://www.jbmi.com/activities/powder-metallurgy> : [18 September 2011]
- Jirang, C. and Lifeng, Z. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. Journal of Hazardous Materials. 158(2-3): 228-256.
- Johansen, S. T., Graadahl, S. and Hagelien, T. F. 2004. Entrainment of inclusions from the dross in stirred reactors for melt treatment. Applied Mathematical Modelling. 28(1): 63-77.
- Jones, V. W. 1944. Aluminium dross as a substitute for fluorspar. Open Hearth Conference. 220-224.
- Kenneth L Barbalace (J.K. Barbalace, inc). USDOT Hazardous Materials Transportation Placards. [Online]. 2001. Available from: <http://environmentalchemistry.com/yogi/hazmat/placards/class4.html> [18 September 2011]
- Manfredi, O., Wuth, W. and Bohlinger, I. 1997. Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross. JOM. 49(11): 48-51.
- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- MFS Systems (2007) Inc. MFS Rotary Cooler. [Online]. 2005. Available from: <http://www.mfssystem.com/cooler.php> [18 September 2011]
- Mroueh, U. M., Laine-Ylijoki, J. and Eskola, P. 2006. Chapter 9 By-product processing and utilization. Waste Management Series 7, Elsevier. 329-374.
- Murayama, N., Okajima, N., Yamaoka, S., Yamamoto, H. and Shibata, J. 2006. Hydrothermal synthesis of $\text{AlPO}_4\text{-5}$ type zeolitic materials by using aluminum dross as a raw material. Journal of the European Ceramic Society. 26:459-462.

- PHMSA. Emergency Response Guidebook (ERG 2008). [Online]. 2008. Available from: <http://www.phmsa.dot.gov/hazmat/library/erg> : [18 September 2011]
- Prasadha Pamunah Limbah Industry. Hazardous Waste Landfill. [Online]. 2008. Available from: http://www.ppli-indo.com/serv_current.php#landfill [18 September 2011]
- Shen, H. and Forssberg, E. 2003. An overview of recovery of metals from slags. Waste Management. 23: 933-949.
- Shinzato, M. C. and Hypolito, R. 2005. Solid waste from aluminum recycling process: Characterization and reuse of its economically valuable constituents. Waste Management. 25(1): 37-46.
- Slack, G. A. and Mcnelly, T. F. 1976. AIN from pellet drop, sublimation and final growth. Journal of Crystal Growth. 24: 263.
- Soto, H. and Toguri, J. M. 1986. Aluminum recovery from dross by flotation. Conservation and Recycling. 9(1): 45-54.
- Tsakiridis, P. E. 2012. Aluminium salt slag characterization and utilization – A review. Journal of Hazardous Materials. 217: 1-10.
- Unger, T. W. and Beckmann, M. 1992. Salt slag processing for recycling, light metals. TMS Annual Meeting. 25: 1159–1162.
- US EPA. Method 3050B. [Online]. 2001. Available from: www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf [18 September 2011]
- US EPA. Method 9045D. [Online]. 2001. Available from: www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/9045d.pdf [18 September 2011]
- Water Industry Assosiation of Australia (WIAO). ODOUR CONTROL STRATEGIES ON THE REGIONAL OUTFALL SEWER. [Online]. 2008. Available from: http://www.wiao.org.au/conference_papers/05/paper20.htm [2 March 2013]
- Yoo, S.-J., Kwak, D.-H., Lee, S.-I., Kim, J.-G., Park, J.-K., Yoon, S.-H. and Jang, H. D. 2011. Kinetics of aluminum dross dissolution in sec-butyl alcohol for aluminum sec-butoxide. Advanced Powder Technology. 22(5): 617-622.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
เอกสารผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง



บริษัท เอส.พี.เอส. คอนซัลติ้ง เซอร์วิส จำกัด

S.P.S. CONSULTING SERVICE CO., LTD.

7 ซอยพหลโยธิน 24 ถนนพหลโยธิน แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
7 SOI PHAHOLYOTHIN 24, PHAHOLYOTHIN RD., JOMPOL, CHATUCHAK, BANGKOK 10900
TEL: 0-2939-4370-2, 0-2939-5858-9, 0-2513-7874-5 FAX: 0-2513-4221
E-MAIL : CONTACT@SPSCON.COM WEBSITE : WWW.SPSCON.COM

1/1

REF. NO. 636-639/02/13/
Quo-0305/2011

REPORT NO. 1876-1879/2013/
FILE : SOIL1101

รายงานผลการวิเคราะห์คุณภาพภาคตะกอน


โครงการ : - วันที่เก็บตัวอย่าง : -
ที่ตั้งโครงการ : - วันที่รับตัวอย่าง : 16 กุมภาพันธ์ 2556
ชื่อ/ที่อยู่ลูกค้า : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร
วันที่วิเคราะห์ : 16-24 กุมภาพันธ์ 2556
ผู้เก็บตัวอย่าง : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วันที่พิมพ์รายงาน : 24 กุมภาพันธ์ 2556

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	สถานี			
		AI 50% หลังน้ำ	AI 50% ก่อนน้ำ	SLAG หลังน้ำ	SLAG ก่อนน้ำ
สภาพตัวอย่าง	-	ภาคตะกอนสีดำ	ภาคตะกอนสีดำ	ภาคตะกอนสีดำ	ภาคตะกอนสีดำ
NITROGEN (mg/kg)	ASA, SSSA 1982	3,494	6,260	14,705	18,855

ผลการวิเคราะห์นี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์เท่านั้น
ห้ามคัดถ่ายรายงานผลการวิเคราะห์เพียงบางส่วนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการเป็นลายลักษณ์อักษร


(นางสาวจารินี นนทิสุทธิ์)
๖-011-๖-2961
เจ้าหน้าที่ทดสอบ
24/02/2556




(นางสาวจารินี นนทิสุทธิ์)
๖-011-๖-538
ผู้จัดการห้องปฏิบัติการ
24/02/2556

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์แอมโมเนียโดยวิธี Nesslerization
และวิธีการวิเคราะห์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยวิธี Iodometric-Titration

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์แอมโมเนียโดยวิธี Nesslerization

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่อง Spectrophotometer
2. หลอดทดลอง
3. ไมโครปิเปต
4. Pipette Tip
5. สารสเตบิลไลเซอร์: น้ำยา EDTA
6. สารเนสเลอร์: ละลาย HgI_2 50 กรัม และ KI 35 กรัมในน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วผสมลงในสารละลาย $NaOH$ 80 กรัม ในน้ำกลั่น 250 ml ที่เย็นแล้ว กวนตลอดเวลาที่เติม แล้วเจือจางเป็น 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดแก้วสีชาที่มีจุกยาง
7. สารละลายสต็อกแอมโมเนีย: ละลาย NH_4Cl 1.9095 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
8. สารละลายมาตรฐานแอมโมเนีย: เจือจางสารละลายสต็อกแอมโมเนีย 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร (1.00 มิลลิลิตร = 10 ไมโครกรัม N = 12.2 ไมโครกรัม NH_3)



ภาพที่ ข-1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาแอมโมเนียโดยวิธี Nesslerization

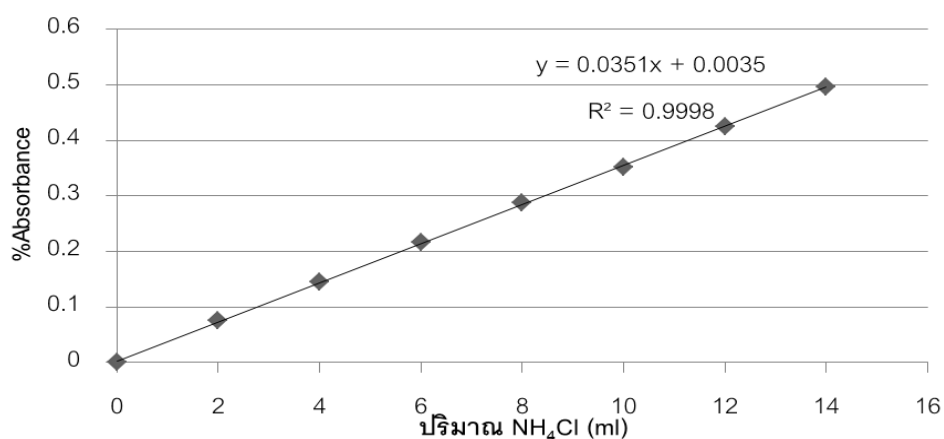
ขั้นตอนการทดลอง

1. สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นแอมโมเนียจาก NH_4Cl ปริมาตร 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

2. หยดน้ำยา EDTA 1 หยด และเติมสารเนสเลอร์ 2 มิลลิลิตร
3. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10-30 นาที
4. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
5. ใช้น้ำตัวอย่างน้อยกว่า 50 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และทำตามขั้นตอนที่ 2-4 เหมือนสารมาตรฐาน

ตารางที่ ข-1 ผลกราฟมาตรฐานความเข้มข้นแอมโมเนียจาก NH_4Cl ปริมาณต่างๆ

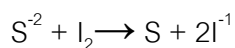
ปริมาณ NH_4Cl (ml)	%Abs
0	0
2	0.076
4	0.145
6	0.216
8	0.288
10	0.351
12	0.425
14	0.496



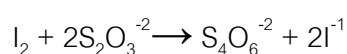
ภาพที่ ข-2 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นแอมโมเนียจาก NH_4Cl ปริมาณต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์ H₂S โดยวิธี Iodometric-Titration (AOAC, 2000)

หลักการตรวจวัดซัลไฟด์



ถ้าในตัวอย่างมี S²⁻ เมื่อเติมไอโอดีนลงไปให้มากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับ S²⁻ หมด แล้วเติมน้ำแป้งลงไป น้ำแป้งจะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนที่เหลืออยู่ เกิดเป็นสีม่วงเข้ม



เมื่อไตเตรทกับโซเดียมไธโอซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจนหมด ทำให้สีม่วงเข้มหายไป

หมายเหตุ : ขีดจำกัดการวัด (Detection limit) ของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ มีค่า 1 มก./ลิตร

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่
2. บิวเรต
3. ออโต้ปิเปต
4. ทิป
5. ปีกเกอร์

สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.025 N
2. ไอโอดีน
3. น้ำแป้ง

วิธีทำการทดลอง

1. ใช้ปริมาณตัวอย่าง 2 มิลลิลิตร
2. เติมไอโอดีนลงไป 2 มิลลิลิตร
3. หยดน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด ซึ่งน้ำแป้งเป็น indicator ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วงเข้ม
4. ไตเตรทด้วย 0.025 N โซเดียมไธโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) ไตเตรทจนถึงจุดยุติเมื่อสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นไม่มีสี

วิธีคำนวณหาปริมาณซัลไฟด์

$$S^{2-} \text{ (mg/l)} = \frac{400(\text{vol. } I_2 - \text{vol. } Na_2S_2O_3)}{\text{vol. of sample}}$$

ภาคผนวก ค
ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณ
ส่วนของการทดสอบการเกิดปฏิกิริยา

ภาคผนวก ค.1 ผลการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกรันอลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:5										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.033	0	0.1	0.84	8.4	41.7	
1	5	590	15	0.038	0	0.1	0.98	9.8	48.3	
1.5	5	585	15	0.052	0	0.1	1.38	13.8	67.4	
2	5	580	15	0.073	0	0.1	1.98	19.8	95.7	
2.5	5	575	15	0.090	0	0.1	2.46	24.6	118.1	
3	5	570	15	0.096	0	0.1	2.64	26.4	124.9	1.64

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:10										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.044	0	0.1	1.15	11.5	114.4	
1	5	590	15	0.046	0	0.1	1.21	12.1	119.1	
1.5	5	585	15	0.051	0	0.1	1.35	13.5	131.9	
2	5	580	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	155.6	
2.5	5	575	15	0.064	0	0.1	1.72	17.2	165.2	
3	5	570	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	169.2	2.22

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:15										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.022	0	0.1	0.53	5.3	78.4	
1	5	590	15	0.024	0	0.1	0.58	5.8	86.2	
1.5	5	585	15	0.031	0	0.1	0.78	7.8	114.6	
2	5	580	15	0.036	0	0.1	0.93	9.3	134.3	
2.5	5	575	15	0.040	0	0.1	1.04	10.4	149.5	
3	5	570	15	0.044	0	0.1	1.15	11.5	164.4	2.16

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่ความเร็วในการหมุนผสม 150 รอบต่อนาที (ความเร็วเรเดียนต์ 9 วินาที⁻¹)

วิธีการคำนวณปริมาณแอมโมเนียสะสม

$$Total NH_3 = \frac{C_R V_R + C_C V_C}{W_D} \quad (ค-1)$$

เมื่อ C_R คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

C_C คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (มก./ลิตร)

V_R คือ ปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์ (ลิตร)

V_C คือ ปริมาตรน้ำในคอลัมน์น้ำ (ลิตร)

W_D คือ น้ำหนักของผงตะกอนหรือฝุ่นอนุมิเนียม (กก.)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแอมโมเนียสะสม ที่อัตราส่วน 1:10 ที่เวลา 3 ชั่วโมง

$$Total NH_3 = \frac{(17.80627)(0.570) + 0}{0.06} = 169.2 \text{ mg / kg}$$

นอกจากนี้ จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดังสมการ (ค-2)

$$Efficiency = \frac{TotalNH_3 \times 100}{NH_{3analysis}} \quad (ค-2)$$

เมื่อ $NH_{3analysis}$ คือ ปริมาณแอมโมเนียที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองที่ 3.2.1

$$NH_{3analysis} = \frac{6260 \times 17}{14} = 7,601 \text{ mg / kg}$$

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด

$$Efficiency = \frac{169.2 \times 100}{7601} = 2.22\%$$

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิบัติ (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิบัติ (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิบัติ	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:5										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.433	0	0.1	12.24	122.4	606.7	
1	5	590	15	0.620	0	0.1	17.56	175.6	863.6	
1.5	5	585	15	0.779	0	0.1	22.09	220.9	1077.1	
2	5	580	15	0.798	0	0.1	22.64	226.4	1094.0	
2.5	5	575	15	0.927	0	0.1	26.31	263.1	1260.7	
3	5	570	15	0.977	0	0.1	27.74	277.4	1317.4	5.75

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:10										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.120	0	0.1	3.32	33.2	329.1	
1	5	590	15	0.274	0	0.1	7.71	77.1	757.8	
1.5	5	585	15	0.386	0	0.1	10.90	109.0	1062.5	
2	5	580	15	0.420	0	0.1	11.87	118.7	1147.1	
2.5	5	575	15	0.464	0	0.1	13.12	131.2	1257.3	
3	5	570	15	0.493	0	0.1	13.95	139.5	1324.9	5.79

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อัตราส่วน 1:15										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.088	0	0.1	2.41	24.1	358.1	
1	5	590	15	0.179	0	0.1	5.00	50.0	737.5	
1.5	5	585	15	0.194	0	0.1	5.43	54.3	793.8	
2	5	580	15	0.196	0	0.1	5.48	54.8	795.2	
2.5	5	575	15	0.205	0	0.1	5.74	57.4	825.2	
3	5	570	15	0.244	0	0.1	6.85	68.5	976.4	4.26

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่ความเร็วในการหมุนผสม 150 รอบต่อนาที (ความเร็วกระเดียนท์ 9 วินาที¹)

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเร็วเกรเดียนท์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเกรเดียนท์ 9 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.033	0	0.1	0.84	8.4	83.4	
1	5	590	15	0.046	0	0.1	1.21	12.1	119.1	
1.5	5	585	15	0.051	0	0.1	1.35	13.5	131.9	
2	5	580	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	155.6	
2.5	5	575	15	0.064	0	0.1	1.72	17.2	165.2	
3	5	570	15	0.070	0	0.1	1.89	18.9	180.0	2.37

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเร็วเกรเดียนท์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเกรเดียนท์ 14 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.036	0	0.1	0.93	9.3	91.8	
1	5	590	15	0.049	0	0.1	1.30	13.0	127.5	
1.5	5	585	15	0.053	0	0.1	1.41	14.1	137.5	
2	5	580	15	0.058	0	0.1	1.55	15.5	150.1	
2.5	5	575	15	0.061	0	0.1	1.64	16.4	157.0	
3	5	570	15	0.071	0	0.1	1.92	19.2	182.7	2.40

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเร็วเกเรเดียนท์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเกเรเดียนท์ 26 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.038	0	0.1	0.98	9.8	97.5	
1	5	590	15	0.055	0	0.1	1.47	14.7	144.3	
1.5	5	585	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	156.9	
2	5	580	15	0.062	0	0.1	1.67	16.7	161.1	
2.5	5	575	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	170.6	
3	5	570	15	0.074	0	0.1	2.01	20.1	190.8	2.51

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองการบำบัดฟุ้งอนุมิเนียมที่ความเร็วเกรเดียนท์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเกรเดียนท์ 9 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.200	0	0.1	5.60	56.0	555.2	
1	5	590	15	0.340	0	0.1	9.59	95.9	942.7	
1.5	5	585	15	0.388	0	0.1	10.95	109.5	1068.1	
2	5	580	15	0.419	0	0.1	11.84	118.4	1144.3	
2.5	5	575	15	0.440	0	0.1	12.44	124.4	1191.8	
3	5	570	15	0.470	0	0.1	13.29	132.9	1262.6	5.51

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่ความเร็วเครื่องยนต์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิบัติการ	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเครื่องยนต์ 14 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.268	0	0.1	7.54	75.4	747.3	
1	5	590	15	0.356	0	0.1	10.04	100.4	987.5	
1.5	5	585	15	0.378	0	0.1	10.67	106.7	1040.3	
2	5	580	15	0.384	0	0.1	10.84	108.4	1047.9	
2.5	5	575	15	0.476	0	0.1	13.46	134.6	1290.1	
3	5	570	15	0.480	0	0.1	13.58	135.8	1290.1	5.63

ตารางที่ ค-4 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่ความเร็วเครื่องยนต์ต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิบัติ (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิบัติ (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิบัติ	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ความเร็วเครื่องยนต์ 26 วินาที ⁻¹										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.516	0	0.1	14.60	146.0	1447.9	
1	5	590	15	0.536	0	0.1	15.17	151.7	1491.8	
1.5	5	585	15	0.576	0	0.1	16.31	163.1	1590.3	
2	5	580	15	0.584	0	0.1	16.54	165.4	1598.7	
2.5	5	575	15	0.598	0	0.1	16.94	169.4	1623.2	
3	5	570	15	0.666	0	0.1	18.87	188.7	1793.1	7.83

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนอูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.014	0	0.1	0.30	3.0	29.7	
1	5	590	15	0.022	0	0.1	0.53	5.3	51.8	
1.5	5	585	15	0.038	0	0.1	0.98	9.8	95.8	
2	5	580	15	0.052	0	0.1	1.38	13.8	133.6	
2.5	5	575	15	0.058	0	0.1	1.55	15.5	148.8	
3	5	570	15	0.062	0	0.1	1.67	16.7	158.3	2.08

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.032	0	0.1	0.81	8.1	75.00	
1	5	590	15	0.050	0	0.1	1.32	13.2	130.2	
1.5	5	585	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	156.9	
2	5	580	15	0.062	0	0.1	1.67	16.7	161.1	
2.5	5	575	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	170.6	
3	5	570	15	0.071	0	0.1	1.92	19.2	182.7	2.40

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.038	0	0.1	0.98	9.8	97.5	
1	5	590	15	0.055	0	0.1	1.47	14.7	144.3	
1.5	5	585	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	173.6	
2	5	580	15	0.086	0	0.1	2.35	23.5	227.2	
2.5	5	575	15	0.104	0	0.1	2.86	28.6	274.4	
3	5	570	15	0.132	0	0.1	3.66	36.6	347.8	4.58

ตารางที่ ค-5 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.056	0	0.1	1.50	15.0	148.3	
1	5	590	15	0.134	0	0.1	3.72	37.2	365.6	
1.5	5	585	15	0.204	0	0.1	5.71	57.1	556.9	
2	5	580	15	0.268	0	0.1	7.54	75.4	728.4	
2.5	5	575	15	0.482	0	0.1	13.63	136.3	1306.5	
3	5	570	15	0.470	0	0.1	13.29	132.9	1306.5	17.19

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.488	0	0.1	13.80	138.0	1368.8	
1	5	590	15	0.540	0	0.1	15.28	152.8	1503.0	
1.5	5	585	15	0.592	0	0.1	16.77	167.7	1634.7	
2	5	580	15	0.611	0	0.1	17.31	173.1	1673.1	
2.5	5	575	15	0.649	0	0.1	18.39	183.9	1762.4	
3	5	570	15	0.690	0	0.1	19.56	195.6	1858.1	8.12

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.459	0	0.1	12.98	129.8	1286.9	
1	5	590	15	0.521	0	0.1	14.74	147.4	1449.8	
1.5	5	585	15	0.552	0	0.1	15.63	156.3	1523.6	
2	5	580	15	0.584	0	0.1	16.54	165.4	1598.7	
2.5	5	575	15	0.598	0	0.1	16.94	169.4	1623.2	
3	5	570	15	0.666	0	0.1	18.87	188.7	1793.1	7.83

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.278	0	0.1	7.82	78.2	775.5	
1	5	590	15	0.356	0	0.1	10.04	100.4	987.5	
1.5	5	585	15	0.368	0	0.1	10.38	103.8	1012.5	
2	5	580	15	0.402	0	0.1	11.35	113.5	1097.5	
2.5	5	575	15	0.420	0	0.1	11.87	118.7	1137.2	
3	5	570	15	0.480	0	0.1	13.58	135.8	1289.7	5.63

ตารางที่ ค-6 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.108	0	0.1	2.98	29.8	295.2	
1	5	590	15	0.150	0	0.1	4.17	41.7	410.4	
1.5	5	585	15	0.188	0	0.1	5.26	52.6	512.5	
2	5	580	15	0.228	0	0.1	6.40	64.0	618.3	
2.5	5	575	15	0.234	0	0.1	6.57	65.7	629.3	
3	5	570	15	0.240	0	0.1	6.74	67.4	640.1	2.80

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วกระเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 16.7 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.036	0	0.1	0.93	9.3	91.8	
1	5	590	15	0.053	0	0.1	1.41	14.1	138.67	
1.5	5	585	15	0.058	0	0.1	1.55	15.5	151.4	
2	5	580	15	0.063	0	0.1	1.70	17.0	163.9	
2.5	5	575	15	0.065	0	0.1	1.75	17.5	167.9	
3	5	570	15	0.068	0	0.1	1.84	18.4	174.6	2.30

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถึง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.040	0	0.1	1.04	10.4	103.1	
1	5	590	15	0.058	0	0.1	1.55	15.5	152.7	
1.5	5	585	15	0.063	0	0.1	1.70	17.0	165.3	
2	5	580	15	0.072	0	0.1	1.95	19.5	188.7	
2.5	5	575	15	0.080	0	0.1	2.18	21.8	208.9	
3	5	570	15	0.088	0	0.1	2.41	24.1	228.7	3.01

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถึง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 33.3 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	Column	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.042	0	0.1	1.09	10.9	108.8	
1	5	590	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	158.3	
1.5	5	585	15	0.062	0	0.1	1.67	16.7	162.5	
2	5	580	15	0.074	0	0.1	2.01	20.1	194.2	
2.5	5	575	15	0.079	0	0.1	2.15	21.5	206.1	
3	5	570	15	0.089	0	0.1	2.44	24.4	231.4	3.04

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถึง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยทรงกลม ความเข้มข้น 16.7 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.036	0	0.1	0.93	9.3	91.8	
1	5	590	15	0.048	0	0.1	1.27	12.7	124.7	
1.5	5	585	15	0.055	0	0.1	1.47	14.7	143.1	
2	5	580	15	0.060	0	0.1	1.61	16.1	163.9	
2.5	5	575	15	0.063	0	0.1	1.69	16.9	154.3	
3	5	570	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	169.2	2.23

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถึง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดกลม ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.040	0	0.1	1.04	10.4	103.1	
1	5	590	15	0.058	0	0.1	1.55	15.5	152.7	
1.5	5	585	15	0.066	0	0.1	1.78	17.8	173.6	
2	5	580	15	0.072	0	0.1	1.95	19.5	188.7	
2.5	5	575	15	0.088	0	0.1	2.41	24.1	230.7	
3	5	570	15	0.092	0	0.1	2.52	25.2	239.5	3.15

ตารางที่ ค-7 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถึง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนียสะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดกลม ความเข้มข้น 33.3 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.042	0	0.1	1.09	10.9	108.8	
1	5	590	15	0.059	0	0.1	1.58	15.8	155.5	
1.5	5	585	15	0.064	0	0.1	1.72	17.2	168.1	
2	5	580	15	0.070	0	0.1	1.89	18.9	183.1	
2.5	5	575	15	0.090	0	0.1	2.46	24.6	236.2	
3	5	570	15	0.094	0	0.1	2.58	25.8	244.9	3.22

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิบัติการ	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 16.7 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.456	0	0.1	12.89	128.9	1278.4	
1	5	590	15	0.530	0	0.1	15.00	150.0	1475.0	
1.5	5	585	15	0.574	0	0.1	16.25	162.5	1584.7	
2	5	580	15	0.586	0	0.1	16.60	165.6	1604.2	
2.5	5	575	15	0.601	0	0.1	17.02	170.2	1631.4	
3	5	570	15	0.668	0	0.1	18.93	189.3	1798.5	7.86

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.480	0	0.1	13.58	135.8	1346.2	
1	5	590	15	0.520	0	0.1	14.72	147.2	1446.9	
1.5	5	585	15	0.580	0	0.1	16.42	164.2	1601.4	
2	5	580	15	0.594	0	0.1	16.82	168.2	1626.3	
2.5	5	575	15	0.610	0	0.1	17.28	172.8	1655.9	
3	5	570	15	0.672	0	0.1	19.05	190.5	1809.3	7.90

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจากถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิบัติการ (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิบัติการ	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดสีเหลือง ความเข้มข้น 33.3 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.502	0	0.1	14.20	142.0	1408.4	
1	5	590	15	0.530	0	0.1	15.00	150.0	1475.0	
1.5	5	585	15	0.612	0	0.1	17.34	173.4	1690.3	
2	5	580	15	0.620	0	0.1	17.56	175.6	1697.9	
2.5	5	575	15	0.638	0	0.1	18.08	180.8	1732.4	
3	5	570	15	0.670	0	0.1	18.99	189.9	1803.9	7.88

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดกลม ความเข้มข้น 16.7 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.510	0	0.1	14.43	144.3	1431.0	
1	5	590	15	0.538	0	0.1	15.23	152.3	1497.4	
1.5	5	585	15	0.560	0	0.1	15.85	158.5	1545.8	
2	5	580	15	0.588	0	0.1	16.65	166.5	1609.7	
2.5	5	575	15	0.636	0	0.1	18.02	180.2	1726.9	
3	5	570	15	0.667	0	0.1	18.90	189.0	1795.8	7.84

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดกลม ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.480	0	0.1	13.58	135.8	1346.2	
1	5	590	15	0.522	0	0.1	14.77	147.7	1452.6	
1.5	5	585	15	0.576	0	0.1	16.31	163.1	1590.3	
2	5	580	15	0.599	0	0.1	16.97	169.7	1640.0	
2.5	5	575	15	0.644	0	0.1	18.25	182.5	1748.8	
3	5	570	15	0.670	0	0.1	18.99	189.9	1803.9	7.88

ตารางที่ ค-8 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของของแข็งแขวนลอย

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
ของแข็งแขวนลอยชนิดกลม ความเข้มข้น 33.3 กรัมต่อลิตร										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.492	0	0.1	13.91	139.1	1380.1	
1	5	590	15	0.528	0	0.1	14.94	149.4	1469.4	
1.5	5	585	15	0.598	0	0.1	16.94	169.4	1651.4	
2	5	580	15	0.624	0	0.1	17.68	176.8	1708.9	
2.5	5	575	15	0.631	0	0.1	17.88	178.8	1713.3	
3	5	570	15	0.672	0	0.1	19.05	190.5	1809.3	7.90

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนอูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของสารลดแรงตึงผิว

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.222	0	0.1	6.23	62.3	617.3	
1	5	590	15	0.224	0	0.1	6.28	62.8	617.7	
1.5	5	585	15	0.236	0	0.1	6.62	66.2	645.8	
2	5	580	15	0.242	0	0.1	6.79	67.9	656.8	
2.5	5	575	15	0.272	0	0.1	7.65	76.5	733.0	
3	5	570	15	0.296	0	0.1	8.33	83.3	791.7	10.42

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอนลูมิเนียมที่ความเข้มข้นต่างๆของสารลดแรงตึงผิว

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.390	0	0.1	11.01	110.1	1091.9	
1	5	590	15	0.426	0	0.1	12.04	120.4	1183.6	
1.5	5	585	15	0.448	0	0.1	12.66	126.6	1234.7	
2	5	580	15	0.462	0	0.1	13.06	130.6	1262.7	
2.5	5	575	15	0.474	0	0.1	13.40	134.0	1284.6	
3	5	570	15	0.521	0	0.1	14.74	147.4	1400.6	18.42

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนิวเมียมที่ความเข้มข้นต่างๆของสารลดแรงตึงผิว

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.520	0	0.1	14.72	147.2	1459.2	
1	5	590	15	0.544	0	0.1	15.40	154.0	1514.2	
1.5	5	585	15	0.563	0	0.1	15.94	159.4	1554.1	
2	5	580	15	0.581	0	0.1	16.45	164.5	1590.5	
2.5	5	575	15	0.615	0	0.1	17.42	174.2	1669.6	
3	5	570	15	0.667	0	0.1	18.90	189.0	1795.8	7.84

ตารางที่ ค-10 (ต่อ) ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุภาคนีเยมที่ความเข้มข้นต่างๆของสารลดแรงตึงผิว

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สารลดแรงตึงผิว ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.550	0	0.1	15.57	155.7	1544.0	
1	5	590	15	0.612	0	0.1	17.34	173.4	1704.7	
1.5	5	585	15	0.664	0	0.1	18.82	188.2	1704.7	
2	5	580	15	0.705	0	0.1	19.99	199.9	1801.9	
2.5	5	575	15	0.734	0	0.1	20.81	208.1	1864.4	
3	5	570	15	0.780	0	0.1	22.12	221.2	1971.6	8.61

หมายเหตุ : ทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 และความเร็วเกรเดียนท์ 26 วินาที⁻¹

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองการบำบัดผงตะกอน淤泥เนียมที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาตรที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาตรที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาตรที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.802	0	0.1	22.75	227.5	2256.0	
1	5	590	15	0.836	0	0.1	23.72	237.2	2332.3	
1.5	5	585	15	0.984	0	0.1	27.93	279.3	2723.6	
2	5	580	15	1.044	0	0.1	29.64	296.4	2865.6	
2.5	5	575	15	1.070	0	0.1	30.38	303.8	2911.9	
3	5	570	15	1.256	0	0.1	35.68	356.8	3389.9	44.60

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองการบำบัดฝุ่นอนุมิเนียมที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณที่ เก็บจาก ถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เหลือในถัง ปฏิกิริยา (มล.)	ปริมาณที่ เก็บจาก คอลัมน์ (มล.)	%Abs ถัง ปฏิกิริยา	%Abs คอลัมน์	ปริมาณที่ นำมา วิเคราะห์ (มล.)	ปริมาณ แอมโมเนีย (จากกราฟ)	ความเข้มข้น แอมโมเนีย (มก./ลิตร)	ปริมาณ แอมโมเนีย สะสม (มก./กก.)	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)
สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา										
0	5	600	15	0	0	0.1	0	0	0	
0.5	5	595	15	0.562	0	0.1	15.91	159.1	1577.9	
1	5	590	15	0.596	0	0.1	16.88	168.8	1659.9	
1.5	5	585	15	0.682	0	0.1	19.33	193.3	1884.7	
2	5	580	15	0.710	0	0.1	20.13	201.3	1945.7	
2.5	5	575	15	0.740	0	0.1	20.98	209.8	2010.9	
3	5	570	15	0.750	0	0.1	21.27	212.7	2020.4	8.82

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการออกแบบถึงปฏิบัติการเบื้องต้นและตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ค.1 ผลการศึกษาการออกแบบถังปฏิกริยาเบื้องต้นสำหรับผงตะกัรณอลูมิเนียม

จากวิธี Differential จะสามารถหาค่าอันดับปฏิกริยา (n) และค่าคงที่ของปฏิกริยา (k) โดยแสดงได้ดังนี้

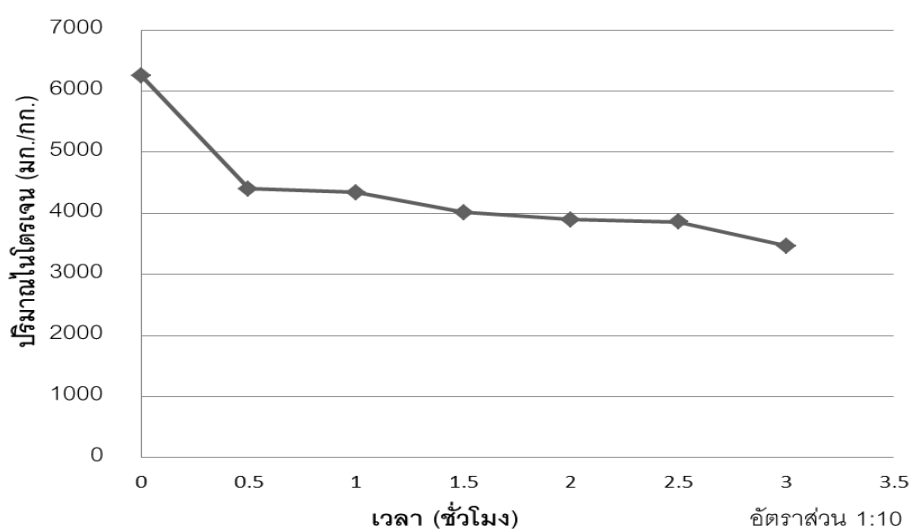
ปฏิกริยา: $C \rightarrow P$

สมการอัตราการเกิดปฏิกริยาในรูปอนุพันธ์: $r = -\frac{dC}{dt} = kC^n$ (ง-1)

สมการอัตราการเกิดปฏิกริยาในรูปปริพันธ์: $\ln r = \ln k + n \ln C$ (ง-2)

เมื่อ r = อัตราการเกิดปฏิกริยา
 C = ค่าความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ
 k = ค่าคงที่สำหรับอัตราเร็วของปฏิกริยา
 n = อันดับการเกิดปฏิกริยา

และจากการทดลองบำบัดผงตะกัรณอลูมิเนียมที่สภาวะที่ดีที่สุด จะสามารถหาปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่คงเหลือในผงตะกัรณได้ดังแสดงในภาพที่ ง-1



ภาพที่ ง-1 ปริมาณไนโตรเจนที่คงเหลืออยู่ในผงตะกัรณอลูมิเนียม ณ เวลาต่างๆ

และจากภาพที่ ง-1 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไนโตรเจนในน้ำที่เปลี่ยนไปตามเวลาสำหรับการเกิดปฏิกริยาระหว่างผงตะกัรณอลูมิเนียมกับน้ำที่สภาวะที่ดีที่สุด ได้ดังสมการที่ (ง-3) และสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกริยา (r) ได้ดังสมการที่ (ง-4)

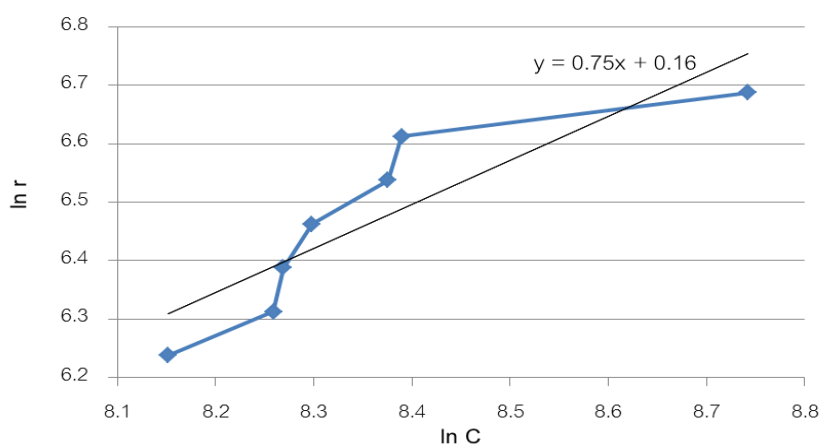
$$C(t) = 5347e^{-0.15t} \quad (\text{ง-3})$$

$$r = -\frac{dC(t)}{dt} = 802.1e^{-0.15t} \quad (\text{ง-4})$$

ตาราง ง-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไนโตรเจนในน้ำที่เปลี่ยนไปตามเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงตะกอนอคูมิเนียม

เวลา (hr)	ปริมาณไนโตรเจนที่เหลือ (mg/kg)	r	ln C	ln r
0	6260.0	53.5	8.74	3.98
0.5	4402.1	49.6	8.39	3.90
1	4339.3	46.0	8.38	3.83
1.5	4017.0	42.7	8.30	3.75
2	3900.1	39.6	8.27	3.68
2.5	3861.9	36.8	8.26	3.60
3	3468.3	34.1	8.15	3.53

จากสมการ ง-2 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln C และ ln r เพื่อหาค่า n และ k ดังแสดงในภาพที่ ง-2



ภาพที่ ง-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln C และ ln r

จากสมการ $y = 0.75x + 0.16$ จะสามารถหาค่า n และ k ได้ โดย $n = 0.75$ และ $k = 1.17$ เมื่อแทนค่าในสมการ ง-1 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ (ง-5)

$$r = 1.17C^{0.75} \quad (\text{ง-5})$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายดิษยพงศ์ หกสุวรรณ เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2529 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนปรางโมชวิทยารามอินทรา จ.กรุงเทพมหานคร ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 จ.กรุงเทพมหานคร และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] Dissayapong Hoksuwan, Nattawin Chawaloesphonsiya, Pisut Painmanakul and Patiparn Panyapalakul. "Treatment of Aluminum Dross and Aluminum Dust by Interaction with Water" Proceedings of the 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38). The Empress Hotel Chiang Mai, Thailand 17-19 October, 2012.
- [2] Dissayapong Hoksuwan, Nattawin Chawaloesphonsiya, Pisut Painmanakul and Patiparn Panyapalakul. "Effect of Various Operating Conditions on Preliminary Treatment of Waste Containing Aluminum Dross" Proceedings of the 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment. Aston Tropicana Hotel Bandung, Indonesia 21-22 November 2012