

การศึกษาการขยายขนาดการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน



นายชุตินันท์ ชาญพานิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตที่ส่งมาขึ้นทะเบียนที่สำนักงานวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

SCALE UP OF POLYALUMINIUM CHLORIDE PRODUCTION IN STIRRED TANK REACTOR

Mr. Chutinun Chanpanit

The logo of Chulalongkorn University, featuring a central emblem with a sunburst and a tiered structure, set against a light background.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการขยายขนาดการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน

โดย

นายชุตินันท์ ชาญพานิชย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. นริศรา อินทรจันทร์)

ชุตินันท์ ชาญพานิชย์ : การศึกษาการขยายขนาดการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน. (SCALE UP OF POLYALUMINIUM CHLORIDE PRODUCTION IN STIRRED TANK REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.เจ็ดศักดิ์ ไชยคุนา , 195 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดใบพายและความเร็วรอบในการปั่นกววนที่มีผลต่อการขยายขนาดการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน ขนาด 1 ลิตร จากการศึกษาพบว่าชนิดของใบพายและความเร็วรอบส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยพบว่าจากการใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาทีให้ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ สูงที่สุด เท่ากับ 82.4 ส่วนการใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที โดยมีร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เท่ากับ 75.6 และ การใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เท่ากับ 77.0 นำใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที มาคำนวณขนาดและความเร็วรอบใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 10 ลิตรและ 25 ลิตร ซึ่งการหมุนที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่ โดยที่ $n = 2, 1$ และ 0.66 ตามลำดับ ดังนั้นที่เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรใช้ความเร็วรอบ 59,133 และ 175 รอบต่อนาที และขนาด 25 ลิตร ใช้ความเร็วรอบ 33,99 และ 144 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่าทุกความเร็วรอบได้ผลลัพธ์ของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร เพื่อให้ได้ผลของร้อยละผลได้ออกมา ให้ใกล้เคียงกันกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร จึงกำหนดความเร็วรอบให้โดยหาความสัมพันธ์ ที่ $n = 0.5$ ซึ่งจะได้ความเร็วรอบใหม่ที่ 200 และ 173 รอบต่อนาทีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทำให้เห็นว่าผลของการปรับความเร็วรอบใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตรโดยที่ผลลัพธ์ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ออกมาใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร โดยร้อยละผลได้ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1,10 และ 25 ลิตร มีค่าเท่ากับ 82.4 , 82.3 และ 82.2 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5371474121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYALUMINIUM CHLORIDE / SOLID SUSPENSION / POWER
CONSUMPTION / SCALE-UP REACTOR

CHUTINUN CHANPANIT: SCALE UP OF POLYALUMINIUM CHLORIDE
PRODUCTION IN STIRRED TANK REACTOR. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA,
Ph.D., 195 pp.

This research investigated the influences of turbines type and mixing speed effect for scale-up of polyaluminum chloride synthesis in one liter reactor . It was found that the turbines type and speed affected rate of hydrolysis reaction and polymerization of polyaluminum chloride. Types of turbine and optimal speed found that to used turbines type pitched 6-blade turbine with mixing speed at 300 rpm ,percentage of polyaluminum chloride equal to 82.4 . Turbines type pitched 4-blade turbine with mixing speed at 600 rpm, percentage of polyaluminum chloride equal to 75.6 and Turbines type Rushton Turbine with mixing speed at 1800 rpm, percentage of polyaluminum chloride equal to 77 .In addition , turbines type pitched 6-blade turbine with mixing speed at 300 rpm were calculated size and mixing speed in the reactor of 10 and 25 liters. Each of experiments mixing speed is different cause by setting constant number of Reynolds number, impeller tip speed and Power per unit volume at $n = 2, 1$ and 0.66 respectively. Thus, the reactor size 10 liters with mixing speed 59,133 and 175 rpm and the reactor size 25 liters 33,99 and 144 rpm by turbines type pitched 6-blade turbine .The results shown percentage of polyaluminum chloride less than one liter reactor. So the relationship of the reactor size 1, 10 and 25 liters for the effect of percentage has to be similar to one liter reactor. Mixing speed is a major factor causing the outcome was similar. Determine the mixing speed provided by the relationship of $n = 0.5$, which is the speed at 200 and 173 rpm in reactors 10 and 25 liters, respectively, the experimental results shown that the effect of adjust mixing speed of reactors 10 and 25 liters. The results of percentage are close to one liter reactor. The percentage of reactor size 1, 10 and 25 liters is equal to 82.4, 82.3 and 82.2 respectively.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือและความเมตตาจากหลายๆท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงในการให้คำปรึกษาต่องานวิจัย แนะนำแนวทางในงานวิจัย ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และความช่วยเหลือในทุกด้านจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง ปรีชานนท์, และอาจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท เคสียร์ เคมิคอล จำกัด ในการสนับสนุนวัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี สำหรับคุณงามความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1	บทนำ..... 1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย..... 3
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4
บทที่ 2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5
2.1	แนวคิดและทฤษฎี..... 5
2.2	สมดุลโมลสาร (Mole Balance)..... 7
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 31
3.1	วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 31
3.2	วิธีการทดลอง..... 33
3.2.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 33
3.2.2	การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับ ห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร..... 34
3.2.3	การศึกษาและคัดเลือกชนิดของใบพายที่เหมาะสมระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, และ Rushton Turbine ตลอดจนความเร็วรอบในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่อง ปฏิกรณ์ 1 ลิตร..... 38
3.2.4	การผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่ม ขยาย 10 ลิตร..... 42
3.2.5	การผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่ม ขยาย 25 ลิตร..... 45

3.2.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการและระดับเพิ่มขยายขนาด	47
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	48
4.1	การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร	48
4.2	การศึกษาและคัดเลือกชนิดของใบพายที่เหมาะสมระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, และ Rushton Turbine ตลอดจนความเร็วรอบในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร	60
4.2.1	การศึกษาใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45°	60
4.2.2	การศึกษาใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°	70
4.2.3	การศึกษาใบพายชนิด Rushton Turbine.....	80
4.3	ผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายและความเร็วรอบที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 10 และ 25 ลิตร.....	91
4.3.1	การศึกษาการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร	91
4.3.2	การศึกษาการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร	97
4.4	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับเพิ่มขยายขนาด	102
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1	สรุปผลการวิจัย	107
5.2	ข้อเสนอแนะของงานวิจัย	110
	รายการอ้างอิง	111
ภาคผนวก ก.	การวิเคราะห์ผลการทดลอง 1	141
ภาคผนวก ข.	การวิเคราะห์ผลการทดลอง 2	143
ภาคผนวก ค.	การวิเคราะห์ผลการทดลอง 3	159
ภาคผนวก ง.	ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of Reaction)	174
ภาคผนวก จ.	ข้อมูลผลการทดลองทางจลนพลศาสตร์.....	182
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	195

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	5
ตารางที่ 2.2	Geometric Proportion for a “ Standard” Agitation System	15
ตารางที่ 2.3	Typical scale up ratios (แหล่งที่มา Robert L. Kabel; Scaleup of Chemical p	
ตารางที่ 3. 1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผล	33
ตารางที่ 3. 2	องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (หน่วย: กรัม).....	36
ตารางที่ 3. 3	สภาวะการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ	36
ตารางที่ 3. 4	องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร.....	41
ตารางที่ 3. 5	สภาวะการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร	42
ตารางที่ 3. 6	องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร.....	42
ตารางที่ 3. 7	สภาวะการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร	43
ตารางที่ 3. 8	ความเร็วรอบการหมุนของใบพายในถังปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร	44
ตารางที่ 3. 9	องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร.....	45
ตารางที่ 3. 10	สภาวะการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร	45
ตารางที่ 3. 11	ความเร็วรอบการหมุนของใบพายในถังปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร	46
	rocesser)	18
ตารางที่ 4.1	คุณภาพทางเคมีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน.....	59
ตารางที่ 4.2	ความเร็วรอบที่นำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ในขนาด 10 ลิตรและ 25 ลิตรโดยใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45o.....	90
ตารางที่ 4.3	สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่	103
ตารางที่ ก.1	สมมูลมวล วัตถุประสงค์ และ ผลลัพธ์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	141
ตารางที่ ก.2	สมมูลมวล วัตถุประสงค์ และ ผลลัพธ์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	142
ตารางที่ ข.1	ช่วงเวลาและปริมาณในการเก็บตัวอย่าง	144
ตารางที่ ข.2	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (โมลต่อลิตร) ...	144
ตารางที่ ข.3	ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 0.25 ลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	145

ตารางที่ ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 1 ลิตร.....	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า
ตารางที่ ข.5 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 10 ลิตร.....	152
ตารางที่ ข.6 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (%)ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 25 ลิตร.....	153
ตารางที่ ข.7 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาที่ไฮโดรไลซิสใน เครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร.....	155
ตารางที่ ข.8 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร.....	156
ตารางที่ ข.9 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร.....	157
ตารางที่ ข.10 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร.....	158
ตารางที่ ค.1 ช่วงเวลาและปริมาณในการเก็บตัวอย่าง	160
ตารางที่ ค.2 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.25 ลิตร.....	161
ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า
ตารางที่ ค.4 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร	168
ตารางที่ ค.5 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาที่ 2 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร	169
ตารางที่ ค.6 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H ₂ SO ₄)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง แก้วขนาด 0.25 ลิตร.....	170
ตารางที่ ค.7 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H ₂ SO ₄)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง แก้วขนาด 1 ลิตร.....	171
ตารางที่ ค.8 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H ₂ SO ₄)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง แก้วขนาด 10 ลิตร.....	172
ตารางที่ ค.9 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H ₂ SO ₄)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาที่ 2 ในเครื่องแก้วขนาด 10 ลิตร.....	173

ตารางที่ ง.1 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 0.25 ลิตร	176
ตารางที่ ง.2 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร.....	177
ตารางที่ ง.3 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 10 ลิตร	180
ตารางที่ ง.4 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 25 ลิตร	181
ตารางที่ จ.1 ร้อยละผลได้ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1ลิตร ใน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	182
ตารางที่ จ.2 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1ลิตร	182
ตารางที่ จ.3 ร้อยละผลได้ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร.....	183
ตารางที่ จ.4 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร ..	183
ตารางที่ จ.5 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10, 25 เมื่อ ปรับค่า n= 0.5	183
ตารางที่ จ.6 ร้อยละของแข็ง (Total Solid %) ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 0.25 ลิตร	184
ตารางที่ จ.7 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1ลิตร	185
ตารางที่ จ.8 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 10ลิตร	188
ตารางที่ จ.9 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 25ลิตร	189
ตารางที่ จ.10 ความหนืดของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 0.25, 1 ,10 และ 25 ลิตร	191
ตารางที่ จ.11 Impeller Tip speed ของใบพายทั้ง 3ชนิดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร	192
ตารางที่ จ.12 Dimensions of turbine and tank	192
ตารางที่ จ.13 ความเร็วรอบที่คำนวณจาก Impeller tip speed.....	193
ตารางที่ จ.14 Reynolds Number	193

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า
รูปที่ 2. 2 Dimensions of turbine and tank.....	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า
รูปที่ 3. 1แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	31
รูปที่ 3. 2กระบวนการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร	35
รูปที่ 3. 3เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร และชนิดของใบพาย	41
รูปที่ 3. 4เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 10 ลิตร และใบพายชนิด Pitched 6-blade turbine at 45°.....	43
รูปที่ 3. 5เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 25 ลิตร และใบพายชนิด Pitched 6-blade turbine at 45°.....	46
รูปที่ 4. 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดร คลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดร คลอริกที่ 1:2,1:3,1:4,1:5,1:6 และ 1:9 ตามลำดับ.....	49
รูปที่ 4. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของสารตั้งต้นและปริมาณของแข็งที่ไม่ ทำปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิ 27 และ 100 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 4. 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของสารตั้งต้นและปริมาณของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ.....	52
รูปที่ 4. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดร คลอริกที่ 1:3 แบบซ้ำที่ 1-4	54

รูปที่ 4. 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อ
กรดซัลฟูริก(H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5 และ 1.3 ตามลำดับ 55

รูปที่ 4. 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วน
โมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อกรดซัลฟูริก(H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5 และ 1.3
ตามลำดับ..... 56

รูปที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่
สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อกรดซัลฟูริก(H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5
และ 1.3 ตามลำดับ 57

รูปที่ 4. 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อกรดซัลฟูริก
(H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5 และ 1.3 ตามลำดับและค่าการเลือกเกิดในการทดลองระดับ
ห้องปฏิบัติการ..... 58

รูปที่ 4. 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกใน
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-
Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ 61

รูปที่ 4. 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-
Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ 62

รูปที่ 4. 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง
ปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 63

รูปที่ 4. 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง
ปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 64

รูปที่ 4. 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at
45° และความหนาแน่น..... 65

รูปที่ 4. 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่ม
ขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบ
ต่างๆ 66

รูปที่ 4. 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย
เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว รอบ
ต่างๆ 67

รูปที่ 4. 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ	68
รูปที่ 4. 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	69
รูปที่ 4. 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	71
รูปที่ 4. 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	72
รูปที่ 4. 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	73
รูปที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	74
รูปที่ 4. 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° และความหนาแน่น.....	75
รูปที่ 4. 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	76
รูปที่ 4. 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	77
รูปที่ 4. 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ	78
รูปที่ 4. 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	79

รูปที่ 4. 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ	81
รูปที่ 4. 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ	81
รูปที่ 4. 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง ปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ	83
รูปที่ 4. 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง ปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ	84
รูปที่ 4. 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Rushton Turbine และความ หนาแน่น	85
รูปที่ 4. 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่ม ขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	86
รูปที่ 4. 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	87
รูปที่ 4. 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์สเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับ ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ	88
รูปที่ 4. 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการ ทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็ว รอบต่าง.....	89
รูปที่ 4. 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่ม ขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ,Pitched 6- Blade Turbine at 45° และ Rushton Turbine	90
รูปที่ 4. 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6- Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ	92
รูปที่ 4. 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	93

รูปที่ 4. 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง
ปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 94

รูปที่ 4. 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย
เครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
..... 95

รูปที่ 4. 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย
เครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
..... 96

รูปที่ 4. 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก
ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-
Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 98

รูปที่ 4. 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched
6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 99

รูปที่ 4. 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่อง
ปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ.... 100

รูปที่ 4. 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย
เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
..... 101

รูปที่ 4. 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย
เครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
..... 102

รูปที่ 4. 47 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพาย
ชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 104

รูปที่ 4. 48 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1, 10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบ
พายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆเมื่อ $n = 0.5$ 104

รูปที่ 4. 49 แสดงความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์และพาวเวอร์นัมเบอร์ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1,
10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° Pitched 6-Blade
Turbine at 45° , Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ..... 105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตกตะกอนสิ่งสกปรกในน้ำเป็นกระบวนการสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพน้ำ ทั้งระบบน้ำดี และระบบน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม สารที่ใช้ในการตกตะกอนที่ใช้งานกันโดยทั่วไปได้แก่ สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4), เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2) และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) โดยที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ถูกพัฒนาเพื่อทดแทนการใช้สารส้ม เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารทั้งสองชนิดพบว่าปริมาณการใช้สาร PACl น้อยกว่าสารส้ม 3-5 เท่า เกิดกากตะกอนจากการบำบัดน้อยกว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำน้อยกว่า และมีต้นทุนภาพรวมของการบำบัดถูกกว่า จากข้อได้เปรียบดังกล่าวจึงส่งผลให้ PACl เป็นที่นิยมอย่างมาก ในการผลิต PACl นั้น นอกจากการเลือกใช้สารเคมีที่มีคุณภาพแล้ว สิ่งสำคัญหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ขั้นตอนและกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญ ซึ่งผลการทดลองที่ประสบความสำเร็จในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถนำมาพัฒนาจนถึงขั้นที่สามารถผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้

การเพิ่มขยายขนาด (Scale-up) มีจุดประสงค์ในการนำผลความสำเร็จจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการมาเพิ่มการผลิตในระดับอุตสาหกรรม (Commercial scale) เพื่อการพาณิชย์ให้ประสบความสำเร็จ โดยเริ่มต้นจากการทดลองในระดับโครงการนำร่อง (Pilot scale) ก่อน เพื่อเก็บข้อมูลมาช่วยในการออกแบบและกำหนดการดำเนินงานในระดับการขยาย การเพิ่มขยายขนาดในกระบวนการทางเคมีของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จำเป็นต้องมีแนวทางในการป้องกันปัญหาและอุปสรรคที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องจากการก้าวกระโดดจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับโครงการนำร่อง ปัญหาที่เกิดขึ้นได้แก่ การถ่ายเทมวล การถ่ายเทความร้อน การเลือกชนิดของใบพายและ

ความเร็วรอบในการปั่นกวน ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลต่อปริมาณผลผลิต กระบวนการผลิต และต้นทุนด้านพลังงาน ดังนั้นจึงถือเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาและคัดเลือกชนิดของใบพายระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, Rushton Turbine ตลอดจนหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานช่วยในการออกแบบเครื่องกวนให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด อันส่งผลต่อเนื่องถึงความสามารถในการผลิตและการประหยัดพลังงาน ส่วนที่สามเป็นผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 10 และ 25 ลิตร และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิผลในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการและระดับเพิ่มขยายขนาด 1, 10, และ 25 ลิตร เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้เบื้องต้นในการเพิ่มการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และศึกษาผลของตัวแปรในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวนที่มีต่อการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับขยายขนาดได้แก่ ชนิดของใบพายและความเร็วในการหมุนของใบพาย
- 2) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวนในระดับอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 27, 80, 90, 100, 110, 120 องศาเซลเซียส และสัดส่วนโมลของ $\text{Al}(\text{OH})_3 : \text{HCl}$ ที่ 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:9 ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยพิจารณา ปริมาณของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์
- 2) ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโมลของ $\text{AlCl}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$ ที่ 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5, 1:3.0 ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์, อุณหภูมิ, ร้อยละผลได้, ค่าการเลือกเกิด, ค่าความหนืด, และคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ได้แก่ ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์, ค่าพีเอช, ความหนาแน่นของสาร
- 3) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) ศึกษาอิทธิพลของชนิดใบพายระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45° , Pitched 6-Blade Turbine at 45° , Rushton Turbine และความเร็วรอบที่ 100, 200, 300, 600, 1200, 1800 รอบต่อนาที ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์, อุณหภูมิ, ค่าความหนืด, ความหนาแน่นของสาร, ร้อยละผลได้, ค่าพลังงานที่ใช้, ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์
- 5) คัดเลือกชนิดของใบพายที่เหมาะสมระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45° , Pitched 6-Blade Turbine at 45° , Rushton Turbine ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร

- 6) ศึกษาหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร และคำนวณหาค่า Impeller tip speed, Reynolds number, Power per unit volume
- 7) คำนวณหาความเร็วรอบที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 10 และ 25 ลิตร โดยอาศัย Scale-Up Criteria ได้แก่ Impeller tip speed, Reynolds number, และ Power per unit volume
- 8) ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 10 และ 25 ลิตร โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลง ปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์, อุณหภูมิ, ร้อยละผลได้, ค่าพลังงานที่ใช้
- 9) เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1, 10, 25 ลิตรที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์, อุณหภูมิ, ร้อยละผลได้, ค่าพลังงานที่ใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลการศึกษาไปออกแบบและพัฒนาขยายขนาดการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ สำหรับการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium Chloride) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า "PAC" หรือ "PACl" มีคุณสมบัติเป็นเกลืออะลูมิเนียม สูตรเคมีคือ $Al_2(OH)_3Cl_3$ เป็นสารประเภทพอลิอนินทรีย์ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของนิวเคลียสหลายตัว สารพอลิดังกล่าวมีความเป็นเบสเกลือแรงและประจุไฟฟ้าบวก มีคุณสมบัติการจับตัว และมีเสถียรภาพสูง ลักษณะทั่วไปของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีทั้งในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อย และในรูปของผงละเอียดสีขาว โดยทั่วไปมีคุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

รายการที่	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี	เกณฑ์ที่กำหนด
1	ความหนาแน่นสัมพัทธ์	1.1 ถึง 1.4
2	พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (คำนวณเป็น Al_2O_3)	5 ถึง 25
3	ความเป็นด่าง ร้อยละโดยน้ำหนัก	10 ถึง 83
4	ความขุ่น เอ็นทียู (NTU) ไม่เกิน	50

หมายเหตุ NTU ย่อมาจาก nephelometric turbidity units

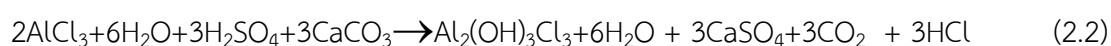
ที่มาของข้อมูล : AWWA B 408-93 Liquid Poly Aluminium Chlorid

พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด ซึ่งกระบวนการผลิตและรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์แตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ในปัจจุบันมีการศึกษากระบวนการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์หลากหลายแบบ แต่ละแบบมีลักษณะกระบวนการและการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกันไป เช่น จากการศึกษาของ Fengting Li [1] ได้ทำการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้โบไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกและแคลเซียมอะลูมิเนทในเครื่องปฏิกรณ์ K.W.Pi Jia [2] ได้ทำการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยาใน Electrolysis Reactor และ ZHAO Changwei [3] ได้ทำการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) โดยค่อยๆเติมลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่เคลือบด้วยแก้วแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมี Zhonglian Yang[4] ที่ได้ทำการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนตในเครื่องปฏิกรณ์ที่เคลือบผิวด้วยแก้ว โดยภายหลังเกิดปฏิกิริยาได้ถูกปล่อยให้แห้งให้เซตตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ซึ่งกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนคือ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:



กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน:



2.2 สมดุลโมลสาร (Mole Balance)

สมดุลโมลสารเป็นพื้นฐานของการออกแบบและควบคุมกระบวนการต่างๆ การทำสมดุลโมลจะทำให้ทราบปริมาณสารตั้งต้นหรือวัตถุดิบที่ต้องใช้ในกระบวนการและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะได้ โดยการคำนวณสมดุลโมลสารนั้นจะใช้หลักของกฎอนุรักษ์ทรงมวล (The law of conservation of mass) ที่กล่าวว่า "มวลสารของระบบหนึ่งๆจะคงที่เสมอ ไม่ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆภายในระบบ" มาประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณ

ระบบหรือขอบเขตที่พิจารณาโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ระบบปิด (Close หรือ Non flow system) คือระบบที่ไม่มีการถ่ายเทสารเข้าออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และระบบเปิด (Open หรือ Flow system) คือระบบที่มีการถ่ายเทสารเข้าออกระหว่างสิ่งแวดล้อมกับระบบ อย่างไรก็ตามในการคำนวณสมดุลโมลสารนั้นจำเป็นต้องพิจารณากระบวนการทางเคมีของระบบโดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ด้วยเพราะแสดงถึงความสัมพันธ์ทางโมลสารของสารที่ทำปฏิกิริยากันพอดี

การสร้างสมดุลโมลสารรอบระบบคือ การพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่เข้า, เคลื่อนที่ออก, เกิดขึ้นในระบบ, และสะสมในระบบที่เวลาใดๆ โดยสมการสมดุลโมลสารแสดงดังสมการ 2.3

$$\begin{bmatrix} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของสารภายในระบบ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{อัตราการไหล} \\ \text{เชิงโมลของสาร} \\ \text{เข้าสู่ระบบ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{อัตราการไหล} \\ \text{เชิงโมลของสาร} \\ \text{ออกจากระบบ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{อัตราการเกิดขึ้น} \\ \text{ของสาร} \\ \text{ภายในระบบ} \end{bmatrix}$$

$$\frac{dN_j}{dt} = F_{j0} - F_j + G_j \quad (2.3)$$

เมื่อ	$\frac{dN_j}{dt}$	คือ อัตราการสะสมของสาร j ภายในระบบ (โมลต่อเวลา)
	F_{j0}	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร j เข้าสู่ระบบ (โมลต่อเวลา)
	F_j	คือ อัตราการไหลเชิงโมลของสาร j ออกจากระบบ (โมลต่อเวลา)
	G_j	คือ อัตราการเกิดขึ้นของสาร i ที่เกิดขึ้นภายในระบบ (โมลต่อเวลา)

ในกรณีที่มีสมบัติต่างๆของระบบ เช่น อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้น มีค่าคงที่ตลอดภายในระบบ อัตราการเกิดขึ้นของสารภายในระบบจะหาได้จากผลคูณของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารกับปริมาตรรวมของระบบ

$$G_j = r_j \cdot V \quad (2.4)$$

เมื่อ	r_j	คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร j (โมลต่อเวลา•ปริมาตร)
	V	คือ ปริมาตรรวมของระบบ (ปริมาตร)

หากสมบัติต่างๆของระบบภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าไม่คงที่จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารมีค่าขึ้นกับตำแหน่งภายในเครื่องปฏิกรณ์ การหาอัตราการเกิดขึ้นของสารภายในระบบ การหาอัตราการเกิดขึ้นของสารภายในระบบจะทำโดยการแบ่งปริมาตรที่เกิดปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กมากจนเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารภายในปริมาตรเล็กๆนั้นแล้วไม่มีผลของตำแหน่งมาเกี่ยวข้อง

$$G_j = \int^V r_j dV \quad (2.5)$$

2.2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อภาวะสมดุล

การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบสมดุล ไม่ว่าจะเพิ่มหรือลดความเข้มข้นนั้นจะทำให้ระบบเสียภาวะสมดุล ระบบจะมีการปรับตัวเพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่เสมอส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ต่างไปจากสมดุลเดิม

1. การเพิ่มความเข้มข้นของสาร การเพิ่มความเข้มข้นของสารชนิดใดชนิดหนึ่งในระบบสมดุล ระบบจะพยายามปรับตัวไปในทิศทางที่จะลดความเข้มข้นของสารที่เติมลงไปด้วยการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า

2. การลดความเข้มข้นของสาร การลดความเข้มข้นของสารชนิดใดชนิดหนึ่งในระบบสมดุล ระบบจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าน้อยลงและจะพยายามปรับตัวไปในทิศทางที่จะเพิ่มความเข้มข้นของสารที่เติมลงไปด้วยการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

2.2.2 ผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิที่มีผลต่อภาวะสมดุล

เมื่อระบบได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของสารมีพลังงานมากขึ้น มีการชนกันมากขึ้น แต่เนื่องจากสารบางชนิดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอาจเกิดการแยกสลายหรือถูกทำลายไปส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบหรือชนิดของปฏิกิริยา โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

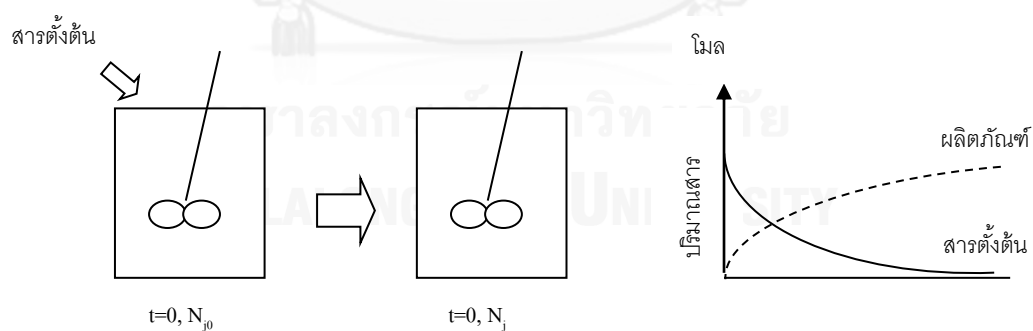
1. สมดุลของปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction equilibrium) เป็นสมดุลของระบบหลังเกิดปฏิกิริยาจะคายพลังงานให้แก่สิ่งแวดล้อม

2. สมดุลของปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction equilibrium) เป็นสมดุลของระบบที่มีการดูดพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาใช้ในปฏิกิริยา

2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มักถูกนำมาใช้เมื่อต้องการผลิตสารในปริมาณที่ไม่มากนัก เช่น ในขั้นตอนการทดสอบเบื้องต้นระหว่างการพัฒนากระบวนการใหม่ การผลิตสารราคาแพง และถูกนำมาใช้ในกระบวนการที่ไม่สามารถด้วยวิธีแบบต่อเนื่องได้ ข้อดีที่สำคัญคือสามารถเพิ่มค่าการแปรผันทางเคมีของสารตั้งต้นได้อย่างง่ายดายคือ เพียงปล่อยให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น และสามารถใช้ได้ปฏิกิริยาระหว่างของเหลว-ของเหลว, ของเหลว-แก๊ส, และของเหลว-ของแข็ง แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานแต่ละครั้งสูง (ค่าแรงงานและค่าดำเนินการ) และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตแต่ละครั้งอาจมีการเปลี่ยนแปลง

หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะคือ การป้อนสารทั้งหมดลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาเริ่มต้น และกวนสารตั้งต้นให้ผสมกันโดยใช้ใบพาย เพื่อให้สารให้มีอุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากันตลอด จากนั้นปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ แล้วจึงนำสารตั้งต้นที่เหลืออยู่และผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆ



รูปที่ 2.1 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

2.4 ระบบหลายปฏิกิริยา (Multiple reactions)

ระบบหลายปฏิกิริยาคือระบบที่มีสมการปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric equation) ตั้งแต่ 2 สมการขึ้นไป มีความหลากหลายและมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แต่สามารถจำแนกประเภทของปฏิกิริยาออกเป็น 4 ประเภทหลักคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขนานกัน (Parallel reactions or Competitive reactions), ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน (Series reactions or Consecutive reactions), ปฏิกิริยาที่ซับซ้อน (Complex reactions), และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างอิสระ (Independent reactions)

เนื่องจากการผลิตพอลิเอทิลีนมัลติคอลไรด์ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ดังแสดงในสมการ (2.1)-(2.2) จึงถือเป็นระบบที่มีหลายปฏิกิริยาโดยจัดอยู่ในกลุ่มประเภทของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน

สิ่งสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับระบบหลายปฏิกิริยา คือ ลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงและเพิ่มการเกิดผลิตภัณฑ์หลัก ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของระบบหลายปฏิกิริยาจึงใช้ ผลได้ (Yield) และค่าการเลือกเกิด (Selectivity) เป็นเกณฑ์

2.4.1. ผลได้ (Yield, Reaction yield)

1. Overall yield คือผลได้โดยรวมของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นปริมาณที่แสดงว่าสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากน้อยเพียงใด สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของ "ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการที่เกิดขึ้นทั้งหมด" เมื่อเทียบกับ "ปริมาณของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาไปทั้งหมด" ภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา

$$\tilde{Y}_D = \frac{N_D}{N_{A0} - N_A} \quad (2.6)$$

เมื่อ \tilde{Y}_D คือ Overall yield

N_D คือ ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ D ที่เกิดขึ้นทั้งหมด

N_{A0} คือ ปริมาณของสารตั้งต้น A ที่เวลาเริ่มต้น

N_A คือ ปริมาณของสารตั้งต้น A ที่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา

2. Percentage yield คือ สัดส่วนของผลได้จริงต่อผลได้ตามทฤษฎี โดยผลได้จริง (Actual yield) แสดงปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา และผลได้ทางทฤษฎี (Theoretical yield) แสดงปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่คำนวณจากปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาที่ดุลแล้ว

$$\text{ร้อยละผลได้} = \frac{\text{ผลได้จริง}}{\text{ผลได้ตามทฤษฎี}} \quad (2.7)$$

2.4.2. ค่าการเลือกเกิด (Selectivity)

ค่าการเลือกเกิดเป็นค่าแสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (Desired product) กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ (Undesired product) สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของ "ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการที่เกิดขึ้นทั้งหมด" เมื่อเทียบกับ "ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นทั้งหมด" ภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา

$$\tilde{S}_{D/U} = \frac{N_D}{N_U} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\tilde{S}_{D/U}$ คือ ค่าการเลือกเกิด

N_D คือ ปริมาณเชิงโมลของสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการที่เกิดขึ้นทั้งหมด

N_U คือ ปริมาณเชิงโมลของสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นทั้งหมด

2.5 การผสมสาร (Mixing)

การผสมหรือการเข้ากันได้ของสารสองชนิดไม่ว่าจะเป็นของเหลว-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว ของเหลว-ก๊าซ ของแข็ง-ของแข็ง ของแข็ง-ก๊าซ การกระจายพลังงานจลน์ของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์จะขึ้นอยู่กับชนิดใบพายที่ใช้ ขนาดของใบพาย และตำแหน่งการจัดวาง รวมไปถึงความเร็วรอบของการหมุน โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทการผสมตามกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีดังต่อไปนี้

1. การผสมของเหลวสองชนิดที่ละลายเข้าด้วยกัน
2. การผสมของแข็งกับของเหลว
3. การลดขนาดและการแพร่กระจายของแข็งในของเหลว
4. การผสมของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน
5. การผสมก๊าซกับของเหลว หรือขบวนการถ่ายเทมวล
6. การถ่ายเทความร้อน

ระบบการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความดันสูงในโรงงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลวที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน การปั่นกวนของเหลวและของแข็งที่ไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกกำหนดด้วยปัจจัยสองประการคือ อัตราการถ่ายเทมวล ณ ตำแหน่งสถานะ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานะ การเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งให้สูงขึ้น จึงทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้ดีขึ้น ทั้งนี้วัตถุประสงค์ของการปั่นกวนของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวคือ

1. เพื่อกระจายกลุ่มอนุภาคของแข็งที่กระจายอยู่ในของเหลว
2. เพื่อกระจายก๊าซในของเหลว ให้อยู่ในรูปของฟองอากาศเล็กๆ
3. ช่วยในการถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น

หากสารผสมมีความหนืดสูงและเกิดลักษณะเป็น Slurry เครื่องมือที่ใช้ในการผสมสารที่มีความหนืดลักษณะพิเศษนี้จึงจำเป็นต้องมีค่าการส่งกำลังต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูง แต่หากเป็นกรณีของไหลความหนืดต่ำโมเมนตัมจะเคลื่อนที่ได้จากการหมุนของส่วนประกอบเครื่องทือ เช่น ใบพาย ดังนั้นจึงควรที่จะทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบของใบพายที่ใช้ในการปั่นกวนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา เนื่องจากความเร็วของใบพายที่ต่างกันจะทำให้การปั่นกวนผสมกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แตกต่างกัน อีกทั้งการใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่แตกต่างกันย่อมนำมาซึ่งผลของการใช้กำลังไฟในการทำปฏิกิริยา

2.6 ใบพาย (Impeller)

ใบพายถือเป็นปัจจัยสำคัญของระบบการปั่นกวนผสมสาร เนื่องจากหากเลือกชนิดใบกวนไม่ตรงตามกระบวนการแล้ว นอกจากสารจะผสมไม่เข้ากันแล้วยังส่งผลถึงการสิ้นเปลืองพลังงานที่เกินความจำเป็น อีกทั้งอาจส่งผลต่อความเสียหายของผลิตภัณฑ์ด้วย ใบพายที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 4 ชนิดคือ

1. Three-blade propeller agitator เป็นใบพายชนิดที่ใช้กันทั่วไป ใบพายชนิดนี้มีความเร็วรอบสูงระหว่าง 400 ถึง 1750 รอบต่อนาที สามารถนำมาใช้งานกับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ
2. Paddle agitators เป็นใบพายที่มีช่วงความเร็วรอบต่ำในช่วง 20 ถึง 200 รอบต่อนาที ขนาดของใบพายประมาณ 60-80 % ของขนาดเครื่องปฏิกรณ์ ใบพายชนิดนี้จะไม่ผลต่อการฟุ้งกระจายของของแข็งในแนวรัศมีและมีผลน้อยมากในแนวตั้ง
3. Turbine agitator เช่น pitched 4-blade turbine at 45° , pitched 6-blade turbine at 45° , และ Rushton Turbine ลักษณะของใบพายชนิดนี้จะเหมาะกับของผสมของแข็งและของเหลว ทั้งในแนวรัศมีและในแนวตั้ง

4. Helical-ribbon agitator ใบพายชนิดนี้เหมาะกับของไหลที่มีความหนืดสูงมากและเป็น การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

มาตรฐานของขนาดใบพาย

ขนาดของใบพายตามมาตรฐานจะเป็นค่าสัดส่วนกับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ [5] ดังแสดงใน ตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 Geometric Proportion for a “ Standard ” Agitation System

$$\frac{D_a}{D_t} = 0.3 \text{ to } 0.5$$

$$\frac{H}{D_t} = 1$$

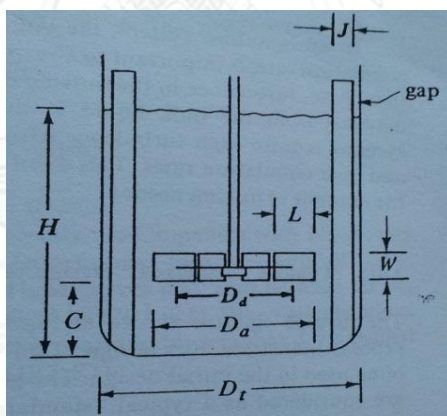
$$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$



รูปที่ 2.2 Dimensions of turbine and tank

(แหล่งที่มา CHRISTIE J; Transport Processes and Unit Operation)

เนื่องจากพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์นั้นมีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลว ดังนั้นในการผสม จึงจำเป็นต้องเลือกใบพายที่เหมาะสมกับลักษณะของของไหลด้วย จากการทดลองของ Rouzbeh Jafari [6] พบว่าในสถานะที่ความเข้มข้นของของแข็งและความเร็วรอบเท่ากันการใช้ใบพายชนิด PBT-D จะให้ผลลัพธ์ในแนวรัศมีน้อยมาก แต่หากพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้พบว่าใบพายชนิด RT ใช้พลังงาน

ในการปั่นกวนมากกว่าใบพายชนิด CBT และ PBT-D ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาการเพิ่มขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จึงต้องคำนึงถึงผลกระทบของระบบของของไหลที่เป็นของแข็งและของเหลว รวมถึงพลังงานที่ใช้ (Power Consumption) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า Power Number เพื่อเป็นทางเลือกในการกำหนดขนาดของเครื่องปั่นกวนได้เหมาะสมเมื่อทำการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ Rouzbeh Jafari [7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณของแข็ง (Solid Concentration) ต่อ Power Number โดยใช้ใบพายชนิด PBT, CBT, และ RT ที่ความเร็วรอบ 600 และ 800 รอบต่อนาที พบว่าที่ความเข้มข้นของของแข็งที่ 30% และ 50% ค่า Power Number ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ใบพายชนิด PBT มีค่าต่างกัน แต่ใบพายชนิด CBT และ RT มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ Power Number แปรผันตรงตามความเร็วรอบ P.S. Keng [8] ได้ทำการศึกษาไว้ว่าใบพัดชนิด RT จะให้ค่า Percentage yield (%) สูงที่สุด

2.7 การเพิ่มขนาดขยาย (Scale up)

James Y. Oldshue [9] ได้กล่าวว่าการศึกษาผลของการปั่นกวนสาร (mixing effects) ในระดับห้องปฏิบัติการมีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ระดับเพิ่มขนาดขยาย ระบบที่สารมีความหนืดสูงการเพิ่มขนาดขยายเครื่องปฏิกรณ์อาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ โดยปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมแบบปั่นกวนคือ การกระจายพลังงานจลน์ของสาร ซึ่งขึ้นกับชนิด ขนาด ตำแหน่ง และความเร็วรอบของใบพาย การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ส่วนใหญ่จะอ้างอิงตาม Standard Agitation System ที่บ่งบอกสัดส่วนของใบพายต่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ แต่สำหรับความเร็วรอบในการหมุนของใบพายจะขึ้นกับค่าความหนืดของสารในระบบ ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงปริมาณการใช้พลังงาน

Attilio Bisio and Robert L. Kabel [10] กล่าวว่าวัตถุประสงค์สำคัญของการทำ Scale up เกิดขึ้นจากความต้องการที่จะนำผลความสำเร็จจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการมาพัฒนาเพิ่ม

อัตราการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้นเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ และเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลสำเร็จอย่างความปลอดภัยจึงจำเป็นต้องเริ่มต้นจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการก่อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเพิ่มขยายขนาด จากนั้นจึงทำการทดลองในระดับต้นหรือการสร้างโรงงานต้นแบบ (Pilot plant) เพื่อเก็บข้อมูลไว้ใช้ประกอบการออกแบบและกำหนดทิศทางการดำเนินงานให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและมีอัตราการผลิตตามความต้องการของโรงงาน สำหรับสัดส่วนในการทำ Scale up ratio นั้นต้องพิจารณาถึงขนาดของอุตสาหกรรมและข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วย โดยค่า Scale up ratio ในระดับห้องปฏิบัติการ-ระดับต้น และระดับต้น-ระดับอุตสาหกรรม จะมีค่าไม่เท่ากันและแตกต่างกันตามชนิดของระบบดังแสดงในตาราง 2.3

ในกระบวนการผลิตจะมีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องมากมายหลายตัว วิธีคิดหนึ่งที่นิยมใช้ในระดับเพิ่มขยายขนาดคือ Dimensionless number เพราะเป็นวิธีที่ช่วยลดปัญหาการมีหลายตัวแปรของไป ปัจจัยสำคัญที่ใช้พิจารณาเพิ่มขยายขนาดจากระบบต้นแบบได้แก่

1. ความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต (Geometric similarity)

ระบบต้นแบบและระบบออกแบบจะต้องมีความคล้ายคลึงทางเรขาคณิต นั่นคือ มิติด้านความยาวของด้านทุกด้านของระบบออกแบบต้องสัมพันธ์กับระบบต้นแบบโดยมีสัดส่วนเป็นค่าเดียวกันทั้งหมด

$$\left(\frac{D}{T}\right)_M = \left(\frac{D}{T}\right)_F \quad \text{และ} \quad \left(\frac{H}{T}\right)_M = \left(\frac{H}{T}\right)_F \quad (2.9)$$

2. ความคล้ายคลึงเชิงจลนศาสตร์ (Kinematic similarity)

รูปแบบการไหล (Flow pattern) ของระบบต้นแบบและระบบออกแบบที่มีความคล้ายคลึงทางจลนศาสตร์จะมีความเร็วที่จุดที่สอดคล้องของทั้งสองระบบอยู่ในทิศทางเดียวกัน และมีขนาด

อัตราเร็วเป็นสัดส่วนที่เป็นค่าคงที่ การที่การไหลสองการไหลมีความคล้ายคลึงเชิงจลนศาสตร์เกิดขึ้นนั้นจะต้องมีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตและมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่จำเป็นของของไหลเกิดขึ้น

3. ความคล้ายคลึงเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

การมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัตเกิดขึ้นเมื่อมีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต ความคล้ายคลึงเชิงจลนศาสตร์ และมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่เหมาะสม เมื่อการไหลสองการไหลมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัตเกิดขึ้นจะทำให้แรงชนิดเดียวกันของระบบต้นแบบและระบบออกแบบมีทิศทางเหมือนกันและมีขนาดเป็นสัดส่วนต่อกันด้วยค่าคงที่

ตารางที่ 2.3 Typical scale up ratios (แหล่งที่มา Robert L. Kabel; Scaleup of Chemical processer)

System	Scale of Operation (kg/hr)		Scale up ratio	
	laboratory	pilot plant	Laboratory to	Pilot Plant to
substantially gaseous (ammonia, methanol)	0.01-0.10	10-100	500-1000	200-1500
gaseous reactant, liquid or solid products	0.01-0.20	10-100	200-500	100-500
liquid and gaseous reactants, liquid products	0.01-0.20	1-30	100-500	100-500
liquid reactants, solid and viscous liquid products (polymerization, agricultural chemicals)	0.005-0.20	1-20	20-200	20-250
solid reactants, solid products (phosphoric acid, cement, ore)	0.01-0.10	10-200	10-100	10-200

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะส่วนใหญ่จะอาศัยความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity) ในการออกแบบ รูปร่างของเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบและเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบจะมีลักษณะเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปค่า Scale up factor หรือ Scale up ratio ที่บ่งชี้สัดส่วนขนาดของตัวแปรระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองจะมีค่าคงที่ ยกเว้นบางตัวแปรที่มีค่าแตกต่างออกไป

$$\frac{(D_r)_{full\ scale}}{(D_r)_{pilot\ scale}} = \frac{(D_I)_{full\ scale}}{(D_I)_{pilot\ scale}} = \frac{H_{full\ scale}}{H_{pilot\ scale}} = S^{1/3} \quad (2.10)$$

$$\frac{A_{full\ scale}}{A_{pilot\ scale}} = S^{2/3} \quad (2.11)$$

เมื่อ A	คือ ขนาดพื้นที่ผิว
D_r	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์
D_I	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพาย
H	คือ ความสูงของระดับของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์
S	คือ ค่าสัดส่วนของตัวแปร (Scaleup factor)

ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตนั้น กำลังการผลิตหรือปริมาณงานที่กระทำในช่วงเวลาหนึ่งๆ สามารถคำนวณหา throughput scaleup factor ได้จากสมการ

$$\text{Scale up ratio} = \frac{\text{commercial production rate}}{\text{pilot unit production rate}} \quad (2.12)$$

$$S_{throughput} = \frac{\text{mass flow through full – scale unit}}{\text{mass flow through pilot unit}} \quad (2.13)$$

$$= \frac{(\rho Q)_{full\ scale}}{(\rho Q)_{pilot\ scale}}$$

หากความหนาแน่นของสารละลายคงที่

$$S_{throughput} = \frac{(Q)_{full\ scale}}{(Q)_{pilot\ scale}} \quad (\text{Costant Density}) \quad (2.14)$$

สามารถคำนวณหาค่า inventory scaleup factor ได้ดังนี้

$$S_{inventory} = \frac{\text{mass inventory in full–scale unit}}{\text{mass finventory in pilot unit}} = \quad (2.15)$$

$$\frac{(\hat{\rho}V)_{full\ scale}}{(\rho^{\wedge}V)_{pilot\ scale}}$$

สำหรับการเพิ่มขยายขนาดให้ประสบความสำเร็จนั้น ค่า Volume-average density ($\hat{\rho}$) ต้องมีค่าเท่ากัน แม้ว่าจะทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดแตกต่างกันก็ตาม ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$S_{Volume} = \frac{V_{full\ scale}}{V_{pilot\ scale}} \quad (2.16)$$

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งกำหนดให้ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาเฉลี่ย (mean resident time (\bar{t})) คงที่

$$S_{throughput} = S_{inventory} = S_{Volume} = S \quad (2.17)$$

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t_{mix} กับค่า Reynolds number และ Froude number ในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าการปั่นกววนที่สูงขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนล (High Reynolds number) ที่สูงขึ้น

$$(N_I t_{mix})_{large} = \text{const} = (N_I t_{mix})_{small} \quad (2.18)$$

เมื่อ N_I คือ ความเร็วในการหมุนของใบพาย
 t_{mix} คือ เวลาที่ใช้ในการปั่นกววน

แต่หากกำหนดให้ความเร็วรอบในการหมุนหรือปั่นกววนของใบพาย (Agitator speed) และ t_{mix} คงที่ ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (power requirements) จะเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้นของเครื่องปฏิกรณ์

$$\left(\frac{1.523 \times 10^{13} P_I}{\rho N_I^3 D_I^5} \right)_{large} = \left(\frac{1.523 \times 10^{13} P_I}{\rho N_I^3 D_I^5} \right)_{small} = P_o \quad (2.19)$$

เมื่อ P_I คือ ค่าพลังงานที่ใช้ของใบพาย

ρ คือ ความหนาแน่นของสาร

D_I คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดใบพาย

P_o คือ ค่า Power number

2.8 ขั้นตอนการเพิ่มขยายขนาดในการผสม (Scale up procedure in mixing)

การเพิ่มขยายขนาดให้ได้ผลสำเร็จนั้นจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่เพียงพอเพื่อใช้ประกอบการออกแบบให้เหมาะสมและตรงตามความต้องการ

1. Scaling objectives ระบุสิ่งที่ต้องการจากการเพิ่มขยายขนาดให้ชัดเจน โดยพิจารณาความคล้ายคลึงของกระบวนการและมองหาลักษณะที่สำคัญ เช่น อัตราการถ่ายเทมวลและพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของระบบต้นแบบเมื่อเทียบกับระบบที่ต้องการ

2. Controlling mechanisms การศึกษากลไกการควบคุมเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน ในการพิจารณาออกแบบเราต้องอาศัยข้อมูลหลายด้าน เช่น สิ่งที่ต้องการผสมคืออะไร กลไกการผสมสารในระบบเป็นอย่างไร กระบวนการเกิดขึ้นที่ไหน ระดับพลังงานที่ใช้และลักษณะเชิงเรขาคณิตของระบบต้นแบบเป็นอย่างไร และขนาดของระบบที่ต้องการออกแบบเป็นเท่าไร เป็นต้น ทั้งนี้ลักษณะเชิงเรขาคณิตของระบบที่ออกแบบสามารถพิจารณาได้จาก Scale up factor หรือ Scale up ratio

3. Correlatons and data of mixing การเพิ่มขยายขนาดนั้นลักษณะของรูปร่างสามารถพิจารณาได้จากความคล้ายคลึงกันทางเรขาคณิต ส่วนสภาวะการดำเนินงานสามารถพิจารณาได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลและความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยทั่วไปปัจจัยที่แสดงความสัมพันธ์ของระบบผสมสารในการเพิ่มขยายขนาดนั้นจะอยู่ในรูปของ Dimensionless Group คือไม่มีหน่วยของปัจจัยมาเกี่ยวข้อง ค่าความสัมพันธ์ต่างๆจะอาศัยผลจากการทดลองมาช่วยในการวิเคราะห์ เช่น ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานใน"ระบบออกแบบหรือระบบเพิ่มขยายขนาด"เมื่อเทียบ"ระบบต้นแบบ"จะใช้ค่า Power number และ Reynolds number เป็นตัวแปร ส่วนความสัมพันธ์เกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการปั่นกววนจะใช้ Mixing time factor และ Reynolds number เป็นตัวแปร

4. Appropriate geometry การออกแบบระดับเพิ่มขยายขนาดมีความเหมาะสมหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความเหมาะสม ตรงตามความต้องการ และคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ หากยังไม่เหมาะสมให้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะเชิงเรขาคณิตใหม่เพื่อให้ได้ผลสำเร็จที่ดียิ่งขึ้น

2.9 หลักเกณฑ์การเพิ่มขยายขนาด (Criteria for scale up)

จากการที่ระบบเกี่ยวข้องกับ Dimensionless Group มากกว่า 1 กลุ่ม โดยทั่วไปการออกแบบเพิ่มขยายขนาดจึงอาศัยหลักเกณฑ์เพื่อการพัฒนาดังต่อไปนี้

- ค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่าคงที่ (constant P/V)
- ค่าความเร็วปลายของใบพายจะมีค่าคงที่ (constant impeller tip speed, πND)
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรจะมีค่าคงที่ (constant volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$)
- ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของใบพายจะมีค่าคงที่ (constant impeller Reynolds No.)
- ค่าเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนสารจะมีค่าคงที่ (constant mixing time, t_{mix} or circulation time, t_{circ})
- การเพิ่มขยายขนาดจะอาศัยพื้นฐานความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตควบคู่กับหลักเกณฑ์ข้างต้นเป็นอย่างน้อย (common to scale-up in the basis of geometric similarity and at least one of the above)

ทั้งนี้ในการออกแบบเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงตามหลักเกณฑ์ 3 ประการคือ ค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่าคงที่, ค่าความเร็วปลายของใบพายจะมีค่าคงที่, และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของใบพายจะมีค่าคงที่ เนื่องจากเป็นค่าที่นิยมใช้เหมาะกับระบบที่ไวต่อแรงเฉือน (เมื่ออัตราเฉือนสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนของใบพาย)

2.9.1 ค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่าคงที่ (constant P/V)

เป็นหลักเกณฑ์ที่ส่วนใหญ่นิยมใช้ การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของใบพายและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถทำได้ดังนี้

$$\left(\frac{P}{V}\right)_M = \left(\frac{P}{V}\right)_F \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\left(\frac{V_M}{V_F}\right) = \left(\frac{D_M}{D_F}\right) = S^{1/3} \quad (2.21)$$

จะได้ว่า

$$\left(\frac{P}{D^3}\right)_M = \left(\frac{P}{D^3}\right)_F \quad (2.22)$$

หากของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองขนาดเป็นชนิดเดียวกัน ($\rho_M = \rho_F$)

เมื่อแทนค่าสมการ (2.22) ในสมการ (2.19) จะได้ว่า

$$\left(\frac{N_F}{N_M}\right)^3 = \left(\frac{D_M}{D_F}\right)^2 = P_0 \quad (2.23)$$

$$N_F = N_M \left(\frac{D_M}{D_F}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.24)$$

2.9.2 ค่าความเร็วปลายของใบพายจะมีค่าคงที่ (constant impeller tip speed, πND)

หลักเกณฑ์นี้เหมาะสำหรับระบบที่ไวต่อแรงเฉือน ซึ่งอัตราเฉือนจะสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนของใบพาย การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานที่ใช้และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้ดังนี้

$$(\pi ND)_F = (\pi ND)_M \quad (2.25)$$

หากของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองขนาดเป็นชนิดเดียวกัน ($\rho_M = \rho_F$)

เมื่อแทนค่าสมการ (2.22) ในสมการ (2.25) จะได้ว่า

$$\left(\frac{P}{D^2}\right)_F = \left(\frac{P}{D^2}\right)_M = P_0 \quad (2.26)$$

$$P_F = P_M \left(\frac{D_F}{D_M}\right)^2 \quad (2.27)$$

2.9.3 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของใบพายจะมีค่าคงที่ (constant impeller Reynolds Number)

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เป็นเลขดัชนีซึ่งบอกลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพลังงานที่ใช้ในการหมุนของใบพาย การพิจารณาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการหมุนของใบพายและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองขนาดเป็นชนิดเดียวกันสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{Re_F}{Re_M} &= \left(\frac{10.754ND^2\rho}{\mu} \right)_F \left(\frac{\mu}{10.754ND^2\rho} \right)_M \\ &= \left(\frac{N_F}{N_M} \right) \left(\frac{D_F}{D_M} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$N_F = N_M \left(\frac{D_M}{D_F} \right)^2 \quad (2.29)$$

2.9.4 ค่าฟรอยด์นัมเบอร์ของใบพายจะมีค่าคงที่ (constant impeller Froude Number)

ฟรอยด์นัมเบอร์เป็นเลขดัชนีซึ่งบอกลักษณะอัตราส่วนของความเร็วยกกำลังสองของไหลต่อแรงโน้มถ่วง ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วยกกำลังสองที่ใช้ในการหมุนของใบพาย การพิจารณาความสัมพันธ์ของความเร็วยกกำลังสองในการหมุนของใบพายและขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อกำหนดให้แรงโน้มถ่วงของไหลคงที่ ในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองขนาด สามารถทำได้ดังนี้

$$F_r = \frac{DN^2}{g} \quad (2.30)$$

$$1 = \frac{D_F N_F^2}{D_M N_M^2} \quad (2.31)$$

$$N_F = N_M \left(\frac{D_M}{D_F} \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ รวมทั้งงานวิจัยซึ่งทำการศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ ซึ่งนำไปสู่การเลือกสถานะที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้ Yun-Hwei Shen [11] พบว่าในการสังเคราะห์พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ การปั่นกวนที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ปฏิกริยาเกิดได้เร็วที่สุดและให้ผลผลิตภาพที่ดีกว่าที่ความเร็ว 600,300 และ 150 รอบต่อนาทีตามลำดับ Steven Wang[12] ได้ศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบและชนิดของใบพายที่มีต่อปริมาณของแข็ง พบว่าหากพิจารณาที่ปริมาณของแข็งเท่ากัน ใบพายชนิด A310 ต้องใช้ความเร็วรอบในการหมุนมากกว่าใบพายชนิด Pitched Bladed Turbine (PBT) และ Ruston turbine (RT) ตามลำดับ Angst และ Kraume[13] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณของแข็งที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองกำลังทางไฟฟ้า (Power Consumption) พบว่าการหมุนของใบพายชนิด Pitched Bladed Turbine (PBT) ในสารผสมที่มีค่า solid load 20%w/w ที่ความเร็วรอบต่ำจะใช้พลังงานในการปั่นกวนต่ำกว่าการหมุนที่ความเร็วรอบสูง

Rouzbeh และคณะ (2012)[14] ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนใบพายต่อเครื่องปฏิกรณ์ (C/T) ที่มีต่อค่าปริมาณของแข็ง (Solid concentration) และอัตราการสิ้นเปลืองกำลังทางไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบใบพาย 3 ชนิดได้แก่ Pitched Bladed Turbine (PBT), Ruston turbine(RT), และ Concave Blade Turbine (CBT) ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อปรับค่า C/T ที่ 0.33 และ Solid concentration ที่ 30%w/w และ 50%w/w พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนของใบพายชนิด Ruston Turbine (RT) จะมากกว่า Concave Blade Turbine(CBT) และ Pitched Bladed Turbine (PBT) ตามลำดับ โดยมีข้อสังเกตว่า Solid concentration ไม่มีอิทธิพลในแนวรัศมี

E.Bruce Nauman [15] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของการปั่นกวนในเครื่องปฏิกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะปริมาตรคงที่ พบว่าความเร็วรอบไม่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าและการถ่ายเทมวล โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนยังคงมีอยู่

Zhao Changwei [3] ได้ศึกษาการเตรียมสารละลายพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร จากอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.0 โมล/ลิตร โดยทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบ แก้วขนาด 1,000 มิลลิลิตร และต่อชุดรีฟลักซ์ โดยในขั้นแรกจะทำการปั่นกวนอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยๆเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.6 โมล/ ลิตร ลงไปจนกระทั่งได้อัตราส่วนของค่าเบสซิวิตี้ตามที่ต้องการในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จากนั้นปั่น กวนต่อไปและรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 65 องศาเซลเซียส

Zhonglian Yang[4] ใช้วิธีการผสมระหว่างของแข็งและของแข็งในการเตรียมสารพอลิอะลูมิเนียม คลอไรด์ โดยใช้ขวดแก้วก้นกลมที่มีน้ำอยู่ 100 มิลลิลิตร ต่อกับแก้วสามหัวและใช้แท่งแม่เหล็กในการ ปั่นกวน ให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยๆเติมของแข็งผสมระหว่าง อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ลงไป ปั่นกวนให้ทั่วเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นให้รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 85 องศาเซลเซียส และปั่นกวนต่อไปอีก 60 นาที จะได้ สารละลาย 0.85 โมล/ลิตร ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

Fengting Li [1] ได้เตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้โบไซด์ที่มีอลูมินาร้อยละ 30-40 ทำปฏิกิริยา กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 20 ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส และปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้สารละลายพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่มีค่าเบสซิ ซิตี้ต่ำ การเพิ่มค่าเบสซิวิตี้ให้ได้มากกว่าร้อยละ 90 ทำโดยการเติมแคลเซียมอะลูมิเนียมเนทลงในเครื่อง ปฏิกรณ์ ปั่นกวน 2-4 ชั่วโมง จากนั้นรอตตะกอนอีก 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการกรอง สารพอลิ อะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ได้จะเป็นของเหลวที่มีเปอร์เซ็นต์ของ Al_2O_3 เท่ากับ 13.7 และเบสซิวิตี้ ที่ร้อยละ 92.9

K.W.Pi Jia [2] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้สารละลาย 0.22 โมล/ลิตร ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบอิเล็กโทรไลซิสต์ (Electrolysis Reactor) ที่ มี 0.3 โมล/ลิตร ของโซเดียมคลอไรด์อยู่ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนขั้วแคโทดและแอโนด

Amer [16] ได้ศึกษาการแพร่กระจายของน้ำมันซิลิโคนในสารละลาย Water Surfactant, ความหนืดของน้ำมัน, การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมัน, และผลของความเร็วในการหมุนของใบ

พายสองชนิดซึ่งมีแรงเฉือนสูงคือ Swtooth และ PBT ที่ความเร็วรอบ 1, 100, 2000, 3000, และ 4000 รอบต่อนาที การลดแรงตึงผิวและความหนืดของน้ำมันสามารถอธิบายได้โดยการปรับความเร็วรอบของใบพายชนิด Swtooth และ PBT พบว่าใบพายทั้งสองชนิดเป็นใบพายที่มีแรงเฉือนสูง และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่ใบพายชนิด Swtooth จะใช้พลังงานที่น้อยกว่าและส่งผลให้ขนาดของน้ำมันเล็กกว่า เนื่องจากใบพายชนิดนี้มีผิวสัมผัสมาก การปรับความเร็วรอบสูงจึงส่งผลต่อขนาดอนุภาคของน้ำมัน

Rajendra [7] ได้ทำการศึกษาความเร็วรอบวิกฤต (Critical speed) โดยปรับ D/T ที่ 0.083-0.65F และใช้ glass bead ผสมกับน้ำเพื่อดูการฟุ้งกระจาย การปรับ C/T และ D/T ให้ของใบพายชนิด Pitched Blade Turbines ชนิด 4 และ 6 Blade พบว่าใบพายทั้งสองให้ค่า C/T แบ่งเป็น 3 ช่วง แต่ที่นำมาศึกษาคือ $CT < 0.1$, $0.1 < CT > 0.35$ และได้ $D/T = 0.35$

D.CHAPPLE [17] ได้ศึกษาผลของขนาดใบพายชนิด PBT และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อ Power Number พบว่าใบพายชนิด PBT ส่งผลกระทบต่อค่า power number 15% แต่ความหนาของใบพายไม่มีผลต่อค่า power number เมื่อให้ $Re > 2 \times 10^4$ คงที่แล้วคำนวณ $N_{pft} = 1.5-0.7 (D/T)$ for $(0.25 < D/T > 0.5)$ ที่ $C=T/3$

Keng [8] ได้ทำการศึกษาผลของชนิดของใบพัดและความเร็วรอบการปั่นกวนที่ 50, 150, 250, 350, และ 450 รอบต่อนาที ที่มีต่อการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าค่าการเปลี่ยนรูป (Conversion) จะแปรผันตรงกับความเร็วนวนที่เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากการกระจายตัวของสารที่มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และในการเพิ่มปริมาณสารจาก 2 ลิตรเป็น 75 ลิตร ต้องมีการเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และปริมาณใบพายเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

Luciano[18] ได้ทำการประเมินผลของการกวนเมื่อเทียบกับชนิดของใบพายในเครื่องปฏิกรณ์แบบ ASBR และแบบ AnSBBR ในการศึกษาใช้ใบพาย 3 ชนิดคือ Flat -blade turbine impeller 45° , inclined - blade turbine impeller, และ helix impeller ทำการทดลองโดยควบคุมอัตราการหมุนของใบพายที่ 40 และ 80 รอบต่อนาที สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ ASBR ทำ

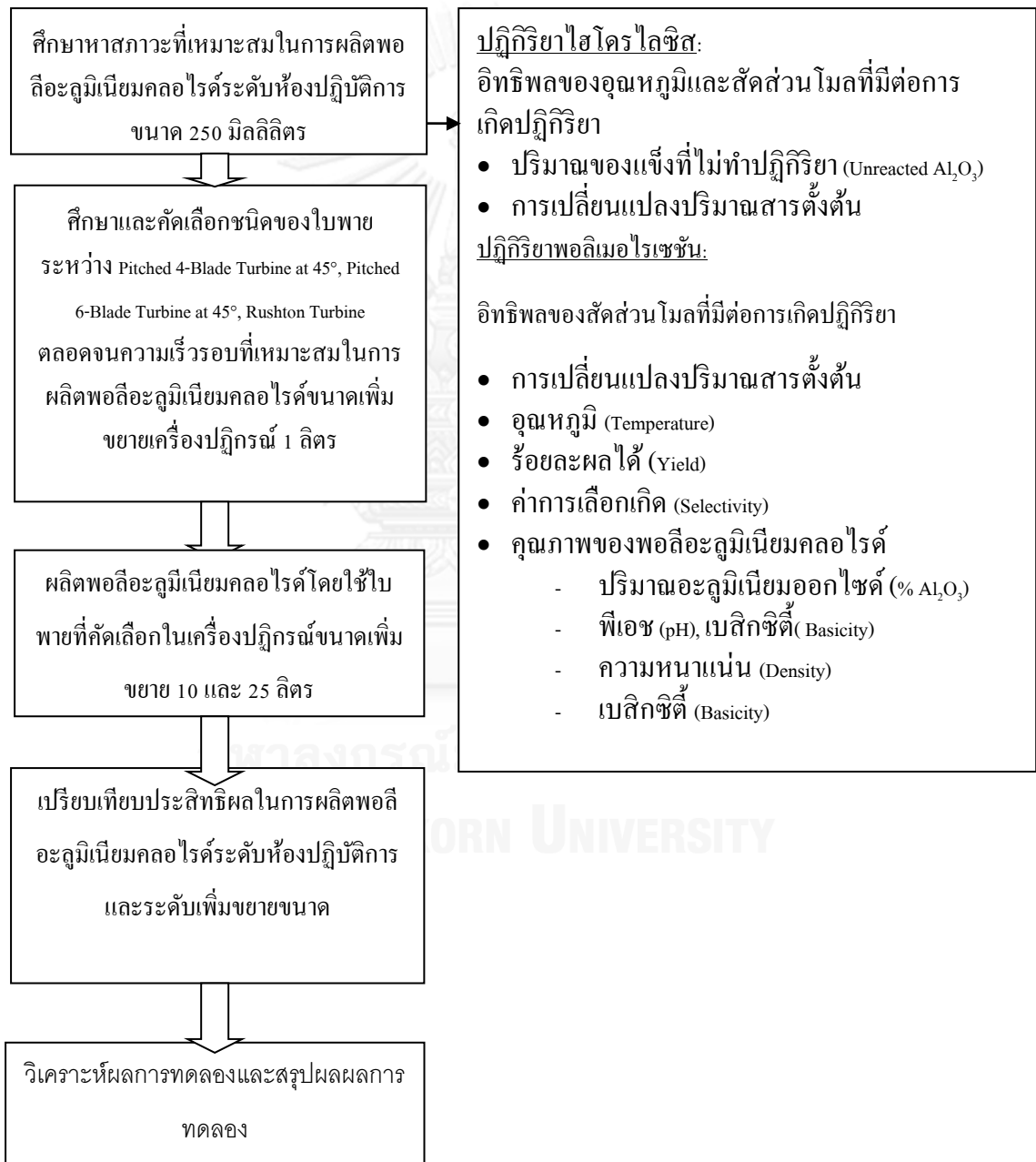
การทดลองเพิ่มเติมด้วย agitation Flat –blade turbine impeller 45 ° ที่ 20 รอบต่อนาที และแบบ AnSBBR ทำการทดลองเพิ่มเติมด้วย helix impeller ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า การใช้ใบพายต่างชนิดกันส่งผลต่ออัตราการใช้สารตั้งต้นแตกต่างกัน การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการหมุนจากเดิม 40 รอบต่อนาที เป็น 80 รอบต่อนาที ใน AnSBBR จะช่วยเพิ่มอัตราการใช้สารตั้งต้น แต่ใน ASBR จะทำให้ระบบไม่เสถียร การพิจารณาระบบใน AnSBBR พบว่าปริมาณของแข็งที่สูงจะส่งผลให้การเคลื่อนตัวของสารตั้งต้นสูงโดยมีพลังงานจลน์คงที่ และอัตราการเกิดสถานะต่างจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ใบพายชนิด helix impeller ที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที นอกจากนี้ยังพบว่า ใบพายชนิด Flat –blade turbine impeller ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน ASBR แต่การใช้ draft tube ใน AnSBBR นั้นไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์มากนัก นอกจากนี้อัตราการใช้พลังงานที่ศึกษาในระดับนำร่องนี้ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราการส่งถ่ายพลังงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเพิ่มอัตราการส่งผ่านมวลซึ่งจะต้องมีการศึกษาในเชิงเทคนิคและพาณิชยกรรม

บทที่ 3

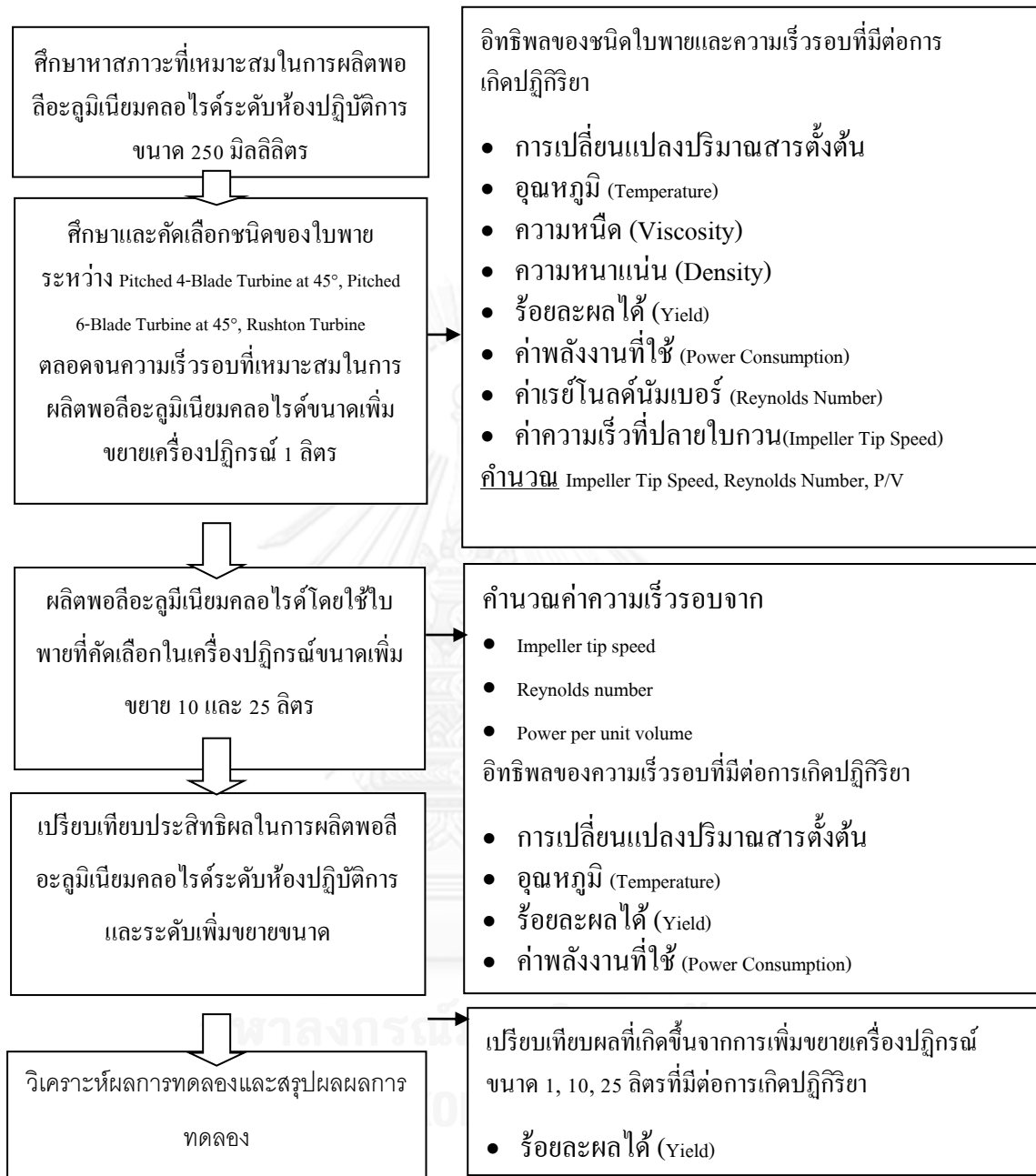
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยทั้งโครงการแสดงโดยสรุปผังแผนผังในรูปที่ 3.1



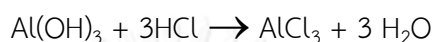
รูปที่ 3. 1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย



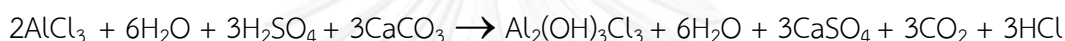
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

3.2 วิธีการทดลอง

กระบวนการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน สามารถแบ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ปฏิกิริยาที่ 1 (ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส):



ปฏิกิริยาที่ 2 (กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน):



3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลมีหลายชนิดดังแสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ชื่อสาร	ผู้ผลิต/ผู้ขาย	เกรด/ความบริสุทธิ์
Aluminium Hydroxide	Suksri Chem	99% / industrial
Hydrochloric Acid	AGC	37% / industrial
Sulfuric Acid	Suksri Chem	98% / industrial
Calcium Carbonate	Suksri Chem	industrial

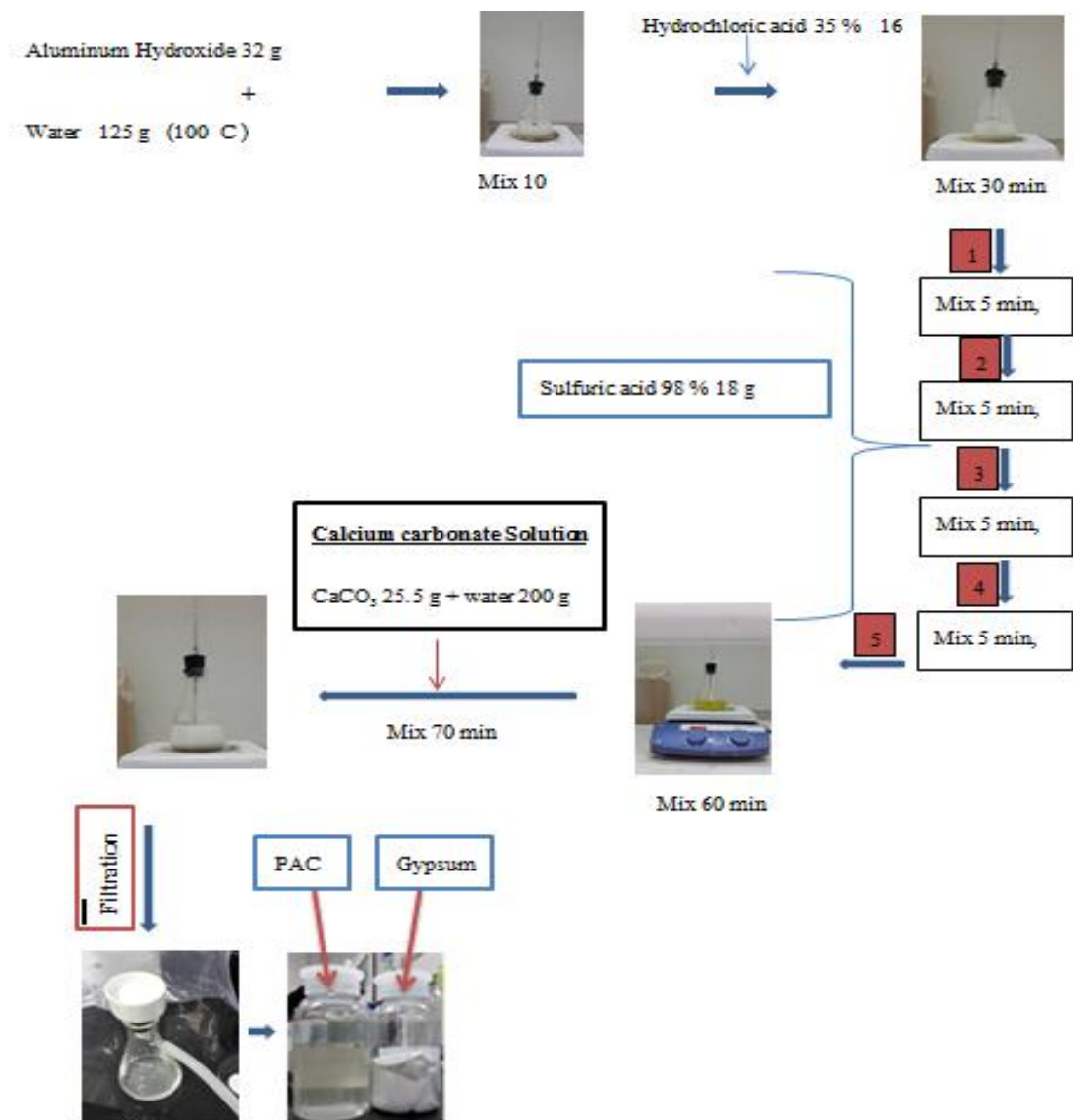
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- ใบพัดสแตนเลส 304 เคลือบพอลิเอทิลีน ชนิด pitched 4-blade turbine at 45°
- ใบพัดสแตนเลส 304 เคลือบพอลิเอทิลีน ชนิด pitched 6-blade turbine at 45°
- ใบพัดสแตนเลส 304 เคลือบพอลิเอทิลีน ชนิด Rushton Turbine
- เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาดบรรจุ 1, 10 และ 25 ลิตร
- เครื่องผสม (mixer) ยี่ห้อ IKA รุ่น IP20
- เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ยี่ห้อ Brookfield Viscometer , Model LV DV-II- Pro
- เครื่องกววนสารละลาย (Stirrer) ยี่ห้อ IKA

- มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)
- อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.2.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร

การผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการในแต่ละการทดลองมีวิธีการเตรียมที่เหมือนกันแต่มีสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน นั่นคือสัดส่วนโมลของปริมาณสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 โดยวิธีการเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนตามการเกิดปฏิกิริยาคือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ขั้นตอนแรกคือการเตรียมสารในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำได้โดยการละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่น ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกและปั่นกวนต่อไปอีก 30 นาที จนได้สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ ขั้นตอนถัดไปคือการเตรียมสารในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำได้โดยการเติมกรดซัลฟูริกลงในสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยแบ่งเติมทุกๆ 5 นาที ในนาทีที่ 35, 40, 45, และ 50 แล้วทำการปั่นกวนจนครบ 60 นาที จึงเติมสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากการละลายแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำกลั่น จากนั้นทำการปั่นกวนต่อไปอีก 70 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์สองวัฏภาคคือ วัฏภาคของเหลวได้แก่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และวัฏภาคของแข็งได้แก่แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้ด้วยกระบวนการกรองดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2กระบวนการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 250 มิลลิลิตร

(แหล่งที่มา : Clear Chemical Laboratory)

ตารางที่ 3. 2 องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (หน่วย: กรัม)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	สัดส่วนโมล $\text{Al}(\text{OH})_3 : \text{HCl}$					
	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:9
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, $\text{Al}(\text{OH})_3$	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
กรดไฮโดรคลอริก, HCl	11.07	16.61	22.15	27.68	33.22	49.89
น้ำกลั่น, H_2O	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	สัดส่วนโมล $\text{AlCl}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$			
	1:1.5	1:2.0	1:2.5	1:3.0
กรดซัลฟูริก, H_2SO_4	60.01	80.00	100.01	120.62
แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO_3	60.00	60.00	60.00	60.00
น้ำกลั่น, H_2O	125.00	125.00	125.00	125.00

ตารางที่ 3. 3 สภาวะการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

สภาวะของการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27, 80, 90, 100, 110, 120
สัดส่วนโดยโมลของ $\text{Al}(\text{OH})_3 : \text{HCl}$	1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:9
สัดส่วนโดยโมลของ $\text{AlCl}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$	1:1.5, 1:2.0, 1:2.5, 1:3.0
ขนาดของใบพายต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์	$\text{Da}/\text{Dt} = 0.3$, $\text{H}/\text{Dt} = 1$, $\text{C}/\text{Dt} = 1/3$ $\text{W}/\text{Da} = 1/5$, $\text{Dd}/\text{Da} = 2/3$, $\text{L}/\text{Da} = 1/4$

ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับห้องปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นข้อมูลการออกแบบในระดับขยาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนตามการเกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนแรกคือการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโมล $\text{Al}(\text{OH})_3:\text{HCl}$ และอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา สิ่งที่น่าสนใจมีดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ขั้นตอนที่ 1 บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทดสอบโดยการเก็บกลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อตัวอย่างต่อครั้ง ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที และทำการวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการไทเทรต

ข. ปริมาณของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา บ่งบอกถึงปริมาณสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่คงเหลือเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Solid} = \frac{A - B}{V} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของกระตาศกรองหลังกรอง (กรัม)
 B คือ น้ำหนักของกระตาศกรองก่อนกรอง (กรัม)
 V คือ ปริมาณตัวอย่าง (กรัม)

จากนั้นขั้นตอนที่ 2 ทำการหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยอ้างอิงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโมล $\text{AlCl}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจมีดังนี้

ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ขั้นตอนที่ 2 บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ กรดซัลฟูริก และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทดสอบโดยการเก็บกลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อตัวอย่างต่อครั้ง ที่เวลา 30, 35, 40, 45, 50, 55, และ 60 นาที และทำการวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการไทเทรต

ง. อุณหภูมิ บ่งบอกถึงปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบ ทดสอบโดยการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์

จ. ร้อยละผลได้ บ่งบอกถึงปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณที่คาดว่าจะเกิดตามทฤษฎี สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{Initial weight of product}}{\text{Initial weight of raw material}} \times 100 \quad (3.2)$$

ฉ. ค่าการเลือกเกิด บ่งบอกถึงอัตราส่วนของสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อสารแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) สามารถคำนวณได้จาก

$$S_{D/U} = \frac{\text{mole of Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3}{\text{mole of CaSO}_4} \quad (3.3)$$

ช. คุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ บ่งบอกถึงคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการนำไปใช้

- ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ สามารถคำนวณตามมาตรฐาน TIS-2150-2546 ได้จาก

$$\%Al_2O_3 = \left[\frac{1.8895 \times (V_a - V_0)f}{M_0 \times 20} \times 100 \right] - [M_1 \times 0.9129 \times 10^{-4}] \quad (3.4)$$

เมื่อ	V_0	คือ ปริมาตรของสารละลายสังกะสีที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง (ลบ.ซม.)
	V_a	คือ ปริมาตรของสารละลายสังกะสีที่ใช้ไทเทรต (ลบ.ซม.)
	M_1	คือ ปริมาณเหล็ก (มก./กก.)
	M_0	คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
	f	คือ มวลของอะลูมิเนียมที่สมมูลกับสารละลายสังกะสี 1 ลบ.ซม. (กรัม)

- ค่าพีเอช ทดสอบโดยการวัดด้วยพีเอชมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546
- ความหนาแน่น ทดสอบโดยการวัดด้วยไฮโดรมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546
- เบสิกซิตี สามารถคำนวณได้จาก

$$\%Basicity = \frac{(V_0 - V_6)f' \times 0.008504}{\frac{M_0 \times C_1 \times 0.5293}{8.994 \times 100}} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	V_0	คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตกับแบลงก์ (ลบ.ซม.)
	V_6	คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง(ลบ.ซม.)
	f	คือ แฟกเตอร์ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
	0.008504	คือ มวล (กรัม) ของหมู่ไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
	17	คือ กรัมสมมูลของหมู่ไฮดรอกซิล
	M_0	คือ มวลของตัวอย่าง (กรัม)
	C_1	คือ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	0.5293	คือ ค่าที่เปลี่ยนอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นอะลูมิเนียม
	8.994	กรัมสมมูลของอะลูมิเนียม

3.2.3 การศึกษาและคัดเลือกชนิดของใบพายที่เหมาะสมระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, และ Rushton Turbine ตลอดจนความเร็วรอบในการผลิตพอลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร

การเตรียมพอลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 และเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาจากผลการทดลองข้างต้น โดยปริมาณของสารและสภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารตั้งต้นประกอบด้วยส่วนของแข็งและของเหลว ดังนั้นใบพายชนิด Pitched 4-blade turbine at 45°

Pitched 6-blade turbine at 45° , และ Rushton Turbine ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จึงถูกนำมาใช้ใน งานวิจัยเพราะมีความเหมาะสมในการใช้ผสมสารที่มีสองวัฏภาคทั้งในแนวรัศมีและแนวตั้ง

การเลือกชนิดของใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมถือเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครื่อง ปฏิกรณ์แบบปั่นกววนเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษา ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามชนิดของใบพายได้แก่ Pitched 4-blade turbine at 45° , Pitched 6- blade turbine at 45° , และ Rushton Turbine และแต่ละชนิดของใบพายที่ทำการทดลองจะมี สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน คือ 100, 200, 300, 600, 1200, และ 1800 รอบต่อ นาที ตามลำดับ สิ่งที่น่าสนใจในการคัดเลือกชนิดใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการ ผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ของสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ ทดสอบโดยการเก็บกลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง ต่อครั้ง ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสาร อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการไทเทรต และที่เวลา 35, 40, 45, 50, 55, และ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ กรดซัลฟูริก และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการไทเทรต

ข. อุณหภูมิ บ่งบอกถึงปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบ ทดสอบโดยการวัดด้วย เทอร์โมมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

ค. ความหนืด บ่งบอกถึงคุณสมบัติความต้านทานการไหลของสาร ทดสอบโดยการวัดด้วย เครื่องวัดความหนืดตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

ง. ความหนาแน่น บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของสาร ทดสอบโดยการวัดด้วย ไฮโดรมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

จ. ร้อยละผลได้ บ่งบอกถึงปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นต่อปริมาณที่คาดว่าจะ เกิดตามทฤษฎี สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{Yield} = \frac{\text{Initial weight of product}}{\text{Initial weight of raw material}} \times 100 \quad (3.6)$$

ฉ. ค่าพลังงานที่ใช้ บ่งบอกถึงปริมาณการใช้พลังงานในการหมุนของใบพาย ทดสอบโดยการ วัดด้วยมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

ช. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ บ่งบอกถึงลักษณะการไหลของสาร สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \quad (3.7)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นของสาร (กก./เมตร ³)
	V	คือ ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)
	N	คือ ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (เมตร)
	μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (พาสคาล.วินาที)

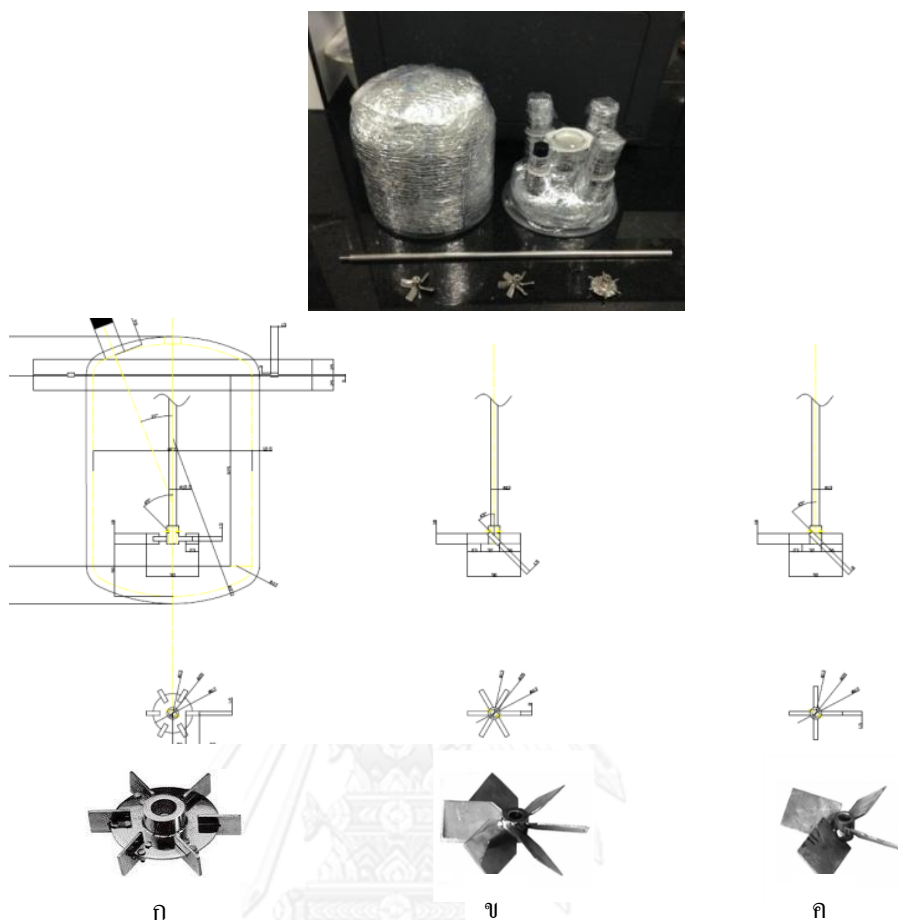
ซ. ค่าความเร็วที่ปลายใบพาย บ่งบอกถึงลักษณะความเร็วที่ปลายใบพาย สามารถคำนวณได้

จาก

$$\text{Impeller Tip speed (ms}^{-1}\text{)} = \frac{\pi NiDi}{60} \quad (3.8)$$

เมื่อ	N	คือ ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพาย (เมตร)

ภายหลังจากคัดเลือกชนิดใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตรแล้ว คำนวณหาค่า Reynolds number, Impeller tip speed, และ Power per unit volume จากความเร็วรอบที่เลือก เพื่อนำไปใช้คำนวณในระดับเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป



รูปที่ 3. 3เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวขนาด 1 ลิตร และชนิดของใบพาย

ก) Rushton Turbine ข) Pitched 6-blade turbine at 45° ค) Pitched 4-blade turbine at 45°

ตารางที่ 3. 4องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	ปริมาณสาร (กรัม)
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, $Al(OH)_3$	128.00
กรดไฮโดรคลอริก, HCl	66.40
น้ำกลั่น, H_2O	400.00

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	ปริมาณสาร (กรัม)
กรดซัลฟูริก, H_2SO_4	240.80
แคลเซียมคาร์บอเนต, $CaCO_3$	240.00
น้ำกลั่น, H_2O	500.00

ตารางที่ 3. 5สภาวะการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร

สภาวะของการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100
สัดส่วนโดยโมลของ $Al(OH)_3$: HCl	1:3
สัดส่วนโดยโมลของ $AlCl_3$: H_2SO_4	1:1.5
ชนิดใบพาย	Pitched 4-blade turbine at 45°
	Pitched 6-blade turbine at 45°
	Rushton Turbine
ความเร็วในการหมุน (รอบต่อนาที)	100, 200, 300, 600, 1200, 1800
ขนาดของใบพายต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์	$Da/Dt = 0.3$, $H/Dt = 1$, $C/Dt = 1/3$
	$W/Da = 1/5$, $Dd/Da = 2/3$, $L/Da = 1/4$

3.2.4 การผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 10 ลิตร

การเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 โดยใช้ใบพายชนิดที่คัดเลือกจากข้อ 3.2.3 ได้แก่ Pitched 6-blade turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และมีปริมาณของสารและสภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3. 6องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	ปริมาณสาร (กรัม)
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, $Al(OH)_3$	1,280.00
กรดไฮโดรคลอริก, HCl	664.00
น้ำกลั่น, H_2O	4,000.00

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	ปริมาณสาร (กรัม)
กรดซัลฟูริก, H_2SO_4	2,408.00
แคลเซียมคาร์บอเนต, $CaCO_3$	2,400.00
น้ำกลั่น, H_2O	5,000.00

ตารางที่ 3. 8 ความเร็วรอบการหมุนของใบพายในถังปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร

Reactor Size	Di (m)	Parameter constant		
		Impeller tip speed (rpm)	Power per unit volume (rpm)	Reynolds number (rpm)
1 L	0.048	300	300	300
10 L	0.108	133	175	59

สำหรับความเร็วรอบการหมุนของใบพายในระดับเพิ่มขยาย 10 ลิตรนั้น จะคำนวณจากค่า Reynolds number, Impeller tip speed, และ Power per unit volume โดยอ้างอิงจากความเร็วรอบที่เลือกในข้อ 3.2.3 แสดงดังตารางที่ 3.8 จากนั้นศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อพิจารณาหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 10 ลิตร สิ่งที่น่ามาพิจารณามีดังนี้

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น/ผลิตภัณฑ์ ทดสอบโดยการเก็บกลุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณ 1 มิลลิลิตรต่อตัวอย่างต่อครั้ง ที่เวลา 1, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการไทเทรต และที่เวลา 35, 40, 45, 50, 55, และ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ กรดซัลฟูริก และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการไทเทรต

ข. อุณหภูมิ บ่งบอกถึงปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบ ทดสอบโดยการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

ค. ร้อยละผลได้ บ่งบอกถึงปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณที่คาดว่าจะเกิดตามทฤษฎี สามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{Yield} = \frac{\text{Initial weight of product}}{\text{Initial weight of raw material}} \times 100 \quad (3.9)$$

ง. ค่าพลังงานที่ใช้ บ่งบอกถึงปริมาณการใช้พลังงานในการหมุนของใบพาย ทดสอบโดยการวัดด้วยมัลติมิเตอร์ตามมาตรฐาน TIS-2150-2546

3.2.5 การผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ใบพายที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 25 ลิตร

การเตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร มีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.2.2 โดยใช้ใบพายชนิดที่คัดเลือกจากข้อ 3.2.3 ได้แก่ Pitched 6-blade turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และมีปริมาณของสารและสภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.9 และ 3.10

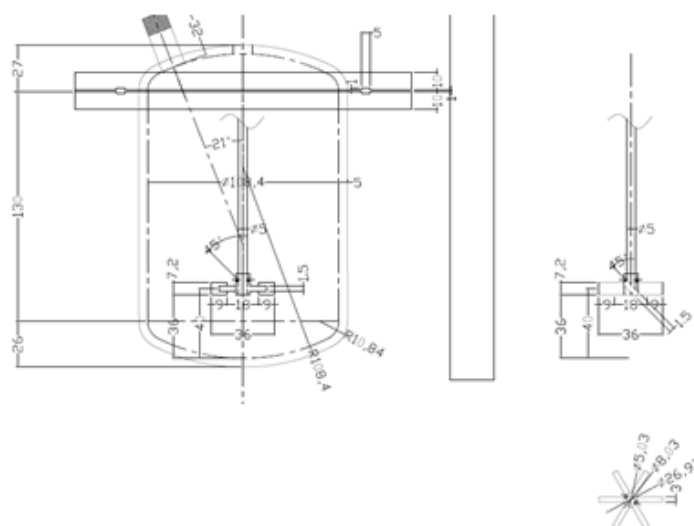
ตารางที่ 3. 9 องค์ประกอบของสารที่ใช้ในการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	ปริมาณสาร (กรัม)
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, $\text{Al}(\text{OH})_3$	3,200.00
กรดไฮโดรคลอริก, HCl	1,660.00
น้ำกลั่น, H_2O	10,000.00

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	ปริมาณสาร (กรัม)
กรดซัลฟูริก, H_2SO_4	6,020.00
แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO_3	6,010.00
น้ำกลั่น, H_2O	12,500.00

ตารางที่ 3. 10 สภาวะการทดลองขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร

สภาวะของการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100
สัดส่วนโดยโมลของ $\text{Al}(\text{OH})_3 : \text{HCl}$	1:3
สัดส่วนโดยโมลของ $\text{AlCl}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$	1:1.5
ชนิดใบพาย	Pitched 6-blade turbine at 45°
ขนาดของใบพายต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์	$\text{Da}/\text{Dt} = 0.3$, $\text{H}/\text{Dt} = 1$, $\text{C}/\text{Dt} = 1/3$
	$\text{W}/\text{Da} = 1/5$, $\text{Dd}/\text{Da} = 2/3$, $\text{L}/\text{Da} = 1/4$



รูปที่ 3. 5 เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวขนาด 25 ลิตร และใบพายชนิด Pitched 6-blade turbine at 45°

ตารางที่ 3. 11 ความเร็วรอบการหมุนของใบพายในถังปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร

Reactor Size	Di (m)	Parameter constant		
		Impeller tip speed (rpm)	Power per unit volume (rpm)	Reynolds number (rpm)
1 L	0.048	300	300	300
25 L	0.145	99	144	33

สำหรับความเร็รรอบการหมุนของใบพายในระดับเพิ่มขยาย 25 ลิตรนั้น คำนวณจากค่า Reynolds number, Impeller tip speed, และ Power per unit volume โดยอ้างอิงจากความเร็วรอบที่เลือกในข้อ 3.2.3 เช่นเดียวกับข้อ 3.2.4 ดังแสดงในตารางที่ 3.10 จากนั้นศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อพิจารณาหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 25 ลิตร ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจมาพิจารณาเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 3.2.4

3.2.6 เปรียบเทียบประสิทธิผลในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการและระดับเพิ่มขยายขนาด

เปรียบเทียบผลที่ได้จากการเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร, 1 ลิตร, 10 ลิตร, และ 25 ลิตรที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา และคำนวณหาค่าสัดส่วนการเพิ่มขยายขนาด (n) ของเครื่องปฏิกรณ์ โดยสิ่งที่น่าสนใจมาพิจารณาคือ ค่าร้อยละผลได้ ทำโดยเปรียบเทียบค่าร้อยละผลได้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับเพิ่มขยายขนาด 1, 10, และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายและความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เหมาะสมในแต่ละเครื่องปฏิกรณ์

และเพื่อให้การออกแบบเกิดประสิทธิผลมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงทำการปรับค่าสัดส่วนการเพิ่มขยายขนาด (n) และคำนวณหาความเร็วรอบใหม่ โดยทำการทดลองซ้ำตามข้อ ก-ง เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ระดับเพิ่มขยาย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับการเพิ่มขยายขนาดในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนได้ดำเนินการทดลองตามหัวข้อ 3.2.2-3.2.5 โดยผลการทดลองจะถูกนำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการขนาด 250 มิลลิลิตร

ในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโมล $Al(OH)_3:HCl$ และอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา และขั้นตอนที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยอ้างอิงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนโมล $AlCl_3:H_2SO_4$ ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 1 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารตั้งต้น

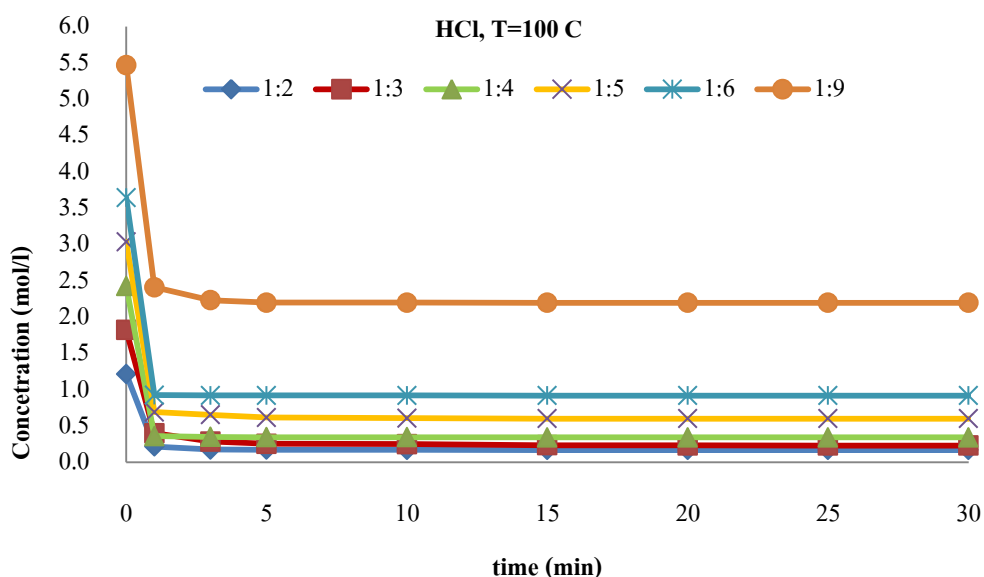
ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ และมีสารตั้งต้นคือ อะลูมิเนียมคลอไรด์และกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารตั้งต้น ในการทดลองมีการเพิ่มสัดส่วนโมลของไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และทำการเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที จนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา 30 นาที

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ 1:2 , 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 และ 1:9 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่แรกของการเกิดปฏิกิริยา(ตารางภาคผนวก ข 3) จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก(HCL) เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนกระทั่งเกือบคงที่ในนาทีที่ 5 ของปฏิกิริยา ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล แต่ในช่วงเวลาที่แรกของปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่า ที่สัดส่วนโมล 1:9 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกลดลงอย่างรวดเร็วกว่าที่สัดส่วนโมลที่ 1:6, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2 ตามลำดับ จากผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าผลของสัดส่วนโมลที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากโดยปกติกรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวให้กลุ่มอิเล็คตรอนสูง ดังนั้นเมื่อสัดส่วนโมลของกรดไฮโดรคลอริกมากจะทำให้มีกลุ่มของกรดไฮโดรคลอริกมากด้วยเช่นกัน และ

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์แตกตัวให้กลุ่มประจุบวกของอะลูมิเนียมอะตอม ดังนั้นเมื่อระบบมีสัดส่วนของอิเล็กตรอนที่มากกว่าจะเกิดการแย่งเข้าทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจึงเกิดอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อสัดส่วนโมลของกรดไฮโดรคลอริกมากเกินไปจะทำให้สถานะของสารละลายมีความเป็นกรดสูงจนเกินไป จะทำให้ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับสภาพมากทำให้มีของแข็งในระบบมาก โดยสัดส่วนโมลที่เหมาะสมคือ 1:3 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อเทียบกับเวลา ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนาที่แรกใกล้เคียงกับจำนวนสัดส่วนโมลที่สูงกว่า และยังมีกรดไฮโดรคลอริกคงเหลือในระบบน้อย

จากผลงานวิจัยจะสอดคล้องกับหลักการของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา[19] โดยเมื่อพิจารณากราฟของกรดไฮโดรคลอริก พบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก จะมีปริมาณมากที่สุด เมื่อเวลา $t=0$ แต่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่า กรดไฮโดรคลอริก ถูกสลายกลายเป็นสารอะลูมิเนียมคลอไรด์ กราฟที่ได้จะโค้งลง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดไฮโดรคลอริก พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกจะเร็วมาก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสังเกตได้จากความชันของกราฟ ถ้ากราฟมีความชันมาก แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

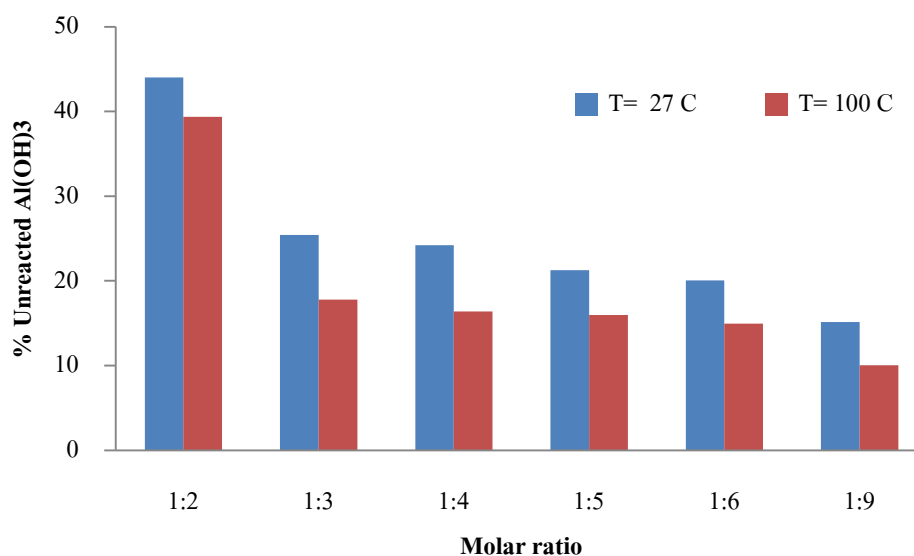


รูปที่ 4. 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดร คลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดรคลอริกที่ 1:2,1:3,1:4,1:5,1:6 และ 1:9 ตามลำดับ

ข. การเปลี่ยนแปลงปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al_2OH_3)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในการทดลองมีการเพิ่มสัดส่วนโมลของไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 27-120 องศาเซลเซียส และทำการเก็บตัวอย่างและวัดปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในรูปของแข็งที่เหลืออยู่ จนกระทั่งสิ้นสุดปฏิกิริยา 30 นาที โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกทดลองที่สัดส่วนโมล ที่ 1:2 , 1:3,1:4,1:5,1:6 และ 1:9 ที่อุณหภูมิ 27 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนในขั้นที่สองนำผลของขั้นตอนแรก เพื่อมาหาสภาวะที่เหมาะสม โดยเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่ 80,90,100 และ 120 องศาเซลเซียส แต่ลดสัดส่วนโมลของกรดไฮโดรคลอริกเนื่องจากผลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือในปฏิกิริยาไม่แตกต่างกัน

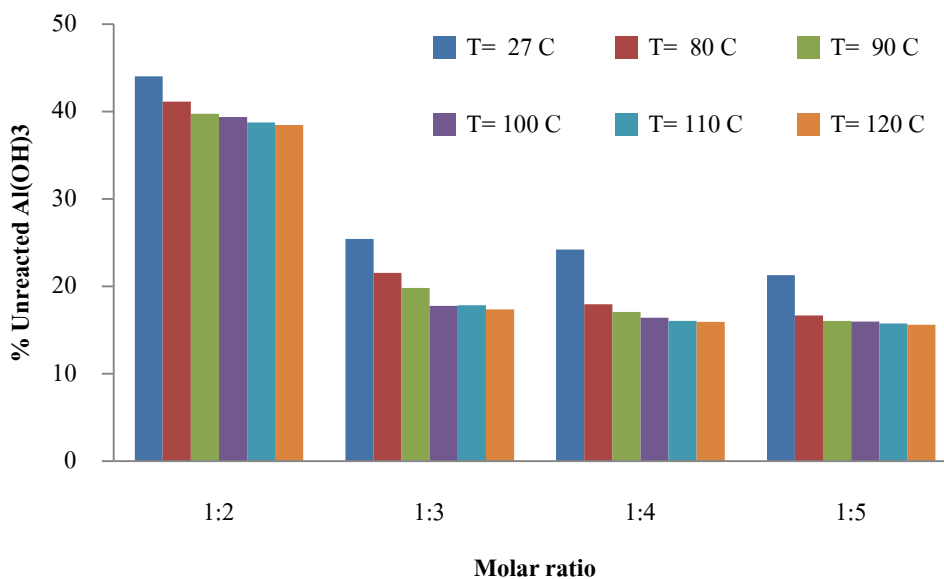
จากผลการทดลองพบว่าผลของสัดส่วนโมลส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และยังพบว่าอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 27 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียสและทำการทดสอบต่อโดยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90,100,110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกได้เร็วขึ้นการเพิ่มของกรดไฮโดรคลอริก เป็นการเพิ่มกลุ่มอิเล็กตรอนให้สูงขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น เนื่องจากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ของเหลวเริ่มเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นการเข้าทำปฏิกิริยาจะทำได้ดีกว่า และยังพบอีกว่าปริมาณของแข็งจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่จะเริ่มช้าลงในช่วงอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส นั้นแสดงว่าจุดที่ดีที่สุดคือในช่วงอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของสารตั้งต้นและปริมาณของแข็งที่ไม่ ทำปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิ 27 และ 100 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองซึ่งสอดคล้องจากผลการผลิตอะลูมิเนียมคลอไรด์[20] ซึ่งอธิบายถึงวิธีการผลิต สารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริกที่มีปริมาณสารสัมพันธ์กันนั้นคือ สัดส่วนโมล $\text{Al(OH)}_3:\text{HCL}$ เท่ากับ 1:3 โดยปฏิกิริยาจะเกิด สมบูรณ์ที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 100-110 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาสาร อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายจะถูกแยกออกด้วยวิธีการกรองและนำกลับไปใช้ในกระบวนการอีกครั้ง ส่วนของเหลวที่มีการปนของน้ำคือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการซึ่งได้แก่ สารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ และจากการค้นคว้าสิทธิบัตรของ Inagaki และ Yasuhito[14] พบว่าภายหลังการเกิดปฏิกิริยา ระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกรดจะคงเหลือสารที่ไม่ละลายเกิดขึ้นในกระบวนการเช่นกัน ซึ่ง จากข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในขั้นตอนของ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในงานวิจัยนี้ พบว่าภายหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และ กรดไฮโดรคลอริกจะมีของแข็งคงเหลืออยู่นั้นคือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณของของแข็งนั้น จะขึ้นกับสัดส่วนโมลของ $\text{Al(OH)}_3:\text{HCL}$

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง จะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสคือ การทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนโมลของ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1:3 ที่สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4. 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของสารตั้งต้นและปริมาณของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยมีอะลูมิเนียมคลอไรด์และกรดซัลฟูริกเป็นสารตั้งต้น

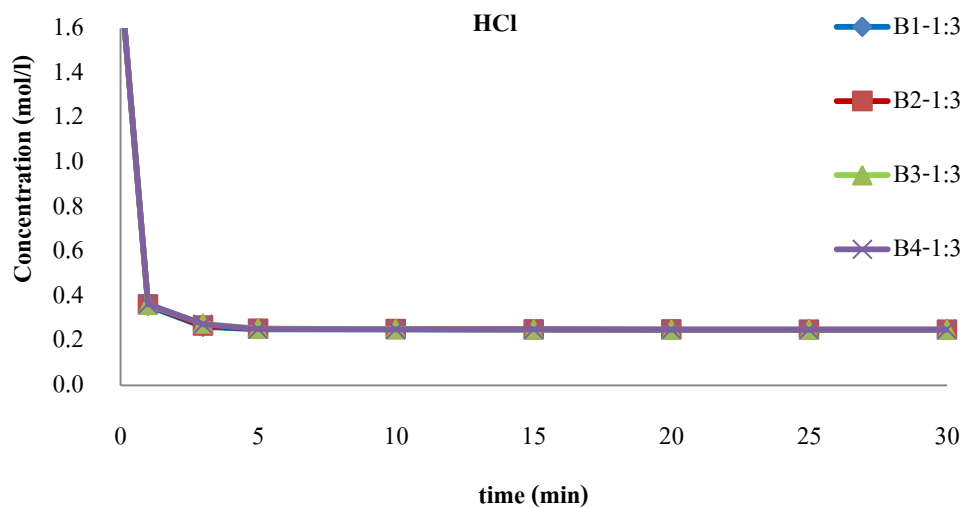
ค. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

การศึกษาหาผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดซัลฟูริกซึ่งต้องทำปฏิกิริยาต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1:3 โดยทำทั้งหมด 4 แบทช์ ดังแสดงในรูป 4.4 หลังจากเมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสิ้นสุดลง จะเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยการเพิ่มสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริกเข้าไป และเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีจนสิ้นสุดปฏิกิริยา

ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแสดงในรูป 4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่สัดส่วนโมล 1:3 พบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลดลงอย่างรวดเร็ว และเริ่มช้าลงในนาที่ที่ 5 และเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยาในนาที่ที่ 30 เช่นเดียวกับการทดลองแบทช์ที่ 1 ,2,3 และ 4 ในส่วนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จากการ

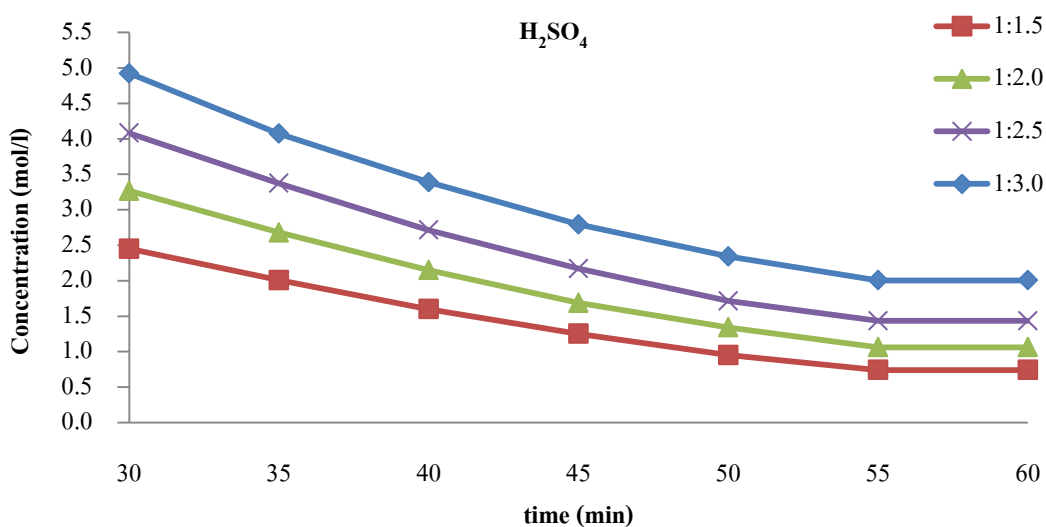
ทดลองพบว่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจนเกิดพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) และยังพบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (ตารางภาคผนวก ค 2) มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา และช้าลงในช่วงนาที่ที่ 55 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยมาก เมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังแสดงในรูป 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเทียบกับเวลาเมื่อสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าจะมีสัดส่วนโมลที่เพิ่มขึ้นก็ตาม นั่นแสดงว่า การเพิ่มสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริกต่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) คงเหลือในปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.74, 1.06, 1.43 และ 2.01 โมลต่อลิตรที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2, 1.2.5 และ 1.3 ตามลำดับ นั่นแสดงว่าสัดส่วนโมลที่เหมาะสมและเหลือในระบบน้อยที่สุดคือ 1:3.1.5

เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา[19] โดยเมื่อพิจารณากราฟของกรดซัลฟูริก พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกจะมีปริมาณมากที่สุด เมื่อเวลา $t=0$ แต่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แสดงว่า กรดซัลฟูริก ถูกสลายกลายเป็นสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ กราฟที่ได้ไค้กลง เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดซัลฟูริก พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกจะเร็วมาก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสังเกตได้จากความชันของกราฟ ถ้ากราฟมีความชันมาก แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อกรดไฮโดรคลอริกที่ 1:3 แบตช์ที่ 1-4

ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยนี้เป็นไปตามทฤษฎีของอัตราการเกิดปฏิกิริยา[19] ที่ได้กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของการเกิดปฏิกิริยาจากสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์นั้น จะขึ้นอยู่กับสมมูลโมลของปฏิกิริยา โดยความหมายของการเกิดปฏิกิริยาคือการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ โดยที่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ มีความแตกต่างไปจากสารเดิม และการเปลี่ยนแปลงสามารถเกิดขึ้นและสลายตัวจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพโดยเป็นไปตามกฎทรงมวล

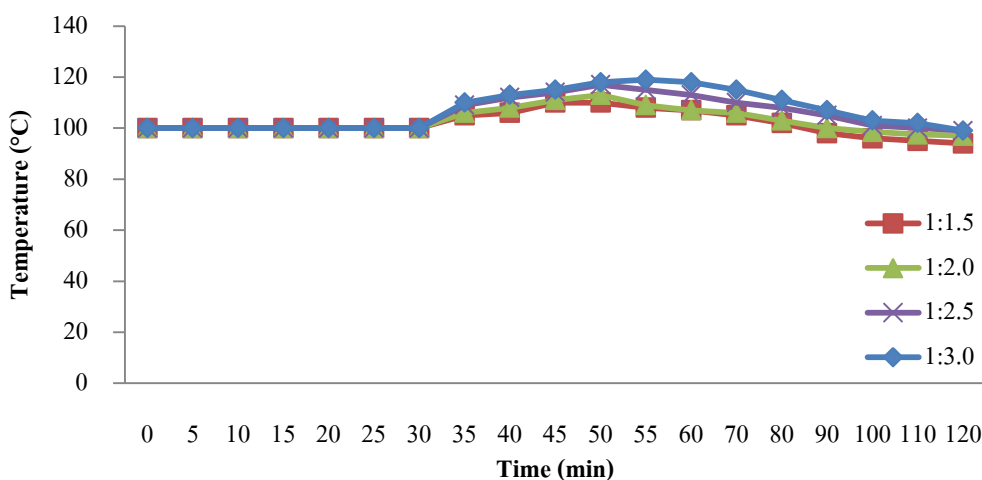


รูปที่ 4. 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ต่อกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2, 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ

ง. อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Adiabatic reaction) ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยดั่งนั้นจากการทดลอง จึงทำการวัดอุณหภูมิทุก 5 นาทีเพื่อดูแนวโน้มของปฏิกิริยาเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2, 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากผลการทดลองจะพบว่าที่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ต่อ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เพิ่มมากขึ้น และ ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงในช่วงของนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ทั้งนี้อิทธิพลสัดส่วนโมลที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาในระบบจะมีการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก ในช่วงกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เช่นเดียวกับ Zhao Changwei [3] ที่เตรียมพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเพิ่มสูงขึ้นในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน



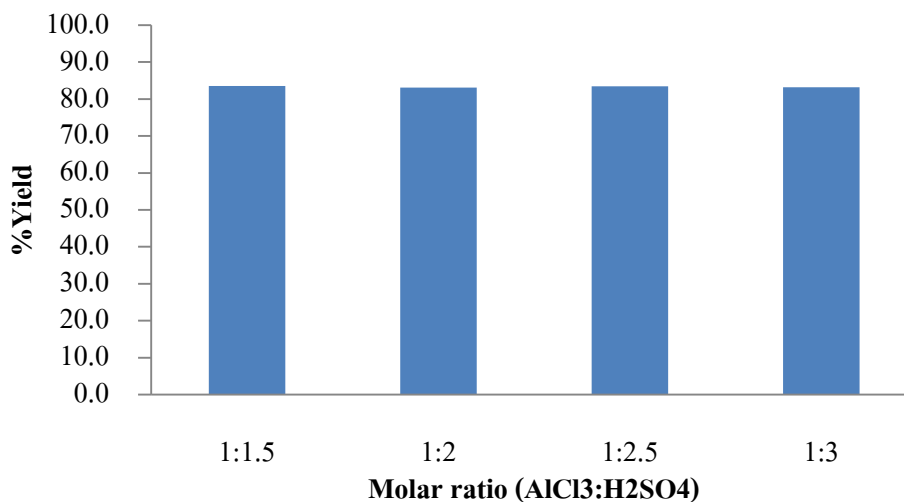
รูปที่ 4. 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ต่อกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2, 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ

จ. ร้อยละผลได้

การหาปริมาณร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะเป็นการหาในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาโดยทำการวัดปริมาณพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อสารตั้งต้นดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากการทดลองพบว่าที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ต่อกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 1:1.5, 1:2, 1:2.5 และ 1:3 ตามลำดับ จะมีผลของร้อยละผลได้อยู่ที่ 83.55, 83.11, 83.47 และ 83.17 โดยที่แนวโน้มของร้อยละผลได้จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อสัดส่วนโมลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตามผลของการเพิ่มสัดส่วนโมลไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เนื่องจากผลของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) ออกมาไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่จะมีผลด้านอัตราการเร็วของการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าสัดส่วนโมลที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ต่อกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) คือ 1:1.5 ซึ่งเป็นสัดส่วนทางสมดุลเคมี

ดังนั้นงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลของสัดส่วนโมลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งผลของสัดส่วนโมลมีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยา



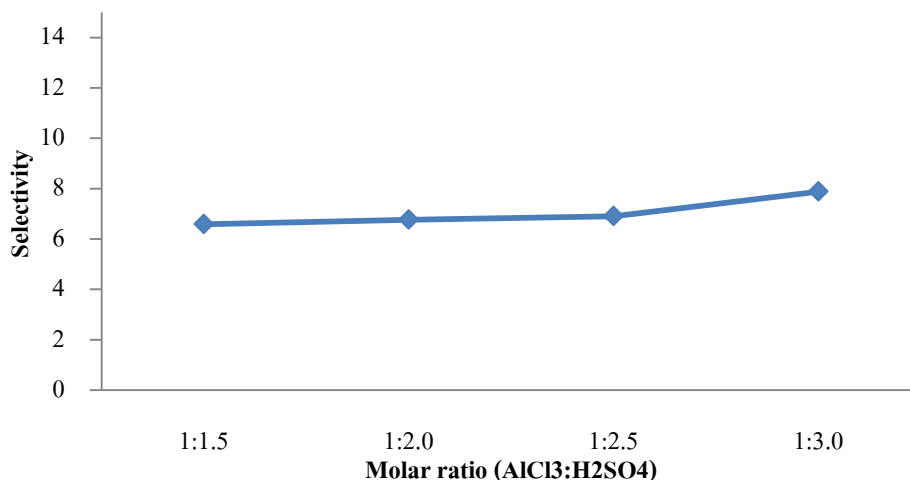
รูปที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ในกาทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อกรดซัลฟูริก(H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5 และ 1.3 ตามลำดับ

ฉ. ค่าการเลือกเกิด

ค่าการเลือกเกิดทำให้ทราบถึงแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนโมลต่างๆ จะมีลักษณะของค่าการเลือกเกิดต่างกัน โดยทำการหาค่าการเลือกเกิดโดยการหาปริมาณวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ต่อผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

ผลของค่าการเลือกเกิดของสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อสารแคลเซียมซัลเฟต(ยิปซัม)พบว่าแนวโน้มของการเพิ่มสัดส่วนโมลมีผลต่อค่าการเลือกเกิดเล็กน้อยที่สัดส่วนโมล 1.15 -1.30 ดังแสดงในรูป 4.8 จากรูปแสดงให้เห็นว่าผลของการเพิ่มสัดส่วนโมลทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและมีโอกาสเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่าการเลือกเกิดมักจะสูงขึ้นดังนั้นค่าการเลือกเกิดจะเป็นสัดส่วนระหว่างผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์รอง

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Zhao Changwei [3]ผลของการเพิ่มสัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมมีผลต่อความเร็วของปฏิกิริยา แต่สัดส่วนโมลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4. 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃)ต่อกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)ที่สัดส่วนโมล 1:1.5, 1:2 ,1.2.5 และ 1.3 ตามลำดับและค่าการเลือกเกิดในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

โดยการพิจารณาค่าการเลือกเกิดนั้นจะพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น แนวโน้มของผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นได้มาน้อยเพียงใด เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ โดยจากราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนโมลของการทดลอง ที่สัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อกรดซัลฟูริกที่ 1.15 – 1.3 ค่าการเลือกเกิด ได้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

ช. คุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

มาตรฐานกรมอุตสาหกรรมระบุมมาตรฐานของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะพิจารณาผลของอะลูมินา (Al₂O₃) , พีเอส , ความหนาแน่น, ร้อยละของเบสิกซิตี ดังนั้นการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับ

ผลการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการเพิ่มสัดส่วนโมลมีผลต่อคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ไม่แตกต่างอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 หากพิจารณาผลของอะลูมินา (Al₂O₃) ที่เกิดขึ้นพบว่าผลของการเพิ่มสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ไม่มีผลต่อร้อยละของอะลูมินาที่เกิดขึ้นโดยร้อยละของอะลูมินามีค่ามากกว่า 10 ซึ่งอยู่ในค่ามาตรฐานของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ หากพิจารณาค่าพีเอส พบว่าค่าพีเอสมีค่าต่ำเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนโมลที่สูงขึ้น เนื่องมาจากผลของกรดซัลฟูริกที่มากเกินไปซึ่งมาตรฐานของค่าพีเอสของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ อยู่ที่ 3.5-4.5 นั้นแสดงว่าหากเพิ่มสัดส่วนโมลมากกว่า 1:1.5 พบว่า ผลของค่าพีเอสต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด และยังส่งผลกระทบต่อค่าความ

หนาแน่นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจาก การเพิ่มสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริกจะทำให้ค่าความหนาแน่นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ สูงขึ้นเนื่องจากปริมาณกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่เจือปนอยู่ในระบบมากเกินไป

เมื่อพิจารณาผลของคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ของงานวิจัยนี้ ซึ่งสอดคล้องจากการทดลองของ Fengting Li [21] ได้ผลของ ร้อยละอะลูมินา (Al_2O_3) มากกว่า 10 ร้อยละ เบสิกซิตีอยู่ในช่วง 45 ถึง 95 เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Benjamin Shultes [22] ได้ผลของ ร้อยละอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในช่วง 9-11 และ ร้อยละ เบสิกซิตีอยู่ในช่วง 38.5 ถึง 50

ตารางที่ 2.4 คุณภาพทางเคมีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

สัดส่วนโมล ($AlCl_3:H_2SO_4$)	คุณภาพทางเคมีของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์			
	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของ อะลูมินา (Al_2O_3)	พีเอช	ความหนาแน่น (กรัม/ มิลลิลิตร)	ร้อยละของ เบสิกซิตี
1:3:3	10.56	4.2	1.21	63
1:3:4	10.48	3.2	1.28	60
1:3:5	10.51	2.4	1.3	57
1:3:6	10.49	1.1	1.38	56

อย่างไรก็ดีผลของการเพิ่มสัดส่วนโมล ทำให้มีผลต่อการลดลงของร้อยละของเบสิกซิตี ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนของปริมาณของอะลูมิเนียมต่อไฮดรอกซีกรุ๊ปน้อยลงเมื่อสัดส่วนโมลของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลดลงอีกด้วย

จากผลการทดลอง จะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันคือ การทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนโมลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ต่อกรดซัลฟูริกเท่ากับ 1:1.5

4.2 การศึกษาและคัดเลือกชนิดของใบพายที่เหมาะสมระหว่าง Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, และ Rushton Turbine ตลอดจนความเร็วรอบในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนตามชนิดของใบพายได้แก่ Pitched 4-Blade Turbine at 45°, Pitched 6-Blade Turbine at 45°, และ Rushton Turbine ซึ่งแต่ละการทดลองจะมีสถานะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันคือ 100, 200, 300, 600, 1200, และ 1800 รอบต่อนาที จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกชนิดใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

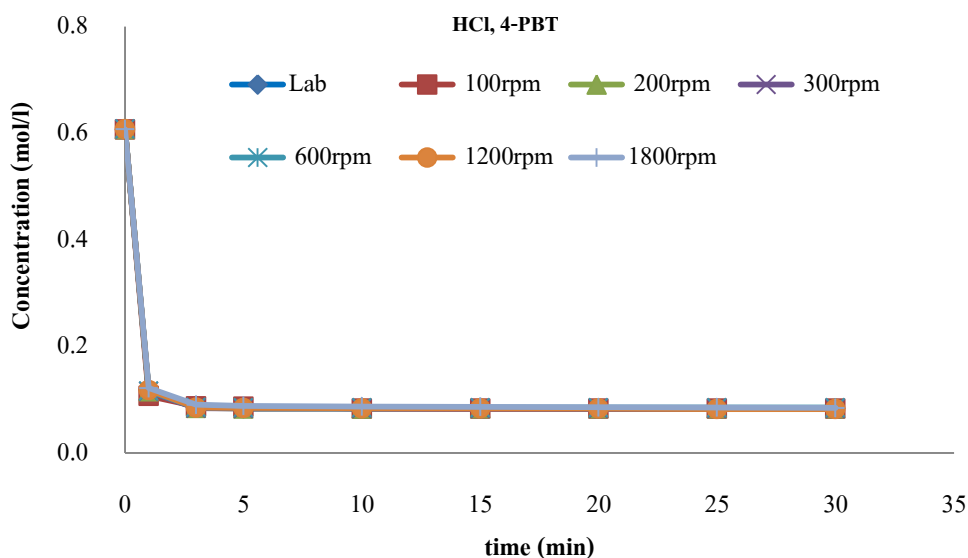
4.2.1 การศึกษาใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45°

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

การศึกษาผลของใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° โดยที่สัดส่วนโมลและอุณหภูมิที่ได้จากการหาสถานะที่เหมาะสม โดยที่ปัจจัยระหว่างผลการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์นั้นคือการผสม ดังนั้น สถานะความเร็วรอบในการหมุนที่ศึกษาคือ 100, 200, 300, 600, 1200, และ 1800 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงนาที่ที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ เช่นเดียวกับที่ความเร็ว 100, 200, 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ถูกจับด้วยพันธะอ็อกซิเจนทั้งคู่ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนโดยจะเกิดขึ้นเร็วมาก หากเปรียบเทียบปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เหลืออยู่ของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขณะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCL) บางส่วนที่กลายเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนยังไม่ได้ถูกการควบแน่นดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวนั้นจะมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 4-Blade Turbine at 45° ซึ่งมีทิศทางการผสมทั้งแนวแกนและรัศมี[9] ทำให้กรดไฮโดรคลอริกฟุ้งกระจายทำปฏิกิริยาได้ดีของทุกช่วงความเร็วรอบเนื่องด้วยผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ลดลงใกล้เคียงกันแม้จะเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้นก็ตาม นั่นแสดงว่าการฟุ้งกระจายของของแข็งและของเหลวสามารถทำได้ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี

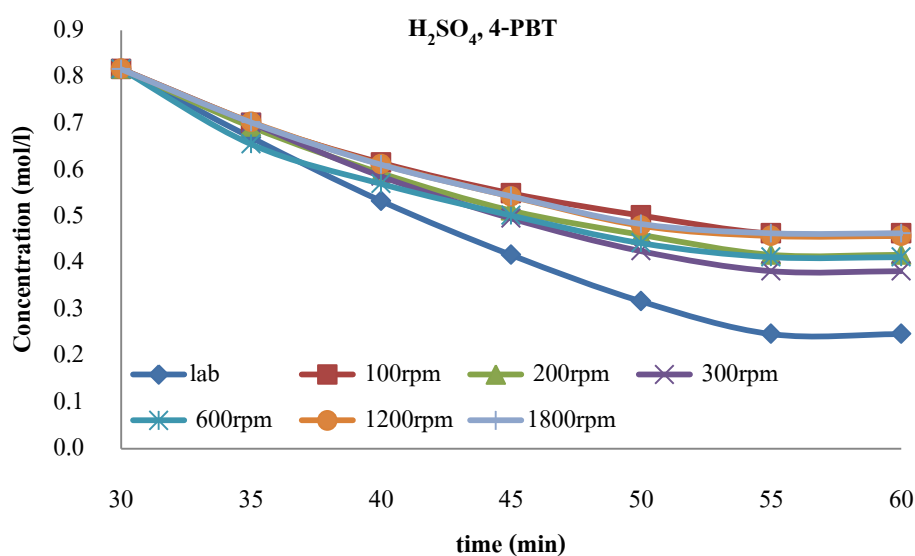


รูปที่ 4. 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คืออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอิทธิพลของชนิดใบพายส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาทีแนวโน้มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ลดลงมากกว่าทุกความเร็วรอบ หากพิจารณาความเร็วรอบที่สูงกว่า 300 รอบต่อนาทีพบว่า ที่ความเร็ว 600 และ 1200 รอบต่อนาทีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ในขณะที่ถ้าเพิ่มความเร็วรอบที่ 1800 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยกว่า ที่ความเร็ว 600 และ 1200 รอบต่อนาที หากพิจารณาความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีพบว่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยกว่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีและใกล้เคียงกับความเร็วยรอบที่ 1800 รอบต่อนาที ส่วนความเร็ว 200 รอบต่อนาทีใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่ 600 และ 1200 รอบต่อนาที นั้นแสดงให้เห็นว่า ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีแนวโน้มของอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) อยู่ในช่วงของความเร็ว 200 ถึง 1200 รอบต่อนาที และผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อัตราการลดลงของความ

เข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 300 รอบต่อนาทีเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45°

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 4-Blade Turbine at 45° ซึ่งมีทิศทางการผสม ทั้งแนวแกนและรัศมี ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดดีที่สุดที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที แต่ยังไม่ใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพายจำนวน 4 ใบอาจจะน้อยไปที่ทำให้สารละลายในกระบวนการ พอลิเมอไรเซชัน มีประสิทธิภาพน้อยเมื่อระบบมีความหนืดเพิ่มขึ้น[9]



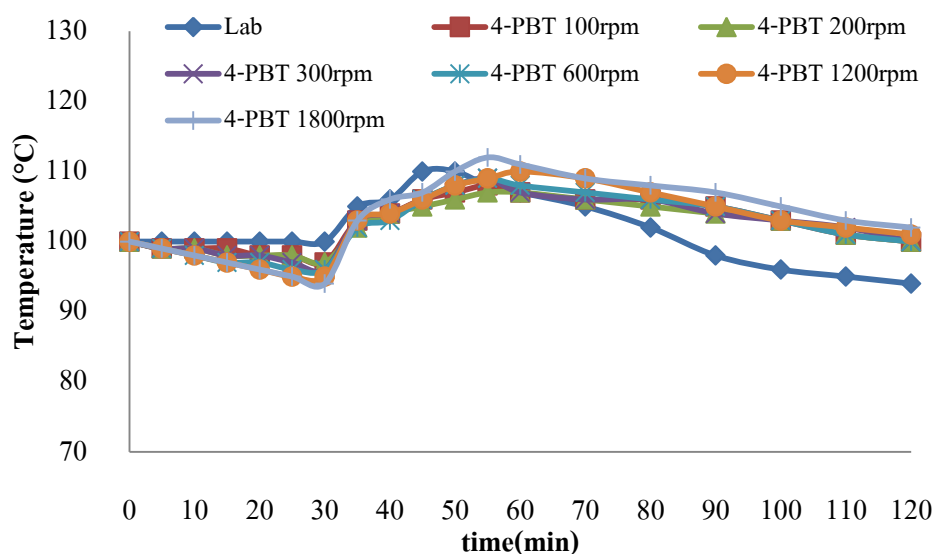
รูปที่ 4. 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ข. อุณหภูมิ

ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็วรอบเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่มีต่ออุณหภูมิ

ในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งผลของอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดได้เร็วขึ้น

หากพิจารณางานวิจัยนี้มีผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ M.D. Grau [23] ที่ผลของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงจากระบบซึ่งมีผลจากการถ่ายเทความร้อนของระบบในการหมุนของใบพาย



รูปที่ 4. 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

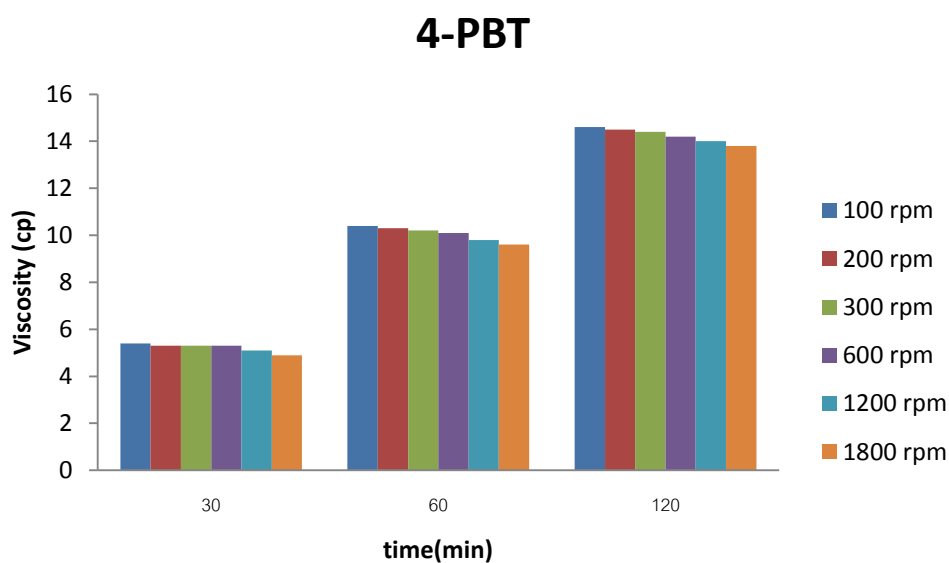
ค. ความหนืด

ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผลของการผสมที่ความเร็วรอบต่างๆจึงมีผลต่อความหนืดที่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง ความหนืดของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งในปฏิกิริยานี้จะอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่เป็นของแข็งจะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาในนาที่ที่ 30 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบสูงขึ้น ส่วนในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาในนาที่ที่ 60 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ใบพายทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในช่วงสุดท้ายของปฏิกิริยาหลังจากขั้นตอนปรับสภาพค่าความเป็นกรดพบว่าในนาที่ที่ 120 ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยที่แนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลจากการทดลองนี้ทำให้สรุปได้ว่า ผลจากระบบที่มีความหนืดสูงและเป็นของผสมระหว่างของแข็งและ

ของเหลว เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° เมื่อเพิ่มความเร็วรอบค่าความหนืดจะไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากในกระบวนการมีสัดส่วนโมลที่เท่ากัน และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้รวดเร็ว

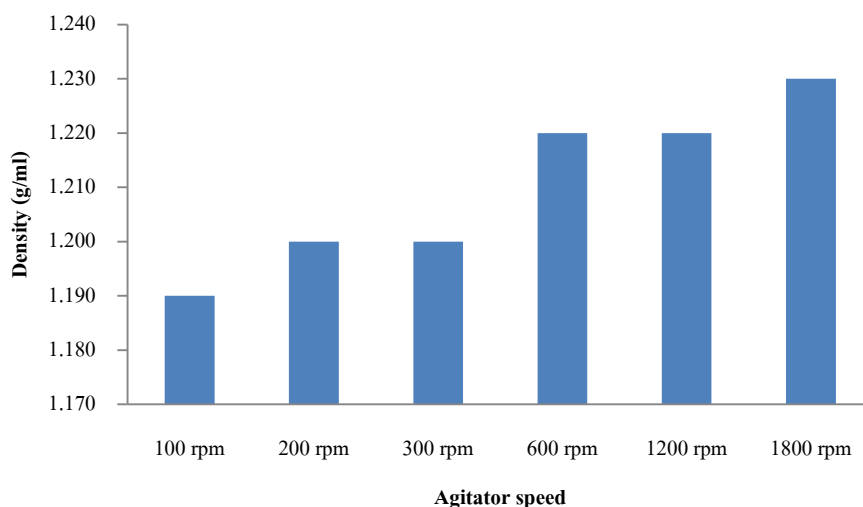
ผลของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติของใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ใช้กับสารที่มีความหนืดสูงขึ้นและเป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลว



รูปที่ 4. 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ง. ความหนาแน่น

คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) ซึ่งความหนาแน่นจะแปรผันได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระบบดังนั้นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการปั่นกวนโดยที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนจะทำให้ประสิทธิภาพในการคายความร้อนต่างกัน ซึ่งผลจากใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° พบว่าแนวโน้มของค่าความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.13 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของการเปลี่ยนจากอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) เป็นพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) ได้สมบูรณ์ตามมาตรฐานของอุตสาหกรรม



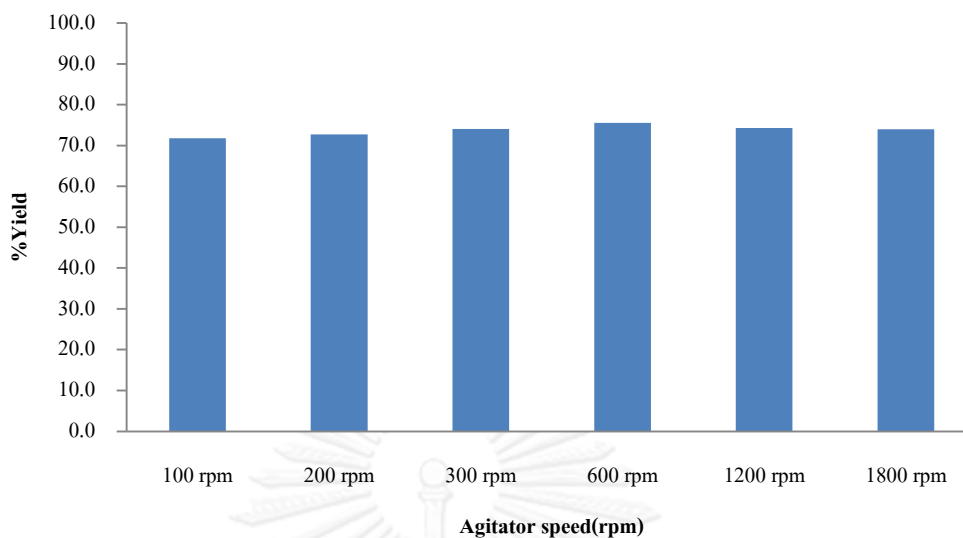
รูปที่ 4. 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° และความหนาแน่น

จ. ร้อยละผลได้

ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณสารตั้งต้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์โดยผลของการจากความเร็วรอบและใบพายจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

จากผลการทดลองใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าที่ความเร็ว 100, 200, 300 และ 600 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ในขณะที่ความเร็ว 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็วรอบมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) โดยที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละผลได้สูงที่สุดที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีสำหรับใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° นั้นแสดงว่าใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที ถ้าเกินกว่า 600 รอบต่อนาทีจะไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$)

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับการทดลองของ P.S Keang [8] ได้ทำการทดลองขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวจาก 2 ลิตรไปสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกว 75 ลิตร พบว่าแนวโน้มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกวเพิ่มขึ้น



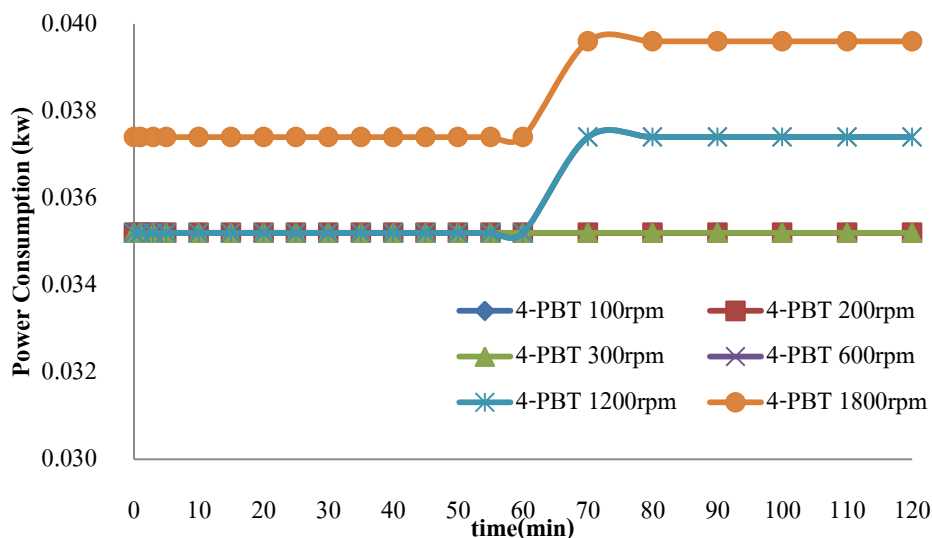
รูปที่ 4. 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ฉ. ค่าพลังงานที่ใช้

ผลของพลังงานการใช้เป็นปัจจัยสำคัญของการผสมเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และใบกวน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงผลของพลังงานจะขึ้นอยู่กับชนิดของใบพายและความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะแปรผันตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นในค่าหนึ่ง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็ว 100, 200, 300 และ 600 รอบต่อนาที แนวนอ้มของการใช้พลังงานจะคงที่แม้ว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นก็ตามซึ่งโดยปกติ $P \propto N^3$ ดังนั้นที่ความเร็วรอบ 1200 และ 1800 รอบต่อนาทีค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะสูงขึ้นในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันดังแสดงในรูป 4.15

โดยงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ N.Dohi [24] ที่ผลของพลังงานการใช้ ที่ ค่าเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง laminar และ transition จะคงที่แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ผลของเรย์โนลด์ เป็นแบบ turbulent



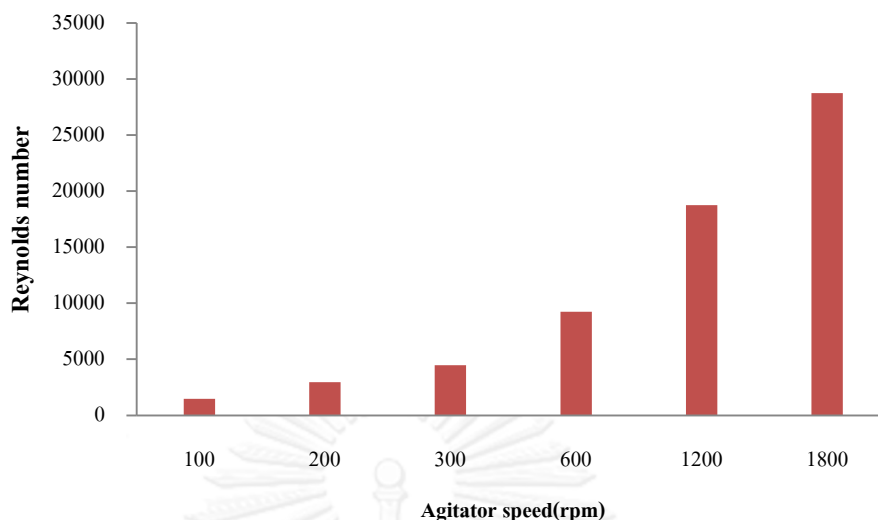
รูปที่ 4. 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว รอบ ต่างๆ

ข. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)

ความเร็วรอบและขนาดของใบพายจะมีผลต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ดังนั้นการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะนำไปใช้หาความเร็วรอบของระบบที่สองเมื่อมีการขยายขนาดจากระบบที่หนึ่งไปเป็นระบบที่ 2

จากการทดลองพบว่าที่ 100, 200 รอบต่อนาทีจะอยู่ในช่วงของ laminar flow ความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาที อยู่ในช่วงของ transition flow และความเร็วรอบ 1200 และ 1800 รอบต่อนาที อยู่ในช่วงของ turbulent flow ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการผสมที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ของใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° พบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง Transition phase

ในการทดลองนี้สอดคล้องกับการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์คงที่ เพื่อที่จะกำหนดความเร็วรอบในเครื่องปฏิกรณ์ในระดับขยายขนาด



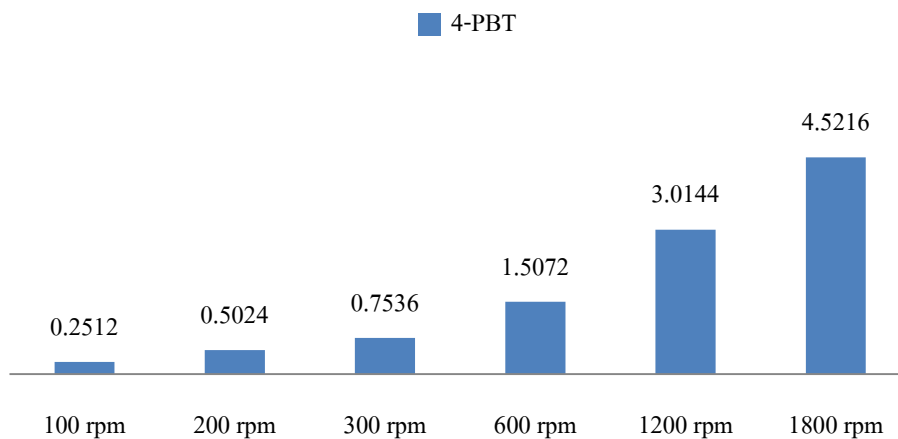
รูปที่ 4. 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ช. ความเร็วที่ปลายใบพาย (Impeller tip speed)

ประสิทธิภาพของการปั่นกวนที่ปลายใบพายการวิเคราะห์ค่า Impeller tip speed ตามรูปที่ 4.17 โดยการคำนวณตามสมการ (2.27) เพื่อนำไปสู่การขยายขนาดในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร พบว่าใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° มีผลต่อร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ซึ่งพบว่าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที จะให้ค่าร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 1.5072 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใบพายชนิดนี้

งานวิจัยนี้สอดคล้องในงานวิจัยของ W. Stephenie [25] ใช้การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ โดยให้ ค่า Impeller tip speed คงที่ 0.56 เมตรต่อวินาที

Impeller Tip speed (ms⁻¹)



รูปที่ 4. 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

จากผลการทดลองเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเร็วรอบต่างๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกเมื่อแตกตัวมีความว่องไวสูงดังนั้นเมื่อความเร็วรอบตั้งแต่ 100 รอบขึ้นไปสามารถทำให้กรดไฮโดรคลอริกแตกตัวได้ดีเพื่อทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หากพิจารณาความเร็วรอบที่ใช้ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 600 รอบต่อนาทีเนื่องจากผลของร้อยละผลได้สูงที่สุด และผลของพลังงานการใช้จะคงที่ต่ำกว่า 600รอบต่อนาที

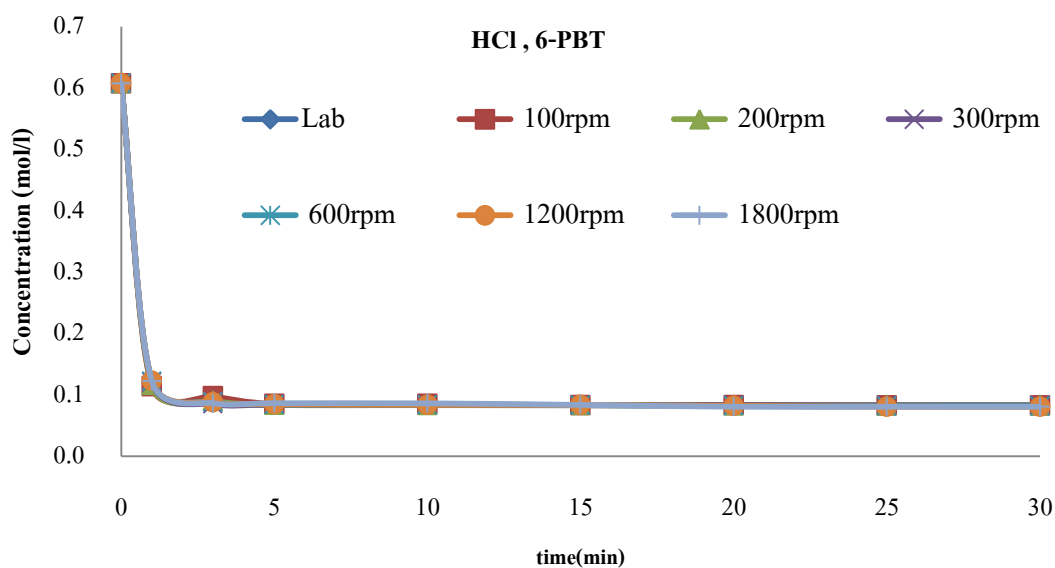
4.2.2 การศึกษาใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

การศึกษาผลของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° โดยที่สัดส่วนโมลและอุณหภูมิที่ได้จากการหาสภาวะที่เหมาะสม โดยที่ปัจจัยระหว่างผลการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์นั้น คือการผสม ดังนั้น สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่ศึกษาคือ 100, 200, 300, 600, 1200, และ 1800 รอบต่อนาที

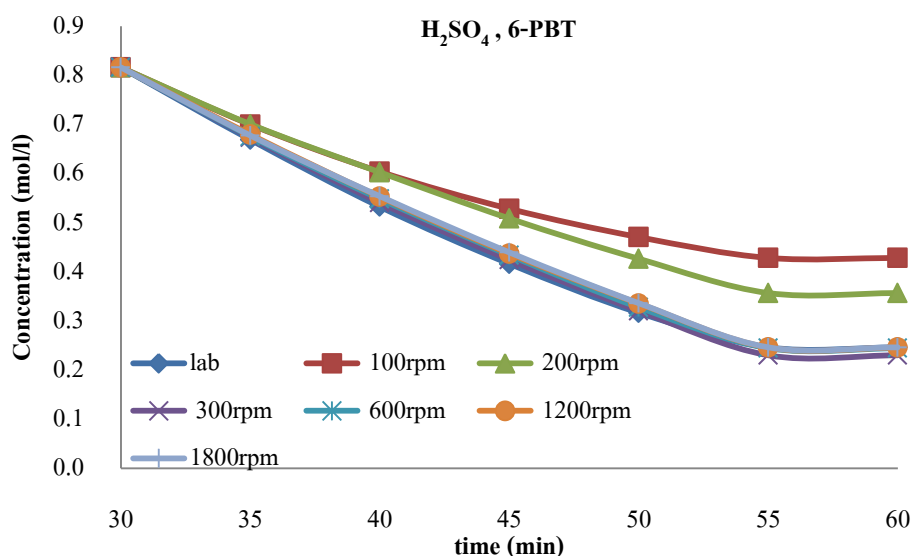
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อพิจารณาใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ผลของสารตั้งต้นที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก (HCL) พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงเวลาที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ ที่ความเร็ว 100, 200, 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ถูกจับด้วยพันธะอิกอนิกทั้งคู่ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนโดยจะเกิดขึ้นเร็วมาก หากเปรียบเทียบปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เหลืออยู่ของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขณะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCL) บางส่วนที่กลายเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนยังไม่ได้ถูกการควบแน่นดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวนั้นจะมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° ซึ่งมีทิศทางการผสมทั้งแนวแกนและรัศมี[9] ทำให้กรดไฮโดรคลอริกฟุ้งกระจายทำปฏิกิริยาได้ดีของทุกช่วงความเร็วรอบ เนื่องด้วยผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ลดลงใกล้เคียงกันแม้จะเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้นก็ตาม นั้นแสดงว่าการฟุ้งกระจายของของแข็งและของเหลวสามารถทำได้ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี



รูปที่ 4. 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คืออะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าอิทธิพลของชนิดใบพายส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยที่ความเร็ว 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที มีแนวโน้มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ลดลงมากกว่าความเร็วรอบ 100 และ 200 รอบต่อนาที หากพิจารณาความเร็วรอบที่สูงกว่า 300 รอบต่อนาที พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนตาม หากพิจารณาความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที พบว่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยกว่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ส่วนความเร็ว 200 รอบต่อนาที น้อยกว่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ขึ้นไป นั้นแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะมีอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) อยู่ในช่วงของความเร็ว 300 รอบต่อนาที ซึ่งถ้าเพิ่มความเร็วรอบมากกว่านี้ ผลการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพจะลดลงด้วย ดังนั้นความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 300 รอบต่อนาที เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°



รูปที่ 4. 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

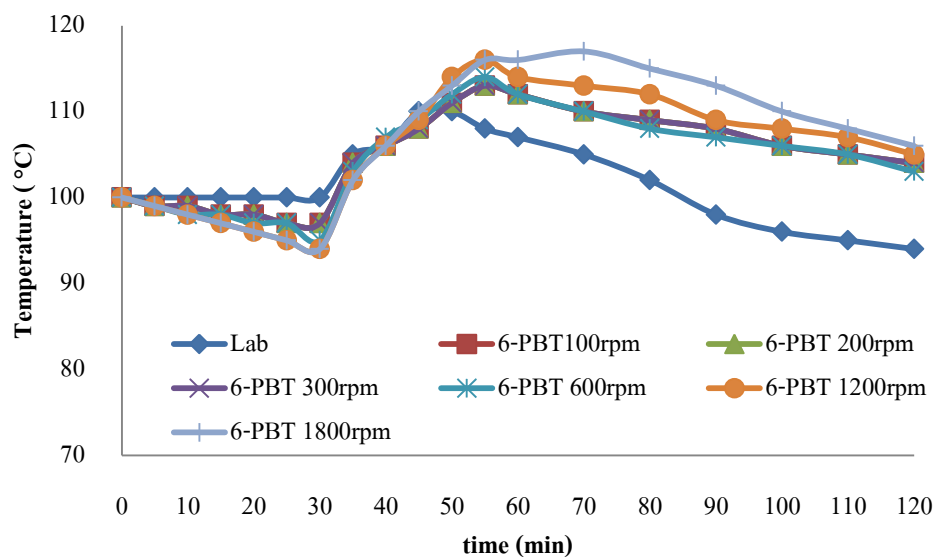
เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° ซึ่งมีทิศทางการผสม[9] ทั้งแนวแกนและรัศมี ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดดีที่สุดที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ได้ผลใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° มีประสิทธิภาพสูงที่ทำให้สารละลายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากใบพายที่เพิ่มขึ้นเป็น 6 ใบ ทำให้การฟุ้งของสารละลายทำปฏิกิริยาได้ดี

ข. อุณหภูมิ

ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Al₂(OH)₃Cl₃) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งผลของอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม

ตามผลของความเร็รรอบที่สูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวการสัมผัสทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุดทำให้อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามความเร็รรอบที่ใช้

เช่นเดียวกับการทดลองของ M.D. Grau [23] ที่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลงเมื่อเวลามากขึ้นอุณหภูมิจะมีค่าลดลง ซึ่งในช่วงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเกิดได้ดี



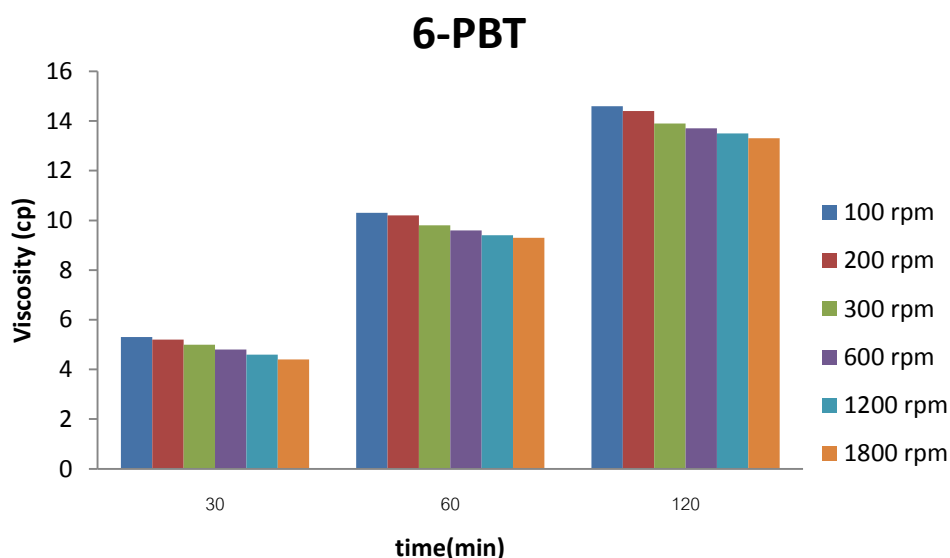
รูปที่ 4. 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็รรอบต่างๆ

ค. ความหนืด

ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผลของการผสมที่ความเร็รรอบต่างๆจึงมีผลต่อความหนืดที่เปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติความต้านทานการไหลของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งในปฏิกิริยานี้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่เป็นของแข็งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาในนาที่ที่ 30 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็รรอบ ส่วนในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาในนาที่ที่ 60 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็รรอบเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ใบพายทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในช่วงสุดท้ายของปฏิกิริยาหลังจากขั้นตอนปรับสภาพค่าความเป็นกรดพบว่าในนาที่ที่ 120 ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยที่

แนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากผลของความหนืดที่เพิ่มขึ้น ใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° จึงเหมาะสมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในแนวรัศมีและแนวแกน[9]

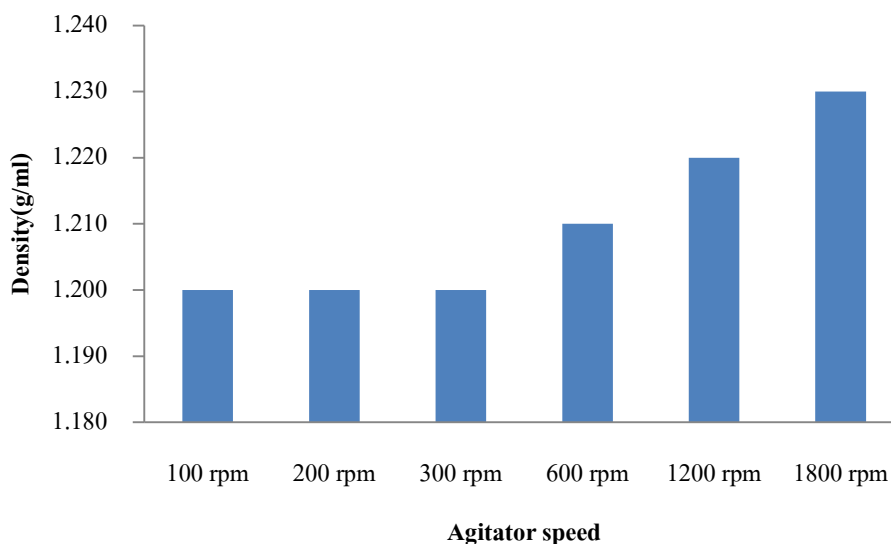


รูปที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ง. ความหนาแน่น

คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และความหนาแน่นจะแปรผันได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระบบ ดังนั้นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการปั่นกวนโดยที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนจะทำให้ประสิทธิภาพในการคายความร้อนต่างกัน ซึ่งผลจากใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° พบว่าแนวโน้มของค่าความหนาแน่นเมื่อใช้ความเร็วรอบที่ 100, 200 และ 300 รอบต่อนาทีไม่แตกต่างกันมากนักในขณะที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที พบว่าความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.22 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความเร็ว

รอบที่สูงขึ้นทำให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของการเปลี่ยนจากอะลูมิเนียมคลอไรด์($AlCl_3$)เป็นพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$)มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



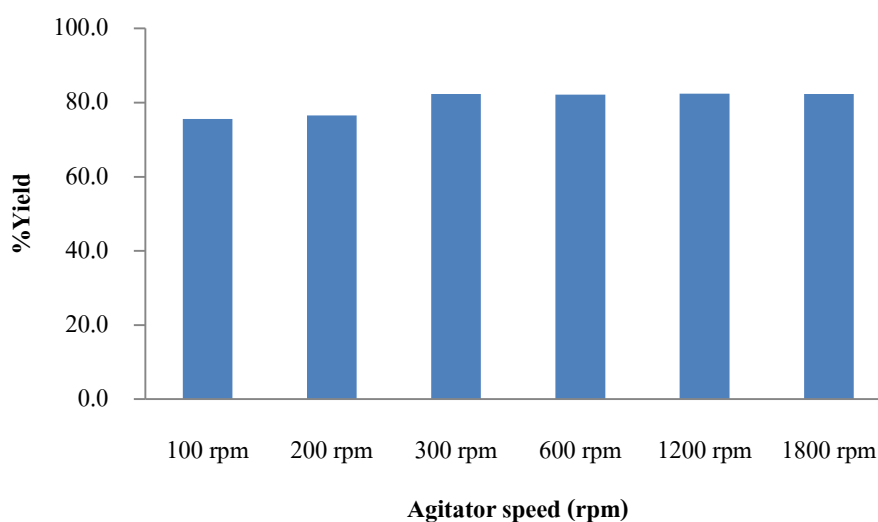
รูปที่ 4. 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° และความหนาแน่น

จ. ร้อยละผลได้

ร้อยละผลได้คือปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณสารตั้งต้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์โดยผลของการจากความเร็วรอบและใบพายจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ร้อยละผลได้ที่เกิดขึ้นจากการทดลองคือปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณสารตั้งต้น จากผลการทดลองใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าที่ความเร็ว 100, และ 200 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เพิ่มขึ้นแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา แต่ยังไม่พอกว่าที่ความเร็ว 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ซึ่งร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ที่มีความเร็วรอบมากกว่า 300 รอบต่อนาทีจะค่อนข้างใกล้เคียงกันแม้กระทั่งเพิ่มความเร็วรอบไปจนถึง 1800 รอบแล้วก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.23 นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็วรอบมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) โดยที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละผลที่ได้ผลสูงคือช่วงความเร็ว 300 รอบต่อนาทีสำหรับใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°

วิจัยนี้มีผลเช่นเดียวกับการทดลองของ P.S Keang [8] ได้ทำการทดลองขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนจาก 2 ลิตรไปสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน 75 ลิตร พบว่าแนวโน้มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกววนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4. 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

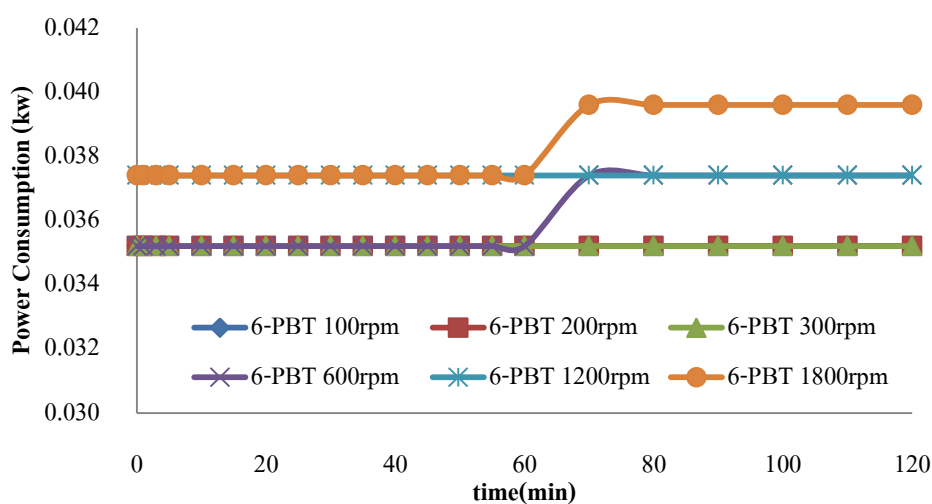
ฉ. ค่าพลังงานที่ใช้

ผลของพลังงานการใช้เป็นปัจจัยสำคัญของการผสมเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และใบกววนดังนั้นการเปลี่ยนแปลงผลของพลังงานจะขึ้นอยู่กับชนิดของใบพายและความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น[17]

การใช้พลังงานในการหมุนของใบพายในความเร็วรอบที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบ 100, 200, และ 300 รอบต่อนาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนจะคงที่ตลอดจนสิ้นสุดปฏิกิริยา ในขณะที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาทีค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนจะเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 1200 รอบต่อนาที พบว่าตั้งแต่เริ่มต้นปฏิกิริยา ค่าพลังงานมากกว่าที่ความเร็ว 100, 200, 300 และ 600 รอบต่อนาที ตามลำดับ จนสิ้นสุดปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาความเร็วรอบที่สูงขึ้นที่ 1800 รอบต่อนาที ช่วงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและพอลิเมอร์ไรเซชันค่าพลังงานการใช้มีค่าเท่ากับที่ความเร็ว 1200 รอบต่อนาที แต่จะเพิ่มขึ้นในช่วงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วงหลังจากนาที่ที่ 60 ลักษณะสภาวะจะเป็นของแข็งและของเหลว ดังนั้น การเพิ่มความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° เป็นการนำของแข็งขึ้นมาทางแนวแกนเพื่อให้มีการ

สัมพันธ์กับของเหลวได้มากขึ้น[9] ดังนั้นจึงเกิดแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้ พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวานจะสูงขึ้นดังแสดงในรูป 4.24

โดยงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ N.Dohi [24] ที่ผลของพลังงานการใช้ ที่ ค่าเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง laminar และtransition จะคงที่แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ผลของเรย์โนลด์ เป็นแบบ turbulent

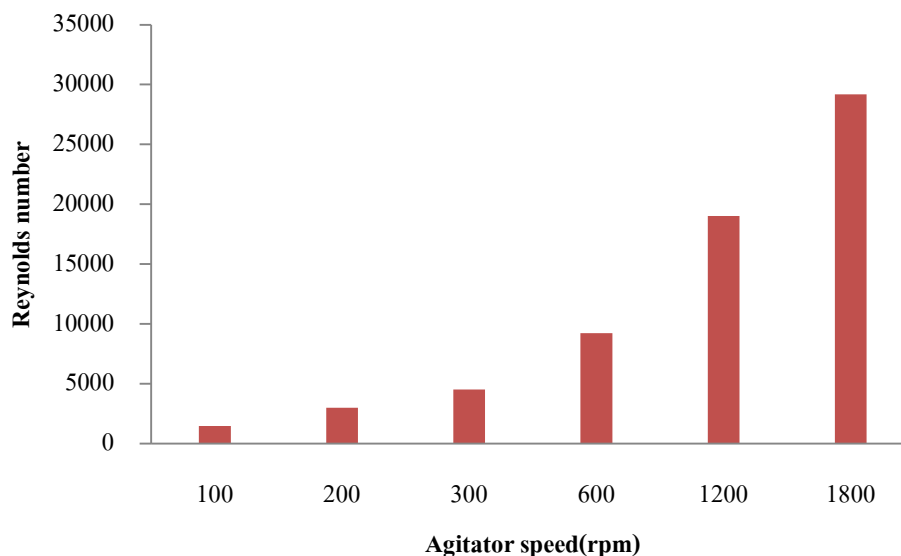


รูปที่ 4. 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ข. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)

ความเร็วรอบและขนาดของใบพายจะมีผลต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ดังนั้นการคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะนำไปใช้หาความเร็วรอบของระบบที่สองเมื่อมีการขยายขนาดจากระบบที่หนึ่งไปเป็นระบบที่ 2

จากการทดลองทำให้รู้ถึงประสิทธิภาพของการไหลในถังปฏิกรณ์ว่าเป็นการไหลชนิดใด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการผสมในถังปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่าที่ 100, 200 รอบต่อนาทีจะอยู่ในช่วงของ laminar flow ความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาที อยู่ในช่วงของ transition flow และความเร็วรอบ 1200 และ 1800 รอบต่อนาที อยู่ในช่วงของ turbulent flow ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการผสมที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° พบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง Transition phase



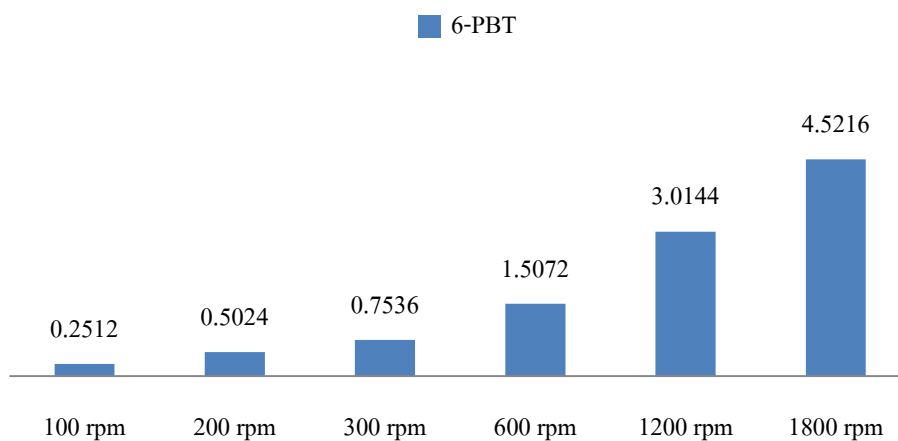
รูปที่ 4. 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ช. ความเร็วที่ปลายใบพาย (Impeller tip speed)

ประสิทธิภาพของการปั่นกวนที่ปลายใบพายการวิเคราะห์ค่า Impeller tip speed ตามรูปที่ 4.26 โดยการคำนวณตามสมการ (2.27) เพื่อนำไปสู่การขยายขนาดในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร พบว่าใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° มีผลต่อร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ซึ่งพบว่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที จะให้ค่าร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 0.7536 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใบพายชนิดนี้

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Stephenie [25] ใช้การขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ โดยให้ ค่า Impeller tip speed คงที่ 0.56 เมตรต่อวินาที

Impeller Tip speed (ms⁻¹)



รูปที่ 4. 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

จากผลการทดลองเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเร็วรอบต่างๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกเมื่อแตกตัวมีความว่องไวสูงดังนั้นเมื่อความเร็วรอบตั้งแต่ 100 รอบขึ้นไปสามารถทำให้กรดไฮโดรคลอริกแตกตัวได้ดีเพื่อทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หากพิจารณาความเร็วรอบที่ใช้ในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 300 รอบต่อนาทีเนื่องจากผลของร้อยละผลได้สูงที่สุด และผลของพลังงานจะคงที่

4.2.3 การศึกษาใบพายชนิด Rushton Turbine

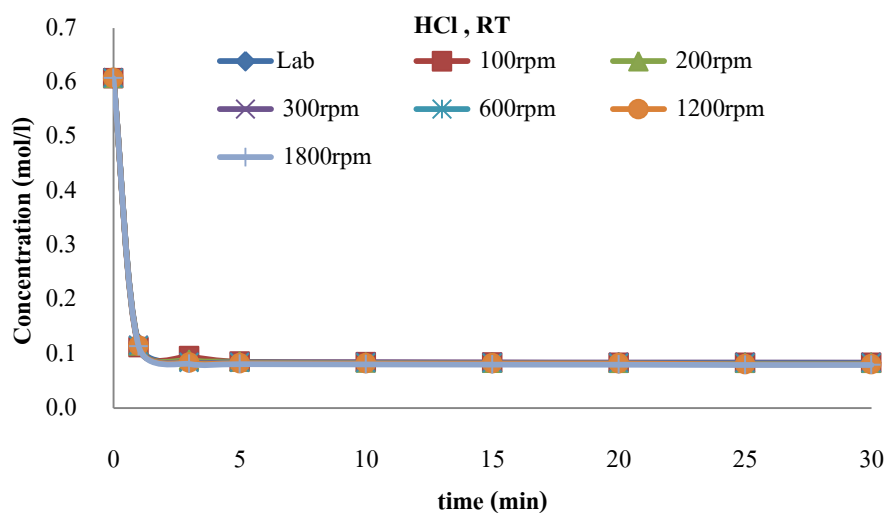
ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

การศึกษาผลของใบพายชนิด Rushton Turbine โดยที่สัดส่วนโมลและอุณหภูมิที่ได้จากการหาสถานะที่เหมาะสม โดยที่ปัจจัยระหว่างผลการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์นั้นคือการผสม ดังนั้นสถานะความเร็วรอบในการหมุนที่ศึกษาคือ 100, 200, 300, 600, 1200, และ 1800 รอบต่อนาที

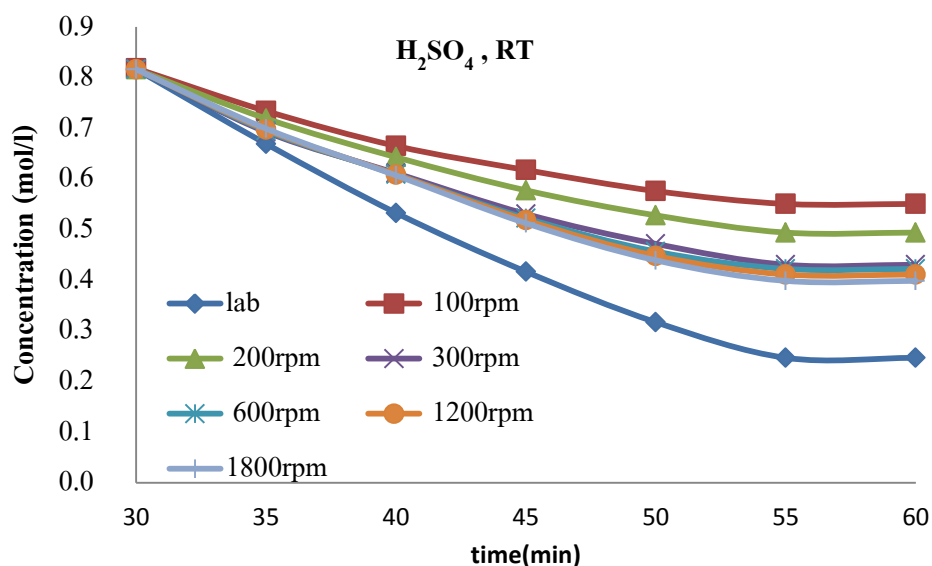
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อนำใบพายชนิด Rushton Turbine มาใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงเวลาที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ ที่ความเร็ว 100, 200, 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ถูกจับด้วยพันธะออนิกทั้งคู่ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนโดยจะเกิดขึ้นเร็วมาก หากเปรียบเทียบปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เหลืออยู่ของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขณะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCL) บางส่วนที่กลายเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนยังไม่ได้ถูกการควบแน่นดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวนั้นจะมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คืออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าอิทธิพลของชนิดใบพายส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยที่ความเร็ว 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที มีแนวโน้มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ลดลงมากกว่าความเร็วรอบ 100 และ 200 รอบต่อนาที หากพิจารณาความเร็วรอบที่สูงกว่า 300 รอบต่อนาทีพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน หากพิจารณาความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีพบว่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยกว่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ส่วนความเร็ว 200 รอบต่อนาที น้อยกว่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาทีขึ้นไป นั้นแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะมีอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) อยู่ในช่วงของความเร็ว 300 รอบต่อนาที ซึ่งถ้าเพิ่มความเร็วรอบมากกว่านี้ผลการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพจะลดลงด้วยดังนั้นความ

เข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 300 รอบต่อนาทีเมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine



รูปที่ 4. 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ



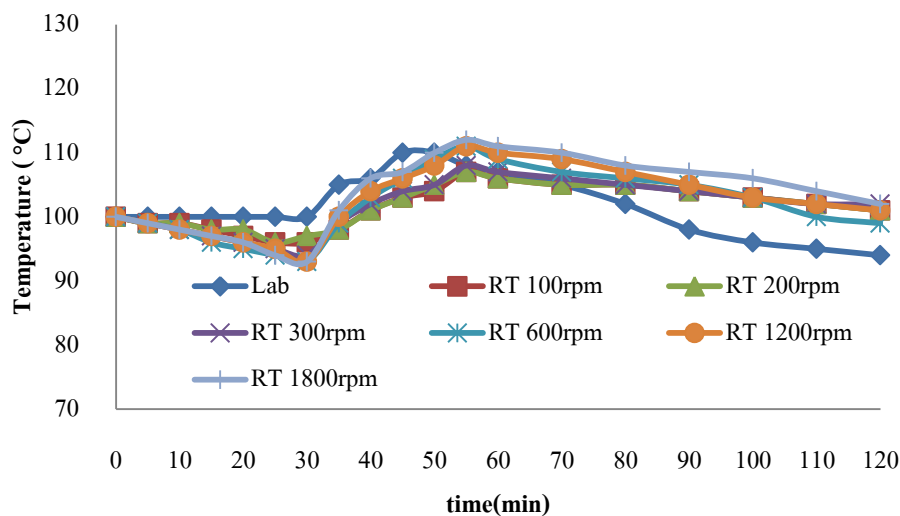
รูปที่ 4. 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Rushton Turbine ซึ่งมีทิศทางการผสมในแนวรัศมี[9] ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดดีที่สุดที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ได้ผลดีที่สุดแต่ไม่ใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพาย Rushton Turbine มีประสิทธิภาพต่ำที่ทำให้สารละลายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากใบพายส่งผลในแนวรัศมีเพียงอย่างเดียว

ข. อุณหภูมิ

ใบพายชนิด Rushton Turbine ซึ่งคุณสมบัติในการปั่นกวนในแนวรัศมี ดังนั้นส่งผลต่อปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ดังแสดงในรูปที่ 4.29 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งผลของอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามผลของความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวการสัมผัสทำปฏิกิริยาที่ดีขึ้นทำให้อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามความเร็วรอบที่ใช้

เช่นเดียวกับการทดลองของ M.D. Grau [23] ที่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลงเมื่อเวลามากขึ้นอุณหภูมิจะมีค่าลดลง ซึ่งในช่วงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นเกิดได้ดี

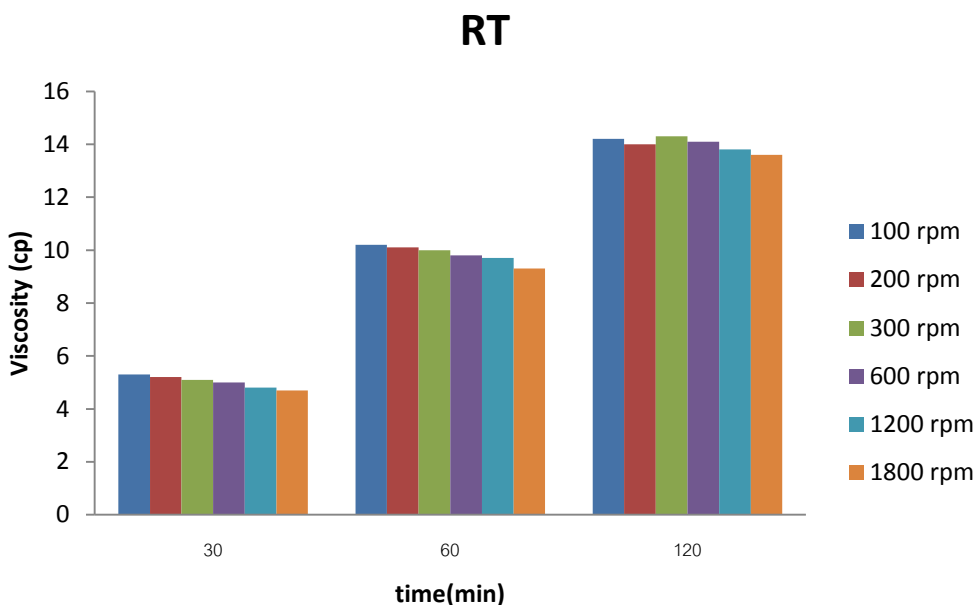


รูปที่ 4. 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ค. ความหนืด

ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผลของการผสมที่ความเร็วรอบต่างๆจึงมีผลต่อความหนืดที่เปลี่ยนแปลง

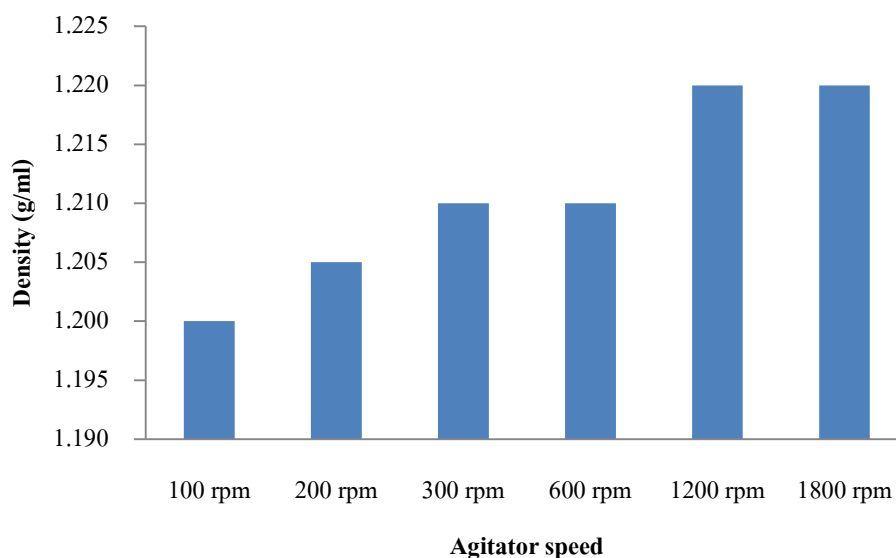
ความหนืดที่เพิ่มขึ้นหมายถึงถึงคุณสมบัติความต้านทานการไหลของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งในปฏิกริยานี้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ที่เป็นของแข็งจะทำปฏิกริยากัดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งหลังจากสิ้นสุดปฏิกริยาในนาที่ที่ 30 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบส่วนในปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกริยาไฮโดรไลซิส โดยหลังจากสิ้นสุดปฏิกริยาในนาที่ที่ 60 พบว่าแนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ใบพายทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในช่วงสุดท้ายของปฏิกริยาหลังจากขั้นตอนปรับสภาพค่าความเป็นกรดพบว่าในนาที่ที่ 120 ผลของความหนืดสูงขึ้นกว่าปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยที่แนวโน้มของค่าความหนืดลดลงเล็กน้อยที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4. 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความหนืดในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ง. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และจะแปรผันได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้น ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในระบบ ดังนั้นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการปั่นกวนโดยที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนจะทำให้ประสิทธิภาพในการคายความร้อนต่างกัน ซึ่งผลจากใบพายชนิด Rushton Turbine พบว่าแนวโน้มของค่าความหนาแน่นเมื่อใช้ความเร็วรอบที่ 100, 200, 300 และ 600 รอบต่อนาทีไม่แตกต่างกันมากนักในขณะที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1200 และ 1800 รอบต่อนาที พบว่าความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.31 นั้นแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของการเปลี่ยนจากอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) เป็นพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



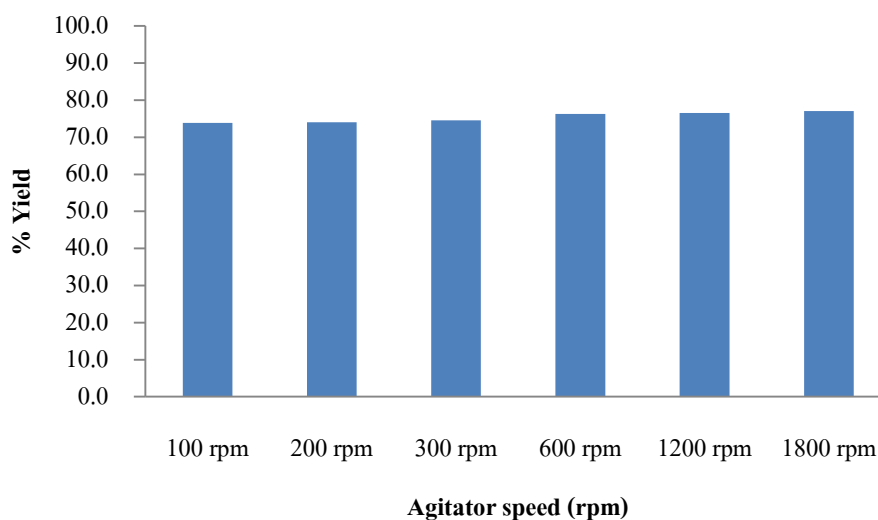
รูปที่ 4. 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบพายชนิด Rushton Turbine และความหนาแน่น

จ. ร้อยละผลได้

ร้อยละผลได้คือปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณสารตั้งต้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์โดยผลของการจากความเร็รรอบและใบพายจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ร้อยละผลได้ที่เกิดขึ้นจากการทดลองคือปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณสารตั้งต้น จากผลการทดลองใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าที่ความเร็ว 100, 200 และ 300 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เพิ่มขึ้นแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา แต่อย่างน้อยกว่าที่ความเร็ว 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ซึ่งร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ เนื่องจากทิศทางการไหลจะไปตามรัศมี ซึ่งไม่มีการไหลในแนวแกน ดังนั้นการเพิ่มความเร็รรอบสูงๆ ทำให้ลักษณะการไหลอยู่ในทิศทางแบบปั่นป่วน โดยทำให้ทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.32 นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็วรอบมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) โดยที่การเพิ่มความเร็รรอบทำให้ร้อยละผลได้ผลสูงขึ้นสำหรับใบพายชนิด Rushton Turbine

P.S Keang [8] ได้กล่าวว่าการเพิ่มความเร็รรอบของใบพายชนิด Rushton Turbine จะทำให้ผลของการปั่นกวตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นและทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเร็รรอบจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองชนิด



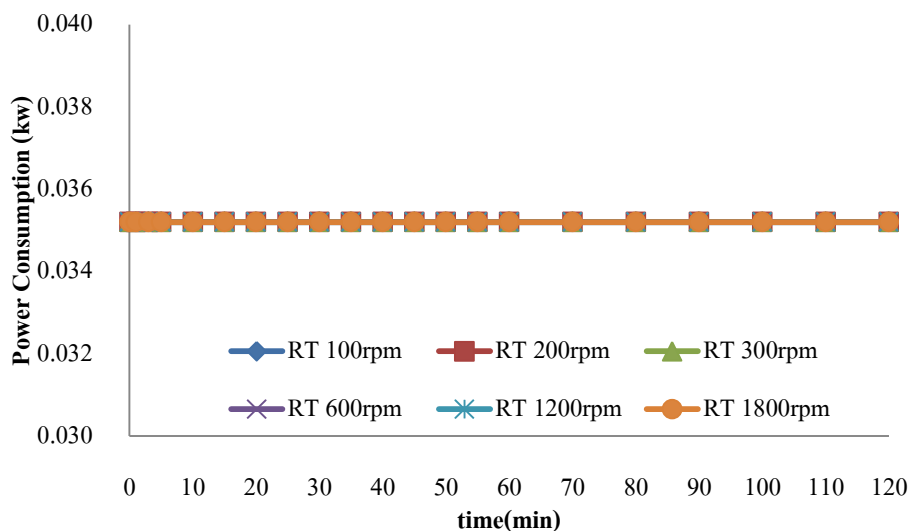
รูปที่ 4. 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

จ. ค่าพลังงานที่ใช้

ผลของพลังงานการใช้เป็นปัจจัยสำคัญของการผสมเมื่อทำการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และใบกวนดังนั้นการเปลี่ยนแปลงผลของพลังงานจะขึ้นอยู่กับชนิดของใบพายและความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น

ผลของการใช้พลังงานในการหมุนของใบพายในความเร็วรอบที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบ 100, 200, 300, 600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะคงที่ตลอดจนถึงที่สุดปฏิกิริยา ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าพลังงานที่ใช้ไม่มีผลมากนักในแนวรัศมี ดังนั้นค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะคงที่ดังแสดงในรูป 4.33

จากการศึกษาของRouzbeh Jafari [26]พบว่าที่ความเข้มข้นของของแข็งเท่ากันจะมีผลต่อพลังงานต่อการผสมในทิศทางแนวรัศมีน้อยมากเมื่อใช้ใบพายชนิด RT ที่ความเร็วรอบเท่ากัน

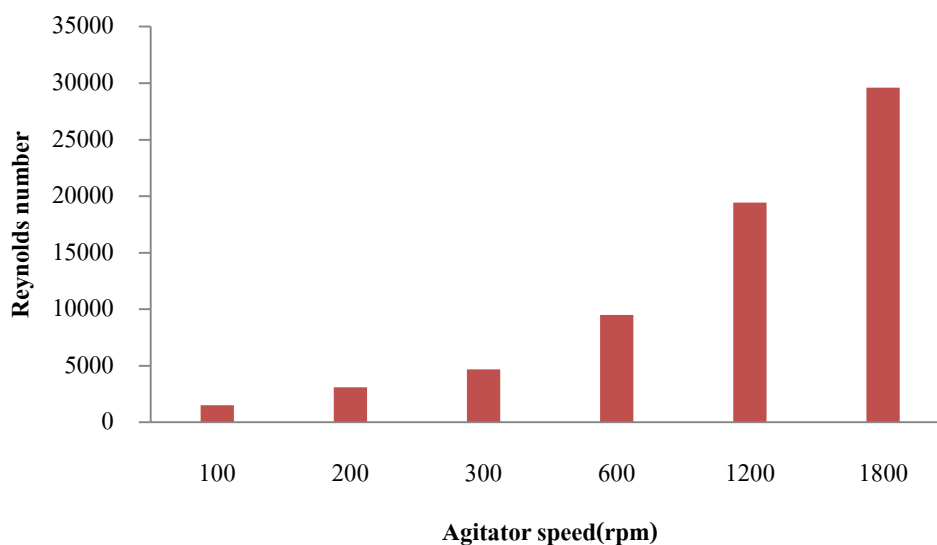


รูปที่ 4. 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ข. ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)

ความเร็วรอบและขนาดของใบพายจะมีผลต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ดังนั้นการคำนวณหาค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์จะนำไปใช้หาความเร็วรอบของระบบที่สองเมื่อมีการขยายขนาดจากระบบที่หนึ่งไปเป็นระบบที่ 2

จากการทดลองทำให้รู้ถึงประสิทธิภาพของการไหลในถังปฏิกรณ์ว่าเป็นการไหลชนิดใดซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการผสมในถังปฏิกรณ์ จากการทดลองพบว่าที่ 100, 200 รอบต่อนาทีจะอยู่ในช่วงของ laminar flow ความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาที [9] อยู่ในช่วงของ transition flow และความเร็วรอบ 1200 และ 1800 รอบต่อนาที อยู่ในช่วงของ Turbulent flow ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการผสมที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ของใบพายชนิด Rushton Turbine พบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง Turbulent flow



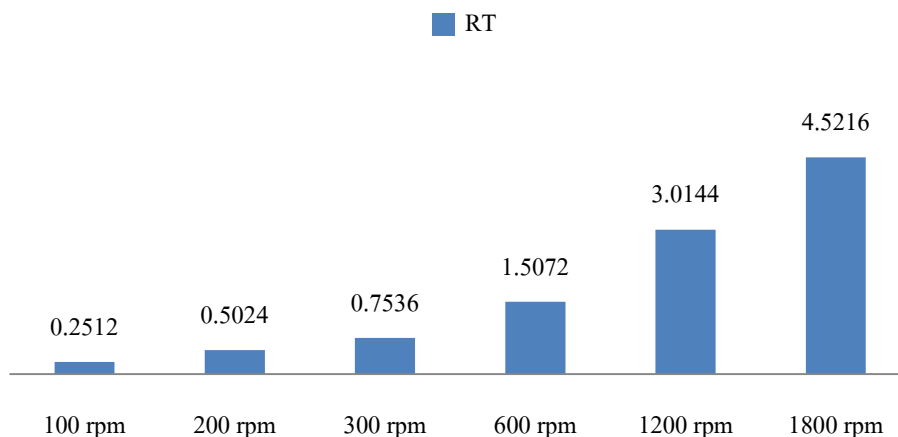
รูปที่ 4. 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ช. ความเร็วที่ปลายใบพาย (Impeller tip speed)

ประสิทธิภาพของการปั่นกวนที่ปลายใบพายการวิเคราะห์ค่า Impeller tip speed ตามรูปที่ 4.35 เพื่อนำไปสู่การขยายขนาดในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร พบว่าใบพายชนิด Rushton Turbine มีผลต่อร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ซึ่งพบว่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที จะให้ค่าร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 4.5216 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใบพายชนิดนี้

P.S Keang [8] ได้ทำการทดลองโดยใช้ผลของ Impeller tip speed คำนวณการขยายขนาดใบพายในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวนขนาด 2 ลิตร และ 75 ลิตร โดยใช้ค่า Impeller tip speed ตามสมการ (2.27) ซึ่งเท่ากับ 0.69 เมตรต่อวินาที และใช้สภาวะของการทดลองเหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวนขนาด 2 ลิตร

Impeller Tip speed (ms⁻¹)

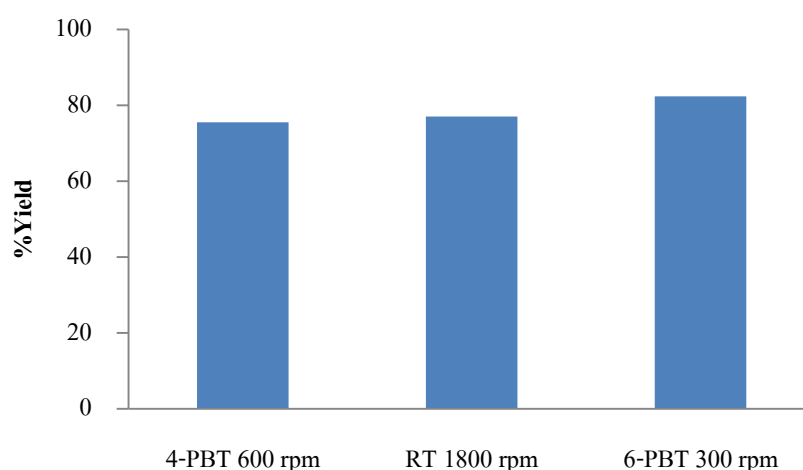


รูปที่ 4. 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วรอบที่ปลายใบกวนที่ได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่าง

จากผลการทดลองเมื่อใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเร็วรอบต่างๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจาก กรดไฮโดรคลอริกเมื่อแตกตัวมีความว่องไวสูงดังนั้นเมื่อความเร็วรอบตั้งแต่ 100 รอบขึ้นไปสามารถทำให้กรดไฮโดรคลอริกแตกตัวได้ดีเพื่อทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หากพิจารณาความเร็วรอบที่ใช้ในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 1800 รอบต่อนาทีเนื่องจากผลของร้อยละผลได้สูงที่สุด และผลของพลังงานจะคงที่

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความเร็วรอบและชนิดใบพายพบว่าที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) จากการใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ให้ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) สูงที่สุด โดยมีร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เท่ากับ 82.4 ส่วนการใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที โดยมีร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เท่ากับ 75.6 และการใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เท่ากับ 77.0 ในขณะที่ผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาด 250 มิลลิลิตรพบว่าร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เท่ากับ 83.55 ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ดังนั้นผลของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) ที่ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาด 250 มิลลิลิตรนั้นคือใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที

จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดดังนั้นก็จึงนำไปใช้ในการศึกษาการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ในขนาด 10 ลิตรและ 25 ลิตรต่อไป ซึ่งการคำนวณความเร็วรอบที่ใช้ในการขยายขนาดสามารถใช้หลักการขยายขนาดได้โดยกำหนดให้ Reynolds number , Power per unit volume และ Impeller tip speed คงที่จึงสามารถคำนวณความเร็วรอบได้ตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4. 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° , Pitched 6-Blade Turbine at 45° และ Rushton Turbine

ตารางที่ 2.5 ความเร็วรอบที่นำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ในขนาด 10 ลิตรและ 25 ลิตรโดยใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°

ขนาดเครื่องปฏิกรณ์ (ลิตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางใบพาย (เมตร)	พารามิเตอร์คงที่		
		ความเร็วปลาย	กำลังต่อปริมาตร	เรย์โนลด์ นัมเบอร์
		ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)
1	0.048	300	300	300
10	0.108	133	175	59
10	0.108	99	145	33

งานวิจัยนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ [9] กำหนดให้ Reynolds number , Power per unit volume และ Impeller tip speed คงที่ เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้เป็นฟังก์ชันของ

ความเร็วรอบและเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพาย เมื่อกำหนดค่าคงที่จะสามารถหาความเร็วรอบของใบพายในระดับขยายขนาดได้

4.3 ผลิตพอลีสลุ่มิเนียมคลอไรต์โดยใช้ใบพายและความเร็วรอบที่คัดเลือกในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเพิ่มขยาย 10 และ 25 ลิตร

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอนตามขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ คือ 10 ลิตรและ 25 ลิตร ซึ่งแต่ละการทดลองจะมีสภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่ ดังนั้นที่เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรใช้ความเร็วรอบ 59 ,133 และ175 รอบต่อนาทีเป็นการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เช่นเดียวกับการทดลองที่2 ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตรใช้ความเร็วรอบ 33 ,99 และ144 รอบต่อนาที โดยทั้ง 2 ขั้นตอนใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45°จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลีสลุ่มิเนียมคลอไรต์

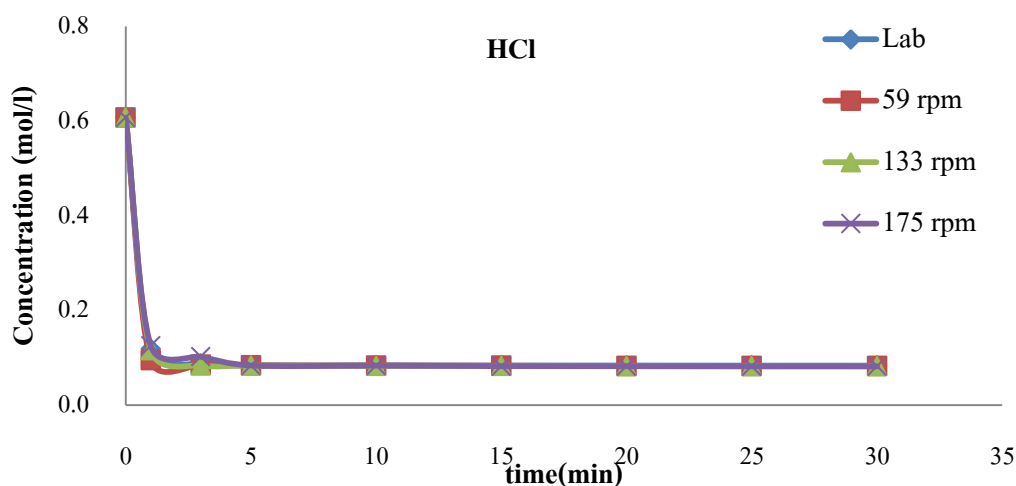
4.3.1 การศึกษาการผลิตพอลีสลุ่มิเนียมคลอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

จากการทดลองผลิตพอลีสลุ่มิเนียมคลอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ได้จากการคำนวณตามค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume นั้นคือ 59 ,133 และ 175 รอบต่อนาที

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

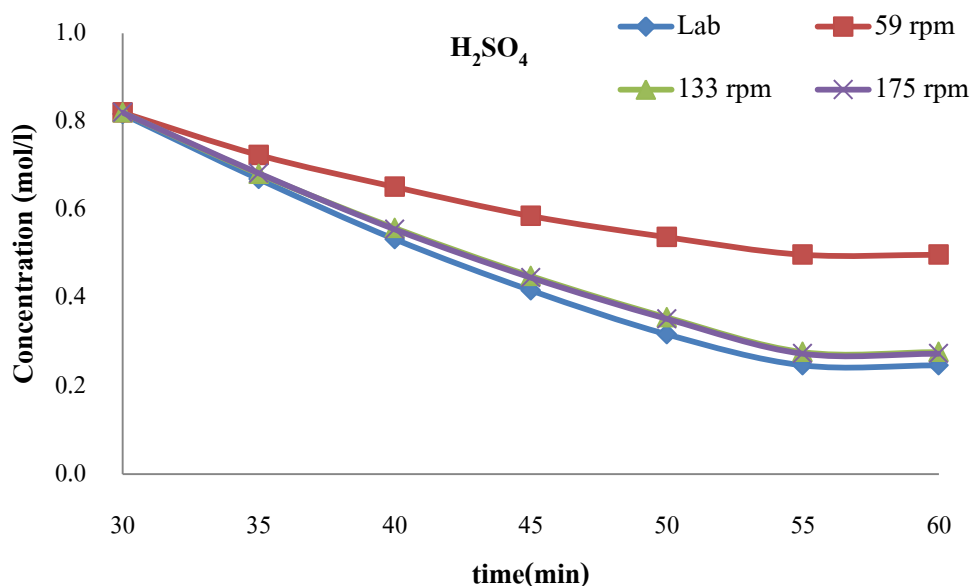
เมื่อพิจารณาใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.37 พบว่าในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่ความเร็ว 133 และ175 รอบต่อนาที มีแนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงนาที่ที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกความเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ถูกจับด้วยพันธะอ็อกซิเจนทั้งคู่ ดังนั้นการทำปฏิกิริยา จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนโดยจะเกิดขึ้นเร็วมาก หากเปรียบเทียบปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เหลืออยู่ของกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขณะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCL) บางส่วนที่กลายเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนยัง

ไม่ได้ถูกการควบแน่นดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว นั้นจะมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 4. 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คืออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าอิทธิพลของชนิดใบพายส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยที่ความเร็ว 133 และ 175 รอบต่อนาที พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่การเปลี่ยนแปลงยังน้อยกว่าในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่ลดความเร็วรอบที่ 59 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยมากเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 133 และ 175 รอบต่อนาที ที่เวลาเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่า ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันประสิทธิภาพของอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จะสูงเมื่อมีความเร็วรอบที่สูงกว่า 175 รอบต่อนาที



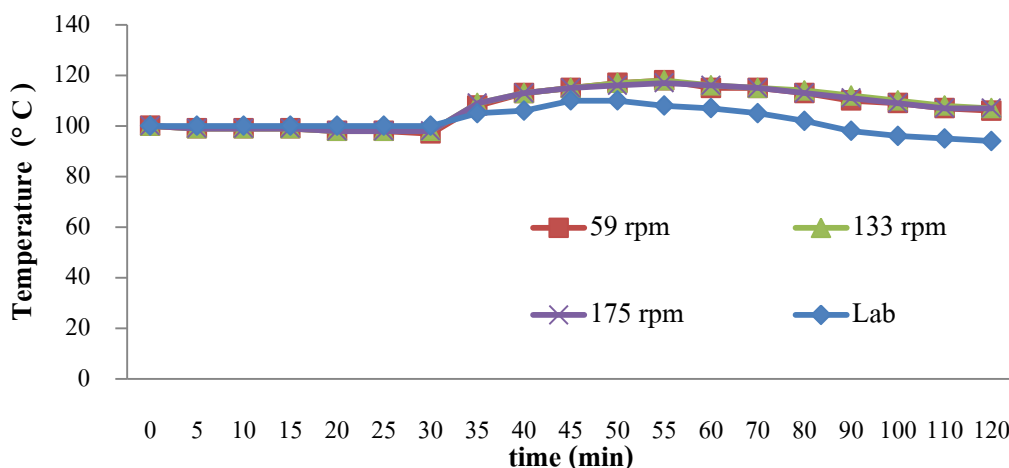
รูปที่ 4. 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° ในเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร ซึ่งมีทิศทางการผสม ทั้งแนวแกนและรัศมี [9] ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดดีที่สุดที่ความเร็ว 175 รอบต่อนาที ได้ผลใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° มีประสิทธิภาพสูงที่ทำให้สารละลายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากใบพาย 6 ใบ ทำให้การฟุ้งของสารละลายทำปฏิกิริยาได้ดี

ข. อุณหภูมิ

ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็วรอบที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน แต่จะ

แตกต่างจากอุณหภูมิที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลของอุณหภูมิที่สูงจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเกิดได้รวดเร็วขึ้น

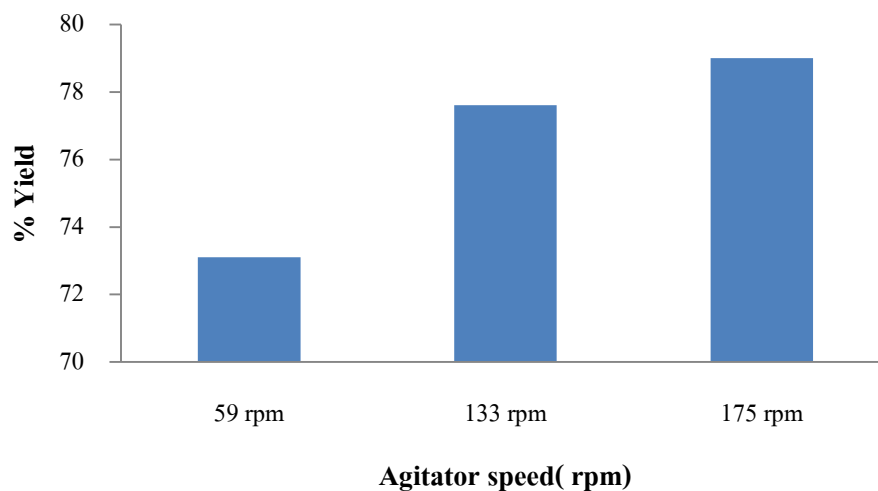


รูปที่ 4. 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

โดยอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร สูงจะมีอุณหภูมิสูงกว่าในเครื่องแก้วเนื่องจากพื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในเครื่องแก้ว[15]

ค. ร้อยละผลได้

ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณของสารตั้งต้น จากผลการทดลองใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าที่ความเร็ว 175 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) มีร้อยละผลได้สูงสุดเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ในขณะที่ความเร็ว 133 และ 59 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็วรอบมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) โดยที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละผลได้สูงสุดที่ความเร็ว 175 รอบต่อนาทีสำหรับใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร แต่อย่างน้อยก็ว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการและเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร เช่นเดียวกับ P.S Keang [8, 27] ได้กล่าวว่าการเพิ่มความเร็วรอบของใบพาย จะทำให้ผลของการปั่นกวตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นและทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองชนิด

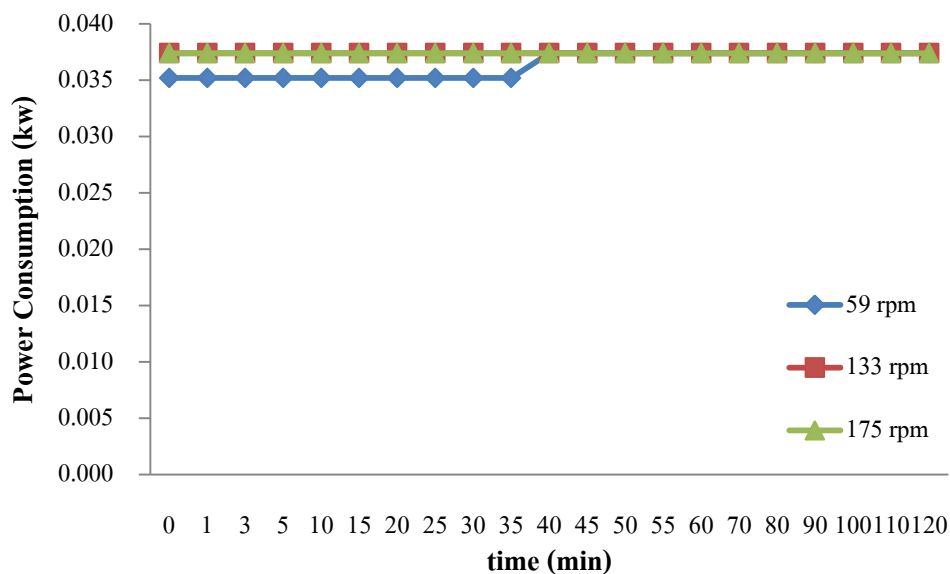


รูปที่ 4. 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ง. ค่าพลังงานที่ใช้

ผลของการใช้พลังงานในการหมุนของใบพายในความเร็วรอบที่ต่างกัน เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 59 , 133 และ 175 รอบต่อนาทีพบว่า ในช่วงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่ความเร็วที่ 59 รอบต่อนาที มีค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนน้อยกว่าที่ความเร็วรอบที่ 133 และ 175 รอบต่อนาที แต่เมื่อเข้าสู่กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ผลปรากฏว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนเท่ากันทุกความเร็วรอบ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ช่วงของการใช้พลังงานจะคงที่แม้ว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยสำหรับค่าพลังงานจะแปรผันกับความเร็วรอบยกกำลังสาม $P \propto N^3$ นั่นคือจะมีช่วงของพลังงานตามความเร็วรอบต่างๆดังแสดงในรูป 4.41

งานวิจัยนี้ สอดคล้อง N.Dohi [24] ที่ผลของพลังงานการใช้ ที่ ค่าเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง laminar และ transition จะคงที่แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ผลของเรย์โนลด์ เป็นแบบ turbulent



รูปที่ 4. 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

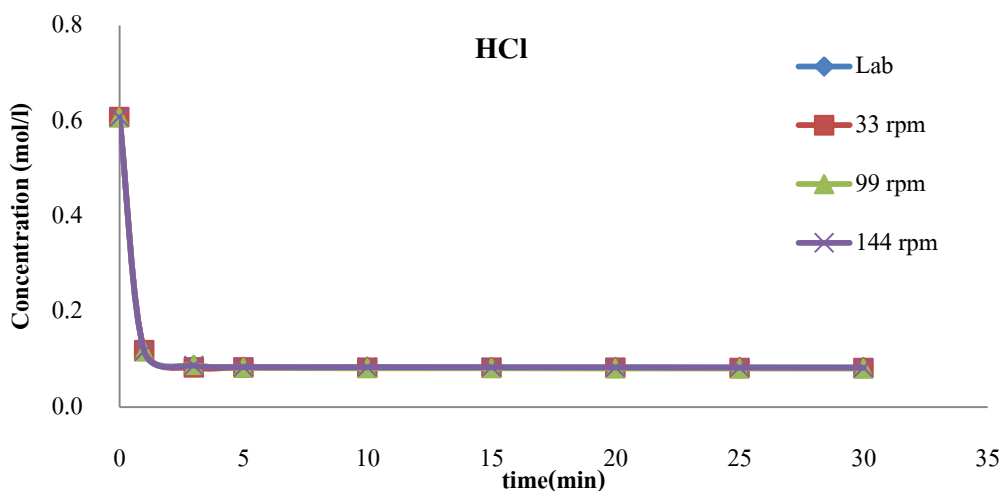
จากผลการทดลองเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° เครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเร็วรอบต่างๆมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจาก กรดไฮโดรคลอริกเมื่อแตกตัวมีความว่องไวสูงดังนั้นเมื่อความเร็วรอบตั้งแต่ 59 รอบขึ้นไปสามารถทำให้กรดไฮโดรคลอริกแตกตัวได้ดีเพื่อทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หากพิจารณาความเร็วรอบที่ใช้ในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 175 รอบต่อนาทีเนื่องจากผลของร้อยละผลได้สูงที่สุด และผลของพลังงานจะคงที่

4.3.2 การศึกษาการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร

จากการทดลองผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนของใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ได้จากการคำนวณตามค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume นั้นคือ 33 ,99 และ 144 รอบต่อนาที

ก. การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCL) และ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

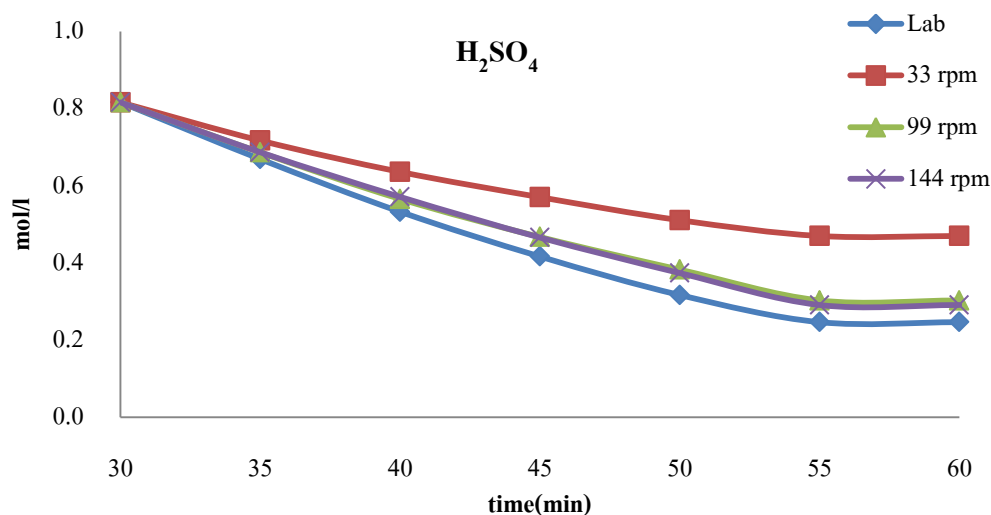
เมื่อพิจารณาใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.42 พบว่า ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พบว่า แนวโน้มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงนาทีที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกความเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.63 ทั้งนี้ เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ถูกจับด้วยพันธะอนิกทั้งคู่ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนโดยจะเกิดขึ้นเร็วมาก หากเปรียบเทียบปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาและส่วนที่เหลืออยู่ของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ไม่สอดคล้องกันเนื่องจากขณะทำปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก (HCl) บางส่วนที่กลายเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนยังไม่ได้ถูกการควบแน่นดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวนั้นจะมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเมื่อใช้ใบพัดชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ



รูปที่ 4. 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° ในเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร ซึ่งมีทิศทางการผสม ทั้งแนวแกนและรัศมี ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดดีที่สุดที่ความเร็ว 175 รอบต่อนาที ได้ผลใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° มีประสิทธิภาพสูงที่ทำให้สารละลายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากใบพาย 6 ใบ ทำให้การฟุ้งของสารละลายทำปฏิกิริยาได้ดี

เมื่อพิจารณาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คืออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าอิทธิพลของชนิดใบพายส่งผลต่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยที่ความเร็ว 99 และ 144 รอบต่อนาที พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่การเปลี่ยนแปลงยังน้อยกว่าในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่ลดความเร็วรอบที่ 33 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยมากเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 99 และ 144 รอบต่อนาที ที่เวลาเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่า ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ประสิทธิภาพของอัตราการลดลงของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จะสูงเมื่อมีความเร็วรอบที่สูงกว่า 144 รอบต่อนาที



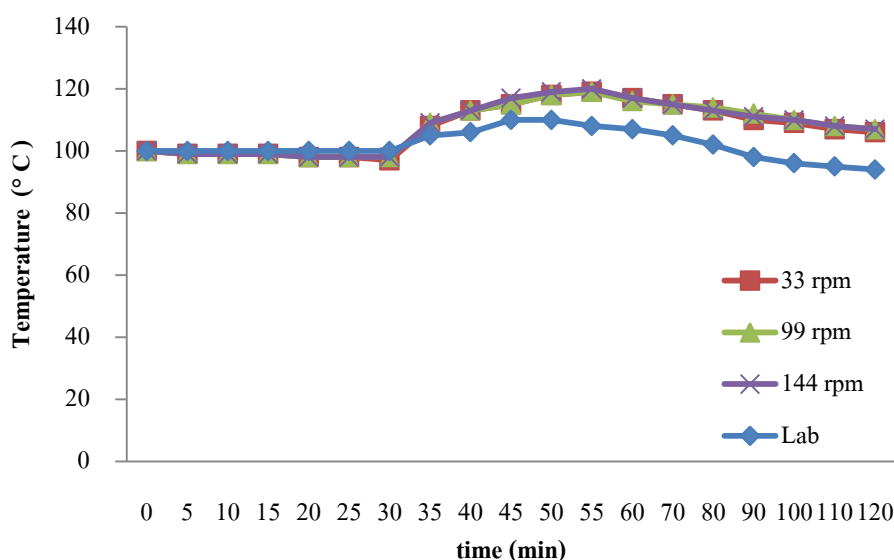
รูปที่ 4. 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาการผสมโดยใช้ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° ในเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร ซึ่งมีทิศทางการผสม ทั้งแนวแกนและรัศมี[9] ในกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ในระบบมีความหนืดสูงขึ้น ในการทดลองพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเกิดขึ้นที่เร็วที่สุดที่ความเร็ว 33-144 รอบต่อนาที ได้ผลใกล้เคียงกับในเครื่องแก้วนั้นแสดงว่า ใบพาย Pitched 6-Blade Turbine at 45° มีประสิทธิภาพสูงที่ทำให้สารละลายในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อมีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากใบพาย 6 ใบ ทำให้การฟุ้งของสารละลายทำปฏิกิริยาได้ดี

ข. อุณหภูมิ

ปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องในระบบเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.44 จะพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมื่ออะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ค่าอุณหภูมิจะเริ่มลดลงนาที่ที่ 60 เป็นต้นไป

ทั้งนี้อิทธิพลของความเร็รรอบที่มีต่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน แต่จะแตกต่างจากอุณหภูมิที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลของอุณหภูมิที่สูงเกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสของเครื่องปฏิกรณ์ใหญ่ขึ้นดังนั้นทำให้อุณหภูมิจะสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่าซึ่งผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้รวดเร็วขึ้น



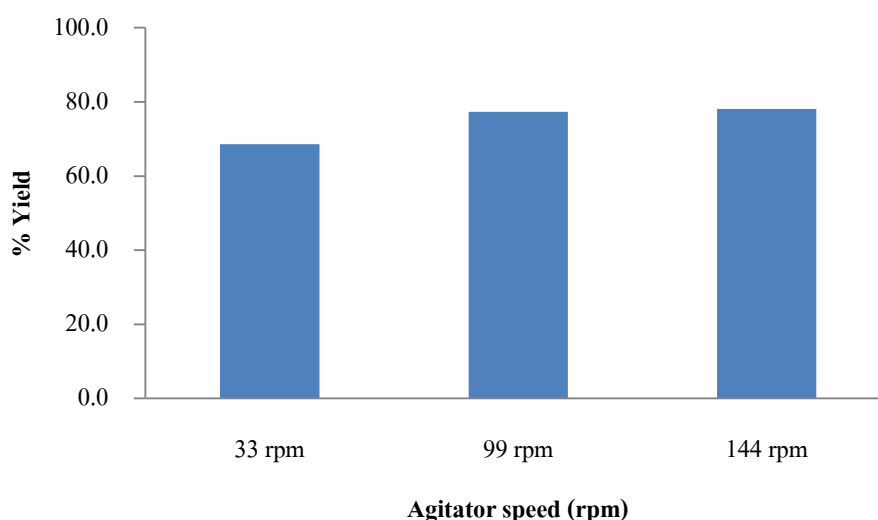
รูปที่ 4. 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยายเครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ซึ่งหากเปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละขนาดของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 25 ลิตร มีอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดซึ่งสอดคล้องตามเครื่องปฏิกรณ์ ขยายขนาด [9]เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายโอนความร้อนมีมากและทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นกว่า

ค. ร้อยละผลได้

ปริมาณสารพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดจริงต่อปริมาณของสารตั้งต้น จากผลการทดลองใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ พบว่าที่ความเร็ว 144 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) มีร้อยละผลได้สูงสุดเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ในขณะที่ความเร็ว 99 และ 33 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.45 นั้นแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็รรอบมีผลต่อร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) โดยที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละผลได้สูงที่สุดที่ความเร็ว 144 รอบต่อนาทีสำหรับใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร แต่อย่างน้อยว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการและเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร

เช่นเดียวกับ P.S Keang[8, 27] ได้กล่าวว่าการเพิ่มความเร็วรอบของใบพายในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้ผลของการปั่นกวนตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นและทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเร็วรอบจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองชนิด



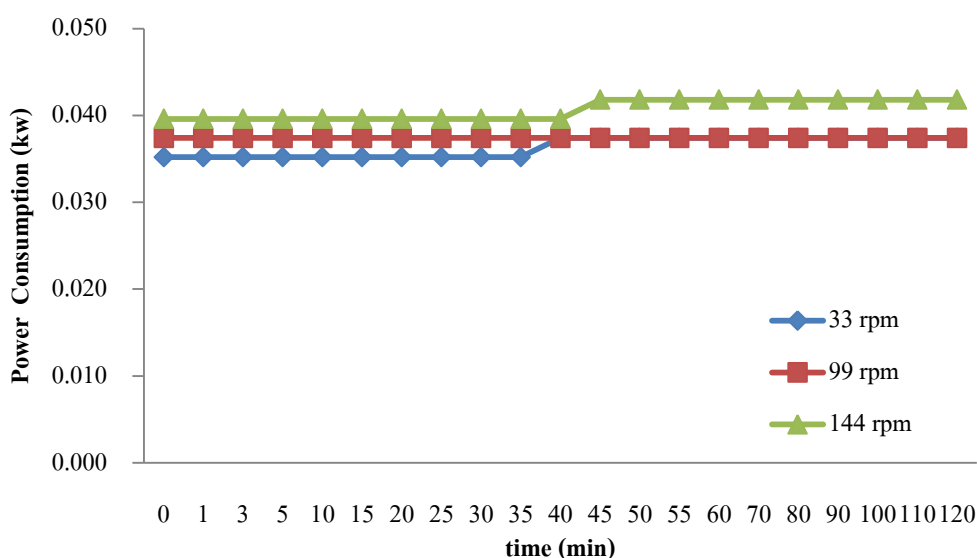
รูปที่ 4. 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและร้อยละผลได้ใน การทดลองระดับขนาดเพิ่มขึ้นขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

ง. ค่าพลังงานที่ใช้

ผลของการใช้พลังงานในการหมุนของใบพายในความเร็วรอบที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบ 33, 99, และ 144 รอบต่อนาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะแตกต่างกันในช่วงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยพบว่า ที่ความเร็ว 144 รอบต่อนาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนมีค่ามากกว่าที่ความเร็วที่ 99 และ 33 รอบต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่เริ่มกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน พบว่าความเร็ว 144 รอบต่อนาที ค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนที่ 33 รอบต่อนาทีค่าการใช้พลังงานมีค่าเท่ากับความเร็วที่ 99 รอบต่อนาที ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วงหลังจากนาที่ที่ 60 ลักษณะสถานะจะเป็นของแข็งและของเหลว ดังนั้น การเพิ่มความเร็วรอบของใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° เป็นการนำของแข็งขึ้นมาทางแนวแกนเพื่อให้มีการสัมผัสกับของเหลวได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้ พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะสูงขึ้นดัง

แสดงในรูป 4.46 โดยสำหรับค่าพลังงานจะแปรผันกับความเร็วยกกำลังสาม $P \propto N^3$ นั้นแสดงว่า จะมีช่วงของพลังงานตามความเร็วรอบต่างๆ

งานวิจัยนี้ สอดคล้อง N.Dohi [24] ที่ผลของพลังงานการใช้ ที่ ค่าเรย์โนลด์ อยู่ในช่วง laminar และ transition จะคงที่แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อ ผลของเรย์โนลด์ เป็นแบบ turbulent



รูปที่ 4. 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานที่ใช้ในการทดลองระดับขนาดเพิ่มขยาย เครื่องปฏิกรณ์ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ

พลังงานที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นซึ่ง สอดคล้องตามค่าพลังงานที่ใช้จะแปรผันตามขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน โดยขนาดของ เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนที่เพิ่มขึ้นจะต้องใช้พลังงานในการปั่นกววนมากขึ้น[15]

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับเพิ่มขยายขนาด

ในงานวิจัยนี้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ คือ 10 ลิตรและ 25 ลิตร ซึ่งแต่ละการทดลองจะมี สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบ ถึงผลของร้อยละผลได้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรพบว่า ผลจาก ความเร็วรอบที่นำมาใช้ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร ทุกความเร็วรอบได้ผลลัพธ์ของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ดังแสดงใน รูป 4.47 ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร เพื่อให้ได้ผลของ ร้อยละผลได้ออกมาให้ใกล้เคียงกันทั้งสามขนาด ดังนั้นความเร็วรอบเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดผลลัพธ์

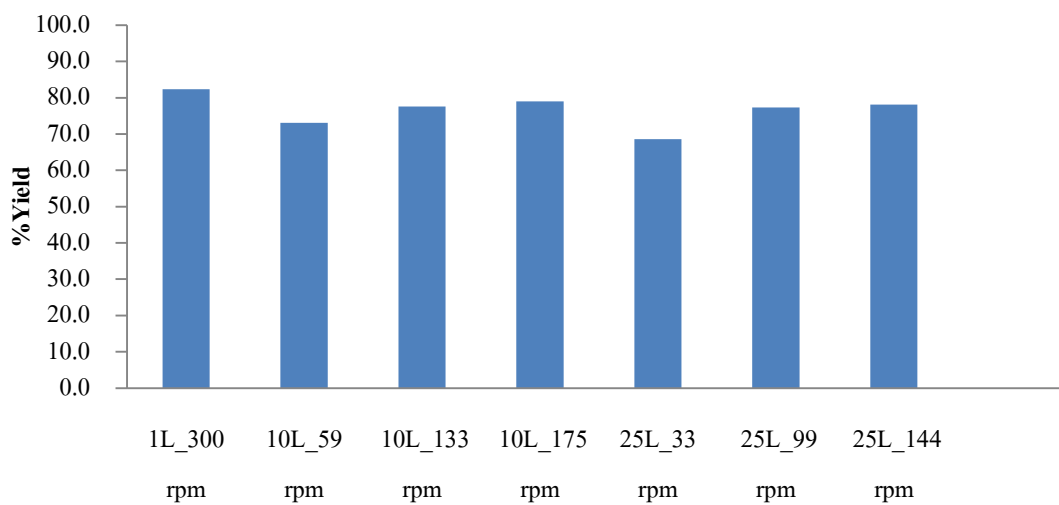
ที่ออกมาใกล้เคียงกัน ซึ่งในการปรับความเร็วรอบใหม่จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ของร้อยละผลได้ที่มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.6 สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่

ขนาดเครื่อง ปฏิกรณ์ (ลิตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางใบ พาย (เมตร)	พารามิเตอร์คงที่		
		ความเร็วปลาย	กำลังต่อปริมาตร	เรย์โนลด์นัมเบอร์
		ความเร็ว (รอบ)	ความเร็ว (รอบต่อ)	ความเร็ว (รอบต่อ)
1	0.048	300	300	300
10	0.108	133	175	59
25	0.145	99	144	33
n		1	0.66	2

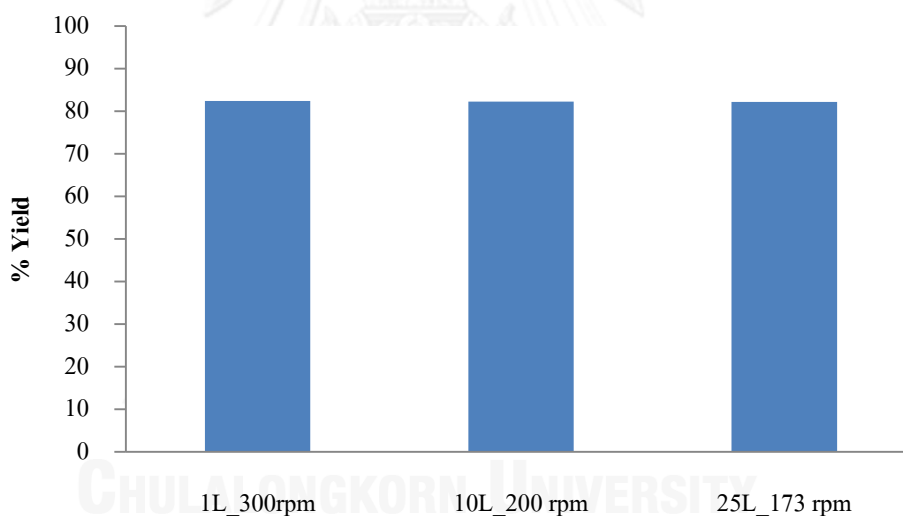
โดยจากตารางที่ 4.3 สามารถกำหนดความเร็วรอบให้โดยหาความสัมพันธ์ของฟรอยด์นัมเบอร์ ที่ $n = 0.5$ ซึ่งจะได้ความเร็วรอบใหม่ที่ 200 และ 173 รอบต่อนาทีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทำให้เห็นว่าผลของการปรับความเร็วรอบใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตรโดยที่ผลลัพธ์ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ออกมาใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรดังแสดงในรูป 4.48

ซึ่งการนำค่าฟรอยด์นัมเบอร์มาคำนวณหาความเร็วรอบใหม่เช่นเดียวกับการทดลองของ T.R. Cumby [28] กล่าวไว้ว่าในกรณีที่ตั้งปฏิกรณ์ไม่มี baffled ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 300 จะเกิดเวอร์เท็กซ์ ดังนั้นจะมีผลต่อค่าฟรอยด์นัมเบอร์ เนื่องจากผลของเวอร์เท็กซ์ส่งผลต่อแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีผลต่อพลังงานและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในกรณีนี้ต้องทำการกำหนดให้ค่าฟรอยด์นัมเบอร์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ คงที่ จากนั้นเปรียบเทียบผลของพลังงานและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์



Reactor size & Agitator speed

รูปที่ 4. 47 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ



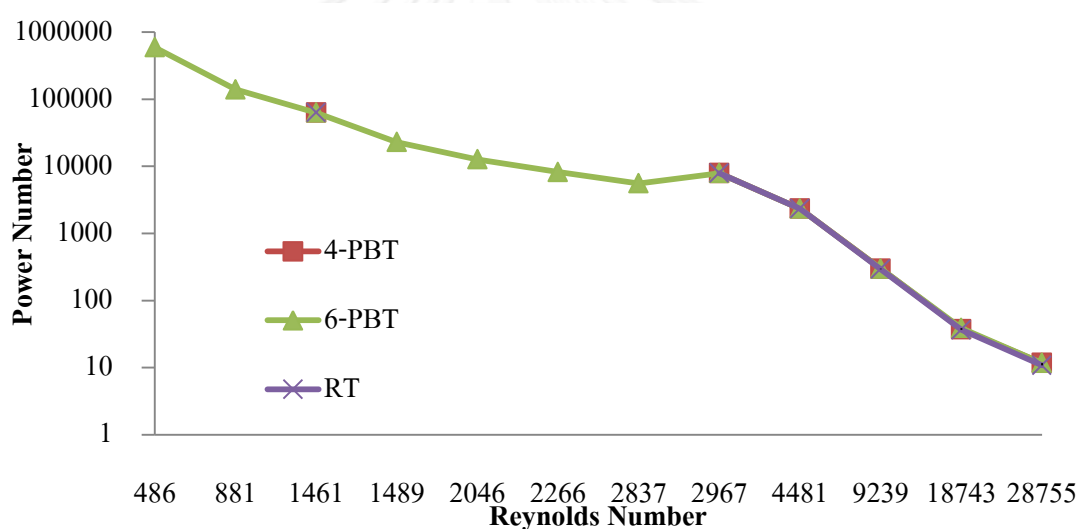
Reactor size

รูปที่ 4. 48 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1, 10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆเมื่อ $n = 0.5$

ผลของความสัมพันธ์ในการขยายขนาดของเครื่องขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร เมื่อกำหนดให้ Reynolds number, Impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่ จะได้สมการความสัมพันธ์ในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ดังนี้ โดยสมการทั้งสามสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์การขยายขนาดของเครื่องขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร ที่ $n = 0.5$ ซึ่งได้ผลของร้อยละ

ผลได้ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับการทดลองของ P.S Keang [8] ได้ทำการทดลองขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนจาก 2ลิตรไปสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววน 75 ลิตร พบว่าแนวโน้มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการปั่นกววนเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามผลจากการ ในระบบที่มีความคล้ายกันของเรขาคณิตทุกมิติ รวมถึงเส้นผ่าศูนย์กลางตัวอย่างใบพาย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของรอกถึงปฏิกรณ์ และความกว้าง โดยที่มีระบบที่คล้ายกัน ผลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์จะมีตัวเลขเท่ากันซึ่งสามารถ นำไปใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับจำนวนพลังงาน ถ้าเราตั้งสองระบบที่คล้ายกันทั้งทางเรขาคณิตและความเร็วรอบ (RPMs) เพื่อให้ตัวเลขไร้หน่วยของเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากันแล้วจะสามารถคำนวณพลังงานของระบบที่แรงบิด, ขึ้นอยู่กับจำนวนพลังงานที่วัดสำหรับระบบแรกซึ่งจะสามารถเทียบกับการคาดการณ์การแรงบิดและพลังงานสำหรับระบบที่สองได้ เมื่อระบบทั้งสองคล้ายกัน



รูปที่ 4. 49 แสดงความสัมพันธ์ของเรย์โนลนัมเบอร์และพาวเวอร์นัมเบอร์ในขยายเครื่องปฏิกรณ์ 1, 10 และ 25 ลิตร โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° Pitched 6-Blade Turbine at 45° , Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ

หรือหากให้ระบบแรกมีความเร็วรอบค่าหนึ่ง โดยได้ความสัมพันธ์ของ เรย์โนลด์นัมเบอร์ และ พาวเวอร์นัมเบอร์ ออกมาทำให้เราสามารถคำนวณความเร็วรอบของระบบที่สองได้ ซึ่งจากการทดลองทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของใบพายทั้งสามชนิดที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังแสดงในรูป 4.49 ดังนั้นผลของงานวิจัยนี้ที่ความเร็วรอบต่างๆที่การขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสามขนาดสามารถคาดการณ์ ผลของความเร็รรอบ หรือพลังงานการใช้ ของระบบที่สองต่อไป จากความสัมพันธ์ของ เรย์โนลด์นัมเบอร์และพาวเวอร์นัมเบอร์ได้ โดยจากความสัมพันธ์ของกราฟ จะสอดคล้องกับทฤษฎีของ

James Y. Oldshue[9]ซึ่งกล่าวไว้ว่า จะแสดงความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์และพาวเวอร์นัมเบอร์จะสามารถหาผลของแฟกเตอร์ในแต่ละระบบของเครื่องปฏิกรณ์ ในช่วงการไหลแบบ laminar ,transional และ turbulent ได้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับอุตสาหกรรมนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษากระบวนการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มต้นจากการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ระดับห้องปฏิบัติการเรื่องแก้วขนาด 250 มิลลิลิตรเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ สภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำไปทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวขนาด 1 ลิตร เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดใบพาย Pitched 4-blade turbine at 45 , Pitched 6-blade turbine at 45 , และ Rushton Turbine ที่ความเร็วรอบต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบพายที่ได้เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ งานวิจัยนี้จะนำเสนอผลวิเคราะห์ในรูปของ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ รวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา จากนั้นเมื่อคัดเลือกสภาวะและชนิดของใบพายที่เหมาะสมเอทำการศึกษาผลการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ ที่ขนาด 10 และ 25 ลิตรตามลำดับ โดยจากการทดลองได้เลือกใบพายชนิด Pitched 6-blade turbine at 45 มาทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกว ขนาด 10 และ 25 ลิตร จากนั้นทำการเลือกความเร็วรอบ โดยให้ค่า Reynold number, impeller tip speed และ Power per unit Volume เพื่อคำนวณหาความเร็วรอบใหม่ ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร โดยนำผลการทดลองที่คัดเลือกใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่าผลของใบพายชนิด Pitched 6-blade turbine at 45 ที่ 300 รอบต่อนาที ให้ผลดีที่สุด ดังนั้นผลจากการคำนวณความเร็วรอบใหม่ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.39 โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยเปอร์เซ็นต์ของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรพบว่า ผลของร้อยละผลได้ของทุกความเร็วรอบน้อยกว่า เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ดังนั้นจึงทำการปรับความเร็วรอบใหม่ โดยพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสม โดยได้ความเร็วรอบของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ที่ 200 รอบต่อ นาที และเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร ที่ 173 รอบต่อ นาที โดยจะนำเสนออิทธิพลของขนาดของถังปฏิกรณ์และความเร็วรอบจากผลวิเคราะห์ในรูปของ ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์และหาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ,10 และ 25 ลิตรเมื่อทำการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เมื่อ

กำหนดให้ค่า Reynold number, impeller tip speed และ Power per unit Volume คงที่ รวมไปถึง พลังงานที่ใช้ ร้อยละของของแข็ง และผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ในห้องปฏิบัติการ จากการทดลองทำการเพิ่มอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกได้เร็วขึ้น โดยผลจากของแข็งที่ไม่ละลายที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า ปริมาณของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 27 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียสและทำการทดสอบต่อโดยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90,100,110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า ปริมาณของแข็งจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่จะเริ่มช้าลงในช่วงอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส นั้นแสดงว่าจุดที่ดีที่สุดคือในช่วงอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนโมล ที่เหมาะสมระหว่าง อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก คือ 1:3 โดยมีของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 17.78 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า สัดส่วนโมลของ อะลูมิเนียมคลอไรด์และกรดซัลฟูริกที่เหมาะสมเท่ากับ 1:1.5 โดยมีผลของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เท่ากับ 83.55 ในส่วนของคุณภาพของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์พบว่า ร้อยละของ อะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 10.56 ,ความหนาแน่น(กรัม/มิลลิลิตร) 1.21,ร้อยละของ เบสิกซิตี เท่ากับ 63 และ ค่าพีเอช เท่ากับ 4.2 ซึ่งอยู่ในมาตรฐานตาม มอก 2151-2546 ว่าด้วยการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. ผลจากการทดลองความเร็วรอบในแต่ละชนิดใบพายในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกชนิดใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร แต่ละใบพายที่ความเร็ว 100,200,300,600,1200 และ 1800 รอบต่อนาที การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ของปฏิกิริยาและจะเริ่มช้าลงในช่วงนาทีที่ 5 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริคน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ในทุกความเร็วรอบและใบพายทั้งสามชนิด ในส่วนของกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า อัตราการลดลงของปฏิกิริยาดำเนินไปและเริ่มช้าลงในช่วงนาทีที่ 55 จนกระทั่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) น้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาจนเกือบคงที่ คือปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยชนิดของใบพายและความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุด พบว่าจากการใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) สูงที่สุด โดยมีร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เท่ากับ 82.4 ส่วนการใช้ใบพายชนิด Pitched 4-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที โดยมีร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เท่ากับ

75.6 และการใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine ที่ความเร็ว 1800 รอบต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ของ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) เท่ากับ 77.0 หากพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนเมื่อ ใช้ใบพายชนิด Rushton Turbine กับทุกความความเร็วรอบ โดยที่ความเร็วรอบไม่มีผลต่อการ เปลี่ยนแปลงค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนในแนวรัศมี ซึ่งแตกต่างจากใบพายชนิดชนิด Pitched 4- Blade Turbine at 45° และ Pitched 4-Blade Turbine at 45° จะมีพลังงานสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม ความเร็วรอบในช่วงหนึ่ง อย่างไรก็ตาม สภาวะทางความร้อนของปฏิกิริยาก็เมื่อใช้ใบพาย Pitched 4- Blade Turbine at 45° , Pitched 6-Blade Turbine at 45° และ Rushton Turbine อุณหภูมิไม่ แตกต่างกันมากนัก

3. ในงานวิจัยนี้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ คือ 10 ลิตรและ 25 ลิตร ซึ่งแต่ละการทดลองจะมี สภาวะความเร็วรอบในการหมุนที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้ค่า Reynolds number, impeller tip speed และ Power per unit volume คงที่ ดังนั้นที่เครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตรใช้ความเร็วรอบ 59 ,133 และ175 รอบต่อนาที เช่นเดียวกับการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 25 ลิตรใช้ความเร็วรอบ 33 ,99 และ144 รอบต่อนาที โดยใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกรอบที่เหมาะสมในการผลิตพอลิ อะลูมิเนียมคลอไรด์ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบถึงผลของร้อยละผลได้เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรพบว่า ผลจากความเร็วยรอบที่นำมาใช้ ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 10 และ 25 ลิตร ทุกความเร็วรอบได้ผลลัพธ์ของร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) น้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร เพื่อให้ได้ผลของร้อยละผลได้ออกมาให้ใกล้เคียงกันกับเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 1 ลิตร ซึ่งความเร็วรอบเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ออกมาใกล้เคียงกัน ซึ่งในการปรับ ความเร็วรอบใหม่จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ของร้อยละผลได้ที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สภาวะทางความร้อนของปฏิกิริยาก็เมื่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา จะสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายโอนความร้อนมีมากและทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ในส่วน ของการใช้พลังงานพบว่าเมื่อใช้ใบพายชนิด Pitched 6-Blade Turbine at 45° ที่ความเร็ว 59 , 133 และ 175 รอบต่อนาทีพบว่า ในช่วงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่ความเร็วที่ 59 รอบต่อนาที มีค่า พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนน้อยกว่าที่ความเร็วรอบที่ 133 และ 175 รอบต่อนาที แต่เมื่อเข้าสู่ กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ผลปรากฏว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนเท่ากันทุกความเร็วรอบ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ช่วงของการใช้พลังงานจะคงที่แม้ว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยสำหรับค่าพลังงานจะแปรผันกับความเร็วรอบยกกำลังสาม $P \propto N^3$ นั่นคือจะมีช่วงของพลังงาน ตามความเร็วรอบต่างๆ

4. กำหนดความเร็วรอบให้โดยหาความสัมพันธ์ ที่ $n = 0.5$ ซึ่งจะได้ความเร็วรอบใหม่ที่ 200 และ 173 รอบต่อนาทีในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทำให้เห็นว่าผลของการปรับความเร็วรอบใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตรโดยที่ผลลัพธ์ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) ออกมาใกล้เคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร โดยร้อยละผลได้ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1, 10 และ 25 ลิตร มีค่าเท่ากับ 82.4 , 82.3 และ 82.2 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีลักษณะสารละลายที่เป็นของแข็งและของเหลว การกระจายตัวของอนุภาคเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบขยายขนาด ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าชนิดและอุปกรณ์ที่เลือกใช้เหมาะสมสามารถใช้สังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพได้จริงซึ่งควรถูกนำมาศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานวิจัยต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Li, F.T., et al., *Preparation and performance of a high purity poly-aluminum chloride*. Chemical Engineering Journal, 2010. 156(1): p. 64-69.
2. Pi, K.W., et al., *Enhancing electrochemical preparation of polyaluminum chloride by a magnetic field*. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2008. 330(2-3): p. 103-107.
3. Zhao, C.W., et al., *Preparation and Characterization of gamma-Al₂O₃ by Polyaluminum Chloride with High Al-13 Content*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010. 18(2): p. 333-336.
4. Yang, Z., B. Gao, and Q. Yue, *Coagulation performance and residual aluminum speciation of Al₂(SO₄)₃ and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment*. Chemical Engineering Journal, 2010. 165(1): p. 122-132.
5. James Y., a.O., *Fluid Mixing Technology*. 1983.
6. Rouzbeh, J., Phillippe, A.T., and Jamal, C, *Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid - liquid suspension*. Chemical Engineer Research and Design, 2012. 90.
7. Jafari, R., P.A. Tanguy, and J. Chaouki, *Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid-liquid suspensions*. Chemical Engineering Research & Design, 2012. 90(2): p. 201-212.
8. Keng, P.S., et al., *Scale-up synthesis of lipase-catalyzed palm esters in stirred-tank reactor, in Bioresource Technology*. 2008. p. 6097-6104.
9. Oldshue, J.Y., *Fluid mixing technology*. 1983, New York, N.Y.: Chemical Engineering. xvi, 574 p.
10. Bisio, A. and R.L. Kabel, *Scaleup of chemical processes : conversion from laboratory scale tests to successful commercial size design*. 1985, New York: Wiley. xviii, 699 p.
11. shen, y.-H., *synthesis and specification of polyaluminium chloride for water treatment*. environmental International, 1998. 24.
12. Steven, W., David, V.B., and Jie, W, *Energy efficient solids suspension in an agitated vessel-water slurry*. Chemical Engineering Science. , 2012. 74.
13. Angst, R. and M. Kraume, *Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption*. Chemical Engineering Science, 2006. 61(9): p. 2864-2870.

14. Inagaki, Y., *From aluminum hydroxide and sulfuric acid in presence of nitric acid and peroxy compound*
2002. US7067099 B2
(
).
15. Nauman, E.B., *Chemical reactor design, optimization, and scaleup*. 2nd ed. 2008, Hoboken, N.J.: Wiley. xxxii, 608 p.
16. El-Hamouz, A., et al., *Dispersion of silicone oil in water surfactant solution: Effect of impeller speed, oil viscosity and addition point on drop size distribution*. *Chemical Engineering and Processing*, 2009. 48(2): p. 633-642.
17. Chapple, D., Kresta, S.M., Wall, A., and Afacan, *The effect of impeller and tank geometry on Power Number for a pitched blade turbine*. 2002. *Tran Chem*, 2002. 80: p. 364-372.
18. Luciano, F.N., Bruna, L.S., Jose Alberto, D.R., Suzana, M.A., Deovaldo, M., Rogers, R., Matcelo, Z., and Eugenio, F., *Effect of impeller type and agitation on the performance of pilot scale ASBR and AnSBBR applied to sanitary wastewater treatment*. *Environmental Management*, 2010. 91.
19. Fogler, H.S., *Elements of chemical reaction engineering*. 4th ed. Prentice Hall PTR international series in the physical and chemical engineering sciences. 2006, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. xxxii, 1080 p.
20. COMMISSION, E., *Additional Information submitted during the information exchange on Large Volume Inorganic Chemical-Solid and other Industry Joint Research Centre*, D.-G. JRC and J.R. CENTRE, Editors. 2005: Sevilla - Spain
21. Fengting, L., Jia-Qian, J., Shengju, W., and Bingru, Z, *Preparation and performance of a high purity poly-aluminium chloride*. *Chemical Engineering* 2010. 156.
22. Benjamin Shultes, K.R., *Preparation of non corrosive aluminum sulfate*. 2003.
23. M.D. Grau , J.M.N., L. Puigjaner, *Batch and semibatch reactor performance for an exothermic reaction*. *Chemical Engineer and Processing*, 2000. 39: p. 141-148.
24. N.Dohi , T.T., K Minekawa ,Y.Kawase, *Power consumption and aolid suspension performance of large-scale impellers in gas-liquid-solid three phase stirrer tank reactor*. *Chemical Engineering*, 2004. 97: p. 103-114.
25. W.Stephenie , B.M.K., M. Shuhaimi,M.Rosfarian,and A.M. Yazid, *Influence of pH and Impeller Tip speed on the Cultivation of Bifidobacterium*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2007. 12: p. 475-483.

26. Rouzbeh, J., Phillippe, A.T., and Jamal, C., *Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid - liquid suspension*. Chemical Engineer Research and Design, 2012. 90: p. 201-212.
27. Keng, P.S., Basri, M., Ariff, A.B., Abdul Rahman, M.B., Abdul Rahman, R.N.Z., and Salleh, A.B, *Scale-up synthesis of lipase-catalyzed palm esters in stirred-tank reactor*. Bioresource Technology, 2008. 99.
28. Cumby, T.R., *Slurry mixing with impellers: Part 1, theory and previous research*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990. 45(0): p. 157-173.



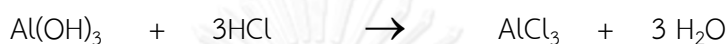
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
การวิเคราะห์ผลการทดลอง 1

ก-1 การทำสมดุลมวล วัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ในไฮโดรไลซิส

จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส:



น้ำหนักโมเลกุล(กรัมต่อโมล)	78	109.38	133.4	54
ร้อยละความบริสุทธิ์	99	37	-	-
อัตราส่วน น้ำหนักโมเลกุล	1.0	1.4	1.7	0.7

ตัวอย่างการคำนวณ

ถ้าใช้มวลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) 26 กรัมในการทดลองเครื่องแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร

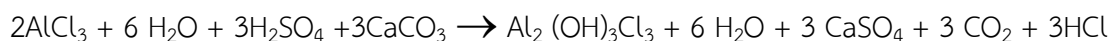
$$\begin{aligned} \text{มวลของกรดไฮโดรคลอริก} &= (\text{มวล(Al(OH)}_3) \times (\text{Mw HCl}) / \text{Mw(Al(OH)}_3) \times (\% \text{Purity HCl} / 100)) \\ &= 32 \times ((109.38)/(78)) \times (37/100) \\ &= 16.6 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.7 สมดุลมวล วัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

รายละเอียด	Al(OH) ₃	3HCl	AlCl ₃	3H ₂ O
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	78	109.34	133.4	54
น้ำหนักโมเลกุลสมดุล(กรัมต่อโมล)	187.34		187.34	
ร้อยละความบริสุทธิ์ (%)	99.95	37	-	-
อัตราส่วนน้ำหนักโมเลกุล	1.0	1.4	1.7	0.7
มวลในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร (g)	32.0	16.6	54.7	22.2
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (g)	128	66.4	218.9	88.6
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (g)	1280	664.1	2189.1	886.2
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร (g)	3200	1660.3	5472.8	2215.4

ก-2 การทำสมดุลมวล วัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน:



ตัวอย่างการคำนวณ

ถ้าใช้มวลของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) 54.7 กรัมในการทดลองเครื่องแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร
 มวลของกรดซัลฟูริก = (มวล(AlCl_3) \times (Mw H_2SO_4) / Mw(AlCl_3) \times (%Purity H_2SO_4 /100))
 = $54.7 \times ((294)/(267)) \times (98/100)$
 = 59 กรัม

ตารางที่ 2.8 สมดุลมวล วัตถุดิบ และ ผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

รายละเอียด	2AlCl_3	$6\text{H}_2\text{O}$	$3\text{H}_2\text{SO}_4$	3CaCO_3
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	267	108	294	300
น้ำหนักโมเลกุลสมดุล(กรัมต่อโมล)	969			
ร้อยละความบริสุทธิ์ (%)	-	-	98	98
อัตราส่วนน้ำหนักโมเลกุล	1	0.4	1.1	1.12
มวลในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร (g)	55	22	59	60
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (g)	219	89	236	241
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (g)	2189	885	2362	2411
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร (g)	5473	2214	5906	6026

รายละเอียด	$\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$	$6\text{H}_2\text{O}$	3CaSO_4	3CO_2	3HCl
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	211.5	108	408	132	109.5
น้ำหนักโมเลกุลสมดุล(กรัมต่อโมล)	969				
ร้อยละความบริสุทธิ์ (%)	-	-	-	-	-
อัตราส่วนน้ำหนักโมเลกุล	0.79	0.4	1.53	0.49	0.41
มวลในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร (g)	43	22	84	27	22
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (g)	173	89	335	108	90
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร (g)	1734	885	3345	1082	898
มวลในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร (g)	4335	2214	8363	2706	2244

ภาคผนวก ข.
การวิเคราะห์ผลการทดลอง 2

ข-1 การวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริกด้วยเทคนิคการไทเทรต

ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการไทเทรตตามมาตรฐาน TIS217-2549, ASTM E200-91 ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยจะทำการเก็บตัวอย่างในการทำปฏิกิริยา แสดงในตาราง ข-1

วิธีวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

อุปกรณ์

1. Burette size 50 cm³
2. Pipette size 25 ml.
3. Analytical Balance
4. Weighing Bottle with glass stopper

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 M
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1.0% ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
3. น้ำกลั่น

วิธีการ

1. ชั่งปริมาณ 2 กรัมของสารตัวอย่างของเหลวลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ผสมให้สารละลายให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว
3. หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนลงในสารละลาย ปริมาณ 3 หยด
4. เขย่าสารละลายในขณะที่ไทเทรตและค่อยๆหยดสารละลายต่างลงในสารละลายจนสารละลายกลายเป็นสีชมพูอย่างน้อย 30 วินาที
5. จดบันทึกปริมาณสารละลายต่าง

ตารางที่ 2.9 ช่วงเวลาและปริมาณในการเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างวิเคราะห์กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	
เวลา (นาที)	ปริมาณตัวอย่าง
1	2
3	2
5	2
10	2
15	2
20	2
25	2
30	2

ข-2 การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
(โมลต่อลิตร)

$$\text{ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์} = \frac{\text{ปริมาณ (KHP) (กรัม)}}{0.20423 \times \text{ปริมาณ (NaOH) (มิลลิลิตร)}}$$

ตารางที่ 2.10 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (โมลต่อลิตร)

จำนวน ตัวอย่าง	ปริมาณโปแตสเซียม ไฮโดรเจนแพทาเลท (KHP) (กรัม)	ปริมาณโซเดียมไฮดรอก ไซด์ (NaOH) ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (โมลต่อลิตร)
1	4.7526	46.9	0.4961
2	4.7529	46.9	0.4962
3	4.7518	46.9	0.496
เฉลี่ย			0.4961
SD			0.0001
%RSD < 0.5			0.0119

ข-3 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (HCl).

$$\text{ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (\%)} = \frac{V_2 \times C \times 3.646}{M_0}$$

เมื่อ V_2 = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (โมลต่อลิตร)

M_0 = มวลของตัวอย่าง (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในนาที่ที่ 1 โดยทำการทดลองในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร น้ำหนักของสารตัวอย่าง 2.0214 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.4961 โมลต่อลิตร และปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ 8.1 มิลลิลิตร

$$\text{ร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(\%)} = \frac{(8.1 \times 0.4961 \times 3.646)}{2.0214}$$

ดังนั้นจากปริมาณสารตัวอย่าง 2.0214 กรัม ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (%) ในนาที่ที่ 1 มีค่า 7.25

ตารางที่ 2.11 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.25 ลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที่)	น้ำหนัก	ปริมาณ	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0214	8.1	7.25
3	2.0456	6.4	5.67
5	2.0478	5.7	5.04
10	2.0432	5.6	4.97
15	2.0011	5.2	4.66
20	2.0509	5.2	4.60
25	2.0103	5.1	4.59
30	2.0114	5.1	4.59

ตารางที่ 2.12 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร

ใบพายชนิด 4-PBT-100 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด 6-PBT-100 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด RT-100 รอบต่อนาที					
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0222	7.2	6.42	1	2.0243	7.6	6.83	1	2.034	7.6	6.72
3	2.0431	5.9	5.25	3	2.0117	6.5	5.86	3	2.0341	6.4	5.71
5	2.0211	5.8	5.21	5	2.0431	5.8	5.12	5	2.0176	5.7	5.12
10	2.0131	5.6	5.00	10	2.0769	5.9	5.11	10	2.0229	5.6	5.04
15	2.0124	5.6	4.99	15	2.0131	5.6	5.00	15	2.0331	5.6	5.02
20	2.0541	5.7	4.99	20	2.0261	5.6	4.99	20	2.0774	5.7	4.99
25	2.0721	5.7	4.98	25	2.0346	5.6	4.98	25	2.0229	5.6	4.99
30	2.0122	5.5	4.98	30	2.0231	5.6	4.98	30	2.0211	5.6	4.99

ตาราง ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-200 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-200 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-200 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น	36.43		0	ที่เวลาเริ่มต้น	36.43		0	ที่เวลาเริ่มต้น	36.43	
1	2.0217	8.0	7.13	1	2.0204	7.8	6.96	1	2.0117	7.7	6.88
3	2.0421	6.8	5.98	3	2.0523	6.1	5.41	3	2.0343	6.0	5.31
5	2.0143	5.9	5.26	5	2.0455	5.7	5.03	5	2.0435	5.8	5.13
10	2.0245	5.8	5.14	10	2.0673	5.7	5.00	10	2.0873	5.8	5.00
15	2.0621	5.7	5.03	15	2.0215	5.6	4.99	15	2.0932	5.8	4.98
20	2.0332	5.6	5.02	20	2.0556	5.7	4.98	20	2.0578	5.7	4.98
25	2.0242	5.6	5.02	25	2.0332	5.6	4.98	25	2.0317	5.6	4.98
30	2.0147	5.6	5.02	30	2.0161	5.6	4.98	30	2.0991	5.8	4.98

ตาราง ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-300 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-300 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-300 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น			0	ที่เวลาเริ่มต้น			0	ที่เวลาเริ่มต้น		
1	2.0222	5.7	5.08	1	2.0243	11.4	10.18	1	2.034	8.6	7.62
3	2.0431	5.7	5.04	3	2.0117	5.6	5.07	3	2.0341	5.7	5.08
5	2.0211	5.6	5.02	5	2.0431	5.7	5.05	5	2.0176	5.7	5.07
10	2.0131	5.5	4.93	10	2.0769	5.8	5.04	10	2.0229	5.7	5.07
15	2.0124	5.5	4.90	15	2.0131	5.6	5.01	15	2.0331	5.7	5.05
20	2.0541	5.6	4.90	20	2.0261	5.6	5.00	20	2.0774	5.8	5.04
25	2.0721	5.6	4.88	25	2.0346	5.6	4.98	25	2.0229	5.6	5.04
30	2.0122	5.4	4.87	30	2.0231	5.5	4.96	30	2.0211	5.6	5.03

ตาราง ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-600 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-600 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-600 รอบต่อนาที				
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น			36.43
1	2.0217	7.1	6.38	1	2.0204	8.8	7.85	1	2.0117	8.3	7.48	
3	2.0421	5.7	5.05	3	2.0523	8.3	7.32	3	2.0343	5.6	5.02	
5	2.0143	5.6	5.03	5	2.0455	5.7	5.07	5	2.0435	5.6	5.00	
10	2.0245	5.6	5.02	10	2.0673	5.7	5.03	10	2.0873	5.7	4.97	
15	2.0621	5.7	5.00	15	2.0215	5.6	5.01	15	2.0932	5.7	4.94	
20	2.0332	5.6	4.98	20	2.0556	5.6	4.92	20	2.0578	5.6	4.94	
25	2.0242	5.6	4.97	25	2.0332	5.5	4.90	25	2.0317	5.5	4.93	
30	2.0147	5.5	4.97	30	2.0161	5.5	4.90	30	2.0991	5.7	4.93	

ตาราง ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-1200 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-1200 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-1200 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0			36.43	0			36.43	0			36.43
		ที่เวลาเริ่มต้น				ที่เวลาเริ่มต้น				ที่เวลาเริ่มต้น	
1	2.0334	8.4	7.46	1	2.0112	8.5	7.67	1	2.0772	8.4	7.34
3	2.0112	5.7	5.10	3	2.0387	8.3	7.38	3	2.0398	5.6	5.01
5	2.0871	5.9	5.08	5	2.0375	5.7	5.09	5	2.0412	5.6	4.96
10	2.0114	5.6	5.03	10	2.0877	5.8	5.03	10	2.0565	5.6	4.94
15	2.0232	5.6	5.02	15	2.0223	5.6	5.02	15	2.0663	5.6	4.93
20	2.0672	5.7	5.01	20	2.0225	5.5	4.93	20	2.0986	5.7	4.93
25	2.0252	5.5	4.95	25	2.0556	5.5	4.85	25	2.0173	5.4	4.84
30	2.0155	5.5	4.94	30	2.0128	5.4	4.83	30	2.0188	5.4	4.84

ตาราง ข.4 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก(%) ในปฏิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-1800 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-1800 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-1800 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0187	8.4	7.57	1	2.0401	8.7	7.68	1	2.0347	8.2	7.32
3	2.0176	6.1	5.43	3	2.0312	5.8	5.20	3	2.0446	5.5	4.88
5	2.0332	6.0	5.31	5	2.0214	5.8	5.19	5	2.0904	5.6	4.86
10	2.0231	5.9	5.24	10	2.0343	5.8	5.18	10	2.0802	5.6	4.83
15	2.0258	5.8	5.20	15	2.0551	5.8	5.13	15	2.0301	5.4	4.81
20	2.0376	5.8	5.15	20	2.0285	5.7	5.12	20	2.0111	5.3	4.80
25	2.0823	5.9	5.13	25	2.0213	5.7	5.11	25	2.0321	5.4	4.77
30	2.0774	5.8	5.08	30	2.0582	5.8	5.11	30	2.0113	5.3	4.77

ตารางที่ 2.13 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (%) ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 10 ลิตร

ใบพายชนิด 6-PBT-59 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-133 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0971	6.6	5.67	1	2.0288	7.8	6.96
3	2.0886	5.9	5.13	3	2.0682	5.7	5.01
5	2.0232	5.6	5.03	5	2.0453	5.6	4.99
10	2.0443	5.7	5	10	2.0111	5.5	4.97
15	2.0193	5.6	4.98	15	2.0238	5.5	4.94
20	2.0276	5.6	4.96	20	2.0144	5.5	4.92
25	2.0324	5.6	4.96	25	2.0002	5.4	4.90
30	2.0773	5.7	4.96	30	2.0875	5.7	4.90
ใบพายชนิด 6-PBT-175 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-200 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0559	8.5	7.52	1	2.0772	8.5	7.42
3	2.0387	6.9	6.12	3	2.0209	5.7	5.14
5	2.0311	5.6	5.01	5	2.0303	5.7	5.05
10	2.0022	5.5	4.99	10	2.0511	5.7	5.02
15	2.0312	5.5	4.93	15	2.0011	5.5	4.99
20	2.0003	5.4	4.92	20	2.0710	5.7	4.98
25	2.0992	5.7	4.91	25	2.0822	5.7	4.97
30	2.0273	5.5	4.90	30	2.0155	5.5	4.97

ตารางที่ 2.14 ปริมาณร้อยละของกรดไฮโดรคลอริก (%)ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 25 ลิตร

ใบพายชนิด 6-PBT-33 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-99 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0319	8.2	7.14	1	2.0983	8.1	6.98
3	2.0344	8.2	4.95	3	2.0492	6.0	5.27
5	2.0829	5.7	4.94	5	2.0275	5.5	4.94
10	2.0327	5.5	4.92	10	2.0834	5.6	4.87
15	2.0449	5.5	4.91	15	2.0013	5.4	4.87
20	2.0602	5.5	4.9	20	2.0071	5.4	4.84
25	2.0512	5.5	4.89	25	2.0219	5.4	4.84
30	2.0771	5.5	4.89	30	2.0682	5.5	4.83
ใบพายชนิด 6-PBT-144 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-173 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%HCL
0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43	0	ที่เวลาเริ่มต้น		36.43
1	2.0383	8.5	6.99	1	2.0297	8.4	7.47
3	2.0134	5.5	5.19	3	2.0119	5.8	5.23
5	2.0462	5.6	5	5	2.0028	5.6	5.07
10	2.0331	5.5	4.99	10	2.0826	5.8	5.03
15	2.0117	5.5	4.98	15	2.0321	5.6	4.99
20	2.0221	5.5	4.97	20	2.0219	5.6	4.98
25	2.0882	5.6	4.94	25	2.0331	5.6	4.98
30	2.0285	5.5	4.93	30	2.0432	5.6	4.98

ข-4 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)

การคำนวณความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก(HCl) จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยหลังจากที่ทำการไทเทรตออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ดังแสดงตาราง ข-3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{HCl (mol/L)} = \left[\frac{A \cdot B}{C} \right] / V / [M]$$

- เมื่อ
- V = ปริมาตรของสารละลาย เป็นลิตร
 - C = ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นเปอร์เซ็นต์
 - A = ความเข้มข้นคงเหลือของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นเปอร์เซ็นต์
 - B = น้ำหนักของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นกรัม
 - M = น้ำหนักโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็น กรัมต่อโมล

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (โมลต่อลิตร) ในนาที่ที่ 1 โดยทำการทดลองในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร ความเข้มข้นคงเหลือของกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 7.25 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เท่ากับ 36.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้ำหนักของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เท่ากับ 16.57 กรัม

$$\text{HCl} \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) = \frac{\left[\frac{7.25 \cdot 16.61}{36.43} \right]}{36.5} \cdot [4]$$

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในนาที่ที่ 1 มีค่า 0.36 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 2.15 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาที่ไฮโดรไลซิสในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)						
เวลา (นาที)	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:9
0	1.21	1.82	2.43	3.03	3.64	5.47
1	0.21	0.36	0.36	0.69	0.92	2.41
3	0.17	0.28	0.35	0.65	0.92	2.23
5	0.17	0.25	0.34	0.61	0.92	2.20
10	0.17	0.25	0.34	0.60	0.92	2.20
15	0.17	0.23	0.34	0.60	0.92	2.19
20	0.17	0.23	0.34	0.60	0.92	2.19
25	0.17	0.23	0.34	0.60	0.92	2.19
30	0.17	0.23	0.34	0.60	0.92	2.19

ตารางที่ 2.16 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตรในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร						
	ผลจาก Lab	100รอบ ต่อนาที	200 รอบต่อ	300 รอบต่อ	600 รอบต่อ	1200รอบ ต่อนาที	1800รอบ ต่อนาที
0	0.607	0.607	0.608	0.608	0.608	0.608	0.607
1	0.119	0.107	0.116	0.116	0.116	0.118	0.122
3	0.087	0.088	0.085	0.084	0.085	0.085	0.091
5	0.084	0.087	0.083	0.083	0.085	0.085	0.089
10	0.084	0.083	0.083	0.083	0.085	0.084	0.087
15	0.083	0.083	0.084	0.083	0.085	0.084	0.087
20	0.083	0.083	0.084	0.083	0.085	0.084	0.086
25	0.083	0.083	0.084	0.083	0.085	0.083	0.086
30	0.083	0.083	0.084	0.083	0.085	0.082	0.085

เวลา นาที)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร						
	ผลจาก Lab	100รอบ ต่อนาที	200 รอบต่อ	300 รอบต่อ	600 รอบต่อ	1200 รอบต่อ	1800รอบ ต่อนาที
0	0.607	0.608	0.608	0.607	0.608	0.608	0.607
1	0.119	0.114	0.116	0.121	0.122	0.123	0.123
3	0.087	0.098	0.090	0.085	0.089	0.088	0.087
5	0.084	0.085	0.084	0.084	0.085	0.085	0.087
10	0.084	0.085	0.083	0.084	0.084	0.084	0.086
15	0.083	0.083	0.083	0.084	0.084	0.084	0.084
20	0.083	0.083	0.083	0.083	0.082	0.082	0.081
25	0.083	0.083	0.083	0.083	0.082	0.081	0.081
30	0.083	0.083	0.083	0.083	0.082	0.081	0.081

ตารางที่ ข.8 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

เวลา นาทึ)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ไบพายชนิด Rushton						
	ผลจาก Lab	100รอบ ต่อนาที	200 รอบต่อ	300 รอบต่อ	600 รอบต่อ	1200 รอบต่อ	1800รอบ ต่อนาที
0	0.607	0.607	0.608	0.608	0.607	0.608	0.608
1	0.119	0.112	0.115	0.116	0.115	0.115	0.114
3	0.087	0.095	0.089	0.085	0.084	0.084	0.081
5	0.084	0.085	0.086	0.085	0.083	0.083	0.081
10	0.084	0.084	0.083	0.085	0.083	0.082	0.081
15	0.083	0.084	0.083	0.084	0.082	0.082	0.080
20	0.083	0.083	0.083	0.084	0.082	0.082	0.080
25	0.083	0.083	0.083	0.084	0.082	0.081	0.080
30	0.083	0.083	0.083	0.084	0.082	0.081	0.080

ตารางที่ 2.17 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (โมลต่อลิตร)			
	ผลจากLab	59รอบต่อนาที	133รอบต่อนาที	175รอบต่อนาที
0	0.607	0.607	0.607	0.607
1	0.119	0.095	0.116	0.125
3	0.087	0.086	0.084	0.102
5	0.084	0.084	0.083	0.084
10	0.084	0.083	0.083	0.083
15	0.083	0.083	0.082	0.082
20	0.083	0.083	0.082	0.082
25	0.083	0.083	0.082	0.082
30	0.083	0.083	0.082	0.082

ตารางที่ 2.18 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเครื่อง
ปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (โมลต่อลิตร)			
	ผลจากLab	33รอบต่อนาที	99รอบต่อนาที	144รอบต่อนาที
0	0.607	0.607	0.607	0.607
1	0.119	0.119	0.116	0.117
3	0.087	0.083	0.088	0.087
5	0.084	0.082	0.082	0.083
10	0.084	0.082	0.081	0.083
15	0.083	0.082	0.081	0.083
20	0.083	0.082	0.081	0.083
25	0.083	0.082	0.081	0.082
30	0.083	0.082	0.081	0.082

ภาคผนวก ค.
การวิเคราะห์ผลการทดลอง 3

ค-1 การวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริกด้วยเทคนิคการไทเทรต

ปริมาณกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการไทเทรตตามมาตรฐาน TIS217-2549, ASTM E200-91 ในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (ปฏิกิริยาที่ 2) โดยจะทำการเก็บตัวอย่างในการทำปฏิกิริยาแสดงในตาราง ค-1

วิธีวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

อุปกรณ์

1. Burette size 50 cm³
2. Pipette size 10 ml.
3. Analytical Balance
4. Weighing Bottle with glass stopper

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 M
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1.0% ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
3. น้ำกลั่น

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.8 กรัม ถึง 1.1 กรัม ของสารตัวอย่างของเหลวลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ผสมให้สารละลายให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว
3. หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนลงในสารละลาย ปริมาณ 3 หยด
4. เขย่าสารละลายในขณะที่ไทเทรตและค่อยๆหยดสารละลายต่างลงในสารละลายจนสารละลายกลายเป็นสีชมพูอย่างน้อย 30 วินาที
5. จดบันทึกปริมาณสารละลายต่าง

ตารางที่ ค.19 ช่วงเวลาและปริมาณในการเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างวิเคราะห์กรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄)	
เวลา (นาที)	ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
35	1
40	1
45	1
50	1
55	1
60	1

ค-2 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

วิธีคำนวณ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก

$$A = \frac{4.904 \times V \times C}{m} \times 100$$

- เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก เป็นร้อยละสัดส่วนโดยมวล
 V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต เป็น มิลลิลิตร
 C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นโมลต่อลิตร
 m คือ มวลของตัวอย่าง เป็นกรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในนาทีที่ 35 โดยทำการทดลองในเครื่องแก้วขนาด 0.25 ลิตร น้ำหนักของสารตัวอย่าง 0.8635 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.4961 โมลต่อลิตร และปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)ที่ใช้ 1.1 มิลลิลิตร

$$\text{ร้อยละของกรดซัลฟูริก(\%)} = \frac{(4.904 \times 1.1 \times 0.4961)}{0.8635}$$

ดังนั้นจากปริมาณสารตัวอย่าง 0.8635 กรัม ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในนาทีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3

ตารางที่ ค.20 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.25 ลิตร

เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8635	3.4	9.70
40	0.871	5.8	16.10
45	0.8112	9.4	28.30
50	0.8886	13.9	38.10
55	0.8002	18.4	55.80
60	0.8019	17.8	54.00

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-200 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด 6-PBT-200 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด RT-200 รอบต่อนาที					
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8667	8.4	23.61	35	0.8766	10.3	28.61	35	0.8973	14.6	39.70
40	0.8549	13.4	38.10	40	0.8976	14.5	39.30	40	0.8771	18.8	52.20
45	0.8219	16.8	49.71	45	0.8571	14.6	41.56	45	0.8769	21.2	58.70
50	0.8641	23.7	66.70	50	0.8734	17.5	48.70	50	0.8913	25.0	68.30
55	0.8693	25.8	72.23	55	0.8863	20.5	56.20	55	0.8789	28.0	77.60
60	0.8876	26.8	73.46	60	0.8789	26.5	73.46	60	0.8665	26.2	73.46

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-300 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด 6-PBT-300 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด RT-300 รอบต่อนาที					
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8653	10.2	28.61	35	0.8465	4.7	13.52	35	0.8921	8.7	23.85
40	0.8231	9.8	29.01	40	0.8878	10.7	29.43	40	0.8545	17.2	49.11
45	0.8772	15.8	43.71	45	0.8511	12.0	34.33	45	0.8679	17.7	49.57
50	0.8676	19.9	55.70	50	0.8321	13.9	40.56	50	0.8689	22.3	62.53
55	0.8211	24.4	72.23	55	0.8727	20.9	58.25	55	0.8532	25.7	73.30
60	0.8323	25.1	73.46	60	0.8686	20.7	57.98	60	0.8175	25.0	74.51

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-600 รอบต่อนาที					ใบพายชนิด 6-PBT-600 รอบต่อนาที					ใบพายชนิด RT-600 รอบต่อนาที					
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8667	10.4	29.21	35	0.8766	10.6	29.40	35	0.8973	9.3	25.31				
40	0.8549	15.2	43.13	40	0.8976	13.6	36.80	40	0.8771	16.6	46.16				
45	0.8219	18.3	54.30	45	0.8571	17.2	48.93	45	0.8769	16.6	46.07				
50	0.8641	21.2	59.70	50	0.8734	21.1	58.70	50	0.8913	21.4	58.50				
55	0.8693	28.1	78.66	55	0.8863	28.3	77.56	55	0.8789	28.0	77.40				
60	0.8876	28.8	78.84	60	0.8789	28.0	77.64	60	0.8665	27.5	77.30				

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-1200 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด 6-PBT-1200 รอบต่อนาที			ใบพายชนิด RT-1200 รอบต่อนาที					
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8643	10.6	29.91	35	0.8345	12.1	35.22	35	0.861	9.4	26.54
40	0.8423	15.0	43.35	40	0.8732	15.4	42.99	40	0.8931	16.4	44.73
45	0.8673	20.1	56.33	45	0.8569	20.4	57.98	45	0.8698	15.7	43.86
50	0.8965	22.2	60.30	50	0.8740	21.0	58.49	50	0.6781	15.5	55.78
55	0.8678	30.2	84.76	55	0.8100	24.5	73.62	55	0.8886	27.7	75.86
60	0.8871	30.9	84.74	60	0.8664	29.0	81.42	60	0.8979	28.0	75.81

ตารางที่ ค.3 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

ใบพายชนิด 4-PBT-1800 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-1800 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด RT-1800 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8901	10.7	29.26	0	0.8965	5.3	14.30	0	0.8649	9.8	27.67
40	0.8747	15.6	43.42	1	0.8814	10.6	29.15	1	0.8223	14.4	42.66
45	0.8583	20.2	57.15	3	0.8451	13.8	39.72	3	0.8693	14.7	41.28
50	0.8910	22.8	62.32	5	0.8657	20.1	56.62	5	0.8667	19.2	53.99
55	0.8791	31.1	86.01	10	0.8691	20.2	56.50	10	0.8184	24.8	73.64
60	0.8595	30.7	86.82	15	0.8711	24.9	69.41	15	0.8862	26.6	73.12

ตารางที่ ค.22 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร

ใบพายชนิด 6-PBT-59 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-133 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8657	15.1	42.46	0	0.8671	6.0	16.80
40	0.8861	19.9	54.6	1	0.8617	8.6	24.20
45	0.8864	21.2	58.3	3	0.8863	11.9	32.70
50	0.8432	24.0	69.3	5	0.8996	15.4	41.60
55	0.8872	27.0	74	10	0.8771	18.3	50.70
60	0.8114	28.5	85.5	15	0.8153	25.1	75.00
ใบพายชนิด 6-PBT-175 รอบต่อนาที				ใบพายชนิด 6-PBT-200 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8671	6.3	17.70	35	0.8461	4.4	12.6
40	0.8773	7.8	21.50	40	0.8867	6.3	17.3
45	0.8976	11.9	32.30	45	0.8539	8.5	24.1
50	0.8439	14.5	41.80	50	0.8822	10.8	29.8
55	0.8877	18.4	50.50	55	0.8203	12.6	37.5
60	0.8690	29.1	81.42	60	0.8307	17.6	51.42

ตารางที่ ค.23 ปริมาณร้อยละของกรดซัลฟูริก(%) ในปฏิกิริยาที่ 2 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร

ไบพายชนิด 6-PBT-33 รอบต่อนาที				ไบพายชนิด 6-PBT-99 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8796	7.0	38.6	35	0.8720	7.2	20.10
40	0.8917	9.9	49.2	40	0.8992	9.5	25.60
45	0.8369	12.2	58.7	45	0.8245	13.1	38.80
50	2.829	46.7	62.2	50	0.8822	17.1	47.20
55	0.8327	22.6	73.4	55	0.8383	17.3	50.10
60	0.8682	27.8	76	60	0.8551	27.4	78.00
ไบพายชนิด 6-PBT-144 รอบต่อนาที				ไบพายชนิด 6-PBT-175 รอบต่อนาที			
เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄	เวลา (นาที)	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	%H ₂ SO ₄
35	0.8661	6.2	20.4	35	0.8308	4.6	13.40
40	0.8653	8.6	28.5	40	0.8003	5.6	17.10
45	0.8971	11.3	34.8	45	0.8155	8.2	24.40
50	0.8559	14.0	42.7	50	0.8162	10.2	30.50
55	0.8371	20.5	48.3	55	0.8779	15.1	41.80
60	0.8134	25.4	81	60	0.8461	18.1	52.00

ค-3 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลต่อลิตร)

ตารางที่ ค.24 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H_2SO_4)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง
แก้วขนาด 0.25 ลิตร

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลต่อลิตร)				
เวลา (นาที)	1:1.5	1:2.0	1:2.5	1:3.0
30	2.45	3.27	4.08	4.92
35	2.01	2.68	3.37	4.07
40	1.60	2.15	2.71	3.39
45	1.25	1.69	2.17	2.79
50	0.95	1.34	1.71	2.34
55	0.74	1.06	1.43	2.01
60	0.74	1.06	1.43	2.01

ตารางที่ ค.25 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H₂SO₄)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง
แก้วขนาด 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลต่อลิตร) (4-PBT)						
	ผลจาก Lab	100 รอบต่อ นาที	200 รอบต่อ นาที	300 รอบต่อ นาที	600 รอบต่อ นาที	1200 รอบต่อ นาที	1800 รอบต่อ นาที
30	0.816	0.816	0.817	0.817	0.816	0.817	0.816
35	0.669	0.701	0.692	0.701	0.655	0.703	0.702
40	0.533	0.615	0.593	0.586	0.570	0.612	0.611
45	0.417	0.549	0.512	0.495	0.502	0.542	0.543
50	0.317	0.501	0.460	0.425	0.442	0.480	0.483
55	0.247	0.463	0.417	0.382	0.412	0.458	0.463
60	0.247	0.463	0.417	0.382	0.412	0.458	0.463

เวลา นาที)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลต่อลิตร) (6-PBT)						
	ผลจาก Lab	100 รอบต่อ นาที	200 รอบต่อ นาที	300 รอบต่อ นาที	600 รอบต่อ นาที	1200 รอบต่อ นาที	1800 รอบต่อ นาที
30	0.816	0.816	0.816	0.817	0.816	0.816	0.816
35	0.669	0.700	0.701	0.674	0.676	0.680	0.678
40	0.533	0.604	0.603	0.541	0.549	0.553	0.554
45	0.417	0.529	0.509	0.425	0.434	0.437	0.440
50	0.317	0.471	0.427	0.321	0.328	0.336	0.336
55	0.247	0.429	0.357	0.230	0.245	0.246	0.247
60	0.247	0.429	0.357	0.230	0.245	0.246	0.247

ตารางที่ ค.7 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H_2SO_4)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง
แก้วขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

เวลา นาที่)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (โมลต่อลิตร) (RT)						
	ผลจาก Lab	100 รอบต่อ นาที่	200 รอบต่อ นาที่	300รอบ ต่อนาที่	600 รอบต่อ นาที่	1200 รอบต่อ นาที่	1800 รอบต่อ นาที่
30	0.816	0.818	0.816	0.817	0.817	0.817	0.816
35	0.669	0.734	0.719	0.693	0.695	0.697	0.699
40	0.533	0.665	0.643	0.611	0.609	0.609	0.607
45	0.417	0.618	0.577	0.531	0.522	0.518	0.512
50	0.317	0.576	0.528	0.472	0.457	0.448	0.439
55	0.247	0.551	0.494	0.430	0.422	0.411	0.399
60	0.247	0.551	0.494	0.430	0.422	0.411	0.399

ตารางที่ ค.26 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H_2SO_4)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่อง
แก้วขนาด 10 ลิตร

เวลา (นาที่)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (โมลต่อลิตร)			
	ผลจากLab	59รอบต่อนาที่	133รอบต่อนาที่	175รอบต่อนาที่
30	0.816	0.820	0.820	0.820
35	0.669	0.724	0.681	0.683
40	0.533	0.651	0.558	0.555
45	0.417	0.585	0.449	0.446
50	0.317	0.538	0.355	0.352
55	0.247	0.498	0.277	0.273
60	0.247	0.498	0.277	0.273

ตารางที่ ค.27 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก(H_2SO_4)โมลต่อลิตร ในปฏิกิริยาที่ 2 ในเครื่องแก้วขนาด 10 ลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)(โมลต่อลิตร)			
	ผลจากLab	33รอบต่อนาที	99รอบต่อนาที	144รอบต่อนาที
30	0.674	0.535	0.651	0.658
35	0.527	0.436	0.521	0.529
40	0.390	0.354	0.400	0.413
45	0.274	0.289	0.302	0.308
50	0.174	0.229	0.217	0.216
55	0.104	0.188	0.137	0.133
60	0.104	0.188	0.137	0.133

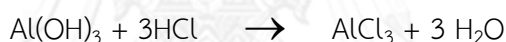
ภาคผนวก ง.

ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of Reaction)

ง-1 การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อน

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เป็นปฏิกิริยาที่ความดันคงที่ แต่ ก็ยังพบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Enthalpy Change, ΔH) โดย กฎของเฮสส์ กล่าวไว้ว่า “สำหรับปฏิกิริยาที่แบ่งเป็นขั้นตอนหลายขั้นตอน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของปฏิกิริยารวมจะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีทุกขั้นตอน” ซึ่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ให้ความร้อนออกมา นั่นคือเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ค่า ΔH จะเป็นค่าติดลบ และเกิดปฏิกิริยาได้ 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (ΔH_1)



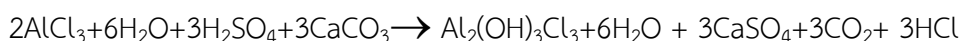
$$\Delta H_1 = H_{\text{AlCl}_3} + 3H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{Al}(\text{OH})_3} + 3H_{\text{HCl}}$$

$$\Delta H_1 = (-705.63) + 3(-286) - (-1277) + 3(-67.2)$$

$$\Delta H_1 = -85.03 \text{ KJ/mol}$$

นั่นแสดงว่าปฏิกิริยาขั้นที่ 1 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ค่า ΔH จะเป็นค่าติดลบ

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (ΔH_2)



$$\Delta H_2 = (H_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_3\text{Cl}_3} + 6H_{\text{H}_2\text{O}} + 3H_{\text{CaSO}_4} + 3H_{\text{CO}_2} + 3H_{\text{HCl}}) - (2H_{\text{AlCl}_3} + 6H_{\text{H}_2\text{O}} + 3H_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 3H_{\text{CaCO}_3})$$

$$\begin{aligned}\Delta H_2 = & ((-2755) + 6(-286) + 3(-1434.52) + 3(-393.5) + 3(-67.2)) \\ & - (2(-705.63) + 6(-286) + 3(-814)) \\ & + 3(-1206.9)\end{aligned}$$

$$\Delta H_2 = -966.7 \text{ KJ/mol}$$

นั่นแสดงว่าปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ค่า ΔH จะเป็นค่าติดลบ

$$\begin{aligned}\Delta H_{Rx} &= \Delta H_1 + \Delta H_2 \\ \Delta H_{Rx} &= (-85.03) + (-966.7)\end{aligned}$$

$$\Delta H_{Rx} = -1051.73 \text{ KJ/mol}$$

ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีทุกขั้นตอน ซึ่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{Al}_2\text{OH}_3\text{Cl}_3$) ให้ความร้อนออกมาเท่ากับ 1051.73 KJ/mol

ง-2 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสและกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

เนื่องจากปฏิกิริยาในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์($\text{Al}_2\text{OH}_3\text{Cl}_3$) และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) ดังนั้นในระบบจึงมีการคายความร้อนออกมดั่งตาราง ง-2

ตารางที่ ง.28 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 0.25 ลิตร

Time	Molar ratio			
	1:1.5	1:2.0	1:2.5	1:3.0
0	100	100	100	100
5	100	100	100	100
10	100	100	100	100
15	100	100	100	100
20	100	100	100	100
25	100	100	100	100
30	100	100	100	100
35	105	106	109	110
40	106	108	112	113
45	110	111	114	115
50	110	113	117	118
55	108	109	115	119
60	107	107	113	118
70	105	106	110	115
80	102	103	108	111
90	98	100	105	107
100	96	98.5	101	103
110	95	97.5	100	102
120	94	97	99	99

ตารางที่ ง.29 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกวขนาด 1 ลิตร

Time	4-PBT 100rpm	4-PBT 200rpm	4-PBT 300rpm	4-PBT 600rpm	4-PBT 1200rpm	4-PBT 1800rpm
0	100	100	100	100	100	100
5	99	99	99	99	99	99
10	99	99	99	98	98	98
15	99	98	98	97	97	97
20	98	98	98	97	96	96
25	98	98	97	96	95	95
30	97	97	96	96	95	94
35	103	102	103	102	103	103
40	104	104	104	103	104	106
45	106	105	106	106	106	107
50	107	106	108	108	108	110
55	108	107	109	109	109	112
60	107	107	107	108	110	111
70	106	106	106	107	109	109
80	106	105	106	106	107	108
90	105	104	104	105	105	107
100	103	103	103	103	103	105
110	101	101	102	101	102	103
120	100	100	100	100	101	102

ตารางที่ ง.2 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

Time	6PBT 100rpm	6-PBT 200rpm	6-PBT 300rpm	6-PBT 600rpm	6-PBT 1200rpm	6-PBT 1800rpm
0	100	100	100	100	100	100
5	99	99	99	99	99	99
10	99	99	99	98	98	98
15	98	98	98	98	97	97
20	98	98	98	97	96	96
25	97	97	97	97	95	95
30	97	97	97	95	94	94
35	104	104	104	103	102	102
40	106	106	106	107	106	106
45	108	108	108	109	109	110
50	111	111	111	112	114	113
55	113	113	113	114	116	116
60	112	112	112	112	114	116
70	110	110	110	110	113	117
80	109	109	109	108	112	115
90	108	108	108	107	109	113
100	106	106	106	106	108	110
110	105	105	105	105	107	108
120	104	104	104	103	105	106

ตารางที่ ง.2 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร (ต่อ)

Time	RT 100rpm	RT 200rpm	RT 300rpm	RT 600rpm	RT 1200rpm	RT 1800rpm
0	100	100	100	100	100	100
5	99	99	99	99	99	99
10	99	99	98	98	98	98
15	98	98	97	96	97	97
20	97	98	96	95	96	96
25	96	96	95	94	95	94
30	96	97	94	93	93	93
35	98	98	99	99	100	101
40	101	101	102	103	104	106
45	103	103	104	106	106	107
50	104	105	105	109	108	110
55	107	107	108	111	111	112
60	106	106	107	109	110	111
70	105	105	106	107	109	110
80	105	105	105	106	107	108
90	104	104	104	105	105	107
100	103	103	103	103	103	106
110	102	102	102	100	102	104
120	101	101	102	99	101	102

ตารางที่ ง.30 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 10 ลิตร

Temperature (C) for Reactor 10 L				
Time	6-PBT(RPM)			
	59	133	175	200
0	100	100	100	100
5	99	99	99	99
10	99	99	99	99
15	99	99	99	99
20	98	98	98	98
25	98	98	98	98
30	97	98	98	97
35	108	109	109	108
40	113	113	113	113
45	115	115	115	115
50	117	117	116	117
55	118	118	117	118
60	115	116	116	115
70	115	115	115	115
80	113	114	113	113
90	110	112	111	110
100	109	110	109	109
120	107	108	107	107

ตารางที่ ง.31 ตารางการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 25 ลิตร

Temperature (C)for Reactor 25 L				
Time	6-PBT(RPM)			
	33	99	144	173
0	100	100	100	100
5	99	99	99	99
10	99	99	99	99
15	99	99	99	99
20	98	98	98	98
25	98	98	98	98
30	97	98	98	98
35	108	109	109	109
40	113	113	113	113
45	115	115	117	118
50	118	118	119	119
55	119	119	120	120
60	117	116	117	117
70	115	115	115	115
80	113	114	113	113
90	110	112	111	112
100	109	110	110	110
120	107	108	108	108

ภาคผนวก จ.

ข้อมูลผลการทดลองทางจลนพลศาสตร์

จ-1 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1,10 และ 25 ลิตร

งานวิจัยนี้จะนำผลของ Percentage yield (%) และ Productivity (mol/L) ที่ได้จากการทำการทดลองของใบพายทั้ง 3 ชนิด ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร มาเปรียบเทียบเพื่อหาข้อมูลที่ดีที่สุดซึ่งผลได้ของ Percentage yield (%) สูงที่สุดและนำข้อมูลไปใช้ในการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Percentage yield (\%)} = \frac{\text{wt Product}}{\text{Wt material fraction used}} \times 100\%$$

ตารางที่ จ.32 ร้อยละผลได้ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1 ลิตร ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

สัดส่วนโมล (AlCl ₃ :H ₂ SO ₄)	ร้อยละผลได้
1:1.5	83.55
1:2.0	83.11
1:2.5	83.47
1:3.0	83.17

ตารางที่ จ.33 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1 ลิตร

RPM/Type	%Yield		
	4-PBT	RT	6-PBT
100 rpm	71.8	73.9	75.6
200 rpm	72.7	74.1	76.5
300 rpm	74.1	74.6	82.4
600 rpm	75.6	76.3	82.1
1200 rpm	74.3	76.5	82.4
1800 rpm	74.0	77.0	82.3

ตารางที่ จ.34 ร้อยละผลได้ของอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ 10 ลิตร

RPM	yield
59 rpm	73.1
133 rpm	77.6
175 rpm	79

ตารางที่ จ.35 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 25 ลิตร

RPM	yield
33 rpm	68.6
99 rpm	77.3
144 rpm	78.1

ตารางที่ จ.36 ร้อยละผลได้ของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (yield) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10, 25 เมื่อปรับค่า n= 0.5

Reactor size (L)	Yield
1L_300rpm	82.4
10L_200 rpm	82.3
25L_173 rpm	82.2

จ-2 ร้อยละของแข็ง (Total Solid %) ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 0.25,1,10 และ 25 ลิตร

ปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเมื่อมีการขยายขนาดนั้น คือการผสมกันของสารสองชนิด ทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็งดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษา ผลการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์ และชนิดใบพายรวมไปถึงความเร็วรอบที่ส่งผลต่อของร้อยละของแข็ง (Total Solid %)ที่เกิดขึ้น ดังนั้นการหาร้อยละของแข็ง (Total Solid %) ตามมาตรฐาน APHA 18th edition 1992 โดยคำนวณตามสูตร

$$\% \text{ Solid} = \frac{(A-B)}{V} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของกระดาศกรองหลังกรอง (กรัม)

B = น้ำหนักของกระดาศกรองก่อนกรอง (กรัม)

V = ปริมาณตัวอย่าง (กรัม)

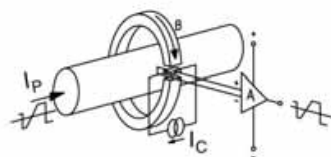
ตารางที่ จ.37 ร้อยละของแข็ง (Total Solid %) ของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 0.25 ลิตร

อุณหภูมิ	อัตราส่วนโมล					
	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:9
T= 27 C	44.01	25.42	24.21	21.28	20.04	15.14
T= 80 C	41.14	21.52	17.95	16.66	-	-
T= 90 C	39.74	19.8	17.08	16.04	-	-
T= 100 C	39.36	17.78	16.4	15.96	14.94	10.03
T= 110 C	38.73	17.84	16.03	15.76	-	-
T= 120 C	38.46	17.38	15.92	15.62	-	-

จ-3 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1,10 และ 25 ลิตร

ในระบบที่สารมีความหนืดสูง การขยายขนาดของถังปฏิกรณ์อาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมคือการกระจายพลังงานจลน์ของสาร ซึ่งขึ้นกับชนิด, ขนาด, ตำแหน่ง และความเร็วรอบของใบพาย โดยการออกแบบถังปฏิกรณ์จะอ้างอิงตาม Standard Agitation System ที่บ่งบอกสัดส่วนของใบพายต่อขนาดของถังปฏิกรณ์ แต่ความเร็วรอบของการปั่น ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารในระบบด้วย ดังนั้นคุณสมบัติของสารในระบบ จึงมีผลต่อการใช้พลังงาน

การพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนใช้อุปกรณ์กฎของโอห์ม (2102210 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) การใช้ Open Loop Transducers เป็นตัววัดกระแส โดย Transducer แปลงสัญญาณกระแสสลับเป็นค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ, Op amp ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและแปลงค่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเป็นแรงดันไฟฟ้า, และ Digital multi meter ทำหน้าที่คำนวณแรงดันไฟฟ้า (E) ให้กลายเป็นกระแสจริง (I) โดยงานวิจัยนี้ใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่งใช้อุปกรณ์ Open Loop Transducers เป็นตัววัดกระแส ตามรูป จ.1



รูปที่ จ.3 Principle of Open Loop Transducers (แหล่งที่มา LEM Components, Publication CH 24108 E/US (11.04 • 9/6 • CDH))

ตารางที่ จ.38 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1 ลิตร

Power Consumption (KW)						
Time	4-PBT 100rpm	4-PBT 200rpm	4-PBT 300rpm	4-PBT 600rpm	4-PBT 1200rpm	4-PBT 1800rpm
0	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
1	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
3	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
5	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
10	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
15	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
20	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
25	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
30	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
35	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
40	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
45	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
50	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
55	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
60	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374
70	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
80	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
90	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
100	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
110	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
120	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
AVG	0.03520	0.03520	0.03520	0.03583	0.03583	0.03803

ตารางที่ จ.7 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 1ลิตร
(ต่อ)

Power Consumption (KW)						
Time	6-PBT	6-PBT	6-PBT	6-PBT	6-PBT	6-PBT
0	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
1	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
3	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
5	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
10	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
15	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
20	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
25	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
30	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
35	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
40	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
45	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
50	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
55	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
60	0.0352	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374
70	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
80	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
90	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
100	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
110	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
120	0.0352	0.0352	0.0352	0.0374	0.0374	0.0396
AVG	0.03520	0.03520	0.03520	0.03583	0.03740	0.03803

ตารางที่ จ.39 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 10ลิตร

Power Consumption (KW)			
Time	59 rpm	133 rpm	175 rpm
0	0.0352	0.0374	0.0374
1	0.0352	0.0374	0.0374
3	0.0352	0.0374	0.0374
5	0.0352	0.0374	0.0374
10	0.0352	0.0374	0.0374
15	0.0352	0.0374	0.0374
20	0.0352	0.0374	0.0374
25	0.0352	0.0374	0.0374
30	0.0352	0.0374	0.0374
35	0.0352	0.0374	0.0374
40	0.0374	0.0374	0.0374
45	0.0374	0.0374	0.0374
50	0.0374	0.0374	0.0374
55	0.0374	0.0374	0.0374
60	0.0374	0.0374	0.0374
70	0.0374	0.0374	0.0374
80	0.0374	0.0374	0.0374
90	0.0374	0.0374	0.0374
100	0.0374	0.0374	0.0374
110	0.0374	0.0374	0.0374
120	0.0374	0.0374	0.0374
AVG	0.03635	0.03740	0.03740

ตารางที่ จ.40 พลังงานที่ใช้ในการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 25ลิตร

Power Consumption (KW)			
Time	33 rpm	99 rpm	144 rpm
0	0.0352	0.0374	0.0396
1	0.0352	0.0374	0.0396
3	0.0352	0.0374	0.0396
5	0.0352	0.0374	0.0396
10	0.0352	0.0374	0.0396
15	0.0352	0.0374	0.0396
20	0.0352	0.0374	0.0396
25	0.0352	0.0374	0.0396
30	0.0352	0.0374	0.0396
35	0.0352	0.0374	0.0396
40	0.0374	0.0374	0.0396
45	0.0374	0.0374	0.0418
50	0.0374	0.0374	0.0418
55	0.0374	0.0374	0.0418
60	0.0374	0.0374	0.0418
70	0.0374	0.0374	0.0418
80	0.0374	0.0374	0.0418
90	0.0374	0.0374	0.0418
100	0.0374	0.0374	0.0418
110	0.0374	0.0374	0.0418
120	0.0374	0.0374	0.0418
AVG	0.03635	0.03740	0.04065

จ-6 ความหนืดของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 0.25,1,10 และ 25 ลิตร

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการปั่นกววนของการผสมของแข็งกับของเหลว เนื่องจากสารเคมีที่มาทำปฏิกิริยา เป็นของแข็งซึ่งได้แก่ อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ และ แคลเซียม คาร์บอเนต ส่วนที่เป็นของเหลวได้แก่ กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก ซึ่งระหว่างทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์จะพบว่าเป็นสารละลายที่มีสองวัฏภาค ดังนั้นการเลือกชนิดของใบกววนต้องให้มีความเหมาะสมกับวัฏภาคของสารผสมดังนั้นการเพิ่มความเร็วกววนจะทำให้ของแข็งกระจายตัวเข้าไปในเฟสของของเหลวได้มากขึ้นและยังทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งเพื่อเกิดการถ่ายเทมวลได้มากขึ้นอีกหนึ่งในลักษณะทางกายภาพของสารในการทดลองนี้ที่มีผลต่อการออกแบบถังปฏิกรณ์นั้นก็คือการที่สารผสมมีความหนืดสูงและมีลักษณะเป็น Slurry ซึ่งเครื่องมือสำหรับการผสมที่มีความหนืดลักษณะพิเศษ คือ จำเป็นต้องมีค่าการส่งกำลังต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่สูง โดยถ้าหากเป็นกรณีของไหลความหนืดต่ำโมเมนตัมจะถูกเคลื่อนที่ได้จากการหมุนส่วนประกอบ เช่น ใบกววน ขณะที่ของผสมมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นผลกระทบจากความหนืดนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยทำการวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer , Model LVDV-II- Pro ในการทดลองนี้ทำการวัดตามมาตรฐาน PGLA test Method no LA-406-01

ตารางที่ จ.41 ความหนืดของการผลิตพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดขนาด 0.25, 1, 10 และ 25 ลิตร

Reactor size	Impeller type	Agitator speed	Sample Volume(ml)	Spindle No	Temp (C)	Viscosity (Cp)		
						30 min	60min	120 min
0.25 L	N/A	N/A	20	00'	30	4.3	9.1	13.7
1 L	4-PBT	300	20	00'	30	5.3	10.2	14.4
		600	20	00'	30	5.3	10.1	14.2
		1200	20	00'	30	5.1	9.8	14.0
		1800	20	00'	30	4.9	9.6	13.8
	6-PBT	300	20	00'	30	5.1	10.0	14.3
		600	20	00'	30	5.0	9.8	14.1
		1200	20	00'	30	4.8	9.7	13.8
		1800	20	00'	30	4.7	9.3	13.6
	RT	300	20	00'	30	5.0	10.6	14.9
		600	20	00'	30	4.8	10.4	14.7
		1200	20	00'	30	4.6	10.3	14.4
		1800	20	00'	30	4.4	9.8	14.1
10 L	6-PBT	59	20	00'	30	5.6	10.4	15.1
		133	20	00'	30	5.7	10.7	15.4
		175	20	00'	30	5.7	10.8	15.4
		200	20	00'	30	5.7	10.8	15.5
25 L	6-PBT	33	20	00'	30	5.6	10.7	15.1
		99	20	00'	30	5.7	10.7	15.4
		144	20	00'	30	5.7	10.8	15.4
		173	20	00'	30	4.8	10.8	15.4

จ-7 Impeller Tip speed

จากนั้นดำเนินการเลือกชนิดของใบพายที่มีค่า Percentage yield (%) และ Productivity (mol/L) ที่ดีที่สุดสำหรับที่ทดลองใน เครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร เพื่อนำชนิดของใบพายที่ได้ ไปทดลองกับถังปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร โดยกำหนดค่าความเร็วรอบจากค่า Impeller tip speed ที่ได้จากข้อมูลจากเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตร ซึ่งสามารถนำไปคำนวณความเร็วรอบที่จะต้องใช้ในขนาดเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 และ 25 ลิตร โดยที่ค่า Impeller tip speed คำนวณได้จาก

$$\text{Impeller Tip speed (ms}^{-1}\text{)} = \frac{\pi Ni Di}{60}$$

เมื่อ Ni คือ ความเร็วรอบ (รอบต่อวินาที)

Di คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพาย (เมตร)

ตารางที่ จ.42 Impeller Tip speed ของใบพายทั้ง 3ชนิดเครื่องปฏิกรณ์แบบปั่นกววนขนาด 1 ลิตร

Impeller Tip speed (MS ⁻¹)			
Agitator speed (rpm)	4-PBT	RT	6-PBT
100	0.2512	0.2512	0.2512
200	0.5024	0.5024	0.5024
300	0.7536	0.7536	0.7536
600	1.5072	1.5072	1.5072
1200	3.0144	3.0144	3.0144
1800	3.0144	3.0144	3.0144

ตารางที่ จ.43 Dimensions of turbine and tank

Reactor size	H	Dt	Da	W	C	H/Dt	Da/Dt	C/Dt	W/Da
	mm	mm	mm	mm	mm				
1 L	106	106	48	10	37	1	0.4528	0.3491	0.2083
10 L	230	230	108	22	80	1	0.4696	0.3478	0.2037
25 L	315	315	145	30	110	1	0.4603	0.3492	0.2069

ตารางที่ จ.44 ความเร็วรอบที่คำนวณจาก Impeller tip speed

Reactor size	Impeller Tip speed (MS-1)	Di (m)	Ni (rpm)
10 L	0.754	0.108	133
25 L	0.754	0.145	99

ตารางที่ จ.45 Reynolds Number

Reynolds number			
RPM	4-PBT	RT	6-PBT
100	1461	1515	1473
200	2967	3085	2987
300	4481	4681	4512
600	9239	9498	9229
1200	18743	19437	19014
1800	28755	29594	29178

ตารางที่ จ.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds Number และ power number

Reynolds	Power Number		
	4-PBT	6-PBT	RT
486	-	593761	-
881	-	139587	-
1461	63123	63123	63123
1489	-	22907	-
2046	-	12693	-
2266	-	8209	-
2837	-	5572	-
2967	7890	7890	7890
4481	2338	2338	2338
9239	298	298	292
18743	37	39	37
28755	12	12	11

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชุตินันท์ ชาญพานิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด ระยอง มีพี่น้องรวม 2 คน เป็นบุตรชายคนโตของครอบครัว ในปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง และในปี พ.ศ. 2546 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY