

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดของปฏิกรณ์เคมี

ในการสังเคราะห์คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส

ร/ท. นายภัทรารุท มนต์วิเศษ

ภา 3547 นายวันชนะ ยืนสุตร

เลขหมู่ 2537
เลขทะเบียน
วัน เดือน ปี

62557262

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2537

**A Study of Important Parameters for Scale Up of Chemical Reactor
in the Synthesis of Carboxymethyl Cellulose**

Mr.Pathavuth Monvisade

Mr.Wanchana Yinasoot

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang**

1994

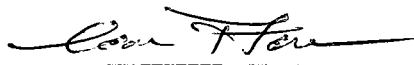
หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี
ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

นักศึกษา นายภัทรธาวุธ มนต์วิเศษ
นายวันชนะ ยินสุตร

ภาควิชา เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลฉวีรัตน์
ดร.ประเสริฐ คุณคำชู
อาจารย์อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้รับโครงการพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ.ดร.เมธีชญชัย ไชยสิทธิ์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ



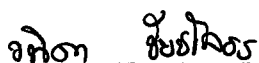
(ผศ.ดร.ศักดิ์ดา ไตรศักดิ์)

ประธานกรรมการ



(ดร.อนุชา เอื้อเพิ่มเกียรติ)

กรรมการ



(อ.วณิดา ชัยชไลธร)

กรรมการ

ธีรวัฒน์ มงคลชัยวัฒน์
(ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลชัยวัฒน์)

กรรมการ

ประเสริฐ คุณคำชู
(ดร.ประเสริฐ คุณคำชู)

กรรมการ

อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล
(อ.อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีใน การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
นักศึกษา	นายภัทรารุช มนต์วิเศษ นายวันชนะ ยินสุตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์ ดร.ประเสริฐ คุณคำชู อาจารย์อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

การขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จำเป็นต้องศึกษาและตรวจสอบตัวแปร และความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ คือกำลังบิด กำลังบิดต่อปริมาตร กำลังต่อปริมาตร ตัวเลขเรย์โนลด์และความเร็วรอบ ซึ่งในการศึกษาได้ดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน คือ การศึกษาแบบจำลองในถังปฏิกรณ์เคมีแบบแบบทซ์ขนาด 2 ลิตร พร้อมครีบบและใบพัดกวนแบบ anchor ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวนต่าง ๆ กัน คือ 50 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที พบว่าขีดจำกัดของความเร็วรอบในการปั่นกวนอยู่ระหว่างความเร็วรอบ 50 และ 75 รอบต่อนาที และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังบิด และกำลังบิดต่อปริมาตร เพียงเล็กน้อยจะทำให้กำลังและกำลังต่อปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปมาก โดยพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของค่าองศาการแทนที่ที่เท่ากัน ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีจึงน่าจะเป็นกำลังบิด และกำลังบิดต่อปริมาตร ในขั้นที่สองของการศึกษาเป็นการคำนวณและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร โดยอาศัยหลักความคล้ายเชิงเรขาคณิต ร่วมกับความคล้ายเชิงพลศาสตร์ ซึ่งแสดงในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ที่นำไปสู่การกำหนดแฟกเตอร์ตัวคูณของการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีต่อไป ในการศึกษาเป็นการสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร และศึกษาโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด ซึ่งจากการทดลองพบว่าความเร็วรอบสัมพัทธ์สำหรับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร คือ 35.57 และ 11.86 รอบต่อนาที โดยเทียบกับความเร็วรอบในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วรอบ 300 และ 100 รอบต่อนาที ตามลำดับ พบว่าค่าองศาการแทนที่ที่ได้เมื่อใช้ความเร็วรอบ 35.57

รอบต่อนาที จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าองศาการแทนที่ของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที แต่ค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที ให้ผลไม่สอดคล้องกับที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังบิดทั้งที่ความเร็วรอบ 35.57 และ 11.86 รอบต่อนาที ให้ผลไม่สอดคล้องกับค่ากำลังบิดในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากำลังบิดเป็นตัวแปรที่เหมาะสมกับการขยายขนาดที่ความเร็วรอบสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตามการศึกษาในช่วงต้นพบว่า ตัวแปรที่น่าจะเหมาะสมอีกตัวหนึ่ง สำหรับการใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด คือ กำลังบิดต่อปริมาตร

A

Special Project Title A Study of Important Parameters for Scale Up of Chemical
Reactor in the Synthesis of Carboxy Methyl cellulose

Name Mr.Pathavuth Monvisade
 Mr.Wanchana Yinasoot

Special Project Advisor Asst.Prof.Dr.Theerawat Mongkolausawarat
 Dr.Prasert Khunkamehoo
 Mr.Anuruk Pitirugsakul

Department Chemistry

Academic Year 1994

Abstract

Since the scale up of chemical reactor for producing carboxy methyl cellulose is necessary to investigate important parameters and their relationships, i.e. torque, torque per unit volume, power, power per unit volume, raynolds number and speed. The study were separated into 2 parts. The first part involved a survey of those parameters at various speed of agitation, i.e. 50, 75, 100, 200 and 300 rpm on a 2-litre chemical reactor. It can be seen from this investigation that degree of substitution was dropped at the lower speeds (50 and 75 rpm) which was found to be differ to other speed limits. In addition, it was observed that the relationships between variable,i.e. when considering at a constant value of degree of substitution, that a small change of torque or torque per unit volume can cause an enormous change of power or power per unit volume respectively. Therefore, the deduction can be proposed that the torque or torque per unit volume is a significant variable in scaling up. Then a 24.7-litre chemical reactor was designed and constructed with a factor which provided a similarity in torque value. Likewise, the speeds of agitation were determined at 35.57 and 11.86 rpm in order to obtain the same speed limit at 300 and 100 rpm respectively. It was found that the degree of substitution (DS) obtained at higher speed limit was comparable to the value obtained from small batch reactor at 300 rpm. However, the DS obtained at the lower speed limit was found

to be discrepancy with the value obtained at 100 rpm in the small batch. Thus, it was implied that the parameter like torque can be used and is suitable for scaling up just for higher speed. In addition, it is presented in this current research work that torque per unit volume could be replaced and would be more appropriate to be employed for further study.

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือ ดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์อรรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ดร.ประเสริฐ คุณคำชู ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือประสานงานในการทำโครงการ พิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลธวัชรัตน์ ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณคณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยพิจารณาและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ บริษัท Hycel จำกัด ที่อนุเคราะห์เอื้อกระชาย และอนุญาตในการเยี่ยมชมโรงงาน

ขอขอบคุณ ร้านโลหะภัณฑ์การช่าง บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด และบริษัท เอ็มคอนโทรล จำกัด ที่ให้คำแนะนำในการจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือวัดกระแส เครื่องมือวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และเครื่องมือวัดความเร็วรอบ

ขอขอบคุณทุก ๆ คนที่เกี่ยวข้อง ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและกำลังใจ จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

นายภัทราวุธ มนต์วิเศษ

นายวันชนะ ยินสุตร

2 เมษายน 2538

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ด
สัญลักษณ์	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การกวน	6
2.1.1 ชนิดของถังกวน	7
2.1.2 ใบพัดกวน	7
2.1.3 ถังมาตรฐาน	16
2.2 การขยายขนาด	20
2.2.1 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการขยายขนาด ถังปฏิกรณ์เคมี	20
2.2.2 การขยายขนาดโดยใช้ความคล้ายเชิงเรขาคณิต และความคล้ายเชิงพลศาสตร์	21
2.2.3 การหาเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้หลักความคล้าย เชิงเรขาคณิตร่วมกับหลักความคล้ายเชิงพลศาสตร์	22
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 สารเคมี	27
3.3 การเขียนแบบ ออกแบบ และจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น	27
3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ CMC ในถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 2 ลิตร	28

	หน้า
3.4.1 ขั้นตอนในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานส์เฟอร์	28
3.4.2 ขั้นตอนการทำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์	29
3.4.3 การหาค่าองศาการแทนที่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	29
3.5 การศึกษาการขยายขนาดในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร โดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด	30
บทที่ 4 การออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	
4.1 การเขียนแบบ การออกแบบ ถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 24.7 ลิตร	31
4.2 อุปกรณ์ประกอบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	41
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
5.1 ผลของความเร็รรอบในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	46
5.1.1 ผลของค่าความเร็รรอบต่อค่าองศาการแทนที่	46
5.1.2 ผลของความเร็รรอบต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ	47
5.2 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	47
5.3 ผลของการขยายขนาด โดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 24.7 ลิตร	57
5.3.1 ผลต่อค่าองศาการแทนที่	57
5.3.2 ผลต่อกำลังบิด	57
5.4 เปรียบเทียบผลของค่าองศาการแทนที่และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการขยาย ขนาดระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรกับถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 24.7 ลิตร	64
5.4.1 ผลของการขยายขนาดกับค่าองศาการแทนที่	64
5.4.2 ผลของการขยายขนาดกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ	66
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 ผลของความเร็รรอบในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	68
6.1.1 ผลของค่าความเร็รรอบต่อค่าองศาการแทนที่	68
6.1.2 ผลของความเร็รรอบต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ	68
6.2 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	69

	หน้า
6.3 ผลของการขยายขนาด โดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ ในถังปฏิกรณ์เคมี	
ขนาด 24.7 ลิตร	69
6.3.1 ผลต่อค่าองศาการแทนที่	69
6.3.2 ผลต่อกำลังบิด	69
6.4 เปรียบเทียบผลของการใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดระหว่าง	
ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร กับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	70
6.4.1 ผลของการขยายขนาดกับค่าองศาการแทนที่	70
6.4.2 ผลของการขยายขนาดกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ	70
6.5 ข้อเสนอแนะ	70
ภาคผนวก ก รูปการทดลอง	71
ภาคผนวก ข การเตรียมสาร	74
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง	75
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ	89
ภาคผนวก จ ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	95
ภาคผนวก ฉ ถังอุปกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรและอุปกรณ์ประกอบ	98
เอกสารอ้างอิง	103
บรรณานุกรม	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถัง มาตรฐาน ครีป และไบพัตชนิดต่าง ๆ	18
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถัง มาตรฐาน ครีป และไบพัตชนิดต่าง ๆ	19
ตารางที่ 2.2 แสดงแฟคเตอร์ที่ใช้เป็นตัวคูณในการขยายขนาด	25
ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถัง มาตรฐานและถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ครีป และไบพัตชนิดต่าง ๆ	31
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถัง มาตรฐานและถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ครีป และไบพัตชนิดต่าง ๆ	32
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร และ 24.7 ลิตร เมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด เปรียบเทียบ ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี	67
ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของการปั่นกววน 300 รอบต่อนาที	75
ตารางที่ ค.2 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที	76
ตารางที่ ค.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบ ของไบพัต 300 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	76
ตารางที่ ค.4 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของไบพัต 200 รอบต่อนาที	77
ตารางที่ ค.5 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที	78
ตารางที่ ค.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบ ของไบพัต 200 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	78
ตารางที่ ค.7 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบไบพัตกววน 100 รอบต่อนาที	79
ตารางที่ ค.8 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที	80

	หน้า
ตารางที่ ค.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 100 รอบต่อนาที	80
ตารางที่ ค.10 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 75 รอบต่อนาที	81
ตารางที่ ค.11 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 75 รอบต่อนาที	82
ตารางที่ ค.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 75 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	82
ตารางที่ ค.13 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 50 รอบต่อนาที	83
ตารางที่ ค.14 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที	84
ตารางที่ ค.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 50 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	84
ตารางที่ ค.16 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 35.57 รอบต่อนาที	85
ตารางที่ ค.17 แสดงข้อมูลการหาลำดับที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาที	86
ตารางที่ ค.18 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 35.57 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	86
ตารางที่ ค.19 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 11.86 รอบต่อนาที	87
ตารางที่ ค.20 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที	88
ตารางที่ ค.21 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 11.86 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	88
ตารางที่ จ.1 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที	95
ตารางที่ จ.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 75 รอบต่อนาที	96

	หน้า
ตารางที่ จ.3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยาย ขนาดโดยใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที	96
ตารางที่ จ.4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยาย ขนาดโดยใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที	97

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การไหลวนในถังกวนแบบไม่มีครีบ	8
รูปที่ 2.2	การไหลในแนวรัศมี (radial-flow) และแนวแกน (axial-flow) ในถังแบบมีครีบ	8
รูปที่ 2.3	รูปแบบการวางครีบ (baffle arrangement)	9
รูปที่ 2.4	ใบพัดเรือ (marine type impeller)	11
รูปที่ 2.5 ก	Anchor agitator	11
รูปที่ 2.5 ข	Gate type anchor agitator	12
รูปที่ 2.5 ค	Herical ribbon agitator	12
รูปที่ 2.6 ก	Flat blade turbine	13
รูปที่ 2.6 ข	Disk mounted curved blade turbine	13
รูปที่ 2.6 ค	Hub mounted curved blade turbine	14
รูปที่ 2.6 ง	Hub mounted pitched blade turbine	14
รูปที่ 2.7 ก	Modified turbine	15
รูปที่ 2.7 ข	Saw-tooth edge	15
รูปที่ 2.7 ค	Herical acrow	16
รูปที่ 2.8	รูปร่างและส่วนประกอบของถังมาตรฐาน	17
รูปที่ 4.1	แสดงแบบของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ที่จัดสร้างขึ้น	33
รูปที่ 4.2	แสดงแบบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	34
รูปที่ 4.3	แสดงแบบของฝาถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร	35
รูปที่ 4.4	แสดงแบบของครีบบังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร สำหรับใบพัดแบบ Anchor	36
รูปที่ 4.5	แสดงแบบของครีบบังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร สำหรับใบพัดชนิดอื่น ๆ	37
รูปที่ 4.6	แสดงแบบของใบพัดชนิด Anchor	38
รูปที่ 4.7	แสดงแบบของใบพัดชนิด Flat blade turbine	39
รูปที่ 4.8	แสดงแบบของใบพัดชนิด Hub mounted pitched blade turbine	40
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power number กับ Reynolds number	41

	หน้า
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลาในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	48
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับเวลาในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	49
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยกับเวลาในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	50
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดต่อปริมาตรกับเวลาในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	51
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่อปริมาตรกับเวลาในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ	52
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับความเร็วรอบที่เวลาต่าง ๆ	53
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่เวลาต่าง ๆ	54
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดต่อปริมาตรกับความเร็วรอบ ที่เวลาต่าง ๆ	55
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่อปริมาตรกับความเร็วรอบที่เวลา ต่าง ๆ	56
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังบิดในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	58
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังเฉลี่ยในถัง ปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	59
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังบิดต่อปริมาตร ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	60
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังต่อปริมาตร ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร	61
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลาในถังปฏิกรณ์ เคมีขนาด 24.7 ลิตร	62
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับเวลาในถังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 24.7 ลิตร	63
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา	65

	หน้า	
รูปที่ ก.1	แสดงถึงปฏิกรณ์เคมีที่ใช้ทดลอง	71
รูปที่ ก.2	แสดงการวัดรอบของการปั่นกวาน	72
รูปที่ ก.3	แสดงการต่อวงจรไฟฟ้า	73
รูปที่ ง.1	การแปลงอินทริกซ์ของพิกัดทรงกลม	93
รูปที่ ฉ.1	แสดงถึงปฏิกรณ์เคมีที่สร้างขึ้น	98
รูปที่ ฉ.2	แสดงฝาถึงปฏิกรณ์เคมีพร้อม ครีบ มอเตอร์ และใบพัดกวาน	99
รูปที่ ฉ.3	แสดงตัวถึงปฏิกรณ์เคมี	100
รูปที่ ฉ.4	แสดง Magnetic relay (ด้านบน)	101
รูปที่ ฉ.5	แสดง Magnetic relay (ด้านข้าง)	101
รูปที่ ฉ.6	แสดงชุดควบคุมหลัก (ด้านบน)	102
รูปที่ ฉ.7	แสดงชุดควบคุมหลัก (ด้านข้าง)	102

สัญลักษณ์

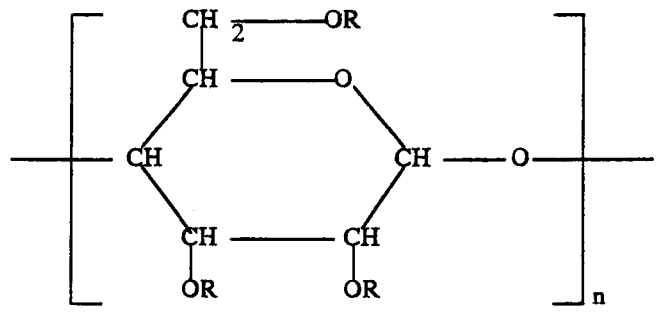
A	: กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
D	: เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด, เมตร
D_T	: เส้นผ่านศูนย์กลางถัง, เมตร
F	: แรงที่กำหนดให้สำหรับขนาดต้นแบบ (m) และขนาดโรงงาน(p)
G	: ความเร่งโน้มถ่วง, เมตร/วินาที ²
H_i	: ความสูงของใบพัดจากกันถัง, เมตร
H	: ความสูงของของเหลว, เมตร
I	: อ่างอิงเป็นแรงเฉื่อย
l	: ความกว้างของแผ่นใบพัด, เมตร
N_{Fr}	: ตัวเลขฟรูด, ไร้หน่วย
N_{Po}	: ตัวเลขกำลัง, ไร้หน่วย
N_Q	: ตัวเลขการไหล, ไร้หน่วย
N_{Re}	: ตัวเลขเรย์โนลด์, ไร้หน่วย
N_{We}	: ตัวเลขเวเบอร์, ไร้หน่วย
P	: กำลัง, วัตต์
Q	: อัตราการไหล, ลูกบาศก์เมตร/วินาที
Q_h	: กำลังของอุปกรณ์ให้ความร้อน, วัตต์
q	: ความสูงของแผ่นใบพัด, เมตร
R	: รัศมีความโค้งกันถัง, เมตร
r	: ความยาวของแผ่นใบพัด, เมตร
V	: ปริมาตร, ลูกบาศก์เมตร
V	: แรงเคลื่อนไฟฟ้า, โวลท์
W_b	: ความกว้างของครีป, เมตร
ρ	: ความหนาแน่น, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
μ	: ความหนืด, กิโลกรัม/เมตร-วินาที
σ	: ความตึงระหว่างผิว
m	: บอกถึงค่าที่ใช้กับขนาดทดลอง
p	: บอกถึงค่าที่ใช้กับขนาดโรงงาน

บทที่ 1

บทนำ

[1]

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส Sodium carboxymethylcellulose , CMC, CM cellulose gum, carboxymethylcellulose glycolate ซึ่งมีหมายเลข CAS = 9004-32-4 เป็นแอนไอออนิกเซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายในน้ำ มีสูตรโครงสร้างดังรูป



R = H หรือ $-CH_2COO^- Na^+$

n คือ ความยาวโซ่เฉลี่ยของแมโครโมเลกุล มีค่าประมาณ 100 ถึง 200

ค่าที่แสดงจำนวนกลุ่ม $CH_2COO^- Na^+$ ที่แทนที่ไฮโดรเจนต่อ 1 หน่วย นี้เรียกว่า องศาการแทนที่ (degree of substitution) สามารถมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 3 แต่ที่ผลิตได้ในปัจจุบันมีค่าองศาการแทนที่ ระหว่าง 0.4 - 1.5 เท่านั้น CMC เป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นอันตรายคงตัวในช่วงความเป็นกรดต่าง 2-10 น้ำหนักโมเลกุลมีตั้งแต่ 2,100 ถึง 500,000 CMC ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ สามารถละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรือ แอซีโตน ความเป็นกรดต่างประมาณ 6.5-8.0 เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้น อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และค่า ความยาวโซ่เฉลี่ยของแมโครโมเลกุล (n) คุณสมบัติในการละลายขึ้นอยู่กับองศาการแทนที่ กล่าวคือ CMC ที่มีค่าองศาการแทนที่ต่ำกว่า 0.1 จะไม่ละลายน้ำและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ถ้าค่านี้สูงกว่า 0.2 จะละลายน้ำ แต่ยังคงไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ CMC เป็นผงซึ่งทำให้เกิดฝุ่นในอากาศ ถ้าสารละลายของ CMC หกบนพื้นจะทำให้พื้นลื่น นอกจากนี้แล้ว CMC เป็นสารที่ปลอดภัยมาก CMC เป็นสารที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ต่าง ๆ เนื่องจากคุณสมบัติในการละลายน้ำ ความเป็นกลาง ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ด้วย

จุลินทรีย์จึงไม่เกิดการสะสมในแหล่งน้ำ มีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ CMC ที่ผลิตจำหน่ายมีมากมายหลายชนิดคุณภาพ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เช่น ในกรณีที่ใช้ ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอางค์ จะใช้ CMC ที่มีควมบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.9 % โดยมีอาร์เซนิก และ ตะกั่ว ในปริมาณที่ต่ำ

การใช้ CMC ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่

- | | |
|------------------------|---|
| อุตสาหกรรมอาหาร | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึก ในไอศกรีมน้ำเชื่อม น้ำตาลปั่น (icings) อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล - ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัว (protective colloid) ใน mayonnaise - ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหาร นม น้ำผลไม้ - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์ สารแต่งหน้าของหวาน - ใช้เป็นสารทำให้เป็นวุ้นในเยลลี่ ขนมพุดดิ้ง (puddings) - ใช้เป็นสารทำให้ขึ้นฟูในไอศกรีม whipping cream |
| อุตสาหกรรมยา | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อการคงตัว และใช้เป็นสารควบคุมการออกฤทธิ์ของยา เนื่องจาก CMC ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรด เช่นในกระเพาะอาหาร แต่ละลายในสภาวะที่เป็นด่าง เช่นในลำไส้ - ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัว สำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะเป็นสารแขวนลอย หรือ อิมัลชัน |
| อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้น สารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัว สารก่อฟิล์มในผลิตภัณฑ์ จำพวกครีม โลชั่น แชมพู เจล ยาสีฟัน |
| อุตสาหกรรมผงซักฟอก | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้ผสมในผงซักฟอก เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดจากผ้ากลับติดบนเนื้อผ้า |
| อุตสาหกรรมกาว | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในกาวสูตรน้ำ |
| อุตสาหกรรมสีและวาร์นิช | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นและสารช่วยในการแขวนลอยของผงสี - ใช้เป็นสารก่อฟิล์มในวาร์นิช |
| อุตสาหกรรมโพลีเมอร์ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการแยกตัว และสารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัวในปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ ของมอนอเมอร์ไวนิลคลอไรด์ |
| อุตสาหกรรมสิ่งทอ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารช่วยให้ด้ายดิบมีความแข็งแรง ทน เรียบ และมีน้ำหนัก - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในสีพิมพ์ผ้า |
| อุตสาหกรรมกระดาษ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้การพิมพ์หมึกดีขึ้น ไม่ดูดซึมน้ำมัน |

- อุตสาหกรรมน้ำมัน - ใช้เป็นสารผสมทำดิน สำหรับหล่อลื่นเครื่องขุดเจาะน้ำมัน เนื่องจาก CMC สามารถอุ้มน้ำได้ปริมาณสูง จึงทำให้การแขวนลอยของดินคงตัว
- อุตสาหกรรมเซรามิก - ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นในการทำ electrical porcelain
- ใช้เป็นสารช่วยทำให้ขึ้นและสารช่วยในการแขวนลอยในส่วนผสมของดิน
- อุตสาหกรรมข่าแม่แมลง - ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในข่าแม่แมลงจำพวกสูตรน้ำ

การบอกรีเมทิลเซลลูโลสสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดอีเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานสเฟอร์ ระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอโรอะซิเตท จากนั้นทำให้สารละลายมีฤทธิ์เป็นกลางด้วยกรด โดยมีโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไกลโคลเลตเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา และทำให้ CMC ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงโดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอซีโตนสกัดแยกเกลือโซเดียมทั้งสอง

การผลิต CMC ในอุตสาหกรรมจะต้องใช้ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ผลผลิตจำนวนมาก และต้องควบคุมพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าองศาการแทนที่สูงสุด ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตด้วย ดังนั้น เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในกระบวนการผลิต จึงต้องมีการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ จากการผลิตด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาดเล็ก และทำการทดลองหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการขยายขนาดเพื่อให้ค่าองศาการแทนที่สูงสุด

ถังปฏิกรณ์เคมีที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ถังปฏิกรณ์เคมีแบบแบทช์ (batch reactor) ถังปฏิกรณ์เคมีแบบท่อควน (mixed flow reactor) และถังปฏิกรณ์เคมีแบบท่อไหล (plug flow reactor) ถังปฏิกรณ์เคมีที่เหมาะสมที่สุดในการหาข้อมูลการทดลอง คือ ถังปฏิกรณ์เคมีแบบแบทช์ ซึ่งมีโครงสร้างง่ายสามารถใช้ได้กับปฏิกิริยาที่ซับซ้อน ลักษณะของถังปฏิกรณ์เคมีแบบนี้จะมีลักษณะเป็นแบบถังควน (stirred tank reactor) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาและคุณสมบัติของของผสมที่ทำปฏิกิริยา เปลี่ยนไปตามเวลา มีครีปสำหรับการไหลวนอย่างรุนแรง สามารถป้องกันการเกิดกระแสน้ำทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการไหลวนของสารจะใช้ใบพัดควน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ paddle, propeller และ turbine ใบพัดควนเหล่านี้ทำให้ของเหลว เกิดการไหลวนและรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคทั้งสอง ทำให้การถ่ายเทมวลสารมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และการเพิ่มความเร็วยรอบของใบพัดควนทำให้เกิดการไหลวนแบบปั่นป่วน ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้น

โครงการพิเศษนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบ และจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 24.7 ลิตร เพื่อศึกษาและตรวจสอบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส และพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาด เพื่อให้ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่ที่ได้จากการขยายขนาด สามารถผลิต CMC ในระดับอุตสาหกรรม โดยให้ค่าองศาการแทนที่สูงสุดเช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์เคมีต้นแบบทดลอง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและตรวจสอบตัวแปรสำคัญในการใช้เป็นเกณฑ์เพื่อขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี ในการสังเคราะห์ CMC จากระดับห้องปฏิบัติการสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม
2. ออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มทักษะและความรู้ทางด้านงานขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีโดยใช้หลักความคล้ายเชิงเรขาคณิต (geometric similarity) และความคล้ายเชิงพลศาสตร์ (dynamic similarity)
2. เป็นจุดเริ่มต้นที่ดีของการศึกษาวิจัยการผลิต CMC ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม
3. มีการพัฒนาทักษะการวางแผนงาน และการดำเนินงานต่าง ๆ เพื่อให้การดำเนินการวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ได้วางไว้ ภายในระยะเวลาที่กำหนด
4. เป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรม และการพัฒนางานทางด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี ของประเทศไทย

ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะของถังปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์ CMC ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์
2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อการใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด
3. ออกแบบ สร้าง และหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น สำหรับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

4. ดำเนินการทดลองสังเคราะห์ CMC ด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร กับใบพัด กวนชนิด anchor สรূปหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด พร้อมกับสรূปหาตัวแปรที่สำคัญที่จะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด

5. ดำเนินการทดลองสังเคราะห์ CMC ด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ตามเกณฑ์ในการขยายขนาดจากข้อ 4 เมื่อได้เกณฑ์ในการขยายขนาดที่ถูกต้องแล้ว ก็ทำการสรূปตัวแปรที่สำคัญที่สุดเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีสำหรับการผลิต CMC ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกวน (agitation) [2]

การกวน เป็นกระบวนการที่ทำให้ของไหลรวมเป็นเนื้อเดียวกันหรือทำให้ของแข็งที่แขวนลอยอยู่แตกออกและละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการเหนี่ยวนำให้สารเกิดการเคลื่อนไหว เช่น การไหลเป็นวงกลมในภาชนะที่บรรจ

วัตถุประสงค์ของการกวน

1. เพื่อกระจายกลุ่มอนุภาคของของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ให้แตกออกจนเป็นของผสมที่มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เพื่อให้ของเหลวรวมกันเป็นเนื้อเดียว เช่น แอลกอฮอล์กับน้ำ
3. เพื่อกระจายแก๊สในของเหลว ให้อยู่ในรูปของฟองแก๊สเล็กๆ
4. เพื่อกระจายของเหลวชนิดที่สองที่ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับชนิดแรก ให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย หรือ อิมัลชัน
5. ช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น เช่น การถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวกับขดลวดให้ความร้อน เป็นต้น

ของเหลวส่วนใหญ่จะถูกกวนในถัง (tank) หรือภาชนะ (vessel) ที่เป็นทรงกระบอกซึ่งตั้งอยู่ในแนวตั้ง ส่วนบนอาจเปิดหรือปิดก็ได้ ชนิดของถังส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสภาพของวัสดุที่จะกวน แบบที่ใช้หมักจะมีก้นมน เพื่อที่จะกำจัดขอบที่คมหรือส่วนของไหลไม่อาจผ่านไปได้ ระดับความลึกของของเหลวจะประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบพัดกวนจะติดตั้งบนแกนที่ยื่นลงไปในถัง โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งบางครั้งก็ต่อเข้าโดยตรง แต่มักต่อผ่านทางชุดเกียร์ลดความเร็ว นอกจากนี้ยังมีการต่อท่อสำหรับให้ของเหลวเข้าออก ขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน กรอบโลหะ (jacket) และช่อง (wells) สำหรับคู่ควมความร้อน (thermocouple) หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ร่วมด้วย

ถังกวนใช้กันมากในการผสมสารหรือในลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เคมี ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะการสร้างและการควบคุมทำได้ง่าย ถังกวนมาตรฐานแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบไม่มีคิริบ และแบบมีคิริบ

2.1.1 ชนิดของถังกวน

ถังกวนแบบไม่มีครีบริบ (unbaffled tank)

ใช้ในการกวนที่ความเร็วรอบใบพัดต่ำ ๆ การกวนในถังชนิดนี้จะเกิดผิวเว้าลงไป (free vortex) ในแนวแกนของใบพัด ดังรูปที่ 2.1 ยิ่งความเร็วสูงผิวของของเหลวยิ่งต่ำลงมากใกล้ใบพัด จึงมีขีดจำกัดในการกำหนดความเร็วของใบพัด และใช้เวลาในการผสมมาก

ถังกวนแบบมีครีบริบ (baffled tank)

ใช้ในการกวนของเหลวที่ต้องการการไหลวนอย่างรุนแรง ทั้งในแนวขนานกับแกนหมุนและแนวรัศมี ไม่เกิดผิวเว้า ดังรูปที่ 2.2 ปกติจะมีครีบริบ 4 อัน มีความกว้างเป็น 1/10 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ระดับของเหลวในถังจะสูงประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบพัดมีขนาด 1/3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง และตั้งห่างจากพื้นถัง 1/3 ของขนาดถัง สำหรับรูปที่ 2.3 จะแสดงลักษณะต่าง ๆ ของการวางครีบริบ

2.1.2 ใบพัดกวน

เป็นตัวสร้างรูปแบบการไหลในระบบ ทำให้ของเหลวไหลหมุนเวียนรอบภาชนะและไหลเข้าสู่ใบพัด วนเวียนไปมาเช่นนี้ ใบพัดกวนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการทำงาน ดังรูปที่ 2.2 คือชนิดที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ขนานกับแกนหมุน (shaft) เรียกว่าชนิด axial-flow impellers เช่น พวงใบพัดเรือ (marine type impeller) และอีกชนิดหนึ่งทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ตั้งฉากกับแกนหรือในแนวรัศมี เรียกว่าชนิด radial-flow impellers เช่น พวงใบพาย (paddles) และพวงเทอร์ไบน์ (turbine)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งใบพัดกวนเป็น 3 แบบใหญ่ ๆ คือ

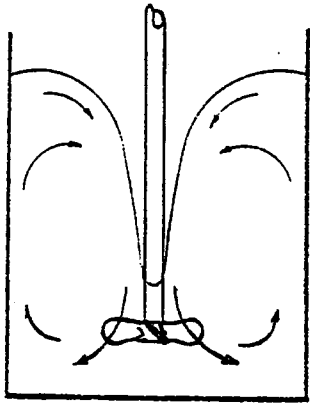
1. Propeller เป็นใบพัดกวนที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง มีการไหลในอัตราสูง ใช้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ มีทั้งชนิดใบพัด 2 ใบ และ 3 ใบ ดังรูปที่ 2.4

2. Paddle มีใบแบนราบสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดอยู่บนแกนหมุนที่ตั้งในแนวตั้ง โดยทั่วไปใช้ใบพัด 2 หรือ 4 ใบ ติดเป็นมุมฉากออกมา ดังรูปที่ 2.5 ก ข และค ใบพัดชนิดนี้จะหมุนในอัตราเร็วจากข้างถึงปานกลาง ใบพัดกวนแบบที่ใช้กันอยู่คือ

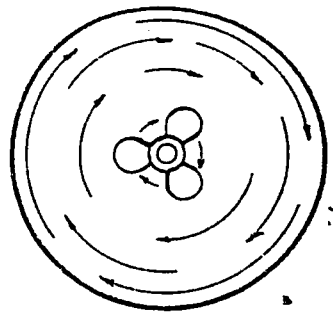
Gate type anchor agitator (รูปที่ 2.5 ก)

Anchor agitator (รูปที่ 2.5 ข)

Helical ribbon agitator (รูปที่ 2.5 ค)

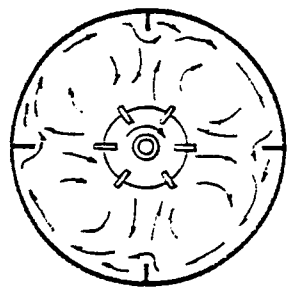


SIDE VIEW

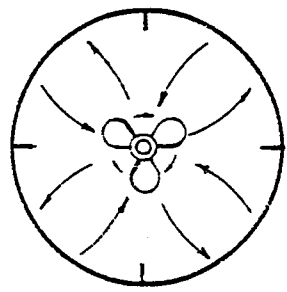


TOP VIEW

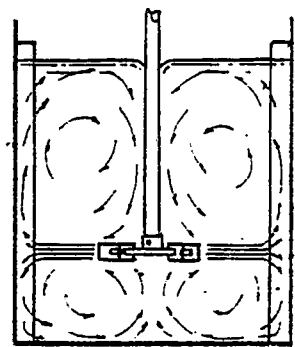
รูปที่ 2.1 การไหลวนในถังกวนแบบไม่มีคิริบ



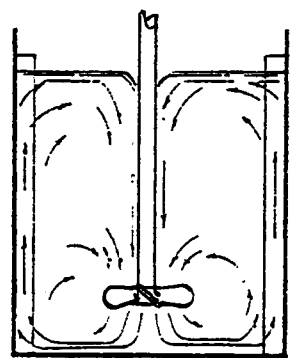
(A)



(B)

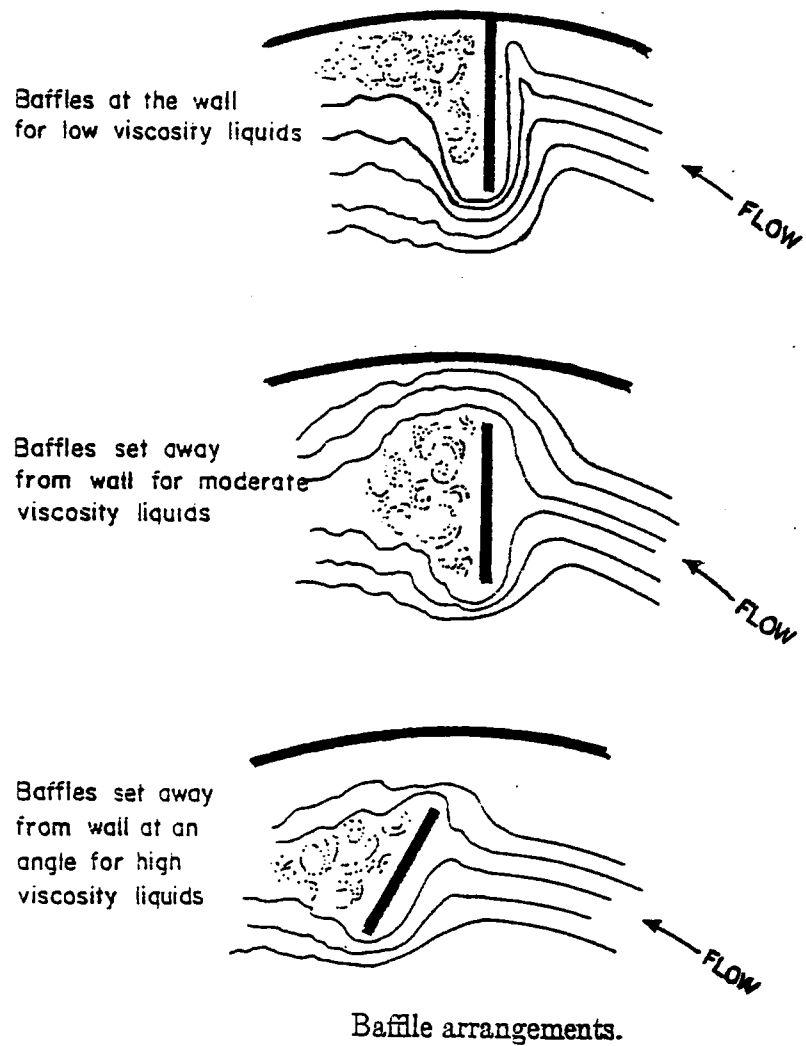


Radial flow pattern



Axial flow pattern

รูปที่ 2.2 การไหลในแนวรัศมี(radial-flow) และ แนวแกน(axial-flow) ในถังแบบมีคิริบ



รูปที่ 2.3 รูปแบบการวางค้ำ (Baffle arrangement)

3. Turbine ส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับใบพัดกวนแบบ paddle แต่มีใบพัดหลายใบที่มีขนาดสั้น ดังรูปที่ 2.6 ก ข ค และ ง หมุนด้วยอัตราเร็วสูง ติดอยู่บนแกนที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางถัง ใบพัดชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการใช้กับของเหลวที่มีความหนืดต่างๆ กันได้หลายค่า ที่ใช้กันอยู่มีดังนี้

Flat blade turbine (รูปที่ 2.6 ก)

Disk mounted curved blade turbine (รูปที่ 2.6 ข)

Hub mounted curved blade turbine (รูปที่ 2.6 ค)

Hub mounted pitched blade turbine (รูปที่ 2.6 ง)

Arrowhead turbine

Fan turbine

นอกจากนี้ยังมีใบพัดกวนที่ใช้งานเฉพาะอย่างและไม่อาจจัดอยู่ใน 3 กลุ่มแรก ได้แก่

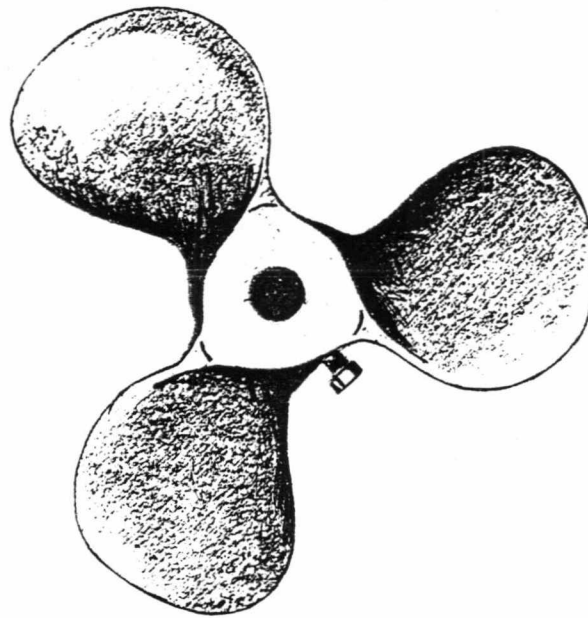
High shear impellers ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อการตีกระจายให้ของแข็งฉีกขาด หรือการกระจายของเหลวชนิดหนึ่งให้เป็นหยดละเอียดในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า อิมัลชัน ดังรูปที่ 2.7 ก,ข ใบพัดพวกนี้คือ

Modified turbine (รูปที่ 2.7 ก)

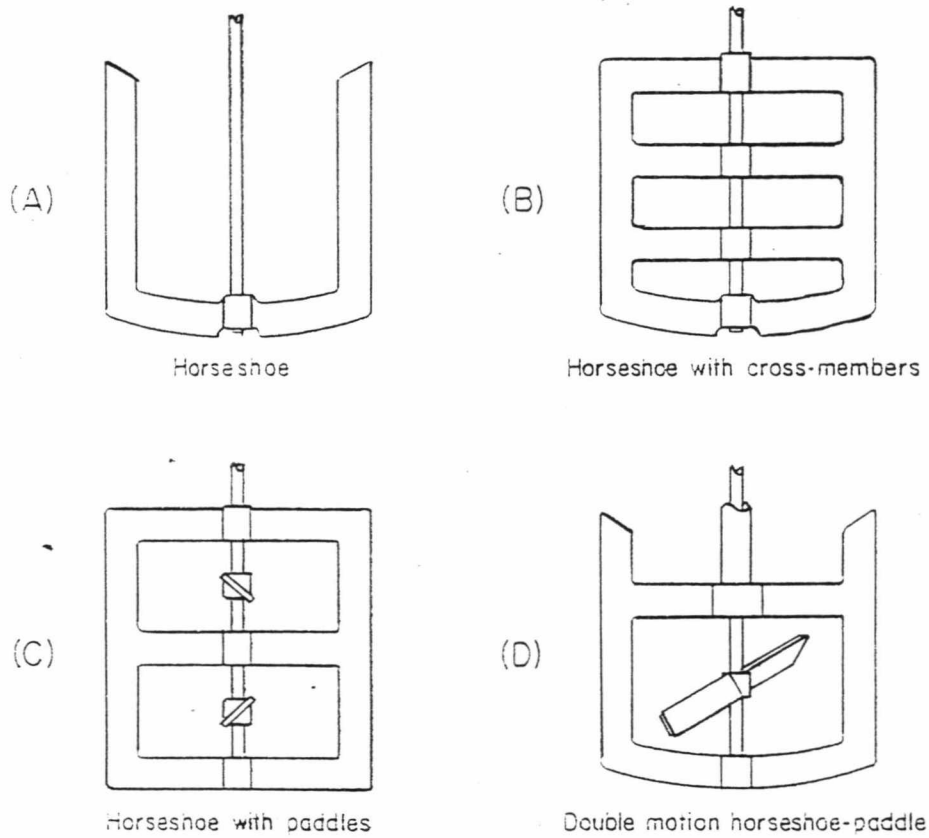
Saw-tooth edge (รูปที่ 2.7 ข)

ใบพัดกวนลักษณะอื่น ๆ พวกนี้มีการดัดแปลงจากกลุ่มแรก ๆ และเป็นแบบผสม ดังรูปที่ 2.7 ค ใบพัดพวกนี้คือ

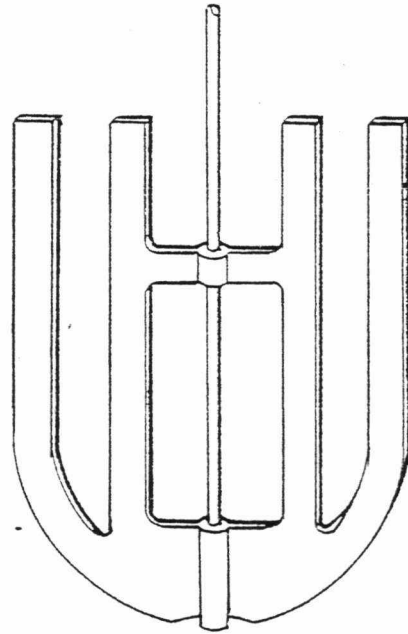
Helical screw



รูปที่ 2.4 ไบพัดเรือ (marine type impeller)

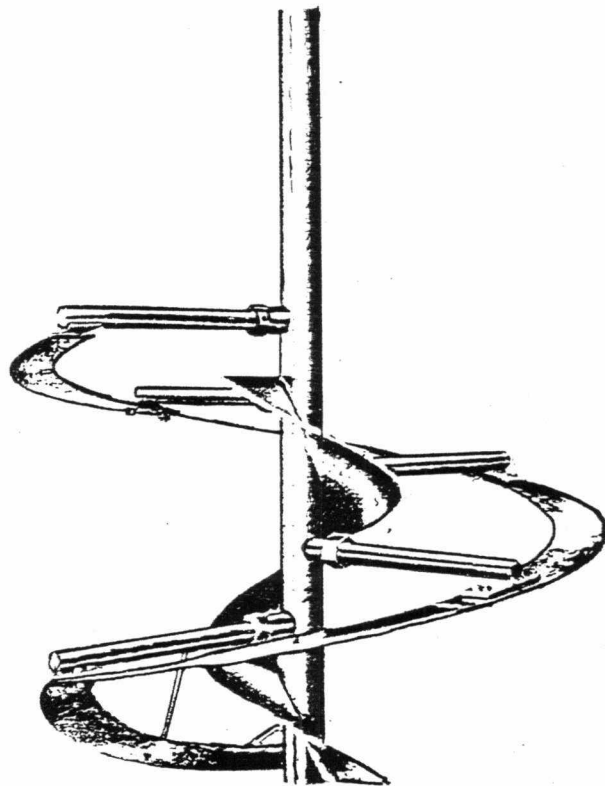


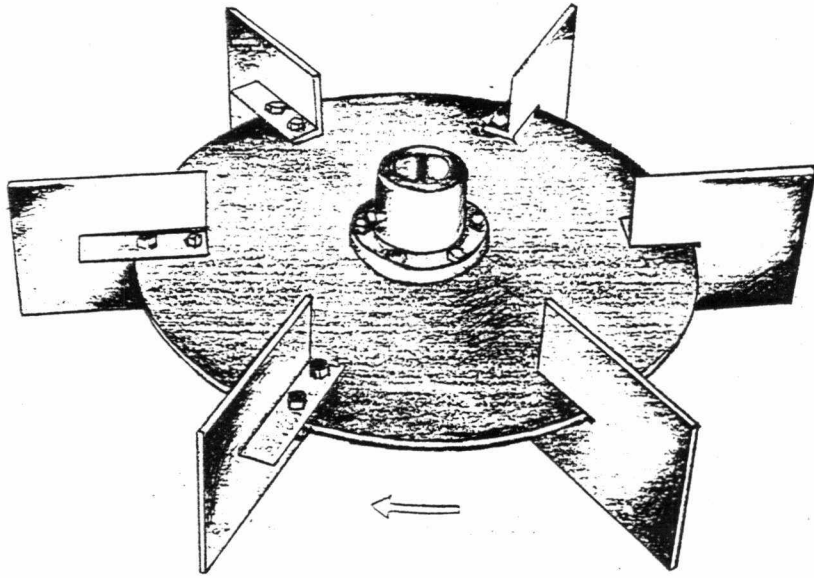
รูปที่ 2.5 ก Anchor agitator



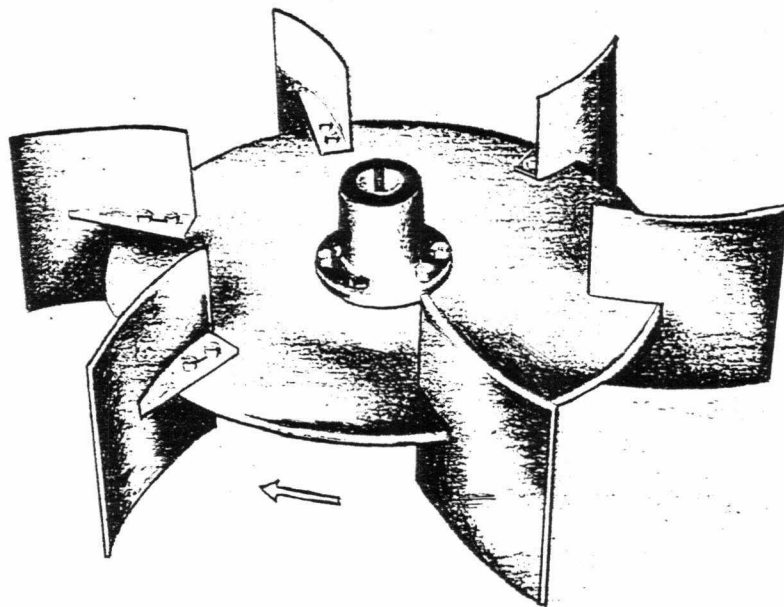
รูปที่ 2.5 ข Gate type anchor agitator

รูปที่ 2.5 ก Helical ribbon agitator

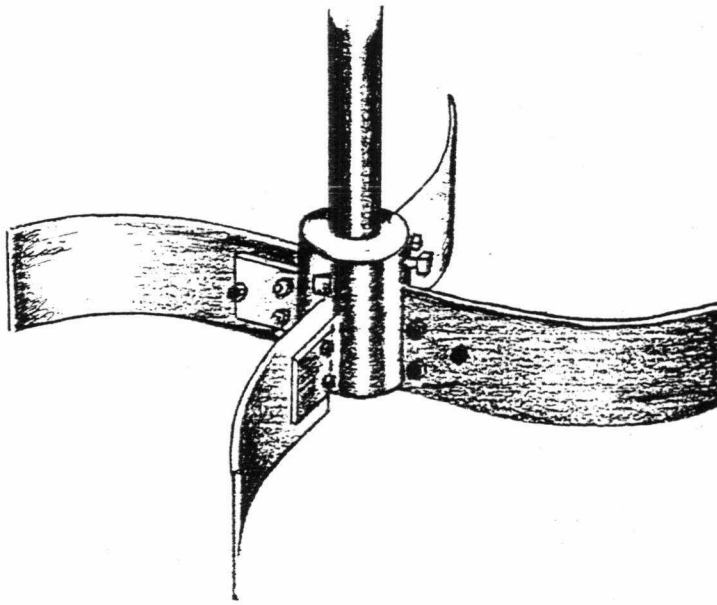




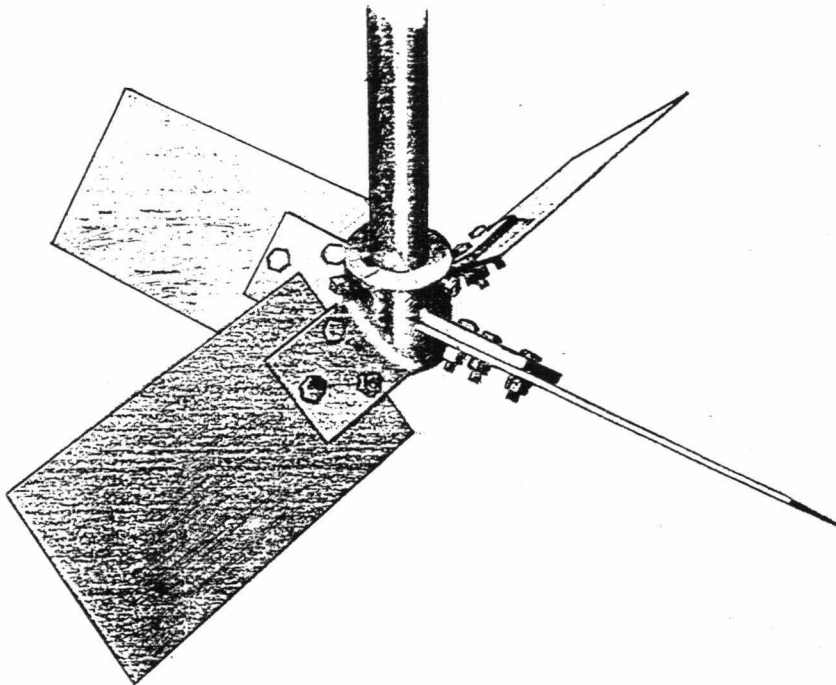
รูปที่ 2.6 ก Flat blade turbine



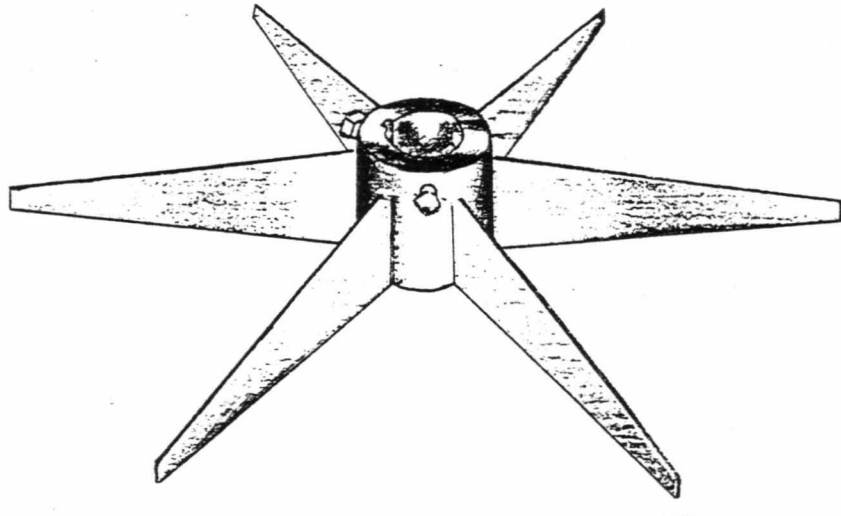
รูปที่ 2.6 ข Disk mounted curved blade turbine



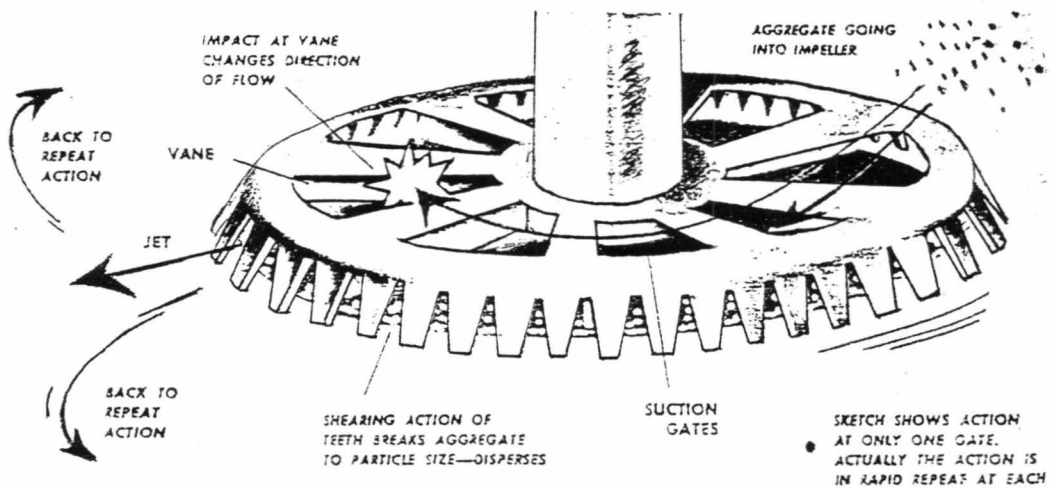
รูปที่ 2.6 ค Hub mounted curved blade turbine



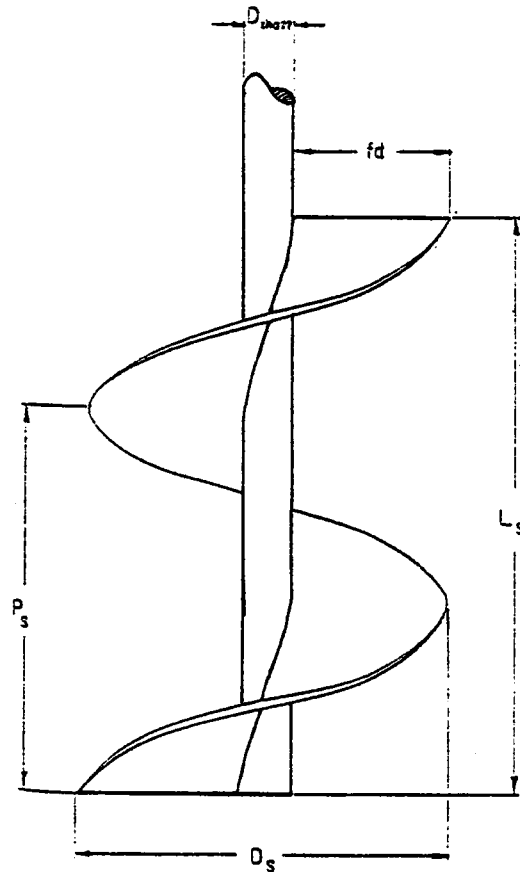
รูปที่ 2.6 ง Hub mounted pitched blade turbine



รูปที่ 2.7 ก Modified turbine



รูปที่ 2.7 ข Saw-tooth edge



รูปที่ 2.7 ก Helical screw

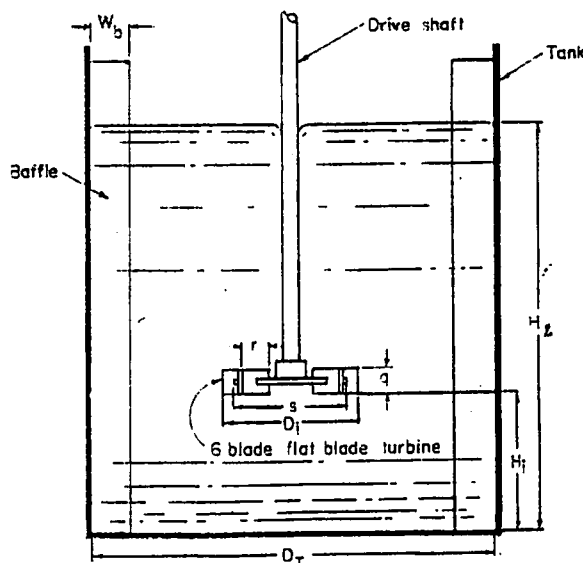
2.1.3 ถังมาตรฐาน (Standard Tank Configuration)

ถังมาตรฐานที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมีรูปร่าง และส่วนประกอบดังรูปที่ 2.8 ถังมาตรฐานจะช่วยให้การผสมกันของสารในถังเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์สำหรับการใช้งานต่าง ๆ ที่เราต้องการ แต่รูปแบบของถังมาตรฐานก็ไม่ใช้รูปแบบที่แน่นอนตายตัว เพราะในบางโอกาส ลักษณะของถังแบบนี้อาจจะไม่ใช่รูปแบบที่ดีที่สุดในการนำไปใช้งานในบางสภาวะ เช่น การผสมของของเหลวกับแก๊สซึ่งมีของแข็งอยู่ในปริมาณมาก ในระบบที่มีความหนืดสูง หรือระบบที่มีความไวต่อ

แรงเฉือน ซึ่งรูปแบบของถังมาตรฐานแบบนี้อาจจะไม่ใช่รูปแบบที่ทำให้เกิดผลลัพท์ที่เราต้องการก็ได้

โดยทั่ว ๆ ไปลักษณะของถังมาตรฐาน สำหรับใบพัดแบบ Plat blade turbine 6 ใบพัด จะมีลักษณะดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดมีขนาดเป็น เศษหนึ่งส่วนสามของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง
 2. ความสูงของใบพัดจากก้นถังเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด
 3. ความกว้างของแผ่นใบพัดมีขนาดเป็น เศษหนึ่งส่วนห้า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด
 4. ความยาวของแผ่นใบพัดมีขนาดเป็น เศษหนึ่งส่วนสี่ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด
 5. ความยาวของแผ่นใบพัดที่ติดตั้งบนจานกลางเท่ากับ เศษหนึ่งส่วนแปดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด
 6. ความสูงของของเหลวที่บรรจุในถังเท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด
 7. จำนวนครีบอกเท่ากับ 4 ใบ ติดตั้งในแนวตั้งและสูงเกินความสูงของของเหลว
 8. ความกว้างของครีบอกเท่ากับ เศษหนึ่งส่วนสิบของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง
- อย่างไรก็ตามลักษณะของถังมาตรฐานสามารถที่จะนำไปใช้กับใบพัดแบบอื่น ๆ ได้
- ส่วนตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ระหว่างส่วนประกอบของถังมาตรฐาน



รูปที่ 2.8 รูปร่างและส่วนประกอบของถังมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถังมาตรฐาน

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต
1.เส้นผ่านศูนย์กลางถัง(ภายใน)	D	1.0 D_T
2.รัศมีความโค้งของก้นถัง	R_T	0.9 D_T
3.ความสูงของถัง	H_T	>1.15 D_T
4.ความสูงของของเหลว	H_l	1.0 D_T
5.ความหนาของถัง ครีบและใบพัด	T	-
6.ความกว้างของครีบ	W_b	0.1 D_T
7. ใบพัดชนิด anchor agitator	2 ใบ	
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	-0.94 D_T
-ความสูงของแผ่นใบพัด	l	~1.0 D_T
-ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	0.1 D
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง		(0.01-0.05) D
-จำนวนครีบ		2 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถัง		> D_T
-ระยะห่างของครีบจากใบพัด		(0.01-0.05) D
8. ใบพัดชนิด flate blade turbine	6 ใบ	
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	1/3 D_T
-ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	1/5 D
-ความยาวของแผ่นใบพัด	r	1/4 D
-เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบพัด	s	3/4 D
-ความยาวของแผ่นใบพัดจากจาน		1/8 D
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง	H_i	1.0 D
-จำนวนครีบ		4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถัง		> D_T

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ระหว่างส่วนประกอบของกังหันมาตรฐาน ครีบและใบพัดชนิดต่างๆ

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต
9. ใบพัดชนิด hub mounted pitched blade turbine 4 ใบ		
-ความกว้างของใบพัด	q	1/5 D
-ความยาวของใบพัด	r	2/5 D
-มุมเอียงของใบพัด	θ	
-ความสูงของใบพัดจากก้านถึง	H_i	1.0 D
-จำนวนครีบ		4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถึง		> D_T
10. ใบพัด propeller 3 ใบ		
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	1/3 D_T
-ความสูงของใบพัดจากก้านถึง	H_i	1.0 D
-ความกว้างของใบพัด	q	1/4 D
-ความยาวของใบพัด	r	2/5 D
-จำนวนครีบ		4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถึง		> D_T

2.1.4 กำลังที่ใช้ในการกวนสาร (Power Consumption)

กำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อนใบพัด, P คำนวณได้จากสมการ

$$N_{Po} = P/N^3 D^5 \rho \longrightarrow (2.1)$$

ซึ่งเรียกว่า power number เป็นตัวเลขไร้มิติ

การคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนใบพัด ต้องพิจารณาถึงชนิดของถังกวนว่าเป็นแบบมีครีบ หรือไม่มีครีบ และรู้จักตัวแปรไร้มิติที่สำคัญในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{Reynolds number, } N_{Re} = ND^2 \rho / \mu \longrightarrow (2.2)$$

เป็นค่าที่แสดงความรุนแรงในการกวนสาร

$$\text{Froude number, } N_{Fr} = N^2 D / G \longrightarrow (2.3)$$

เป็นค่าที่แสดงผลของการเกิดกระแสวน ใช้เฉพาะในถังที่ไม่มีคียบ

$$\text{Flow number, } N_Q = Q / ND^3 \longrightarrow (2.4)$$

เป็นค่าที่แสดงจำนวนการไหลเวียน โดย Q คือ อัตราการไหล ลบ.ม./ชม.

2.2 การขยายขนาด (Scale Up)

ในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี เพื่อให้มีการผสมสารได้ในเวลาที่เท่ากับถังปฏิกรณ์เคมีขนาดเล็กนั้นมีปัญหาคือ อัตราการผสมสารให้ไหลเวียนต่อหน่วยปริมาตรไม่เท่ากันเมื่อให้ขนาดของใบพัดกับขนาดถังมีสัดส่วนเดียวกัน โดยใช้พลังงานกวนต่อปริมาตรเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้พลังงานต่อปริมาตรมากขึ้น หรือใช้เวลาผสมนานขึ้น

การออกแบบในการขยายขนาด เพื่อให้การทำงาน ได้ผลดีที่สุดสำหรับถังปฏิกรณ์เคมีขนาดโรงงาน (prototype, p) จะต้องใช้ข้อมูลจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาดทดลอง (model, m) มาช่วยพิจารณาด้วย โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดทดลอง กับขนาดโรงงาน

2.2.1 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี

การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์เคมีแบบกวน (stirred tank reactor, STR) มักจะกระทำด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาดต้นแบบซึ่งมีขนาดเล็ก ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องมีเกณฑ์ในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีเพื่อที่จะใช้ในการทำนายผลของกระบวนการ ในอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยปกติแล้วกระบวนการแต่ละชนิดจะมีวิธีการในการขยายขนาดเพียงวิธีเดียว การขยายขนาดจะอาศัยหลักความคล้ายของลักษณะใดลักษณะหนึ่งดังต่อไปนี้คือ

1. ความคล้ายเชิงเรขาคณิต (geometric similarity)
2. ความคล้ายเชิงพลศาสตร์ (dynamic similarity)
3. ความคล้ายเชิงความเร็ว (kinematic similarity)

ความคล้ายเชิงเรขาคณิต หมายถึง ทุก ๆ มิติที่เกี่ยวข้องกันจะมีลักษณะเหมือนกัน และมีอัตราส่วนร่วมกันอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$X_m/X_p = X_r \longrightarrow (2.5)$$

เมื่อ

X_m = ขนาดของดั้งต้นแบบ

X_r = อัตราส่วนร่วม

X_p = ขนาดของดั้งต้นแบบ

ความคล้ายเชิงพลศาสตร์ หมายถึง ทุก ๆ อัตราส่วนของแรงจะมีอัตราส่วนร่วมทั่วไปอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$(F_I)_m/(F_I)_p = (F_V)_m/(F_V)_p = (F_G)_m/(F_G)_p = (F_\sigma)_m/(F_\sigma)_p = F_r \longrightarrow (2.6)$$

เมื่อ

F แทนแรงที่กำหนด

I อ้างอิงเป็นแรงเฉื่อย

V อ้างอิงเป็นแรงหนืด

G อ้างอิงเป็นแรงโน้มถ่วง

σ อ้างอิงเป็นความตึงระหว่างผิว

ความคล้ายเชิงความเร็ว หมายถึง ทุกความเร็วในถังปฏิกรณ์เคมี สองขนาดจะมีอัตราส่วนร่วมอยู่ค่าหนึ่ง

2.2.2 การขยายขนาดโดยใช้ความคล้ายเชิงเรขาคณิตและความคล้ายเชิงพลศาสตร์

แนวความคิดของการขยายขนาดโดยอาศัยความคล้ายเชิงพลศาสตร์ จะใช้กลุ่มของตัวเลขไร้มิติคือ

1. Reynolds number ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงหนืด (viscous force)

$$N_{Re} = F_I/F_V = ND^2\rho/\mu$$

2. Froude number เป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงโน้มถ่วง(gravity force)

$$N_{Fr} = F_I/F_G = ND^2/G$$

3. Weber number เป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อความตึงผิว (interfacial force)

$$N_{We} = F_I/F_\sigma = N^2D^3\rho/\sigma$$

4. Power number

$$N_P = P/N^3D^5\rho$$

5. Flow number

$$N_Q = Q/ND^3$$

จากความหมายของความคล้ายเชิงพลศาสตร์ ที่แสดงดังสมการ 2.5 จะได้ว่า สำหรับถึงปฏิกรณ์ขนาดต้นแบบและขนาดโรงงาน ค่าตัวเลขไร้หน่วยเหล่านี้มีค่าเท่ากันนั่นคือ

$$\begin{aligned} (N_{Fr})_p &= (N_{Fr})_m & (N_{Re})_p &= (N_{Re})_m \\ (N_P)_p &= (N_P)_m & (N_{We})_p &= (N_{We})_m \\ (N_Q)_p &= (N_Q)_m \end{aligned}$$

2.2.3 การหาเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้หลักความคล้ายเชิงเรขาคณิตร่วมกับหลัก

ความคล้ายเชิงพลศาสตร์

อาศัยหลักความคล้ายเชิงเรขาคณิตจะได้

$$(V_T)_p/(V_T)_m = 0.92(D_T)_p^3/0.92(D_T)_m^3 = (D_T)_p^3/(D_T)_m^3 = k \longrightarrow (2.7)$$

จากสมการที่ 1 จะได้

$$(D_T)_p^3 = k(D_T)_m^3 \longrightarrow (2.8)$$

$$(D_T)_p = k^{(1/3)}(D_T)_m \longrightarrow (2.9)$$

จากความคล้ายเชิงพลศาสตร์

$$\begin{aligned} (N_p)_m &= (N_p)_p \\ \therefore P_p/N_p^3 D_p^5 \rho_p &= P_m/N_m^3 D_m^5 \rho_m \longrightarrow (2.10) \end{aligned}$$

สำหรับสารในถังที่เป็นชนิดเดียวกัน $\rho_p = \rho_m$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 จะได้

$$P_p/P_m = N_p^3 D_p^5 / N_m^3 D_m^5 \longrightarrow (2.11)$$

สำหรับใบพัดแบบ anchor $D = 0.94D_T$ ส่วนใบพัดแบบอื่น $D = 0.1D_T$

\therefore จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$D_p = k^{(1/3)} D_m \longrightarrow (2.12)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับใบพัดทุกแบบ แทนค่า D_p จากสมการที่ 2.12 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้

$$P_p/P_m = N_p^3 k^{(5/3)} D_m^5 / N_m^3 D_m^5 \longrightarrow (2.13)$$

$$P_p/P_m = N_p^3 k^{(5/3)} / N_m^3 \longrightarrow (2.14)$$

สำหรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ $(N_{Re})_p = (N_{Re})_m$

$$\therefore N_p D_p^2 \rho_p / \mu_p = N_m D_m^2 \rho_m / \mu_m \longrightarrow (2.15)$$

เนื่องจากเป็นสารระบบเดียวกัน ($\rho_p/\mu_p = \rho_m/\mu_m$) ดังนั้นสมการที่ 2.15 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$N_p/N_m = D_p/D_m \longrightarrow (2.16)$$

หาสูตรทั่วไปสำหรับการคำนวณค่ากำลังต่อปริมาตร (P/V)

จากสมการที่ 2.13

$$P_p/P_m = N_p^3 k^{(5/3)} D_m^5 / N_m^3 D_m^5 \longrightarrow (2.13)$$

จะได้

$$(P/V)_p / (P/V)_m = N_p^3 V_m k^{(5/3)} / N_m^3 V_p \longrightarrow (2.17)$$

แทนค่า V_p จากสมการที่ 2.7 จะได้

$$\begin{aligned} (P/V)_p / (P/V)_m &= N_p^3 V_m k^{(5/3)} / N_m^3 V_m k \\ &= N_p^3 k^{(2/3)} / N_m^3 \\ (P/V)_p / (P/V)_m &= N_p^3 k^{(2/3)} / N_m^3 \longrightarrow (2.18) \end{aligned}$$

สูตรทั่วไปสำหรับหาค่ากำลังบิด (P/N) จากสมการที่ 2.13

$$(P/N)_p / (P/N)_m = k^{(5/3)} (N_p/N_m)^2 \longrightarrow (2.19)$$

สูตรทั่วไปสำหรับหาค่ากำลังบิดต่อปริมาตร (P/N)/V

จากสมการที่ 2.19

$$[(P/N)/V]_p / [(P/N)/V]_m = k^{(2/3)} (N_p/N_m)^2 \longrightarrow (2.20)$$

จากสมการที่ 2.8, 2.9, 2.14, 2.16, 2.19 และ 2.20 นำมาคำนวณสูตรทั่วไปสำหรับการขยายขนาด เมื่อกำหนดให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้มีค่าคงที่คือ กำลังต่อปริมาตร กำลังบิด ความเร็วรอบ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ความเร็วปลายใบพัด และค่ากำลังบิดต่อปริมาตร จะได้ตัวคูณทั่วไปสำหรับการขยายขนาดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงแฟกเตอร์ที่ใช้เป็นตัวคูณในการขยายขนาด

ตัวแปร	ถึงปฏิกรณ์เคมี ต้นแบบ (model, m)	แฟกเตอร์สำหรับใช้เป็นตัวคูณเพื่อหาค่าตัวแปร ในถึงปฏิกรณ์ขนาดโรงงาน (prototype, p)						
		P/V	N	N_{Re}	P/N	(P/N)/V	ND	P
P/V	1	1	$k^{-2/9}$	$k^{4/9}$	$k^{11/9}$	$k^{2/9}$	$k^{1/9}$	k
N	1	$k^{2/3}$	1	$k^{1/3}$	$k^{5/3}$	$k^{2/3}$	$k^{1/3}$	$k^{5/3}$
N_{Re}	1	$k^{-4/3}$	$k^{-2/3}$	1	$k^{1/3}$	$k^{-2/3}$	$k^{-1/3}$	$k^{-1/3}$
P/N	1	$k^{-11/6}$	$k^{-5/6}$	$k^{-1/6}$	1	k^{-1}	$k^{-1/2}$	$k^{-5/6}$
(P/N)/V	1	$k^{-1/3}$	$k^{-1/3}$	$k^{1/3}$	k	1	1	$k^{2/3}$
ND	1	$k^{-1/3}$	$k^{-1/3}$	$k^{1/3}$	k	1	1	$k^{2/3}$

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

1. การเขียนแบบ ออกแบบ และสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พร้อมทั้งหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น
2. ดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยใช้ใบพัด anchor agitator อัตราส่วนของสารละลายต่อเซลล์ูโลสเท่ากับ 25:1 โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด
3. ดำเนินการทดลองสังเคราะห์ CMC ด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร โดยใช้เกณฑ์ในการขยายขนาดจากข้อ 2

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 24.7 ลิตร สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด ANSI 304 พร้อมใบพัดกวน anchor agitator
2. ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดความจุ 2 ลิตร สร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด ANSI 304 พร้อมใบพัดกวน anchor agitator
3. เครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirer) IKA LABORTECHNIK รุ่น EUROSTAR power digital 230 โวลต์ 130 วัตต์
4. เครื่องกวนเชิงกลกระแสตรง Pacific Scientific 180 โวลต์ 4.6 แอมแปร์ 1 แรงม้า 1750 รอบต่อนาที พร้อมชุดเฟืองทดรอบ 5:1
5. คู่ความความร้อน (thermocouple) ชนิด K
6. แมกเนติกรีเลย์ (magnetic relay)
7. เครื่องวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (volt meter) Digicon รุ่น DM-810A
8. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (amp. meter) CIE 8020 multimeter
9. เครื่องควบคุมและแสดงค่าอุณหภูมิแบบ PD (PD controller)

10. เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer) Lutron Digital Tachometer รุ่น DT-2235A
11. เครื่องวัดความหนืด (viscometer) Brookfield รุ่น RVT
12. ชุดกรองสารแบบสูญญากาศ และกระดาษกรอง
13. เทอร์มอมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0-100 องศาเซลเซียส
14. เครื่องดูดความชื้น (desiccator)
15. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 และ 105 องศาเซลเซียส
16. เครื่องทำน้ำเย็น (cooling aid)
17. ชุดกลั่น
18. กระดาษลิคมีส

3.2 สารเคมี

1. กรดคลอโรแอซิก (ClCH_2COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
2. กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
3. กรดแอซิก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
5. เงินไนเตรด (AgNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค
6. เซลลูโลสจากต้นสน (cellulose from spruce) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดการค้า บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
8. ไดฟีนิลามีน ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
9. เทตระแอมโมเนียมคลอไรด์ ($(\text{CH}_3)_4\text{N}^+ \text{Cl}^-$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
10. เอทานอล 95 % ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
11. เอทานอล 80% ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดการค้า บริษัท คาร์เลอร์บา
12. ไอโซโพรพานอล ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) เกรดการค้า บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
13. น้ำกลั่น (distilled water)

3.3 การเขียนแบบ ออกแบบ และจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น

ทำการเขียนแบบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ครีบลึงชนิด 2 ใบ และ 4 ใบ พร้อมด้วยใบพัดกวน 4 ชนิด คือ anchor agitator , flat blade turbine , hub mounted pitched blade turbine และ propeller โดยมีสัดส่วนและส่วนประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1 และจัดสร้างด้วยเหล็กกล้า-

ไร้สนิม เกรด ANSI 304 พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นได้แก่ มอเตอร์ แผ่นให้ความร้อน แมกเนติกรีเลย์ ฉนวน ปลอกโลหะ ถูควบคุมความร้อน และตัวควบคุมอุณหภูมิตามที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 เพื่อใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์ CMC ต่อไป

3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ CMC ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

ศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โดยใช้ใบพัดกวนชนิด anchor ที่อัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลสเท่ากับ 25:1 โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการปั่นคือ 50 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที

3.4.1 ขั้นตอนในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานส์เฟอร์

ชั่งเซลลูโลส 72.00 กรัม เทตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.86 กรัม (0.008 โมล) ดวงไอโซโพรพานอล 1400 มล. เทส่วนผสมทั้งหมดลงถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ตั้งเครื่องมือในอ่างควบคุมอุณหภูมิ กวนของผสมด้วยเครื่องกวนเชิงกล โดยใช้ใบพัดแบบ anchor ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 36 % 180 กรัม (1.620 โมล) จากกรวยแยกจนหมดในเวลา 15 นาที กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเริ่มให้ความร้อน รอจนอุณหภูมิของของผสมขึ้นถึง 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทสารละลายกรดคลอโรแอซิดิก (เตรียมโดยชั่งกรดคลอโรแอซิดิก 73.48 กรัม (0.778 โมล) ละลายในไอโซโพรพานอล 220 มล.) ลงในสารละลายทันที เก็บตัวอย่างของผสม โดยใช้ปิเปตต์ดูดครั้งละ 50 มล. ที่เวลา 10 30 60 120 และ 210 นาที ตามลำดับ หลังจากที่ได้เติมกรดคลอโรแอซิดิกแล้ว ทำให้ของผสมมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียสทันที โดยแช่ในน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำของผสมมาปรับความเป็น กรด-ด่าง ให้มีความเป็นกลางด้วยกรดคลอโรแอซิดิกเข้มข้น ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส โดยไม่เปลี่ยนสีจากแดงเป็นน้ำเงิน กรองของผสมผ่านกระดาษกรองโดยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อแยกไอโซโพรพานอลออก จะได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส นำไปทำให้บริสุทธิ์เพื่อหาค่าองค์การแทนที่ต่อไป

ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที จากนั้นเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 200 100 75 และ 50 ตามลำดับ

3.4.2 ขั้นตอนการทำการบอกรีบอกซีเมทิลเซลลูโลสให้บริสุทธิ์^[4]

นำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากขั้นตอน 3.4.1 มาทำให้บริสุทธิ์ โดยนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันและล้าง CMC ให้หมดเกลือคลอไรด์ด้วยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทดสอบโดยนำเอทานอลที่ล้าง 5 หยดสุดท้ายจากกรวยกรอง มาหยดด้วยสารละลายเงินไนเตรต 2-3 หยด จนพบว่าสารละลายไม่มีตะกอนสีขาวของเงินคลอไรด์เกิดขึ้น ล้างอีกครั้งด้วยเอทานอลที่ปราศจากน้ำ กรองให้แห้ง ถ่ายสารจากกรวยกรองลงบนกระดาษฟิคา อบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น CMC ที่ได้จะมีสีขาวละลายน้ำได้ดี

3.4.3 การหาค่าองค์การแทนที่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส^[4]

ชั่ง CMC ประมาณ 2 กรัม ตวงเอทานอล 95% 75 มล. กวนผสมโดยใช้แท่งแม่เหล็กจนกระทั่งได้ของผสมที่มีการกระจายตัวดีที่สุด เติมกรดไนตริกเข้มข้น 2.5 มล. ในขณะที่ปั่นกวน กวนต่อไป 1-2 นาที ให้ความร้อนของผสมและปล่อยให้เดือดเป็นเวลา 5 นาที กวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ถึง 15 นาที กรองสารละลายผ่านกรวยกรองโดยใช้เครื่องกรองลดความดัน ถ่ายตะกอน CMC จากกรวยกรองลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. เติมเอทานอล 95% 50-100 มล. นำไปปั่นกวน จากนั้นกรองและล้างสารให้หมดกรดไนตริกด้วยเอทานอล 80% ที่ 60 องศาเซลเซียส ทดสอบโดยนำเอาเอทานอลที่ล้าง 5 หยดสุดท้ายมาหยดลงบนกระดาษกรองและหยดสารละลายไดฟีนิลามีน 1 หยด ถ้าพบว่าสารละลายมีสีน้ำเงินเกิดขึ้น แสดงว่ายังมีไนเตรดเหลืออยู่ให้ทำการล้างต่อไป ถ้าหยดสารละลายไดฟีนิลามีนหยดแรกแล้วไม่เกิดสารละลายสีน้ำเงิน ให้หยดต่อไปจนกระทั่งสารละลายมากเกินพอ และไม่พบสารละลายสีน้ำเงิน แสดงว่าหมดกรดไนตริกแล้ว (ปกติล้างตะกอนประมาณ 4-6 ครั้ง) ล้างตะกอนด้วยเอทานอลที่ปราศจากน้ำ กรองให้แห้ง ถ่ายสารลงบนกระดาษฟิคา นำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น CMC ในรูปกรดที่ได้ มีสีขาวลักษณะใสไม่ละลายน้ำ จากนั้นชั่ง CMC ในรูปกรด 0.500 กรัมโดยละเอียด ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. เติมน้ำกลั่น 100 มล. กวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก บีบอัดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 นอร์มอล 10 มล. ลงในขวดรูปชมพู่ ให้ความร้อนแก่สารละลายจนกระทั่งเดือด ปล่อยให้เดือดประมาณ 15-30 นาที ไทเทรตโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือขณะร้อน ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 นอร์มอล โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จนกระทั่งได้สารละลายสีชมพูอ่อน

3.5 การศึกษาการขยายขนาดในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยถัง

ปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร โดยใช้กำลังบิดเป็นพารามิเตอร์ในการขยายขนาด

นำพารามิเตอร์จากการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยทำการทดลองดังนี้

ซึ่งเซลลูโลส 930 กรัม เททระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 11.11 กรัม และไอโซโพรพานอล 18,100 มล. ลงถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร กวนของผสมด้วยเครื่องกวนเชิงกล โดยใช้ใบพัดแบบ anchor ด้วยความเร็ว 35.57 รอบต่อนาที ค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 36 % 2325 กรัม จากกรวยแยกจนหมดในเวลา 30 นาที กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเริ่มให้ความร้อน รอกวนอุณหภูมิของของผสมขึ้นถึง 45 องศาเซลเซียส กวนต่อเป็นเวลา 20 นาที เติมสารละลายกรดคลอโรแอซิดิก (เตรียมโดยซึ่งกรดคลอโรแอซิดิก 950 กรัม ละลายในไอโซโพรพานอล 2840 มล.) ลงในสารละลายทันที เก็บตัวอย่างของผสมโดยเปิดวาล์วกันถังครั้งละ 100 มล. ที่เวลา 10 30 60 120 และ 210 นาที ตามลำดับหลังจากที่เติมกรดคลอโรแอซิดิกแล้ว (ในแต่ละครั้งที่เก็บตัวอย่าง ให้ใช้แอมมิเตอร์ และโวลท์มิเตอร์ วัดค่ากระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามลำดับ เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังของเครื่องกวนเชิงกล) ทำให้ของผสมมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียสทันที โดยแช่ในน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำของผสมมาปรับความเป็นกรด-ด่าง ให้เป็นกลางด้วยกรดคลอโรแอซิดิกเข้มข้น ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัสโดยไม่เปลี่ยนสีจากแดงเป็นน้ำเงิน กรองของผสมผ่านกระดาษกรองโดยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อแยกไอโซโพรพานอลออก จะได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส นำไปทำให้บริสุทธิ์และหาค่าองศาการแทนที่โดยทำตามขั้นตอน 3.4.2 และ 3.4.3 ตามลำดับ

ดำเนินการทดลองซ้ำโดยนำพารามิเตอร์จากการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นเกณฑ์โดยเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 11.86 รอบต่อนาที

บทที่ 4

การออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

4.1 การเขียนแบบ การออกแบบ ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ออกแบบโดยใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตกับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถังมาตรฐานและขนาดของถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร ครีบบและใบพัดชนิดต่างๆ

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต	ขนาด (cm)
1.เส้นผ่านศูนย์กลางถัง(ภายใน)	D	1.0 D_T	30
2.รัศมีความโค้งของก้นถัง	R_T	0.9 D_T	27
3.ความสูงของถัง	H_T	>1.15 D_T	40.5
4.ความสูงของของเหลว	H_l	1.0 D_T	30
5.ความหนาของถัง ครีบบและใบพัด	T	-	0.3
6.ความกว้างของครีบบ	W_b	0.1 D_T	3
7.ใบพัดชนิด anchor agitator		2 ใบ	2 ใบ
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	~0.94 D_T	28
-ความสูงของแผ่นใบพัด	l	~1.0 D_T	32
-ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	0.1 D	2.8
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง		(0.01-0.05) D	1.0
-จำนวนครีบบ		2 อัน	2 อัน
-ความยาวของครีบบจากปากถัง		> D_T	33
-ระยะห่างของครีบบจากใบพัด		(0.01-0.05) D	1.0

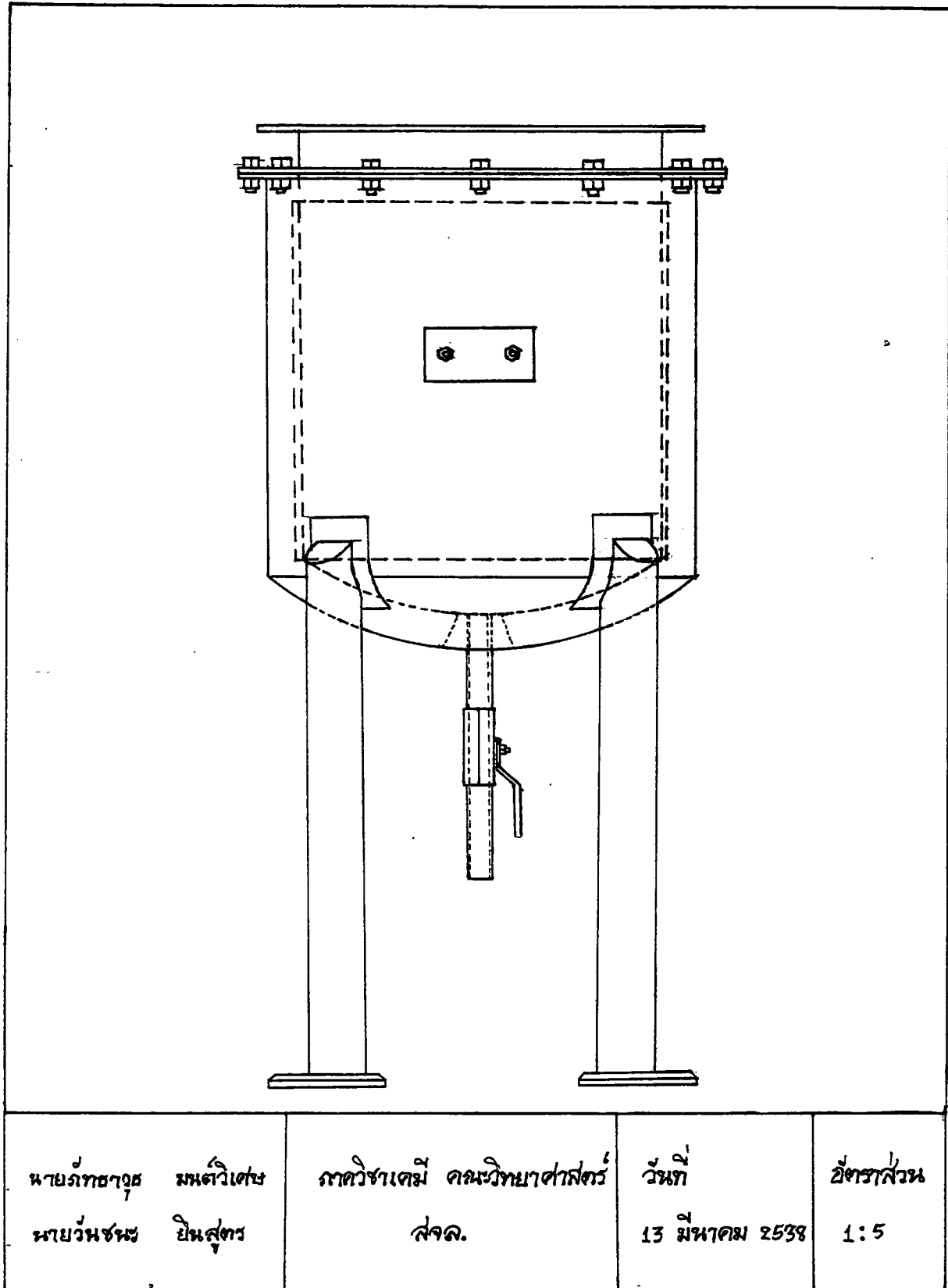
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ระหว่างส่วนประกอบของกังหันมาตรฐาน และขนาดของกังหันที่มีขนาด 24.7 ลิตร ครีบและใบพัดชนิดต่าง ๆ

รายละเอียด	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต	ขนาด (cm)
8. ใบพัดชนิด flate blade turbine		6 ใบ	6 ใบ
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	$1/3 D_T$	10
-ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	$1/5 D$	2
-ความยาวของแผ่นใบพัด	r	$1/4 D$	2.5
-เส้นผ่านศูนย์กลางงานใบพัด	s	$3/4 D$	7.5
-ความยาวของแผ่นใบพัดจากงาน		$1/8 D$	1.25
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง	H_i	$1.0 D$	10
-จำนวนครีบ		4 อัน	4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถัง		$> D_T$	36
-ความห่างของครีบจากปากถัง			0.4
9. ใบพัดชนิด hub mounted pitched blade turbine		4 ใบ	4 ใบ
-ความกว้างของใบพัด	q	$1/5 D$	2
-ความยาวของใบพัด	r	$2/5 D$	4
-มุมเอียงของใบพัด	θ		45°
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง	H_i	$1.0 D$	10
-จำนวนครีบ		4 อัน	4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถัง		$> D_T$	36
10. ใบพัด propeller		3 ใบ	3 ใบ
-เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	$1/3 D_T$	10
-ความสูงของใบพัดจากก้นถัง	H_i	$1.0 D$	10
-ความกว้างของใบพัด	q	$1/4 D$	2.5
-ความยาวของใบพัด	r	$2/5 D$	4
-จำนวนครีบ		4 อัน	4 อัน
-ความยาวของครีบจากปากถัง		$> D_T$	36
-ระยะห่างของครีบจากปากถัง			0.4

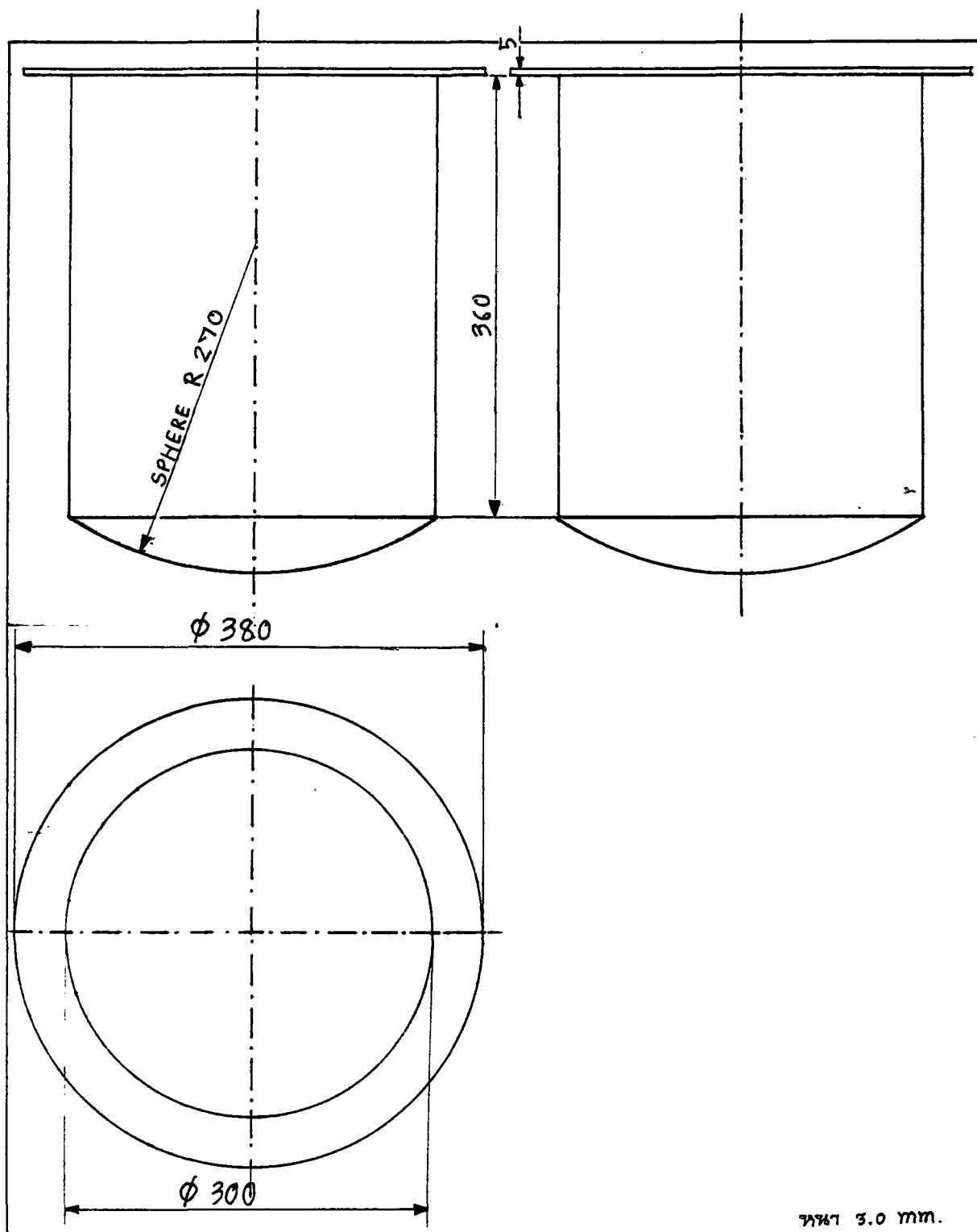
*หมายเหตุ ใช้โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด ANSI 304 *

แบบแสดงส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง

4.8

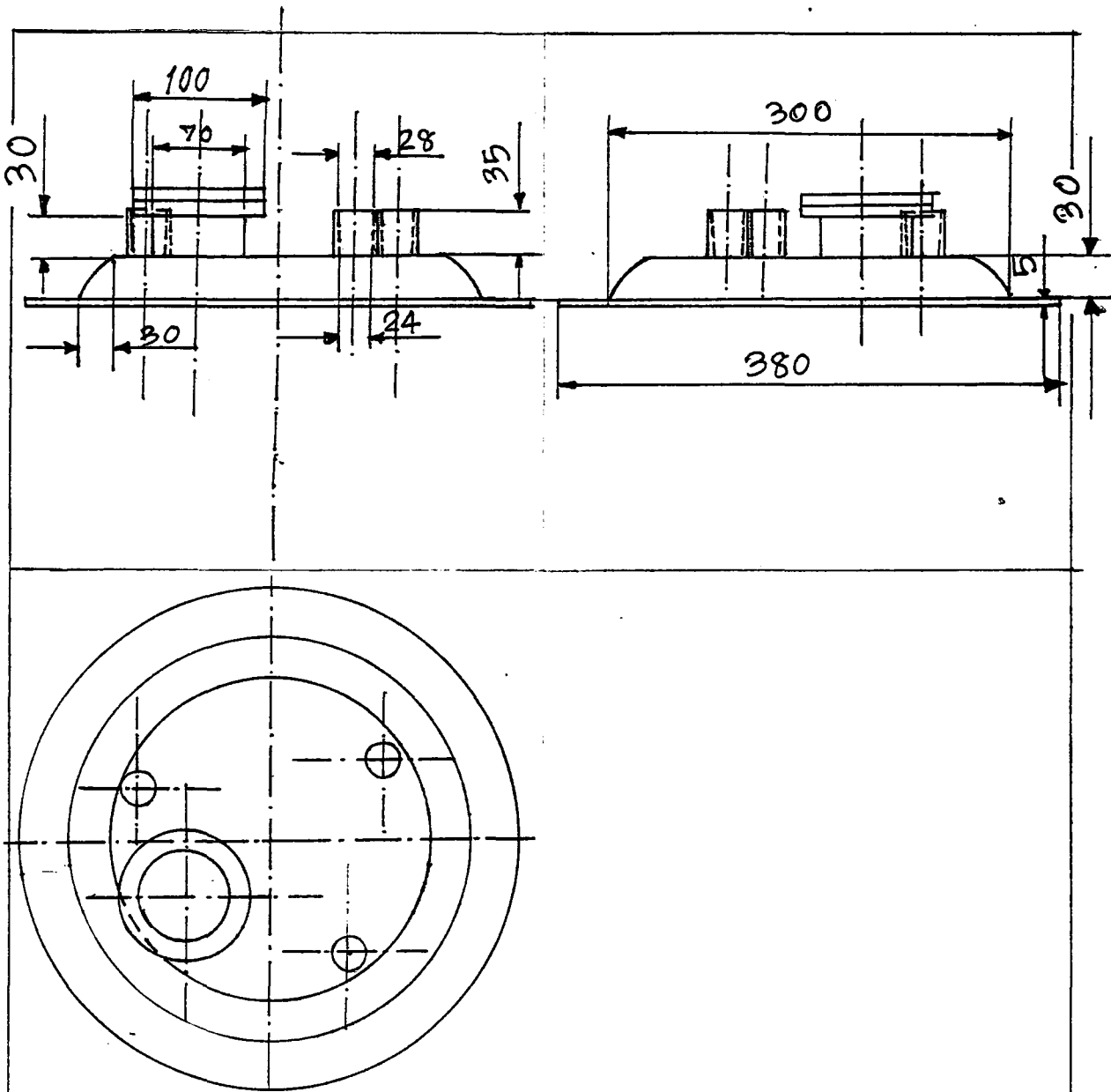


รูปที่ 4.1 แสดงแบบของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรที่จัดสร้างขึ้น



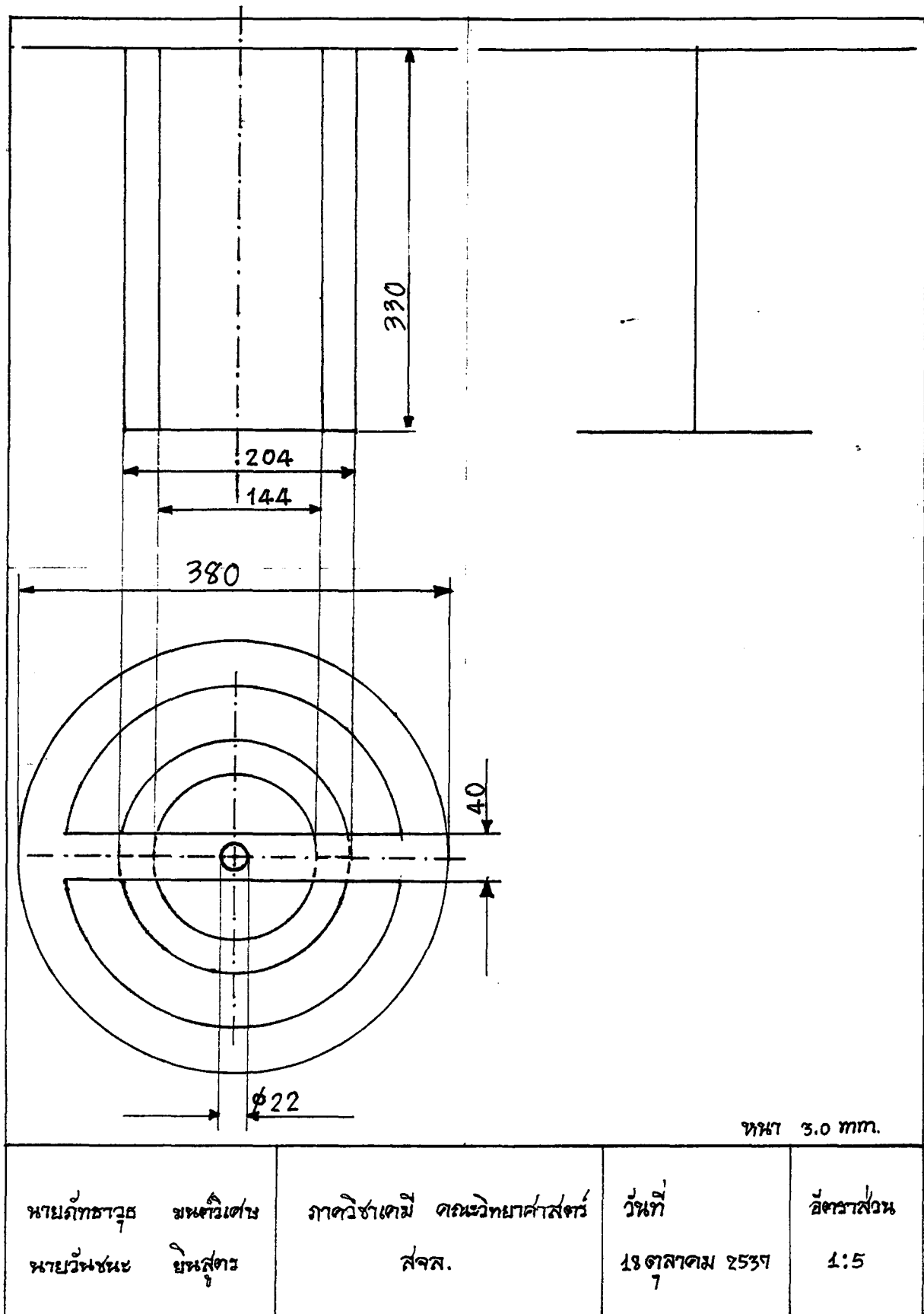
นายวิชาวุธ มนต์วิเศษ	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายวันชนะ ยืนสุวรร	สจล.	18 ตุลาคม 2537	1:5

รูปที่ 4.2 แสดงถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

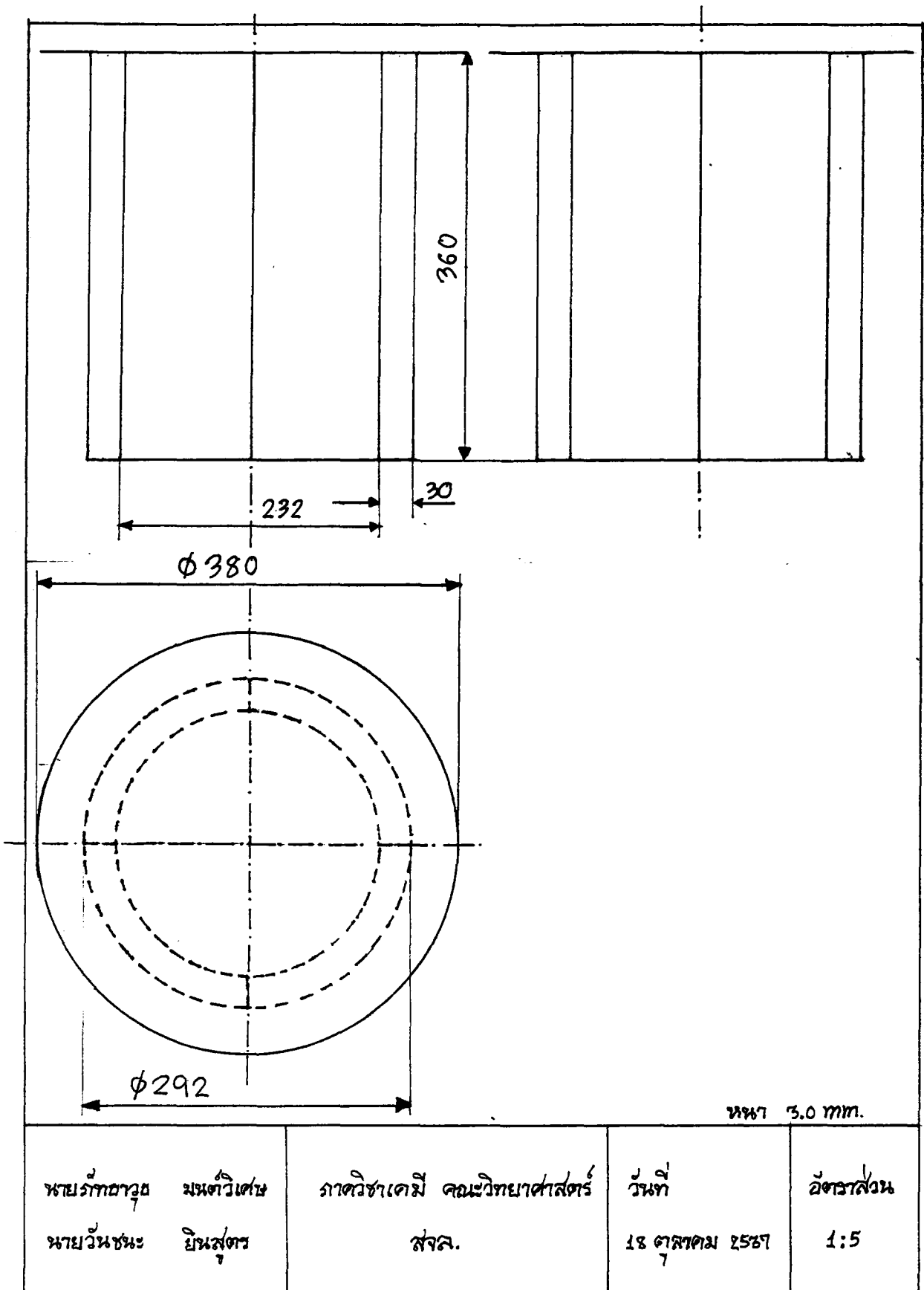


นายอภิชาต มงคลวิเศษ นายวันชนะ ยิมสุต	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.	วันที่ 13 มีนาคม 2538	อัตราส่วน 1:6
---	------------------------------------	--------------------------	------------------

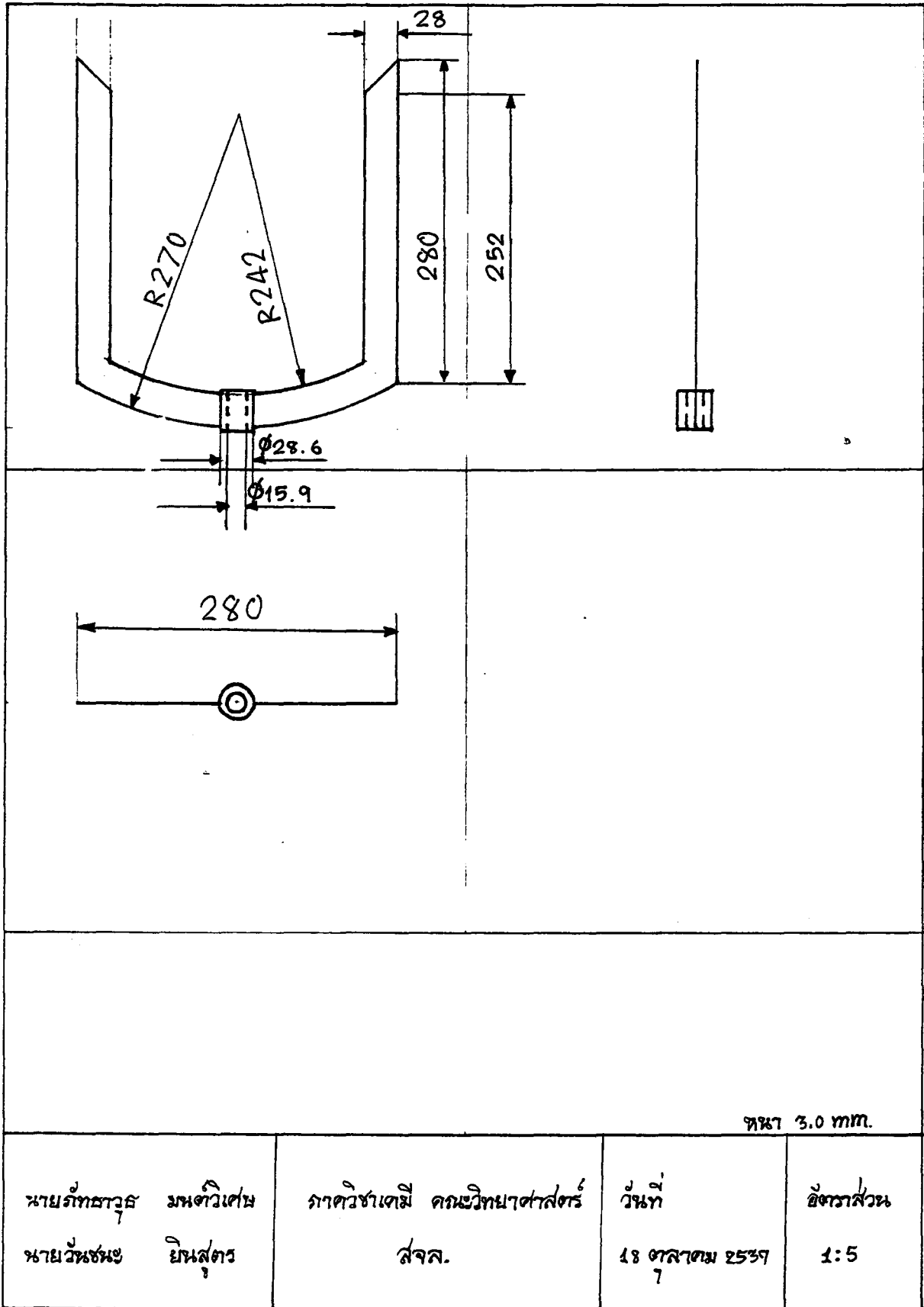
รูปที่ 4.3 แสดงแบบของฝักบัวปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร



รูปที่ 4.4 แสดงแบบของกริบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร สำหรับใบพัดแบบ Anchor



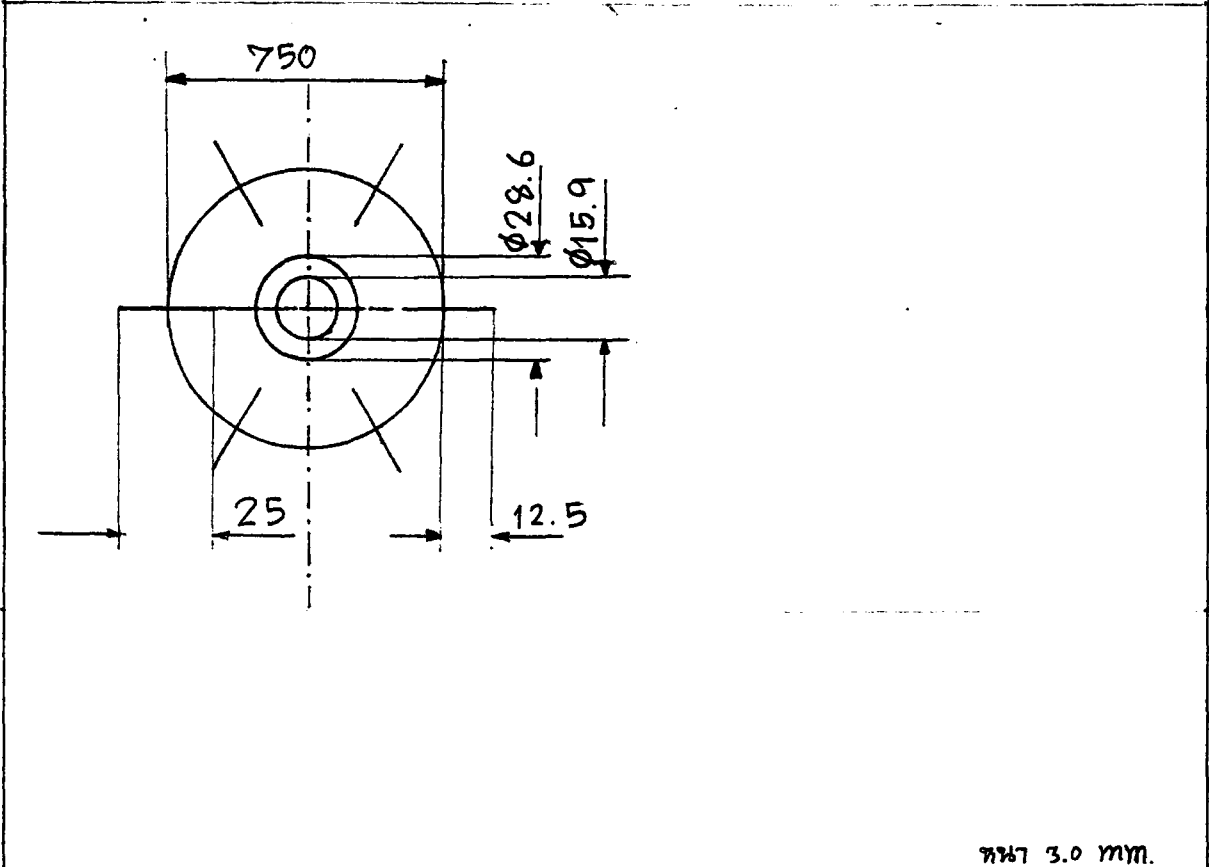
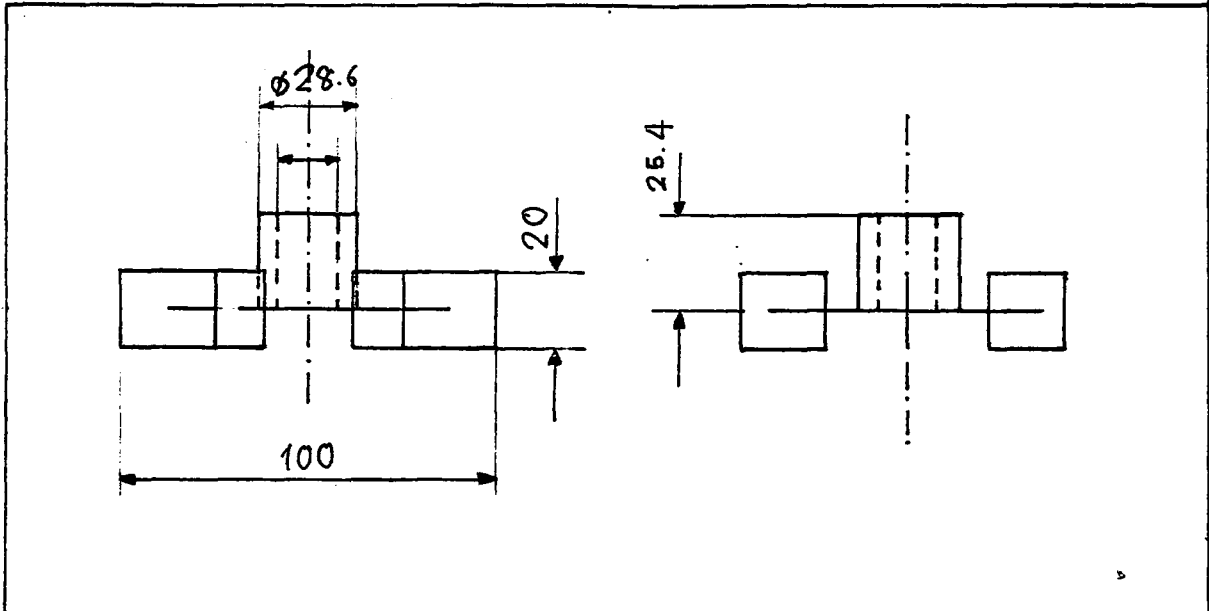
รูปที่ 4.5 แสดงแบบของกรวยของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร สำหรับไบพัตชนิดอื่น ๆ



พหยา 3.0 มม.

นายภัททวรุฒ นายวิหชนน	มหตวิเตษ ยินสตร	ภาตวิธาเตมี สจล.	วงษ์ 18 ตุลาคม 2537 7	อัตราส่วน 1:5
--------------------------	--------------------	---------------------	-----------------------------	------------------

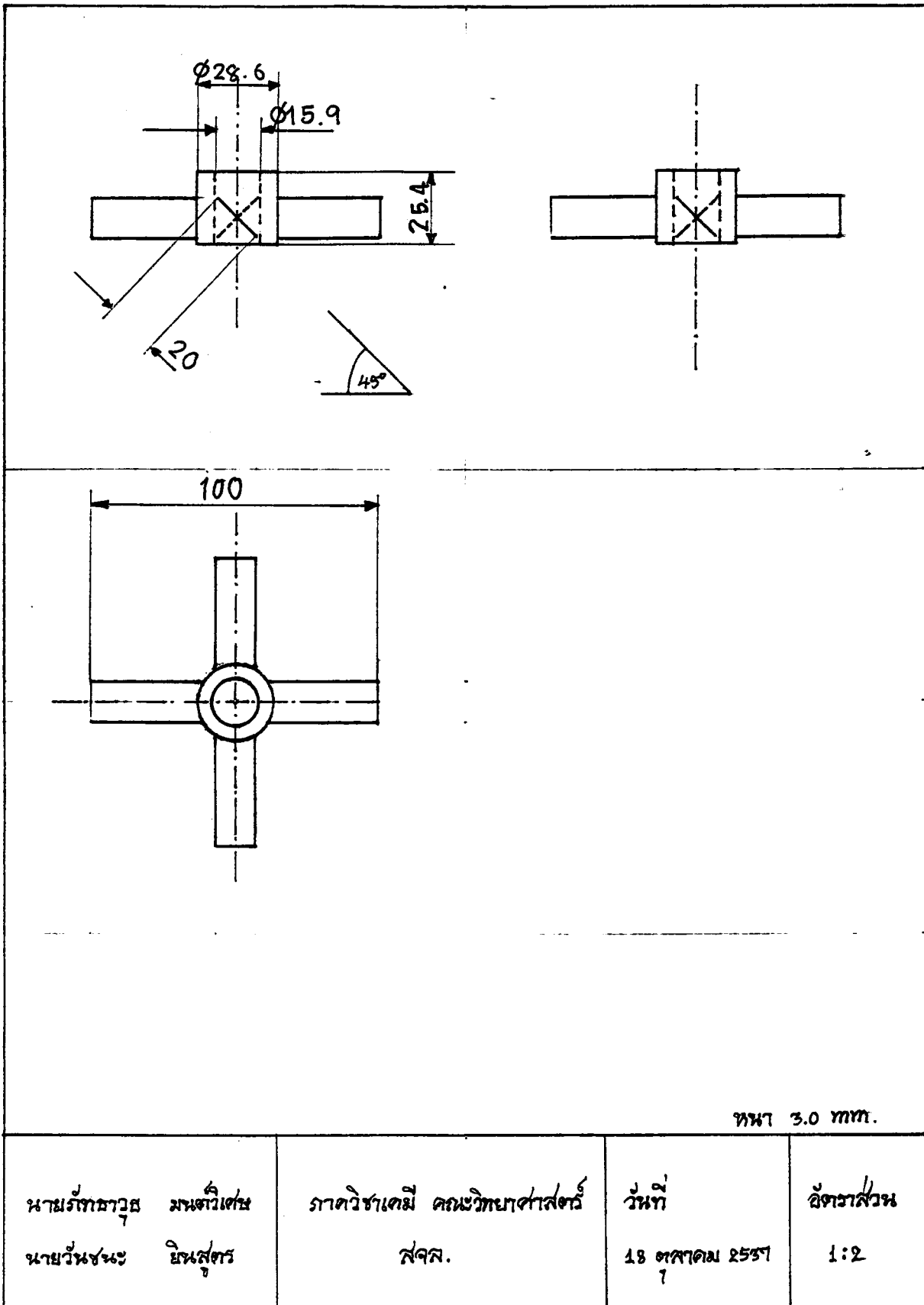
รูปที่ 4.6 แสดงแบบของใบพัดชนิด Anchor



ขนาด 3.0 มม.

นายอภิชาตวณิช มณฑวีเดช	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายวันชนะ ยืนสงคร	สจล.	18 ตุลาคม 2557	1:2

รูปที่ 4.7 แสดงแบบของใบพัดชนิด Flat blade turbine -



รูปที่ 4.8 แสดงแบบของใบพัดชนิด hub mounted pitched blade turbine

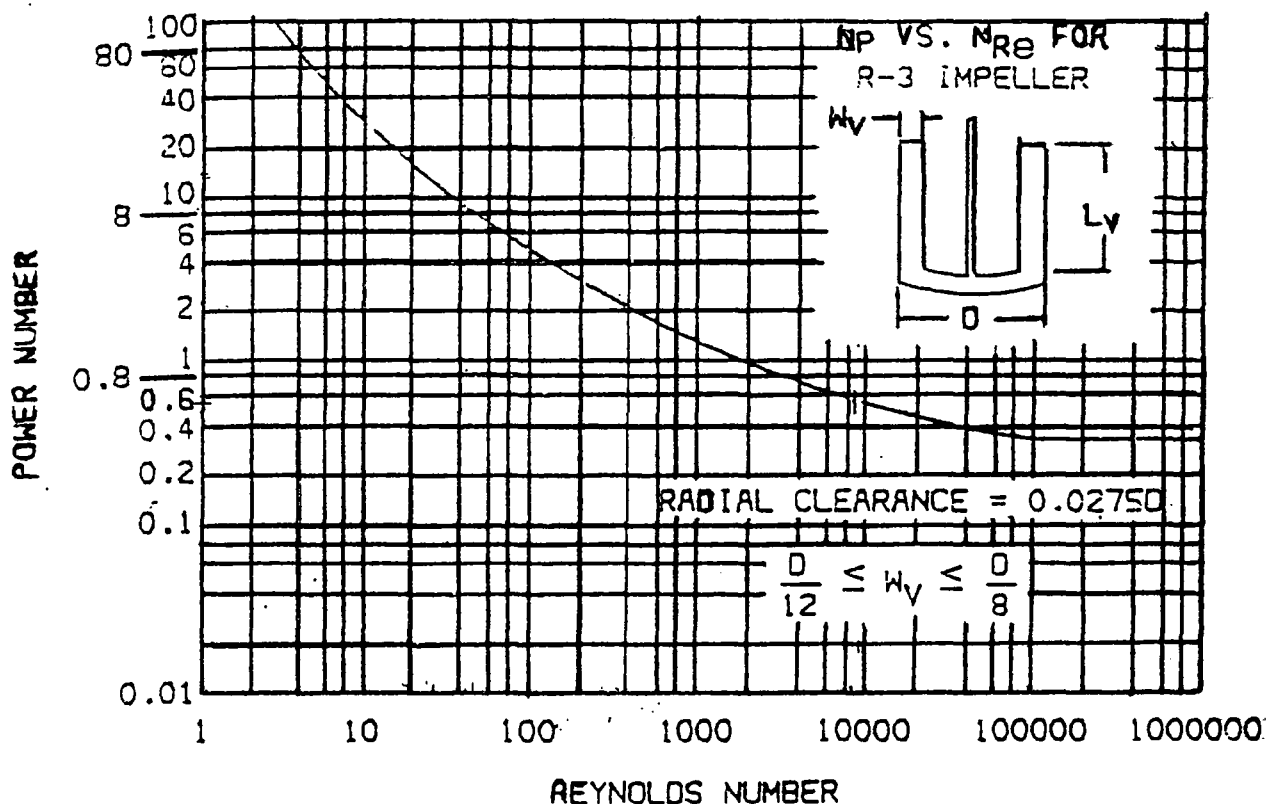
4.2 อุปกรณ์ประกอบถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

เนื่องจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรที่นำมาทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของการหาเกณฑ์ในการขยายขนาด เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์เคมีในระดับห้องปฏิบัติการมาก ดังนั้นจึงต้องมีการหาอุปกรณ์ประกอบถังเพิ่มเติมคือ

- 1) มอเตอร์และชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์
 - 2) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อ่านค่าอุณหภูมิ และควบคุมอุณหภูมิ
 - 3) อุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนกับถังปฏิกรณ์ และฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน
- โดยแยกพิจารณา ดังนี้คือ

- 1) มอเตอร์ สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาเลือกมอเตอร์คือ

1.1) กำลังของมอเตอร์ โดยการพิจารณากำลังของมอเตอร์จากใบพัดกวนชนิด anchor ซึ่งให้ผลการสังเคราะห์ที่ดีกว่าใบพัดชนิดอื่น ๆ และเป็นใบพัดกวนที่ต้องการกำลังในการปั่นกวนสูงสุด การคำนวณจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง power number กับ reynolds number ของใบพัดกวนชนิด anchor ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power number กับ Reynolds number

$$\text{จากสมการ Reynolds number} = 10.754ND^2\rho/\mu \longrightarrow (4.1)$$

$$\text{และ Power number} = 1.523e13P/N^3D^5\rho \longrightarrow (4.2)$$

เมื่อ

N = ความเร็วรอบใบพัดกวน, รอบ/นาที

P = กำลังที่ขับใบพัดกวน, กำลังม้า

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, นิ้ว

ρ = ความถ่วงจำเพาะของสารในถัง

μ = ความหนืดของสารในถัง, เซนติพอยส์

จากสูตรดังกล่าวพบว่า มีตัวแปรสำคัญสองตัว ที่จะต้องทำการหาจากการทดลอง คือ ความหนืดของสารในถังปฏิกรณ์เคมี และความถ่วงจำเพาะของสารในถังปฏิกรณ์เคมี

1.1.1) การหาความหนืดของสารในถังปฏิกรณ์เคมีเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด

วัดด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield รุ่น RVT ค่าที่อ่านได้จากหน้าปัทม์ของเครื่องแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดความหนืด

ชนิดของเซลล์โกลด์	ค่าที่อ่านได้จากสเกลของเครื่องวัดความหนืด									
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
paper pulp	34.2	18.2	34.5	20.0	24.6	28.0	12.7	32.8	37.6	38.2

หมายเหตุ ใช้เข็มวัดเบอร์ 5 ความเร็ว 20 รอบ/นาที แฟคเตอร์ x200

จากตารางพบว่าค่าที่อ่านได้สูงที่สุดคือ 38.2 เมื่อคูณด้วย แฟคเตอร์ 200 ได้ค่าความหนืด เท่ากับ 7640 cP

1.1.2) การหาความถ่วงจำเพาะของสารในถัง

ทำโดยการวัดด้วยขวดวัดความหนาแน่น ได้ผลการทดลองดังนี้

น้ำหนักของขวดหาความหนาแน่นเปล่า 16.2265 กรัม

น้ำหนักของขวดหาความหนาแน่น + น้ำกลั่น	22.2713	กรัม
น้ำหนักของขวดหาความหนาแน่น + สาร	25.5110	กรัม
ดังนั้นน้ำหนักของน้ำในขวดเท่ากับ	6.0448	กรัม
ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ	1	กรัม/ลบ.ซม.
ปริมาตรขวดเท่ากับ	6.0448	ลบ. ซม.
น้ำหนักของสารในขวดเท่ากับ	9.2845	กรัม
ดังนั้นความหนาแน่นของสารเท่ากับ	1.54	กรัม/ลบ.ซม.
นั่นคือความถ่วงจำเพาะเท่ากับ	1.54	

จากตารางที่ 2.1 ถ้าเลือกใช้กำลังต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดจากถึงปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรไปเป็นถึงปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พบว่าเมื่อเลือกความเร็วรอบในการปั่นกววนของถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร เท่ากับ 300 รอบต่อนาที (จะใช้รอบในการปั่นกววนสูงที่สุด ยกเว้นการใช้ความเร็วรอบในการปั่นกววนเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด)

จากตัวคูณในตารางที่ 2.3 จะได้ความเร็วรอบในการปั่นกววนของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร เท่ากับ

$$300(24.7/2)^{(-2/9)} = 171.6 \text{ รอบต่อนาที}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด} = 28/2.54 = 11.02 \text{ นิ้ว}$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = 1.54$$

$$\text{ความหนืด} = 7640 \text{ cP}$$

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาค่า Reynolds number

$$= 10.754 * 171.6 * 11.02^2 * 1.54 / 7640$$

$$= 45.20$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power number กับ Reynolds number (รูปที่ 4.10) จะได้ค่า Power number เท่ากับ 9

จาก สมการ Power number (สมการที่ 4.2) จะได้

$$P = 9 * 171.6^3 * 11.02^5 * 1.54 / 1.523e13$$

$$= 0.75 \text{ Hp}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ที่มีกำลัง 1 แรงม้า

1.2) ชนิดของมอเตอร์ เนื่องจากการดำเนินการทดลองศึกษาตัวแปรสำคัญในการใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดต้องการมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงสูง สามารถวัดกำลังของมอเตอร์ได้ง่าย และสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มีคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2) เครื่องวัดอุณหภูมิ ความคุมอุณหภูมิ และอ่านค่าอุณหภูมิ

2.1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิจะใช้คู่ความความร้อน ชนิด K ซึ่งบรรจุภายในหลอดป้องกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 6 มม. ยาว 200 มม.

2.2) ชุดควบคุมและอ่านค่าอุณหภูมิประกอบด้วยแมกเนติกรีเลย์ ขนาด 15 แอมแปร์ และ เครื่องควบคุมและแสดงค่าแบบ PD

3) อุปกรณ์ให้ความร้อน

อุปกรณ์ให้ความร้อนมีลักษณะเป็นเส้นลวดให้ความร้อนประกบรอบ ๆ ถึง กำลังของอุปกรณ์ให้ความร้อนสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Q_h = MC_p \Delta T$$

โดย

Q_h = กำลังของอุปกรณ์ให้ความร้อน , วัตต์

M = มวลของสารในถัง , กิโลกรัม

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร, จูล/กิโลกรัม*เคลวิน

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิที่ต้องการกับอุณหภูมิเริ่มต้น, เคลวิน/วินาที

มวลของสารในถังปฏิกรณ์ที่นำมาคำนวณคิดจากน้ำหนักของเอทิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 24.7 ลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.53 กิโลกรัม

C_p ของเอทิลแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากับ 2470 J/kg*K

เนื่องจากการทดลองทำที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส หรือ 318 K อุณหภูมิห้องมีค่า 30 องศาเซลเซียสหรือ 303 K เลือกที่จะเพิ่มอุณหภูมิจาก 303 K เป็น 318 K ในเวลา 5 นาที ดังนั้น

$$\Delta T = (318 - 303)/300$$

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} Q_h &= 19.53 * 2470 * (318-303)/300 \\ &= 2411.9 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจึงใช้เครื่องให้ความร้อนที่มีกำลังเท่ากับ 3000 วัตต์
สำหรับฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนของถัง ใช้แผ่นใยหินที่มีความหนา 5
เซนติเมตร

บทที่ 5

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์เคมีในการวิเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์ ประกอบด้วยการศึกษาความเร็วรอบในการกวนและการบิดในตัวถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร และทำการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในตัวถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร (โดยมีข้อมูลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ก)

5.1 ผลของความเร็วรอบในตัวถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

ในการทดลองทำโดยใช้ความเร็วรอบในใบพัดกวนแบบ anchor ต่าง ๆ กัน คือ 50 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลสเท่ากับ 25 : 1 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

5.1.1 ผลของความเร็วรอบต่อค่าองศาการแทนที่

ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลาในการดำเนินไปของปฏิกิริยา พบว่าความเร็วรอบ 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที ได้ค่าองศาการแทนที่ที่เวลาในการดำเนินไปของปฏิกิริยาเดียวกันใกล้เคียงกัน สำหรับที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ได้ค่าองศาการแทนที่ต่ำกว่าที่ความเร็วรอบอื่น ๆ ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่าในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตัวเร่งปฏิกิริยา TMAC เข้าทำปฏิกิริยากับแอลคาไลเซลลูโลส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Cell-O⁻N⁺(CH₃)₄) ซึ่งสามารถละลายเข้าไปในชั้นตัวทำละลายอินทรีย์ และทำปฏิกิริยากับกรดคลอโรแอซิดเกิดเป็น CMC ขึ้น ในการเกิดปฏิกิริยานั้นเริ่มเกิดที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลสก่อน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาสิ้นสุดลงก็เกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อแอลคาไลเซลลูโลสต่อไป ใบพัดกวนแบบ anchor ให้การปั่นกวนที่รุนแรง ทำให้การสัมผัสของวัฏภาคทั้งสองดี การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นได้ดี เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลส โดยมีข้อจำกัดที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจนเกินขีดจำกัดนี้ จะไม่มีผลของความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว ค่าองศาการแทนที่จึงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ค่าองศาการแทนที่ที่มีค่าต่ำกว่าที่ความเร็วรอบอื่น ๆ แสดงว่า

ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที อยู่ต่ำกว่าขีดจำกัด ความเร็วรอบจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวลดลงเนื่องจากมีความรุนแรงในการปั่นกวนน้อยทำให้การสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองไม่ดี ค่าองศาการแทนที่จึงมีค่าต่ำลง

5.1.2 ผลของความเร็วรอบต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ผลการทดลองดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่ากำลังบิด กำลังเฉลี่ย กำลังบิดต่อปริมาตร และ กำลังต่อปริมาตรกับเวลาตามลำดับ และรูปที่ 5.6 ถึง 5.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่ากำลังบิด กำลังเฉลี่ย กำลังบิดต่อปริมาตร และ กำลังต่อปริมาตรกับความเร็วรอบตามลำดับ พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกำลังที่ต้องใช้ในการปั่นกวนสารเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาทั้ง 4 พารามิเตอร์นั้นแปรผันตามกำลังในการกวนสาร

5.2 ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังบิด กำลังเฉลี่ย กำลังบิดต่อปริมาตร และกำลังต่อปริมาตร โดยการควบคุมสถานะให้เหมือนกัน คือ ใบพัดกวนแบบ anchor อัตราส่วนสารละลายต่อเซลลูโลส 25:1 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 50 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที ตามลำดับ

พิจารณาเส้นกราฟที่ตำแหน่งความเร็วรอบ 50 และ 75 รอบต่อนาที ที่เวลา 210 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ความเร็วรอบมีผลต่อค่าองศาการแทนที่ ดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.13 พบว่า

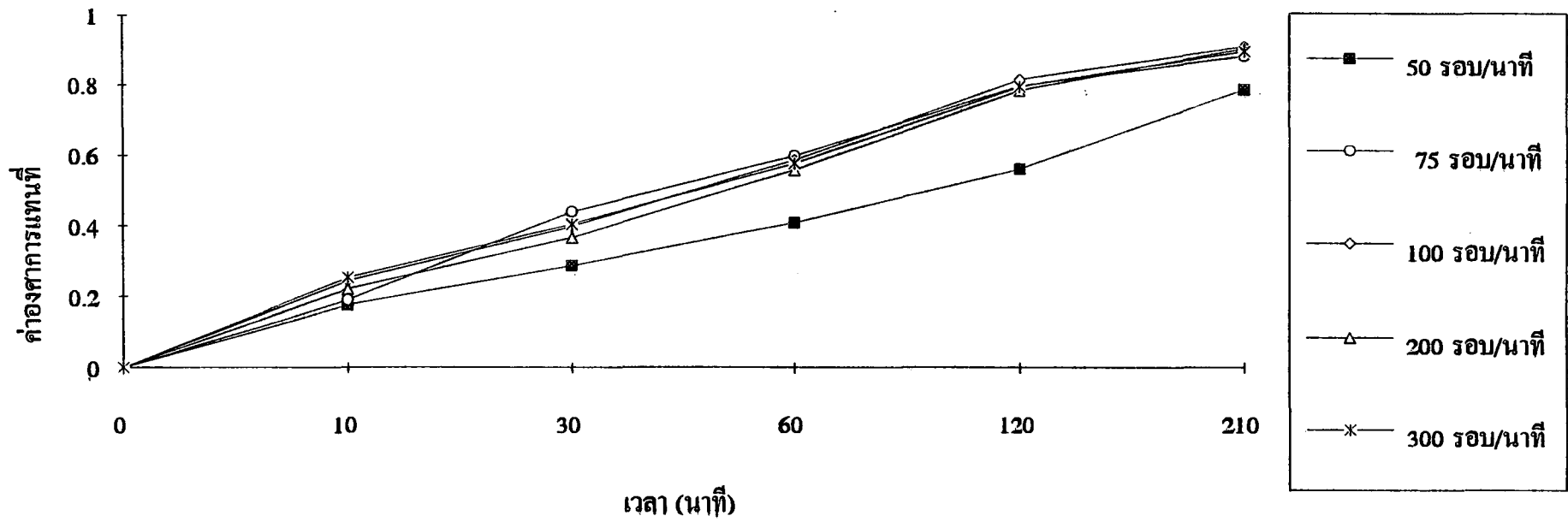
กำลังบิดเพิ่มขึ้นจาก 0.021 Nm เป็น 0.034 Nm หรือเพิ่มขึ้น 61.9%

กำลังเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.110 W เป็น 0.267 W หรือเพิ่มขึ้น 142.73%

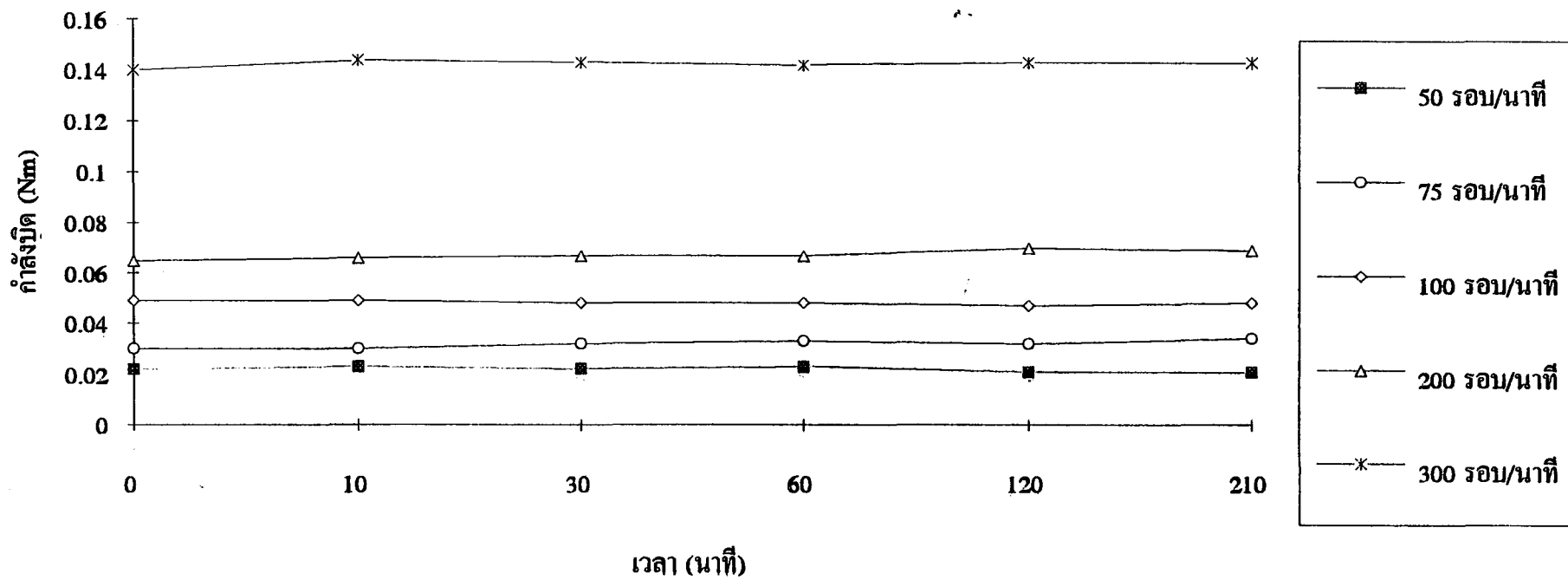
กำลังบิดต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นจาก 12.750 Nm/cm³ เป็น 20.644 Nm/cm³
หรือเพิ่มขึ้น 61.91%

กำลังต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นจาก 62.788 W/cm³ เป็น 162.113 W/cm³
หรือเพิ่มขึ้น 158.19%

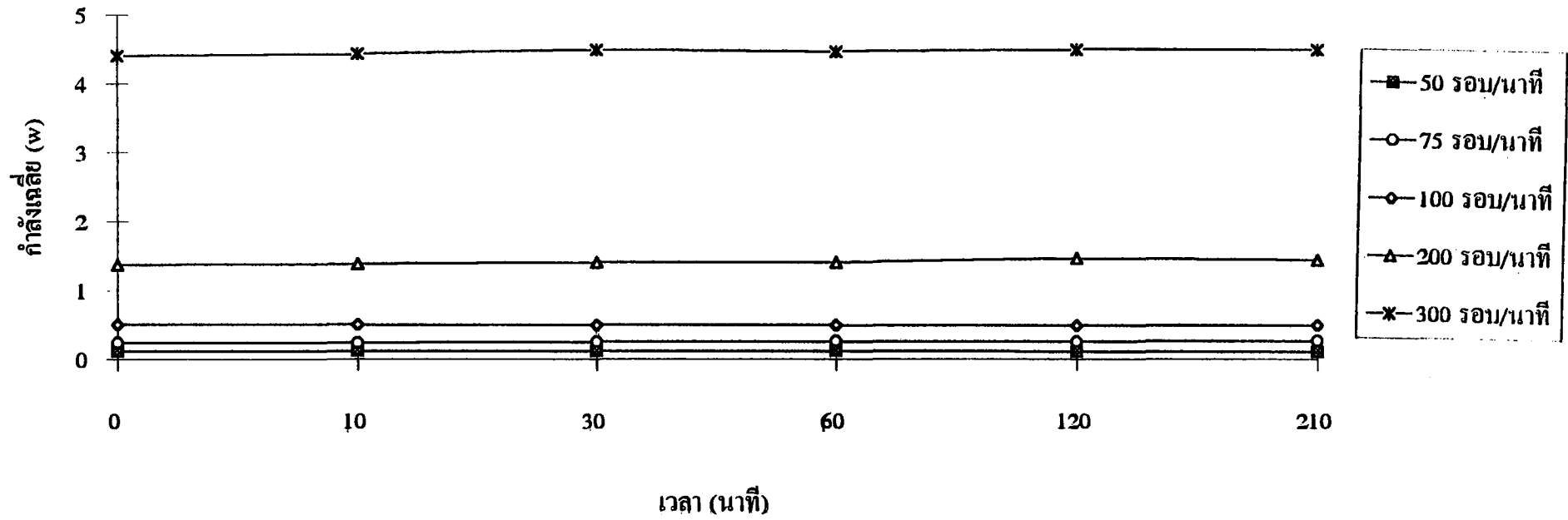
นั่นคือ เมื่อกำลังบิดเพิ่มขึ้น 61.9 % ปรากฏว่ากำลังเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 142.73 % กำลังบิดต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น 61.91 % และกำลังต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น 61.9 % แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังบิดหรือกำลังบิดต่อปริมาตรเพียงเล็กน้อย มีผลทำให้พารามิเตอร์อื่นเปลี่ยนแปลงไป



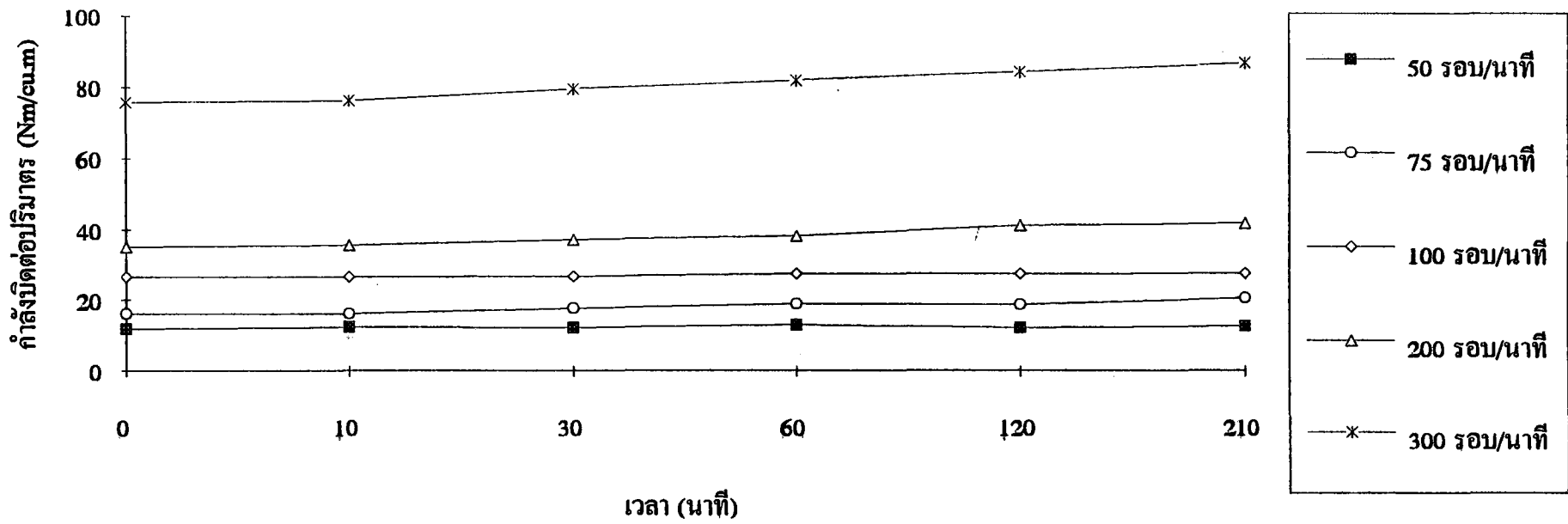
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



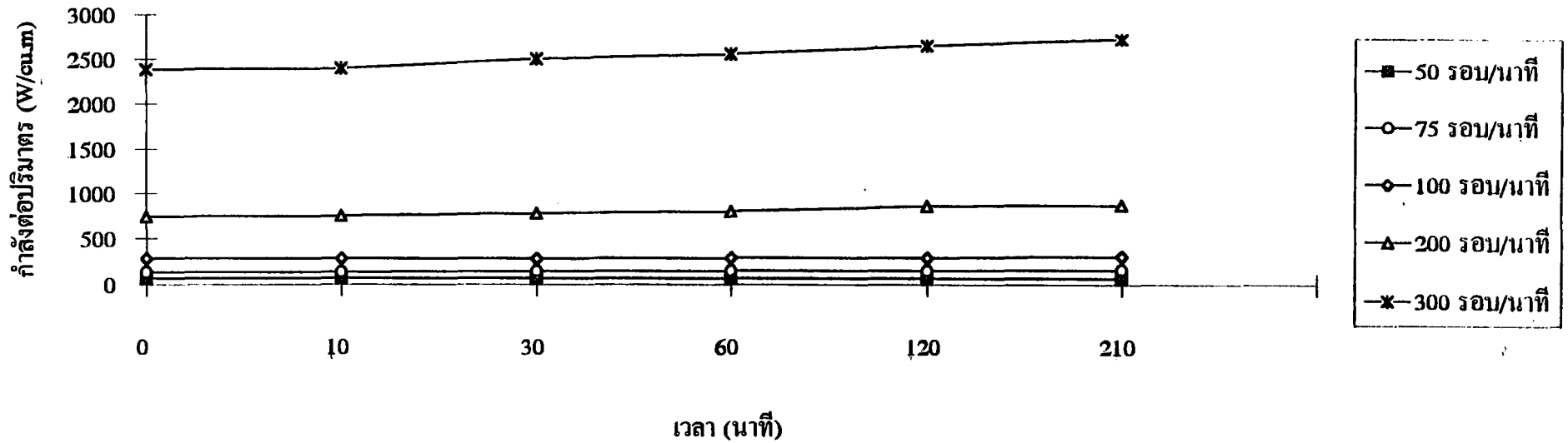
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



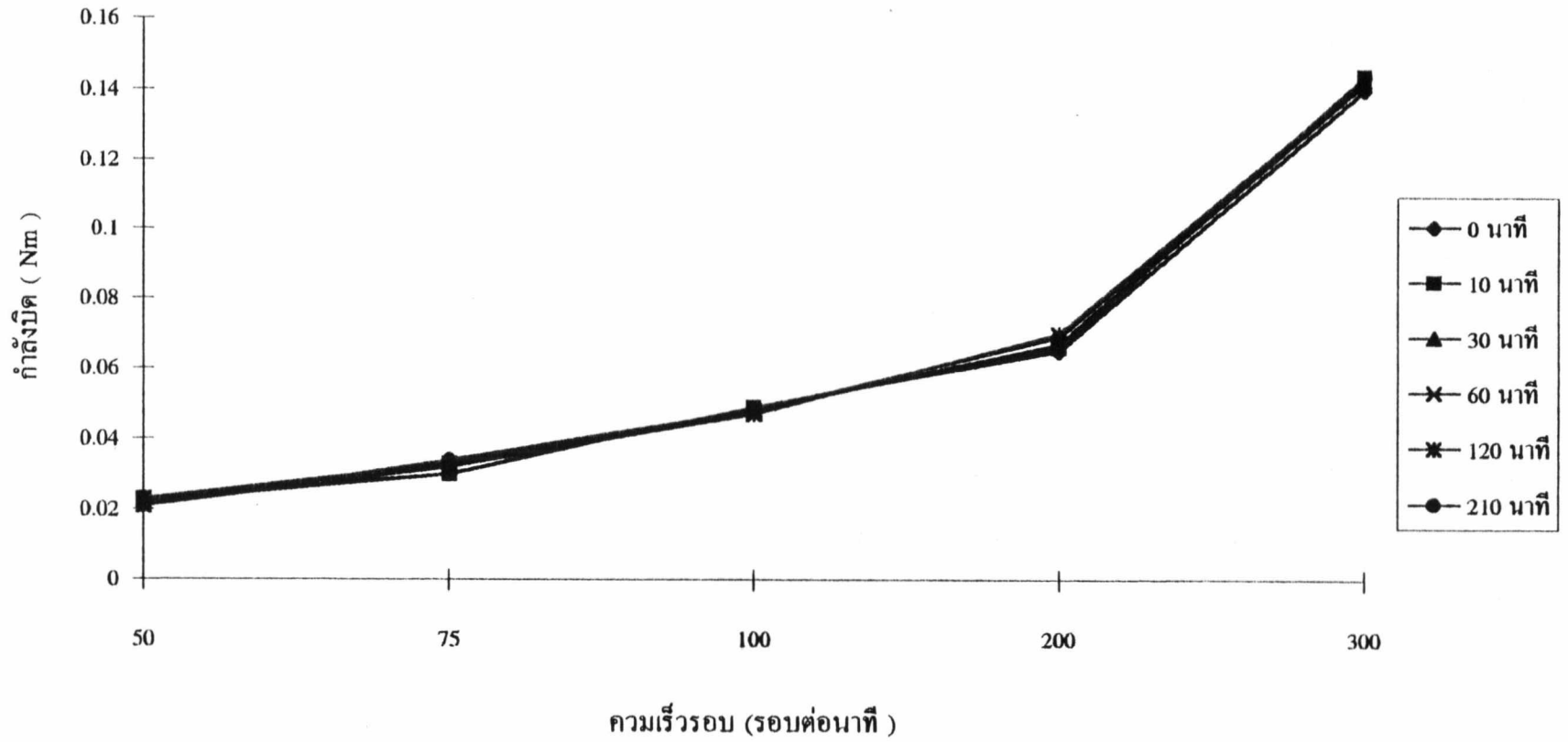
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยกับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



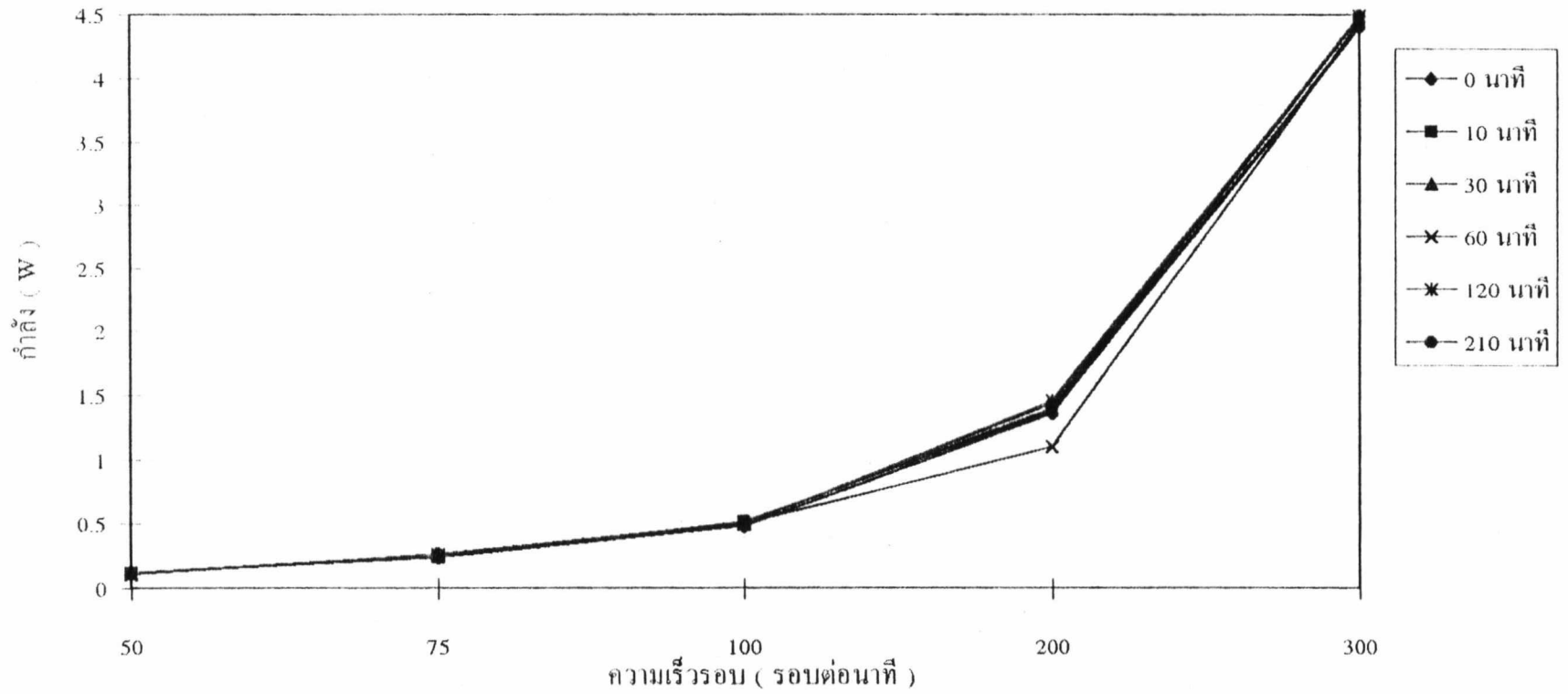
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดต่อปริมาตรกับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



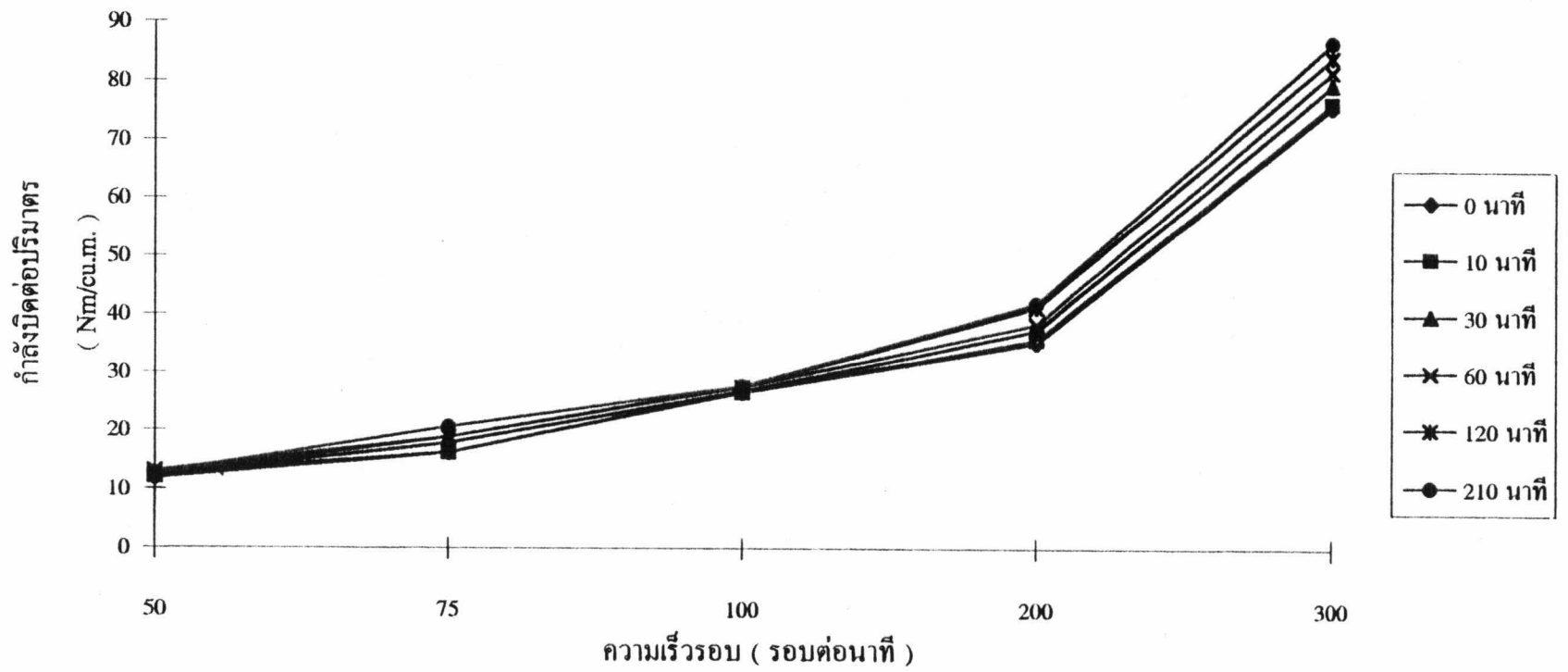
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่อปริมาตรกับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ



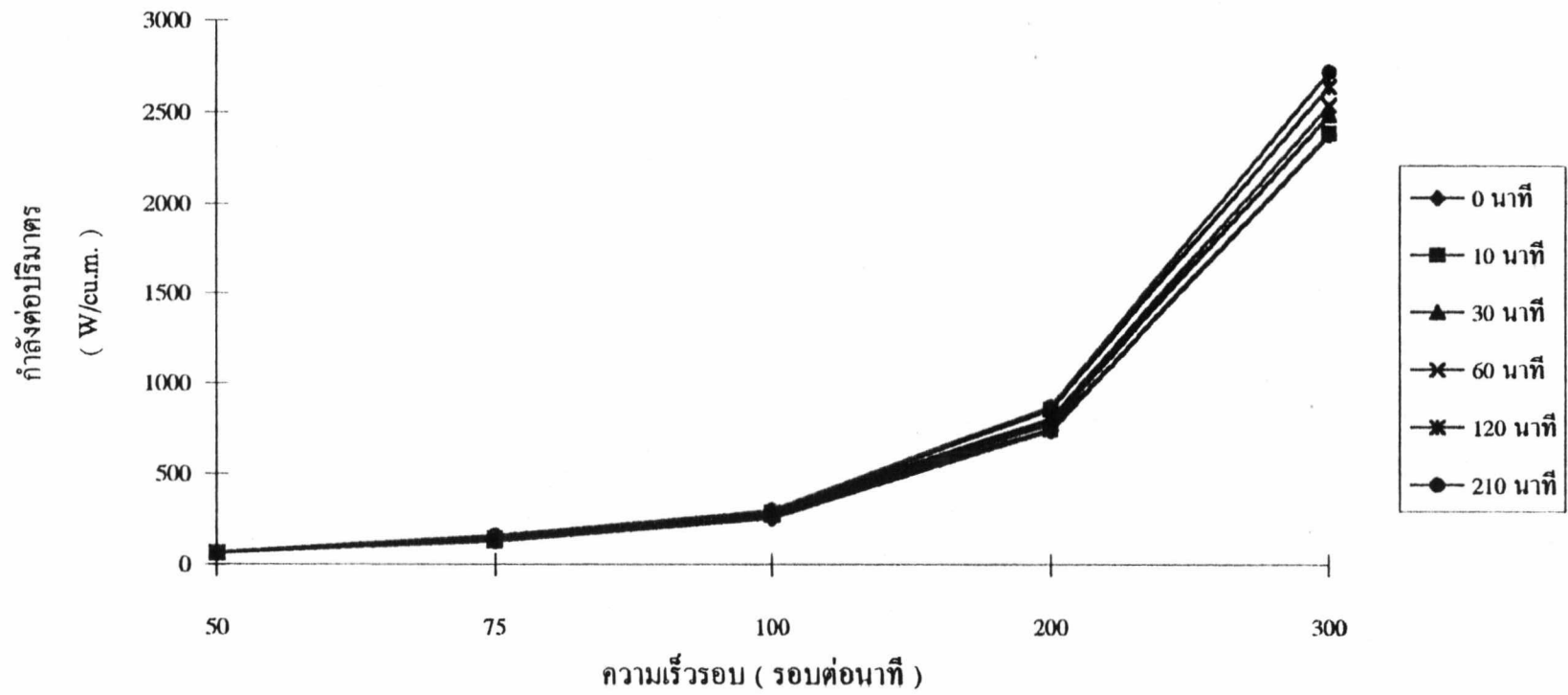
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับความเร็วรอบที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดต่อปริมาตรกับความเร็วรอบที่
เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต่อปริมาตรกับความเร็รรอบที่เวลาต่าง ๆ

อย่างชัดเจน จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้กำลังบิดเป็นพารามิเตอร์ในการขยายขนาดถึง
 ปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์ CMC

5.3 ผลของการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

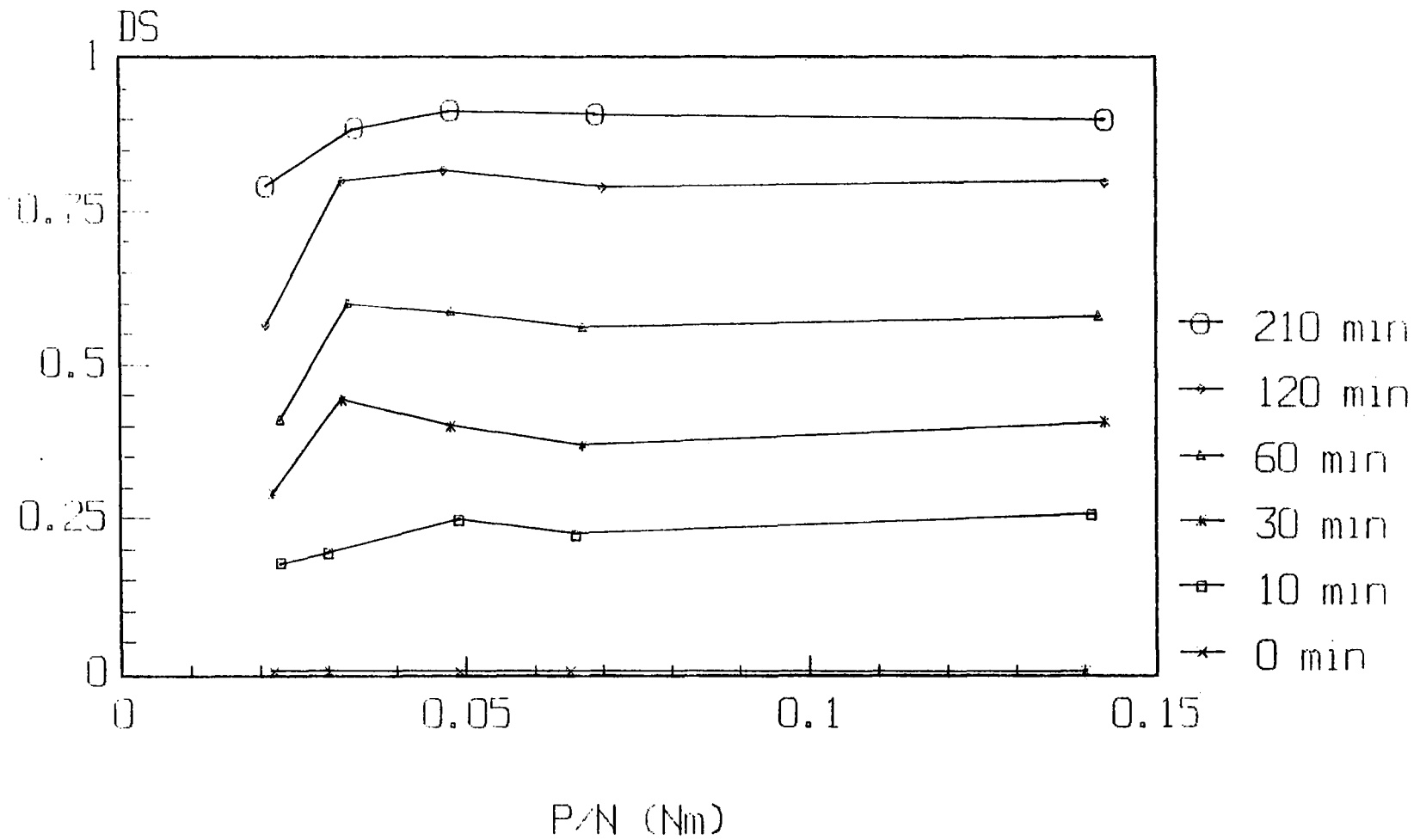
ในการทดลองทำโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์จากการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 100 และ 300 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ได้ความเร็วรอบเป็น 11.86 และ 35.57 รอบต่อนาที ตามลำดับ

5.3.1 ผลต่อค่าองศาการแทนที่

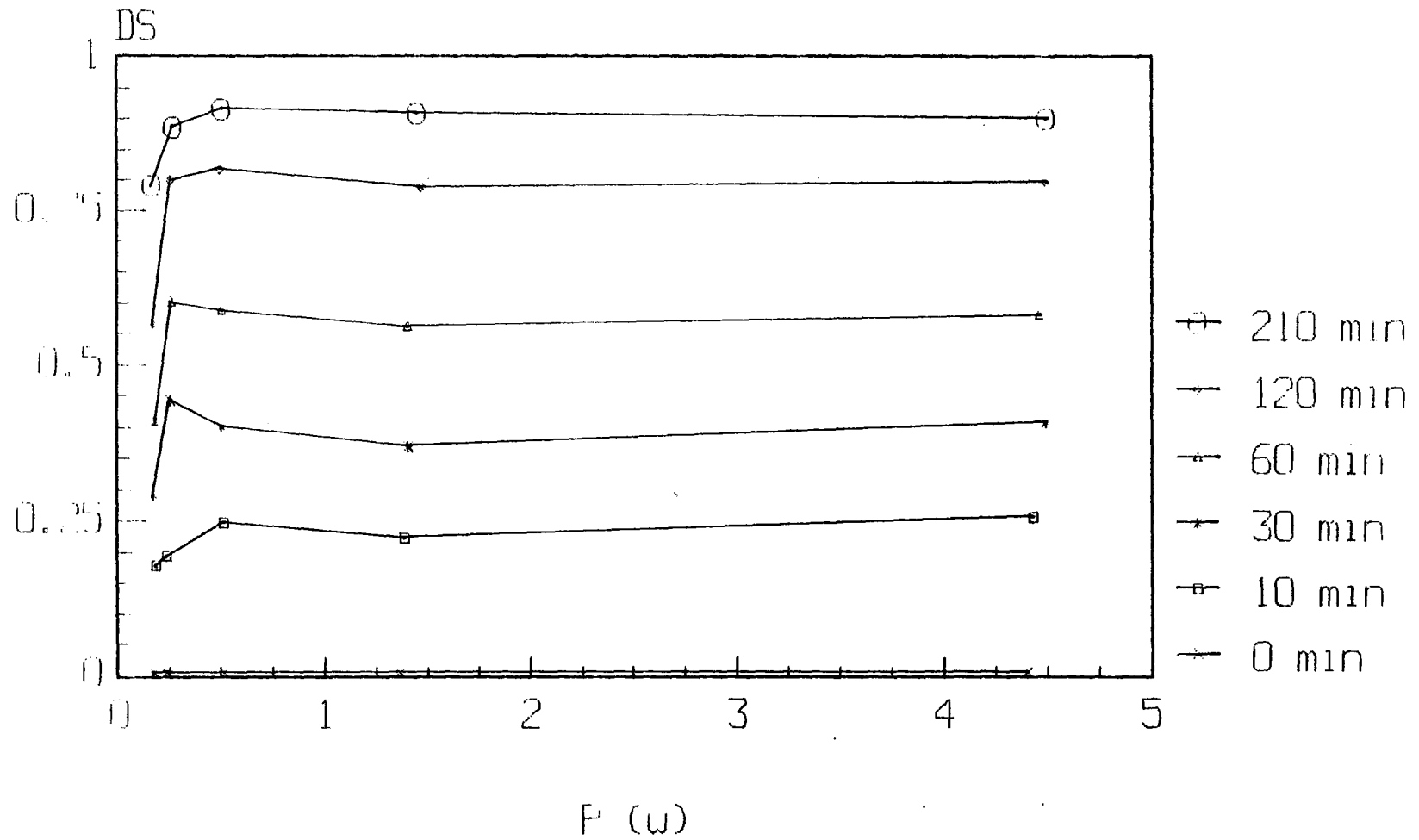
ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร พบว่าที่ความเร็วรอบ 11.86 และ 35.57 รอบต่อนาที ให้ค่าองศาการแทนที่ที่แตกต่างกันมาก โดยที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาทีมีค่าองศาการแทนที่สูงกว่าที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่าที่ความเร็วรอบต่ำกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่ง ความเร็วรอบมีผลต่อค่าองศาการแทนที่ ซึ่งเกิดจากความรุนแรงในการปั่นกวนมีค่าน้อยทำให้การผสมกันที่ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิดพลาด

5.3.2 ผลต่อกำลังบิด

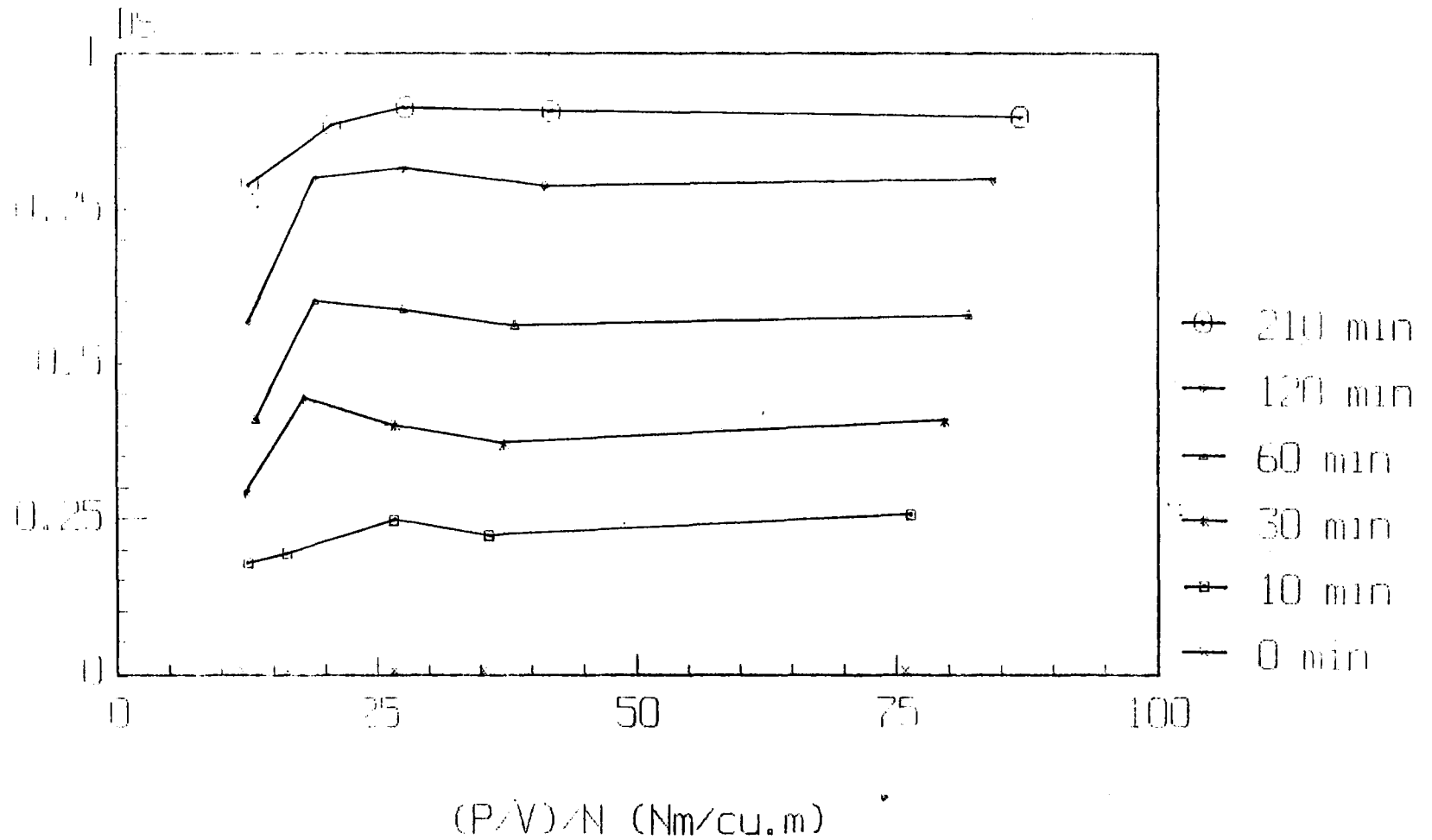
ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังบิดกับเวลา พบว่าที่ความเร็วรอบสูง กำลังบิด มีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ ต้องใช้กำลังในการปั่นกวนสารเพิ่มขึ้น นอกจากผลของกำลังในการปั่นกวนสารแล้วกำลังบิดยังมีผลมาจากความเร็วรอบของใบพัดกวน เมื่อพิจารณาจากข้อมูลในภาคผนวก ค พบว่ากำลังที่ใช้การปั่นกวนสารระหว่างความเร็วรอบที่ต่างกันมีความแตกต่างกันน้อย แต่ความเร็วรอบแตกต่างกันมาก ค่ากำลังบิดที่ความเร็วรอบสูงจึงต่ำกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ



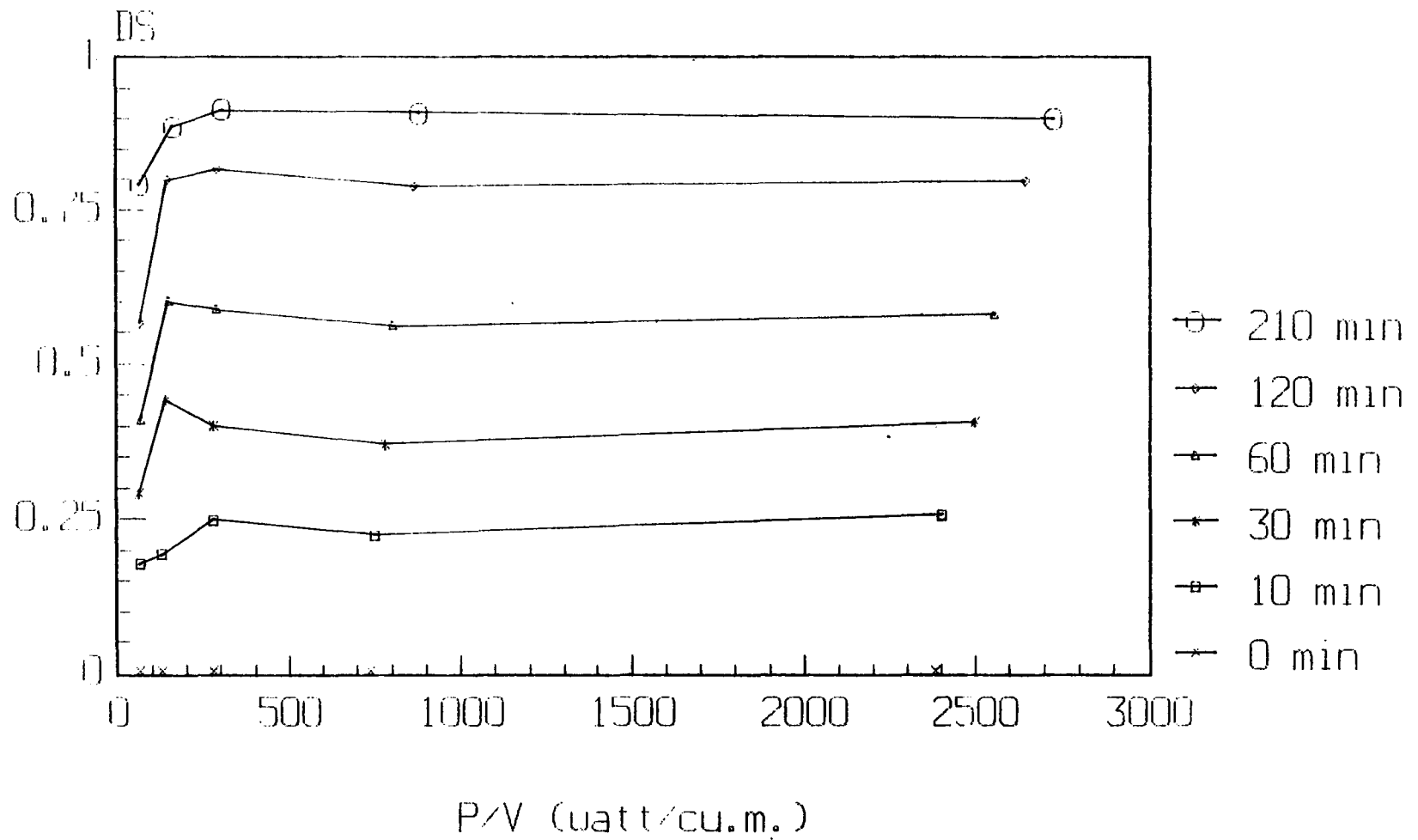
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวการแทนที่กับกำลังบิด ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร



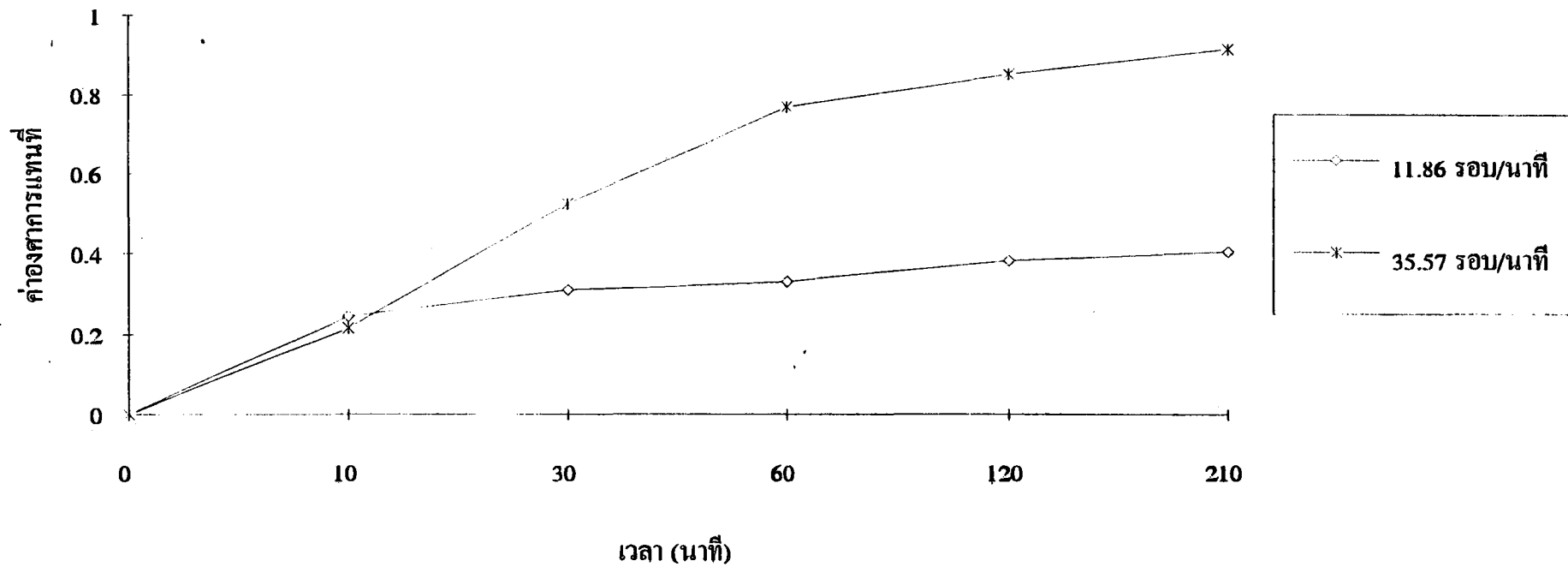
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับค่าคงที่ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร



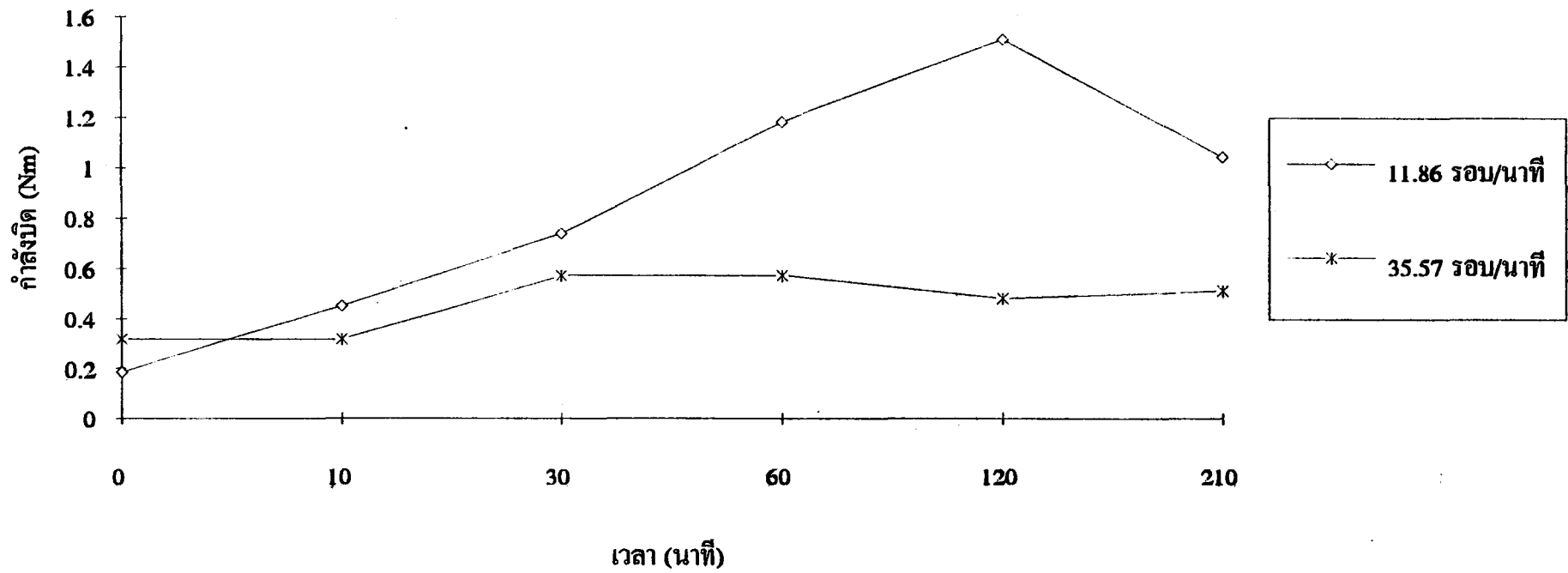
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังบิดต่อปริมาตร ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังต่อปริมาตร ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร



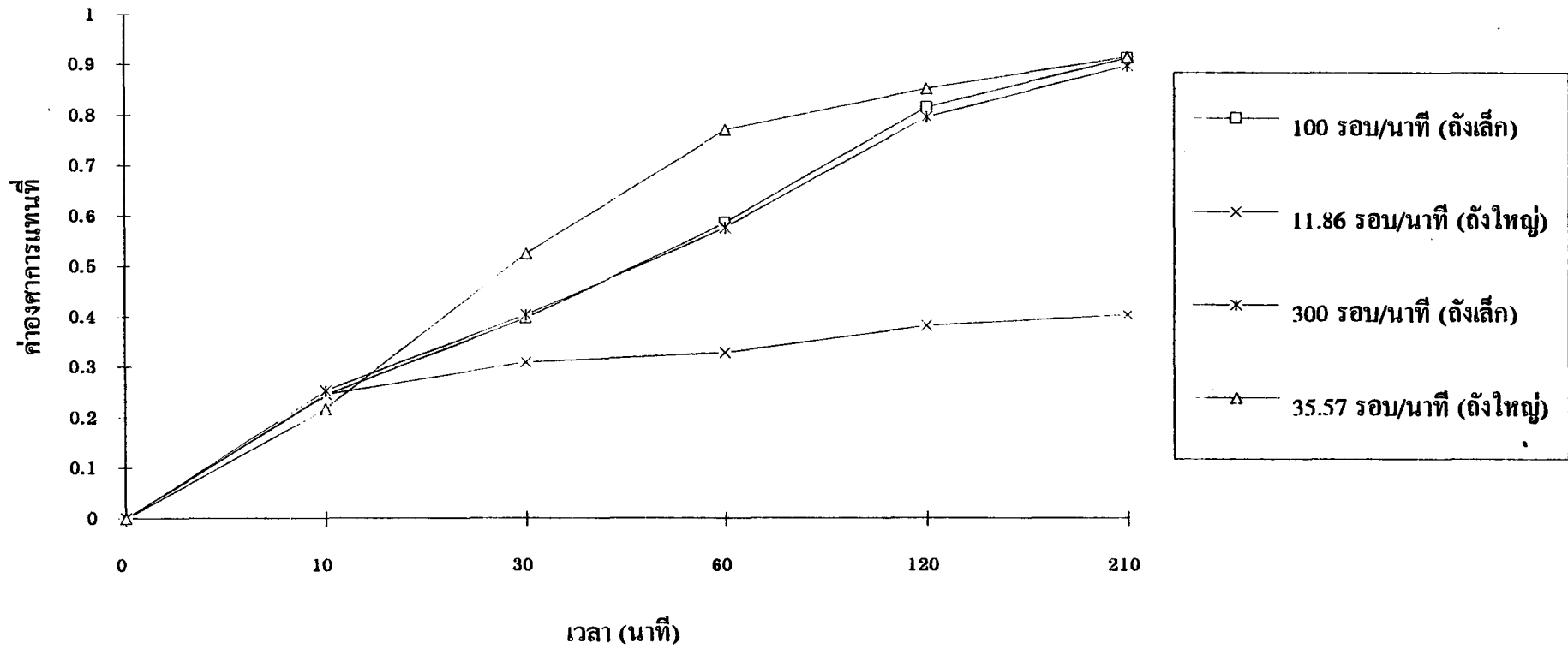
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบิดกับเวลา ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

5.4 เปรียบเทียบผลของค่าองศาการแทนที่และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการขยายขนาดระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร กับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

เปรียบเทียบค่าองศาการแทนที่ และกำลังบิด ของถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร กับถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

5.4.1 ผลของการขยายขนาดกับค่าองศาการแทนที่

ผลของการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.16 พบว่าการขยายขนาดโดยใช้เกณฑ์จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีค่าองศาการแทนที่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 30 นาที ถึง 120 นาทีที่มีค่าแตกต่างกัน โดยในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรมีค่าองศาการแทนที่มากกว่าในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ^[3]เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ CMC เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและถังปฏิกรณ์เคมีที่สร้างขึ้นถูกหุ้มไว้ด้วยฉนวนกันความร้อนทำให้อุณหภูมิของของผสมในถังมีค่าสูงขึ้น เมื่อเวลาในการดำเนินไปของปฏิกิริยาดัง 210 นาทีค่าองศาการแทนที่ที่ได้จากการสังเคราะห์ CMC ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร และ 24.7 ลิตรมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการขยายขนาดโดยใช้เกณฑ์จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที พบว่ามีค่าองศาการแทนที่แตกต่างกัน โดยการทดลองในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรมีค่าองศาการแทนที่ต่ำกว่าการทดลองในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่า กำลังบิดเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการขยายขนาดในช่วงหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาทีในถังขนาด 2 ลิตรที่นำมาขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดเป็นค่าความเร็วรอบในการปั่นกวนที่อยู่เหนือขีดจำกัดของการปั่นกวน และเมื่อนำมาขยายขนาดทำให้ได้ความเร็วรอบในการปั่นกวนในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรเกินขีดจำกัดของความเร็วรอบในการปั่นกวนในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรจึงได้ค่าองศาการแทนที่สูงสุดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์เช่นเดียวกันแต่ใช้ค่าตัวแปรจากความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรเป็นเกณฑ์ในการทดลองพบว่าค่าองศาการแทนที่มีค่าต่ำกว่าค่าองศาการแทนที่ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากความเร็วรอบที่ได้จากการขยายขนาดมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของการปั่นกวนในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร ค่าหนึ่งทำให้ความรุนแรงในการปั่นกวนมีค่าน้อยดังนั้นประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลสต่ำ ค่าองศาการแทนที่ที่ได้จึงมีค่าต่ำ



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา

5.4.2 ผลของการขยายขนาดกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ

เมื่อทำการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ ต้องควบคุมกำลังบิดให้คงที่ตลอดการทดลอง แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ ดังนั้นจึงใช้การคำนวณความเร็วรอบโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ และควบคุมความเร็วรอบแทน โดยเครื่องมือวัดรอบ (ภาคผนวก ก.2) เมื่อทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ กำลังบิด กำลังเฉลี่ย กำลังบิดต่อปริมาตร และกำลังต่อปริมาตร พบว่าค่าตามทฤษฎีที่ได้มีความแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 5.1

ที่เป็นเช่นนี้มีข้อสันนิษฐาน 2 ประการ คือ

1. ในการทดลองไม่สามารถควบคุมกำลังบิดให้เป็นไปตามค่าทฤษฎีได้ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองจึงแตกต่างจากค่าทางทฤษฎี

2. กำลังบิดอาจไม่ใช่ตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร และ 24.7 ลิตรเมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด
เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี

ความเร็วรอบดั่งเล็ก 300 รอบต่อนาที

เวลา (นาทีก)	กำลังบิด (Nm)			กำลัง (Watt)			กำลังบิดต่อปริมาตร (Nm/m ³)			กำลังต่อปริมาตร (Watt/m ³)		
	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี
0	0.140	0.316	0.140	4.400	1.68	0.522	75.799	13.242	5.867	2382.241	70.399	21.861
10	0.141	0.316	0.141	4.431	1.68	0.525	76.340	13.242	5.909	2399.025	70.399	22.015
30	0.143	0.573	0.143	4.494	3.05	0.533	79.577	24.112	6.159	2500.835	128.345	22.949
60	0.142	0.573	0.142	4.463	3.05	0.529	81.855	24.214	6.336	2554.665	128.888	23.443
120	0.143	0.483	0.143	4.494	2.57	0.533	84.266	20.497	6.522	2648.203	109.065	24.302
210	0.143	0.513	0.143	4.494	2.73	0.533	86.825	21.863	6.720	2728.597	116.348	25.039

ความเร็วรอบดั่งเล็ก 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาทีก)	กำลังบิด (Nm)			กำลัง (Watt)			กำลังบิดต่อปริมาตร (Nm/m ³)			กำลังต่อปริมาตร (Watt/m ³)		
	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี	ดั่งเล็ก	ดั่งใหญ่	ทฤษฎี
0	0.049	0.186	0.049	0.513	0.33	0.061	26.530	7.794	2.053	277.748	13.83	2.549
10	0.049	0.456	0.049	0.513	0.81	0.061	26.530	19.108	2.053	277.748	33.94	2.549
30	0.048	0.738	0.048	0.503	1.31	0.060	26.711	55.125	2.067	279.911	55.13	2.569
60	0.048	1.183	0.048	0.503	2.10	0.060	27.476	88.996	2.127	287.922	88.74	2.642
120	0.047	1.510	0.047	0.492	2.68	0.058	27.496	113.733	2.128	289.923	113.73	2.661
210	0.048	1.042	0.048	0.503	1.85	0.060	27.696	78.844	2.144	305.404	78.84	2.803

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการศึกษาตัวแปรสำคัญในการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฟสทรานเฟอร์ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1 ผลของความเร็รรอบในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

โดยเปลี่ยนความเร็ว รอบ 50 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที ใช้ภาวะการทดลองดังนี้

ใบพัดแบบ	anchor
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70
อัตราส่วนโดยโมลของกรดแอสติกต่อเซลลูโลส	1.75
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	1.012
ปริมาตรสารละลายรวม	1847.56 ลบ.ซม

6.1.1 ผลต่อความเร็รรอบต่อค่าองศาการแทนที่

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ ค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็รรอบ 75 100 200 และ 300 รอบต่อนาที มีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับที่ความเร็รรอบ 50 รอบต่อนาที มีค่าต่ำกว่าที่ความเร็รรอบอื่นๆ

6.1.2 ผลของความเร็รรอบต่อพารามิเตอร์ต่างๆ

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ เมื่อความเร็รรอบเพิ่มขึ้น พารามิเตอร์ต่างๆ คือ กำลังบิด กำลังเฉื่อย กำลังบิดต่อปริมาตร และกำลังต่อปริมาตร จะมีค่าเพิ่มขึ้น

6.2 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

พารามิเตอร์ที่ควรใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดคือ กำลังบิด (P/N) และกำลังบิดต่อปริมาตร ((P/N)/V)

6.3 ผลของการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด

24.7 ลิตร

โดยใช้เกณฑ์การขยายขนาดจากการทดลองที่ความเร็วรอบ 100 และ 300 รอบต่อนาที ซึ่งได้ค่าความเร็วรอบในถังปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่ เป็น 11.86 และ 35.57 รอบต่อนาที ตามลำดับ ใช้ภาวะการทดลองดังนี้

ใบพัดแบบ	anchor
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
ตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70
อัตราส่วนโดยโมลของกรดคลอโรแอซิดิกต่อเซลลูโลส	1.75
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	0.012
ปริมาตรสารละลายรวม	23,864.28 ลบ.ซม.

6.3.1 ผลต่อองศาการแทนที่

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที มีค่าต่ำกว่าค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาที

6.3.2 ผลต่อกำลังบิด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ค่ากำลังบิด ที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที จะมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาที

6.4 เปรียบเทียบผลของการใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดระหว่าง ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร กับ ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

6.4.1 ผลของการขยายขนาดกับค่าองศาการแทนที่

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ค่าองศาการแทนที่หลังจากหยุดปฏิกิริยา (ที่เวลา 210 นาที) ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรเปรียบเทียบกับที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร เปรียบเทียบกับที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร มีค่าแตกต่างกัน

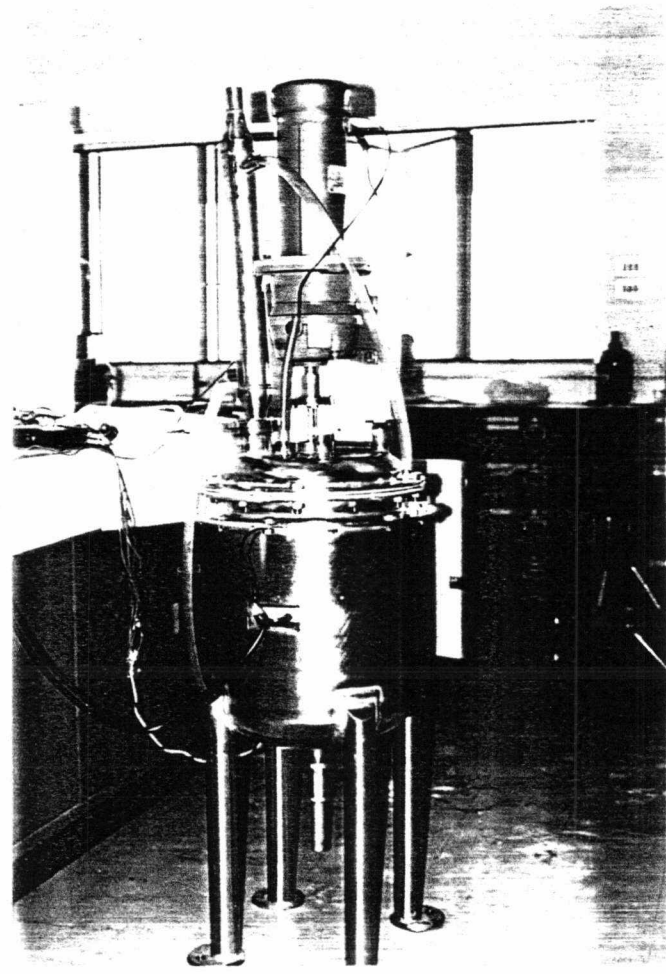
6.4.2 ผลของการขยายขนาดกับพารามิเตอร์ต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ กำลังบิด กำลังเฉื่อย กำลังบิดต่อปริมาตร และกำลังต่อปริมาตรที่คำนวณได้จากการทดลอง มีค่าที่แตกต่างจากค่าทางทฤษฎี

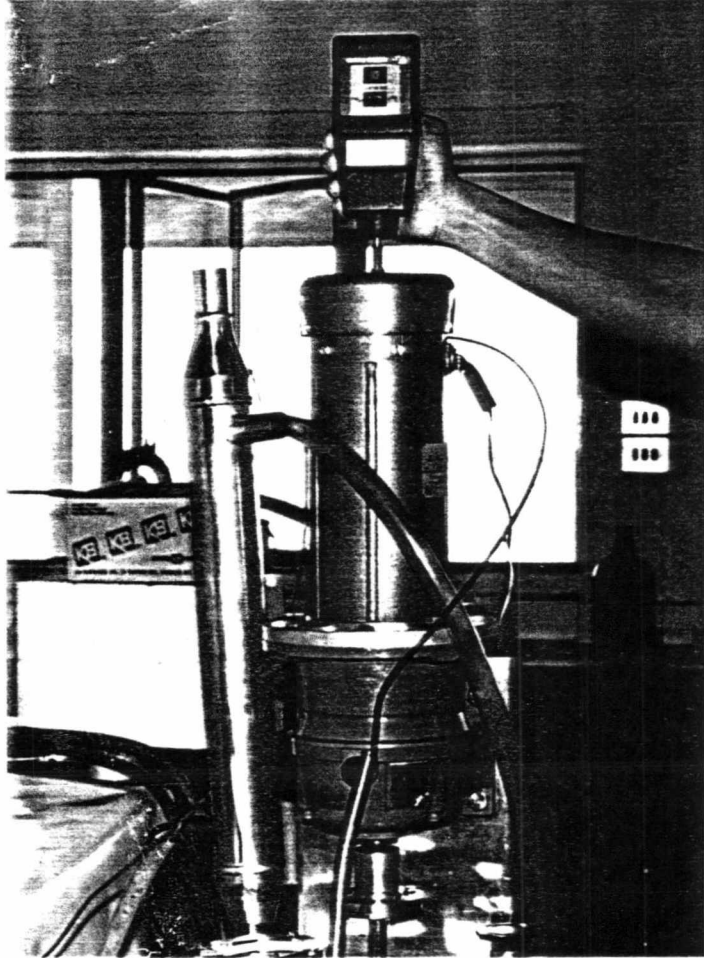
6.5 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด (ภาคผนวก จ)
2. ทำการทดลองกับถังปฏิกรณ์ขนาด 24.7 ลิตร โดยใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดและใช้เครื่องมือวัดกำลังบิดโดยตรง

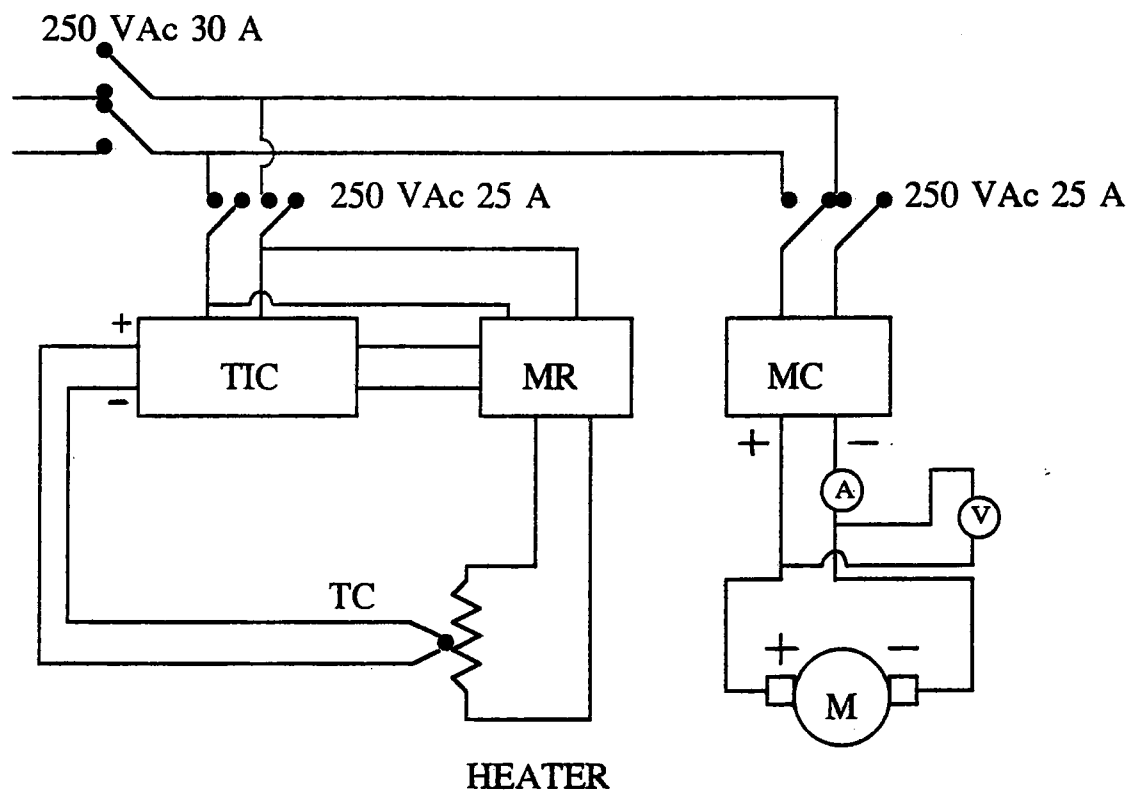
ภาคผนวก ก
รูปการทดลอง



รูปที่ ก.1 แสดงถึงอุปกรณ์เคมีที่ใช้ทดลอง



รูปที่ ก.2 แสดงการวัดความเร็วรอบของการป้อนกวน



TIC = TEMPERATURE CONTROLLER

MR= MAGNETIC RELAY

MC= MOTOR CONTROLLER

A = AMP. METER

V = VOLT METER

TC = THERMOCOUPLE

M = MOTOR

รูปที่ ก.3 แสดงการต่อวงจรไฟฟ้า

ภาคผนวก ข

การเตรียมสาร

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36 % (w/w)
เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36 กรัม (0.9 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 64 กรัม
2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
เตรียมจากโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 12.7344 กรัม (0.625 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 250 มล.
3. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล
เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 9.87 กรัม (0.25 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 500 มล.
ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับ สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
4. การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.25 นอร์มอล
ตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 % 5.2 มล. (0.0625 โมล) ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 250 มล. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล
5. การเตรียมสารละลายเงินไนเตรตเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร
เตรียมจากเงินไนเตรต 1.80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
6. การเตรียมสารละลายไดฟีนิลามีน
เตรียมจากไดฟีนิลามีน 0.5 กรัม ละลายในกรดซัลฟูริก 9 + 2 ปริมาณ 125 มล.
(กรดซัลฟูริก 9+2 เตรียมโดยผสมกรดซัลฟูริก 9 ส่วนกับน้ำ 2 ส่วนโดยปริมาตร)

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลแสดงผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนที่มีต่อปฏิบัติการสังเคราะห์ CMC

1.1 ความเร็วยรอบของใบพัด 300 รอบต่อนาทีด้วยใบพัดแบบ anchor

การทดลองที่ 1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2412	นอร์มัล
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3316	นอร์มัล
การทดลองที่ 2 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2412	นอร์มัล
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3316	นอร์มัล

ตาราง ค.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของการปั่นกวน 300 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5113	10.55	1	0.5203	10.08
	2	0.5229	10.70	2	0.5173	10.85
	3	-	-	3	0.5096	10.80
30	1	0.5110	9.05	1	0.5202	9.00
	2	0.5071	9.20	2	0.5067	9.20
	3	0.5143	9.15	3	0.5067	9.20
60	1	0.5062	7.75	1	0.5148	7.20
	2	0.5116	7.70	2	0.5072	7.40
	3	0.3974	9.25	3	0.5220	7.45
120	1	0.5067	5.60	1	0.5014	5.85
	2	0.5073	5.70	2	0.5049	5.85
	3	0.5013	5.70	3	0.5060	5.85
210	1	0.5018	5.00	1	0.5022	5.10
	2	0.5083	4.80	2	0.5072	5.00
	3	0.5246	4.50	3	0.5134	4.95

ตารางที่ ค.2 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1 (Ncm)	การทดลองครั้งที่ 2 (Ncm)
ถึงเปล่า	25.9	24.0
0	39.7	38.2
10	40.0	38.0
30	40.2	38.2
60	40.2	38.0
120	39.9	38.6
210	40.0	38.5

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 300 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.140	4.400	75.799	2382.241	0
10	0.141	4.431	76.340	2399.025	0.253
30	0.143	4.494	79.577	2500.835	0.403
60	0.142	4.463	81.855	2554.665	0.576
120	0.143	4.494	84.266	2648.203	0.795
210	0.143	4.494	86.825	2728.597	0.897

1.2 ความเร็วรอบของใบพัด 200 รอบต่อนาทีด้วยใบพัดแบบ anchor

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2410	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3810	นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2410	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3810	นอร์มัล

ตาราง ค.4 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5098	13.40	1	0.5144	12.85
	2	0.5055	13.50	2	0.5073	12.90
	3	0.5091	13.40	3	0.5005	12.90
30	1	0.5094	11.80	1	0.5058	11.20
	2	0.5056	11.90	2	0.5133	11.25
	3	-	-	3	0.5059	11.40
60	1	0.5029	10.10	1	0.5040	9.45
	2	0.5072	10.00	2	0.5107	9.55
	3	0.5151	10.05	3	0.5112	9.35
120	1	0.5022	8.10	1	0.5094	7.65
	2	0.5031	8.05	2	0.5261	7.35
	3	0.5068	7.95	3	0.5030	7.90
210	1	0.5067	6.80	1	0.5001	7.05
	2	0.5096	6.85	2	0.5118	6.90
	3	0.5079	6.90	3	0.5074	7.05

ตารางที่ ค.5 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1 (Ncm)	การทดลองครั้งที่ 2 (Ncm)
ถึงเปล่า	32.1	34.3
0	38.6	40.8
10	38.8	40.7
30	39.0	40.7
60	39.3	40.5
120	39.8	40.5
210	39.8	40.3

ตารางที่ ค.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณ ได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของ ไบพัด
200 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.065	1.362	35.192	737.412	0
10	0.066	1.383	35.734	748.782	0.220
30	0.067	1.404	37.284	781.302	0.366
60	0.067	1.404	38.351	803.663	0.558
120	0.070	1.467	41.249	864.467	0.785
210	0.069	1.446	41.894	877.960	0.905

1.3 ความเร็วรอบของใบพัด 100 รอบต่อนาทีใบพัดแบบ anchor

การทดลองครั้งที่ 1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2429	นอร์มัล
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.2969	นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2410	นอร์มัล
โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3808	นอร์มัล

ตาราง ก.7 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบใบพัดควน 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5018	9.40	1	0.5022	12.70
	2	0.5119	9.40	2	0.5038	12.75
	3	0.5152	9.65	3	0.5090	12.75
30	1	0.5065	8.15	1	0.5027	10.95
	2	0.5087	8.05	2	0.5060	10.85
	3	0.5051	8.30	3	0.5088	10.90
60	1	0.5089	6.30	1	0.5029	9.20
	2	0.5066	6.25	2	0.5008	9.20
	3	0.5055	6.40	3	0.5037	9.30
120	1	0.4984	4.20	1	0.5024	7.70
	2	0.5071	4.00	2	0.5099	7.60
	3	0.5126	4.20	3	-	-
210	1	0.5103	3.2	1	0.5041	17.70*
	2	0.5136	3.2	2	0.5049	17.90*
	3	-	-	3	0.5086	17.75*

หมายเหตุ *โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.6411 นอร์มัล

ตารางที่ ค.8 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1 (Ncm)	การทดลองครั้งที่ 2 (Ncm)
ถึงเปล่า	34.8	36.2
0	40.0	40.7
10	40.0	40.8
30	40.0	40.5
60	39.9	40.7
120	39.9	40.5
210	40.0	40.5

ตาราง ค.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด
100 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.049	0.513	26.530	277.748	0
10	0.049	0.513	26.530	277.748	0.244
30	0.048	0.503	26.711	279.911	0.397
60	0.048	0.503	27.476	287.922	0.586
120	0.047	0.492	27.496	289.923	0.815
210	0.048	0.503	27.696	305.404	0.912

1.4 ความเร็วรอบของใบพัด 75 รอบต่อนาที ใบพัดแบบ anchor

กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2443 นอร์มัล

โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.4275 นอร์มัล

ตารางที่ ค.10 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 75 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5026	15.30
	2	0.5110	15.15
	3	0.5071	15.20
30	1	0.5274	12.40
	2	0.5028	12.70
	3	0.5126	12.60
60	1	0.5073	11.10
	2	0.5168	11.10
	3	0.5159	11.10
120	1	0.5028	9.65
	2	0.5014	9.60
	3	0.5143	9.45
210	1	0.5110	8.90
	2	0.5344	8.50
	3	0.5125	8.70

ตาราง ก.11 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 75 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1 (Ncm)
ถึงเปล่า	35.9
0	38.9
10	38.9
30	39.1
60	39.2
120	39.1
210	39.3

ตารางที่ ก.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด
75 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.030	0.236	16.243	127.775	0
10	0.030	0.236	16.243	127.775	0.190
30	0.032	0.251	17.807	139.677	0.439
60	0.033	0.259	18.890	148.254	0.599
120	0.032	0.251	18.857	147.308	0.797
210	0.034	0.267	20.644	162.113	0.883

1.5 ความเร็วรอบของใบพัด 50 รอบต่อนาที ใบพัดแบบ anchor

กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2443 นอร์มัล

โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3847 นอร์มัล

ตารางที่ ค.13 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 50 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.4951	13.75
	2	0.5213	13.65
	3	0.4859	13.60
30	1	0.4925	12.50
	2	0.5192	12.35
	3	0.5151	12.35
60	1	0.4912	11.25
	2	0.4994	11.30
	3	0.5037	11.25
120	1	0.4986	9.85
	2	0.5184	9.60
	3	0.5112	9.75
210	1	0.5056	7.95
	2	0.5076	7.85
	3	0.5006	7.95

ตาราง ค.14 แสดงกำลังบิดที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1 (Ncm)
ถึงเปล่า	38.5
0	40.7
10	40.8
30	40.7
60	40.8
120	40.6
210	40.6

ตารางที่ ค.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด
50 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.022	0.173	11.911	93.665	0
10	0.023	0.181	12.453	97.997	0.175
30	0.022	0.173	12.243	96.272	0.287
60	0.023	0.181	13.165	103.606	0.408
120	0.021	0.165	12.375	97.230	0.561
210	0.021	0.165	12.750	100.182	0.787

2. การศึกษาการขยายขนาดด้วยถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

การศึกษาการขยายขนาดจะใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด

2.1 ใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 300 รอบเป็นเกณฑ์ในการทดลอง

ความเร็วรอบในการปั่นกววน = 35.57 รอบต่อนาที

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2443	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.3847	นอร์มัล

ตาราง ก.16 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 35.57 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5083	13.05
	2	0.5212	13.10
	3	0.5100	13.30
30	1	0.5142	9.90
	2	0.5354	9.80
	3	0.5269	9.95
60	1	0.5121	7.90
	2	0.5139	7.90
	3	0.5059	8.10
120	1	0.5053	7.40
	2	0.5157	7.25
	3	0.5151	7.25
210	1	0.5187	6.70
	2	0.5071	6.90
	3	0.5177	6.75

* ใช้ NaOH 20 ml

ตารางที่ ค.17 แสดงข้อมูลการหาค่ากำลังที่ความเร็วรอบ 35.57 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
ถึงเปล่า	0.43	19.5
0	0.53	19.8
10	0.53	19.8
30	0.61	20.0
60	0.61	20.0
120	0.57	20.0
210	0.58	20.0

ตารางที่ ค.18 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด 35.57 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.316	1.68	13.243	70.399	0
10	0.316	1.68	13.242	70.399	0.257
30	0.573	3.05	24.112	128.399	0.514
60	0.573	3.05	24.214	128.888	0.720
120	0.483	2.57	20.497	109.065	0.844
210	0.513	2.73	21.863	116.348	0.899

2.2 ใช้ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตรที่ 100 รอบเป็นเกณฑ์ในการทดลอง

ความเร็วรอบในการปั่นกววน = 11.86 รอบต่อนาที

การทดลองครั้งที่ 1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2443 นอร์มัล

โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.4275 นอร์มัล

ตาราง ค.19 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ที่ความเร็วรอบของใบพัด 11.86 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		
	ครั้งที่	นน. CMC (กรัม)	ปริมาตร HCl (มล.)
10	1	0.5218	14.5
	2	0.5294	14.5
	3	0.5109	14.6
30	1	0.5085	14.0
	2	0.5008	13.95
	3	0.5020	13.90
60	1	0.4990	13.7
	2	0.5086	13.8
	3	0.5061	13.75
120	1	0.5018	13.15
	2	0.5024	13.3
	3	0.5047	13.25
210	1	0.5065	12.90
	2	0.5066	12.95
	3	0.5038	13.15

ตารางที่ ค.20 แสดงข้อมูลการหาค่ากำลังที่ความเร็วรอบ 11.86 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
ถึงเปล่า	0.35	7.4
0	0.39	7.7
10	0.45	8.0
30	0.51	8.3
60	0.60	8.7
120	0.66	9.0
210	0.57	8.6

ตารางที่ ค.21 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการทดลองที่ความเร็วรอบของใบพัด
11.86 รอบต่อนาที ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตร

เวลา (นาที)	กำลังบิดเฉลี่ย (Nm)	กำลังเฉลี่ย (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อ ปริมาตร (W/m ³)	องศาการแทน ที่เฉลี่ย
0	0.186	0.33	7.794	13.83	0
10	0.456	0.81	19.108	33.94	0.245
30	0.738	1.31	55.125	55.13	0.309
60	1.183	2.10	88.996	88.74	0.329
120	1.510	2.68	113.733	113.73	0.382
210	1.042	1.85	78.844	78.84	0.403

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

จากข้อมูลการทดลองในตาราง ค.1 และค.2 ที่เวลา 210 นาที

1. การหาค่าองศาการแทนที่

$$A = \frac{(BC - DE)}{F}$$

เมื่อ A : กรัมสมมูลของกรดที่ใช้ไปต่อน้ำหนักเป็นกรัมของสารตัวอย่าง

B : มล. ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

C : ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

D : ปริมาตรเป็น มล. ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

E : ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

F : น้ำหนักเป็นกรัมของ CMC ในรูปกรด

$$\text{องศาการแทนที่} = \frac{0.162A}{1 - 0.058A}$$

162 : น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของเซลลูโลส

กลูโคสของแต่ละหมู่คาร์บอกซีเมทิลที่แทนที่

การทดลองครั้งที่ 1

ครั้งที่ 1 B = 10.00 มล.

C = 0.3316 มล.

D = 5.0 มล.

E = 0.2412 นอร์มัล

F = 0.5018 กรัม

$$\begin{aligned}
 \therefore A &= 4.2049 \\
 \text{ค่าองศาการแทนที่} &= \frac{(0.162 \times 0.9225)}{1 - (0.058 \times 4.2049)} \\
 &= 0.9009 \\
 \text{ครั้งที่ 2 ค่าองศาการแทนที่} & \\
 &= 0.9126 \\
 \text{ครั้งที่ 3 ค่าองศาการแทนที่} & \\
 &= 0.9143 \\
 \therefore \text{ค่าองศาการแทนที่เฉลี่ย} &= 0.9093 \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 2 ค่าองศาการแทนที่เฉลี่ย} & \\
 &= 0.8851 \\
 \text{ดังนั้นค่าองศาการแทนที่ที่เวลา 210 นาที} & \\
 &= 0.8972
 \end{aligned}$$

2. การคำนวณหากล้างบิด กำลังบิดต่อปริมาตร กำลัง กำลังต่อปริมาตร ความเร็วปลายใบพัด และ ความเร็วรอบ

$$\begin{aligned}
 2.1 \text{ กำลังบิด (TQ)} &= \text{กำลังบิด ณ เวลาใด ๆ} - \text{กำลังบิดของถังเปล่า} \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ณ เวลา 60 นาที} & \\
 \text{กำลังบิด} &= 40.2 - 25.9 \quad \text{Ncm} \\
 &= 14.3 \quad \text{Ncm} \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 2 ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที} & \\
 \text{กำลังบิด} &= 38.0 - 24.0 \quad \text{Ncm} \\
 &= 14.0 \quad \text{Ncm} \\
 \text{เฉลี่ย} &= 14.15 \quad \text{Ncm} \\
 &= 0.142 \quad \text{Nm}
 \end{aligned}$$

2.2 กำลังบิดต่อปริมาตร

$$\begin{aligned}
 &= \frac{T_Q}{V} \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ณ เวลา 60 นาที} & \\
 \text{กำลังบิดต่อปริมาตร} & \\
 &= \frac{T_Q}{V}
 \end{aligned}$$

$$= 81.855 \quad \text{Nm/m}^3$$

2.3 กำลัง

2.3.1 คำนวณจากกำลังบิด (T_Q)

$$\text{จากสูตร } T_Q = \frac{PE_d}{2\pi N}$$

เมื่อ

$$T_Q = \text{กำลังบิด (Nm)}$$

$$P = \text{กำลัง (Watt)}$$

$$N = \text{ความเร็วรอบ (รอบ/วินาที)}$$

$$E_d = \text{ประสิทธิภาพของเฟือง}$$

การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ณ เวลา 60 นาที

$$\text{กำลังบิด} = 0.142 \text{ Nm}$$

$$P = 0.142 \times 2 \times \pi \times 5$$

$$= 4.463 \text{ Watt}$$

2.3.2 คำนวณจากกระแสและแรงเคลื่อน

$$\text{กำลังจากเครื่องมือวัด} = \text{กระแส (แอมแปร์) x แรงเคลื่อน (โวลต์)}$$

$$\text{กำลัง} = \text{กำลังที่คำนวณจากเครื่องมือวัด x ประสิทธิภาพของมอเตอร์}$$

2.4 กำลังต่อปริมาตร

$$\text{กำลังต่อปริมาตร} = \frac{P}{V}$$

$$= \frac{4.463 \times 10^6}{1847 - 100}$$

$$= 2554.665 \quad \text{Watt}$$

2.5 ความเร็วปลายใบพัดกวน

$$= \pi ND$$

เมื่อ

$$N = \text{ความเร็วรอบ (รอบต่อวินาที)}$$

$$D = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)}$$

$$\text{ความเร็วปลายใบพัดกวน} = \frac{22}{7} \times 5 \times 0.045$$

$$= 0.707 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.6 ความเร็วรอบ (รอบต่อ นาที)

$$\text{ความเร็วรอบ} = \text{ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)} / 60 \text{ (วินาทีต่อนาที)}$$

3. การขยายขนาด

เมื่อพิจารณาเกณฑ์ในการขยายขนาดเป็น กำลังบิด จากตารางที่ 2.2 จะได้ว่า

กำลังบิดในถังปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่ = กำลังบิดในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ความเร็วรอบในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ = $k^{(-5/6)}$ ความเร็วรอบในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก(N_m)

เนื่องจากในการทดลองตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ง่ายที่สุด คือ จำนวนรอบ

ปริมาตรของสารทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เท่ากับ 23864.28 มล.

ปริมาตรของสารทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเท่ากับ 1847.56 มล.

$$\text{ดังนั้น } k = \frac{23864.28}{1847.56}$$

$$= 12.92$$

$$\text{จำนวนรอบในการปั่นกวน} = (12.92)^{(-5/6)} N_m$$

∴ ความเร็วรอบในการปั่นกวนของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เท่ากับ 35.57 เมื่อความเร็วรอบในการปั่นกวนของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเป็น 300 รอบต่อนาที

4. ข้อมูลแสดงวิธีการคำนวณหาปริมาตรและความยาวกั้นถึงบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง

จาก จากสมการทรงกลม $X^2 + Y^2 + Z^2 = \rho^2$ เมื่อ $\rho =$ รัศมีของทรงกลม

การแปลงอินทิกรัล 3 ชั้นในพิกัดทรงกลม จะได้

$$Z = \rho \cos \phi, \quad X = \rho \sin \phi \cos \theta, \quad Y = \rho \sin \phi \sin \theta$$

จากการแปลงจะได้ $\rho \sin \phi = A = D/2$

สำหรับกั้นถึงรัศมีความโค้ง $0.9D \therefore \rho = 0.9D$ ดังนั้น

$$\sin \phi = 0.56$$

$$\phi = 34.06^\circ$$

จากรูปที่ ง.1 จะได้

$$B = \rho \cos \phi$$

$$\therefore B = 0.75D$$

จากสูตรปริมาตรทรงกลมเท่ากับ $\iiint \rho^2 \sin \phi \, d\rho \, d\phi \, d\theta$

เมื่อ

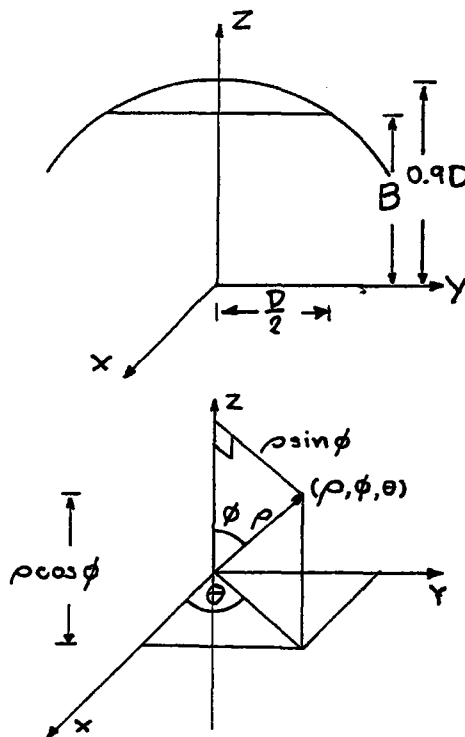
$$0.75D \leq \rho \leq 0.9D$$

$$0 \leq \phi \leq 34.06$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

ดังนั้นจะได้ปริมาตร

$$\begin{aligned} &= \iiint \rho^2 \sin \phi \, d\rho \, d\phi \, d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{34.6} \int_{0.75D}^{0.9D} \rho^2 \sin \phi \, d\rho \, d\phi \, d\theta \\ &= \frac{1}{3} \int_0^{2\pi} \int_0^{34.6} \rho^3 \sin \phi \Big|_{0.75D}^{0.9D} \, d\phi \, d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{34.6} 0.1D^3 \sin \phi \, d\phi \, d\theta \\ &= - \int_0^{2\pi} 0.1D^3 \cos \phi \Big|_0^{34.6} \, d\theta \\ &= 0.02 D^3 \int_0^{2\pi} d\theta \\ &= 0.02 D^3 \theta \Big|_0^{2\pi} \\ &= 0.13 D^3 \end{aligned}$$



รูปที่ ง.1 การแปลงอินทิกรัล
ของพิกัดทรงกลม

ดังนั้นปริมาตรที่กั้นถึงเท่ากับ $0.13D^3$

ปริมาตรทั้งหมดของถังที่สามารถบรรจุได้เท่ากับ $0.13D^3 + \pi D^3/4 = 0.92D^3$

จากค่า $B = 0.75D$ ดังนั้น จากรูปที่ ง.1 จะได้ความสูงของของเหลวที่บรรจุ

$$= (0.9D - 0.75D) + D$$

$$= 1.15D$$

ภาคผนวก จ

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. อังปฏิกรณ์เคมี ขนาด 24.7 ลิตร

1.1 เพิ่มอุปกรณ์ระบายความร้อนภายในถัง เนื่องจากถังปฏิกรณ์เคมีถูกหุ้มไว้ด้วยฉนวน ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เคมีเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในถังมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าที่ต้องการ จึงต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์สำหรับระบายความร้อน อุปกรณ์ดังกล่าวอาจจะเป็นท่อที่ขดเป็นเกลียวรอบ ๆ บริเวณแกนของใบพัดกวนและยึดปลายทั้งสองของท่อนี้บนฝาของถังปฏิกรณ์เคมีสำหรับต่อน้ำหล่อเย็น

1.2 เพิ่มขนาดของวาล์วและท่อสำหรับเก็บตัวอย่างและปล่อยสารออก เนื่องจากวาล์วที่ได้ออกแบบมามีขนาดเพียง 0.5 นิ้ว ทำให้การเก็บตัวอย่างและการปล่อยสารในถังที่ประกอบด้วยความยากลำบากดังนั้นควรเพิ่มขนาดเป็น 1 นิ้ว

2. การขยายขนาด

ทำการขยายขนาดโดยใช้กำลังบิดต่อปริมาตรเป็นเกณฑ์ โดยมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่คำนวณทางทฤษฎีดังนี้

ตารางที่ จ.1 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้

ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	กำลังบิด (Nm)	กำลัง (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร(Nm/m ³)	กำลังต่อปริมาตร (W/m ³)
0	0.284	0.633	11.911	26.534
10	0.297	0.661	12.453	27.688
30	0.284	0.633	12.453	27.273
60	0.297	0.661	13.165	29.273
120	0.271	0.606	12.375	27.624
210	0.271	0.606	12.750	28.463

ความเร็วรอบ 21.31 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้
ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 75 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	กำลังบิด (Nm)	กำลัง (W)	กำลังบิดต่อปริมาตร (Nm/m ³)	กำลังต่อปริมาตร (W/m ³)
0	0.388	1.299	16.243	54.453
10	0.388	1.299	16.243	54.453
30	0.143	1.382	17.807	59.526
60	0.426	1.426	18.809	63.181
120	0.413	1.382	18.857	62.778
210	0.439	1.470	20.644	69.087

ความเร็วรอบ 31.96 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ.3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้
ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	กำลังบิด (Nm)	กำลัง (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร(Nm/m ³)	กำลังต่อปริมาตร (W/m ³)
0	0.633	2.825	26.530	118.367
10	0.633	2.825	26.530	118.367
30	0.620	2.770	26.711	119.289
60	0.620	2.770	27.476	122.703
120	0.607	2.709	27.496	123.555
210	0.620	2.770	27.696	130.153

ความเร็วรอบ 42.617 รอบต่อนาที

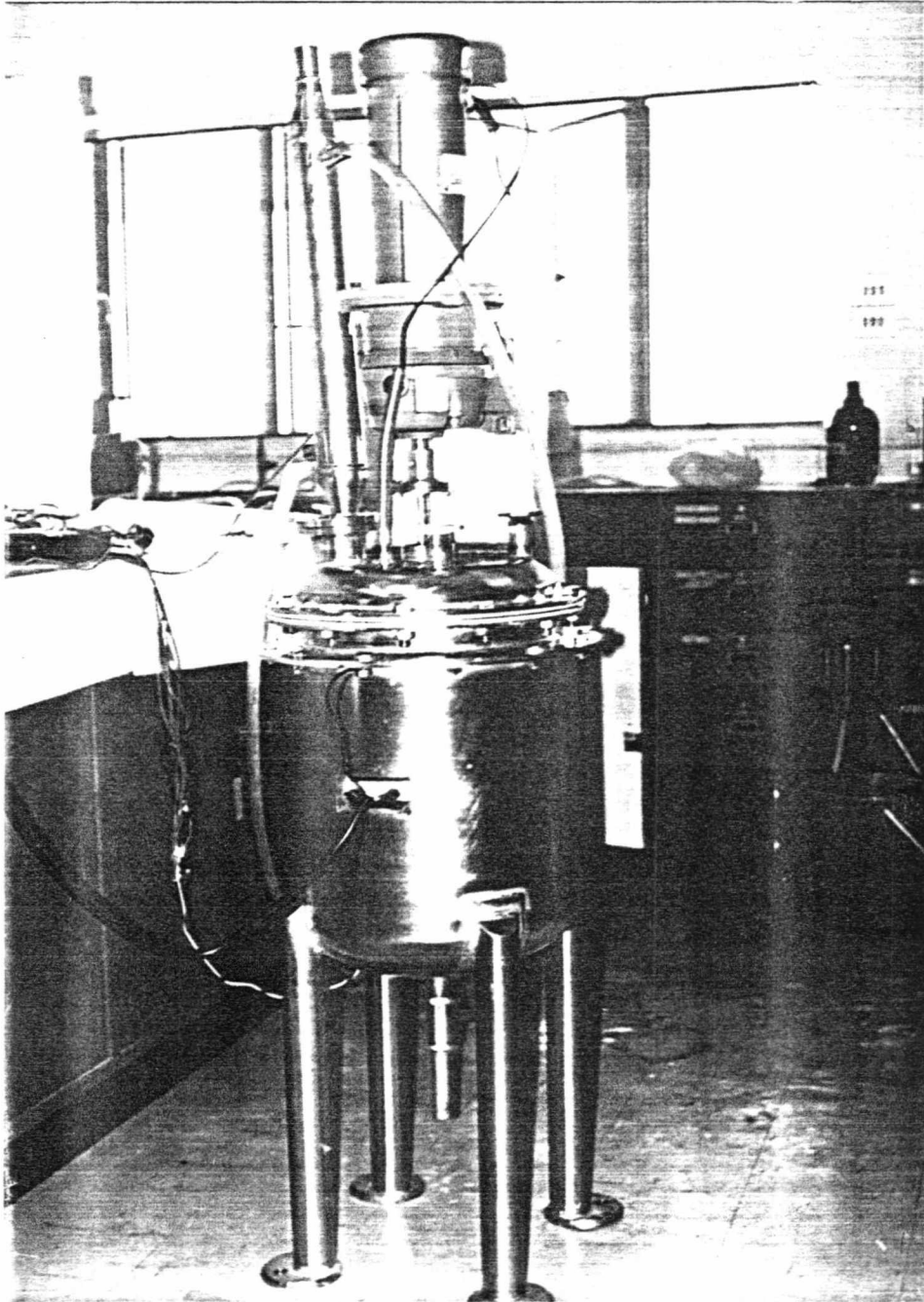
ตารางที่ จ.4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดโดยใช้
ค่าตัวแปรจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 2 ลิตรที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	กำลังบิด (Nm)	กำลัง (W)	กำลังบิดต่อ ปริมาตร(Nm/m ³)	กำลังต่อปริมาตร (W/m ³)
0	1.809	24.277	75.799	1015.231
10	1.822	24.397	76.340	1022.384
30	1.848	24.744	79.577	1065.772
60	1.835	24.574	81.855	1088.712
120	1.848	24.744	84.266	1128.575
210	1.848	24.744	86.825	1162.836

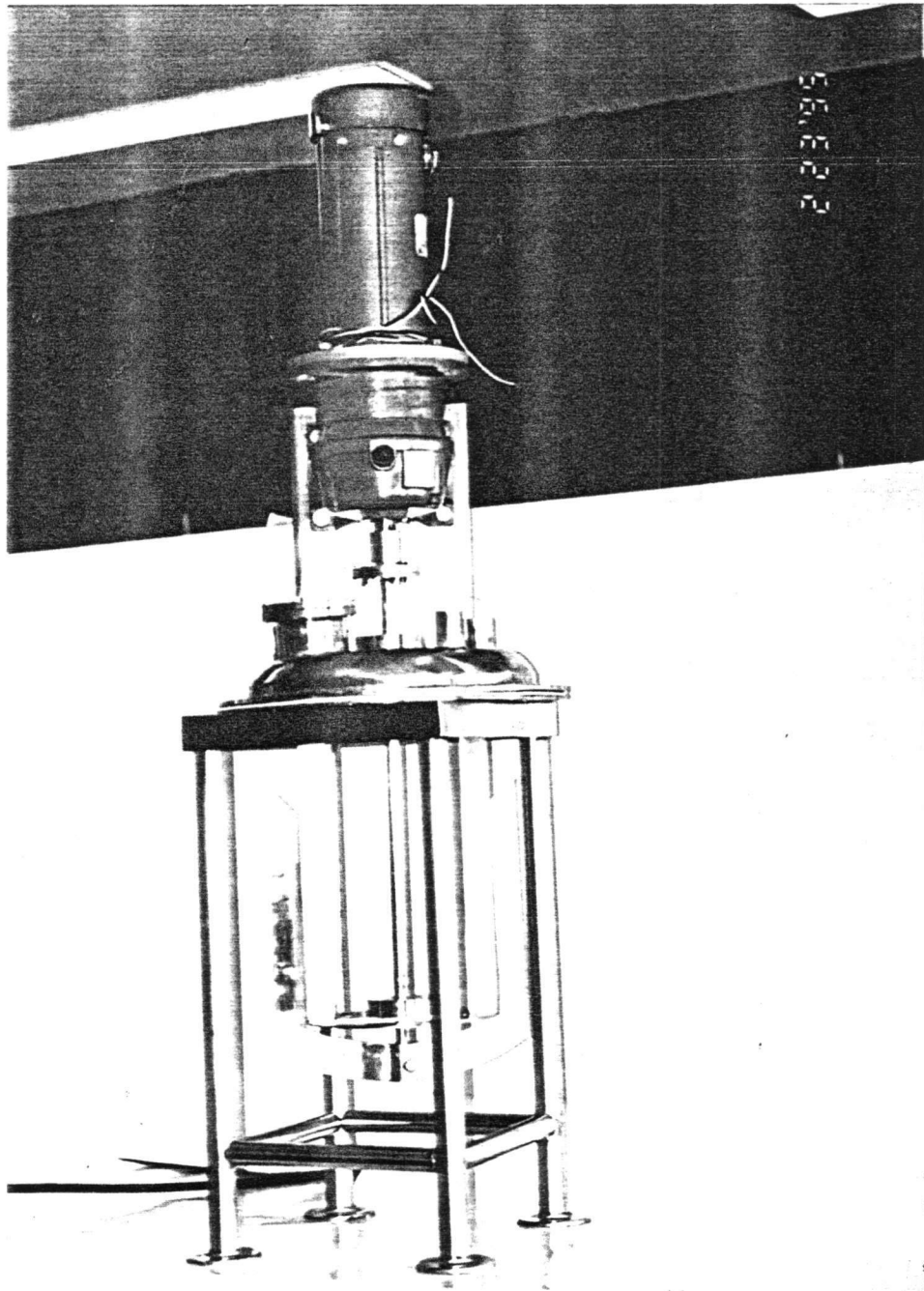
ความเร็วรอบ 127.85 รอบต่อนาที

ภาคผนวก ฉ

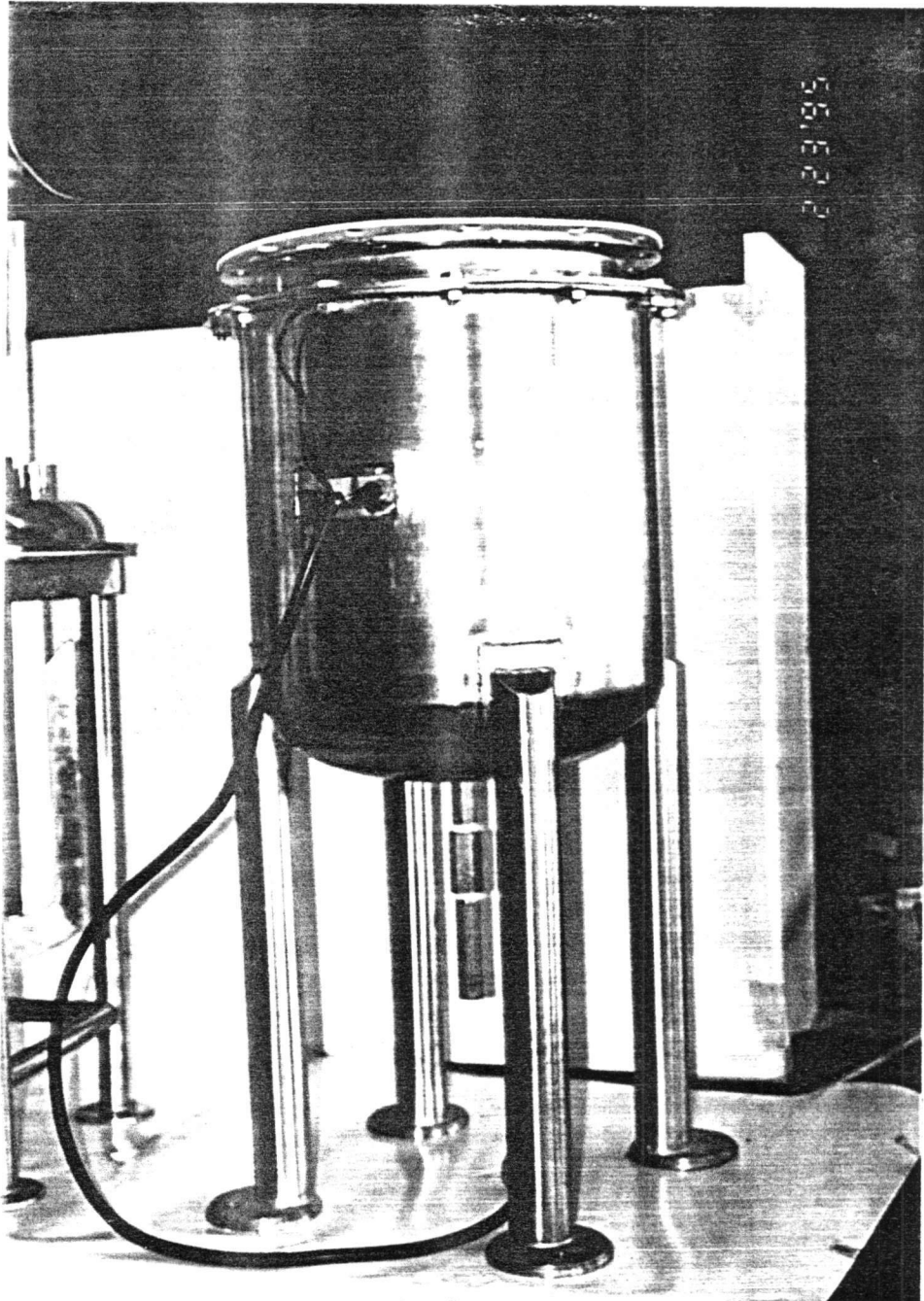
ถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 24.7 ลิตรและอุปกรณ์ประกอบ



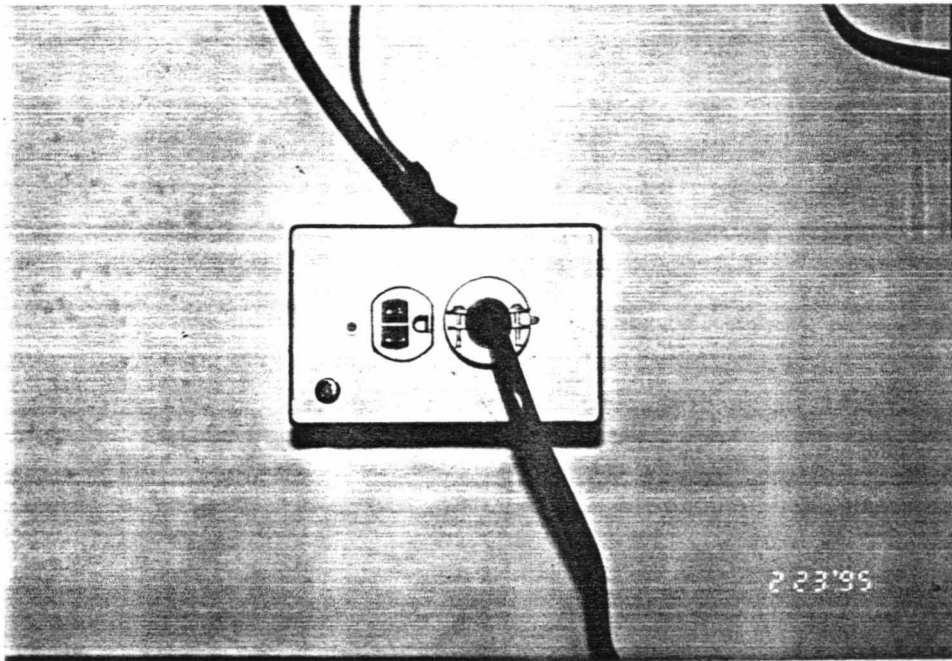
รูปที่ ฉ.1 แสดงถังปฏิกรณ์เคมีที่สร้างขึ้น



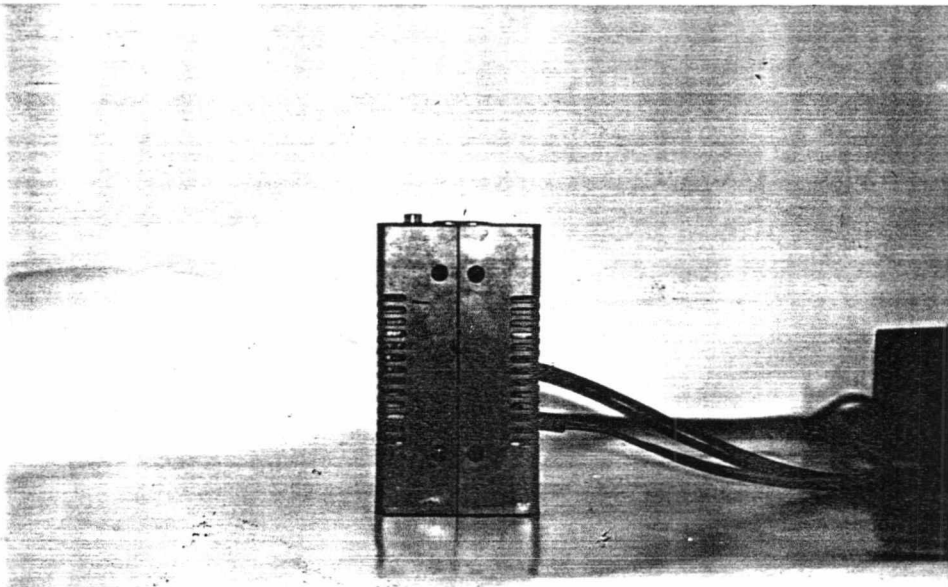
รูปที่ ๑.๒ แสดงฝาถังปฏิกรณ์เคมีพร้อมกริม มอเตอร์ และใบพัดกวน



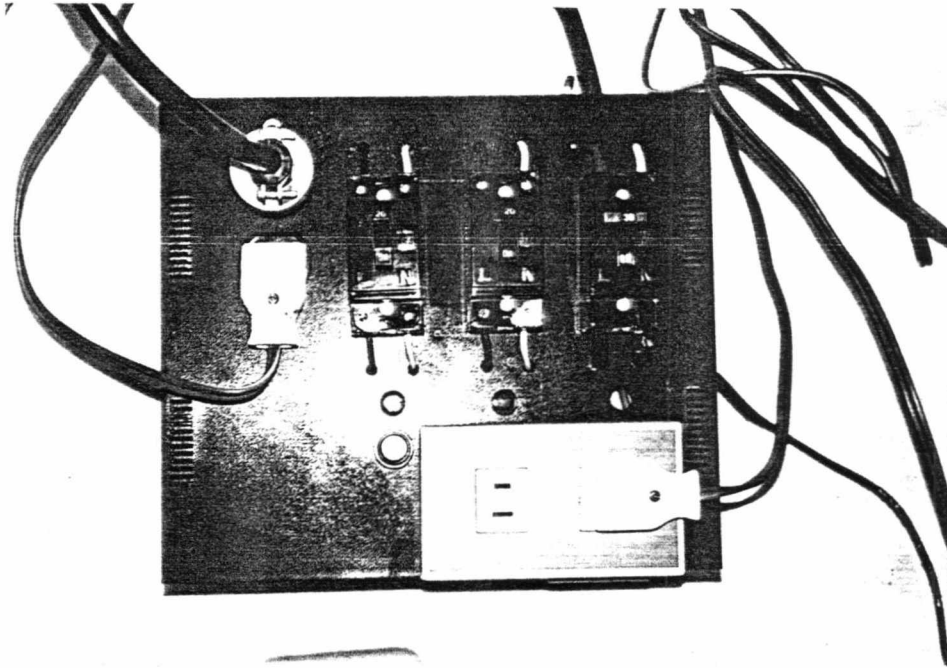
รูปที่ ๓.๓ แสดงตัวถังปฏิกรณ์เคมี



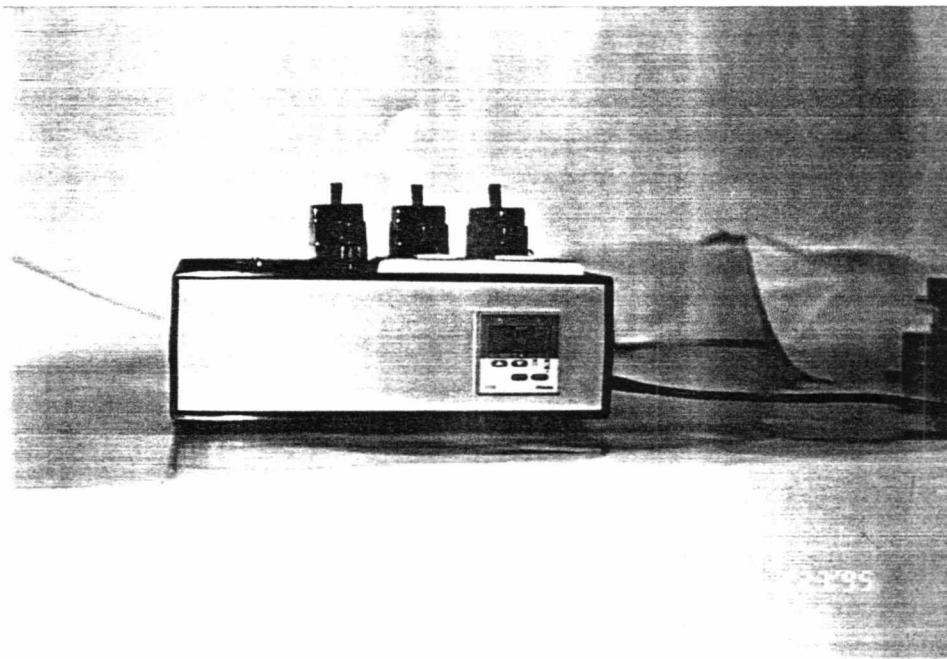
รูปที่ ๓.๔ แสดง Magnetic relay (ด้านบน)



รูปที่ ๓.๕ แสดง Magnetic relay (ด้านข้าง)



รูปที่ ๖.๖ แสดงชุดควบคุมหลัก (ด้านบน)



รูปที่ ๖.๗ แสดงชุดควบคุมหลัก (ด้านข้าง)

เอกสารอ้างอิง

- 1) ยุกัณฑ์ มิลเลอร์ “ข้อมูลเคมีภัณฑ์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส” ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม 4(1) (2537) :49-50.
- 2) ชาติรี จันทร์; ไพโรจน์ สิริวัฒน์โยธิน “การศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกริยาในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส” วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต; ภาควิชาเคมี; คณะวิทยาศาสตร์; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2536.
- 3) ยุพิน อังศุณิตย์; สมชัย ปัทมมงคลชัย “จลนศาสตร์ของปฏิกริยาการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยใช้ตั้งเร่งปฏิกริยาเฟสทรานสเฟอ์” วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต; ภาควิชาเคมี; คณะวิทยาศาสตร์; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
- 4) ASTM Committee on Standards “Standard Methods of Testing Sodium Carboxymethylcellulose” American Society for Testing and Materials. Philladelphia. 1989.

บรรณานุกรม

- ชาตรี จันทร; ไพโรจน์ สิริวัฒน์โยธิน “การศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกริยาในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส” วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต; ภาควิชาเคมี:คณะวิทยาศาสตร์: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2536.
- ธวัชชัย ศิริพันธ์; ธวัชชัย อธิธิพูนธนกร;นงลักษณ์ ชินชุมมากร “การศึกษาเพื่อการออกแบบโรงงานต้นแบบในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส” วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต :ภาควิชาเคมี:คณะวิทยาศาสตร์: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2535.
- Oldshue,J.Y. **Fluid Mixing Technology** pp. 43-71,192-215.;McGraw-Hill: New York,1983;
- Chapman,F.S.;Holland,F.A. **Liquid Mixing and Processing in Stirred Tank ;** pp.1-107; Reinhold:New York, 1967;.