

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิบัติการสั้งเคราะห์

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

๒/๓๓

๒๕๕๑๓

เลขหมู่

๒๕๓๖

เลขทะเบียน

วันเดือนปี

นายชาติรี จันทร

นายพรจัน ศรีวัฒนโยธิน

612624268

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๓๖

The study on scale up of chemical reactor in
Carboxymethyl cellulose synthesis

Mr. Chatree Chantorn

Mr. Pairoje Siriwattanayothin

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

1993

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกริยาในการสังเคราะห์

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

นักศึกษา

นายชาติรี จันทร์

นายไพโรจน์ ศิริวัฒน์โยธิน

ภาควิชา

เคมี

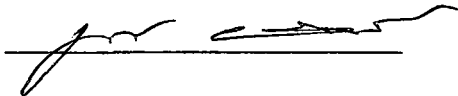
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์

ดร.ประเสริฐ คุณคำชู

อาจารย์อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล

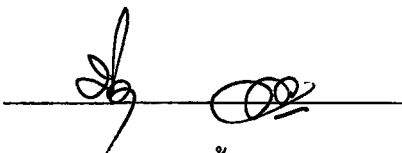
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ. นงนุช เกตรานูวัฒน์)

รักษาการแทนหัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ



(ดร. ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์)

ประธานกรรมการ



(ดร. อนุชา เอื้อเพิ่มเกียรติ)

กรรมการ

ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์

(ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

กรรมการ

ประเสริฐ คุณคำชู

(ดร.ประเสริฐ คุณคำชู)

กรรมการ

อนุรักษ์ บิตรีกษ์กุล

(อ.อนุรักษ์ บิตรีกษ์กุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์	
	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	
นักศึกษา	นายชาติรี	จันทร์
	นายไพโรจน์	ศิริวัฒน์โยธิน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	มงคลอัศวรัตน์
	ดร.ประเสริฐ	คุณคำชู
	อาจารย์อนุรักษ์	ปิติรักษ์สกุล
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2536	

บทคัดย่อ

ถังปฏิกรณ์เคมี เป็นส่วนสำคัญในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่หาค่าองศาการแทนที่สูง โดยถังที่ใช้จะมีครีบบอกอยู่ภายในซึ่งจะเพิ่มการไหลวนของของเหลวอันเนื่องมาจากใบพัดกวนทั้งแนวตั้งและแนวรัศมีของถัง ดังนั้นในการศึกษาการผลิตจึงใช้ถังตั้งต้นแบบทดลองขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร แบบมีครีบบ หรือมาใบพัดกวน 2 ชนิด คือ Anchor agitator และ Flat blade turbine สารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสประกอบด้วย ไอโซโพรพานอล น้ำ เซลลูโลสจากต้นสน กรดคลอโรอะซิติก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟสทรานสเฟอร์ ทำการหาค่าองศาการแทนที่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยการไตเตรตย้อนกลับด้วยกรดคลอโรริก เพื่อหาปริมาณส่วนเกินของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการพิจารณาค่าองศาการแทนที่ได้ทำการศึกษาโดยให้ความเร็วรอบใบพัดกวน ส่วนประกอบของสารตั้งต้น และเวลาเปลี่ยนแปลงใบ พร้อมกับศึกษาตัวแปรในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี อันได้แก่กำลังบิด กำลังต่อปริมาตร และความเร็วปลายของใบพัดกวน ด้วยการแปลงค่าของกำลัง และความเร็วรอบของใบพัดกวน แล้ว

สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่ที่เวลาต่าง ๆ กับกำลังบิด กำลังต่อ ปริมาตร และความเร็วปลายของใบพัดกวน เพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรที่ใช้ในการขยายขนาด จากการศึกษาพบว่า ชนิดของใบพัดกวน และส่วนประกอบของสารตั้งต้นที่เหมาะสม ทำให้ได้ค่า องศาการแทนที่สูง คือ ใบพัดกวนแบบ Anchor agitator และ 15:1 (อัตราส่วนของ สารละลายต่อเซลล์โรลส) ตามลำดับ และตัวแปรที่จะนำไปใช้ขยายขนาดต่อไปคือ กำลังบิด

of substitution was observed as a function of stirring speeds, chemical compositions and times. Meanwhile, during the production of CMC, the power and speed, which would be transformed into the torque, power per unit volume, and tip speed value at different time, incurred could be also measured. Then, the curves of D.S. versus torque, power per unit volume and tip speed were developed and used as a criterion for scale-up. It was reported in this investigation that, an optimum chemical compositions and suitable impeller, which enhanced degree of substitution, are 15:1 (ratio of solution to cellulose) and Anchor agitator respectively. Likewise, a variable which will be used for further scale-up the system are torque.

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างยิ่ง ดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์อนุรักษ์ บิตรีกษ์สกุล และดร.ประเสริฐ คุณคำชู ที่ให้คำปรึกษาพร้อมช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์ ที่ช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี ที่อนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ในการเขียนโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบคุณ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ช่วยพิจารณา และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาเอื้อเพื่อเครื่องมือวัดกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาเอื้อเพื่อเครื่องปั่นกวนพร้อมเครื่องควบคุมความเร็ว

ขอขอบคุณ พนักงานทำความสะอาด ที่ดูแลทำความสะอาดห้องปฏิบัติการเคมีมากเป็นพิเศษ

ขอขอบคุณ ทุก ๆ คน ที่เกี่ยวข้อง ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจเสมอ

นายชาติรี จันทร

นายไพโรจน์ ศิริวัฒนโยธิน

4 เมษายน 2537

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
สัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การสำรวจงานวิจัยด้านการขยายขนาดถึงปฏิกิริยาคีมี่ที่ผ่านมา	2
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับ	4
1.4 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การกวน	6
2.1.1 ชนิดของถังกวน	7
2.1.2 ใบพัดกวน	7
2.1.3 ถังมาตรฐาน	14
2.1.4 กำลังที่ใช้ในการกวนสาร	16
2.2 การขยายขนาด	16
2.2.1 ความคล้ายเชิงเรขาคณิต	17
2.2.2 เกณฑ์ในการขยายขนาด	17

บทที่ 3	การดำเนินการวิจัย	19
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2	สารเคมี	20
3.3	การออกแบบและจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐานความจุ 2 ลิตร	21
3.4	การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	21
3.5	การศึกษาผลของการลดอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส	22
3.6	การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี	23
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิจารณ์	24
4.1	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวน	24
4.1.1	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine	24
4.1.2	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนแบบ Anchor	26
4.2	ผลของชนิดใบพัดกวน	27
4.3	ผลของการลดอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลส	28
4.4	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี	31
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	35
5.1	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวน	35
5.1.1	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine	35
5.1.2	ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนแบบ Anchor	35
5.2	ผลของชนิดใบพัดกวน	36
5.3	ผลของการลดอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลส	36
5.4	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี	37
5.5	ข้อเสนอแนะ	37
ภาคผนวก ก		38
ภาคผนวก ข		46
ภาคผนวก ค		47

ภาคผนวก ง	48
ภาคผนวก จ	50
ภาคผนวก ฉ	70
เอกสารอ้างอิง	71
บรรณานุกรม	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของถังมาตรฐาน	15
ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะของการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี	18
ตารางที่ ก.1 แสดงส่วนประกอบของถังขนาดมาตรฐานความจุ 2 และ 10 ลิตร	38
ตารางที่ ก.1 (ต่อ)แสดงส่วนประกอบของถังขนาดมาตรฐานความจุ 2 และ 10 ลิตร ..	39
ตารางที่ จ.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที อัตราส่วน 25:1 ใบพัด FBT	50
ตารางที่ จ.2 แสดงข้อมูลการหากำลัง	51
ตารางที่ จ.3 แสดงค่าที่คำนวณได้	51
ตารางที่ จ.4 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที อัตราส่วน 25:1 ใบพัด FBT	52
ตารางที่ จ.5 แสดงข้อมูลการหากำลัง	53
ตารางที่ จ.6 แสดงค่าที่คำนวณได้	53
ตารางที่ จ.7 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที อัตราส่วน 25:1 ใบพัด FBT	54
ตารางที่ จ.8 แสดงข้อมูลการหากำลัง	55
ตารางที่ จ.9 แสดงค่าที่คำนวณได้	55
ตารางที่ จ.10 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราส่วน 25:1 ใบพัด Anchor	56
ตารางที่ จ.11 แสดงข้อมูลการหากำลัง	57
ตารางที่ จ.12 แสดงค่าที่คำนวณได้	57
ตารางที่ จ.13 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อัตราส่วน 25:1 ใบพัด Anchor	58

ตารางที่ จ.14	แสดงข้อมูลการหากำลัง	59
ตารางที่ จ.15	แสดงค่าที่คำนวณได้	59
ตารางที่ จ.16	แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที	
	อัตราส่วน 25:1 ใบพัด Anchor	60
ตารางที่ จ.17	แสดงข้อมูลการหากำลัง	61
ตารางที่ จ.18	แสดงค่าที่คำนวณได้	61
ตารางที่ จ.19	แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ในอัตราส่วน 20:1	
	ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ใบพัด FBT	62
ตารางที่ จ.20	แสดงข้อมูลการหากำลัง	63
ตารางที่ จ.21	แสดงค่าที่คำนวณได้	63
ตารางที่ จ.22	แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ในอัตราส่วน 15:1	
	ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ใบพัด FBT	64
ตารางที่ จ.23	แสดงข้อมูลการหากำลัง	65
ตารางที่ จ.24	แสดงค่าที่คำนวณได้	65
ตารางที่ จ.25	แสดงข้อมูลแสดงผลของชนิดของใบพัดที่มีต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ CMC	66
ตารางที่ ฉ.1	แสดงข้อมูลในการขยายขนาดถังบดเคมีจาก 2 ลิตร	
	เป็น 10 และ 20 ลิตร โดยมีกำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด	70

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงถังกวนแบบไม่มีคิริบ (unbaffled tank)	9
รูปที่ 2.2 แสดงการไหลในแนว axial-flow และ radial-flow ในถังแบบมีคิริบ ..	10
รูปที่ 2.3 แสดงใบพัดเรือ (marine type impeller)	10
รูปที่ 2.4 แสดงใบพัดแบบ paddle	11
ก. Anchor agitator	
ข. Gate type anchor agitator	
ค. Helical ribbon agitator	
รูปที่ 2.5 แสดงใบพัดแบบ turbine	12
ก. Flat blade turbine	
ข. Hub mounted pitched blade turbine	
ค. Disk mounted curved blade turbine	
ง. Arrowhead turbine	
จ. Hub mounted curved blade turbine	
ฉ. Fan turbine	
รูปที่ 2.6 แสดงใบพัดที่ทำงานเฉพาะอย่าง	13
ก. Modified turbine	
ข. Helical screw	
ค. Saw-tooth edge	
ง. Shrouded curved blade turbine with stator ring	
รูปที่ 2.7 แสดงรูปร่างและส่วนประกอบของถังมาตรฐาน	14
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา	
ใบพัดแบบ FBT โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบพัดก่อน	25

รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา ใบพัดแบบ Anchor โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบพัดกวน	26
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา โดยเปลี่ยนแปลงใบพัดกวน	28
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน	29
รูปที่ 4.5	แสดงการหาปฏิกริยาระหว่างแอลคาไลเซลลูโลสที่อยู่ในวัฏภาคน้ำ กับกรดคลอโรอะซิดที่อยู่ในวัฏภาคอินทรีย์	30
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับความเร็วปลาย	32
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังต่อปริมาตร	33
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังบิด	34
รูปที่ ก.1	แสดงแบบของถังขนาดมาตรฐานความจุ 2 ลิตร	40
รูปที่ ก.2	แสดงแบบของใบพัดชนิด Flat blade turbine	41
รูปที่ ก.3	แสดงแบบของครีบสำหรับใบพัดชนิด Flat blade turbine	42
รูปที่ ก.4	แสดงแบบของใบพัดชนิด Anchor	43
รูปที่ ก.5	แสดงแบบของครีบสำหรับใบพัดชนิด Anchor	44
รูปที่ ก.6	แสดงถึงปฏิกรณ์ เคมิพร้อมครีบและใบพัดชนิด Flat blade turbine	45
รูปที่ ก.7	แสดงถึงปฏิกรณ์ เคมิพร้อมครีบและใบพัดชนิด Anchor	45
รูปที่ ข.1	แสดงลักษณะการตั้งชุดทดลอง	46

สัญลักษณ์

- A : กระแสไฟฟ้า, แอมแปร์
- D : เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด, เมตร
- D_T : เส้นผ่านศูนย์กลางถัง, เมตร
- g : ความเร่งโน้มถ่วง, เมตร/วินาที²
- H_i : ความสูงของใบพัดจากกันถัง, เมตร
- H_l : ความสูงของของเหลว, เมตร
- l : ความกว้างของแผ่นใบพัด, เมตร
- N : ความเร็วรอบของใบพัด, รอบ/วินาที
- N_{Fr} : ตัวเลขฟรูด, ไร้หน่วย
- N_{Po} : ตัวเลขก่าถัง, ไร้หน่วย
- N_Q : ตัวเลขการไหล, ไร้หน่วย
- N_{Re} : ตัวเลขเรโนลด์, ไร้หน่วย
- P : กำลัง, วัตต์
- Q : อัตราการไหล, ลบ.ม./วินาที
- q : ความสูงของแผ่นใบพัด, เมตร
- r : ความยาวของแผ่นใบพัด, เมตร
- s : เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบพัด, เมตร
- V : ปริมาตร, ลูกบาศก์เมตร
- V : แรงเคลื่อนไฟฟ้า, โวลท์
- W_b : ความกว้างของครีป, เมตร
- ρ : ความหนาแน่น, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
- μ : ความหนืด, กิโลกรัม/เมตร-วินาที
- η : บอกลังค่าใช้กับขนาดทดลอง
- τ : บอกลังค่าใช้กับขนาดจริงรวม

บทที่ 1

บทนำ

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส(Carboxymethyl cellulose,CMC) เป็นสารพอลิเมอร์ กึ่งสังเคราะห์ มีชื่อทางการค้าว่า เซลลูโลสกัม หรือโซเดียมเซลลูโลสไกลคอลลेट เป็นวัตถุดิบ ที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สิ่งทอ กระดาษ และเครื่องสำอางค์ เป็นต้น

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เตรียมได้จากปฏิกิริยาเพสทรานเพอร์อะซิเลชัน ระหว่าง เซลลูโลส กับ โซเดียมคลอโรอะซิเตต ซึ่งมีค่าองศาการแทนที่ตามทฤษฎีเท่ากับ 3 แต่ที่ผลิตได้ ในปัจจุบันมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 1.5 เท่านั้น การผลิตในอุตสาหกรรมจะต้องใช้ถังปฏิกรณ์เคมี ขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก และต้องควบคุมพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี ค่าองศาการแทนที่สูงสุด ซึ่งต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตด้วย ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหา ในกระบวนการผลิตจึงต้องมีการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ จากถังปฏิกรณ์เคมีขนาดเล็ก โดยจัดสร้าง ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐานความจุ 2 ลิตร [1] และทำการทดลองหาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดเพื่อให้ค่าองศาการแทนที่สูงสุด

ถังปฏิกรณ์เคมีต้นแบบทดลองที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ถังปฏิกรณ์เคมี แบบกะ (Batch reactor) ถังปฏิกรณ์เคมีแบบท่อทวน (Mixed flow reactor) และ ถังปฏิกรณ์เคมีแบบท่อไหล (Plug flow reactor) ถังปฏิกรณ์เคมีที่เหมาะสมที่สุดในการหา ข้อมูลการทดลอง คือ ถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะซึ่งมีโครงสร้างง่ายสำหรับปฏิกิริยาที่ซับซ้อน โดย อัตราการเกิดปฏิกิริยา และคุณสมบัติของของผสมที่เข้าปฏิกิริยาเปลี่ยนไปกับเวลา มีครีบริบสำหรับการไหลวนอย่างรุนแรง สามารถป้องกันการเกิดวังวนทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการไหลวนของสารจะใช้ใบพัดทวน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Paddle, Propeller และ Turbine โดยเลือกพิจารณาใบพัดทวน 2 ชนิด คือ Anchor (สำหรับ Paddle) และ Flat Blade Turbine (สำหรับ Turbine) ใบพัดทวนเหล่านี้ทำให้ ของเหลวเกิดการไหลวนรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เพิ่มพื้นที่สัมผัสของวัฏภาคทั้งสอง ทำให้การ

ถ่ายเทมวลสารมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และการเพิ่มความเร็วรอบของใบพัดกวนทำให้เกิดการปั่นป่วน ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้น ใบพัดชนิดใดที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ต้องทำการศึกษาไปพร้อม ๆ กับการศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์เคมี

โครงการพิเศษนี้ เกี่ยวข้องกับการเขียนแบบและจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร เป็นถังปฏิกรณ์เคมีต้นแบบทดลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการสังเคราะห์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการขยายขนาด ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดใหญ่ ที่ได้จากการขยายขนาดสามารถผลิต CMC ในระดับอุตสาหกรรม โดยให้ค่าองศาการแทนที่สูงสุด เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์เคมีต้นแบบทดลอง

1.1 การสำรวจงานวิจัยด้านการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ที่ผ่านมา

ค.ศ.1988 : Scale-Up of Two-Impinging-Stream (TIS) Reactors

: Abraham Tamir and Beni Shaimon [2]

: *Department of Chemical Engineering, Ben gurion University of the Negev, Beer Sheva 84 105, Israel*

การวิจัยการขยายขนาดด้านไฮดรอดนามิกส์ ได้แก่ Mean residence time, Hold up, Residence time distribution curve ของอนุภาคสารในถังปฏิกรณ์เคมี ซึ่งมีท่อสำหรับป้อนสาร *Suspension stream* สมมาตรกันจำนวน 2 ท่อ (TIS) งานวิจัยนี้ใช้ถังปฏิกรณ์เคมีแบบ Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) จำนวน 3 ถัง และแบบ Plug flow จำนวน 1 ถัง ทำงานร่วมกัน

ค.ศ.1992 : **Mixing Characteristics of a Micro-Berty Catalytic Reactor**

: Hasan Hannoun and John R. Regalbuto [3]

: *Department of Chemical Engineering, University of Illinois at Chicago, P.O. Box 4348, Chicago, Illinois 60607*

การวิจัยการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี Micro-Berty Catalytic สำหรับปฏิกิริยาแบบ Gas-solid Catalytic พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบของใบพัด กวน ความดัน อัตราการไหล และขนาดอนุภาคของคะตะลิสต์ งานวิจัยนี้เป็นถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรก Bulk gas-phase mixing ความเร็วใบพัดกวนที่เหมาะสม คือ มากกว่า 1,000 รอบ/นาที ความดันสูงกว่า 100 psi สำหรับอนุภาคทุกขนาด ส่วนที่สอง Internal mixing ที่ความเร็วใบพัดกวนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 รอบ/นาที ความดันมากกว่าหรือเท่ากับ 80 psi อัตราการไหลเท่ากับ 8,500 cm³ (STP)/(g of catalyst-h) คะตะลิสต์ที่ใช้ คือ Ni/Al₂O₃ และพบว่าการผสมมีประสิทธิภาพต่ำที่ความดันบรรยากาศ

พ.ศ.2535 : **Scale - Up of Agar Extraction Tank**

(การศึกษาการขยายขนาดของถังสกัดวุ้น)

: นายสมานพันธ์ เทพกาญจนาและ นางสาวกนิษฐา งามพันธ์เวชชะกุล [4]

: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

การวิจัยการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีสกัดวุ้นจากสาหร่ายทะเล Gracilaria spp. โดยพิจารณาตัวแปรสำคัญ 2 ตัว คือความเร็วใบพัดกวน และอัตราส่วนกำลังต่อปริมาตรในการกวน การทดลองทำในถังสกัด 2 ขนาด คือ ขนาด 2 ลิตร และ 50 ลิตรถังสกัดทั้งสองเป็นแบบมีครีป และใช้ใบพัดกวนแบบใบพัดเรือ (Propeller) จากการทดลองในถังสกัดขนาด 2 ลิตร พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดวุ้น คือ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวน 500 รอบ/นาที กำลังต่อปริมาตร 1.3 วัตต์/ลิตร ซึ่งจะให้ % Yield

ประมาณ 35 % และ เมื่อทำการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีสกัดวุ้นจากขนาด 2 ลิตร เป็น 50 ลิตร พบว่าความเร็วบดภายในพัฒนาเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการขยายขนาดถังสกัดแบบ มีความคล้ายเชิงเรขาคณิต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เขียนแบบ และจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร
2. ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี ในการสังเคราะห์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. เพิ่มพูนความรู้ทางการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ ในอุตสาหกรรมหลายประเภท
2. เป็นจุดเริ่มต้นที่ดีของการศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมีในการผลิต CMC เพื่อเป็นประโยชน์ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม
3. เพิ่มพูนทักษะการวางแผน และดำเนินงานเพื่อให้โครงการบรรลุผลตามเป้าหมาย ภายในเวลาที่กำหนดไว้
4. เป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรม และพัฒนางานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในประเทศ

1.4 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ออกแบบ และจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร
2. ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อันได้แก่ ความเร็วรอบใบพัดกวน และชนิดใบพัด คือ Flat blade turbine และ Anchor agitator ณ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส
3. ศึกษาพารามิเตอร์เดี่ยวที่สำคัญในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี คือ ความเร็วปลายของใบพัดกวน (πND), กำลังต่อปริมาตร (P/V) และกำลังบิด (Torque) แบบมีความคล้ายเชิงเรขาคณิต
4. ศึกษาผลของการลดอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลส ที่มีผลต่อค่าองศาการแทนที่ 3 อัตราส่วน คือ 25:1, 20:1 และ 15:1 สำหรับ Flat blade turbine ที่ความเร็วใบพัดกวน 1400 รอบ/นาที อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกวน (agitation)

การกวน เป็นกระบวนการที่ทำให้ของไหลรวมเนื้อเดียวกันหรือทำให้ของแข็งที่แขวนลอยอยู่แตกออกและละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นการเหนี่ยวนำให้สารเกิดการเคลื่อนไหว เช่น การหมุนเป็นวงกลมภายในภาชนะที่บรรจุ

วัตถุประสงค์ของการกวน

(1) เพื่อกระจายกลุ่มอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ให้แตกออกจนเป็นของผสมที่มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) เพื่อทำให้ของเหลวรวมกันเป็นเนื้อเดียว เช่น อัลกอฮอล์กับน้ำ

(3) เพื่อกระจายก๊าซในของเหลว ให้อยู่ในรูปของฟองอากาศเล็ก ๆ

(4) เพื่อกระจายของเหลวชนิดที่สองที่ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับชนิดแรกให้อยู่ในรูปของ suspension หรือ emulsion

(5) ช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น เช่น ระหว่างของเหลวกับขดลวดให้ความร้อน เป็นต้น

ของเหลวส่วนใหญ่จะถูกกวนในถัง (tank) หรือ ภาชนะ (vessel) ที่เป็นทรงกระบอกตั้งอยู่ในแนวตั้ง ส่วนบนอาจเปิดหรือปิดก็ได้ ชนิดของถังส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสภาพของวัสดุที่จะกวน แบบที่ไข่มักจะมีก้านวน เพื่อที่จะกำจัดขอบที่คมหรือส่วนที่ของไหลไม่อาจผ่านไปได้ ระดับความลึกของของเหลวจะประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง ใบพัดกวนจะติดตั้งบนแกนที่ยื่นลงไปกลางถัง โดยใช้แรงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ซึ่งบางครั้งก็ต่อเข้าโดยตรง แต่มีกต่อ

ผ่านทางชุดเกียร์ลดความเร็ว นอกจากนี้ยังมีการต่อท่อสำหรับให้ของเหลวเข้าออก ชุดต่อแลกเปลี่ยนความร้อน ปลอกครอบ (jacket) และรูเจาะ (wells) สำหรับเทอร์มิเตอร์ หรือเครื่องมือวัดอื่น ๆ รวมด้วย

ถึงกวนใช้กันมากในการผสมสาร หรือในลักษณะเครื่องปฏิกรณ์เคมี เพื่อกระบวนการผลิตต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะการสร้างความปั่นป่วนทำได้ง่าย ถึงกวนมาตรฐานแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบไม่มีครีป และมีครีป

2.1.1 ชนิดของถึงกวน

ถึงกวนแบบไม่มีครีป (unbaffled tank)

ใช้ในการกวนที่ความเร็วรอบไม่ต่ำ ๆ การกวนในถังชนิดนี้จะเกิดผิวเว้าลงใบ (free vortex) ในแนวแกนของใบพัด ดังรูปที่ 2.1 ยิ่งความเร็วสูงผิวของของเหลวยิ่งต่ำลงมากใกล้ใบพัด จึงมีขีดจำกัดในการกำหนดความเร็วของใบพัด และใช้เวลาในการผสมมาก

ถึงกวนแบบมีครีป (baffled tank)

ใช้ในการกวนของเหลวที่ต้องการไหลวนอย่างรุนแรง ทั้งในแนวขนานกับแกนหมุน และแนวรัศมี ไม่เกิดผิวเว้า ดังรูปที่ 2.2 ปกติจะมีครีป 4 อัน มีความกว้างเป็น $1/10$ เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ระดับของเหลวในถังจะสูงประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบพัดมีขนาด $1/3$ ของถัง และตั้งห่างจากพื้นถัง $1/3$ ของขนาดถัง

2.1.2 ใบพัดกวน

เป็นตัวสร้างรูปแบบการไหลในระบบ ทำให้ของเหลวไหลวนเวียนรอบภาชนะและไหลเข้าสู่ใบพัด วนเวียนไปมาเช่นนี้

ใบกวนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการทำงาน ดังรูปที่ 2.2 คือชนิดที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ขนานกับแกนหมุน (shaft) เรียกว่าชนิด axial-flow impellers เช่น พวงใบพัดเรือ (marine type impeller) และอีกชนิดหนึ่งที่ทำงานให้กระแสไหลในแนวที่ตั้งฉากกับแกนหรือในแนวรัศมี เรียกว่าชนิด radial-flow impellers เช่น พวงใบพาย (paddles) และพวงเทอร์ไบน์ (turbine)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งใบพัดกวนเป็น 3 แบบใหญ่ ๆ คือ

(1) Propeller เป็นใบพัดกวนที่มีแกนหมุนในแนวตั้ง มีอัตราการไหลในอัตราเร็วสูง ใช้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ มีทั้งชนิดใบพัด 2 ใบ และ 3 ใบ ดังรูปที่ 2.3

(2) Paddle มีใบแบนราบสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดอยู่บนแกนหมุนที่ตั้งในแนวตั้ง โดยทั่วไปใช้ใบพัด 2 หรือ 4 ใบ ติดเป็นมุมฉากออกมา ดังรูปที่ 2.4 ใบพัดชนิดนี้จะหมุนในอัตราเร็วจากช้าถึงปานกลาง ใบพัดกวนแบบนี้ที่ใช้นั้นคือ

Gate type anchor agitator

Anchor agitator

Helical ribbon agitator

(3) Turbine ส่วนใหญ่คล้ายคลึงกับใบพัดกวนแบบ paddle แต่มีใบพัดหลายใบ ที่มีขนาดสั้น ดังรูปที่ 2.5 หมุนด้วยอัตราเร็วสูง ติดอยู่บนแกนที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางถึง ใบพัดชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการใช้กับของเหลวที่มีความหนืดต่าง ๆ กันได้หลายค่า ที่ใช้นั้นมีดังนี้

Flat blade turbine

Disk mounted curved blade turbine

Hub mounted curved blade turbine

Hub mounted pitched blade turbine

Arrowhead turbine

Fan turbine

นอกจากนี้ยังมีใบพัดกวนที่ใช้งานเฉพาะอย่างและไม่อาจจัดอยู่ใน 3 กลุ่มแรก

High shear impellers ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อการตีกระจายให้ของแข็ง
 ฉีกขาด หรือการกระจายของเหลวชนิดหนึ่งให้เป็นหยดละเอียดในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า
 emulsion ดังรูปที่ 2.6 ก,ข ใบพัดพวกนี้คือ

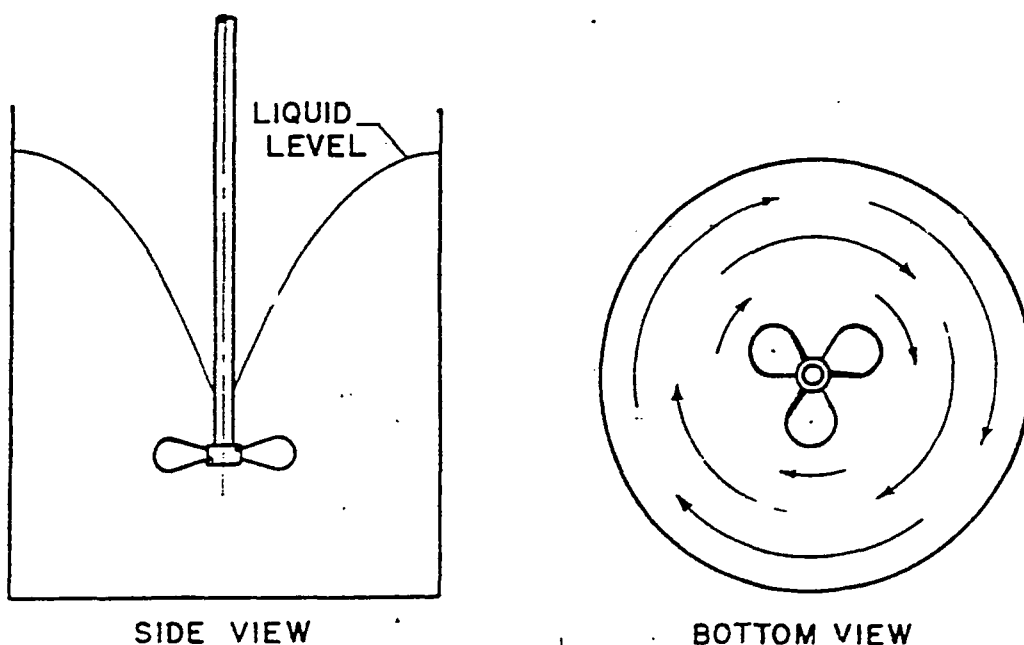
Modified turbine

Saw-tooth edge

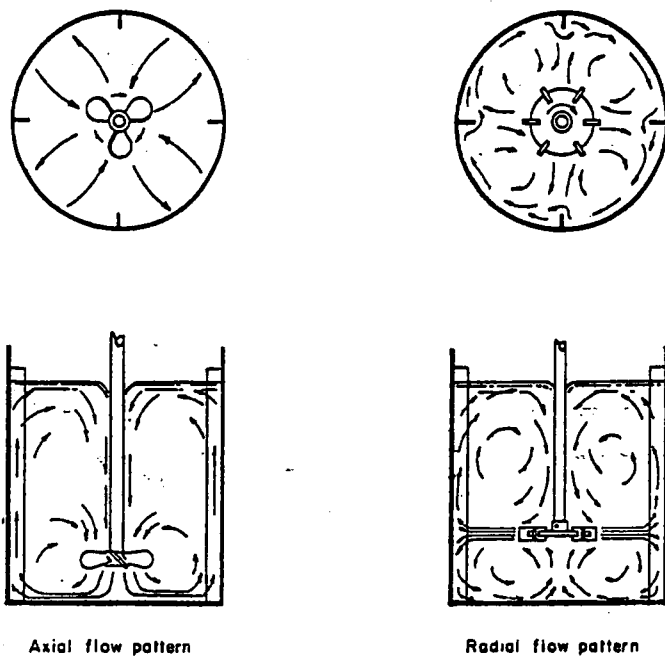
ใบพัดกวนกลุ่มจิปาถะ พวกนี้มีการดัดแปลงจากกลุ่มแรก ๆ และเป็นแบบผสม ดังรูปที่
 2.6 ค,ง ใบพัดพวกนี้คือ

Helical screw

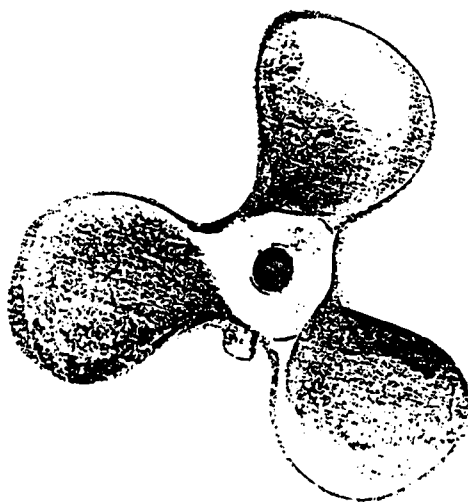
Shrouded curved blade turbine with stator ring



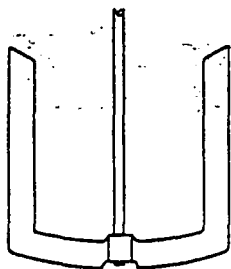
รูปที่ 2.1 ถังกวนแบบไม่มีคิริบ (unbaffled tank)



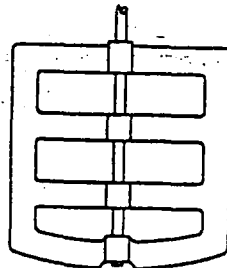
รูปที่ 2.2 การไหลในแนว axial-flow และ radial-flow
ในถังแบบมีคิริบ (baffled tank)



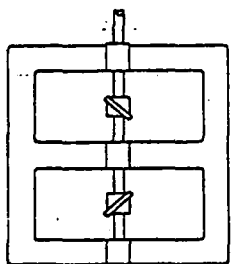
รูปที่ 2.3 ใบพัดเรือ (marine type impeller)



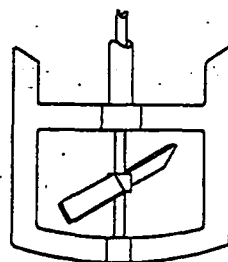
Horseshoe



Horseshoe with cross-members

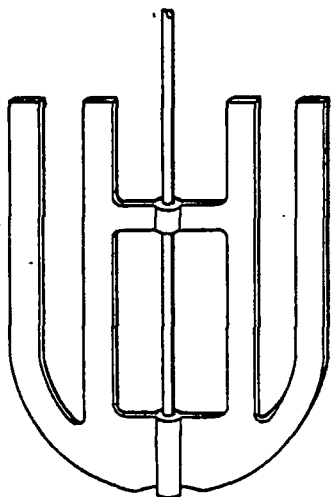


Horseshoe with paddles

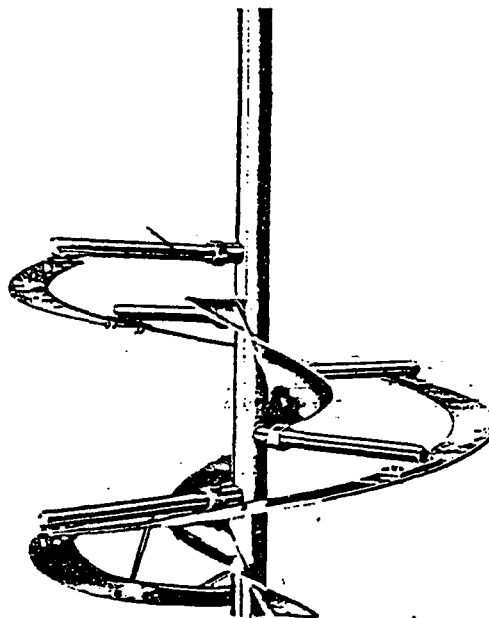


Double motion horseshoe-paddle

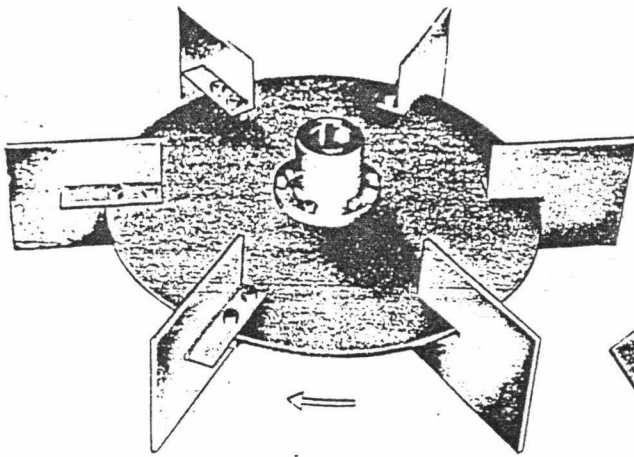
ก. Anchor agitator



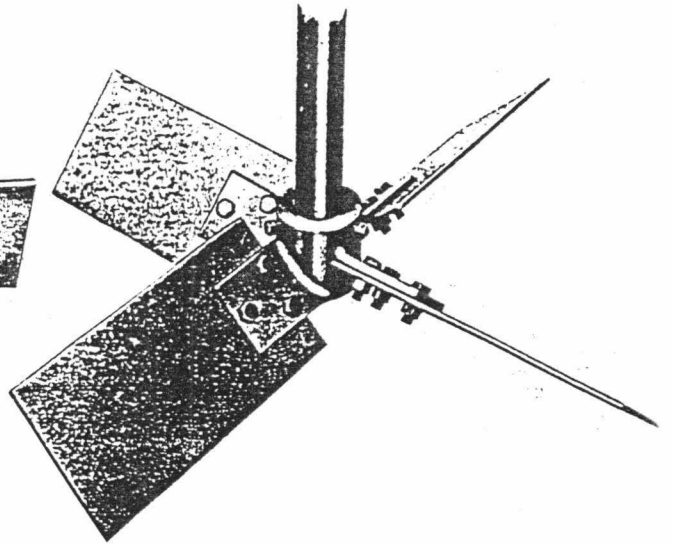
จ. Gate type anchor agitator



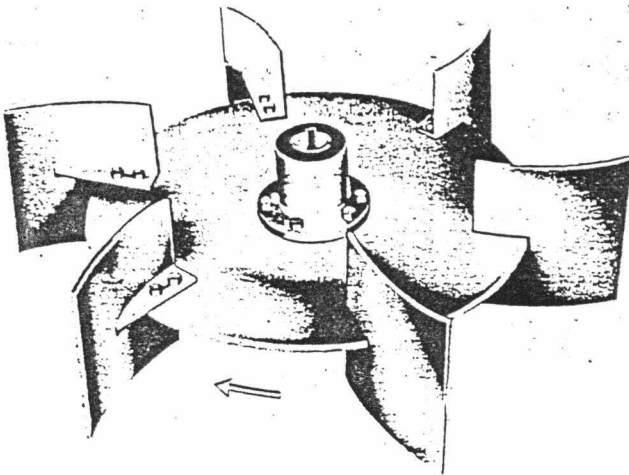
ค. Helical ribbon agitator



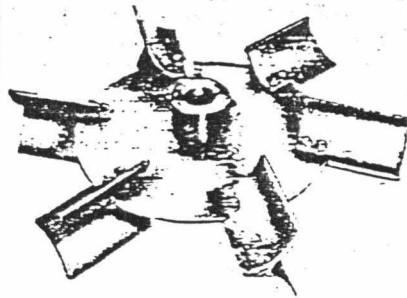
ก. Flat blade turbine



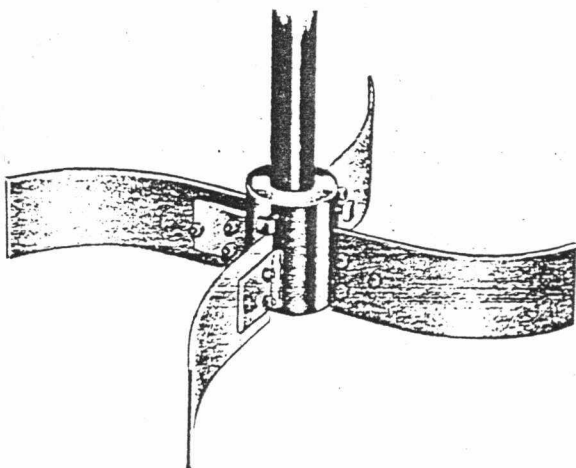
ข. Hub mounted pitched blade turbine



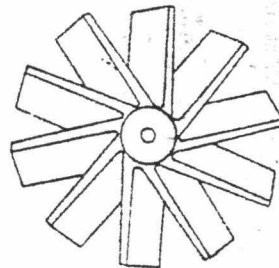
ค. Disk mounted curved blade turbine



ง. Arrowhead turbine

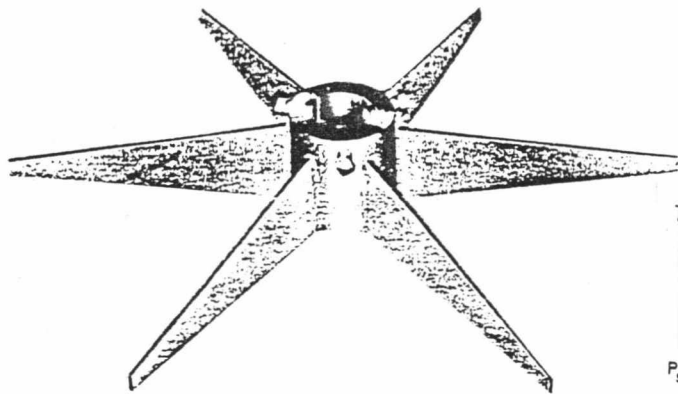


จ. Hub mounted curved blade turbine

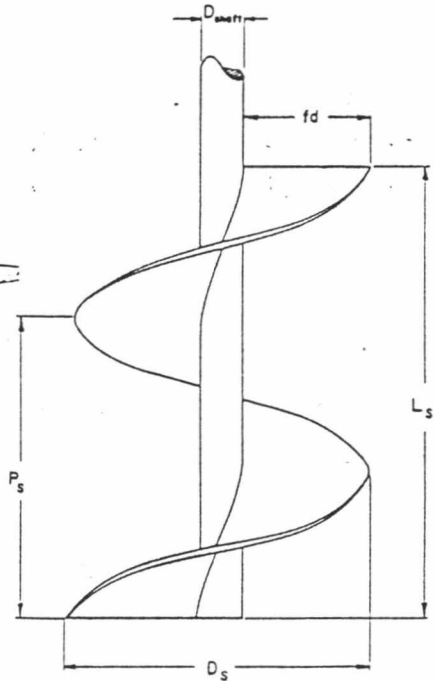


ฉ. Fan turbine

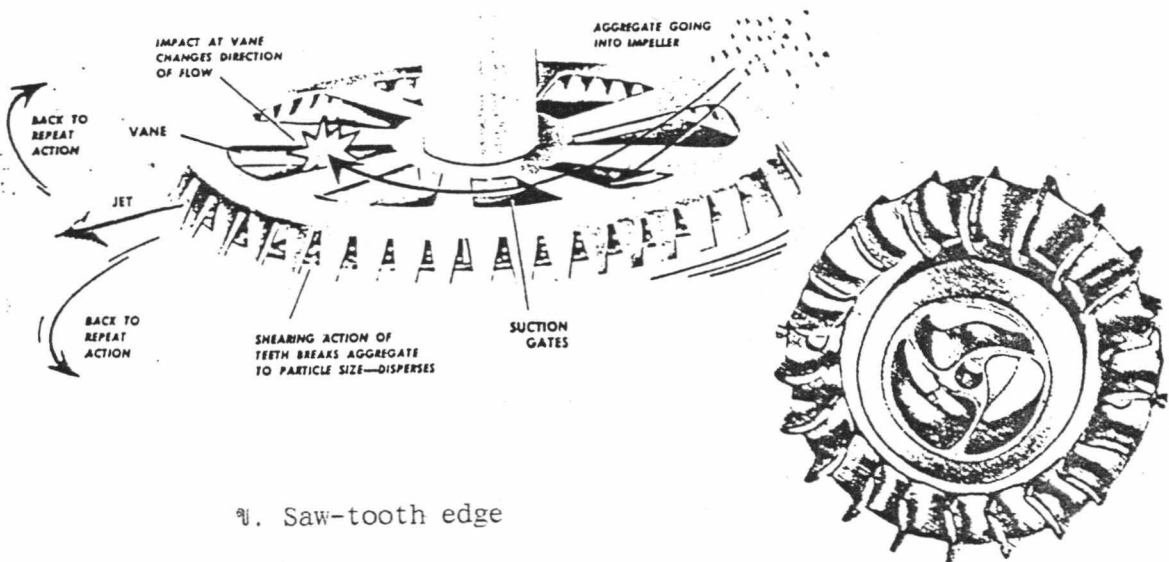
รูปที่ 2.5 ใบพัดแบบ turbine



ก. Modified turbine



ค. Helical screw



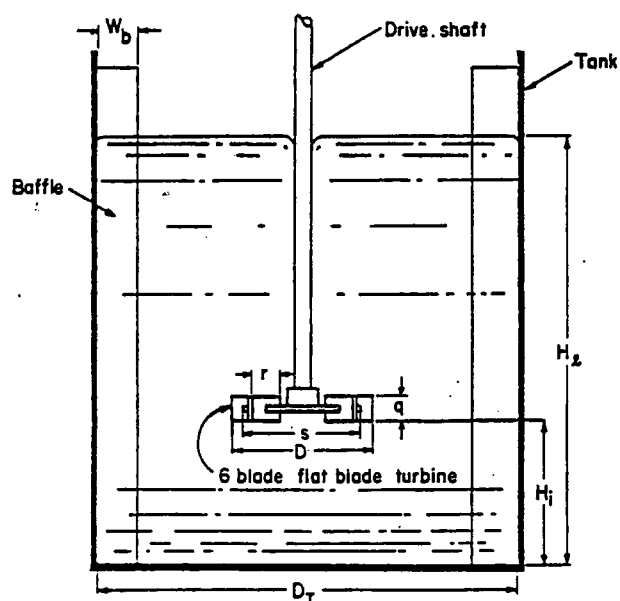
ข. Saw-tooth edge

ง. Shrouded curved blade turbine
with stator ring

2.1.3 ถังมาตรฐาน (Standard Tank Configuration)

ถังมาตรฐานที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปมีรูปร่างและส่วนประกอบดังรูปที่ 2.7

ส่วนตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างส่วนประกอบของถังมาตรฐาน



รูปที่ 2.7 รูปร่างและส่วนประกอบของถังมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของถังมาตรฐาน

ส่วนประกอบต่าง ๆ	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ ทางเรขาคณิต
1. เส้นผ่านศูนย์กลางถัง	D_T	$1.0 D_T$
2. ความสูงของเหลว	H_l	$1.0 D_T$
3. ความกว้างของครีป	W_b	$1/10 D_T$
4. ใบพัดชนิด Flate blade turbine		6 ใบ
5. เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	$1/3 D_T$
6. ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	$1/5 D$
7. ความยาวของแผ่นใบพัด	r	$1/4 D$
8. เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบพัด	s	$3/4 D$
9. ความยาวของแผ่นใบพัดจากจาน		$1/8 D$
10. ความสูงของใบพัดจากก้นถัง	H_i	$1.0 D$
11. จำนวนครีป		4 อัน
12. ใบพัดชนิด Anchor agitator		2 ใบ
13. เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	$\sim 0.94 D_T$
14. ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	$1/10 D$
15. ความสูงของแผ่นใบพัด	l	$\sim 1.0 D$
16. ความสูงของใบพัดจากก้นถัง		$(0.01-0.05) D$
17. ความห่างของครีปจากใบพัด		$(0.01-0.05) D$
18. จำนวนครีป		2 อัน

2.1.4 กำลังที่ใช้ในการกวนสาร (power consumption)

กำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อนใบพัด, P คำนวณได้จากสมการ

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

ซึ่งเรียกว่า power number เป็นตัวเลขไร้หน่วย

การคำนวณกำลังที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนใบพัด ต้องพิจารณาถึงชนิดของถังกวนว่าเป็นแบบมีคิริบ หรือไม่มีคิริบ และรู้จักตัวแปรไร้หน่วยที่สำคัญในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{Reynolds number, } N_{Re} = \rho N D^2 / \mu \quad \text{-----(2.2)}$$

เป็นค่าที่แสดงความรุนแรงในการกวนสาร

$$\text{Froude number, } N_{Fr} = N^2 D / g \quad \text{-----(2.3)}$$

เป็นค่าที่แสดงผลของการเกิดวังวน ใช้เฉพาะในถังที่ไม่มีคิริบ

$$\text{Flow number, } N_Q = Q / N D^3 \quad \text{-----(2.4)}$$

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

2.2 การขยายขนาด (scale up)

ในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี เพื่อให้มีการผสมสารได้ในเวลาที่เท่ากันกับขนาดเล็กนั้นมีปัญหาคือ อัตราการสูบลำไหลเวียนต่อหน่วยปริมาตรจะไม่เท่ากันเมื่อให้ขนาดของใบพัดกับขนาดถังมีสัดส่วนเดียวกัน แล้วใช้พลังงานกวนต่อปริมาตรเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้พลังงานต่อปริมาตรมากขึ้น หรือใช้เวลาผสมนานขึ้น

การออกแบบในการขยายขนาด เพื่อให้การทำงานได้ผลดีที่สุดสำหรับถังปฏิกรณ์เคมีขนาดโรงงาน (prototype, p) จะต้องใช้ข้อมูลจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาดทดลอง (model, m) มาช่วยพิจารณาด้วย โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดทดลองกับขนาดโรงงาน

2.2.1 ความคล้ายเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดโรงงานจะมีขนาดใหญ่กว่า แต่มีรูปร่างเหมือนกับถังปฏิกรณ์เคมีขนาดทดลองทุกประการ ซึ่งจะใช้ค่าตัวเลขไร้มิติเท่ากัน คือ

$$\begin{aligned} (N_{Re})_p &= (N_{Re})_m \\ \text{หรือ } (N_{Po})_p &= (N_{Po})_m \\ \text{หรือ } (N_{Fr})_p &= (N_{Fr})_m \end{aligned} \quad \text{-----}(2.5)$$

2.2.2 เกณฑ์ในการขยายขนาด (Criteria of Scale Up)

เมื่อพิจารณาใช้ N_{Po} จากสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$(P/\rho N^3 D^5)_p = (P/\rho N^3 D^5)_m \quad \text{-----}(2.6)$$

ถ้าเป็นของเหลวชนิดเดียวกัน

$$P_p = P_m (N_p/N_m)^3 (D_p/D_m)^5 \quad \text{-----}(2.7)$$

หรือ

$$(P/D^3)_p = (P/D^3)_m (N_p/N_m)^3 (D_p/D_m)^2 \quad \text{-----}(2.8)$$

เมื่อพลังงานต่อปริมาตร (P/D^3) คงที่ ซึ่งเรียกว่าเกณฑ์ในการขยายขนาด จะได้

$$(N_p/N_m)^3 = (D_m/D_p)^2 \quad \text{-----}(2.9)$$

ให้ขยายขนาดขึ้นมีปริมาตรเป็น 125 เท่า จะได้

$$N_p = (D_m/D_p)^{2/3} N_m = 0.34 N_m \quad \text{-----}(2.10)$$

$$(N_{Re})_p = 8.5 (N_{Re})_m \quad \text{-----}(2.11)$$

$$(ND)_p = 1.7 (ND)_m \quad \text{-----}(2.12)$$

ดังตารางที่ 2.2 เป็นการขยายขนาดจากถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 0.019 ลบ.ม. เป็น

2.37 ลบ.ม. โดยมี P/V , P/N , ND และ N_{Re} เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์เคมี

ค่าต่าง ๆ	ขนาดทดลอง (0.019 ลบ.ม.)			ขนาดโรงงาน (2.37 ลบ.ม.)		
P	1.0	125	0.018	25	0.2	
P/V	1.0	<u>1.0</u>	0.00014	0.2	0.0016	
N	1.0	0.34	0.018	0.2	0.04	
P/N	1.0	367.65	<u>1.0</u>	125	5.0	
D	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
ND	1.0	1.7	0.09	<u>1.0</u>	0.2	
$\rho ND^2/\mu$	1.0	8.5	0.45	5.0	<u>1.0</u>	

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน ดังนี้

1. การเขียนแบบและจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร
2. การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ CMC ใต้แก่ ชนิดของใบพัดกวน และความเร็วรอบในการกวน
3. การศึกษาผลของการลดอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์ลูโลส ที่มีผลต่อค่าองศาการแทนที่
4. การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี ใต้แก่ ความเร็วปลายใบพัด กำลังต่อปริมาตร และกำลังบิด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน (standard reactor) ความจุ 2 ลิตร สร้างจากสแตนเลส สตีล
2. ใบพัดกวน Flat blade turbine และ Anchor agitator
3. อ่างน้ำร้อน (water bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 100 องศาเซลเซียส
4. เครื่องกวนเชิงกลกระแสดตรง (mechanical stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมความเร็ว
5. เครื่องวัดกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า (amp. meter, volt meter)
6. แผ่นให้ความร้อน (hot plate) ที่ให้ความร้อนได้ถึง 300 องศาเซลเซียส

7. ชุดกรองสารสูญญากาศและกระดาษกรอง เบอร์ 40 และ 42
8. เทอร์มิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 0-100 องศาเซลเซียส
9. เครื่องดูดความชื้น (desiccator)
10. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 และ 105 องศาเซลเซียส
11. เครื่องทำน้ำเย็น (cooling aid)
12. เครื่องกลั่น (condenser)
13. กระดาษลิทมัส

3.2 สารเคมี

1. กรดคลอโรอะซิติก (ClCH_2COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
2. กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท คาร์เลอร์บา
3. กรดอะซิติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
5. เงินไนเตรต (AgNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค
6. เซลลูโลสจากต้นสน (Cellulose from spruce) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
8. ไดเฟนิลามีน (C_6H_5)₂NH เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
9. เตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ($(\text{CH}_3)_4\text{N}^+\text{Cl}^-$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท ฟลูกา
10. เมทานอล 80 % (CH_3OH) เกรดการค้า กลั่นก่อนใช้
11. เมทานอลปราศจากน้ำ (Abs. CH_3OH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
12. เอทานอล 80 % และ 95 % ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดการค้า บริษัท คาร์เลอร์บา
13. ไอโซโพรพานอล ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมย์แอนด์เบเกอร์
14. น้ำกลั่น (Distilled water)

3.3 การเขียนแบบและจัดสร้างถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 ลิตร

ทำการเขียนแบบถังปฏิกรณ์เคมีพร้อมด้วยใบพัดกวน 2 ชนิด คือ Anchor agitator และ Flat blade turbine โดยมีสัดส่วนและส่วนประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1 และจัดสร้างด้วยสแตนเลส สตีล ตามแบบในภาคผนวก ก เพื่อให้เป็นดังต้นแบบในการศึกษาการสังเคราะห์ CMC ต่อไป

3.4 การศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ CMC

ศึกษาพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ CMC ได้แก่ ชนิดของใบพัดกวน และความเร็วรอบในการกวน

3.4.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพสทรานส์เฟอร์

ชั่งเซลลูโลส (72.00 กรัม) เตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.86 กรัม, 0.008 โมล) ตวงไฮดรอกซิพรพานอล (1400 มล.) ลงในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ตั้งเครื่องมือในอ่างควบคุมอุณหภูมิ กวนของผสมด้วยเครื่องกวนเชิงกล โดยใช้ใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine ด้วยความเร็ว 400 รอบ/นาที หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 36 % (180 มล., 0.970 โมล) จากกรวยแยกจนหมดเป็นเวลา 15 นาที กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเริ่มให้ความร้อน รอจนอุณหภูมิของผสมถึง 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที หยดสารละลายกรดคลอโรอะซิติก (ซึ่งเตรียมโดยชั่งกรดคลอโรอะซิติก 73.48 กรัม (0.842โมล) ละลายในไฮดรอกซิพรพานอล 220 มล.) ลงในสารละลายทันที เก็บตัวอย่างของผสม โดยใช้ปิเปตตูดครั้งละ 50 มล. ที่เวลา 10, 30, 60, 120, และ 210 นาที ตามลำดับ (ในแต่ละครั้งที่เก็บตัวอย่าง ให้ใช้แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ วัดค่ากระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกวนเชิงกล เพื่อนำไปคำนวณหากำลัง) ทำให้ของผสมอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียสทันที โดยผ่านเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำของผสม

มาปรับความเป็นกรด-ด่าง ให้เป็นกลางด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส โดยไม่เปลี่ยนสีจากแดงเป็นน้ำเงิน กรองของผสมผ่านกระดาษกรองโดยเครื่องกรองสุญญากาศ เพื่อแยกไอโซพรพานอลออก จะได้ CMC นำไปทำให้บริสุทธิ์เพื่อหาค่าองศาการแทนที่ต่อไป ทว่าการทดลองกะต่อไปด้วยความเร็วรอบใบพัดดังนี้ 900 และ 1400 รอบ/นาที ตามลำดับ

ทว่าการทดลองซ้ำทั้งหมด โดยเปลี่ยนใบพัดควนเป็นแบบ Anchor agitator แต่ใช้ความเร็วรอบใบพัด 100, 200 และ 300 รอบ/นาที ตามลำดับ

3.4.2 ขั้นตอนการทำให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสบริสุทธิ์

นำ CMC ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาทำให้บริสุทธิ์ โดยการมากรองเพื่อล้าง CMC ให้หมดเกลือคลอไรด์ด้วยเมทานอล 80 % ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (30 มล.) ล้าง 4 ครั้ง ทดสอบโดยนำเมทานอลที่ล้าง 5 หยดสุดท้ายจากกรวยกรอง มาหยดสารละลายเงินในเตรต 2-3 หยด สารละลายไม่มีตะกอนขาว ล้างอีกครั้งด้วยเมทานอลที่ปราศจากน้ำ (30 มล.) ดูดให้แห้ง ถ่ายสารลงบนกระดาษฟิวส์ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น CMC ที่ได้มีสีขาวละลายน้ำได้ดี

3.4.3 หาค่าองศาการแทนที่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ดังแสดงในภาคผนวก ง.

3.5 การศึกษาผลของการลดอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลสที่มีต่อค่าองศาการแทนที่

สังเคราะห์ CMC โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลสจากเดิม 25:1 เป็น 20:1 และ 15:1 ทั้งนี้โดยให้มีน้ำอยู่ในระบบเพียง 10 % ของปริมาตรสารละลายรวม ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเพื่อให้ปริมาตรของเหลวในการทำปฏิกิริยาทั้งหมดคงที่ ปริมาณของของแข็งทุก ๆ ตัวจึงเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลสลดลง ดังนี้

อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์โกลส 20:1

เซลล์โกลส 90.00 กรัม

เตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 1.08 กรัม (0.009 โมล)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 45 % (2.025 โมล)

กรดคลอโรอะซิติก 91.85 กรัม (0.970 โมล)

อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์โกลส 15:1

เซลล์โกลส 120.00 กรัม

เตตระเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ 1.44 กรัม (0.013 โมล)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 60 % (2.700 โมล)

กรดคลอโรอะซิติก 122.47 กรัม (1.290 โมล)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ในพัดกวนแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที

3.6 การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีสำหรับสังเคราะห์ CMC

พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ กำลังต่อปริมาตร (P/V) ความเร็วปลายของใบพัดกวน (Tip speed) และ กำลังบิด (Torque)

นำข้อมูลจากการทดลอง 3.4 เลือกใบพัดกวนชนิดที่สังเคราะห์ CMC แล้วให้ค่าองศาการแทนที่สูงกว่า ระหว่างแบบ Flat blade turbine และ Anchor agitator ที่ความเร็วรอบระดับกำลังเท่ากัน อัตราส่วนของสารละลายต่อเซลล์โกลสเดียวกัน

สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่ ที่เวลาต่าง ๆ กับกำลังต่อปริมาตร ความเร็วปลายของใบพัดกวน และกำลังบิดของใบพัดชนิดที่เหมาะสม วิเคราะห์และเปรียบเทียบกราฟทั้งสามแบบ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่จะใช้ในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมี

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาบทบาทของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์เคมี ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพสทรานเฟอร์ ที่ประกอบด้วยการศึกษาความเร็วรอบของใบพัดกวน และชนิดของใบพัด รวมทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลส โดยมีข้อมูลการทดลองอยู่ในภาคผนวก จ.)

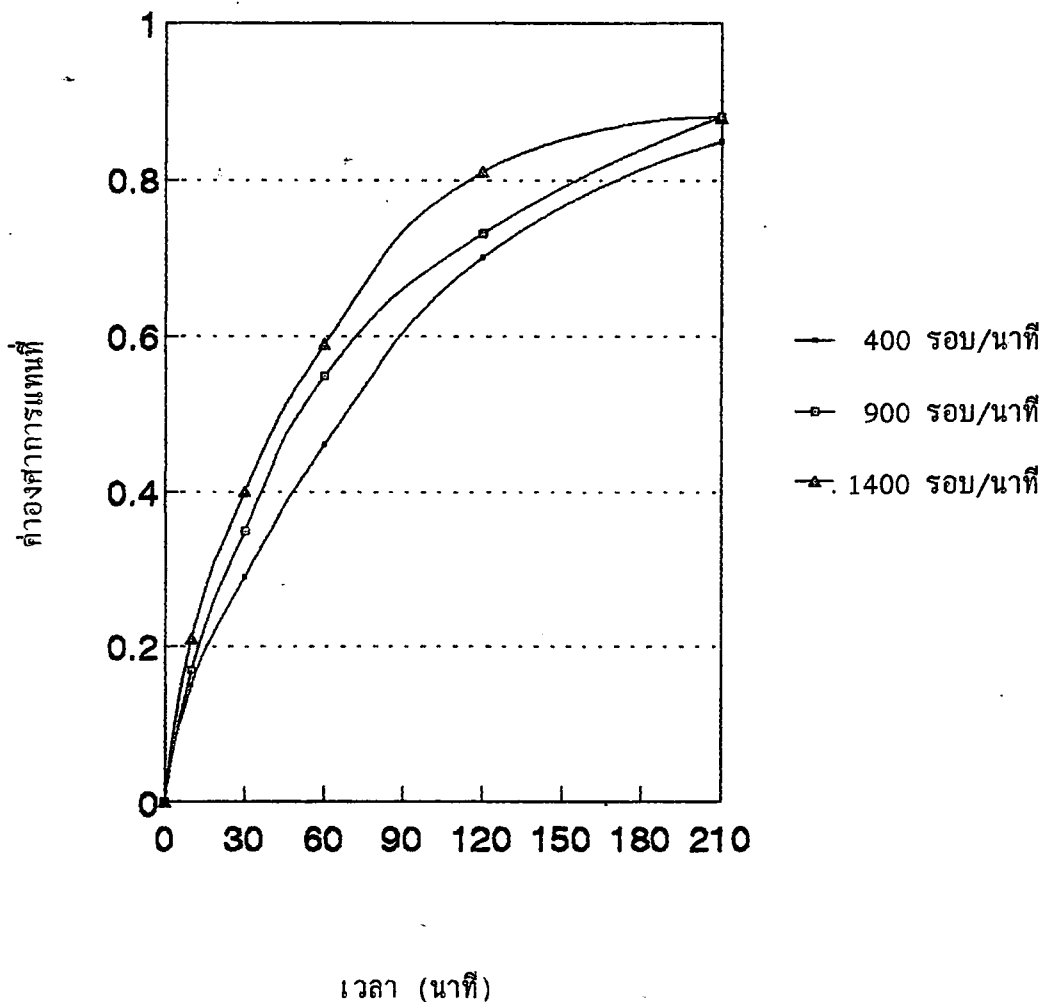
4.1 ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวน

4.1.1 ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine

ในการทดลองหาโดยใช้ความเร็วรอบของใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine ต่าง ๆ กัน คือ 400, 900 และ 1400 รอบต่อนาที ด้วยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส 25:1 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของใบพัดกวนทำให้ค่าองศาการแทนที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่า ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้อัตราส่วน 25:1 ใช้ TMAC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ใบพัดชนิด FBT บันกวนที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที TMAC จะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลคาไลเซลลูโลส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $(Cell-O^-N^+(CH_3)_4)$ ซึ่งสารประกอบนั้นสามารถละลายเข้าไปในชั้นอินทรีย์ และทำปฏิกิริยากับกรดคลอโรอะซิติกเกิดเป็น CMC ขึ้น ในการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเริ่มเกิดที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลสก่อน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสิ้นสุดลงก็จะเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อแอลคาไลเซลลูโลสต่อไป

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็น 900 รอบต่อนาที ทำให้การสัมผัสกันของวัสดุภาคทั้งสอง ดีขึ้น มีการถ่ายเทมวลสารมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลส ทำให้ค่าองศาการแทนที่สูงขึ้น สำหรับที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ก็มีลักษณะเหมือนกับที่ความเร็วอื่น โดยจะให้ค่าองศาการแทนที่สูงสุด



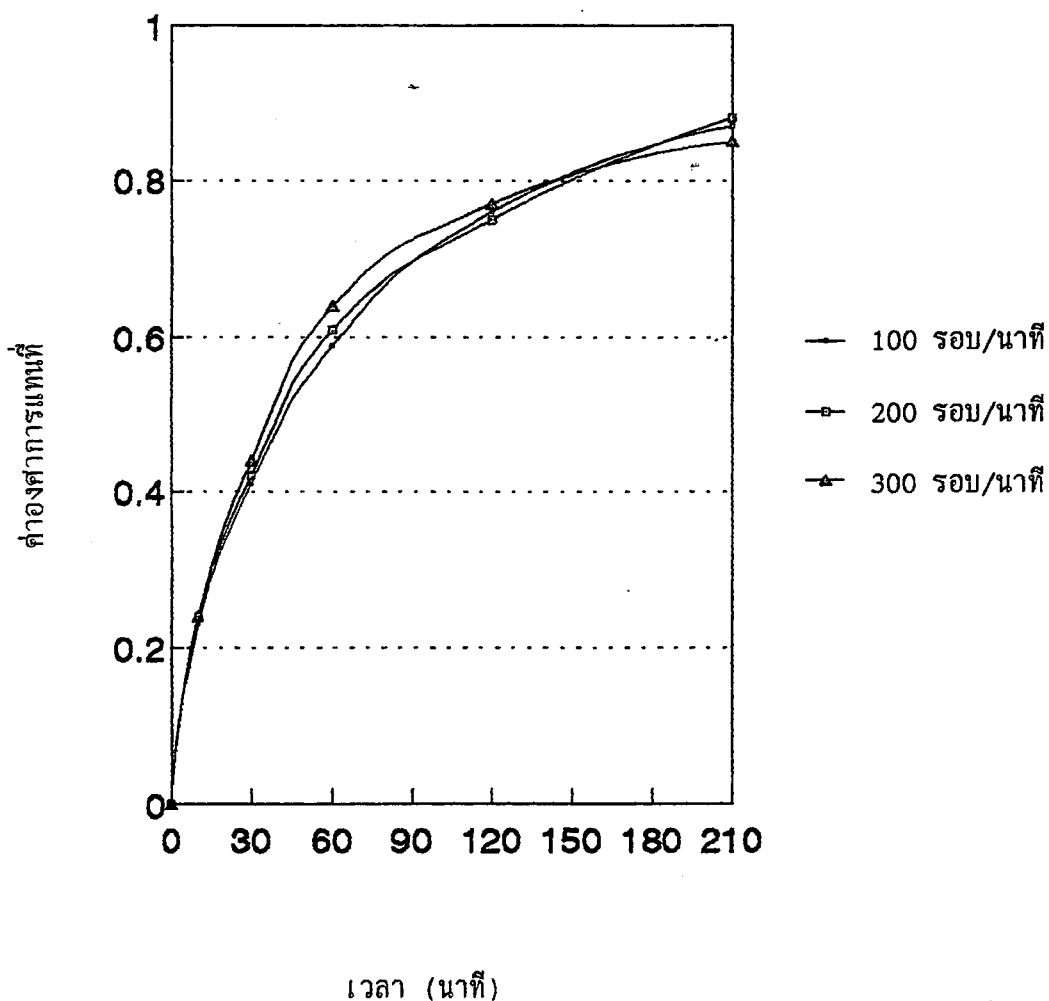
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใบพัดแบบ FBT อัตราส่วน 25:1

โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบพัดกวน

4.1.2 ผลของความเร็วรอบของใบพัดกวนแบบ Anchor

ในการทดลองทำโดยใช้ความเร็วรอบของใบพัดต่าง ๆ กัน คือ 100, 200 และ 300 รอบต่อนาที ด้วยอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์ูโลส 25:1 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใบพัดแบบ Anchor อัตราส่วน 25:1

โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบพัดกวน

ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าองศาการแทนที่ กับ เวลา พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของใบพัดกวนไม่มีผลต่อค่าองศาการแทนที่ ที่เป็นเช่นนี้ สันนิษฐานว่า ใบพัดกวนแบบ Anchor ให้การปั่นกวนที่รุนแรง การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นได้ดี เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลสอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบขึ้นจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว

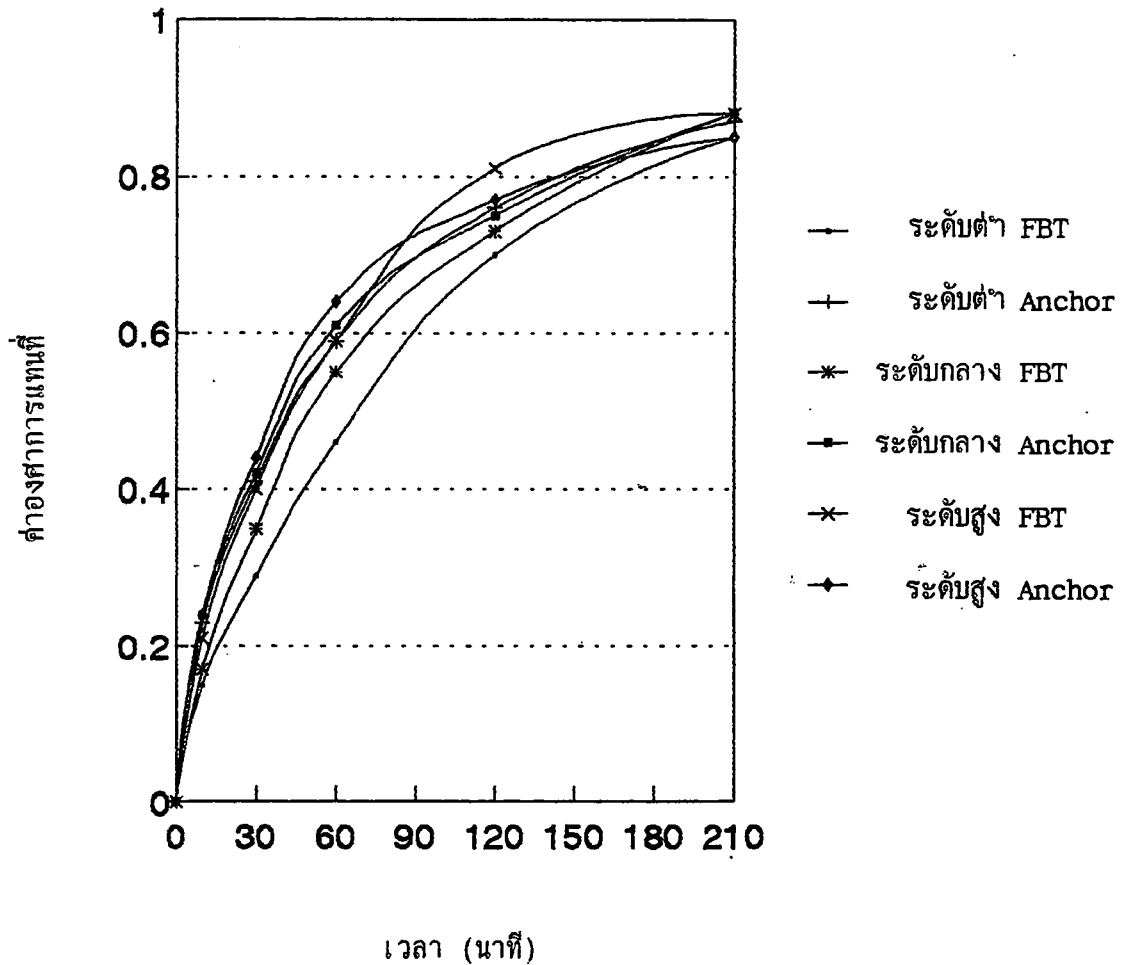
4.2 ผลของชนิดใบพัดกวน

ในการทดลองทำโดยใช้ใบพัดกวนแบบ FBT และ Anchor ที่ความเร็วยรอบ 3 ระดับ โดยแต่ละระดับจะใช้กำลัง ($P=IV$) เท่ากัน โดยการควบคุมกระแส (I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่มอเตอร์ใช้ด้วยแอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ตามลำดับ

ระดับต่ำ	Anchor 100 รอบต่อนาที	ใช้กำลังเท่ากับ FBT 400 รอบต่อนาที
ระดับกลาง	Anchor 200 รอบต่อนาที	ใช้กำลังเท่ากับ FBT 900 รอบต่อนาที
ระดับสูง	Anchor 300 รอบต่อนาที	ใช้กำลังเท่ากับ FBT 1400 รอบต่อนาที

ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าองศาการแทนที่ กับ เวลา พบว่าที่ระดับความเร็วต่ำใบพัดกวนแบบ Anchor ให้ค่าองศาการแทนที่สูงกว่าอันเนื่องมาจากมีการปั่นป่วนที่รุนแรงกว่า

ที่ระดับความเร็วปานกลาง และที่ระดับสูงก็เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา

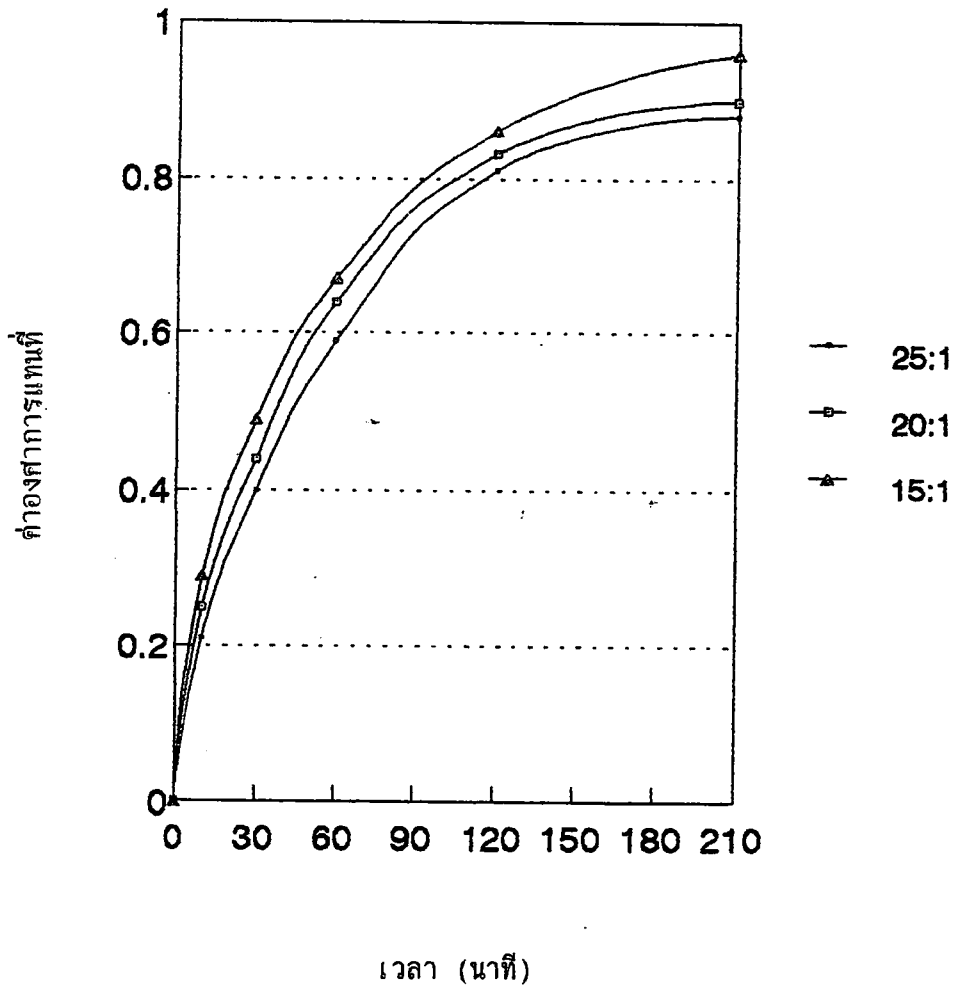
ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 25:1

โดยเปลี่ยนแปลงใบพัดกวน

4.3 ผลของการลดอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์โกลส

ในการทดลองหาโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์โกลสต่าง ๆ กัน คือ

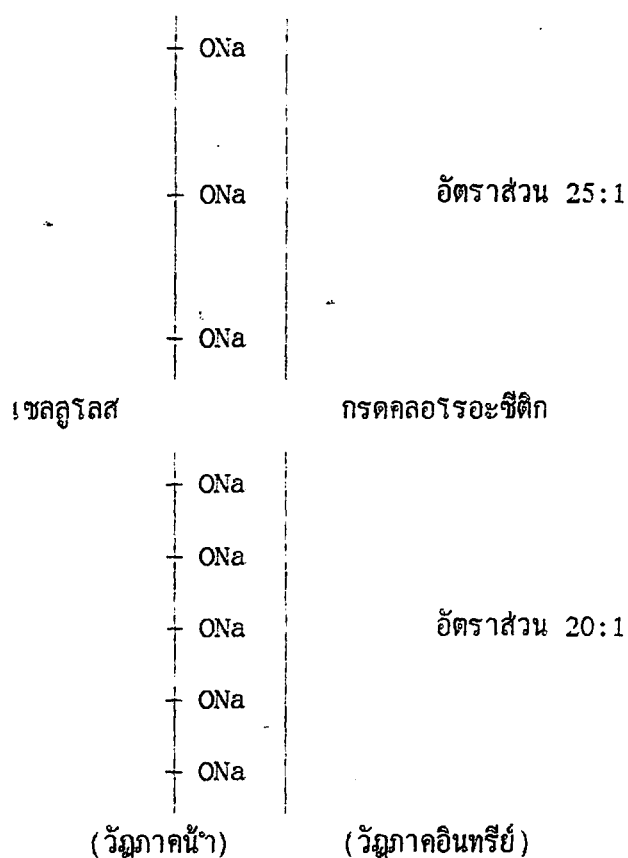
25:1, 20:1 และ 15:1 โดยใช้อุปกรณ์แบบ FBT ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับเวลา
ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่าองศาการแทนที่ กับ เวลา พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลล์รูโลสเป็น 20:1 ปริมาตรของสารละลายรวมในระบบ และปริมาณน้ำที่ล้อมรอบอัลคาไลเซลล์รูโลสมีค่าเท่าเดิม โดยที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดคลอโรอะซิติกมากขึ้น ดังนั้นอัตราการแพร่ของกรดคลอโรอะซิติกจากชั้นอินทรีย์เข้าสู่ชั้นน้ำจึงมีค่าสูงกว่าอัตราส่วน 25:1 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จึงสันนิษฐานว่า

กรดคลอโรอะซิติกที่แพร่เข้ามาในทันปฏิริยาที่ผิวของแอลคาไลเซลลูโลส จากนั้นจึงเกิดการแพร่
 เข้าไปในเนื้อของแอลคาไลเซลลูโลส เป็นผลทำให้ค่าองศาการแทนที่มีค่าสูงกว่าอัตราส่วน 25:1
 สำหรับอัตราส่วน 15:1 ก็มีลักษณะเหมือนกับอัตราส่วนอื่น



รูปที่ 4.5 แสดงการทันปฏิริยาระหว่างแอลคาไลเซลลูโลสที่อยู่ในวัฏภาคน้ำ

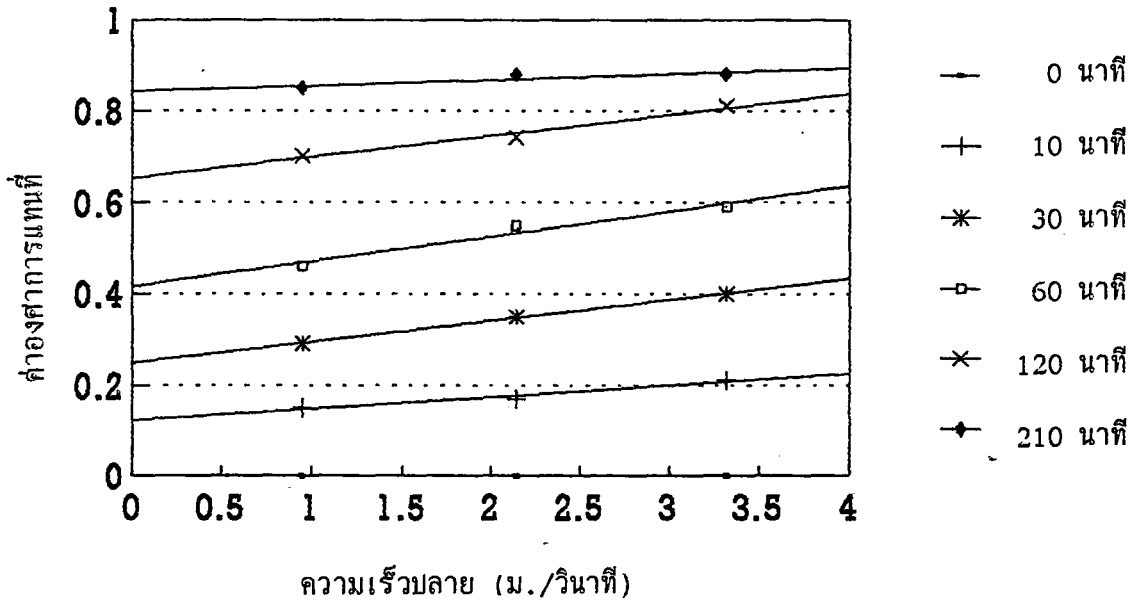
กับกรดคลอโรอะซิติกที่อยู่ในวัฏภาคอินทรีย์

ที่อัตราส่วนสารละลายต่อเซลลูโลสลดลง

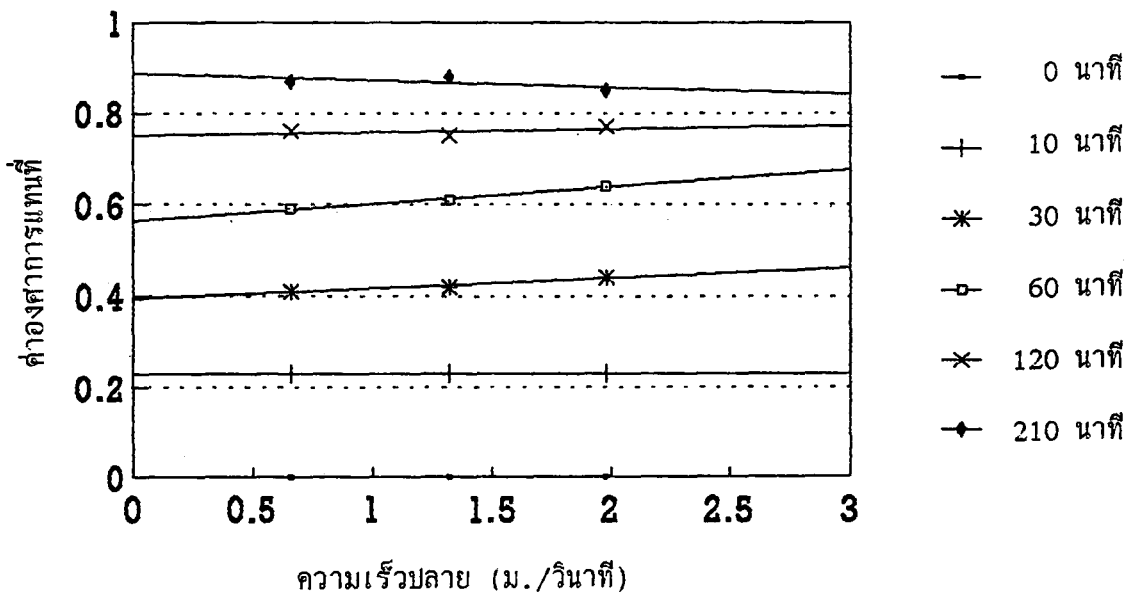
4.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายขนาดถึงปฏิกิริยาคีเมรี

ทำการเปรียบเทียบกำลังต่อปริมาตร ความเร็วปลายของใบพัด และค่ากำลังบิดของใบพัดทั้ง 2 ชนิด โดยการควบคุมสภาวะให้เหมือนกัน คือ ใบพัดแบบ FBT ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ในอัตราส่วน 25:1 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใบพัดแบบ Anchor ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ในอัตราส่วน 25:1 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

เพื่อให้ได้ค่าองศาการแทนที่ค่าเดียวกันที่เวลาเดียวกัน ทั้งนี้โดยต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของต้นทุนในการผลิต พบว่าความถี่ขนาดใหญ่ของใบพัดแบบ Anchor สามารถที่จะให้การปั่นกววนอย่างรุนแรงมาก ซึ่งไม่ต้องใช้ความเร็วปลายของใบพัดและกำลังต่อปริมาตรสูงเท่ากับใบพัดแบบ FBT แต่ก็สามารถให้กำลังบิดที่มากกว่าได้ ดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อความเร็วปลายเพิ่มขึ้นจากเดิมหนึ่งเท่า ปรากฏว่ากำลังต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งเท่า ในขณะที่กำลังบิดเพิ่มขึ้นน้อยกว่าหนึ่งเท่า นั้นหมายถึงว่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังบิดเพียงเล็กน้อย จะมีผลทำให้พารามิเตอร์อื่นเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้กำลังบิดเป็นพารามิเตอร์เดียวในการขยายขนาดถึงปฏิกิริยาคีเมรี ในการสังเคราะห์ CMC โดยจะใช้ใบพัดแบบ Anchor ซึ่งจะนำมาใช้พิจารณาและควบคุมให้คงที่ในการขยายขนาดในลำดับต่อไป



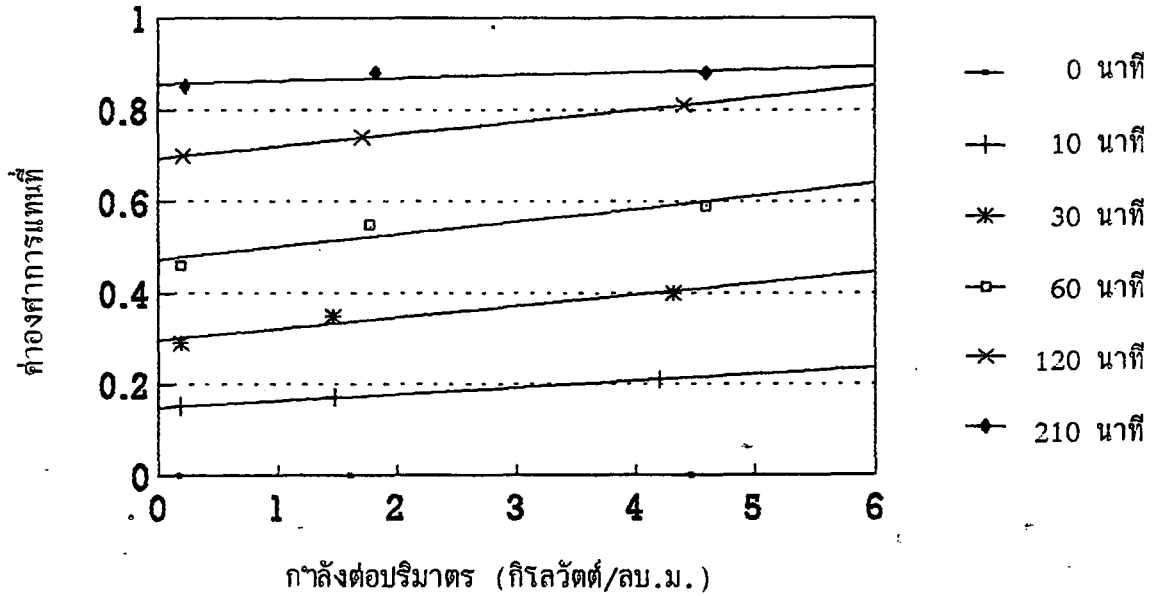
ใบพัดกวนแบบ FBT ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที



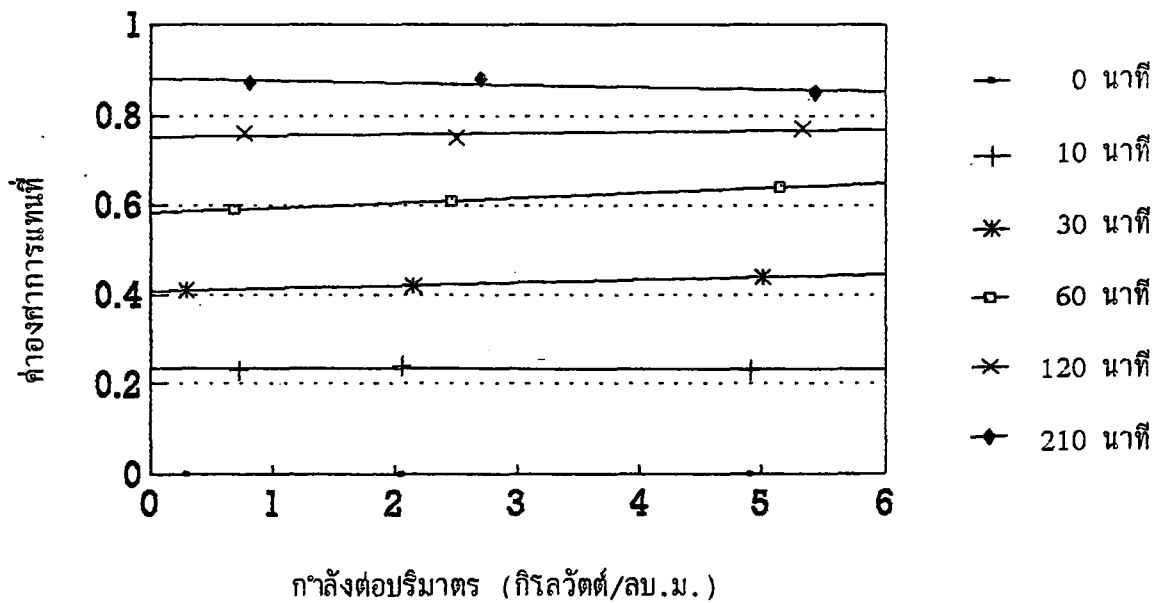
ใบพัดกวนแบบ Anchor ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับความเร็วปลาย

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 25:1 ณ. เวลาต่าง ๆ



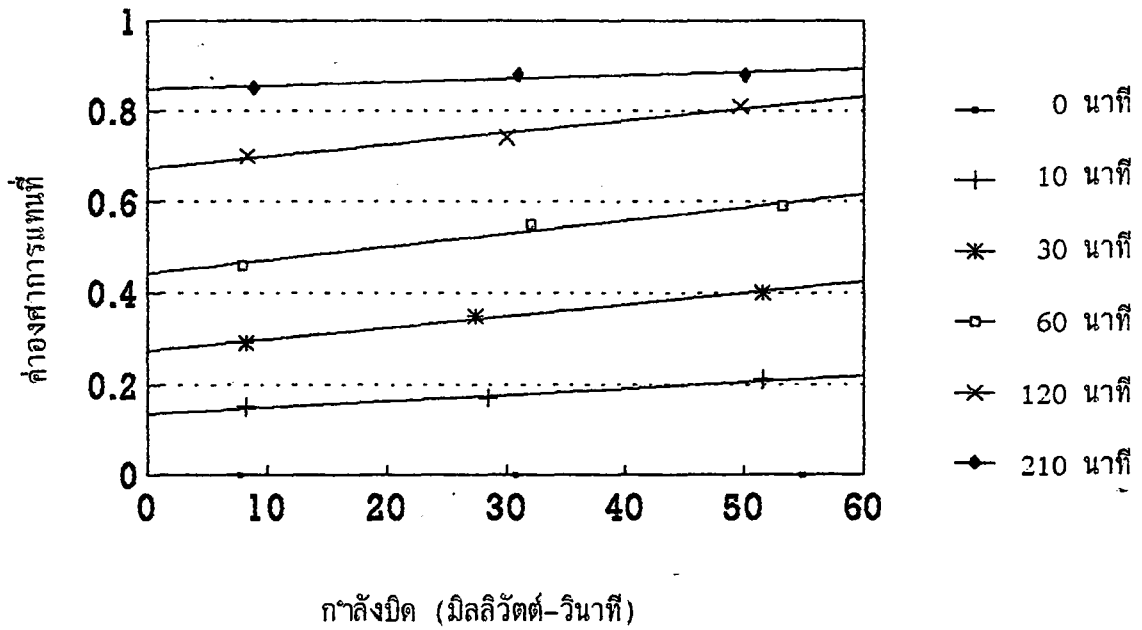
ใบพัดกวนแบบ FBT ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที



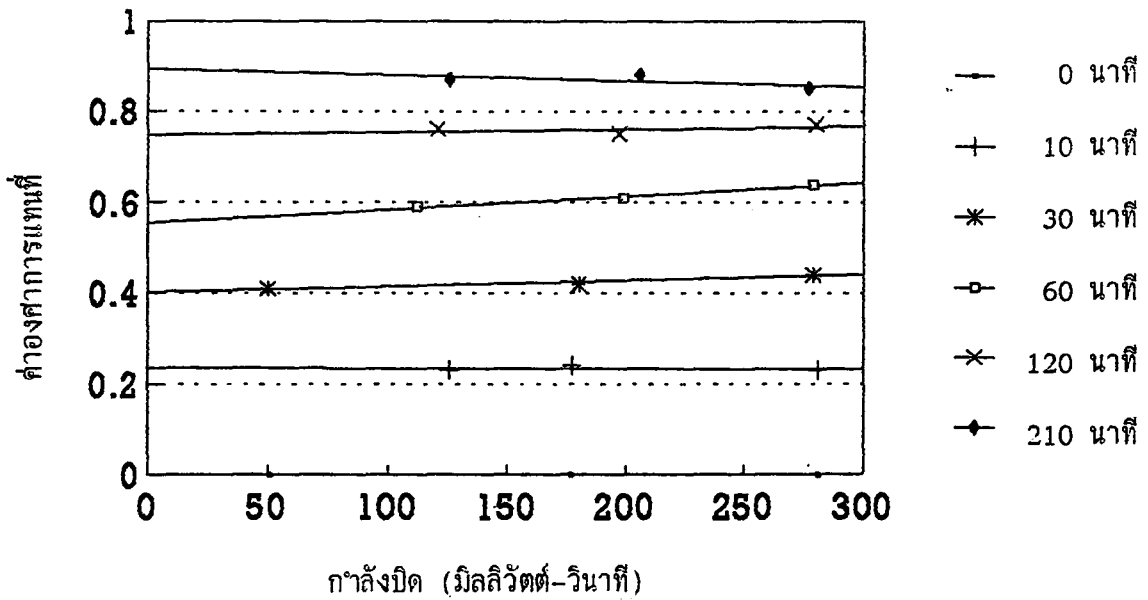
ใบพัดกวนแบบ Anchor ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังต่อปริมาตร

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 25:1 ณ. เวลาต่าง ๆ



ใบพัดกวนแบบ FBT ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที



ใบพัดกวนแบบ Anchor ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับกำลังปิด

ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราส่วน 25:1 ณ. เวลาต่าง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบถังปฏิกรณ์เคมีขนาดมาตรฐานความจุ 2 ลิตร พร้อมใบพัดกวน 2 ชนิด อันได้แก่ Flat blade turbine และ Anchor เพื่อศึกษาบทบาทของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ผลที่ได้คือ

5.1 ผลของความเร็วยรอบของใบพัดกวน

5.1.1 ผลของความเร็วยรอบใบพัดกวนแบบ Flat blade turbine โดยเปลี่ยนความเร็วยรอบ 400, 900 และ 1400 รอบต่อนาที ใ้ภาวะการทดลองดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70
อัตราส่วนโดยมวลของกรดคลอโรอะซิติกต่อเซลลูโลส	1.75
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	0.012
ปริมาตรสารละลายรวม	1800 ลบ.ซม.
ปริมาตรน้ำ	180 ลบ.ซม.

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ ค่าองศาการแทนที่ของความเร็วยรอบ $1400 > 900 > 400$ รอบต่อนาที ตามลำดับ

5.1.2 ผลของความเร็วยรอบใบพัดกวนแบบ Anchor โดยเปลี่ยนความเร็วยรอบ 100, 200 และ 300 รอบต่อนาที ใ้ภาวะการทดลองดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70

อัตราส่วนโดยมวลของกรดคลอโรอะซีติกต่อเซลลูโลส	1.75
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	0.012
ปริมาตรสารละลายรวม	1800 ลบ.ซม.
ปริมาตรน้ำ	180 ลบ.ซม.

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือค่าองศาการแทนที่ของความเร็วรอบต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

5.2 ผลของชนิดของใบพัด

โดยเปลี่ยนชนิดของใบพัด FBT และ Anchor ใช้ภาวะการทดลองดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70
อัตราส่วนโดยมวลของกรดคลอโรอะซีติกต่อเซลลูโลส	1.75
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	0.012
ปริมาตรสารละลายรวม	1800 ลบ.ซม.
ปริมาตรน้ำ	180 ลบ.ซม.

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ค่าองศาการแทนที่ของใบพัด Anchor มากกว่า FBT ที่กำลังระดับเดียวกัน

5.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส

โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส 25:1, 20:1 และ 15:1 ใช้ภาวะการทดลองดังนี้

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานปฏิกิริยา	45 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเซลลูโลส	3.70
อัตราส่วนโดยมวลของกรดคลอโรอะซีติกต่อเซลลูโลส	1.75

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ TMAC ต่อเซลลูโลส	0.012
ปริมาตรสารละลายรวม	1800 ลบ.ซม.
ปริมาตรน้ำ	180 ลบ.ซม.

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ ค่าองศาการแทนที่ของอัตราส่วน 15:1 > 20:1 > 25:1

ตามลำดับ

5.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขยายขนาดถึงปฏิกรณ์เคมี

พารามิเตอร์เดี่ยวที่ใช้ในการขยายขนาด คือ กำลังบิด (Torque, P/N)

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ทว่าการศึกษาผลของการลดอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลส สำหรับใบพัดแบบ Anchor
2. ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ด้วยใบพัดกวนแบบ Propeller
3. ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในถังปฏิกรณ์เคมีขนาด 10 ลิตร โดยใช้กำลังบิดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการขยายขนาดแบบมีความคล้ายเชิงเรขาคณิต ซึ่งมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการขยายขนาดดังตารางที่ ฉ.1 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้

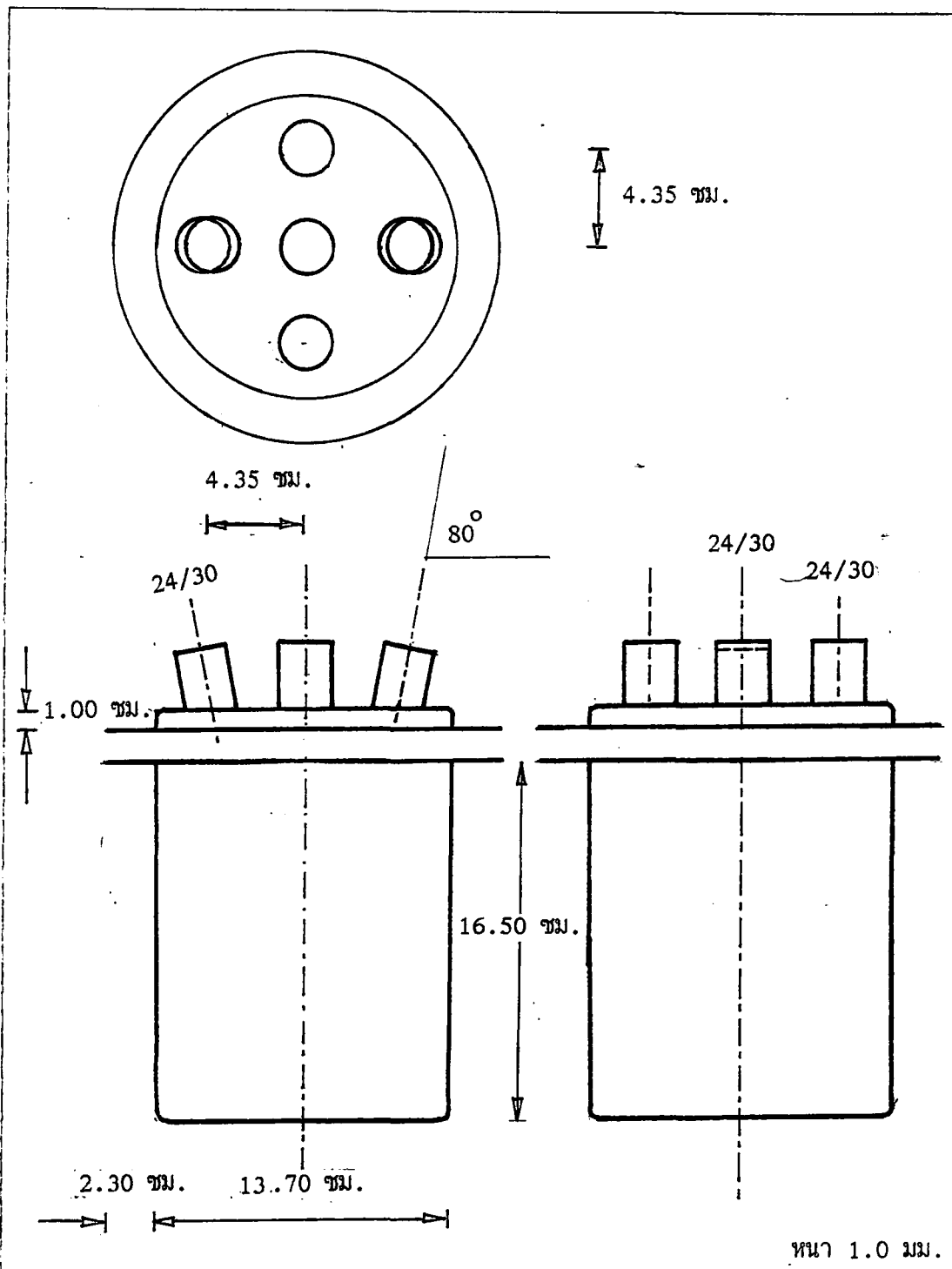
ภาคผนวก ก
ถึงขนาดมาตรฐาน

ตารางที่ ก.1 ส่วนประกอบของถึงขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 และ 10 ลิตร

ส่วนประกอบต่าง ๆ	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์ ทางเรขาคณิต	ขนาดถึง (ม.ม.)	
			2 ลิตร	10 ลิตร
1. เส้นผ่านศูนย์กลางถึง	D_T	1.0 D_T	137.0	295.2
2. ความสูงของเหลว	H_l	1.0 D_T	137.0	295.2
3. ความกว้างของครีป	w_b	1/10 D_T	13.7	29.5
4. ใบพัดชนิด Flate blade turbine		6 ใบ	6 ใบ	6 ใบ
5. เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	1/3 D_T	45.7	98.4
6. ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	1/5 D	9.1	19.7
7. ความยาวของแผ่นใบพัด	r	1/4 D	11.4	24.6
8. เส้นผ่านศูนย์กลางจานใบพัด	s	3/4 D	34.2	73.8
9. ความยาวของแผ่นใบพัดจากจาน		1/8 D	5.7	12.3
10. ความสูงของใบพัดจากก้นถึง	H_i	1.0 D	45.7	98.4
11. จำนวนครีป		4 อัน	4 อัน	4 อัน

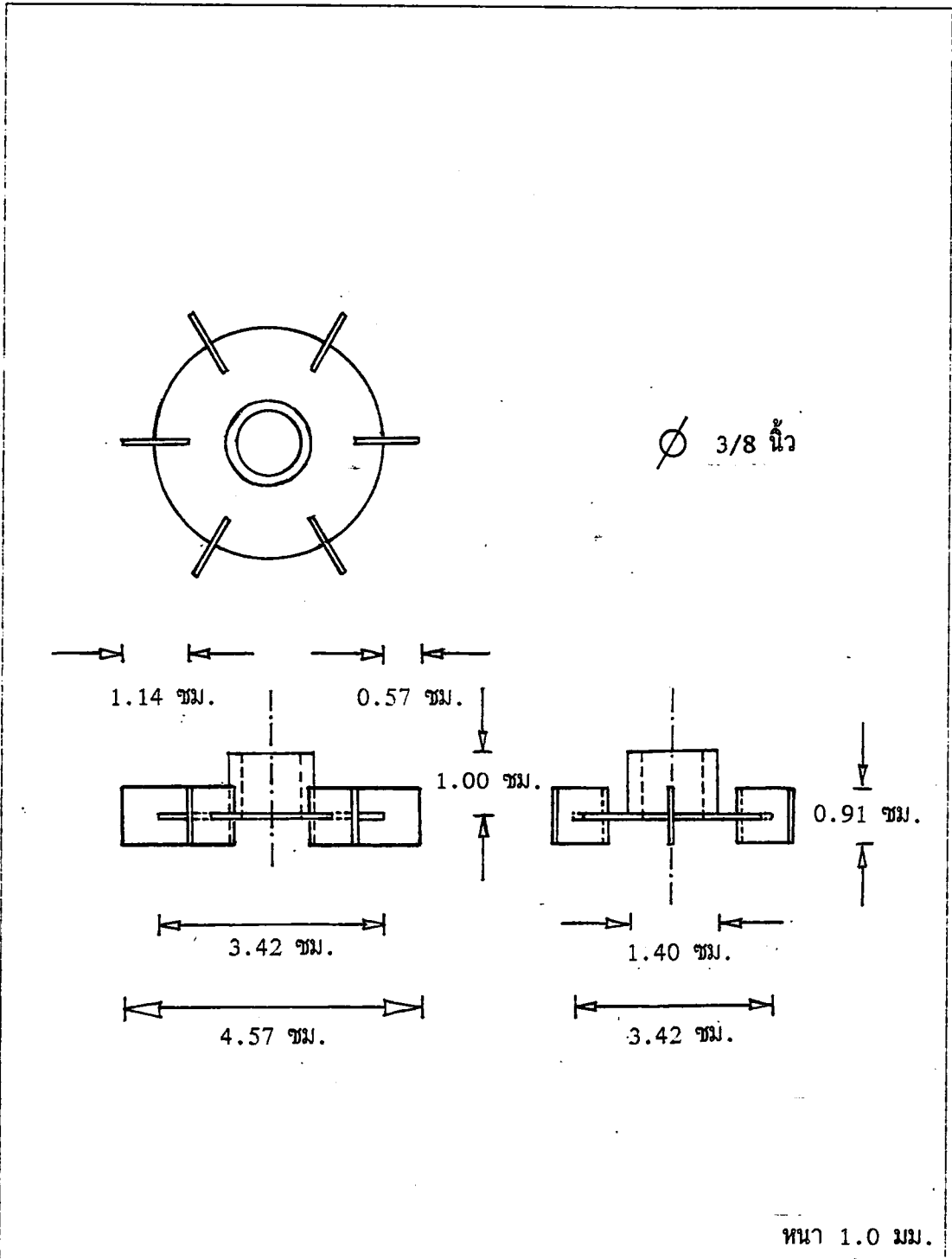
ตารางที่ ก.1(ต่อ) ส่วนประกอบของถังขนาดมาตรฐาน ความจุ 2 และ 10 ลิตร

ส่วนประกอบต่าง ๆ	สัญลักษณ์	ความสัมพันธ์	ขนาดถัง (ม.ม.)	
		ทางเรขาคณิต	2 ลิตร	10 ลิตร
12. ใบพัดชนิด Anchor agitator		2 ใบ	2 ใบ	2 ใบ
13. เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	D	$\sim 0.94 D_T$	128.0	275.8
14. ความกว้างของแผ่นใบพัด	q	1/10 D	12.8	27.6
15. ความสูงของแผ่นใบพัด	l	$\sim 1.0 D$	12.0	25.8
16. ความสูงของใบพัดจากก้นถัง		(0.01-0.05) D	4.5	9.7
17. ความห่างของครีบบจากใบพัด		(0.01-0.05) D	4.2	9.0
18. จำนวนครีบบ		2 อัน	2 อัน	2 อัน



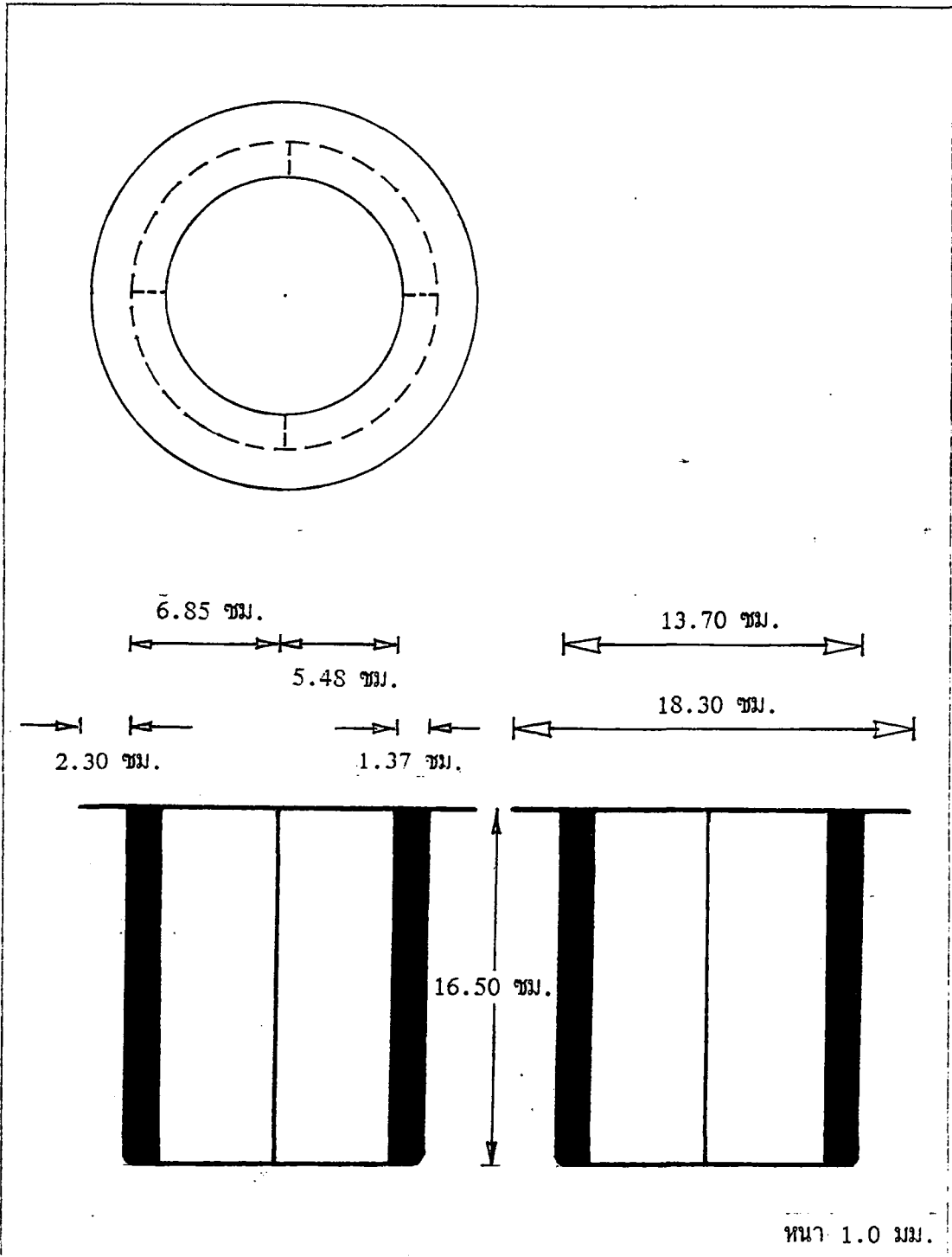
นายชาติ จันทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายไพโรจน์ ศิริวัฒนเรยริน	สจล.	15 กันยายน 2536	1:3

รูปที่ ก.1 แสดงแบบของถังขนาดมาตรฐานความจุ 2 ลิตร



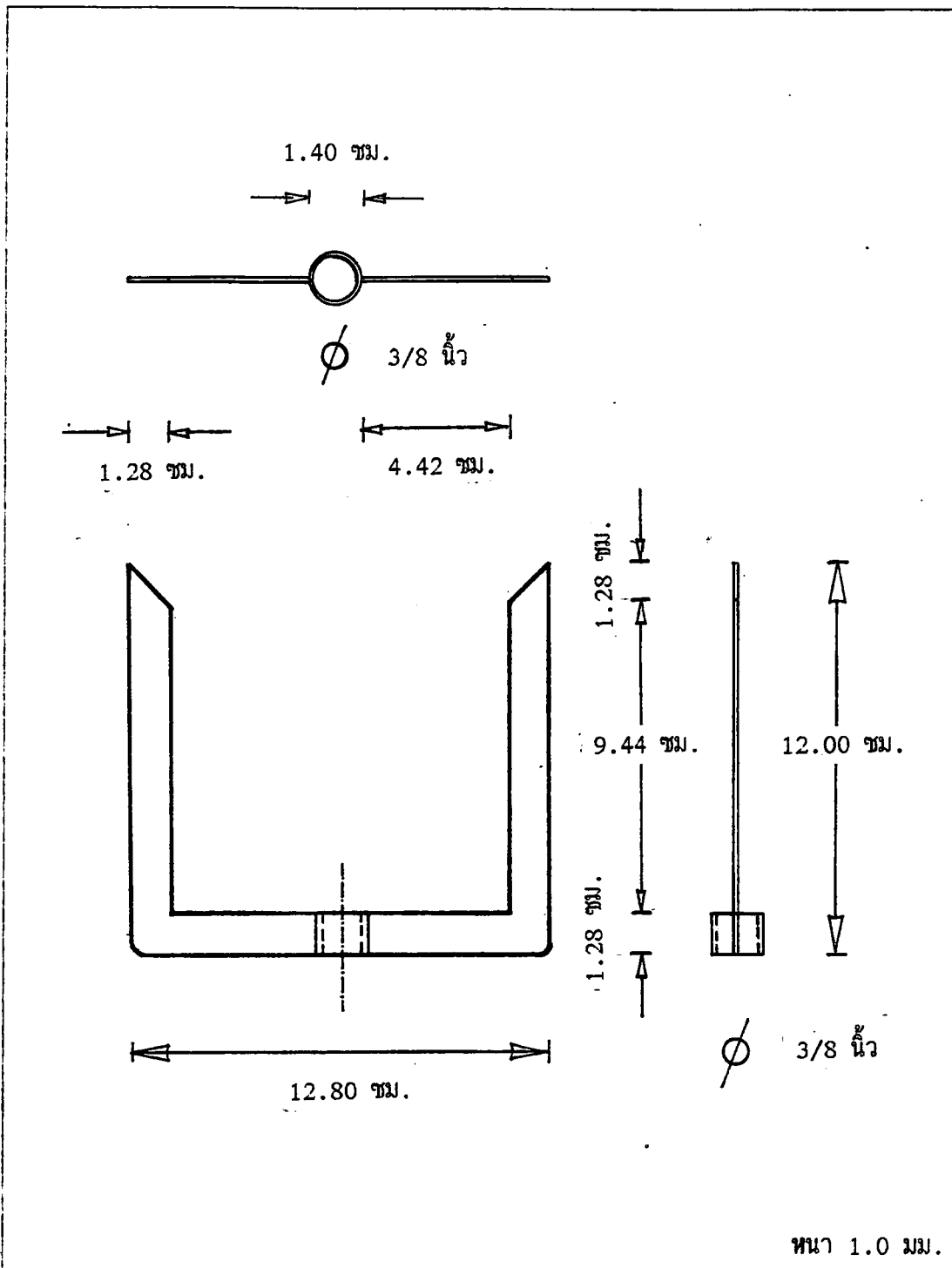
นายชาติร์ จันทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายไพโรจน์ ศิริวัฒน์โยธิน	สจล.	15 กันยายน 2536	1:1

รูปที่ ก.2 แสดงแบบของใบพัดชนิด Flat blade turbine



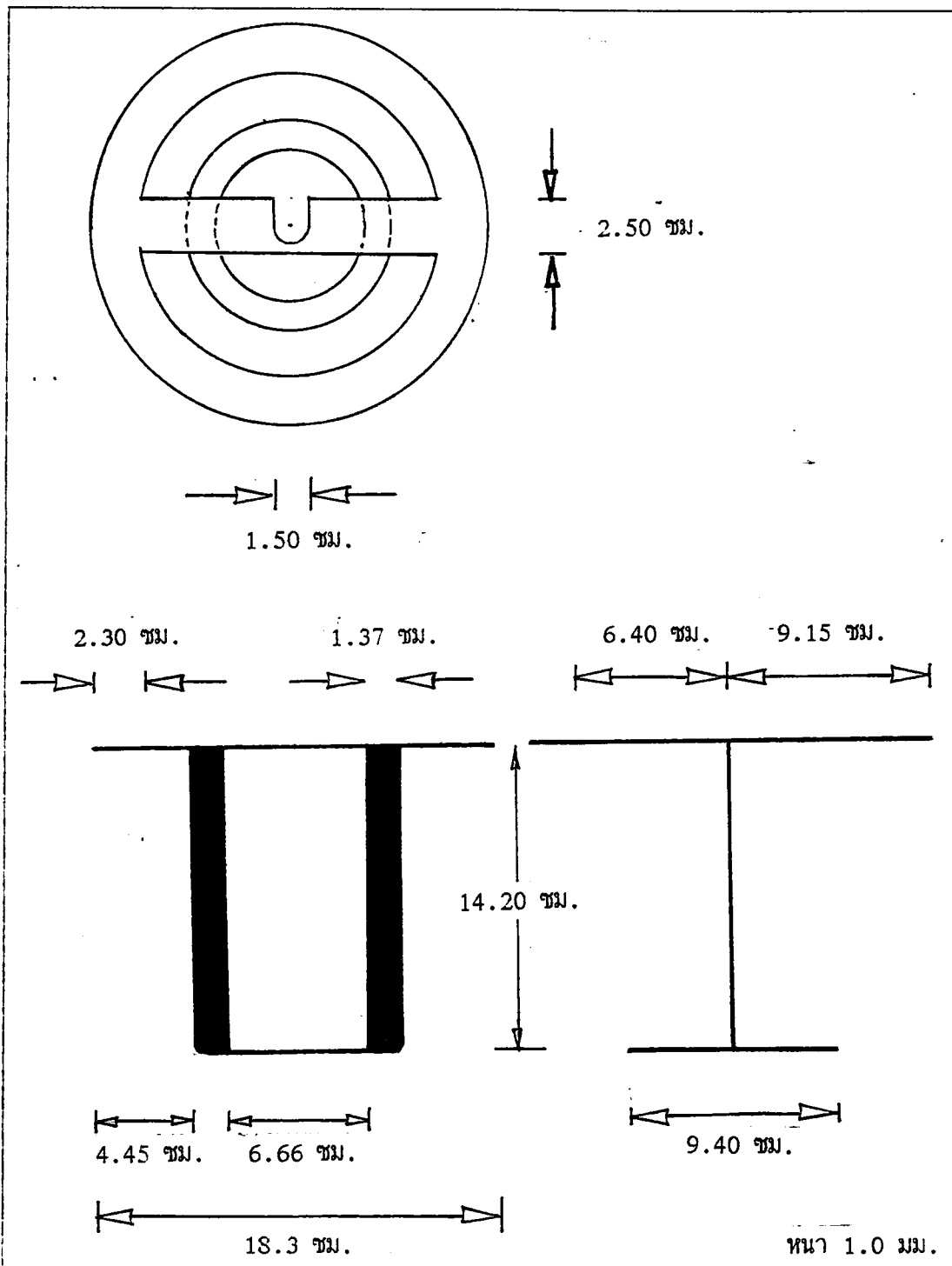
นายชาติ จันท	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายไพโรจน์ ศิริวัฒน์โยธิน	สจล.	15 กันยายน 2536	1:3

รูปที่ 0.3 แสดงแบบของครีบสำหรับใบพัดชนิด Flat blade turbine



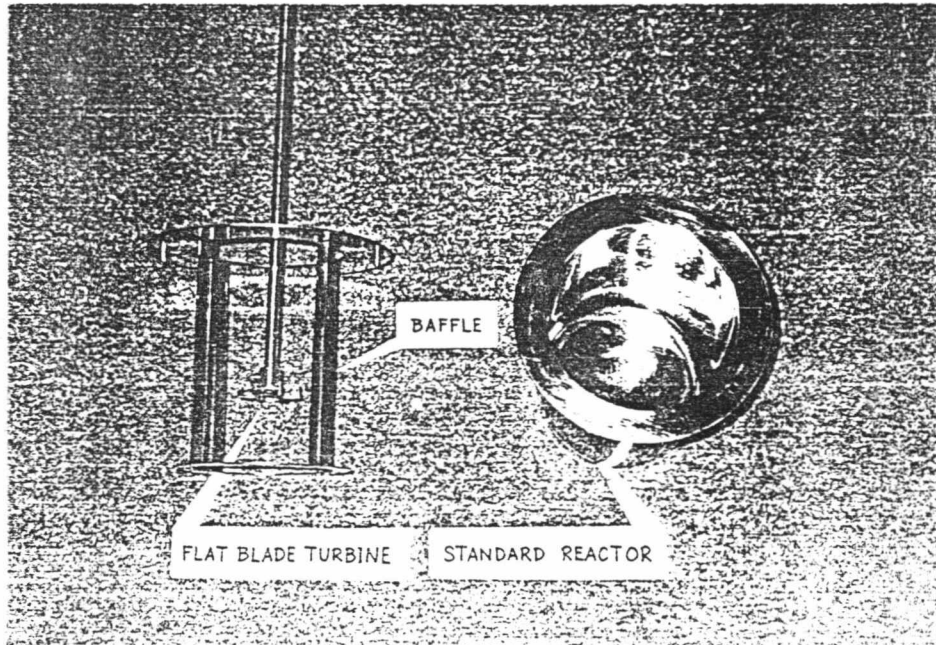
นายชาติ จันท	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายไพโรจน์ ศิริวัฒน์โยธิน	สจล.	15 กันยายน 2536	1:2

รูปที่ ๓:4 แสดงแบบของอุปกรณ์ยึด Anchor

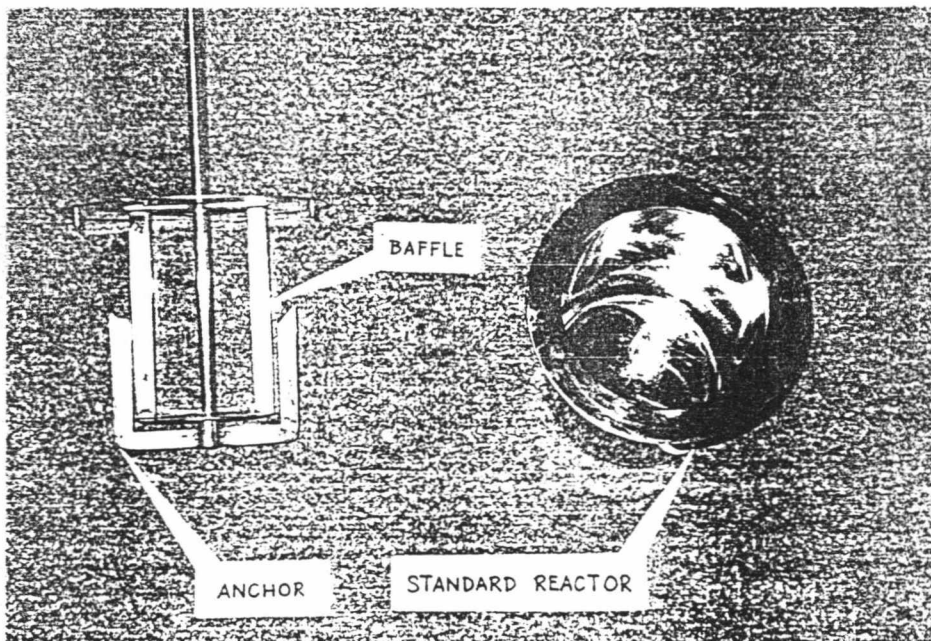


นายชาติ จันทร	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์	วันที่	อัตราส่วน
นายไพโรจน์ ศิริวัฒนโยธิน	สจล.	15 กันยายน 2536	1:3

รูปที่ ก.5 แสดงแบบของสกริปสำหรับไบพัตชนิด Anchor



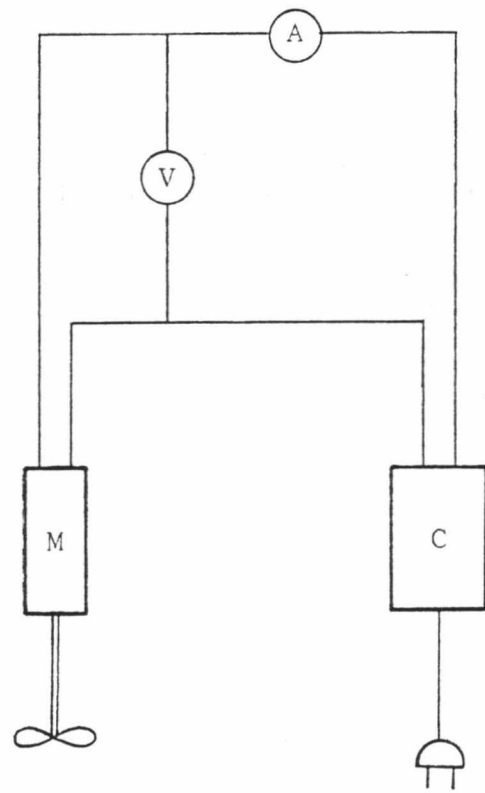
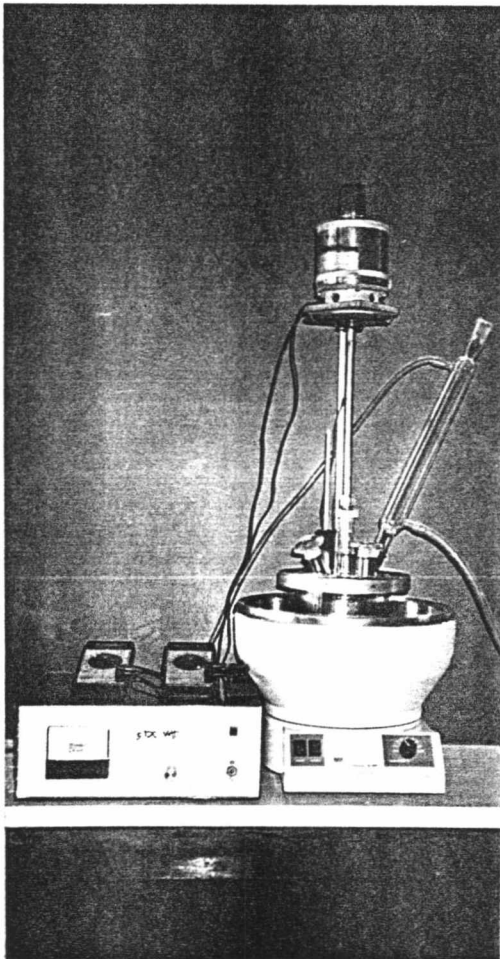
รูปที่ ก.6 แสดงถึงปฏิกรณ์เคมีพร้อมครีบและใบพัดชนิด Flat blade turbine



รูปที่ ก.7 แสดงถึงปฏิกรณ์เคมีพร้อมครีบและใบพัดชนิด Anchor

ภาคผนวก ข

รูปการทดลอง



M = เครื่องปั่นกวนกระแสดตรง

C = เครื่องควบคุมความเร็ว

A = เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

V = เครื่องวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ก. แสดงการตั้งชุดทดลอง

ข. แสดงการต่อวงจรไฟฟ้า

รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะการตั้งชุดทดลอง

ภาคผนวก ค

การเตรียมสาร

1. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 36 %

เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ 36 กรัม (0.9 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 64 กรัม

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโบแตสเซียมไฮดรเจนพทาเลตเข้มข้น 0.25 นอร์มอล

เตรียมจากโบแตสเซียมไฮดรเจนพทาเลต 12.7344 กรัม (0.625 โมล) ละลาย
ในน้ำกลั่น 250 มล.

3. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล

เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 9.87 กรัม (0.25 โมล) ละลายในน้ำกลั่น 500
มล. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับ สารละลายมาตรฐานโบแตสเซียมไฮดรเจนพทาเลต
เข้มข้น 0.25 นอร์มอล

4. การเตรียมสารละลายกรดไฮดรคลอริกเข้มข้น 0.25 นอร์มอล

ดวงกรดไฮดรคลอริกเข้มข้น 37 % 5.2 มล. (0.0625 โมล) ทำให้เจือจาง
ด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 250 มล. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับ สารละลายโซเดียม
ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล

5. การเตรียมสารละลายเงินไนเตรทเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร

เตรียมจากเงินไนเตรท 1.80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์หาค่าองศาการแทนที่ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยวิธีล้างด้วยกรด [5]

ชั่ง CMC (2.00 กรัม) ตวงเอทานอล 95 % ใส่ถังแม่เหล็กลงในบีกเกอร์ 250 มล. กวนผสมโดยใช้ถังแม่เหล็กไฟฟ้าของผสมกระจายตัวที่ดีที่สุด (ใช้ความเร็วรอบหมายเลข 7) เติมกรดไนตริกเข้มข้น (2.5 มล., 0.05 โมล) ลักษณะ CMC จะใสขึ้นเล็กน้อย จับเวลา หลังจากการเติม 2 นาที จึงให้ความร้อนแก่ของผสมเป็นเวลา 5 นาที โดยที่ยังไม่หยุดเครื่อง กวนครบ 5 นาที กวนต่อที่อุณหภูมิปกติ 15 นาที กรองสารผ่านกรวยกรองที่มีกระดาษกรองโดยมีเครื่องดูดอากาศออก ล้างสารให้หมดกรดไนตริกด้วยเอทานอล 80 % ที่ 60 องศาเซลเซียส (25 มล.) ล้าง 5 ครั้ง ทดสอบโดยเอาเอทานอลที่ล้าง 5 หยดสุดท้ายจากกรวยกรองมาหยดสารละลายในปิเปตติง 5 หยด สารไม่สีน้ำเงินเกิดขึ้น ล้างอีกครั้งด้วยเมทานอลที่ปราศจากน้ำ (25 มล.) ดูดน้ำแห้ง ถ่ายสารลงบนกระดาษฟิลาป้า นำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทาให้เย็นในเครื่องดูดความชื้น CMC ในรูปกรดที่ได้ มีสีขาวลักษณะใสขึ้นไม่ละลายน้ำ จากนั้นชั่ง CMC ที่ได้ในรูปกรด 0.500 กรัม ตวงน้ำ 100 มล. บีเบตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล (10 มล., 0.005 โมล) ลงในขวดรูปกรวย ให้ความร้อนแก่สารละลายจนกระทั่งสารละลายเดือด 1 เทพรดกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.25 นอร์มอล ขณะร้อนจนได้สารละลายสีชมพูอ่อน

การคำนวณ

$$A = (BC - DE) / F$$

$$\text{ค่าองศาการแทนที่} = 0.162 A / (1 - 0.058 A)$$

- เมื่อ
- A : กรัมสมมูลของกรดที่ใช้ไปต่อน้ำหนักเป็นกรัมของสารตัวอย่าง
 - B : มล. ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 - C : ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 - D : ปริมาตรเป็น มล. ของสารละลายกรดไฮดรคลอริก
 - E : ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายกรดไฮดรคลอริก
 - F : น้ำหนักเป็นกรัมของ CMC ในรูปกรด
- 162 : น้ำหนักเป็นกรัมของหน่วยแอนไฮดรากลูโคสของเซลลูโลส
- 58 : การเพิ่มขึ้นของมวลรวมเลกุลของหน่วยแอนไฮดรากลูโคสของแต่ละหมู่คาร์บอกซีเมทิลที่แทนที่

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลแสดงผลของความเร็วรอบของใบพัดกวนที่มีต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์ CMC

1.1 ความเร็วรอบของใบพัด 400 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลลูโลส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4913	นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4913	นอร์มัล

ตารางที่ จ.1 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด FBT

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.5003	0.4986	17.94	17.94	0.5625	0.5030	17.80	18.35
30	0.4998	0.4905	16.54	16.52	0.4924	0.4924	16.79	16.61
60	0.4936	0.4905	14.78	14.90	0.5012	0.4982	14.77	15.11
120	0.5044	0.4961	12.80	12.76	0.4977	0.4958	12.98	12.86
210	0.4913	0.3943	11.70	13.48	0.5150	0.5321	11.49	11.21

ตารางที่ จ.2 แสดงข้อมูลการหากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมป์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมป์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.210	4.26	0.202	3.93
10	0.294	4.31	0.280	3.98
30	0.291	4.31	0.283	3.98
60	0.284	4.30	0.285	3.98
120	0.293	4.30	0.286	3.97
210	0.304	4.31	0.284	3.97

ตารางที่ จ.3 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.15	0.35	6.67	1.92	0.95	8.24
30	0.29	0.35	6.67	1.98	0.95	8.26
60	0.46	0.33	6.67	1.96	0.95	7.96
120	0.70	0.35	6.67	2.14	0.95	8.43
210	0.85	0.37	6.67	2.34	0.95	8.94

1.2 ความเร็วรอบของใบพัด 900 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลล์รูเลส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2978 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4913 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4913 นอร์มัล

ตารางที่ จ.4 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 900 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด FBT

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.4993	0.5049	15.06	15.06	0.5456	0.5003	17.33	17.40
30	0.5584	0.5187	12.92	13.20	0.4982	0.4950	15.94	15.87
60	0.5512	0.5330	11.20	11.36	0.5230	0.5007	13.83	14.23
120	0.5019	0.5133	10.46	10.36	0.5000	0.4998	12.48	12.51
210	0.5177	0.4991	9.28	9.60	0.4990	0.5080	11.32	11.39

ตารางที่ จ.5 แสดงข้อมูลการหาค่ากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.261	5.83	0.258	5.90
10	0.617	7.22	0.581	6.80
30	0.628	7.26	0.543	6.70
60	0.676	7.40	0.598	6.82
120	0.630	7.27	0.601	6.86
210	0.644	7.32	0.605	6.90

ตารางที่ จ.6 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.17	2.68	15.00	1.49	2.14	28.43
30	0.35	2.58	15.00	1.47	2.14	27.33
60	0.55	3.02	15.00	1.78	2.14	32.01
120	0.73	2.83	15.00	1.71	2.14	30.00
210	0.88	2.92	15.00	1.83	2.14	30.99

1.3 ความเร็วรอบของใบพัด 1400 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลล์รูเลส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2978 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4981 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4913 นอร์มัล

ตารางที่ จ.7 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด FBT

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.5141	0.5208	14.87	14.62	0.5032	0.5031	17.40	17.10
30	0.5000	0.5079	13.11	13.18	0.5044	0.5152	15.34	15.25
60	0.5051	0.5127	11.70	11.52	0.5089	0.5127	13.73	13.41
120	0.5040	0.5046	10.26	10.16	0.5036	0.5163	11.95	11.63
210	0.5168	0.5113	9.60	9.66	0.5171	0.5221	11.10	11.03

ตารางที่ จ.8 แสดงข้อมูลการหากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.365	9.15	0.322	8.57
10	0.987	10.59	1.066	10.10
30	0.952	10.48	1.110	10.13
60	0.989	10.49	1.121	10.12
120	0.974	10.50	1.030	10.14
210	0.975	10.52	1.051	10.05

ตารางที่ จ.9 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.21	7.56	23.33	4.20	3.32	51.54
30	0.40	7.56	23.33	4.32	3.32	51.55
60	0.59	7.81	23.33	4.59	3.32	53.25
120	0.81	7.29	23.33	4.42	3.32	49.68
210	0.88	7.36	23.33	4.60	3.32	50.18

1.4 ความเร็วรอบของใบพัด 100 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลล์ลูลอส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ Anchor

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4863 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4863 นอร์มัล

ตารางที่ จ.10 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด Anchor

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.4940	0.5120	17.20	16.72	0.4989	0.5024	17.06	16.66
30	0.5195	0.5009	15.20	15.02	0.5102	0.5030	14.98	15.12
60	0.5040	0.5084	13.56	13.44	0.5041	0.5010	13.42	13.61
120	0.4996	0.5030	12.20	12.10	0.4992	0.4980	12.15	12.35
210	0.4991	0.4201	11.40	12.60	0.4988	0.5109	11.35	11.23

ตารางที่ จ.11 แสดงข้อมูลการหากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.181	2.01	0.230	2.50
10	0.755	3.28	0.428	2.59
30	0.413	2.12	0.428	2.60
60	0.383	2.11	0.681	3.65
120	0.388	2.11	0.739	3.59
210	0.406	2.12	0.755	3.60

ตารางที่ จ.12 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.23	1.32	1.67	0.74	0.66	126.29
30	0.41	0.52	1.67	0.30	0.66	50.09
60	0.59	1.18	1.67	0.69	0.66	112.40
120	0.76	1.27	1.67	0.77	0.66	120.88
210	0.87	1.32	1.67	0.82	0.66	126.00

1.5 ความเร็วรอบของใบพัด 200 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลล์ลอส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ Anchor

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4863 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4863 นอร์มัล

ตารางที่ จ.13 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด Anchor

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.4905	0.5119	16.98	16.78	0.5184	0.5159	16.73	16.76
30	0.5323	0.5329	14.76	14.88	0.5389	0.5391	14.85	14.56
60	0.5135	0.3168	13.16	15.80	0.4965	0.5034	13.32	13.31
120	0.5190	0.5069	12.02	12.14	0.5034	0.3429	12.27	14.48
210	0.5344	0.5269	10.72	10.92	0.5267	0.4049	10.92	12.81

ตารางที่ จ.14 แสดงข้อมูลการหากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.375	3.36	0.206	3.03
10	0.964	4.60	1.056	4.60
30	0.988	4.60	1.060	4.59
60	1.104	4.80	1.080	4.58
120	1.098	4.70	1.085	4.59
210	1.127	4.80	1.105	4.62

ตารางที่ จ.15 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.24	3.71	3.33	2.06	1.32	176.78
30	0.42	3.76	3.33	2.15	1.32	179.60
60	0.61	4.18	3.33	2.46	1.32	199.53
120	0.75	4.13	3.33	2.50	1.32	197.03
210	0.88	4.32	3.33	2.70	1.32	205.96

1.6 ความเร็วรอบของใบพัด 300 รอบต่อนาที ในอัตราส่วนระหว่างสารละลาย
ต่อเซลล์ลูโรส 25:1 ด้วยใบพัดกวนแบบ Anchor

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2978 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4981 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4864 นอร์มัล

ตารางที่ จ.16 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที อัตราส่วน
25:1 ใบพัด Anchor

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.5265	0.5211	14.35	14.49	0.5073	0.5212	16.86	16.70
30	0.5200	0.5024	12.77	12.65	0.5030	0.5198	14.84	14.58
60	0.5159	0.5130	10.89	10.93	0.5198	0.5060	12.82	12.96
120	0.4978	0.5213	10.45	10.24	0.4933	0.4966	12.40	11.84
210	0.5222	0.5070	9.580	9.908	0.5002	0.3485	11.62	13.90

ตารางที่ จ.17 แสดงข้อมูลการหาค่าล้าง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.437	4.06	0.425	4.13
10	1.680	6.29	1.638	6.49
30	1.690	6.28	1.645	6.36
60	1.685	6.26	1.647	6.38
120	1.695	6.21	1.683	6.30
210	1.677	6.22	1.625	6.46

ตารางที่ จ.18 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.24	8.83	5.00	4.91	1.98	281.09
30	0.44	8.77	5.00	5.01	1.98	279.14
60	0.64	8.76	5.00	5.15	1.98	278.83
120	0.77	8.80	5.00	5.33	1.98	280.00
210	0.85	8.70	5.00	5.44	1.98	276.80

2. ข้อมูลแสดงผลของอัตราส่วนของสารละลายต่อเซลลูโลสที่มีต่อปฏิบัติการสังเคราะห์ CMC

2.1 อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส 25:1 ที่ความเร็วรอบของใบพัด 1400 รอบต่อนาที ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

(ข้อ 1.3 ภาคผนวก จ.)

2.2 อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลลูโลส 20:1 ที่ความเร็วรอบของใบพัด 1400 รอบต่อนาที ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4864	นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481	นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4864	นอร์มัล

ตารางที่ จ.19 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ในอัตราส่วน 20:1 ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ใบพัด FBT

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.5007	0.5052	16.69	16.66	0.5053	0.5067	16.84	16.74
30	0.5037	0.5049	14.92	14.97	0.5143	0.5023	14.52	14.66
60	0.4997	0.5030	13.25	13.18	0.5233	0.5020	12.70	13.10
120	0.5402	0.5094	10.94	11.49	0.5161	0.5058	11.46	11.62
210	0.5113	0.5052	10.84	10.99	0.5078	0.4062	11.22	12.72

ตารางที่ จ.20 แสดงข้อมูลการหาค่ากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.295	8.34	0.360	8.80
10	1.082	10.10	1.043	10.34
30	1.007	10.08	1.062	10.36
60	0.961	10.04	1.067	10.37
120	0.830	9.71	1.070	10.34
210	0.803	9.67	1.025	10.40

ตารางที่ จ.21 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.25	8.04	23.33	4.47	3.32	54.83
30	0.44	7.76	23.33	4.44	3.32	52.92
60	0.64	7.54	23.33	4.44	3.32	51.43
120	0.83	6.75	23.33	4.09	3.32	46.00
210	0.90	6.40	23.33	3.40	3.32	43.62

2.3 อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเซลล์รูเลส 15:1 ที่ความเร็วรอบของใบพัด 1400 รอบต่อนาที ด้วยใบพัดกวนแบบ FBT

การทดลองครั้งที่ 1	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2978 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4981 นอร์มัล
การทดลองครั้งที่ 2	กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	0.2481 นอร์มัล
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น	0.4863 นอร์มัล

ตารางที่ จ.22 แสดงข้อมูลการหาค่าองศาการแทนที่ ในอัตราส่วน 15:1 ความเร็ว 1400 รอบต่อนาที ใบพัด FBT

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2			
	น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)		น.น.CMC (กรัม)		ปริมาตร HCl(มล.)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	0.5014	0.4074	16.51	16.90	0.5172	0.5026	13.90	13.85
30	0.5112	0.5053	13.43	14.06	0.5097	0.5023	12.43	12.58
60	0.5000	0.4985	12.87	12.79	0.5221	0.5074	10.88	11.00
120	0.5056	0.5146	11.26	11.08	0.5155	0.5039	9.73	9.93
210	0.5076	0.5007	10.57	10.57	0.5138	0.4520	9.15	10.13

ตารางที่ จ.23 แสดงข้อมูลการหากำลัง

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)	กระแส(แอมแปร์)	แรงเคลื่อน(โวลท์)
0	0.295	8.34	0.361	9.49
10	1.082	10.10	1.060	11.04
30	1.007	10.08	1.066	11.04
60	0.961	10.04	1.108	11.07
120	0.830	9.71	1.100	11.01
210	0.803	9.67	1.053	11.01

ตารางที่ จ.24 แสดงค่าที่คำนวณได้

เวลา (นาที)	องศา การ แทนที่	กำลัง (วัตต์)	ความเร็ว รอบ (รอบ/วินาที)	กำลัง ต่อปริมาตร (กิโลวัตต์/ลบ.ม.)	ความเร็ว ปลาย (ม./วินาที)	กำลัง บิด (มิลลิวัตต์-วินาที)
10	0.29	8.37	23.33	4.65	3.32	57.08
30	0.49	8.02	23.33	4.58	3.32	54.66
60	0.68	8.01	23.33	4.71	3.32	54.64
120	0.86	7.14	23.33	4.33	3.32	48.69
210	0.96	6.74	23.33	4.21	3.32	45.93

3. ข้อมูลแสดงผลของชนิดของใบพัดที่มีต่อปฏิบัติการสังเคราะห์ CMC

ใช้ข้อมูลจากข้อ 1.1 ถึง 1.6 ภาคผนวก จ โดยเปรียบเทียบใบพัด 2 ชนิด ที่ใช้
ค่ากำลังเท่ากัน 3 ระดับ

ตารางที่ จ.25 แสดงข้อมูลแสดงผลของชนิดของใบพัดที่มีต่อปฏิบัติการสังเคราะห์ CMC

ระดับกำลัง	ชนิดใบพัด	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ภาคผนวก จ
ต่ำ	FBT	400	ข้อ 1.1
	Anchor	100	ข้อ 1.4
กลาง	FBT	900	ข้อ 1.2
	Anchor	200	ข้อ 1.5
สูง	FBT	1400	ข้อ 1.3
	Anchor	300	ข้อ 1.6

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อ 1.1 ภาคผนวก จ ที่เวลา 10 นาที

1. การหาค่าองศาการแทนที่

$$A = (BC-DE)/F$$

$$\text{ค่าองศาการแทนที่} = 0.162 A / (1-0.058 A)$$

การทดลองครั้งที่ 1

: สารตัวอย่างที่ 1	B = 10.0 มล.
	C = 0.4913 นอร์มอล
	D = 17.94 มล.
	E = 0.2481 นอร์มอล
	F = 0.5003 กรัม

$$A = [(10.0 \times 0.4913) - (17.94 \times 0.2481)] / 0.5003$$

$$= 0.9225$$

$$\text{ค่าองศาการแทนที่} = (0.162 \times 0.9225) / [1 - (0.058 \times 0.9225)]$$

$$= 0.16$$

: สารตัวอย่างที่ 2	= 0.16
--------------------	--------

การทดลองครั้งที่ 2

: สารตัวอย่างที่ 1	= 0.15
--------------------	--------

: สารตัวอย่างที่ 2	= 0.12
--------------------	--------

$$\text{เฉลี่ย} = (0.16 + 0.16 + 0.15 + 0.12) / 4$$

$$= 0.15$$

2. การคำนวณหากำลัง ความเร็วรอบ กำลังต่อปริมาตร ความเร็วปลาย และกำลังบิด

$$\therefore \text{กำลัง} \quad P = (I \times V) \text{ ณ. เวลา } t - (I \times V) \text{ ณ. ถึง เปลา}$$

$$\text{การทดลองครั้งที่ 1, 10 นาที} \quad I = 0.294 \text{ แอมแปร์, } V = 4.31 \text{ โวลท์}$$

$$\text{ถึง เปลา} \quad I = 0.210 \text{ แอมแปร์, } V = 4.23 \text{ โวลท์}$$

$$\text{กำลัง} = (0.294 \times 4.31) - (0.210 \times 4.23) \text{ วัตต์}$$

$$= 0.37 \text{ วัตต์}$$

$$\text{การทดลองครั้งที่ 2} \quad \text{กำลัง} = 0.32 \text{ วัตต์}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 0.35 \text{ วัตต์}$$

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

$$= 400/60 \text{ รอบ/วินาที}$$

$$= 6.67 \text{ รอบ/วินาที}$$

$$\therefore \text{ความเร็วปลาย (Tip speed)} = \pi ND$$

$$N = 6.67 \text{ รอบ/วินาที, } D = 0.045 \text{ ม.}$$

$$= \pi \times 6.67 \times 0.045 \text{ ม./วินาที}$$

$$= 0.95 \text{ ม./วินาที}$$

$$\therefore \text{กำลังต่อปริมาตร} = P / [(V \text{ สารละลายก่อนเก็บตัวอย่าง}) - (V \text{ ตัวอย่าง})]$$

$$\text{การทดลองครั้งที่ 1} = 0.37 / [(1800 - 0) \times 10^{-6}] \text{ วัตต์/ลบ.ม.}$$

$$= 2.06 \text{ กิโลวัตต์/ลบ.ม.}$$

$$\text{การทดลองครั้งที่ 2} = 1.78 \text{ กิโลวัตต์/ลบ.ม.}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 1.92 \text{ กิโลวัตต์/ลบ.ม.}$$

$$\begin{aligned}
 & : \text{กำลังบิด (Torque)} & = & P/2\pi N \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 1} & & = & 0.37/(2 \times \pi \times 6.67) \text{ วัตต์-วินาที} \\
 & & = & 8.83 \text{ มิลลิวัตต์-วินาที} \\
 \text{การทดลองครั้งที่ 2} & & = & 7.64 \text{ มิลลิวัตต์-วินาที} \\
 \text{เฉลี่ย} & & = & 8.24 \text{ มิลลิวัตต์-วินาที}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ฉ
ข้อมูลการขยายขนาด

ตารางที่ ฉ.1 แสดงข้อมูลในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์เคมีจาก 2 ลิตร เป็น 10 และ 20 ลิตร โดยมีกำลังบิดเป็นเกณฑ์ในการขยายขนาด

ค่าต่าง ๆ	ขนาดทดลอง	ขนาดโรงงาน	ขนาดโรงงาน
	2 ลิตร	10 ลิตร	20 ลิตร
P	1.0	0.26	0.15
P/V	1.0	0.052	0.015
N	1.0	0.26	0.15
P/N	1.0	<u>1.0</u>	<u>1.0</u>
D	1.0	1.71	2.15
ND	1.0	0.45	0.32
$\rho ND^2/\mu$	1.0	0.76	0.68

เอกสารอ้างอิง

1. Holland. F.A. and Chapman, F.S., *Liquid Mixing and Processing in stirred tanks*. New york, NY:Reinhold Publishing Co.. 1966.
2. Abraham Tamir and Beni Shalmon, "Scale-Up of Two-Impinging-Streams (TIS) Reactors." *Ind. Eng. Chem. Res.* 27(1988):238-242.
3. Hasan Hannoun and John R. Regalbuto, "Mixing Characteristics of a Micro-Berty Catalytic Reactor, " *Ind. Eng. Chem. Res.* 31(1992): 1288-1292.
4. สมานพันธ์ เทพกาญจนาท และกนิษฐา งามพันธ์เวชชะกุล , "การศึกษาการขยายขนาดของถังสัปดาห์" วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิตร วิชาเอกเคมีอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, 2535.
5. ASTM Committee on Standard. "Standard Methods of Testing Sodium Carboxymethyl Cellulose, "Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1989.

บรรณานุกรม

- สมชาย ใสสุวรรณ, "จลนศาสตร์วิศวกรรมเคมี" หน้า 105-128, โรงพิมพ์ไจทอง, กรุงเทพฯ, 2532.
- อนุชา ถับบัวงาม และอนุรักษ์ บิตรีกษ์สกุล, "โครงการงานวิจัยการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส" วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2528.
- James M.Lee, "Agitation and Aeration," *Biochemical Engineering*. Englewood Cliffs. NJ:Prentice-Hall, Inc., 1992.
- James Y.Oldshue. Ph.D. *Fluid Mixing Technology*. New york, NY:Mc Graw-Hill Publications Co.,1983.
- Rushton, J.H., Costich, E.W., and Everett, H.J., "Power Characteristics of Mixing Impellers, Part I." *Chem. Eng. Pro.* 46(1950):395-404.
- Rushton, J.H., Costich, E.W., and Everett, H.J., "Power Characteristics of Mixing Impellers, Part II," *Chem. Eng. Pro.* 46(1950):467-476.