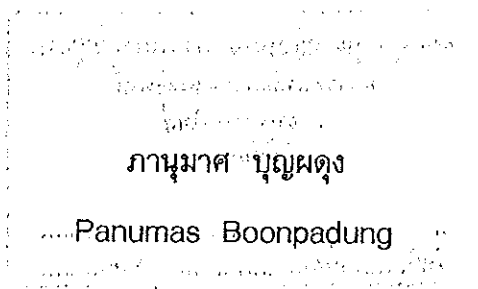




ผลของรายละเอียดและอัตราการให้อากาศต่อการผสมและไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวนที่

บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน

Effect of Configuration and Aeration Rate on Mixing and Hydrodynamics in
Stirred Tank Bioreactor Containing Xanthan Solution



วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Biotechnology

Prince of Songkla University

๑ 2541

เลขที่	TP979.5.X3 ๑๖๖ 2541 ๑. ๒
Bib Key	144141

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลของรายละเอียดและอัตราการใช้อากาศต่อการผสมและ
ไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวนที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน
ผู้เขียน นาย ภาณุมาศ บุญผดุง
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

คณะกรรมการที่ปรึกษา

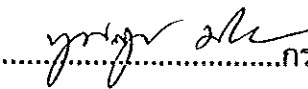
คณะกรรมการสอบ


.....ประธานกรรมการ


.....ประธานกรรมการ

(ดร. ชัยวัฒน์ คิริพันธ์)

(ดร. ชัยวัฒน์ คิริพันธ์)


.....กรรมการ

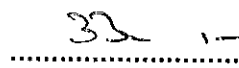

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

(รองศาสตราจารย์ ดร. พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

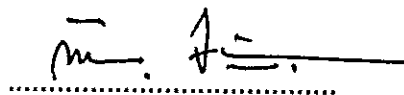

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکวิต ทองอุไร)


.....กรรมการ

(นพ. วิวิทย์ สมตานดี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ


.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลของรายละเอียดและอัตราการใช้อากาศต่อการผสมและไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวนที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน
ผู้เขียน	นาย ภาณุมาศ บุญผดุง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ
ปีการศึกษา	2540

บทคัดย่อ

ในกระบวนการหมักแซนแทนพบว่าความเข้มข้นของแซนแทนที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการหมักจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นสาเหตุทำให้อัตราการผลิตผลผลิตจำเพาะลดลง เนื่องจากการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังจุลินทรีย์ถูกจำกัด งานวิจัยในครั้งนี้เป็นงานขั้นเริ่มต้นโดยเลือกกระบวนการละลายแซนแทนที่สำเร็จแทนบรอกทจริง ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางรีโอโลยีของไหลจำลองกับบรอกทจริงหาได้โดยใช้เทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยี (Rheological matching)

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วน คือ กำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม, gas hold up และ การผสม โดยใช้ถังหมักแบบกวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังและความสูงของของเหลวในถังเท่ากับ 25 เซนติเมตร ที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0-0.5 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราการใช้อากาศ 0-0.36 vvm และความเร็วรอบในการกวน 2.5-5.833 รอบต่อวินาที ส่วนแรกเป็นการศึกษากำลังที่ใช้ในการกวน พบว่ากำลังที่ใช้ในการกวนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการใช้อากาศและความเร็วรอบในการกวน นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดลองก็สอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว และยังพบว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine ใช้กำลังในการกวนมากกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine ถึง 2-4 เท่าในทุกกรณี. ส่วนที่สองเป็นการศึกษา gas hold-up พบว่า ที่สารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำๆ (<0.1%) ใบพัดแบบ Flat blade turbine จะให้ผลของ hold-up ที่สูงกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine อย่างไรก็ตาม hold-up ก็ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ ความเร็วรอบในการกวนและอัตราการใช้อากาศ. ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการผสมโดยใช้เทคนิคการติดตามการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ชั้นแรกศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมที่ได้จากกราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์นั้นสามารถใช้วิเคราะห์ได้เพียงในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำๆ เท่านั้น (<0.1%) ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นสูงควรใช้ปัจจัยอื่นๆ ในการวิเคราะห์ถึงการผสม ในขั้นถัดมาจึงศึกษาหาปริมาณของบริเวณที่มีการผสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ถึงการผสม พบว่าที่สารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำ (<0.1%) ปริมาณของบริเวณที่มีการผสมระดับไมโครจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น จนปริมาณเท่ากับของเหลวในถังทั้งหมด ในขณะที่ปริมาณของบริเวณที่มีการผสมระดับมาโครและบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่ลดลง สำหรับใน

สารละลายแซนแทนความเข้มข้นสูงปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับไมโครและมาโครจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาตรของบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่ลดลง. หลังจากนั้นจึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การผสมในถังหมักแบบกวนโดยใช้เทคนิคการติดตามการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางกว่าแบบจำลองของนักวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษามาแล้ว และแบบจำลองดังกล่าวก็เป็นเพียงกรณีหนึ่งของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมา เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการซิมูเลชันของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่ามีความสอดคล้องกัน แต่การซิมูเลตยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก จึงควรมีการพัฒนาการเขียนโปรแกรม model fitting สำหรับพีดเข้ากับข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่อไป

การวิจัยในครั้งนี้เป็นเพียงเบื้องต้นของการวิจัยในขั้นต่อไป เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตโพลีเมอร์ชีวภาพอย่างมีระบบต่อไป

Thesis Title Effect of Configuration and Aeration Rate on Mixing and
Hydrodynamics in Stirred Tank Bioreactor Containing
Xanthan Solution

Author Mr. Panumas Boonpadung

Major Program Biotechnology

Academic Year 1997

Abstract

In xanthan production, the accumulation of the xanthan product in the culture medium increases its viscosity. This lead to oxygen-limitation, while reduces the production rate gradually. In this preliminary study, xanthan solution was chosen as a representative of real broth. Relationship between rheological properties of model fluid and real broth can be established using technique called rheological matching.

This work introduces three aspects of physical phenomena namely ; power consumption, gas hold-up and mixing. The work was confined to stirred tank of 25 cm in diameter and liquid depth, containing 0-0.5 % xanthan solutions and using gas flow rate of 0-0.36 vvm in the agitation speed range of 2.5-5.833 rps. The power consumption as a function of gas flow rate and impeller speeds was correlated. The results agree reasonably well with previous works. Flat bladed turbine consumed power 2-4 times of pitched bladed turbine in all cases. At low concentration of xanthan solution (<0.1%) flat-bladed turbine exhibits higher hold-up than that of pitch-bladed turbine. However, the effect of speed and air flow rate is more intensified. The mixing was studied by tracer response technique. The mixing times estimated from the tracer response curves were consistent only for very low concentration of xanthan (< 0.1 %). For higher concentration of xanthan, other mixing criteria should be used. The volume of mixing regions was investigated, at low concentration of xanthan (<0.1%) the micromixing region continued to increase with increasing agitation speed until it reached the total liquid volume, while the macromixing and stagnant regions decreased. For higher concentration of xanthan the micromixing and the macromixing regions increased with increases in the agitation speed, resulting in the decrease of the stagnant region. After that, the mixing models for a stirred tank reactor was developed and analysed using tracer response technique. It

was found that the model developed in this work is more flexible and covers conditions wider than the most published models. This model can also describe experimental data considerably well, However, it is seen that a computer program for model fitting must be developed.

This research is only a very beginning step of the whole approach, which aims to design the bioreactor for biopolymer production systematically.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ชัยวัฒน์ ศิริพัธนะ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคต่างๆ ที่พบตลอดการวิจัย รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รองศาสตราจารย์ ดร. พูนสุข ประเสริฐสรรพ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศรีท ทองอุไร กรรมการผู้แทนจากภาควิชาชีพวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ อ. วิวิทย์ สมศานต์ กรรมการผู้แทนจากบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และวัสดุอุปกรณ์ ในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา และโครงการวิจัยของ ดร. ชัยวัฒน์ ศิริพัธนะ และคณะ ที่ให้ทุนอุดหนุนและอุปกรณ์ต่างๆ ในการดำเนินการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ครูพรชัย ศรีไพบูลย์ ตลอดจนบุคลากรในคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เพื่อให้การวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง และหลาน ทุกคน ด้วยความเคารพรักอย่างที่สุดที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกๆ คน สำหรับกำลังใจ, คำแนะนำ และการช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนทุกๆ ท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ภานุมาศ บุญมดุง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
รายการภาพ.....	(11)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(19)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	1
1. โครงสร้างและการสังเคราะห์แซนแทนกัม.....	1
1.1 โครงสร้างของแซนแทนกัม.....	1
1.2 การสังเคราะห์แซนแทนกัม.....	3
2. การผลิตแซนแทนในถังหมักแบบกวน.....	4
2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์โดยตรง.....	6
2.1.1 การผลิตแซนแทนกัม.....	6
2.1.2 การเก็บเกี่ยวแซนแทนกัม.....	7
2.2 ปัจจัยที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์โดยตรง.....	7
2.2.1 ผลของถังหมักแบบกวน การกวน และการให้อากาศต่อ ประสิทธิภาพการผลิต.....	7
2.2.2 การถ่ายโอนมวลสาร.....	8
2.2.3 กำลังที่ต้องใช้ในการกวน.....	9
2.2.4 การผสม.....	12
2.2.4.1 นียามและเมโนทอร์ศน์ของการผสม.....	12
2.2.4.2 เวลาในการผสม.....	13
2.2.4.3 เวลาในการวนครบรอบ.....	16
3. วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น.....	16
3.1 ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis....	16
3.2 แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น.....	18
วัตถุประสงค์.....	21
2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ.....	22

วัสดุ.....	22
อุปกรณ์.....	22
วิธีการ.....	22
1. เตรียมสารละลายแซนแทนกัม.....	22
2. ศึกษาผลของรายละเอียดของถังหมักแบบกวนและอัตราการให้อากาศ ต่อกระบวนการไหล กำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม รูปลักษณะการ ไหล และพารามิเตอร์แสดงระดับการผสม โดยวิธีวัดการตอบสนองของ เทรซเซอร์ในบรอดจำลอง (สารละลายแซนแทนกัม).....	27
2.1 ศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม.....	27
2.2 ศึกษา Hold-Up ที่ได้จากการทดลอง.....	27
2.3 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม (Mixing time).....	27
2.4 ศึกษารูปลักษณะการไหล (Flow configurations).....	27
2.5 ศึกษาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (Volume of mixing region).....	28
2.6 ศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับถังหมักแบบกวน.....	28
3 ผลและวิจารณ์.....	30
2.1 ผลการศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม.....	30
2.1.1 การดูตกสัณกำลังในสภาวะที่ไม่มีให้อากาศ.....	32
2.1.2 การดูตกสัณกำลังในสภาวะที่มีการให้อากาศ.....	32
2.1.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการทำนายของ สหสัมพันธ์ที่รวบรวมโดยนักวิจัยอื่นๆ.....	32
2.2 ผลการศึกษา Hold-Up ที่ได้จากการทดลอง.....	45
2.3 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม (Mixing time).....	56
2.4 ผลการศึกษารูปลักษณะการไหล (Flow configurations).....	69
2.5 ผลการศึกษปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (Volume of mixing region).....	76
2.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับถังหมักแบบกวน.....	93
2.6.1 ผลการวิเคราะห์การซิมิวเลตแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b).....	93
2.6.2 ผลการวิเคราะห์การซิมิวเลตแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	97
2.6.3 ผลการเทียบเคียงกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ (tracer response curve) ระหว่างแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลที่ได้จากการทดลอง....	105
2.6.4 แบบจำลองทั่วไปสำหรับการผสมแบบหลายไซน.....	110
4 สรุป.....	119
ข้อเสนอแนะ.....	120

เอกสารอ้างอิง.....	122
ภาคผนวก.....	126
ก. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล.....	126
ข. ผลการทดลองกราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ทั้งสามตำแหน่งใน ถังหมัก.....	130
ค. ผลการทดลองรูปลักษณะการไหล.....	142
ประวัติผู้เขียน.....	160

รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของแซนแนกัม	3
1.2 กระบวนการสังเคราะห์แซนแนกัมโดยแบคทีเรีย	4
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมักและ การแบ่ง ปัญหาเป็นส่วนย่อย (problem segmentation)	5
1.4 ความสัมพันธ์ของกำลังในการกวนสำหรับใบพัดแบบ flat six blade turbine ที่มีแผ่นกลม (disk) สำหรับของไหลนิวโตเนียนและนอน-นิวโตเนียน	11
1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของการผสม กับ เวลาในการผสม	13
1.6 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของ Funahashi และคณะ (1987b)	14
1.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_{micro} / C_{final} - 1)$ กับ เวลา	15
2.1 รายละเอียดของถังหมักแบบกวนที่ใช้ในการทดลอง	24
2.2 ถังหมักแบบกวนพร้อม เครื่องวัดพีเอช, ชุดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ และ ตำแหน่งสำหรับการวัดการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ทั้ง 3 ตำแหน่ง	26
2.3 ใบพัดแบบ Pitched-blade impeller ที่ใช้ในการทดลอง	29
2.4 ใบพัดแบบ Flat-blade impeller with center disk ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.1 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ของสารละลายแซนแนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศ ต่างๆ	34
3.2 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ของสารละลายแซนแนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศ ต่างๆ	35
3.3 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ของสารละลายแซนแนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศ ต่างๆ	36
3.4 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ของสารละลายแซนแนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศ ต่างๆ	37

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 N_p กับ N'_{Ro} ของสารละลายน้ำและสารละลายแซนแซนที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ	38
3.6 N_p กับ N'_{Ro} ของสารละลายน้ำและสารละลายแซนแซนสำหรับใบพัดแบบ flat blade turbine และใบพัดแบบ pitched blade turbine ในสภาวะที่ไม่มีอากาศ	39
3.7 เปรียบเทียบค่า P_g/P_o ระหว่างสมการความสัมพันธ์ กับ ผลที่ได้จากการทดลอง	40
3.8 P_g/P_o กับ A_o ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแซน ความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	41
3.9 P_g/P_o กับ A_o ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแซน ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก	42
3.10 P_g/P_o กับ A_o ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแซน ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก	43
3.11 P_g/P_o กับ A_o ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแซน ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	44
3.12 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแซนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	49
3.13 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแซนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก	50
3.14 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแซนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก	51
3.15 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแซนความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก	52
3.16 Hold-up (E_g) กับ ความหนืด ที่ความเร็วรอบและอัตราการให้อากาศต่างๆ สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine	53
3.17 Hold-up (E_g) กับ ความหนืด ที่ความเร็วรอบและอัตราการให้อากาศต่างๆ สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine	54

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.18 การเทียบเคียง E_g ของสมการความสัมพันธ์ทั้งสามสมการกับผลที่ได้จากการทดลอง ที่ความเร็วรอบและอัตราการให้อากาศต่างๆ	55
3.19 การตอบสนองของเทอร์เซอร์สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที และอัตราการให้อากาศ 0 vvm ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	58
3.20 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 vvm	59
3.21 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	60
3.22 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	61
3.23 การเปรียบเทียบ $t_{mix, 95\%}/V$ ระหว่างผลจากสมการที่ 12 และ 13 กับผลที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศต่างๆ	62
3.24 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 vvm	63
3.25 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	64
3.26 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	65

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.27 $t_{\max, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 wvm	66
3.28 $t_{\max, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 wvm	67
3.29 $t_{\max, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 wvm	68
3.30 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	70
3.31 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	71
3.32 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	72
3.33 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	73
3.34 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	74
3.35 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก	75

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.36 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0 vvm	78
3.37 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	79
3.38 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	80
3.39 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0 vvm	81
3.40 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	82
3.41 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	83
3.42 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0 vvm	84
3.43 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	85
3.44 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	86

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.45 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0 vvm	87
3.46 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	88
3.47 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และอัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	89
3.48 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการให้อากาศ 0 vvm	90
3.49 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm	91
3.50 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการให้อากาศ 0.36 vvm	92
3.51 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของ Funahashi และคณะ (1987b)	93
3.52 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1$ และ 5 ตามลำดับ	95
3.53 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1, 0.5$ และ 0.1 ตามลำดับ	95
3.54 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $q = 1$ และให้ $V_0 = 7.32, 5.5$ และ 3.66 ตามลำดับ	96
3.55 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้	97
3.56 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = q_2 = 1$	100

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.57 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1$	101
3.58 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.5$	102
3.59 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.1$	103
3.60 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.01$	104
3.61 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ)	106
3.62 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก	107
3.63 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ)	108
3.64 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลองสำหรับ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก	109
3.65 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 2 โซน มีปริมาตรเท่ากันคือ 5.5 ลิตร และให้ $q = 1$	111
3.66 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 5 โซน มีปริมาตรเท่ากันคือ 2.2 ลิตร และให้ $q = 1$	112
3.67 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 10 โซน มีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และให้ $q = 1$	112

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.68 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 20 โซน มีปริมาตรเท่ากันคือ 0.55 ลิตร และให้ $q = 1$	113
3.69 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (q) กับจำนวนโซน (i) ในรูปของสมการเส้นตรง ($m=0.1$) และสมการเอกโปเนนเชียล ($m=0.2, 0.5, 0.8, 1.0$)	115
3.70 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 0.001$	116
3.71 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 0.1$	116
3.72 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 1$	117
3.73 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกโปเนนเชียล แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 0.01$	117
3.74 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกโปเนนเชียล แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 0.1$	118
3.75 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมิวเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกโปเนนเชียล แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1, q = 1$	118
3.76 ขอบเขตงานวิจัยในที่นี้ (เส้นประ) และแนวทางการศึกษาต่อ	121

ตัวย่อและสัญลักษณ์

A_e	=	Aeration number
C_i	=	ความเข้มข้นของเทรชเซอร์ในโซนที่ i ($i = 1, 2, 3 \dots n$)
C_{micro}	=	ความเข้มข้นของเทรชเซอร์ใน micromixing region (กรัมต่อลิตร)
C_{macro}	=	ความเข้มข้นของเทรชเซอร์ใน macromixing region (กรัมต่อลิตร)
$C_{stagnant}$	=	ความเข้มข้นของเทรชเซอร์ใน stagnant region (กรัมต่อลิตร)
C'	=	ความเข้มข้นของเทรชเซอร์ใน micromixing region รวมกับ macromixing region (กรัมต่อลิตร)
D_a	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)
E_g	=	hold-up
F_g	=	อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
G'	=	มอดูลัสสะสม (storage modulus) (Pa หรือ N/m^2)
G''	=	มอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) (Pa หรือ N/m^2)
K	=	consistency index
$K_L a$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (วินาที ⁻¹)
n	=	plasticity or power law index
N	=	ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อวินาที)
N_p	=	เลขกำลัง
N'_{Re}	=	Modified Reynolds number
P	=	กำลัง (วัตต์)
P_g	=	กำลังในการกวนในสภาวะที่มีการให้อากาศ (วัตต์)
P_0	=	กำลังในการกวนในสภาวะที่ไม่มีการให้อากาศ (วัตต์)
q	=	อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (ลิตรต่อวินาที)
T	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (เมตร)
t_c	=	เวลาในการวนครบรอบ (วินาที)

t_{mix}	=	เวลาที่ใช้ในการผสม (วินาที)
V	=	ปริมาตรของถัง (ลิตร)
vvm	=	หน่วยของอัตราการให้อากาศ (ปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรของเหลวในถังหมักต่อนาที)
V_i	=	ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมในโซนที่ i ($i = 1, 2, 3 \dots n$)
V_{micro}	=	ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับไมโคร (ลิตร)
V_{macro}	=	ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับมาโคร (ลิตร)
$V_{stagnant}$	=	ปริมาตรของบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่ (ลิตร)
V'	=	ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับไมโครรวมกับปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับมาโคร (ลิตร)
W	=	ความกว้างของใบพัด (เมตร)
μ_a	=	ความหนืด (Pa.s)
τ	=	ทอร์ค (นิวตันเมตร)
ω	=	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

แซนแชนแกมจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ที่ผลิตออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular heteropolysaccharide) โดยการหมักของแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* (Funahashi *et al*, 1988) สารละลายแซนแชนแกมจะมีทั้งความหนืด และความ เป็นซูโดพลาสติคสูงมีความคงตัวในช่วงของ พีเอช, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเกลือที่กว้าง เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมเภสัชกรรม ฯลฯ เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้มข้น (thickening agent), สารให้ความคงตัว (stabilizers), สารหล่อลื่น (lubricant) ฯลฯ ใน กระบวนการหมักแซนแชนพบว่าหลังจากการหมักระยะหนึ่ง ความเข้มข้นของแซนแชนแกม และความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นสาเหตุทำให้อัตราการผลิตผลผลิตจำเพาะลดลง เนื่องจากการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังจุลินทรีย์ถูกจำกัด (Jana and Ghosh, 1995). จึงได้มีการศึกษา ความหลากหลายของรายละเอียดของถังหมักกัน เช่น ถังหมักแบบกวน (stirred tank reactor) กับใบพัดแบบต่างๆ, ถังหมักแบบลูปหมุนเวียนภายนอก (external circulation loop), ถังหมักแบบอากาศยก (air lift reactor), ถังหมักแบบ bubble column, รวมทั้งถัง หมักแบบ plunging jet, ที่ใช้สำหรับเพิ่มการถ่ายโอนออกซิเจนในอาหาร (Funahashi *et al*, 1987b)

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นงานขั้นเริ่มต้นเพื่อศึกษาผลของรายละเอียดและอัตราการให้อากาศ ต่อการผสมและไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวน กำลังที่ใช้ในกวนและการผสม เวลาที่ใช้ในการผสม รูปทรงและขอบเขตของโซนของการผสม และพารามิเตอร์แสดงระดับการผสม โดยวิธี วัดการตอบสนองของเทรซเซอร์ในบรอกจำลองโดยใช้แซนแชนแกมเป็นกรณีศึกษา โดยใช้แนวคิด ของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (Concept of increasing complexity procedure) จากนั้นนำผลจากการศึกษาดังกล่าวมาใช้เป็นบรรทัดฐานในการเลือกรายละเอียด ของถังหมัก และกำหนดสภาวะที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้ในการผลิตแซนแชนโดยการหมักจริง ด้วยเชื้อ *Xanthomonas campestris* ATCC 13951 ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการผลิต แซนแชนแกมสูงทั้งปริมาณและคุณภาพซึ่งจะมีการวิจัยต่อไปในอนาคต ผลจากการวิจัยนี้คาดว่าจะ เป็นข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยต่อไป และเป็นข้อมูลสำหรับการขยายขนาดการผลิตพอลิ เมอร์ชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ตรวจเอกสาร

1. โครงสร้างและการสังเคราะห์แซนแชนแกม

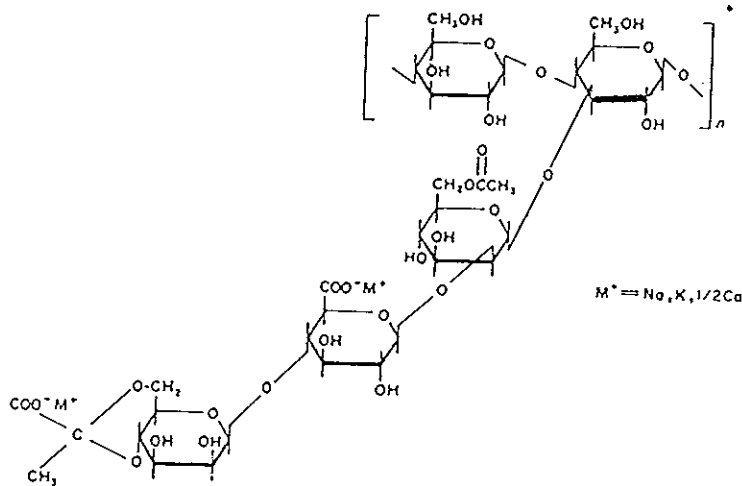
1.1 โครงสร้างของแซนแชนแกม

แซนแธนแกมเป็นสารจำพวกเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ ผลิตโดยแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* และได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมอื่นๆ (Zaidi *et al*, 1991) Margaritis และ Pace (1985) รายงานว่าโครงสร้างและองค์ประกอบของพอลิแซคคาไรด์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของจุลินทรีย์ แหล่งของสารตั้งต้น และสภาวะที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก

ดังได้แสดงในภาพที่ 1.1 โครงสร้างของแซนแธนแกมเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่มีโครงสร้างที่ซ้ำกัน (repeating unit) ของโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วย β -D-glucose จับกันที่ตำแหน่ง 1 และ 4 คล้ายกับโมเลกุลของเซลลูโลส และยังประกอบด้วย 2 โมเลกุลของ mannose และ 1 โมเลกุลของ gluconic acid เป็นโซ่ข้าง (side chain) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกลุ่มของไฮดรอกซิลประมาณร้อยละ 2-6 และกลุ่มของอะซิติกร้อยละ 4.5 (Sandford, 1979 ; Margaritis and Pace, 1985) Demain และคณะ (1981) ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของโมโนเมอร์ในโครงสร้างของแซนแธนแกม ระหว่าง D-glucose : D-mannose : D-gluconic acid เป็น 2 : 2 : 1 ตามลำดับ และยังประกอบด้วยหมู่อะซิติกร้อยละ 4.7 Cadmus และคณะ (1978) พบว่าตำแหน่งของ D-mannose จะมีกลุ่มของไฮดรอกซิลจับที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 4 และ 6 ของ D-mannose ตัวสุดท้าย ส่วนกลุ่มของอะซิติกจะจับที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 6 ของ D-mannose ที่ไม่ใช่ตัวสุดท้าย

แซนแธนแกมมีคุณสมบัติเป็นสารจำพวกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ที่ละลายน้ำได้ดี โดยมากแซนแธนในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเกลือของสารประกอบต่างๆ ผสมกัน เช่น โปแตสเซียม โซเดียม และแคลเซียม ฯลฯ โดยโลหะเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยาที่กลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) และพบว่าโปแตสเซียมจะเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุด (Betz, 1979)

Cadmus และคณะ (1978) พบว่าความหนืดมีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแซนแธนแกม โดยทั่วไปความหนืดของสารละลายแซนแธนแกมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุลของแซนแธนแกม และปริมาณของกลุ่มไฮดรอกซิลก็ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของแซนแธนแกม โดยแซนแธนที่มีคุณภาพดีจะมีกลุ่มของไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 ถ้าพบว่ามีกลุ่มของไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 3 จะถูกจัดว่าเป็นแซนแธนที่มีคุณภาพต่ำ

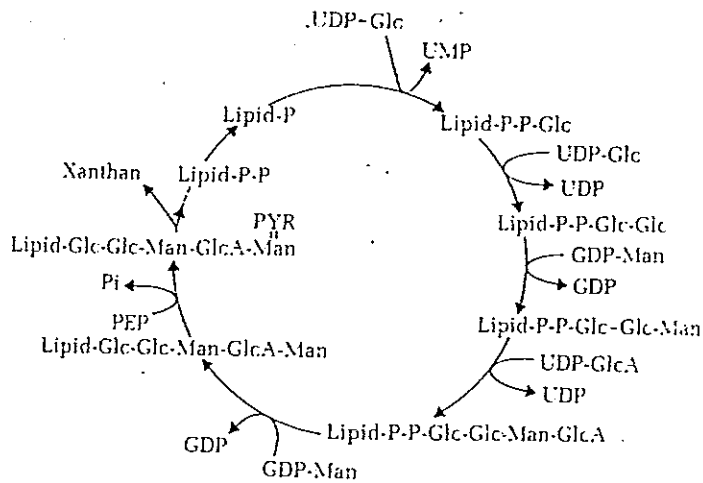


ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของแซนแทนกัม

ที่มา : Magaritis และ Pace (1985)

1.2 การสังเคราะห์แซนแทนกัม

แซนแทนกัมจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งถูกสร้างและปล่อยออกมาจากเซลล์ พบอยู่บริเวณนอกเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรีย ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้จัดเป็นโครงสร้างของเซลล์จุลินทรีย์ที่อยู่นอกผนังเซลล์ (cell wall) Dawes และ Sutherland (1992) พบว่าแซนแทนกัมจะถูกสร้างและปล่อยออกมาจากเซลล์โดยใช้ lipid diphosphate เป็นพาหะนำโครงสร้างของพอลิเมอร์ไปยังผนังนอกเซลล์ พาหะนี้อาจเรียกว่า C_{55} (isoprenoid lipid carrier) ซึ่งอยู่ในชั้นของเมมเบรนเป็นตัวขนส่งพอลิเมอร์ไปยังผนังนอกเซลล์ แต่ในการสังเคราะห์นั้นจะต้องอาศัย UTP (uridine triphosphate) และ GTP (guanosine triphosphate) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะต้องใช้รวมตัวกับโมโนเมอร์ให้อยู่ในรูปของ sugar nucleotide ที่จะใช้ในการสังเคราะห์เพื่อสร้างมาเป็นแซนแทนกัมที่แสดงในภาพที่ 1.2 นอกจากนี้การเติมกลุ่มของอะซิติลและไพริวริกในกระบวนการสังเคราะห์จะเติมในรูปของอะซิติลโคเอ (acetyl CoA) และ ฟอสโฟอินอลไพริวเวต (phosphoenol pyruvate)



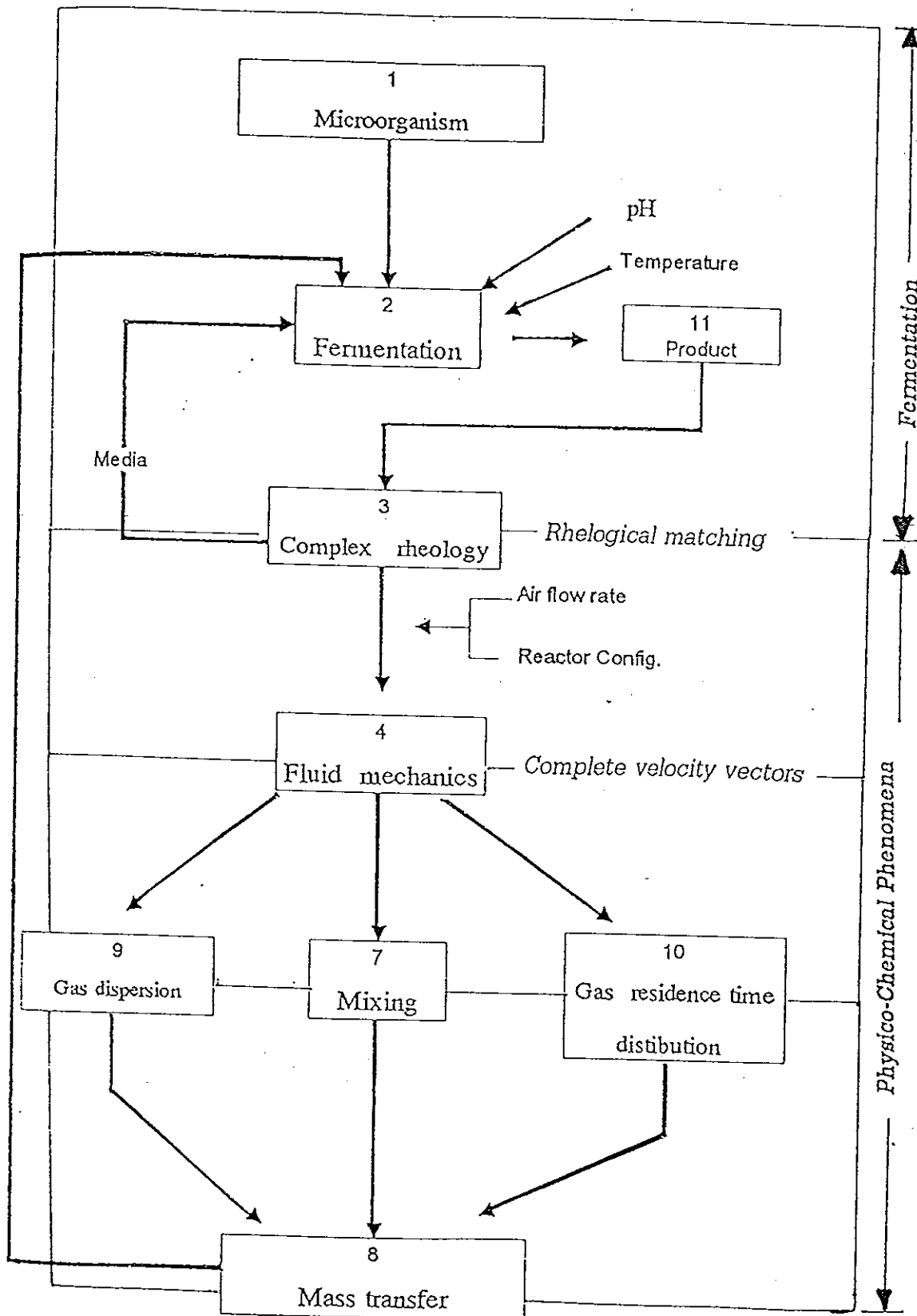
ภาพที่ 1.2 กระบวนการสังเคราะห์แซนแทนกัมโดยแบคทีเรีย
ที่มา : Vanderslice และคณะ (1989)

2. การผลิตแซนแทนในถังหมักแบบกวน

ขั้นตอนในการผลิตแซนแทนสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

- การเตรียมเชื้อ (Culture preparation)
- การหมัก (Fermentation)
- การเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ (Recovery)

ในการศึกษาปัญหาการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น แซนแทนกัม เมื่อพิจารณาภาพที่ 1.3 ซึ่งแสดงเหตุและผล (cause and effect) ของส่วนต่างๆ ของปัญหา สามารถแบ่งปัญหาออกเป็น ส่วนๆ ดังนี้คือ ส่วนแรก เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรง และอีกส่วนหนึ่ง ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการหมัก (ยุพดี สันติวุฒน์ 2538) ฉะนั้นจึงแยกปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการหมักได้ดังนี้



ภาพที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมัก และการแบ่งปัญหาเป็นส่วนย่อย (problem segmentation)

ที่มา : ยุพดี สันติวฒน์ (2538)

2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์โดยตรง

จุลินทรีย์พวก *Xanthomonas* หลายชนิดสามารถสร้างพอลิแซคคาไรด์ในระหว่างกระบวนการหมัก อย่างไรก็ตาม *Xanthomonas campestris* ได้รับความสนใจมากที่สุดเพราะเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตแซนแทนกัมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Kennedy and Bradshaw, 1984)

2.1.1 การผลิตแซนแทนกัม

ในการหมักแบบกะมีการเติมเชื้อ *X. campestris* ที่บริสุทธิ์ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ประกอบด้วยสารอาหารที่จำเป็นทั้งหมด การเตรียมหัวเชื้อ (inoculum) ประกอบด้วยการเลี้ยงเชื้อในหลายขั้นตอน ก่อนที่จะเติมลงไปในการเลี้ยงเชื้อสำหรับผลิตแซนแทนกัม ในการที่จะขยายขนาดการเลี้ยงเชื้อ การผลิตหัวเชื้อให้เพียงพอจะต้องใช้เวลาหลายวัน และหลังจากขั้นตอนนี้แล้วการหมักจะดำเนินต่อไปเป็นเวลา 48-96 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ จนกระทั่งสารตั้งต้นอย่างใดอย่างหนึ่ง (ซึ่งโดยปกติก็คือ คาร์โบไฮเดรต) ถูกใช้ไปจนหมด (Godet, 1973 ; Kennedy and Bradshaw, 1984)

แหล่งไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อ มีความจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งรวมไปถึงเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของแหล่งคาร์บอนไปเป็นแซนแทนกัมเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าถ้ามีไนโตรเจนที่เกินความต้องการก็จะทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างพอลิเมอร์ได้ (Souw and Demain, 1979)

Moraine และ Rogovin (1971) พบว่าถ้าไม่มีการควบคุมพีเอชในกระบวนการหมัก พีเอชจะมีค่าต่ำลงจนกระทั่งมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งหลังจากนั้นก็ทำให้การผลิตแซนแทนกัมเกิดขึ้นช้าลงอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้พีเอชของอาหารมีค่าอยู่ที่ค่าเหมาะสมที่สุดคือที่พีเอช 7 อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแซนแทนกัมคือ 28 องศาเซลเซียส (Moraine and Rogovin, 1966) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 28 องศาเซลเซียสจะทำให้ความหนืดของแซนแทนลดลง (Pace and Coote, 1981)

เป็นที่ทราบกันว่าการผลิตแซนแทนกัมซึ่งการหมักดำเนินไปในสภาวะที่มีอากาศจะมีความไวต่อข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนเป็นอย่างมาก (Robinson and Wang, 1988; Funahashi *et al*, 1987b; Pons *et al*, 1990) การให้อากาศและการผสมเป็นปัญหาหลักสำหรับการผลิตแซนแทน เนื่องจากบรอกที่มีคุณสมบัติเป็นนอนนิวโตเนียน (non-newtonian) มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น (ยุพดี สันติวุฒน์, 2538)

2.1.2 การเก็บเกี่ยวแซนแธนแกม

ในการเก็บเกี่ยวแซนแธนแกมโดยใช้เอธานอล พบว่าชนิดของเกลือ และความเข้มข้นของเอธานอลเป็นปัจจัยที่สำคัญ ส่วนอุณหภูมิ และความเข้มข้นของแซนแธนแกมเป็นปัจจัยรองลงมา สภาวะที่ดีที่สุดในการเก็บเกี่ยวแซนแธนแกมคือ ใช้เอธานอล 60 เปอร์เซ็นต์ เกลือโปแตสเซียมคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถเก็บเกี่ยวแซนแธนแกมได้ถึง 89-90 เปอร์เซ็นต์ (Gonzales *et al*, 1989) Lader และ Miescher (1967) พบว่าการตกตะกอน 2 ครั้งโดยการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วงพีเอช 5-6 แล้วจึงเติมเอธานอลลงไปร้อยละ 25 โดยปริมาตร จะทำให้ได้แซนแธนแกมที่บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

2.2 ปัจจัยที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์โดยตรง

2.2.1 ผลของถังหมักแบบกวน การกวน และการให้อากาศต่อประสิทธิภาพการผลิต

Baig และ Ahmad (1995) ศึกษากระบวนการหมักของเชื้อ *Xanthomonas cucurbitae* PCSIR B-52 ในถังหมักขนาด 10 ลิตรที่ใช้ใบพัดแบบ six-blade disc turbine (A) และใบพัดแบบ six vertically attached stabilizing fins (B) พบว่าถังหมักที่ติดตั้งใบพัดแบบ A ที่ใช้ความเร็วรอบในการกวน 5 รอบต่อวินาที มีผลทำให้ได้ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์และความหนืดสูงขึ้นและจะคงที่ในช่วงเวลาที่ 15 ของกระบวนการหมัก และถ้าเพิ่มความเร็วรอบในการกวนต่อจากชั่วโมงที่ 15 เป็น 10 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ก็จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์และความหนืดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในถังหมักที่ติดตั้งใบพัดแบบ B ที่ใช้ความเร็วรอบในการกวน 5 รอบต่อวินาที นั้นทำให้พอลิแซคคาไรด์และความหนืดเพิ่มขึ้นจนถึงชั่วโมงที่ 30 ของกระบวนการหมัก และปรากฏว่าปริมาณพอลิแซคคาไรด์และความหนืดจะเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนขึ้นเป็น 10 รอบต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่าถังหมักที่ติดตั้งใบพัดแบบ B จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์และปริมาณพอลิแซคคาไรด์สูงกว่าถังหมักที่ติดตั้งใบพัดแบบ A

อิทธิพลของอัตราการกวนต่อการเจริญของเซลล์และการผลิตแซนแธนแกมในถังหมักที่มีแผ่นกั้น ขนาด 10 ลิตร ที่ติดตั้งใบพัดแบบอินเตอร์มิก (intermig impeller) โดยศึกษาความเร็วรอบในการกวน 200-800 รอบต่อวินาที พบว่าการเจริญของเซลล์จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการกวนที่ความเร็วรอบต่ำกว่า 200 รอบต่อวินาทีเท่านั้น ถ้าอัตราเร็วในการกวนสูงขึ้นจะทำให้การเจริญของเซลล์นั้นไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากออกซิเจนถูกจำกัด และพบว่าความเข้มข้นของแซนแธนแกมหลังจากการหมักเป็นเวลา 90 ชั่วโมงจะสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็วในการกวนให้สูงขึ้น แสดงว่าออกซิเจนเป็นตัวจำกัดอัตราการสร้างแซนแธนแกม นอกจากนี้ได้ศึกษาชั้นเยื่อเมือก เพื่อแยกผลทางไฮโดรไดนามิกส์อันเนื่องมาจากอัตราเร็วของการกวนต่อการมีอยู่ของชั้นเยื่อเมือกออกจากผลเนื่องจากการถ่ายโอนมวลสาร โดยใช้ทั้งอากาศปกติที่ 0.33 vvm และอากาศที่เติมออกซิเจนเพิ่มเข้าไป พบว่าการหลีกเลี่ยงการขาดออกซิเจนโดยใช้อัตราเร็วในการ

กวนที่สูงหรือการเพิ่มความดันย่อยของออกซิเจนในเฟสก๊าซให้สูงขึ้น ให้ผลต่ออัตราการเกิดผลผลิตจำเพาะเหมือนกัน ผลการทดลองไม่ได้ไปถึงผลใดๆ ทางไฮโดรไดนามิกส์เนื่องจากการเพิ่มอัตราเร็วในการกวนต่ออัตราการผลิตแซนแทน กล่าวอีกนัยหนึ่งการทดลองบอกให้ทราบว่าชั้นเยื่อเมือกกรอบๆเซลล์มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนออกซิเจนน้อย และเมื่อได้ตรวจสอบชั้นเยื่อเมือกว่ามีจริงหรือไม่ โดยการใช้อัลตร้าซาวด์หรือนิเลคตรอน พบว่าชั้นเยื่อเมือกมีจริง และสามารถลอกหลุดได้ง่ายเมื่อมีการเขย่าในสารละลายน้ำเบาๆ นอกจากนี้ยังพบว่าในตัวอย่างที่ได้จากถังหมักที่มีการกวน ไม่มีอะไรบ่งบอกว่ามีแซนแทนที่มีความเข้มข้นสูงรอบผนังเซลล์เลย (Peter *et al*, 1989) Funahashi และคณะ (1987a) ศึกษาผลของความเร็วยกในการกวนในถังหมักขนาด 10 ลิตรที่ใช้ในกระบวนการหมักของเชื้อ *Xanthomonas campestris* ATCC 13951 ที่ติดตั้งใบพัดแบบ six flat-blade turbine พบว่าความเร็วยกในการกวนเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการผลิตแซนแทนกัม โดยอัตราการสร้างผลผลิตจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วยกในการกวนเพิ่มขึ้น และความเค้นเฉือน (shear stress) เป็นปัจจัยทางกายภาพที่มีความสำคัญเนื่องมาจากการกวน โดยพบว่าผลของความเค้นเฉือนต่ออัตราการสร้างผลผลิตจำเพาะและอัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนน้อยกว่า 40 ปาสคาล และหลังจากนั้นจะคงที่แม้จะเพิ่มความเค้นเฉือนก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งอัตราการสร้างผลผลิตจำเพาะและอัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน (shear rate) และยังแนะนำว่าการถ่ายโอนออกซิเจนและกลูโคสจากอาหารไปสู่เซลล์ ก็อาจจะเป็นตัวจำกัดการสร้างแซนแทนกัมเมื่อความเค้นเฉือนน้อยกว่า 40 ปาสคาล นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสก็สามารถเพิ่มอัตราการผลิตแซนแทนกัมจำเพาะขึ้นได้เช่นกัน

2.2.2 การถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer)

ในระบบการหมักแบบให้อากาศ การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจากสภาวะก๊าซไปยังพื้นผิวของเซลล์จุลินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญอันดับแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์มีมาก อัตราการเจริญของจุลินทรีย์จะถูกจำกัดด้วยปริมาณของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในบรอต ถังหมักจะถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้มีอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนในปริมาณที่มาก ความสามารถในการออกแบบถังหมักเพื่อให้มีอัตราการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความเข้าใจในเรื่องของการถ่ายโอนมวลและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ Kawase และ Moo-Young (1990) กล่าวว่าระบบการหมักแบบให้อากาศนั้น ป้อยครั้งอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนไปยังเซลล์จุลินทรีย์จะถูกจำกัดด้วยปัจจัยต่างๆ ฉะนั้นการถ่ายโอนออกซิเจนจึงมีความสำคัญมาก ออกซิเจนจะถูกถ่ายโอนจากฟองอากาศไปยังเซลล์ของจุลินทรีย์จะต้องผ่านความต้านทานการถ่ายโอนมวลมากมาย

ระดับของออกซิเจนที่ละลายอยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลของอากาศ ระดับของการกวน แบบแผนของการไหลของน้ำหมัก และความดันย่อยของออกซิเจน (oxygen partial pressure) ในขบวนการหมักจะต้องให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($K_L a$) ของ

ออกซิเจนที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้อัตราการให้ออกซิเจน เท่ากับอัตราการใช้ออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการ ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะขึ้นอยู่กับความมากน้อยของการกวน, อัตราการให้อากาศ (aeration-agitation intensity) และคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำหมัก นอกจากนี้สิ่งสำคัญในระบบการกวนและการให้อากาศ คือการควบคุมให้ได้ค่า K_La ที่ต้องการโดยใช้พลังงานน้อยที่สุดจะทำให้การหมักมีประสิทธิภาพที่สุด ทั้งในแง่ผลผลิตและพลังงาน

Ahmad และคณะ (1994) ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการหมัก โดยใช้ *Candida utilis* ในถังหมักแบบกะ ขนาด 2.0 ลิตร ใบพัดแบบ Flat blade turbine ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร พบว่าอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศจนถึงระดับที่จำกัดระดับหนึ่ง นอกจากนี้้ออัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะ (specific oxygen uptake rate, K_r) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศ เช่นกัน การเพิ่มความเร็วรอบในการกวนให้สูงขึ้น และการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอน (interfacial area, a) โดยเพิ่มอัตราการให้อากาศให้สูงขึ้น พบว่าจะไปเพิ่ม K_La และยังได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง K_La กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ดังนี้

$$K_La = 1.079 \times 10^{-3} N^{1.96}$$

Morain และ Rogovin (1973) กล่าวว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (K_La) จะลดลงเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้นำไปสู่ภาวะที่ออกซิเจนเป็นตัวจำกัดการเจริญ และอัตราการผลิตแซนแทนกัมในบางจุดของถังหมัก ขึ้นเมื่อกที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นรอบๆ เซลล์จะเป็นตัวกีดกันการแพร่ของสารอาหาร และ บรบทในระหว่างกระบวนการหมักไม่มีการผสมกันที่ดีพอ จึงเป็นสาเหตุสำคัญนำไปสู่ข้อจำกัดของการถ่ายโอนของสารอาหาร ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Funahashi และคณะ (1987a) อัตราการผลิตแซนแทนกัมจำเพาะ (specific production rate of xanthan gum, SPR) จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดความต้านทานการถ่ายโอนออกซิเจนและกลูโคสรอบๆ เซลล์โดยการเพิ่มความเค้นเฉือน นอกจากนี้ยังพบว่า SPR จะลดลงเช่นเดียวกับการลดลงของ K_La เมื่อค่าของ K_La น้อยกว่า 1.67×10^{-2} ต่อวินาที อย่างไรก็ตาม SPR จะไม่ขึ้นอยู่กับ K_La อีกต่อไป (คงที่) เมื่อ K_La มีค่ามากกว่า 1.67×10^{-2} ต่อวินาที

2.2.3 กำลังที่ต้องใช้ในการกวน (Power Consumption)

กำลังเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการผสม และการถ่ายโอนมวลสาร ความรุนแรงของกำลังที่ใช้ในการกวนมีผลทำให้ฟองอากาศแตกกระจาย และเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มกำลังในการกวนทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนและส่งผลให้บริเวณที่มีการผสมระดับไมโครเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเพิ่มกำลังที่ใช้ในการกวน นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความรุนแรงในการกวนจะทำให้เซลล์บาดเจ็บได้ โดยเฉพาะเซลล์สัตว์ ฉะนั้นการควบคุมปัจจัยต่างๆ อย่างเหมาะสม จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้กระบวนการหมักดำเนินไปอย่างดีที่สุด รวมทั้งต้นทุนในการผลิตก็ลดลงด้วย (Riet and Tramper, 1991)

McCabe และ Smith (1956) ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ต้องใช้ในการกวนและการผสม (เลขกำลัง หรือ Power number (N_p)) กับความรุนแรงในการกวน (เลขเรย์โนลด์ หรือ Modified Reynolds number (N'_{Re})) มีความคล้ายคลึงกับในกรณีของเหลวนิวโตเนียน อย่างไรก็ตาม เลขเรย์โนลด์ของของเหลวนอน-นิวโตเนียนที่ใช้จะมีนิยามที่ซับซ้อนมากกว่าในกรณีของเหลวนิวโตเนียน เพราะว่าความหนืดเฉลี่ย (average viscosity) ไม่คงที่เมื่ออัตราการเฉือนเปลี่ยนไป สำหรับการกวนของเหลวนอน-นิวโตเนียน เลขเรย์โนลด์มีนิยามดังสมการที่ 1

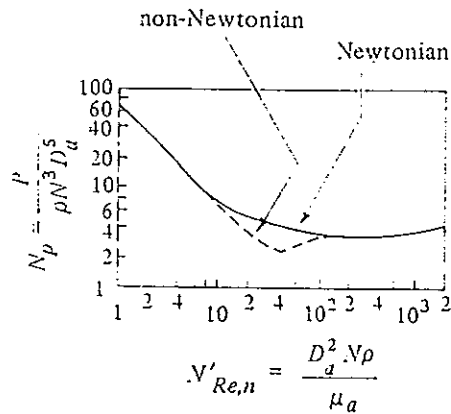
$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{11^{n-1} K} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_a} \quad (1)$$

โดยที่ N'_{Re} = Modified Reynolds number (ไม่มีหน่วย)
 n = plasticity or power law index (ไม่มีหน่วย)
 K = consistency index ($N \cdot s^n / m^2$)
 μ_a = ความหนืดเฉลี่ย (Pa.s)
 N = ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อวินาที)
 D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)
 ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ส่วนเลขกำลังมีนิยามเหมือนกับกรณีของเหลวนิวโตเนียนดังสมการที่ 2

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (2)$$

โดยที่ N_p = เลขกำลัง (ไม่มีหน่วย)
 P = กำลัง (วัตต์)
 ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



ภาพที่ 1.4 ความสัมพันธ์ของกำลังในการกวนสำหรับใบพัดแบบ flat six blade turbine ที่มีแผ่นกลม (disk) สำหรับของเหลวนิวโตเนียนและนอน-นิวโตเนียน

ที่มา: Geankoplis (1983)

จากภาพที่ 1.4 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังและเลขเรย์โนลด์ในเขตที่มีการไหลแบบลามินาร์ ($N'_{Re} < 10$) จะเห็นว่าเส้นกราฟมีความชันมาก ส่วนในเขตที่มีการไหลแบบทรานสิชัน ($10 < N'_{Re} < 10000$) และในเขตที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ($N'_{Re} > 10000$) กราฟมีความชันน้อยหรือแบนราบแสดงว่า N_p มีความผันแปรน้อยอยู่ในช่วง 2-8 เท่านั้น และไม่ขึ้นอยู่กับการไหลแบบปั่นป่วน (Geankoplis, 1983)

Taguchi และ Miyamota (1966) ได้ศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนของเหลวชนิดนอน-นิวโตเนียนสำหรับใบพัดแบบ Flat blade disk turbine ที่เส้นผ่านศูนย์กลางและความกว้างของใบพัดในอัตราส่วนต่างๆ จากขบวนการหมักที่มีและไม่มีการให้อากาศ โดยการวัดค่าทอร์ก (torque, τ) โดยที่กำลังที่ใช้ในการกวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 (Riet and Tramper, 1991)

$$P = \tau\omega$$

(3)

โดยที่ P = กำลัง (วัตต์)
 ω = ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
 r = ทอร์ค (นิวตัน-เมตร)

และพบว่าขนาดของใบพัดมีความสัมพันธ์ต่อกำลังที่ใช้ในการกวนสำหรับของไหลนอนนิวโตเนียนดังสมการที่ 4 (Taguchi and Miyamoto, 1966)

$$N_P = k(N_{Re})^\alpha \left(\frac{D_a}{T}\right)^\beta \left(\frac{W}{T}\right)^\gamma \quad (4)$$

โดยที่ D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)
 T = เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (เมตร)
 W = ความกว้างของใบพัด (เมตร)
 α, β, γ, k = ค่าคงที่

Sanchez และคณะ (1992) ได้ศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนบรธแซนแซนของใบพัดทั้งสามแบบคือ Rushton turbine (RT) , Pitch blade turbine (PT) , และ A-310 lightnin mixer (A-310) ในถังหมักที่มีปริมาตรบรทเท่ากับ 9.4 ลิตร โดยทำการทดลองสามชุดการทดลอง คือใบพัดแบบ RT-RT, ใบพัดแบบ RT-PT, และใบพัดแบบ RT-A-310 ในแซนแซนความเข้มข้น 5-40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราการให้อากาศ 0.25 vvm, 0.5 vvm, 1.0 vvm และปราศจากการให้อากาศ พบว่าอัตราการให้อากาศทำให้กำลังลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งตรงกันข้ามกับการใช้ใบพัดแบบ RTเพียงใบพัดเดียว อัตราการให้อากาศจะมีผลต่อการลดลงของกำลังที่ใช้ในการกวนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแซนแซนที่มีความเข้มข้นสูงๆ และระบบมีการให้อากาศ พบว่าทอร์คที่วัดได้มีค่าไม่คงที่ซึ่งทำให้ระบบการกวนมีอายุการใช้งานสั้นลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใบพัดแบบ RT-PT จากการศึกษาพบว่าใบพัดแบบ RT-RT ต้องการกำลังที่ใช้ทำให้ผลการผสมดีที่สุด และให้ผลผลิตแซนแซนกัมสูง นอกจากนี้ได้เสนอแนะว่า ถ้ามีการเปลี่ยนชนิดของใบพัด รูปแบบของการไหล และโครงสร้างภายในของถังหลายๆ แบบแล้วจะทำให้เข้าใจไฮโดรไดนามิกส์ที่ซับซ้อนภายในถังได้ดีขึ้น รวมทั้งควรมีการศึกษาระยะห่างระหว่างใบพัดและปัจจัยอื่นๆ ทางรีโวลยิวที่สำคัญ เช่น คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก อย่างลึกซึ้งและเป็นระบบมากขึ้น

2.2.4 การผสม (Mixing)

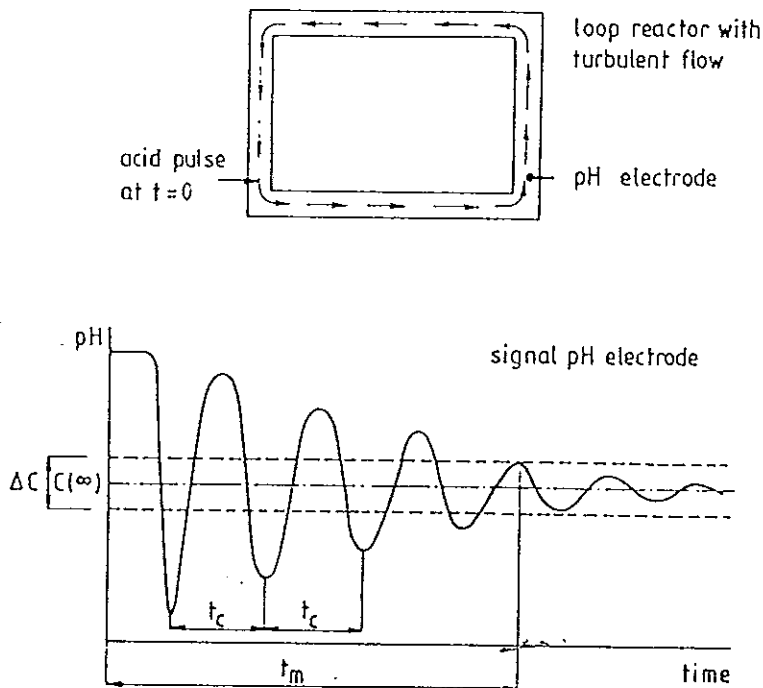
2.2.4.1 นิยามและมโนทรรคของการผสม

การผสม คือ กระบวนการลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของระบบ ระบบมีการผสมอย่างสมบูรณ์ถ้าองค์ประกอบต่างๆ ในระบบมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ไม่ว่าจะพิจารณาปริมาตรย่อยของระบบซึ่งมีขนาดเล็กเท่าใด ตรวจสอบเท่าที่ปริมาตรดังกล่าวไม่เล็กจนมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุล ในทางทฤษฎีสามารถแสดงการผสมโดยใช้พารามิเตอร์ 2 ตัวคือ

ขนาดของการผสม (scale of mixing) และความเข้มของการผสม (intensity of mixing) (Riet and Tramper, 1991)

2.2.4.2 เวลาในการผสม (mixing time, t_m)

เวลาในการผสม, t_m คือ เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดระดับการผสมที่ต้องการ หรือที่กำหนดขึ้นหลังจากฉีดเทรชเซอร์ลงไป และติดตามความเข้มข้นของเทรชเซอร์ที่ตำแหน่งเฉพาะตำแหน่งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 1.5

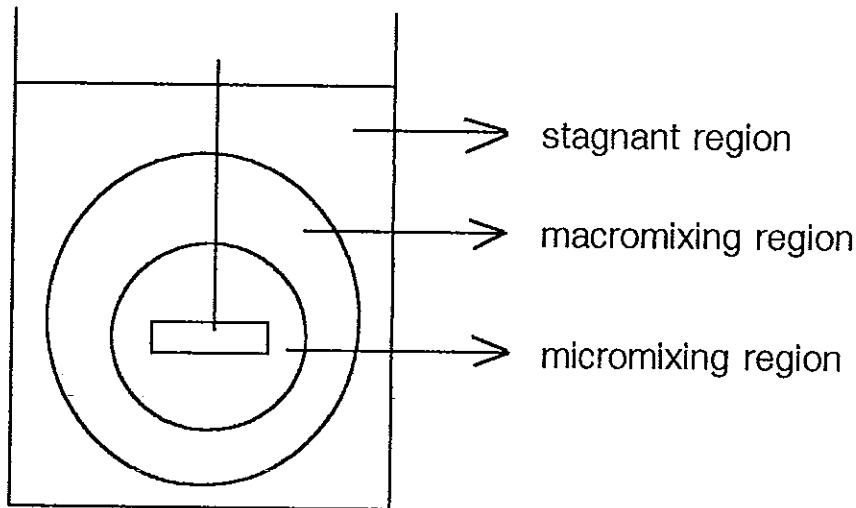


ภาพที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของการผสม กับ เวลาในการผสม
ที่มา : Riet และ Tramper (1991)

Funahashi และคณะ (1987b) ได้ศึกษาและสังเกตรูปแบบของการไหลและการผสมในถังหมักแบบกวน พบว่าปริมาตรทั้งหมดของถังอาจแบ่งได้เป็น 3 บริเวณดังภาพที่ 1.6

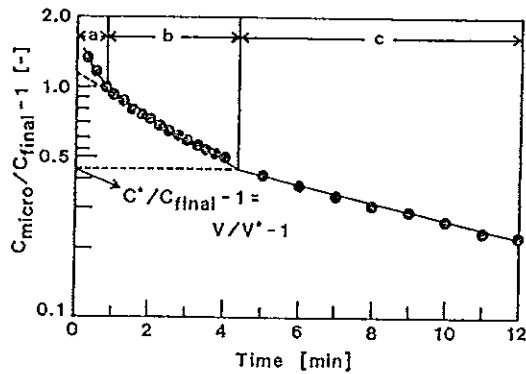
- บริเวณที่มีการผสมระดับไมโคร (micromixing region, V_{micro}) เป็นบริเวณที่ใกล้ๆ กับใบพัด ซึ่งมีการผสมกันอย่างดีจนเป็นเนื้อเดียวกันตลอดเวลา
- บริเวณที่มีการผสมระดับมาโคร (macromixing region, V_{macro}) เป็น

- บริเวณที่มีการไหลวนช้าแต่การไหลวนทั่วถึงกันตลอด
- บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่ง (stagnant region, V_{stagnant}) เป็นบริเวณที่ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่



ภาพที่ 1.6 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของ Funahashi และคณะ (1987b)

ปริมาตรของบริเวณผสม (volume of mixing region) สามารถคำนวณจากการวิเคราะห์อัตราการแพร่กระจายของเทรซเซอร์คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงพีเอชหลังจากฉีดเทรซเซอร์ลงไป 1-2 มิลลิลิตร ที่บริเวณใต้ใบพัด จากนั้นก็วัดพีเอชที่บริเวณใกล้เคียงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 10 นาที และพีเอชที่วัดได้สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้จากการเปรียบเทียบจากกราฟมาตรฐานระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Funahashi *et al*, 1987b) ดังภาพที่ 1.7 ความสัมพันธ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในถังหมักสามารถแบ่งได้เป็นสามบริเวณคือ a, b และ c ที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่เติมเข้าไป ที่แพร่จาก V_{micro} ไปยัง V_{macro} และ V_{stagnant} ตามลำดับ ดังนั้น C_{micro} และ V_{micro} สามารถคำนวณหาได้จากความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่จุดเปลี่ยนจาก a ไปยัง b ดังภาพ และ C' กับ V' สามารถคำนวณหาได้จากความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่จุดเปลี่ยนจาก b ไปยัง c ดังภาพ และถ้าไม่มี V_{stagnant} อยู่ในถังหมัก V_{macro} จะได้จากปริมาตรของเหลวในถังทั้งหมดลบด้วย V_{micro} ($V - V_{\text{micro}}$) เป็นต้น



ภาพที่ 1.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_{\text{micro}}/C_{\text{final}} - 1)$ กับ เวลา
ที่มา : Funahashi และคณะ (1987b)

Baig และ Ahmad (1995) ศึกษาารูปแบบของใบพัด และความเร็วรอบในการกววนในถังหมักแบบกวนขนาด 10 ลิตร พบว่าใบพัดแบบ A (six-bladed disc turbine) และใบพัดแบบ B (six vertically attached stabilizing fins) นั้นทำให้เกิดปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณที่แตกต่างกันในระหว่างการผลิตโพลีแซคคาไรด์ของเชื้อ *Xanthomonas cucurbitae* PCSIR B-52 ซึ่งใช้ระยะเวลาในการหมักเป็น 50 ชั่วโมง หลังจากการเพิ่มความเร็วรอบในการกววนจาก 10 รอบต่อวินาทีเป็น 20 รอบต่อวินาที พบว่าใบพัดแบบ B ทำให้บริเวณที่มีการผสมระดับไมโครและมาโครเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งลดลง ส่วนใบพัดแบบ A ไม่ได้ทำให้บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งลดลง และพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการกววนของใบพัดทั้งสองแบบจาก 5 รอบต่อวินาทีเป็น 10 รอบต่อวินาที ไม่ทำให้บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งลดลงแต่อย่างใด

สำหรับเซนเซนที่มีความเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรของการผสมระดับไมโครและระดับมาโครจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความเร็วรอบในการกววนที่ต่ำกว่าค่าวิกฤต (ที่ระดับความเร็วรอบในการกววนที่ทำให้ V_{macro} มีค่าสูงสุด) แต่ถ้าความเร็วสูงกว่าค่าวิกฤตแล้ว ปริมาตรที่มีการผสมระดับไมโครจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเท่ากับปริมาตรของของเหลวทั้งหมดในถัง ในขณะที่ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับมาโครลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของเวลาในการวนครบรอบจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกววนที่ความเร็วรอบในการกววนสูงกว่าค่าวิกฤต ซึ่งตรงข้ามกับในกรณีที่มีความเร็วรอบต่ำกว่าค่าวิกฤต พบว่าเวลาในการวนครบรอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกววน ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการกววนที่เกินค่าวิกฤตทำให้บริเวณที่มีการผสมเพิ่มขึ้น และค่าวิกฤตจะเปลี่ยนไปอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของเซนเซนกัมเพิ่มขึ้น (Funahashi *et al*, 1987b)

2.2.4.3 เวลาในการวนครบรอบ (circulation time)

Funahashi และคณะ (1987b) กล่าวว่าเวลาในการวนครบรอบในของเหลวซูโดพลาสติก เช่น แซนแซนแกมในถังหมักแบบกวนที่ติดตั้งใบพัดแบบ six flat blade turbine นั้นขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของแซนแซนแกม ความเร็วรอบในการกวน และอัตราการให้อากาศ และได้วัดเวลาในการวนครบรอบภายในถังหมักแบบกวนโดยใช้ magnetic particle เป็นเทอร์ชเซอร์ เมื่อเทอร์ชเซอร์เคลื่อนที่ผ่านและข้ามคอยด์ทองแดงจะทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าและส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ ระยะเวลาระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าสองครั้งก็คือ เวลาในการวนครบรอบ.

ผลของการศึกษาเวลาในการวนครบรอบของสารละลายแซนแซนแกมความเข้มข้น 0.9–4.6 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมักแบบกวนที่ติดตั้งใบพัดแบบ six flat blade turbine พบว่าในสารละลายแซนแซนแกมที่มีความเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า รวมทั้งสภาวะที่มีการให้และไม่ให้อากาศ ยังคงมีบริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งอยู่ในถังหมัก ดังนั้นจุดวิกฤตของความเร็วยรอบในการกวนเพื่อไม่ให้มีบริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งในถังหมักจะสูงขึ้นเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น และเวลาในการวนครบรอบเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความเร็วยรอบในการกวน เมื่อบริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งยังคงมีอยู่ในถังหมัก (Funahashi *et al* , 1987b)

ดังนั้นในการศึกษาผลของรายละเอียดและอัตราการให้อากาศต่อการผสม และไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวนที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแซนแกม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสำหรับการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ที่ใช้ในการผลิตแซนแซนแกมนั้น ควรจะต้องทำการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น โดยศึกษาเพิ่มสิ่งที่ เป็นปัจจัยเข้าไปทีละอย่าง แล้วดูผลของปัจจัยนั้นว่าจะทำให้มีอะไรเปลี่ยนแปลงบ้าง ซึ่งจะทำให้เข้าใจเชิงเหตุและผลอย่างชัดเจน และจุดมุ่งหมายของการวิจัยแบบนี้ก็คือ หลังจากเข้าใจอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกันแบบแยกส่วนแล้ว จึงค่อยนำมาประกอบเข้าด้วยกันและดูผลของปัจจัยต่างๆ เมื่อมีการผันแปรพร้อม ๆ กัน เพื่อดูอันตรกิริยาในสภาวะการหมักจริง ที่จะได้กล่าวต่อไป เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบและขยายขนาดระบบการผลิตแซนแซนแกมต่อไป

3. วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (Approach of increasing complexity)

3.1 ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis

แม้ว่าได้มีการทดลองและหาสหสัมพันธ์ (correlations) ต่าง ๆ จำนวนมากที่ทำนายตัวแปรที่ใช้ออกแบบถังปฏิกรณ์ แต่มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้น กรณีของของไหลที่มีความซับซ้อนทางรีโอโลยี (Siripatana, 1992)

Charles (1985a, 1985b) ได้ศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ และได้ประเมินสหสัมพันธ์ที่มีผู้เสนอขึ้นเท่าที่ผ่านมาว่าสามารถที่จะเอามาใช้งานได้เพียงใด สรุปว่า ถึงแม้ว่ารีโอโลยีของน้ำหมัก จะมีความสำคัญมากในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ แต่ปรากฏว่ามีคนสนใจ

น้อยที่จะนำความรู้ในเรื่องรีโวลูชันนี้มาใช้ในการขยายขนาดจริง ๆ สหสัมพันธ์ส่วนใหญ่สำหรับการใช้กำลังงาน (power consumption) และการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) มักจะมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

- ในทุกกรณี ถังหมักมีขนาดเล็ก
- ไม่มีการใช้น้ำหมักจริง
- รีโวลูชันและลักษณะอื่นๆ ที่สำคัญไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างที่ควรจะเป็น
- ปัจจัยในด้านโครงสร้างทางเรขาคณิต (geometry factor) ไม่ได้มีการศึกษาอย่างเพียงพอ

- การศึกษาส่วนใหญ่ยังไม่เป็นระบบอย่างเพียงพอ นั่นคือเมื่อได้ข้อมูลแล้วก็มุ่งแต่จะหาสหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้มองว่าจริงๆ แล้วสหสัมพันธ์นั้นไม่ได้ตอบคำถามอะไรมากนัก นอกจากว่าเป็นผลสรุปการทดลองแต่เพียงอย่างเดียว

สหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานและการถ่ายโอนมวลสาร $K_L a$ (ของของไหลนอน-นิวโตเนียน) แสดงความแปรปรวน (variations) มาก ยิ่งไปกว่านั้นผลที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่มีอยู่มักจะไม่ตรงกับสภาวะจริง (Charles, 1985a, 1985b)

มีสหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานที่ตีพิมพ์ไว้อยู่บ้างสำหรับน้ำหมักนอน-นิวโตเนียนที่มีการให้อากาศ Charles (1985a, 1985b) แสดงข้อคิดเห็นว่ามีเพียงงานของ Tagushi และคณะ (1968) และ Michael และ Miller (1962) เท่านั้นที่ทำการทดลองไว้ในช่วงกว้าง อย่างไรก็ตามมีสิ่งสำคัญที่พึงตระหนักว่า สหสัมพันธ์ทั้งสองนั้นไม่สอดคล้องซึ่งกันและกัน และที่สำคัญในการหมักปริมาณมากพบว่าสหสัมพันธ์ทั้งสองให้ผลที่แตกต่างกันประมาณ 2-3 เท่า

จะเห็นว่าสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่มีผู้ทำการทดลองไว้มากมายนั้นให้ข้อสรุปที่ขัดแย้งกันเอง อีกทั้งการหาสหสัมพันธ์แบบเดิมนั้น ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ได้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการทดลองเนื่องจากไม่มีพื้นฐานความเข้าใจที่ลึกซึ้งเพียงพอที่จะเอามาใช้ในสภาวะใกล้เคียง เพราะไม่ทราบผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยืดหยุ่น (elasticity) อย่างชัดเจน ทราบเพียงแต่ผลโดยรวม ๆ ของปัจจัยเหล่านั้น

ดังนั้นจึงเกิดคำถามขึ้นว่า การใช้วิธีการศึกษาในลักษณะที่รวบรวมทั้งหมด คือ แปรเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ศึกษาผล แล้วนำมาสรุปโดยที่ไม่ต้องใช้ความเข้าใจอะไรนั้นถูกต้องดีแล้วหรือไม่ หรือว่าควรที่จะทำการทดลองศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ให้เห็นชัดเจนก่อน แล้วค่อย ๆ เพิ่มความซับซ้อนขึ้นมา สิ่งนี้คือต้นเหตุและจุดเริ่มของวิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น เพราะแนวทางนี้ต้องการความเข้าใจมากกว่าที่จะรวบรวมสรุปดังที่ได้มีผู้ศึกษาและกระทำไว้มากแล้ว

สรุปว่าถ้าจะศึกษาให้เป็นระบบแล้วควรมีการศึกษาอย่างเป็นขั้นตอนที่มีการเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้นทีละน้อยโดยเพิ่มสิ่งที่เป็นปัจจัยเข้าไปทีละอย่าง แล้วดูผลของการเพิ่มปัจจัยนั้น ๆ จะทำให้มีอะไรเปลี่ยนแปลงบ้าง จะทำให้เข้าใจเหตุและผล (cause and effect) ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำคัญเพื่อนำไปใช้ในการขยายขนาด

3.2 แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (The concept of increasing complexity procedure)

ระบบที่มีความซับซ้อน ไม่ใช่เป็นเพียงว่าใช้อุปกรณ์ หรือคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเท่านั้นที่จัดการกับการทดลอง แต่ต้องการการทดลองที่เป็นระบบ Siripatana (1992) ได้วิจารณ์แบบวิธีการวางแผนการทดลองเชิงสถิติที่มีประสิทธิภาพสูงว่าเป็นวิธีการที่ตรงข้ามกับแนวทางการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ซึ่งแนวทางนี้จะจัดเรียงการทดลองในลักษณะที่ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่ต้องการ (objective function) สามารถที่จะทดสอบแยกเป็นส่วนๆ ได้ ในขั้นต้นของการทดลอง หลังจากที่ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่ต้องการนั้นชัดเจนแล้ว จึงค่อยรวมความซับซ้อนเหล่านั้นเพิ่มขึ้น

จุดมุ่งหมายสุดท้ายของแนวทางนี้คือ การระบุผลของแต่ละปัจจัยได้กระจ่างชัดอย่างที่อันตรกิริยาจริงควรจะเป็น Siripatana (1992) เชื่อว่าไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง, ปริมาณความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล โดยการรวบรวมทุกๆ สาเหตุเข้าด้วยกันระหว่างการทดลอง และหวังว่านัยสำคัญของแต่ละปัจจัยจะถูกระบุโดยวิธีการทางสถิติ ทั้งนี้เพราะโอกาสที่จะมีข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคทางการทดลอง และแบบจำลองทางสถิติที่สมมติขึ้นนั้นเป็นไปได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง

แนวทางนี้ต้องใช้เวลาและงบประมาณ อีกทั้งยังต้องการรายละเอียดในการวัดมากกว่า ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ความเร็วในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว, การกระจายของขนาดฟองอากาศ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับบางปัญหาที่ยากมากๆ จะไม่สามารถคาดหวังผลที่จะให้ค่าทางปฏิบัติ (practical value) ในเวลาอันสั้นได้

ในการนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัญหาการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ ลองมาพิจารณาในกระบวนการออกแบบดังหมักทั้งกระบวนการ พิจารณาภาพที่ 1.3 ซึ่งแสดงเหตุและผล (cause and effect) ของส่วนต่างๆ

จากลักษณะของปัญหาเช่นนี้ สามารถแบ่งปัญหาเป็นส่วน ๆ ดังนี้ ชั้นแรก แบ่งส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรง และอีกส่วนหนึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์หรือการหมักโดยตรงออกจากกันก่อน เนื่องจากถ้าทำการหมักแล้ว ไม่สามารถศึกษาหรือทำการทดลองอย่างลึกซึ้งได้เลย เพราะว่ากลไกและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องมีมากเกินไป อีกทั้งปัจจัยทางชีวภาพนั้นซับซ้อน ไม่มีความสม่ำเสมอ และหากใช้บรอดจริงในการศึกษาแล้ว จะเกิดปัญหาต่างๆ เช่น บรอดจริงควบคุมยากเพราะต้องอยู่ในสภาพที่ปราศจากเชื้อ การทดลองต้องใช้เวลาานาน ต้องใช้เครื่องและเทคนิคที่ซับซ้อนและมีราคาแพง ผลที่ได้มีความผันแปรสูง ป้อยครั้งที่การวัดไม่สามารถทำได้ ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา อาจแบ่งปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมัก และไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหมักออกจากกัน และการที่จะแบ่งปัญหาในส่วนนี้ได้ ก็ จะพบปัญหาในเรื่องบรอดจริง บรอดจริง - บรอดปลอมหรือของไหลจำลอง (สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้น เพื่อแยกปัญหาในส่วนอันเนื่องมาจากการหมักออกไปก่อน) นั้นอาจ

จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคบางอย่างที่สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมโยงผลการทดลองที่ได้จากบรอตจำลอง ให้สามารถประยุกต์ใช้กับบรอตที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักจริงได้ เป็นที่ทราบกันว่าของไหลถึงแม้จะต่างชนิดกันถ้ามีสมบัติทางด้านรีโอโลยีเหมือนกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสมบัติทางรีโอโลยีดังกล่าวนี้ไม่ใช่แค่เพียงความหนืด หรือ รีโอแกรม (ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน) รวมทั้งจะต้องเหมือนกันในเรื่องสมบัติวิสโคอีลาสติกด้วย ซึ่งถ้าสารละลายเป็นสารละลายที่ต่างชนิดกัน การที่จะหาสารละลายที่มีสมบัติทางรีโอโลยีเหมือนกับบรอตอย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก สิ่งที่ทำได้ก็คือพยายามเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยี (rheological matching) ซึ่งต้องหาวิธีการที่จะเทียบเคียงทางรีโอโลยีอย่างมีระบบ

การพัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางด้านรีโอโลยีนั้นเป็นเรื่องสำคัญที่ยังมีการสนใจกันน้อยมาก หากมีการพัฒนาวิธีการเทียบเคียงที่เชื่อถือได้ขึ้นมา ก็จะช่วยให้นำผลการทดลองโดยใช้ของไหลชนิดหนึ่ง มาใช้ในการออกแบบกับของไหลอีกชนิดหนึ่งได้ ถ้าของไหลทั้งสองไม่แตกต่างกันมากเกินไป หรือพอที่จะเทียบเคียงกันได้ การออกแบบและการขยายขนาดสำหรับระบบการไหลพวกลิเมอร์ก็คงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางรีโอโลยีที่อาศัยรีโอแกรมในเทอมของ Power law model parameter (n และ K) และอาศัยสมบัติวิสโคอีลาสติก (G' และ G'') เป็นบรรทัดฐานในการเทียบเคียง หลังจากที่ได้ทำการเทียบเคียงทางรีโอโลยีแล้ว จึงเริ่มศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในส่วนถัดไปคือผลของรีโอโลยี อัตราการไหลของอากาศและลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ต่อกลศาสตร์ของของไหล (Siripatana, 1992)

สรุปขั้นตอนในการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพโดยการหมักจุลินทรีย์ ในงานวิจัยขั้นสมบูรณ์แสดงได้ดังนี้

1. ศึกษารีโอโลยีที่ซับซ้อน
2. ศึกษาผลของรีโอโลยีเชิงซ้อนที่มีผลต่อกลศาสตร์การไหล โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาคหรือเทคนิคอื่นๆ
3. ศึกษาผลของกลศาสตร์การไหลที่มีต่อการกระจายของฟองอากาศ, การผสม, การกระจายของขนาดและเวลาเรซีเดนซ์ของฟองอากาศ
4. ศึกษาผลของการกระจายของฟองอากาศ, การผสม, การกระจายของขนาดและเวลาเรซีเดนซ์ของฟองอากาศที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสาร
5. ศึกษาผลของการถ่ายโอนมวลสารที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการเจริญและการสร้างพอลิเมอร์ชีวภาพของจุลินทรีย์

เมื่อเข้าใจอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีต่อกันแบบแยกส่วนแล้ว จึงค่อยนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบและการขยายขนาดระบบการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของรายละเอียดและอัตราการใช้อากาศต่อการผสม และไฮโดรไดนามิกส์ในถังหมักแบบกวนที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแธน โดยวิธีวัดการตอบสนองของเทอร์เซอร์
2. เพื่อนำผลจากการศึกษาในบรอกจำลองมาใช้เป็นบรรทัดฐานในการเลือกรายละเอียดของถังหมัก และกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการผลิตแซนแธนในกระบวนการหมักจริงด้วยเชื้อ *Xanthomonas campestris* ATCC 13951 ที่จะมีการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

1. แชนแชนกัมผง KTL 73223A ผลิตจากรัฐคาลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา มีความชื้นเฉลี่ย 12.3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
2. โซเดียมเอไซด์ (NaN_3) เกรดห้องปฏิบัติการ
3. สารละลาย HCl ความเข้มข้น 5 โมลาร์
4. สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์
5. สารต้านทานการเกิดฟองจำพวกซิลิกอนโพลีเมอร์ เกรดห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์

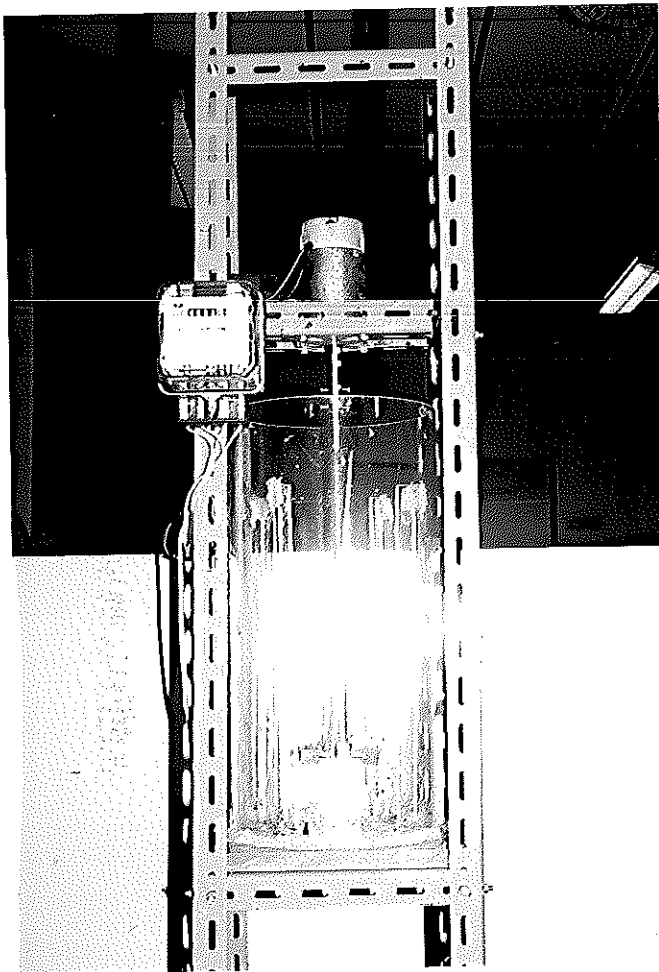
1. ถังหมักแบบกวนและรายละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 2.1
รายละเอียดของถังหมักแบบกวน
 - 1.1 ปริมาตรของถัง 12 ลิตร
 - 1.2 เส้นผ่าศูนย์กลางของถัง 0.25 เมตร
 - 1.3 ความสูงของถัง 0.40 เมตร
 - 1.4 แผ่นกั้นการไหล 4 ตัว
2. ปัมอากาศ (Air compressors) ยี่ห้อ TIGER รุ่น MK 100
3. Flow meter ขนาด 1-10 ลิตรต่อนาที รุ่น PAT 3675481 Series RMP ของบริษัท DWYER INSTRUMENT, INC
4. วัดวัตต์มิเตอร์สำหรับวัดกำลังในการผสม (Single-Phase-Watt-Hour meter Type DD28 220V 5(10)A 50Hz)
5. เครื่องวัดพีเอช และชุดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ พัฒนาโดย สุธา เกลาฉืด (2540) และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แสดงในภาพที่ 2.2
6. เครื่องวัดความหนืด (HAAKE Viscometer System CV 20)
7. มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้าพร้อมใบกวนที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแชนแชนกัม

วิธีการ

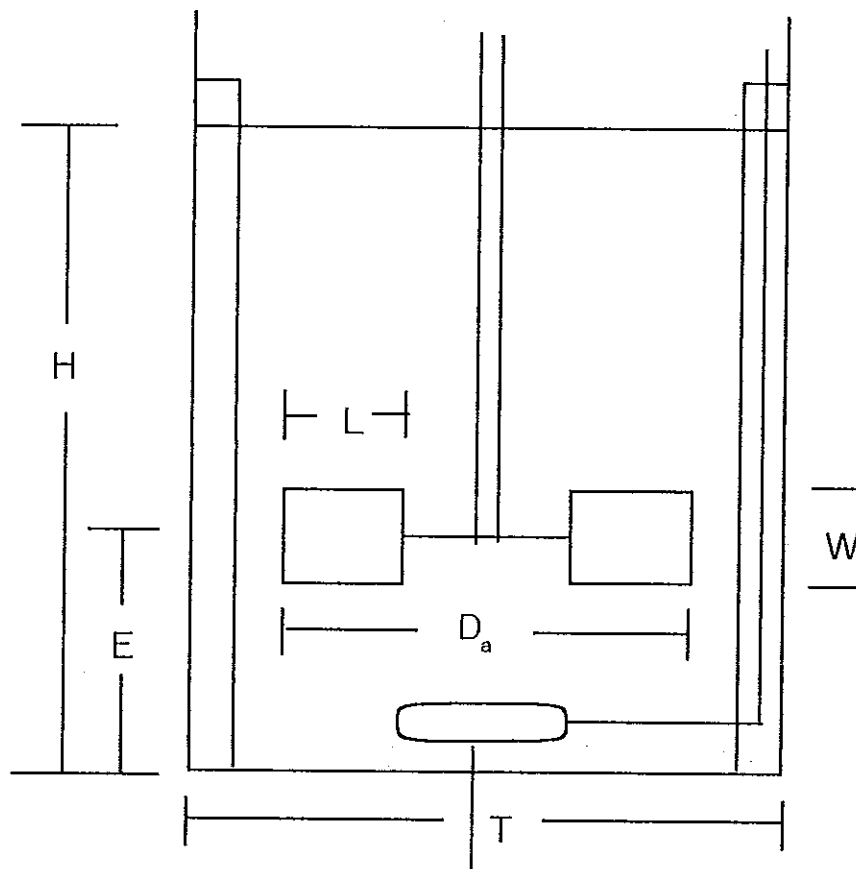
1. เตรียมสารละลายแชนแชนกัม

ซึ่งผงแชนแชนกัมตามปริมาณที่คำนวณได้ ค่อยๆ ละลายผงแชนแชนกัมปริมาณน้อยๆ ลงในน้ำ (น้ำกรอง) ในปริมาตรที่คำนวณได้ (ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 โดยน้ำหนัก) โดยใช้มอเตอร์ที่ติดใบกวนช่วยในการละลาย จนกระทั่งละลายเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งเติมสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (โซเดียมเอไซด์) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเก็บไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้คุณสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแชน

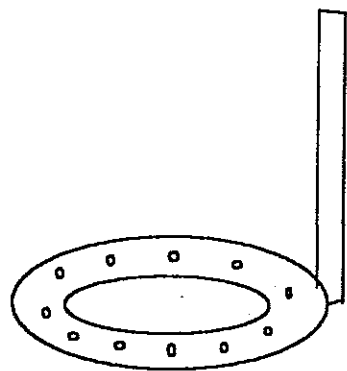
แท่นที่เตรียมขึ้นมีความคงตัวและสม่ำเสมอ ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง และค่าต่างๆ ของคุณสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทน (G' , G'' , K , n) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงมาจาก ยุพดี สันติวุดน์ (2538) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง



(a)



ตัวให้อากาศ (Sparger)



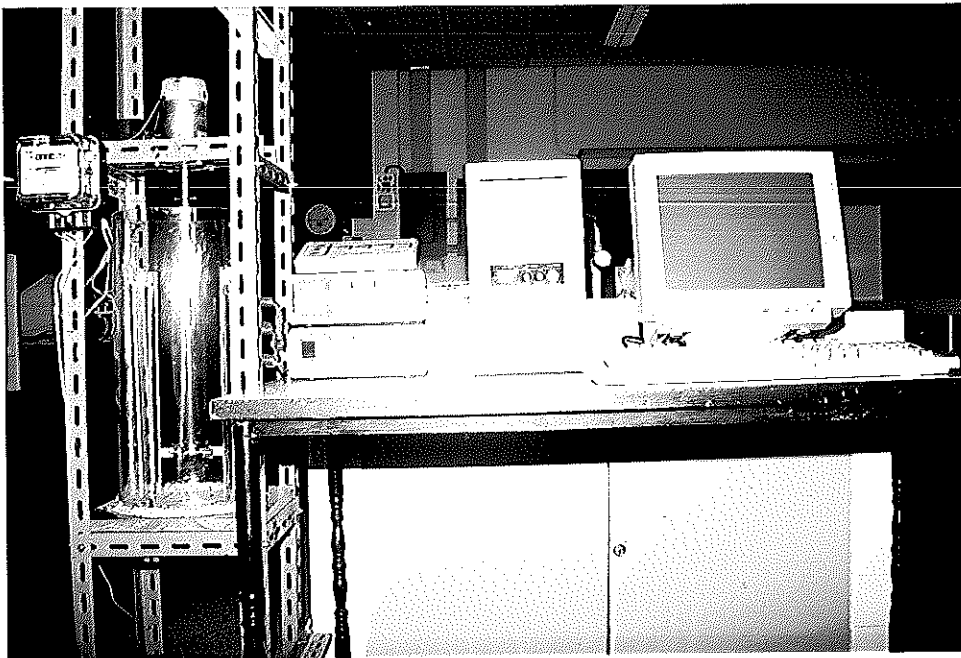
ตัวให้อากาศ (Sparger)

(b)

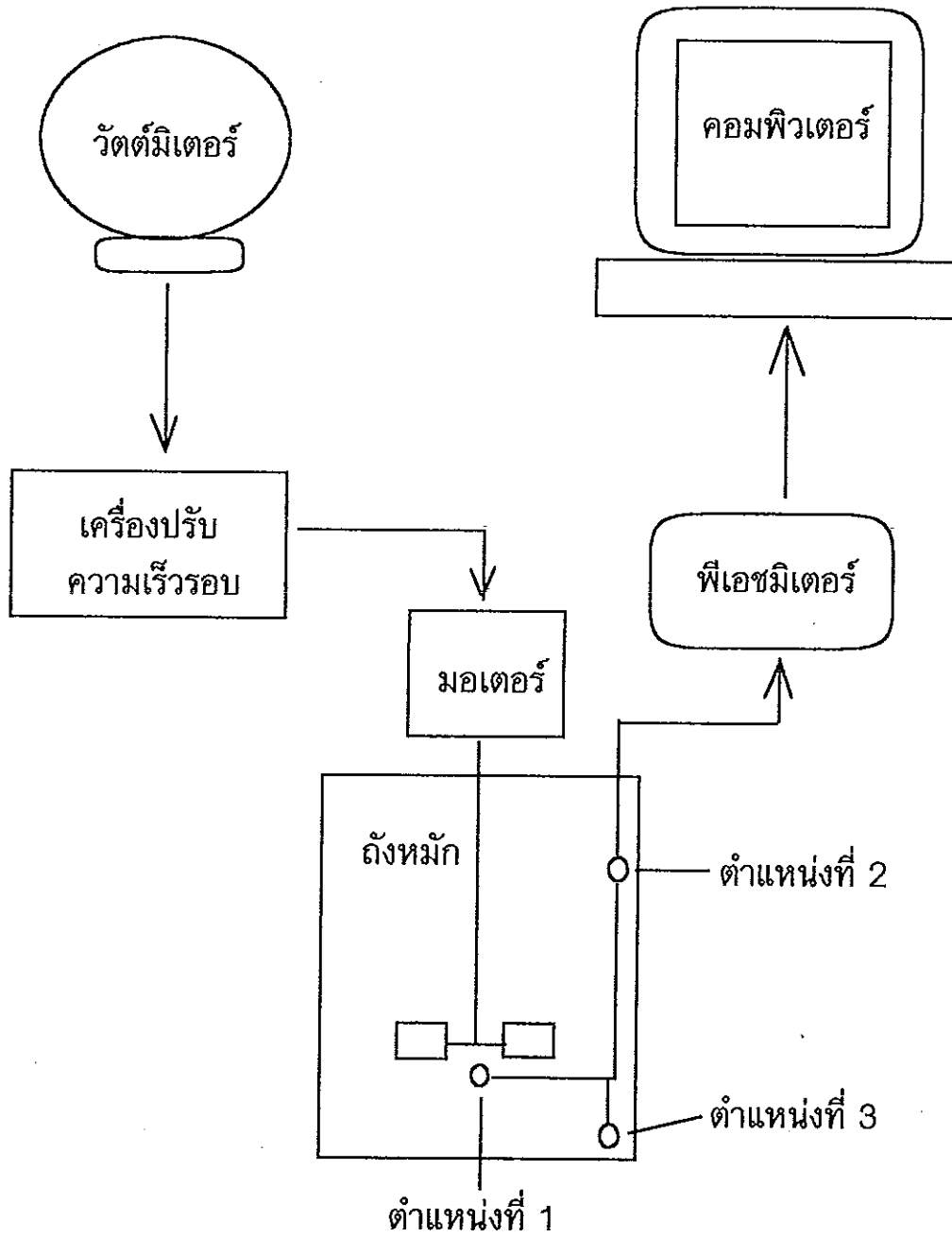
ภาพที่ 2.1 รายละเอียดของถังหมักแบบกวนที่ใช้ในการทดลอง

(a) ถังหมักแบบกวนที่ใช้ในงานวิจัย

(b) มิติของถังหมักแบบกวน และ ตัวให้อากาศ (เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06 เมตร)



(a)



(b)

ภาพที่ 2.2 ถังหมักแบบกวนพร้อม เครื่องวัดพีเอช, ชุดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ และตำแหน่ง สำหรับการวัดการตอบสนองของทรานส์เซอรัททั้ง 3 ตำแหน่ง

2. ศึกษาผลของรายละเอียดของถังหมักแบบกวนและอัตราการให้อากาศต่อกระบวนการไหลกำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม รูปลักษณะการไหล และพารามิเตอร์แสดงระดับการผสม โดยวิธีวัดการตอบสนองของเทรซเซอร์ในบรอกซ์จำลอง (สารละลายแซนแซนแกม)

2.1 ศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม (Power consumption)

2.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังภาพที่ 2.2 และตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดเพื่อทำการทดลอง (จากการทดลองใช้ความเร็วรอบในการกวนสามระดับคือ 2.5, 4.166, 5.833 รอบต่อวินาที ใบพัดสองแบบคือ Flat blade turbine และ Pitched blade turbine และอัตราการให้อากาศสามระดับคือ 0, 0.18, 0.36 vvm ในสารละลายแซนแซนแกมความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนัก)

2.1.2 บันทึกกำลังที่ต้องใช้ในการกวนจากวัตต์มิเตอร์ และ นำผลของกำลังที่ได้ไปคำนวณหาเลขกำลัง (Power number) และเลขเรโนลด์ (Reynold number) ตามวิธีการของ McCabe และ Smith (1956) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาคผนวก ก.

2.2 ศึกษา Hold-Up ที่ได้จากการทดลอง

2.2.1 ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดตามหัวข้อ 2.1.1

2.2.2 บันทึกความสูงที่เพิ่มขึ้นจากถังหมักเพื่อนำไปคำนวณหา Hold-Upตามวิธีการของ Cieszkowski และ Dylag (1994) ดังแสดงในภาคผนวก ก.

2.3 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม (Mixing time, t_{mix}) โดยวิธีติดตามการตอบสนองความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (tracer response) ทั้ง 3 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ 1 บริเวณใต้ใบพัด ห่างจากก้นถังในแนวกลางถังเท่ากับ 70 มิลลิเมตร, ตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านบน ห่างจากผิวของของเหลวด้านบนเท่ากับ 45 มิลลิเมตร และห่างจากผนังของถัง 10 มิลลิเมตร, ตำแหน่งที่ 3 บริเวณด้านล่าง ห่างจากก้นถัง 10 มิลลิเมตร และห่างจากผนังของถัง 10 มิลลิเมตร)

2.3.1 ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดตามหัวข้อ 2.1.1

2.3.2 ฉีดสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ในปริมาตรตามที่กำหนด (ในสารละลายแซนแซนแกมความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.1, 0.25, 0.5 โดยน้ำหนัก จะฉีดสารละลาย NaOH ในปริมาณ 1, 2, 3 และ 3 มิลลิลิตร ตามลำดับ เพื่อให้เห็นกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ได้อย่างชัดเจน) ที่ตำแหน่งใต้ใบพัด

2.3.3 บันทึกการเปลี่ยนแปลงของ pH เทียบกับเวลา ที่ pH probe ทั้งสามตำแหน่งด้วยคอมพิวเตอร์ และนำผลที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการผสมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง (ในงานวิจัยนี้ pH จะถูกบันทึกทุกๆ 0.16 วินาที)

2.4 ศึกษารูปลักษณะการไหล (Flow configuration)

2.4.1 ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดตามหัวข้อ 2.1.1

2.4.2 สังเกตดูการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เติมลงไปในถังหมักด้วยสายตา (แผ่นพลาสติกสีดำสีเหลี่ยมเล็กๆ) ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ (980.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร) ขนาด 2x2 มิลลิเมตร จำนวน 100 แผ่น) โดยวาดภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในถังหมักของไบโพลิตทั้งสองแบบ

2.5 ศึกษาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (Volume of mixing region) โดยวิธีติดตามการตอบสนองของความเข้มข้นของเทรเซอร์ (tracer response) ทั้ง 3 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่ 1 บริเวณใต้ไบโพลิต, ตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านบน, ตำแหน่งที่ 3 บริเวณด้านล่าง)

2.5.1 ตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนดตามหัวข้อ 2.1.1

2.5.2 ฉีดสารละลาย NaOH ในปริมาตรตามที่กำหนดที่ตำแหน่งใต้ไบโพลิต

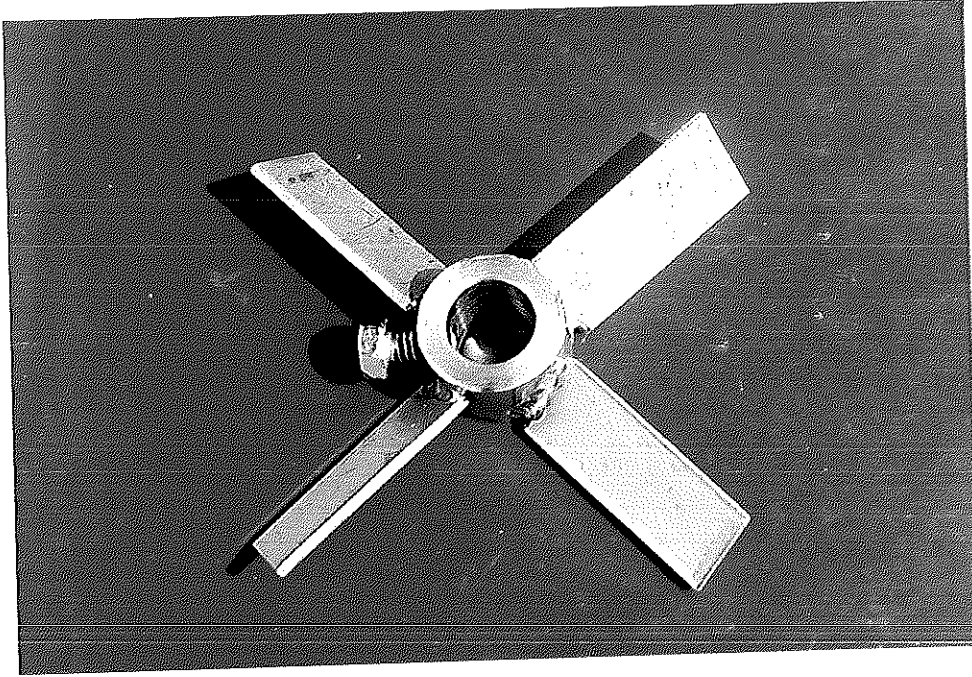
2.5.3 บันทึกการเปลี่ยนแปลงของ pH เทียบกับเวลา ที่ pH probe ทั้งสามตำแหน่งด้วยคอมพิวเตอร์ และนำผลที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (volume of mixing region) ตามวิธีการของ Funahashi และคณะ (1987b) แสดงในภาคผนวก ก. (ในงานวิจัยนี้ pH จะถูกบันทึกทุกๆ 0.16 วินาที)

2.6 ศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับถังหมักแบบกวน

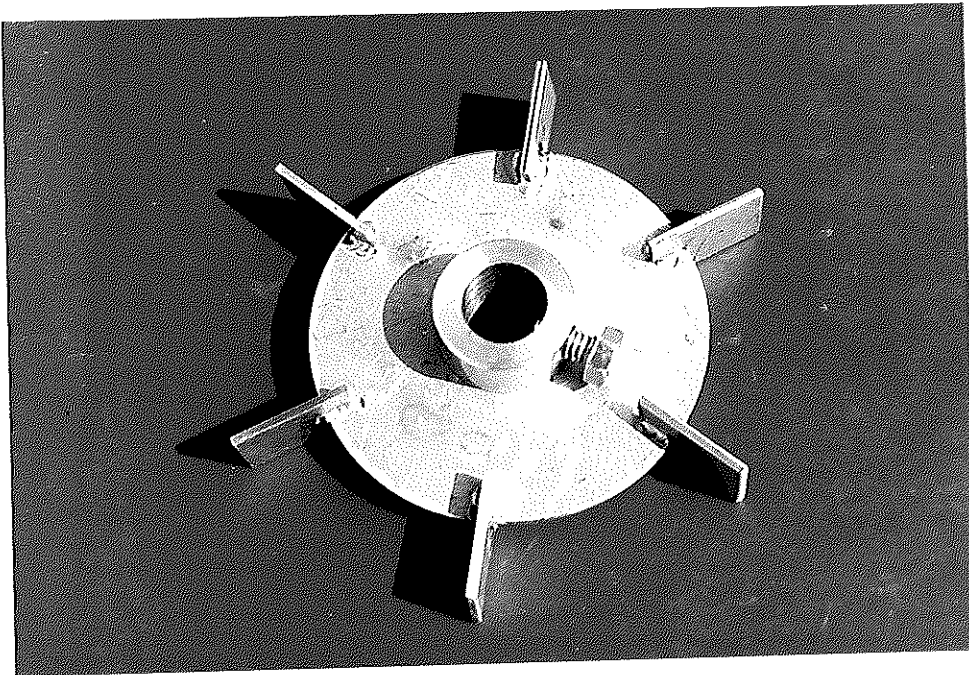
ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b) เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลอง เพื่อศึกษากลไกการผสมขึ้นมาใหม่ โดยวิธีติดตามการตอบสนองของความเข้มข้นของเทรเซอร์

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1. อัตราการให้อากาศที่ระดับอัตราการให้อากาศ 3 ระดับคือ 0, 0.18 และ 0.36 vvm
2. ระดับของสารละลายแซนแทนในถังหมักที่ระดับความสูง 0.25 เมตร
3. ความเร็วรอบในการกวน โดยใช้ความเร็วต่างกัน 3 ระดับคือ 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที
4. ความเข้มข้นของแซนแทนกัมที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
5. ชนิดของไบโพลิต 2 แบบคือ
 - 5.1 ไบโพลิตแบบ Flat-blade impeller with center disk ดังแสดงในภาพที่ 2.3
 - เส้นผ่านศูนย์กลางของไบโพลิต = 0.105 เมตร
 - ความกว้างของไบโพลิต = 0.017 เมตร
 - ความยาวของไบโพลิต = 0.020 เมตร
 - เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านไบโพลิต = 0.015 เมตร
 - 5.2 ไบโพลิตแบบ Pitched-blade impeller ดังแสดงในภาพที่ 2.4
 - เส้นผ่านศูนย์กลางของไบโพลิต = 0.105 เมตร
 - ความกว้างของไบโพลิต = 0.017 เมตร
 - ความยาวของไบโพลิต = 0.045 เมตร



ภาพที่ 2.3 ใบพัดแบบ Pitched-blade impeller ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2.4 ใบพัดแบบ Flat-blade impeller with center disk ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์

2.1 ผลการศึกษากำลังที่ใช้ในการกววนและการผสม (Power consumption)

จากการทดลองใช้ความเร็วรอบในการกววนสามระดับคือ 2.5, 4.166, 5.833 รอบต่อวินาที ใบพัดสองแบบคือ Flat blade turbine และ Pitched blade turbine และอัตราการให้อากาศสามระดับคือ 0, 0.18, 0.36 vvm ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังที่ใช้ในการกววนและการผสม (P) จะเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกววน (N) และเมื่อให้อากาศเพิ่มเข้าไป 0.18 vvm จะมีผลทำให้กำลังที่ใช้ในการกววนและการผสมลดลง และจะลดลงต่อไปเมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.36 vvm ทั้งนี้เพราะว่าฟองอากาศจะทำให้ความหนาแน่นของของเหลวลดลง รวมทั้งการให้อากาศมีผลทำให้ของเหลวในถังเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับถังหมักแบบอากาศยก (air-lift reactor) จึงทำให้กำลังที่ใช้ในการกววนและการผสมลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine จะใช้กำลังในการกววนและการผสมมากกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine ในทุกกรณี (ภาพที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 ตามลำดับ) เช่น ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังที่ใช้ในการกววนและการผสมสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine มีค่าเท่ากับ 1.45 วัตต์ (ที่ความเร็วรอบในการกววน 2.5 รอบต่อวินาที) เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกววนเป็น 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที มีผลทำให้กำลังที่ใช้ในการกววนและการผสมเพิ่มเป็น 8.62 และ 28.40 วัตต์ ตามลำดับ ในขณะที่ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ใช้กำลังที่ใช้ในการกววนและการผสมเท่ากับ 0.55, 2.54 และ 8.57 วัตต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine ใช้กำลังในการกววนและการผสมสูงกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine มาก และเมื่อมีการให้อากาศเพิ่มเข้าไปพบว่ากำลังที่ใช้ในการกววนจะลดลงเช่นกัน (ภาพที่ 3.1) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนต่อกำลังที่ใช้ในการกววนและการผสม พบว่ากำลังที่ใช้ในการกววนจะมีค่าสูงเมื่อสารละลายแซนแทนมีความเข้มข้นถึงร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และจะลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนลดลง ทั้งนี้เพราะผลของความหนืดที่ลดลงจาก 3.39 Pa.s เป็น 0.00089 Pa.s นอกจากนี้ผลของการให้อากาศที่เพิ่มขึ้นยังสอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยอื่นๆ เช่น Mockel และคณะ (1990) ที่ศึกษาหาค่ากำลังที่ใช้ในการกววนโดยใช้ถังหมักขนาด 2400-26000 ลิตร ใบพัดแบบ Flat blade turbine ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-7 เมตร ซึ่งพบว่ากำลังที่ใช้ในการกววนในของเหลว (น้ำ) จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศ และ Wang และคณะ (1979) กล่าวว่ากำลังที่ต้องการสำหรับระบบการหมักที่มีการกววนและการให้อากาศจะน้อยกว่าระบบการหมักที่มีการกววนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะ ฟองอากาศจะทำให้ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ของของเหลวลดลง ฉะนั้นกำลังที่ใช้ในการกววนจึง

ขึ้นอยู่กับอัตราการให้อากาศและชนิดของใบพัด และอัตราการให้อากาศสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ Aeration number (A_e) ดังนี้

$$A_e = \frac{F_g}{ND_a^3} \quad (1)$$

โดยที่ F_g = อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 N = ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อวินาที)
 D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

เมื่อนำผลการดูดกลืนกำลัง (power consumption) ทั้งในน้ำ และ ในสารละลายแซนแทนกับความสัมพันธ์ร้อยละ 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลัง (N_p) และ เลขเรย์โนลด์ (N'_{Re}) พบว่าเลขกำลังจะมีค่ามากกว่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ (น้อยกว่า 10) และจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับคงที่ระดับหนึ่ง ซึ่งเลขกำลังจะไม่ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ อีกต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ฉะนั้นจากผลการศึกษา กำลังที่ใช้ในการกวนและการผสมในน้ำและในสารละลายแซนแทนแสดงให้เห็นว่ากำลังที่ต้องใช้ในการกวนและการผสมจะสูงเมื่อใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine และจะลดลงอย่างมากเมื่อใช้ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มการให้อากาศหรือไม่ก็ตาม และพบว่า การให้อากาศมีอิทธิพลทำให้กำลังที่ใช้ในการกวนและการผสมลดลงเช่นกัน และจะลดลงมากสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ส่วนใบพัดแบบ Pitched blade turbine จะลดลงเพียงเล็กน้อย

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังกับเลขเรย์โนลด์ในถังหมักแบบกวนที่มีแผ่นกั้น (Baffle) ที่ใช้ใบพัดทั้งสามแบบคือ Flat six blade turbine, Flat two blade turbine และ Pitched blade turbine พบว่าเลขกำลังจะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่คงที่ระดับหนึ่ง และเมื่อเลขเรย์โนลด์มากกว่า 10000 พบว่าเลขกำลังจะไม่ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์อีก หรือเลขกำลังจะคงที่นั่นเอง (Alba *et al*, 1973) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังกับเลขเรย์โนลด์ พบว่าเลขเรย์โนลด์ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อยู่ระหว่าง 30000-80000 แสดงอยู่ในบริเวณที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ($N'_{Re} > 10000$) ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 600-1500 ซึ่งแสดงว่าอยู่ในบริเวณที่มีการไหลแบบทรานสิชัน ($30 > N'_{Re} < 10000$) ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก แนวโน้มของกราฟแสดงให้เห็นว่า เลขกำลังจะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่เลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 60-160 แสดงว่าอยู่ในบริเวณที่มีการไหลแบบทรานสิชัน ($30 > N'_{Re} < 10000$) และในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าเลขเรย์โนลด์ อยู่ระหว่าง 8-20 แสดงว่าอยู่ในบริเวณที่มีการไหลแบบลามินาร์ ($N'_{Re} < 30$) (Geankoplis, 1983)

2.1.1 การดูดกลืนกำลังในสภาวะที่ไม่มีการให้อากาศ

Nagata (1988) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังและเลขเรย์โนลด์ และได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง เลขกำลัง และ เลขเรย์โนลด์ เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 0.8N_{Re}}{10^3 + 1.6N_{Re}} \right) C \quad (2)$$

โดยที่ N_p = เลขกำลัง
 N_{Re} = เลขเรย์โนลด์
 A, B, C = ค่าคงที่

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อนำมาเทียบเคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.6 และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังและเลขเรย์โนลด์ สำหรับใบพัดทั้งสองแบบ ในสภาวะที่ไม่มีการให้อากาศ คือ

สมการความสัมพันธ์สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine

โดยที่ $A = 131.67$
 $B = 9.68$
 $C = -0.0199$

สมการความสัมพันธ์สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine

โดยที่ $A = 110.85$
 $B = 3.108$
 $C = -0.1303$

2.1.2 การดูดกลืนกำลังในสภาวะที่มีการให้อากาศ

2.1.2.1 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการทำนายของสหสัมพันธ์ที่รวบรวมโดยนักวิจัยอื่นๆ

ได้มีนักวิจัยจำนวนมากหาความสัมพันธ์ของกำลัง (P_g/P_0) ในรูปแบบต่างๆ ในของเหลว (น้ำ) สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine เช่น

Calderbank (1958 อ้างโดย Murugesan and Degaleesan, 1993) ได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังคือ

$$P_g/P_0 = 1 + (-1.26) \left(\frac{F_g}{ND_a^3} \right) \quad (3)$$

Murugesan และ Degaleesan (1993) ได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังคือ

$$P_g/P_o = 0.11 \left(\frac{ND_a^3}{F_g} \right)^{0.26} \left(\frac{g}{N^2 D_a} \right)^{0.19} \left(\frac{T}{D_a} \right)^{0.28} \left(\frac{D_a}{W} \right)^{0.21} \quad (4)$$

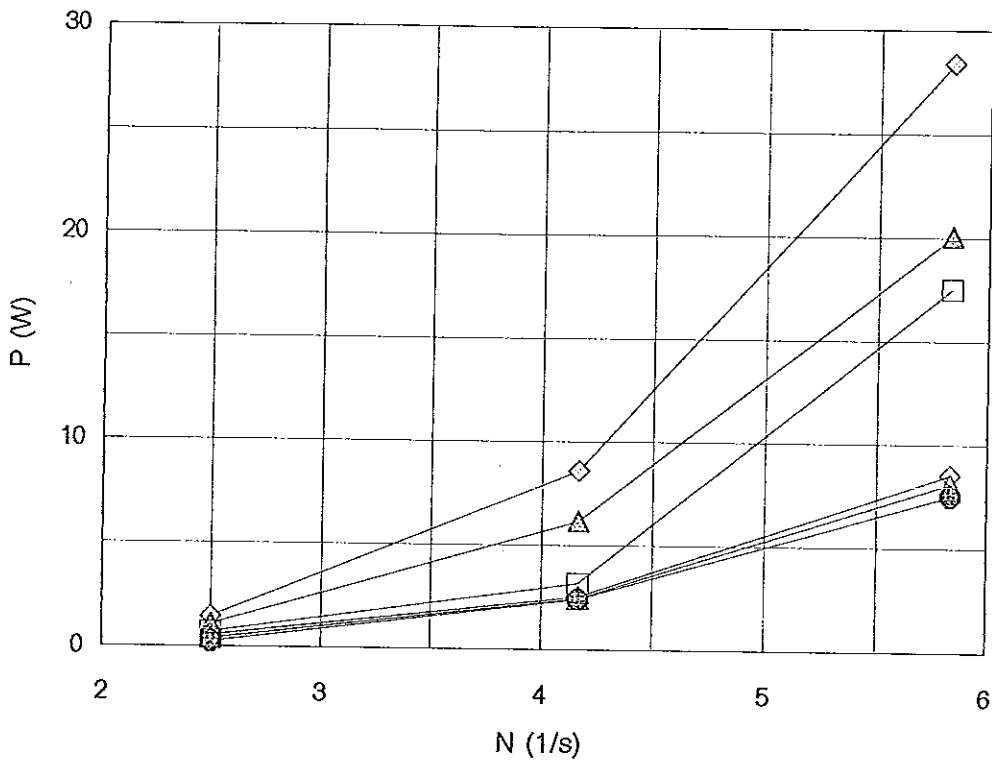
Hughmark (1980 อ้างโดย Murugesan and Degaleesan, 1993) ได้ให้สมการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังคือ

$$P_g/P_o = 0.10 \left(\frac{F_g}{NV} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{N^2 D_a^4}{g W V^3} \right)^{-\frac{1}{5}} \quad (5)$$

เมื่อนำสมการดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.7 พบว่าจากสหสัมพันธ์ที่นำมาเปรียบเทียบทั้งสามสมการ สมการที่ (4) Murugesan และ Degaleesan (1993) ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้มากที่สุด สหสัมพันธ์นี้เป็นสมการความสัมพันธ์ที่ได้รวบรวมมาจากผลการวิจัยนักวิจัยจำนวนมาก โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองและสามารถสรุปโดยสร้างมาเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ข้างต้น โดยครอบคลุมสภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ

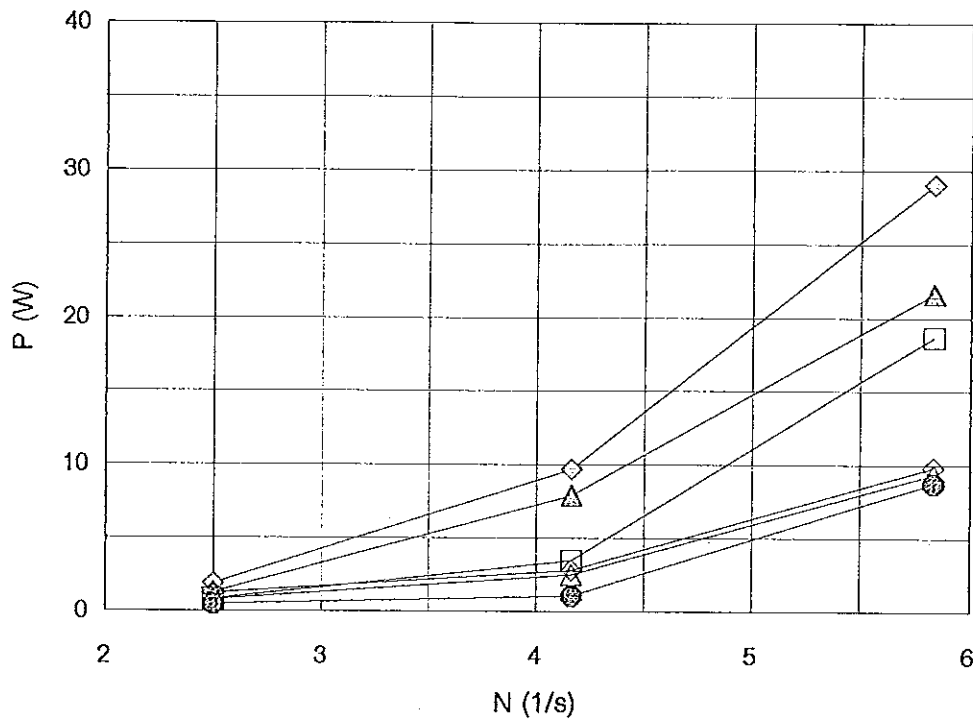
- เส้นผ่าศูนย์กลางถัง 15-100 เซนติเมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด 5-33 เซนติเมตร
- ความกว้างของใบพัด 0.8-6.6 เซนติเมตร
- อัตราการให้อากาศ 0.65-1.45 vvm
- ความเร็วรอบในการกวน 1.3-26.4 รอบต่อวินาที
- ความหนาแน่น 0.858-1.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ความหนืด 0.8-28 เซนติพอยด์

ต่อไปในการทดลองใช้สหสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการที่ 4 ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_o กับ Aeration number โดยที่จะเทียบเคียงค่า P_g/P_o กับค่าที่ได้จากสมการที่ 4 เมื่อนำผลของ P_g/P_o ในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_o กับ Aeration number (A_o) ดังแสดงในภาพที่ 3.8, 3.9, 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ พบว่า P_g/P_o จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.18 vvm เป็น 0.36 vvm (อัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นทำให้ A_o มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ) ไม่ว่าจะใช้ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ก็ตาม รวมทั้งในสารละลาย แซนแทนทุกความเข้มข้นเช่นกัน ซึ่งแสดงว่า อัตราการให้อากาศนั้นมีผลทำให้กำลังที่ต้องใช้ในการกวนลดลง จึงทำให้ค่า P_g/P_o ที่ได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ดังกล่าวในแต่ละความเร็วรอบแล้วพบว่า P_g/P_o จะลดลงเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น



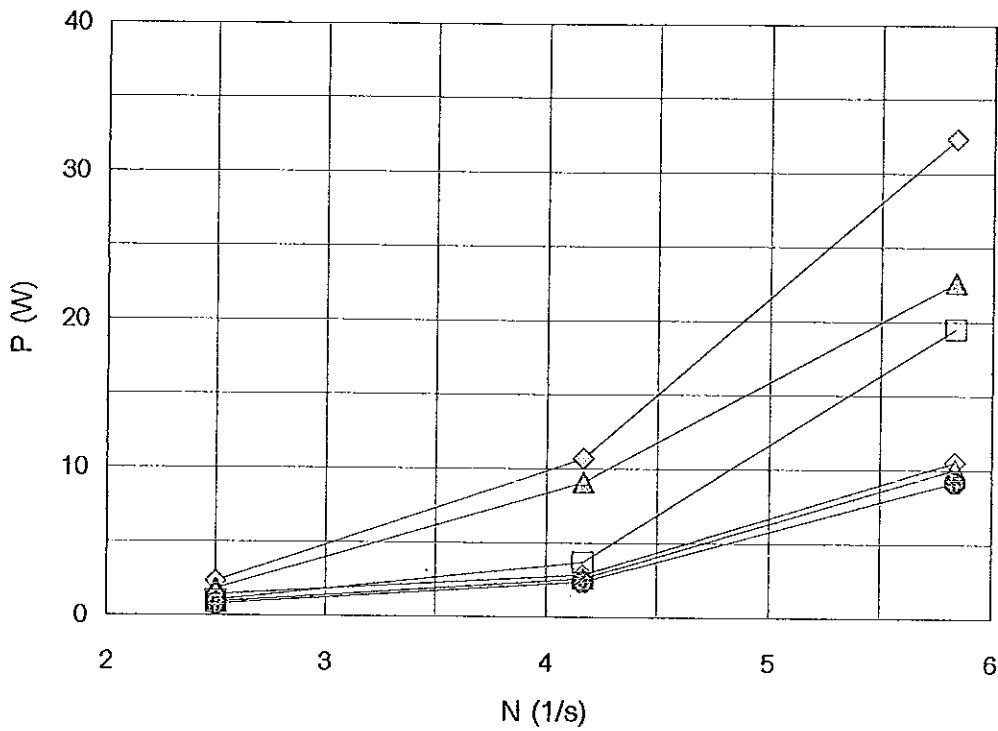
ภาพที่ 3.1 กำลังที่ใช้ในการกวม (P) กับ ความเร็วรอบในการกวม (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ)

- (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (△) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (⊕) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
- (◇) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (⊕) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36



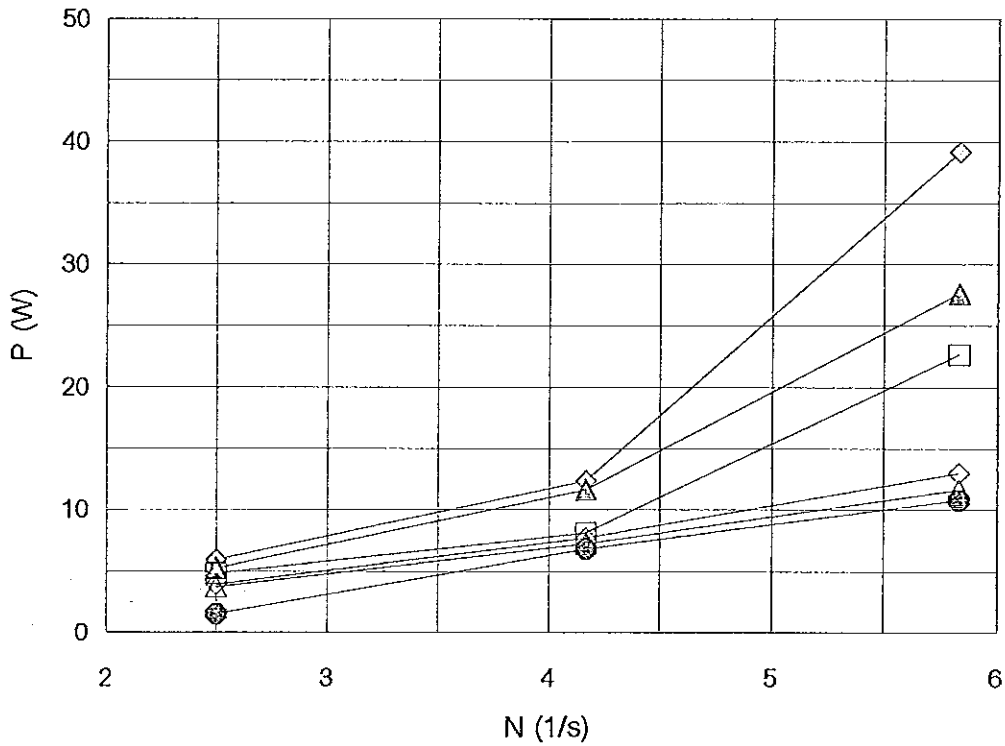
ภาพที่ 3.2 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

- (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 vvm
- (△) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm
- (⊕) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm
- (◊) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 vvm
- (⊖) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm
- (⊗) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36



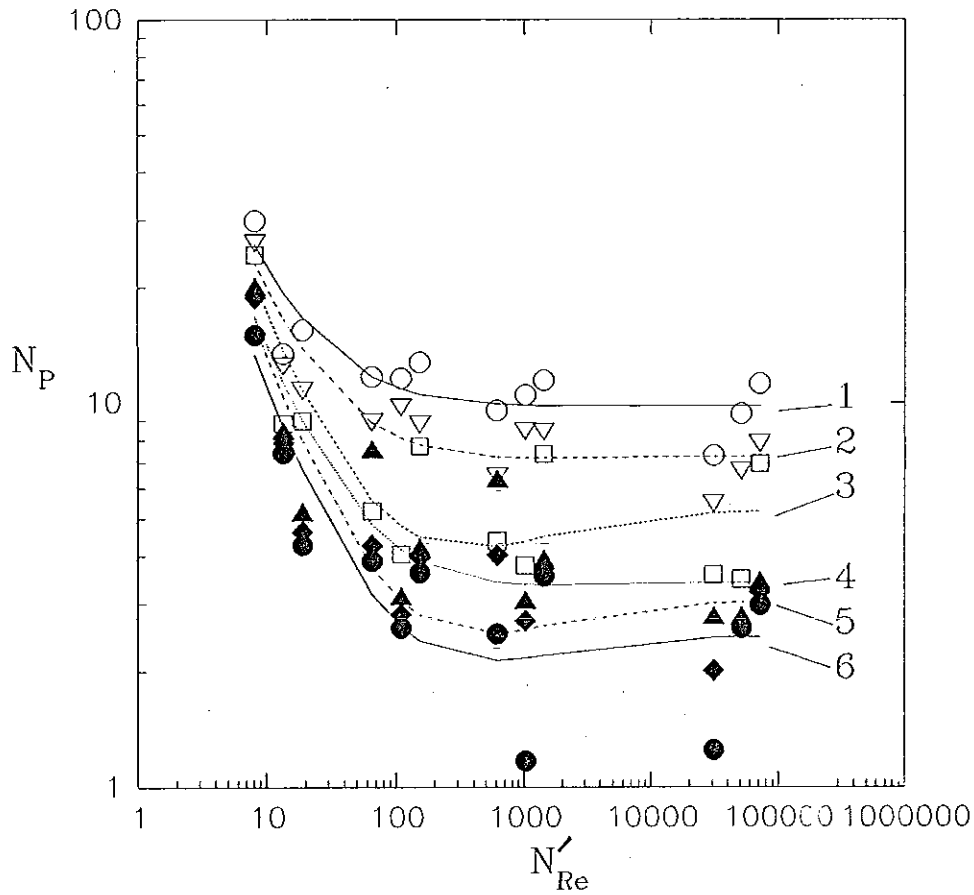
ภาพที่ 3.3 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการใช้
 ให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

- (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0 w/m
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0.18 w/m
- (⊕) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0.36 w/m
- (◇) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0 w/m
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0.18 w/m
- (⊗) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการใช้ให้อากาศ 0.36



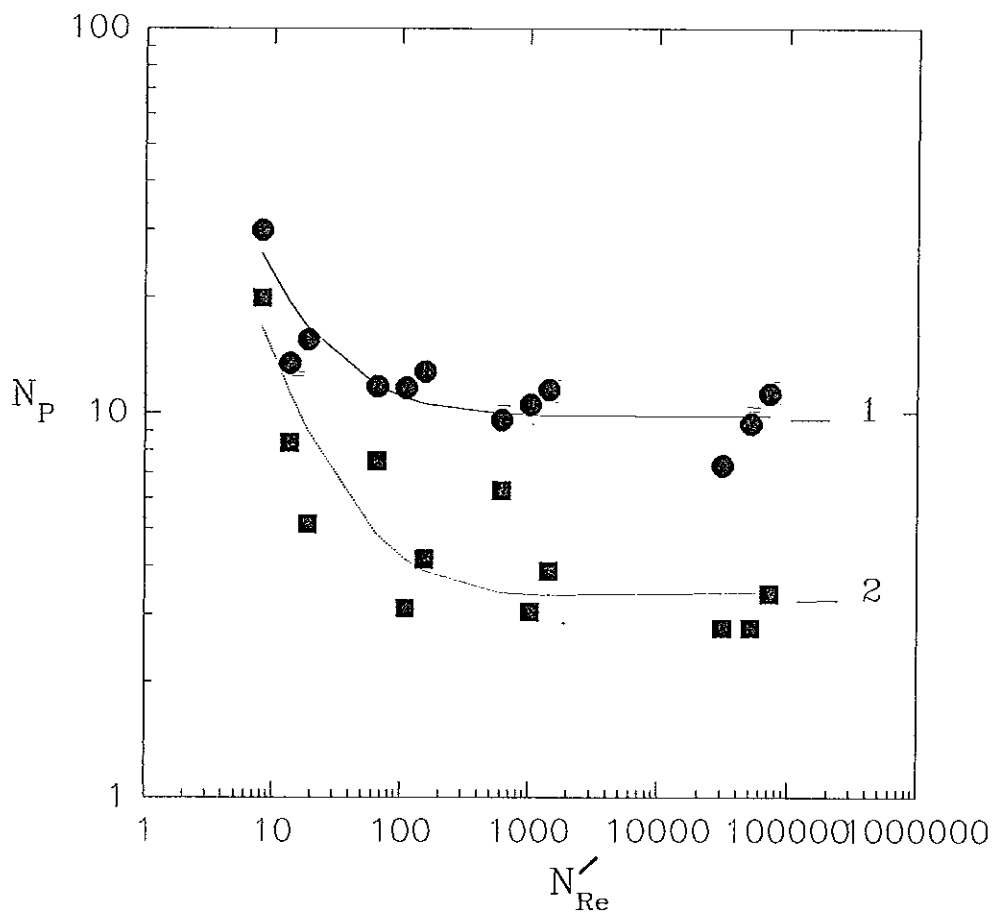
ภาพที่ 3.4 กำลังที่ใช้ในการกวน (P) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก

- (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 v/m
- (△) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 v/m
- (□) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 v/m
- (◇) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 v/m
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 v/m
- (●) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36



ภาพที่ 3.5 N_p กับ N'_{Re} ของสารละลายน้ำและสารละลายแซนแทนทุกความเข้มข้นที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ

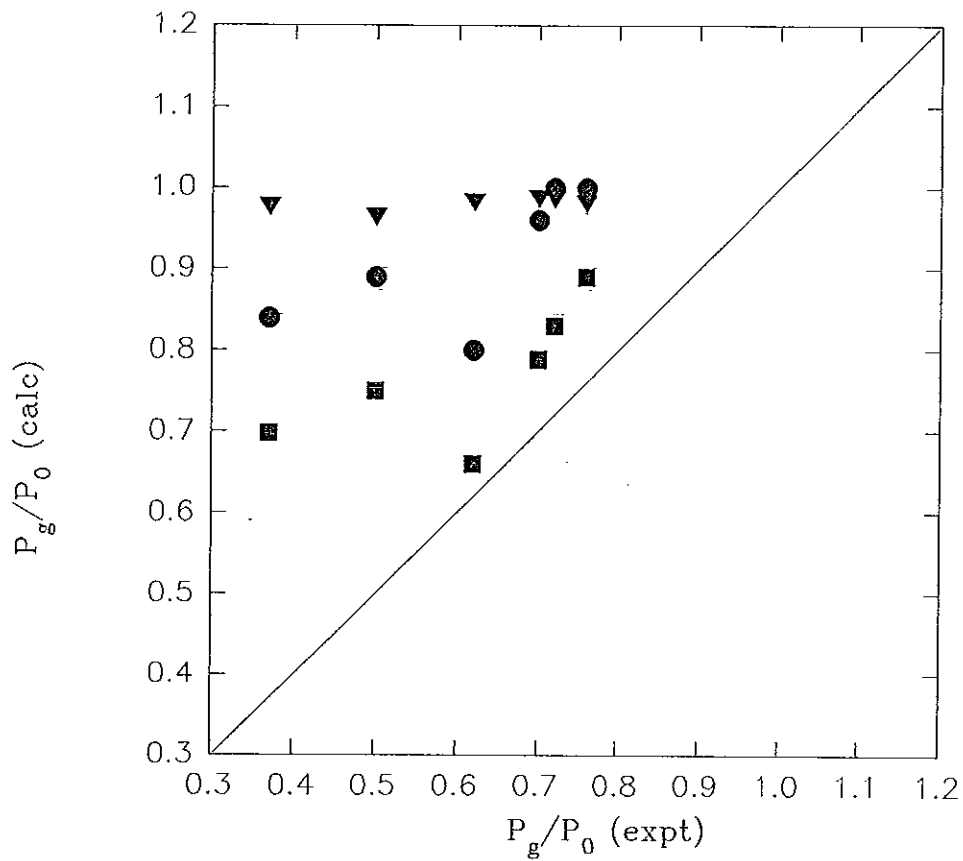
- (1, ○) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (2, △) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (3, □) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
- (4, ▲) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (5, ◆) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (6, ●) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36



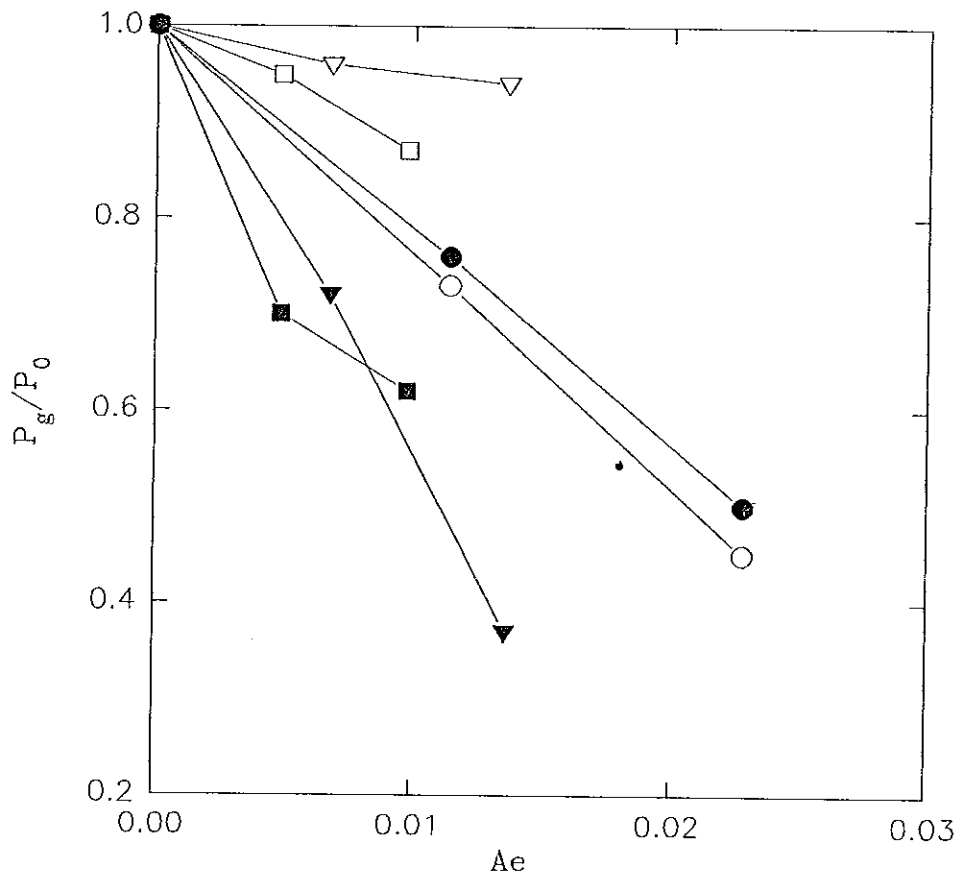
ภาพที่ 3.6 N_p กับ N'_{Re} ของสารละลายน้ำและสารละลายแซนแทนทุกความเข้มข้น สำหรับใบพัดแบบ flat blade turbine และ ใบพัดแบบ pitched blade turbine ในสถานะที่ไม่มีอากาศ

(1, ●) ใบพัดแบบ Flat blade turbine

(2, ■) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine

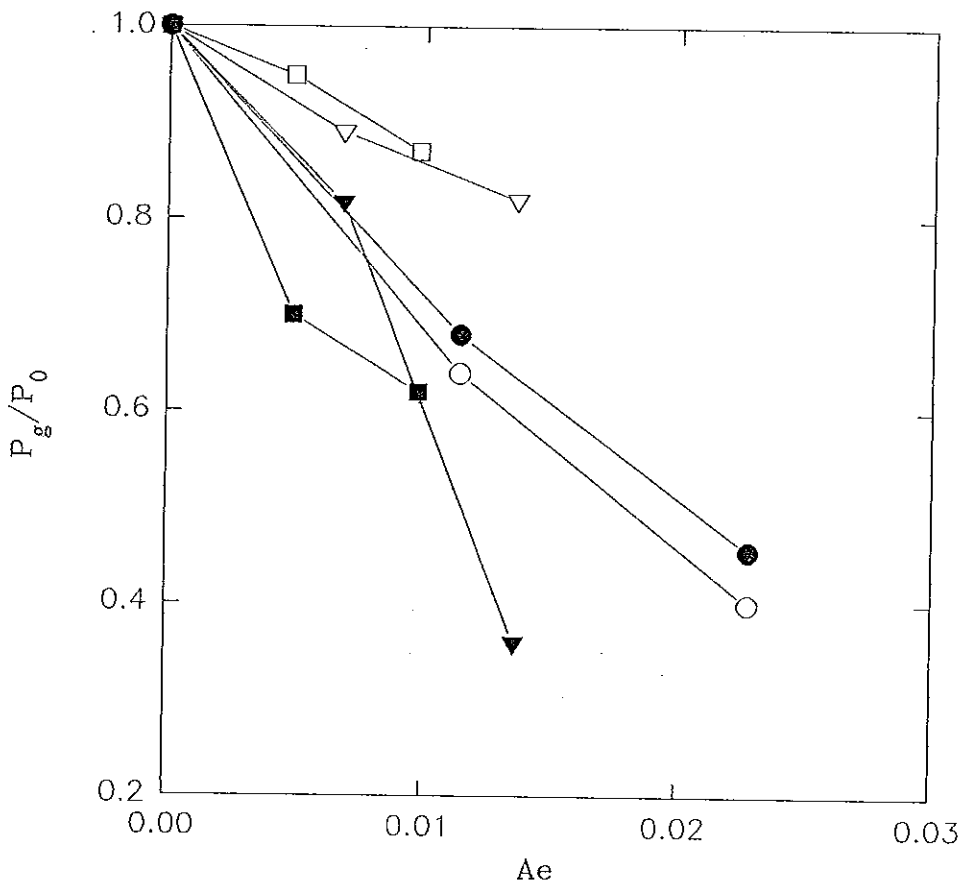


ภาพที่ 3.7 เปรียบเทียบค่า P_g/P_0 ระหว่างสมการความสัมพันธ์ กับ ผลที่ได้จากการทดลอง
 (▲) สมการที่ 3 (Calderbank (1958))
 (■) สมการที่ 4 (Murugesan และ Degaleesan (1993))
 (●) สมการที่ 5 (Hughmark (1980))



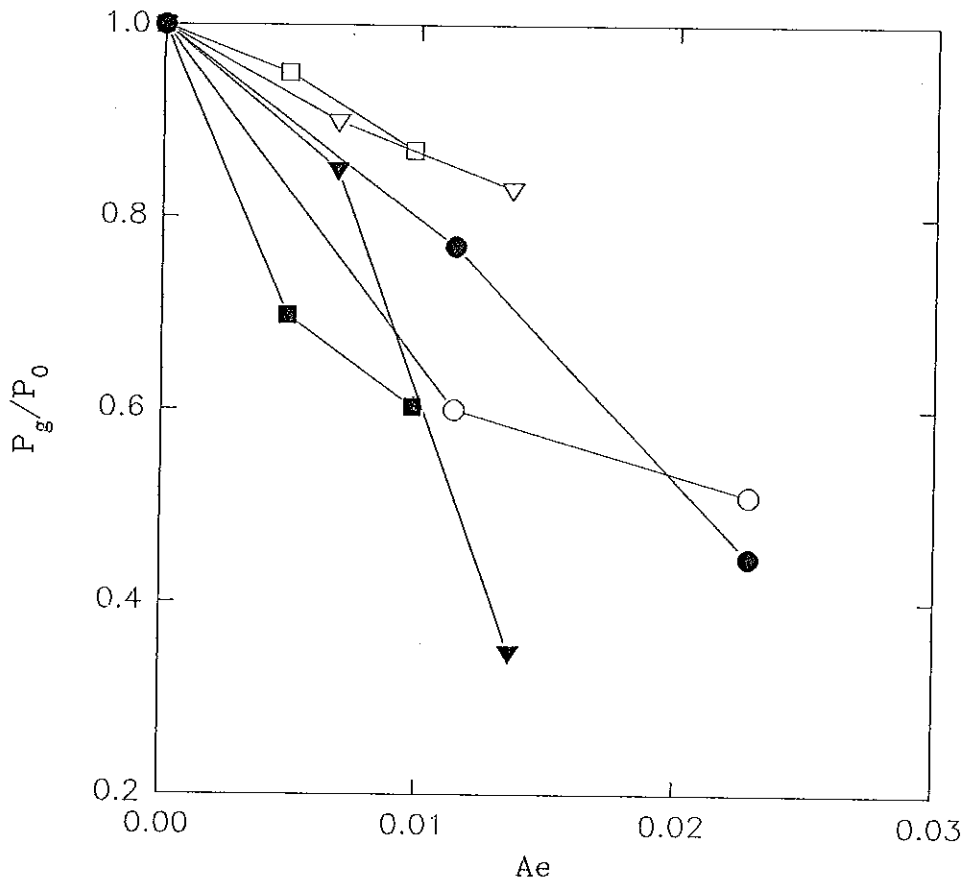
ภาพที่ 3.8 P_s/P_0 กับ A_e ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

- (●) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (■) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที
- (○) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (▽) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (□) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที



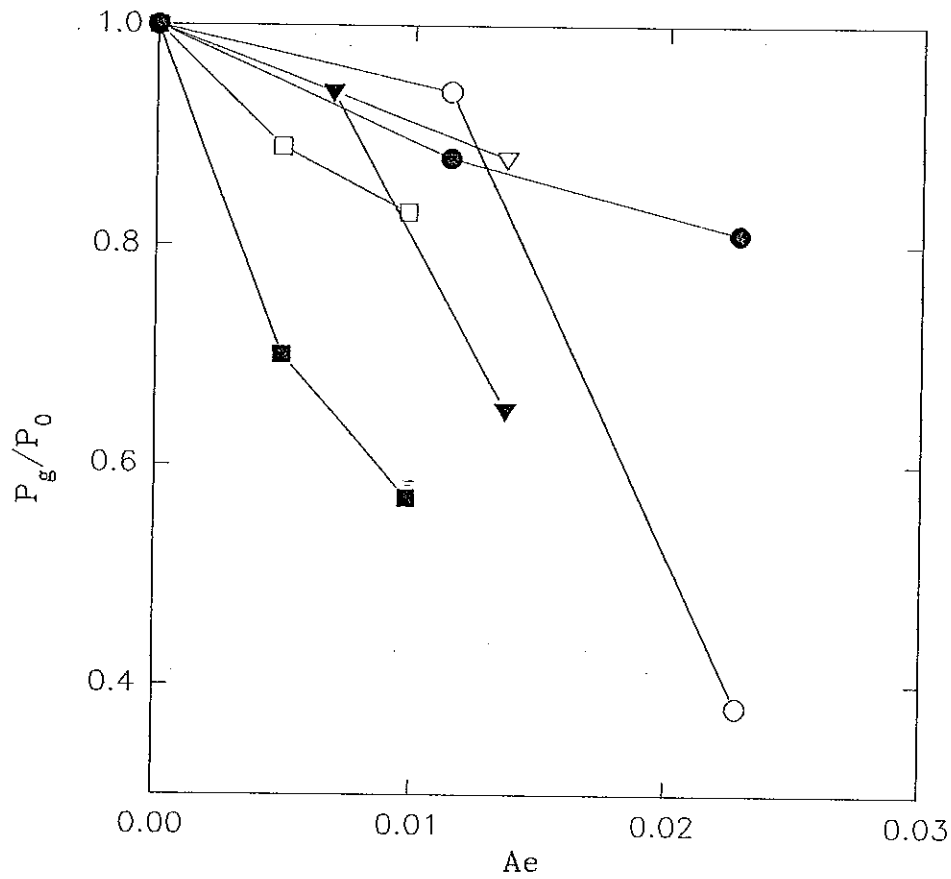
ภาพที่ 3.9 P_g/P_0 กับ A_e ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

- (●) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (■) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที
- (○) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (□) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที



ภาพที่ 3.10 P_g/P_0 กับ A_e ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

- (●) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (■) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที
- (○) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (□) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที



ภาพที่ 3.11 P_g/P_0 กับ A_e ที่ความเร็วรอบและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

- (●) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (■) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที
- (○) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อวินาที
- (△) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 4.166 รอบต่อวินาที
- (□) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อวินาที

2.2 ผลการศึกษา Hold-Up (E_g)

จากการทดลองวัดค่า E_g ของสารละลายแซนแทนที่เตรียมขึ้น 4 ความเข้มข้น (ร้อยละ 0, 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก) เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง E_g กับความเร็วรอบในการกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.12, 3.13, 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ พบว่าทั้งความเร็วรอบในการกวน อัตราการให้อากาศ และรูปแบบของใบพัดนั้นมีผลต่อ E_g เช่นเดียวกัน คือเมื่อใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine อัตราการให้อากาศเท่ากับ 0.18 vvm พบว่า E_g จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวน นอกจากนี้ถ้าเพิ่มอัตราการให้อากาศจาก 0.18 vvm เป็น 0.36 vvm จะทำให้ E_g เพิ่มขึ้นตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้ใบพัดแบบ Pitched blade turbine พบว่า E_g จะเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็วรอบในการกวน และระดับอัตราการให้อากาศเช่นกันเพราะว่าอัตราการให้อากาศที่สูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของฟองอากาศเพิ่มขึ้น และความเร็วรอบในการกวนที่สูงขึ้นทำให้การกระจายของฟองอากาศในถังมากขึ้นรวมทั้งการไหลวนกลับของฟองอากาศตามรูปลักษณะการไหลมีมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างใบพัดทั้งสองแบบพบว่าในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) ใบพัดแบบ Flat blade turbine จะให้ค่า E_g สูงกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine ในทุกความเร็วรอบในการกวน (ภาพที่ 3.12) ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25 และ 0.50 โดยน้ำหนัก พบว่า E_g สำหรับใบพัดทั้งสองแบบให้ผลไม่แตกต่างกันในทุกความเร็วรอบในการกวน (ภาพที่ 3.13, 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ)

ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่า E_g จะขึ้นอยู่กับ รูปแบบของใบพัด อัตราการให้อากาศ และความเร็วรอบในการกวน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนหรือความหนืดมีผลต่อ E_g เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 3.16, 3.17 เพราะจากการทดลองพบว่า E_g ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (ที่ความหนืด 3.39 Pa.s) จะมีค่าสูง และจะลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนลดลงเป็นร้อยละ 0.25, 0.1 และ 0 โดยน้ำหนัก แต่ E_g ที่ได้จากสารละลายแซนแทน พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (<0.25%) E_g ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าในสารละลายน้ำ แต่ถ้าสารละลายแซนแทนมีความเข้มข้นสูง (>0.25%) E_g ไม่สามารถวัดได้อย่างชัดเจนทั้งนี้ก็เป็นเพราะขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังหมัก เช่นเดียวกับ Riet และ Tramper (1991) กล่าวว่าได้มีการทดลองหาความสัมพันธ์สำหรับ E_g ในสารละลายน้ำและนำไปใช้กันมากมาย ส่วนในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ (ความหนืดสูงกว่าน้ำ) พบว่า E_g ยังมีค่าสูงกว่าในสารละลายน้ำ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูง E_g จะไม่สามารถทำนายได้ทั้งหมด แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กก็จะส่งผลให้ E_g มีค่าสูง ในทางกลับกันถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลในทางลบ ฉะนั้น E_g เป็นเพียงบรรทัดฐานหนึ่งเท่านั้น ที่พอจะบอกได้ว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นมานั้น มีผลดีต่อสภาวะการหมักที่ต้องการอากาศไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความเร็วยรอบ อัตราการให้อากาศ และรูปแบบของใบพัดล้วนแต่มีผลต่อ E_g ทั้งสิ้น แม้ว่ารูปแบบของใบพัดจะมีผลเพียงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีผลต่อ E_g เลยก็ตาม

ได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง E_g และ N , F_g เช่น

Takennaka และ Takahashi (1996) ได้ให้สมการความสัมพันธ์สำหรับ E_g ในของเหลว (น้ำ) กับอากาศคือ

$$E_g = 0.621N^{0.21}F_g^{0.437} \quad (6)$$

Smit และ Warmoeskerken (1985 อ้างโดย Tatterson, 1991) ได้ให้สมการความสัมพันธ์สำหรับ E_g ในของเหลว (น้ำ) กับอากาศคือ

$$E_g = 0.62N^{1.6}F_g^{0.45} \quad (7)$$

Greaves และ Barigou (1988) ได้ให้สมการความสัมพันธ์สำหรับ E_g ในของเหลว (น้ำ) กับอากาศคือ

$$E_g = 3.85N^{0.73}F_g^{0.62}\left(\frac{D_a}{T}\right)^{1.64} \quad (8)$$

จากการเปรียบเทียบค่า E_g ที่ได้จากทั้งสามสมการกับผลที่ได้จากการทดลองในสารละลายน้ำกับอากาศที่ใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine พบว่าให้ผลใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.18 ผลดังกล่าวอาจจะไม่เหมือนกับสมการความสัมพันธ์ข้างต้นเลยทีเดียว แต่ก็ให้ผลใกล้เคียงโดยเฉพาะสมการที่ 6 ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นเพราะว่ามีมิติและสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้แตกต่างไปจากการทดลองของผู้อื่นมิได้เหมือนกันทั้งหมดเลยทีเดียว และจากผลการทดลองครั้งนี้สามารถหาสมการความสัมพันธ์สำหรับ E_g ในสารละลายน้ำของใบพัดแบบ Flat blade turbine และ Pitched blade turbine ได้ดังนี้คือ

สมการความสัมพันธ์สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ในสารละลายน้ำ

$$E_g = 0.2817N^{0.60}F_g^{0.36} \quad (9)$$

สมการความสัมพันธ์สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ในสารละลายน้ำ

$$E_g = 0.2677N^{0.69}F_g^{0.39} \quad (10)$$

Cieszkowski และ Dylag (1994) ทำการศึกษาการแพร่กระจายของก๊าซในถังหมักแบบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.297 เมตร ใบพัดแบบ Flat blade turbine และทำการวัด E_g พบว่าความเร็วรอบและอัตราการให้อากาศมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ E_g ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่น่าจะมองไปถึงฟองอากาศที่อยู่ในถังหมักมากกว่าว่ามีขนาด และรูปร่างอย่างไร ถ้าฟองอากาศยังมีขนาดเล็กและสามารถแพร่กระจายได้ทั่วถึงก็จะส่งผลให้ระบบการ

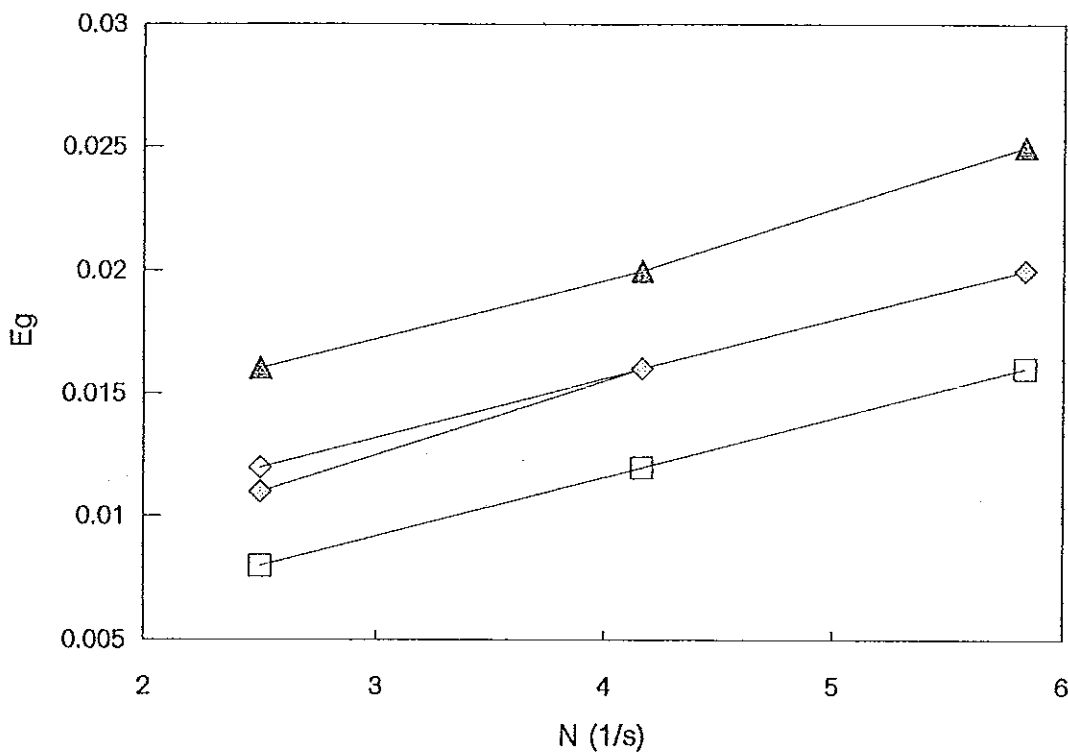
หมักที่ต้องการอากาศดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้ามถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่จะเป็นผลเสียต่อระบบการหมักที่ต้องการอากาศเช่นกัน

จากการทดลองได้บันทึกลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังหมักที่ติดตั้งใบพัดแบบ Flat blade turbine ในสารละลายน้ำพบว่าที่อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm และความเร็วยรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที พบฟองอากาศลักษณะเป็นวงกลมและวงรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-3 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ไปตามรูปลักษณะการไหลในแนวรัศมี (radial flow) โดยฟองอากาศส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของถังมีการเคลื่อนที่แบบในแนวตรงและเคลื่อนที่เป็นแบบสายคดเคี้ยวสั้นไปมา และพบฟองอากาศบางส่วนถูกตีลงด้านล่างของถังแต่ไม่ถึงกันถึงเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการกวนให้สูงขึ้นจนถึง 5.833 รอบต่อวินาที พบว่าจะทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเร็วขึ้นและฟองอากาศจะถูกตีได้ถึงกันถึงรวมทั้งมีการวนกลับของฟองอากาศตามรูปลักษณะการไหลเช่นกัน เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.36 vvm จะพบการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกัน แต่พบว่าความหนาแน่นของฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการให้อากาศสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ให้ผลเช่นเดียวกันเพียงแต่รูปลักษณะการไหลเป็นแบบการไหลในแนวแกน (axial flow) และจะพบฟองอากาศบางส่วนเคลื่อนที่ผ่านใบพัดขึ้นสู่ด้านบนได้รวมทั้งการกระจายของฟองอากาศบริเวณก้นถังน้อยกว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก พบว่าให้ผลเหมือนกับในกรณีน้ำในใบพัดทั้งสองแบบ ลักษณะฟองอากาศเริ่มเห็นเป็นวงรีชัดเจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร แต่การเคลื่อนที่ของฟองอากาศจะไม่เป็นสายคดเคี้ยวและสั้นไปมามากนัก

ผลการทดลองในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine พบว่าที่อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm และความเร็วยรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที พบฟองอากาศลักษณะเป็นวงกลมและวงรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-3 มิลลิเมตร และฟองอากาศขนาดใหญ่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-4 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ไปตามรูปลักษณะการไหลในแนวรัศมี และฟองอากาศจะเคลื่อนที่ช้าลงเพราะว่าสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบฟองอากาศขนาดเล็กที่รวมกันเป็นกลุ่มเกาะติดผนังหรือเคลื่อนที่ช้า และบางส่วนรวมตัวกันแล้วลอยขึ้นด้านบน เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการกวนให้สูงขึ้นจนถึง 5.833 รอบต่อวินาที พบว่าจะทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศเร็วขึ้นและฟองอากาศจะถูกตีได้ถึงกันถึงรวมทั้งมีการวนกลับของฟองอากาศเช่นกัน เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.36 vvm จะพบการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกัน แต่พบว่าความหนาแน่นของฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการให้อากาศ สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่การกระจายของฟองอากาศยังน้อยกว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine

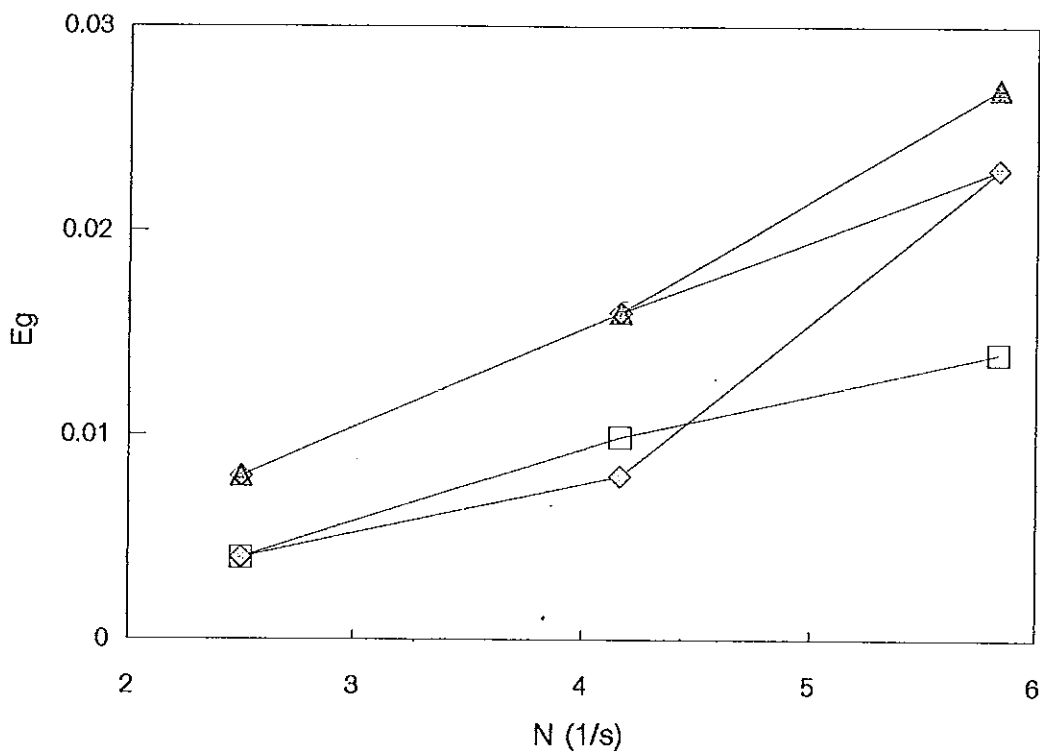
เมื่อของเหลวเป็นสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าให้ผลเหมือนกับในกรณีของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ในใบพัดทั้งสองแบบ แต่ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-6 มิลลิเมตร) มี

ลักษณะเป็นวงรีเห็นได้ชัดเจนจะเคลื่อนที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนเร็วกว่าฟองอากาศขนาดเล็ก และพบฟองอากาศขนาดเล็กอาจเป็นฟองอากาศเดี่ยวๆ หรือที่รวมกันเป็นกลุ่มเกาะติดผนังเป็นแผงมากขึ้น บางส่วนอยู่นิ่ง บางส่วนหลุดลอยขึ้นด้านบน และฟองอากาศมีการเคลื่อนที่ช้าลงเพราะสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้นจะมีการกระจายของฟองอากาศอยู่หนาแน่นมากขึ้น

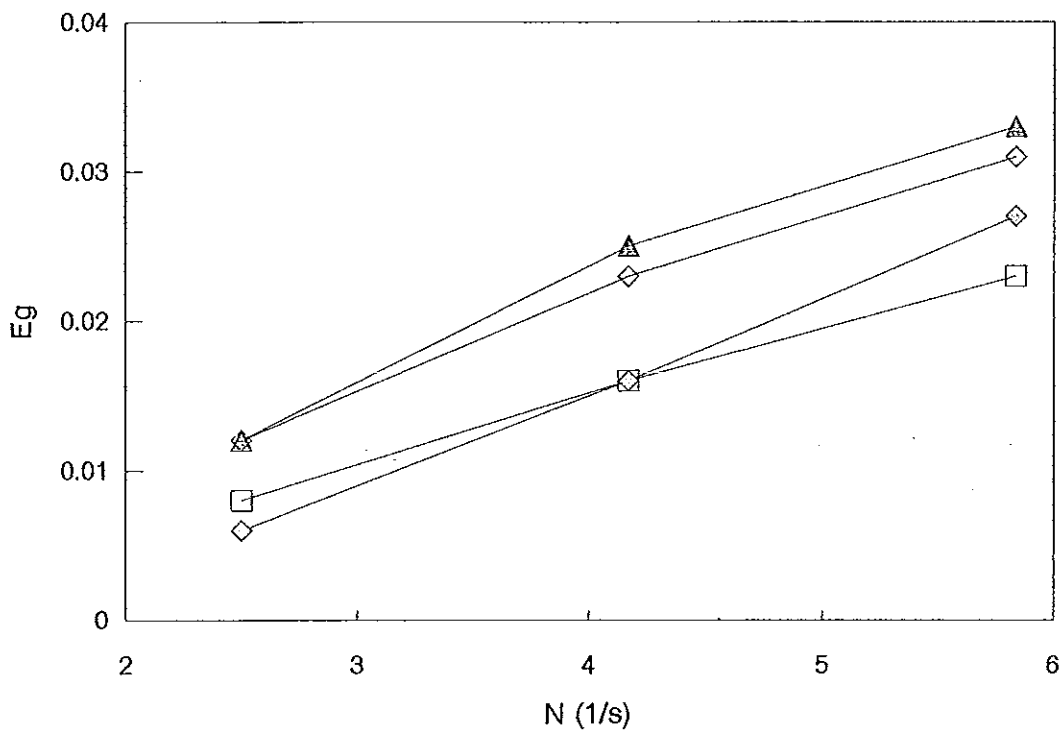


ภาพที่ 3.12 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

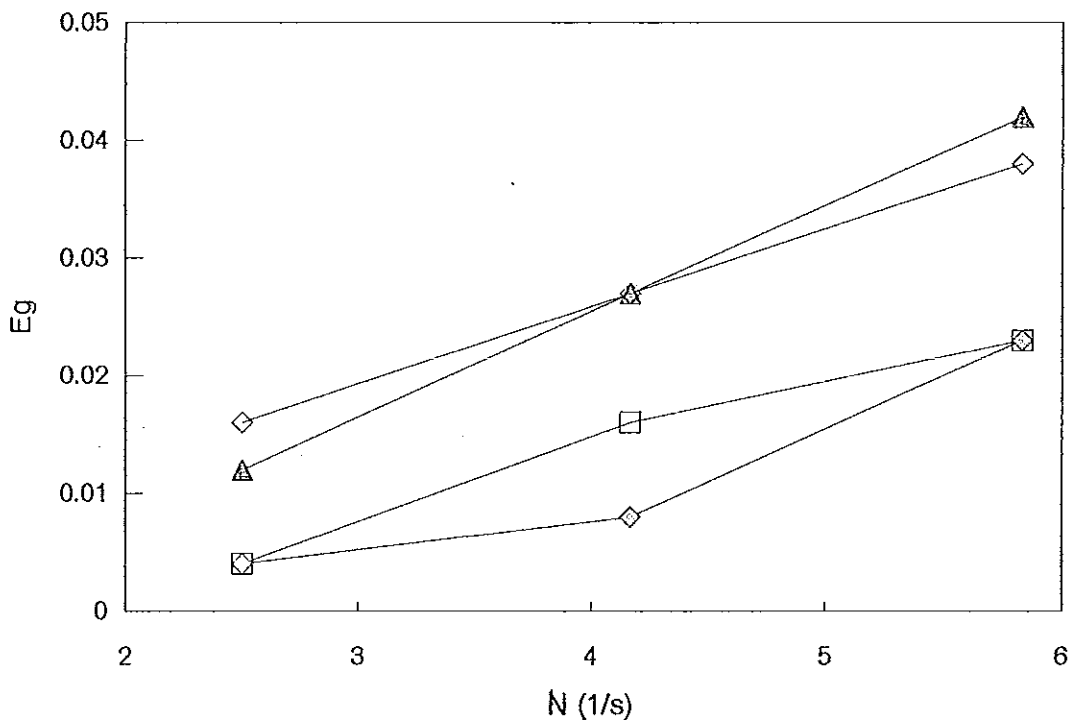
- (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
- (⊞) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (◊) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m



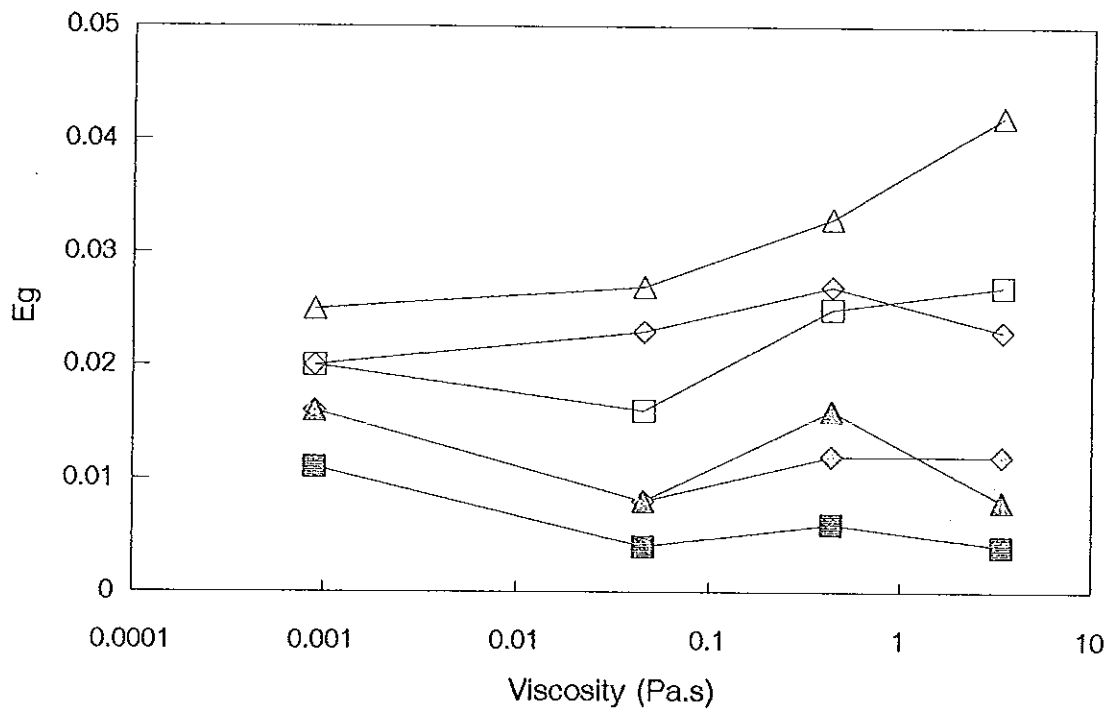
ภาพที่ 3.13 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก
 (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
 (⊕) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (⊖) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m



ภาพที่ 3.14 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก
 (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
 (⊞) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (◊) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m

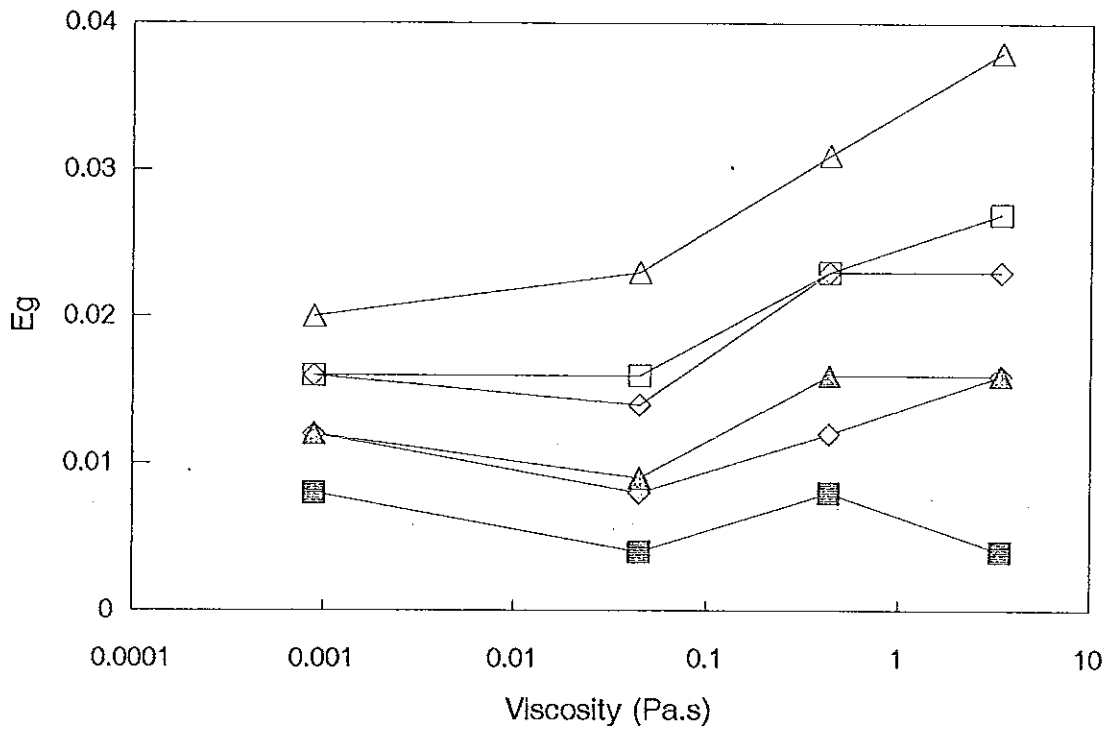


ภาพที่ 3.15 Hold-up (E_g) กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและอัตราการให้อากาศต่างๆ ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก
 (◇) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (▲) ใบพัดแบบ Flat blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
 (◻) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
 (◊) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine, อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m



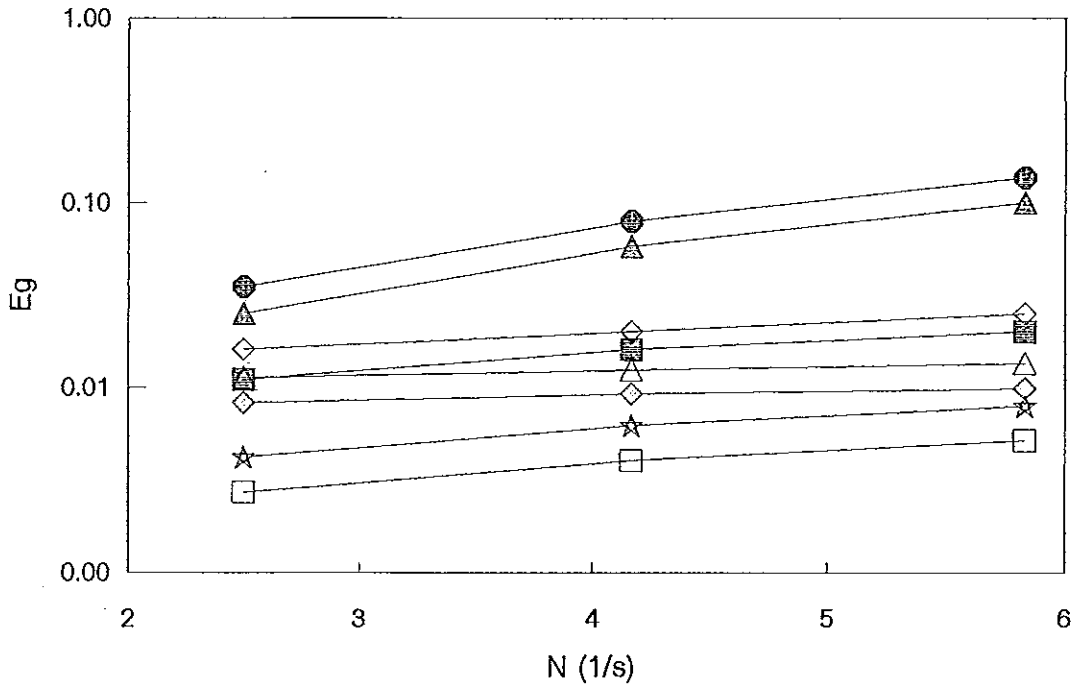
ภาพที่ 3.16 Hold-up (E_g) กับ ความหนืด ที่ความเร็วรอบและอัตราการให้อากาศต่างๆ สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine

- (■) ความเร็วรอบ 150 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.18 wvm
- (◇) ความเร็วรอบ 150 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.36 wvm
- (▲) ความเร็วรอบ 250 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.18 wvm
- (◻) ความเร็วรอบ 250 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.36 wvm
- (◊) ความเร็วรอบ 350 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.18 wvm
- (△) ความเร็วรอบ 350 rpm, อัตราการให้อากาศ 0.36 wvm



ภาพที่ 3.17 Hold-up (E_g) กับ ความหนืด ที่ความเร็วรอบและอัตราการใช้อากาศต่างๆ สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine

- (■) ความเร็วรอบ 150 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (◇) ความเร็วรอบ 150 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm
- (▲) ความเร็วรอบ 250 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (□) ความเร็วรอบ 250 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm
- (◊) ความเร็วรอบ 350 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (△) ความเร็วรอบ 350 rpm, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm



ภาพที่ 3.18 การเทียบเคียง Hold-up (E_g) ของสมการความสัมพันธ์ทั้งสามสมการกับผลที่ได้จากการทดลอง ที่ความเร็วรอบและอัตราการใช้อากาศต่างๆ

- (■) ผลที่ได้จากการทดลอง, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (◇) ผลที่ได้จากสมการที่ 7, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (△) ผลที่ได้จากสมการที่ 8, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (⊕) ผลที่ได้จากสมการที่ 9, อัตราการใช้อากาศ 0.18 vvm
- (◇) ผลที่ได้จากการทดลอง, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm
- (△) ผลที่ได้จากสมการที่ 7, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm
- (⊕) ผลที่ได้จากสมการที่ 8, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm
- (☆) ผลที่ได้จากสมการที่ 9, อัตราการใช้อากาศ 0.36 vvm

2.3 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม (Mixing time)

จากการทดลองศึกษาการผสมในถังหมักแบบกวน โดยวิธีติดตามการตอบสนองความเข้มข้นของเทรเซอร์ (tracer response) ทั้ง 3 ตำแหน่งในถังหมัก ในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จากการทดลองจะได้กราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ที่ ใบพัด ความเร็วรอบ และอัตราการให้อากาศต่างๆ (แสดงในภาคผนวก ข) เช่น ตัวอย่างกราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ทั้งสามตำแหน่งสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบ 5.833 รอบต่อนาที โดยไม่มีการให้อากาศในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) แสดงในภาพที่ 3.19

จากกราฟการตอบสนองของเทรเซอร์สำหรับสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 0.1 โดยน้ำหนักสามารถหาเวลาที่ใช้ในการผสม ($t_{mix, 95\%}$) ได้ (ภาพที่ 3.20, 3.21, 3.22, 3.24, 3.25, 3.26) และเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการผสมกับความเร็วรอบในการกวน พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมทั้งสามจุดในถังหมักจะมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะเป็นใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine รวมทั้งที่ระดับอัตราการให้อากาศทั้งสามระดับ (0, 0.18 และ 0.36 vvm) เช่น ในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการผสมอยู่ที่ค่าประมาณ 5 วินาที เมื่อใช้ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีการให้อากาศ (ภาพที่ 3.20, 3.21, 3.22) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างใบพัดทั้งสองแบบพบว่า เวลาที่ใช้ในการผสมสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine มีค่าน้อยกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine แต่จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีการให้อากาศ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาหาความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการผสมในถังหมักแบบกวนไว้อย่างมากมาย เช่น

Pedersen และคณะ (1994) ได้ศึกษาการผสมในถังหมักขนาด 15 ลิตร ที่ติดตั้งใบพัดแบบ Flat blade turbine ในสารละลายน้ำ ได้ให้ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการผสมที่ 63.2 เปอร์เซ็นต์ ออกมาเป็นสมการดังนี้

$$t_{mix,63.2\%} = 0.042 + \left(\frac{22.06}{N}\right) \quad (11)$$

Chisti และ Moo-Young (1993) ได้ศึกษาการผสมในถังหมักแบบกวนมาตรฐาน (Standard stirred tank) ขนาด 2.5 ลิตร ที่ติดตั้งใบพัดแบบ Flat blade turbine ได้ให้ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการผสมที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ออกมาเป็นสมการดังนี้

$$t_{mix,95\%} = 28.23N^{-0.41} \quad (12)$$

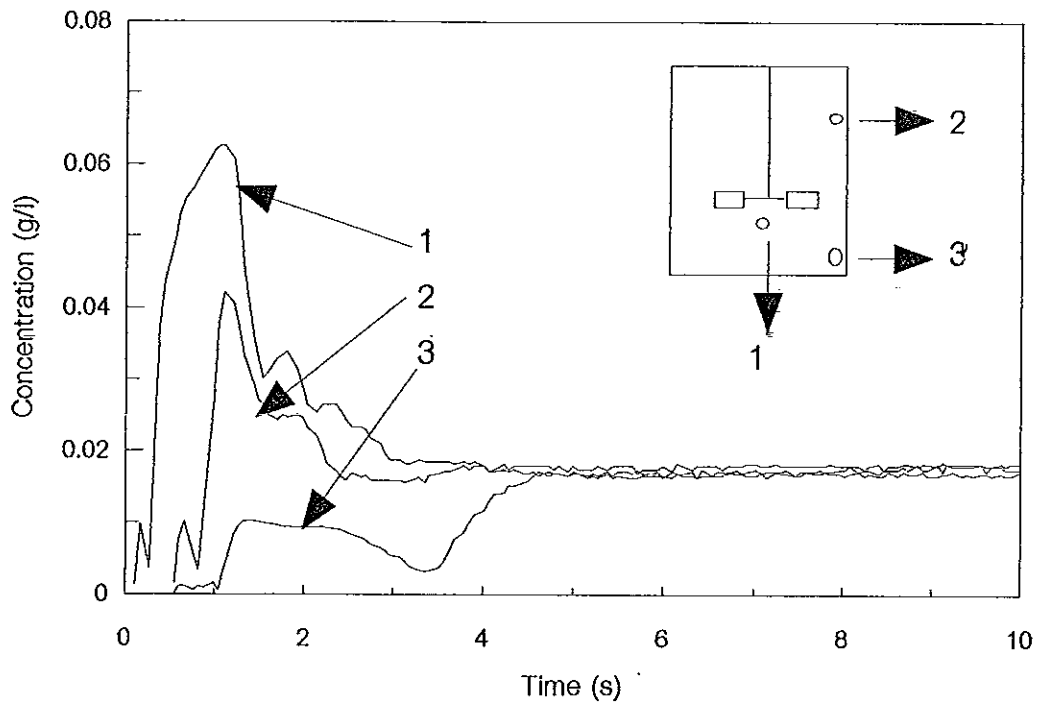
จากสมการดังกล่าวเมื่อนำมาเทียบเคียงกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันดังแสดงในภาพที่ 3.23 ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักก็ให้

ผลเป็นไปในทำนองเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 3.24, 3.25 และ 3.26 แต่พบข้อสังเกตคือ เวลาที่ใช้ในการผสมทั้งสามจุดที่ความเร็วรอบต่ำๆ เริ่มมีความแตกต่างกันเพราะว่าของเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากเดิม แต่โดยรวมแล้วผลการทดลองก็ยังคงแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการผสมไม่ว่าจะใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine หรือ ระบบที่มีการให้อากาศและไม่ให้อากาศก็ตาม จะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวน และพบข้อสังเกตคือเวลาที่ใช้ในการผสมทั้งสามตำแหน่งของใบพัดแบบ Pitched blade turbine โดยเฉพาะตำแหน่งที่ 2 และ 3 จะมีค่าใกล้เคียงกันหรือตำแหน่งที่สามมีค่าต่ำกว่าตำแหน่งที่ 2 เนื่องจากรูปลักษณะการไหลในแนวแกนจึงทำให้เทรซเซอร์ถูกดีไปยังตำแหน่งที่ 2 ได้ดีกว่าตำแหน่งที่ 3 จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการผสมมีความแปรปรวน นอกจากนี้ยังมีผลต่อกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ที่ทำให้มีการสลับตำแหน่งของตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 เช่นกัน

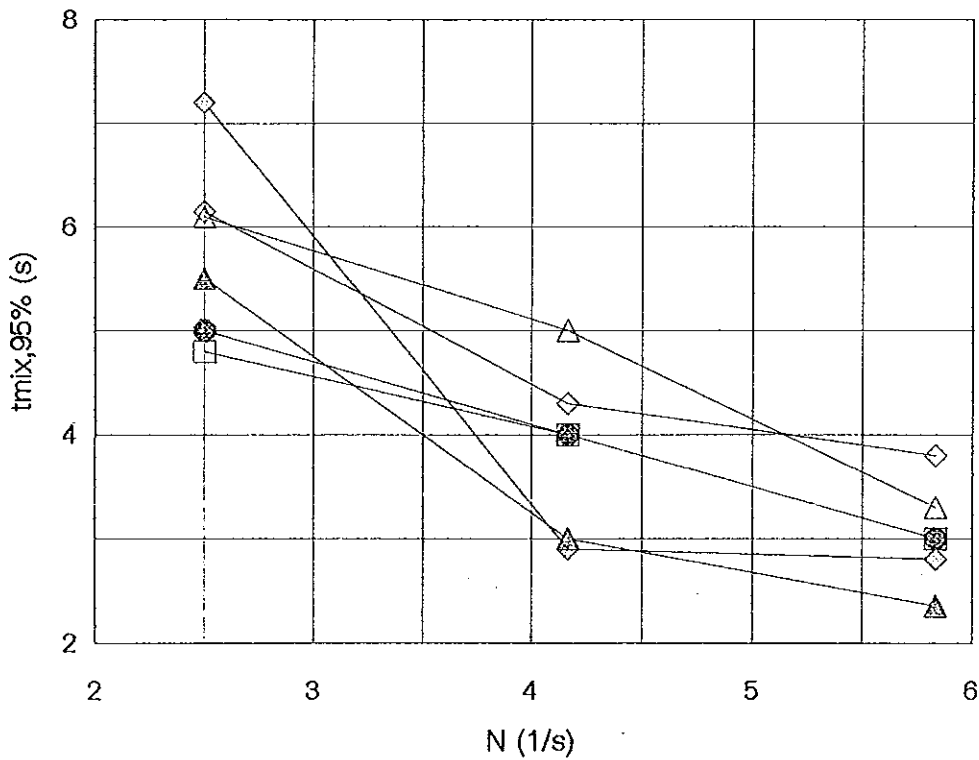
สำหรับสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จากกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ไม่สามารถหา $t_{mix, 95\%}$ ได้ เพราะต้องใช้เวลาในการผสมนานมากจึงได้หาเวลาที่ใช้ในการผสมที่ 63.2% ($t_{mix, 63.2\%}$) แทน และเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $t_{mix, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบ พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมทั้งสามจุดในถังหมักจะมีค่าที่แตกต่างกันมากและมีความแปรปรวน รวมทั้งบางจุดก็ไม่สามารถหาเวลาที่ใช้ในการผสมได้เพราะว่าของเหลวไม่สามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถัง ไม่ว่าจะใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine รวมทั้งที่ระดับอัตราการให้อากาศ 0.18 และ 0.36 vvm ดังแสดงในภาพที่ 3.27, 3.28 และ 3.29

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการผสมจะไม่สามารถบอกถึงการผสมที่ถึงได้ดี เนื่องจากของเหลวไม่สามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถัง แต่สามารถบอกได้แค่ว่าการผสมที่จุดทั้งสามนั้นเป็นอย่างไร โดยที่ทั้งสามจุดนั้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และจะสังเกตเห็นว่าที่ความเร็วรอบในการกวนสูงๆ (5.83 รอบต่อวินาที) $t_{mix, 63.2\%}$ ทั้งสามจุดค่อนข้างจะใกล้เคียงกันจึงเป็นบรรทัดฐานที่พอจะบอกได้ว่า ถ้าเพิ่มความเร็วรอบในการกวนให้สูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสม น่าจะใช้เป็นบรรทัดฐานในการวิเคราะห์การผสมในถังหมักแบบกวนได้เช่นเดียวกับการทดลองในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 0.1 โดยน้ำหนัก ได้ เพราะว่าของเหลวสามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถัง แต่โดยรวมแล้วผลการทดลองก็ยังคงแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการผสมไม่ว่าจะใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine หรือ ระบบที่มีการให้อากาศและไม่ให้อากาศก็ตาม จะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวน

ดังนั้นจากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสมในถังหมักแบบกวนสำหรับงานวิจัยนี้จึงสามารถบอกถึงการผสมได้อย่างชัดเจนเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น (>0.1%) ฉะนั้นจึงได้หาตัวแปรอื่นที่สามารถบอกถึงการผสมได้ดีกว่า t_{mix} คือ ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (volume of mixing region) ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมที่นำมาพิจารณานี้ก็น่าจะเป็นวิธีที่บ่งบอกถึงการผสมได้ดี รายละเอียดและผลการทดลองจะได้กล่าวในบทต่อไป

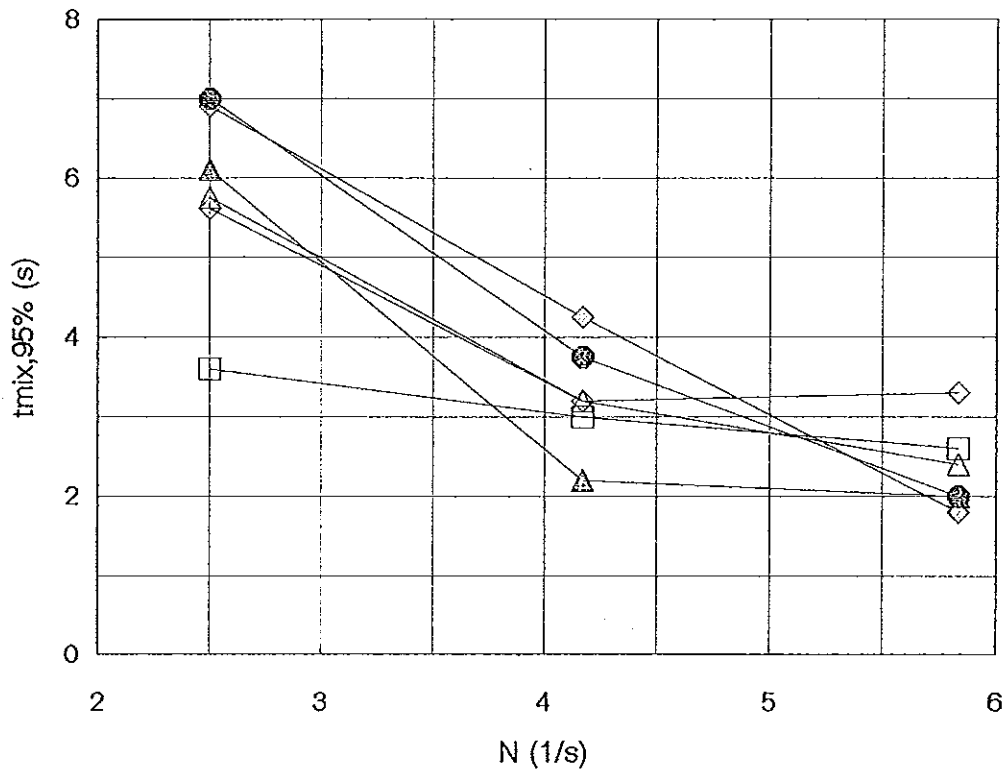


ภาพที่ 3.19 การตอบสนองของทรูเซอร์สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที และอัตราการให้อากาศ 0 vvm ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ทั้งสามตำแหน่ง
 (1) ตำแหน่งใต้ใบพัด
 (2) ตำแหน่งด้านบน
 (3) ตำแหน่งด้านล่าง



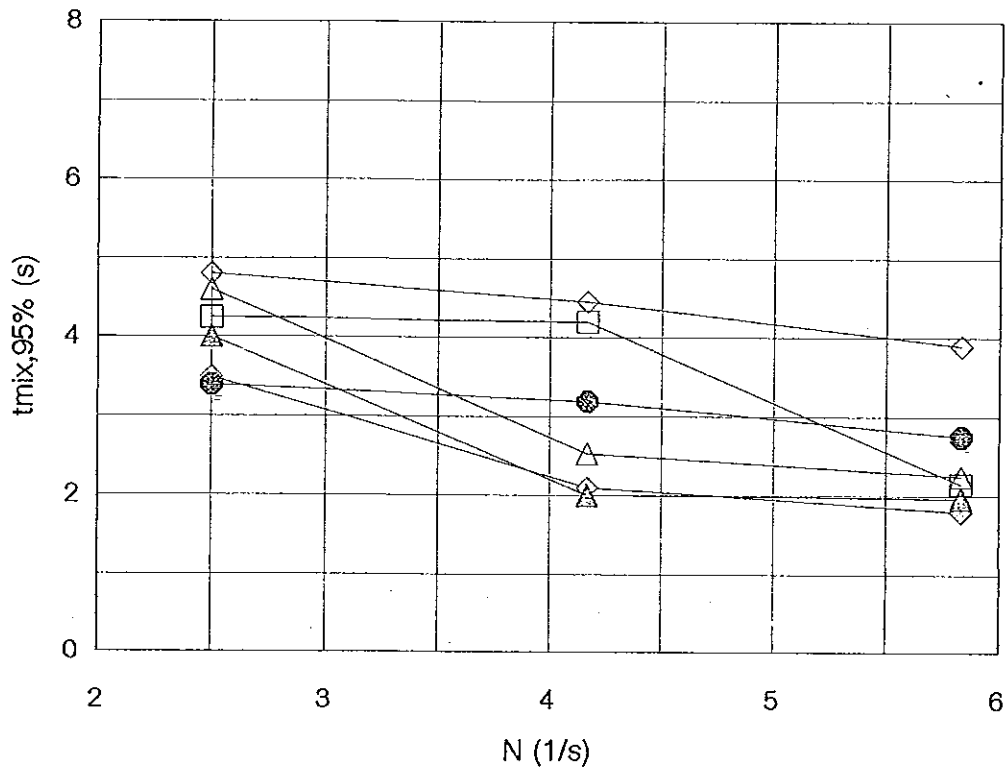
ภาพที่ 3.20 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 vvm

- (⊞) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (⊠) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (◊) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



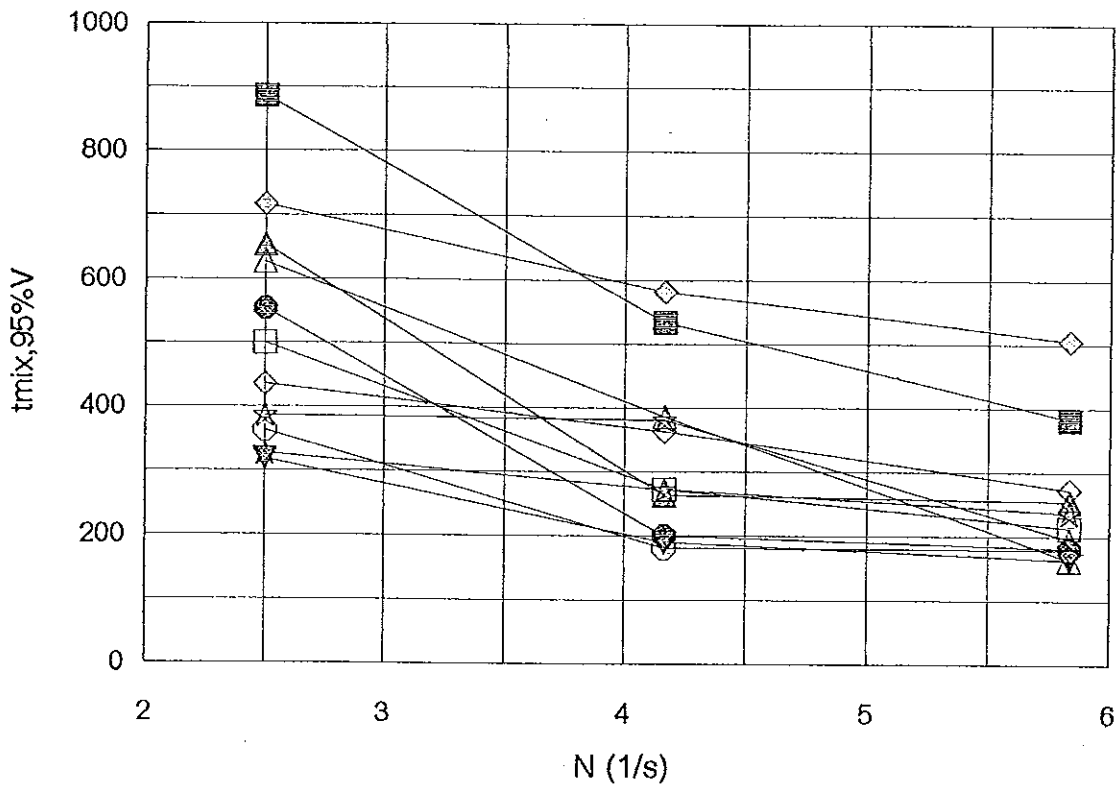
ภาพที่ 3.21 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm

- (\square) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (\triangle) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (\diamond) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (\bullet) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (\triangle) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (\diamond) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



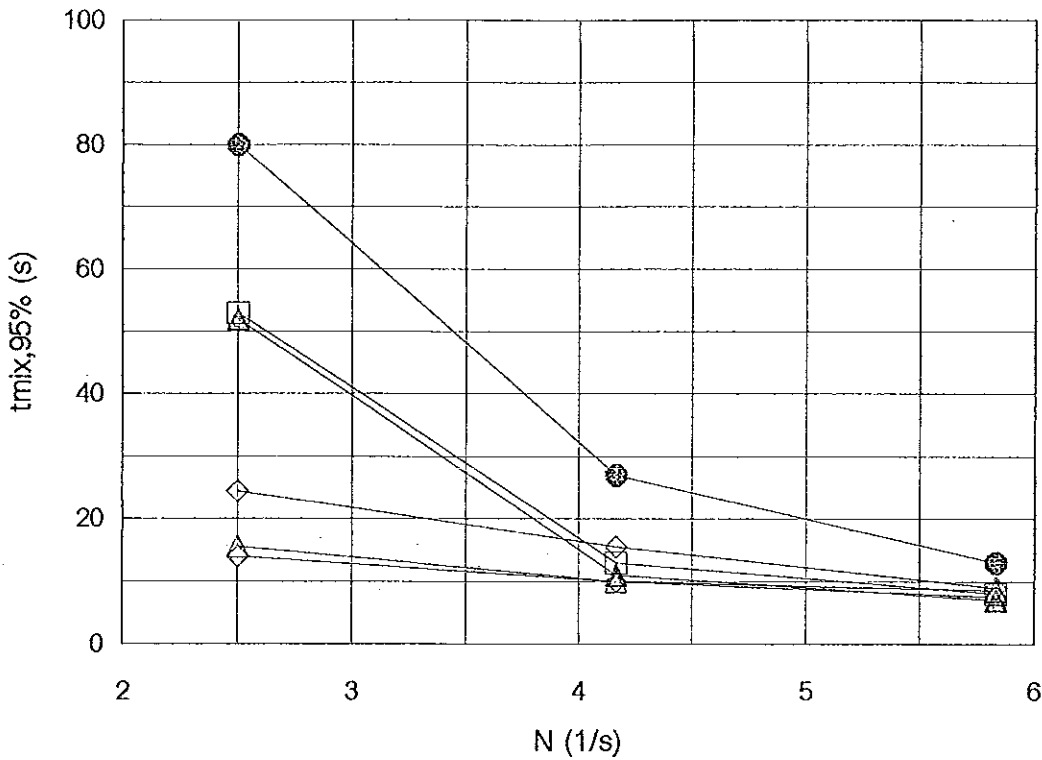
ภาพที่ 3.22 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (□) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (●) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



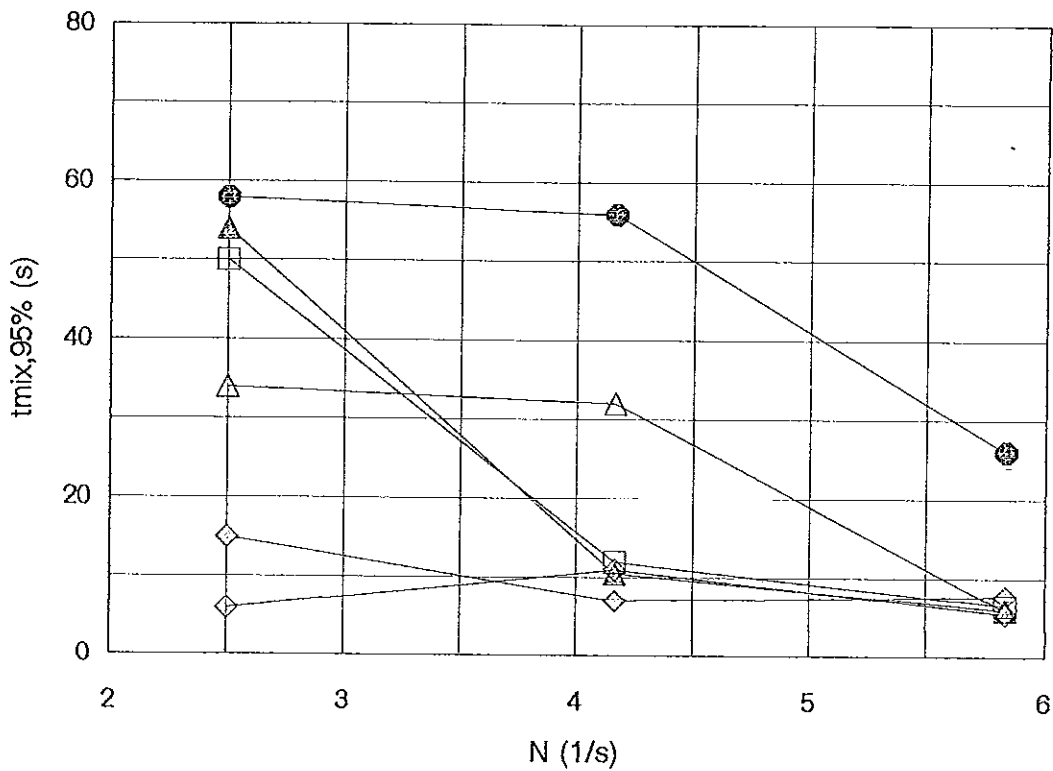
ภาพที่ 3.23 การเปรียบเทียบ $t_{mix, 95\%}/V$ ระหว่างผลจากสมการที่ 11 และ 12 กับผลที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งสำหรับ ใบพัดแบบ Flat blade turbine ในสภาวะลมเฉือนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ ต่างๆ

- (■) สมการที่ 11 (Pedersen และคณะ (1994))
- (◇) สมการที่ 12 (Chisti และ Moo-Young (1993))
- (▲) ตำแหน่งที่ 1. อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (□) ตำแหน่งที่ 2. อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (◇) ตำแหน่งที่ 3. อัตราการให้อากาศ 0 w/m
- (△) ตำแหน่งที่ 1. อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (●) ตำแหน่งที่ 2. อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (☆) ตำแหน่งที่ 3. อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m
- (▽) ตำแหน่งที่ 1. อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
- (⊖) ตำแหน่งที่ 2. อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m
- (★) ตำแหน่งที่ 3. อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m



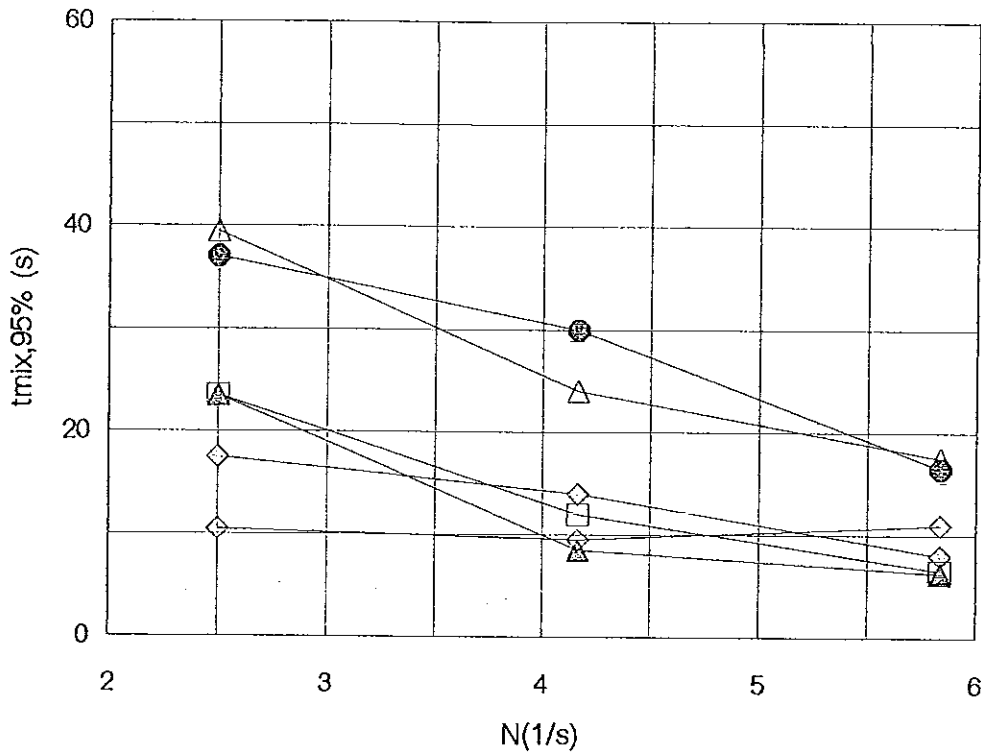
ภาพที่ 3.24 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 vvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (□) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



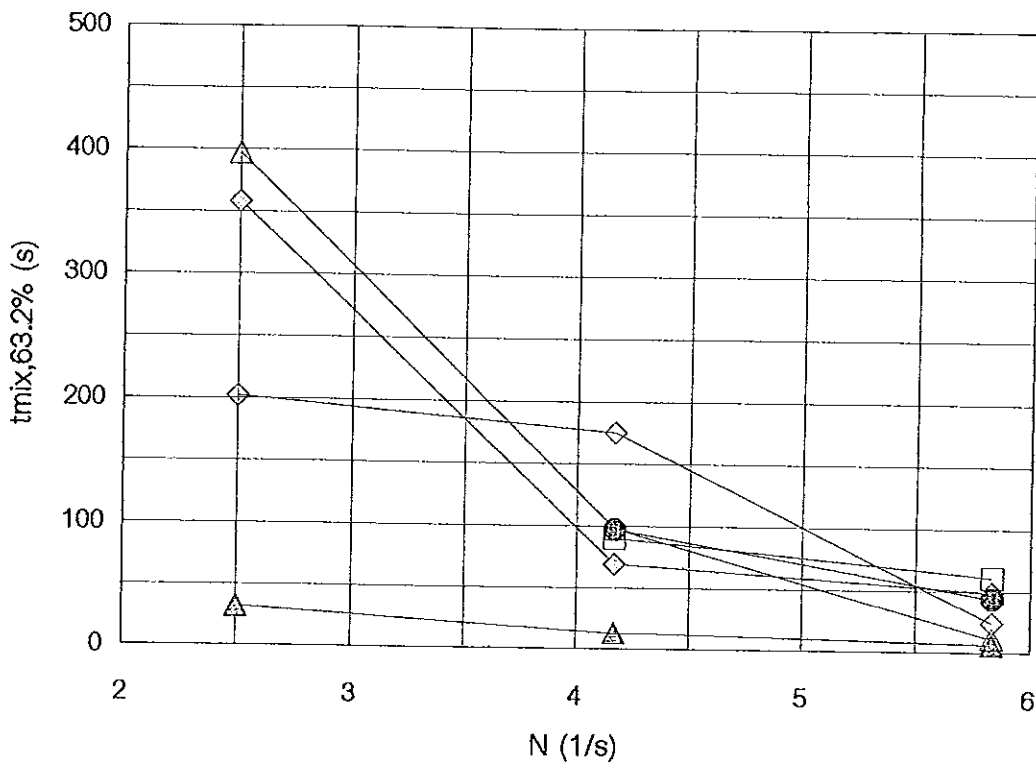
ภาพที่ 3.25 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 wvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (□) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



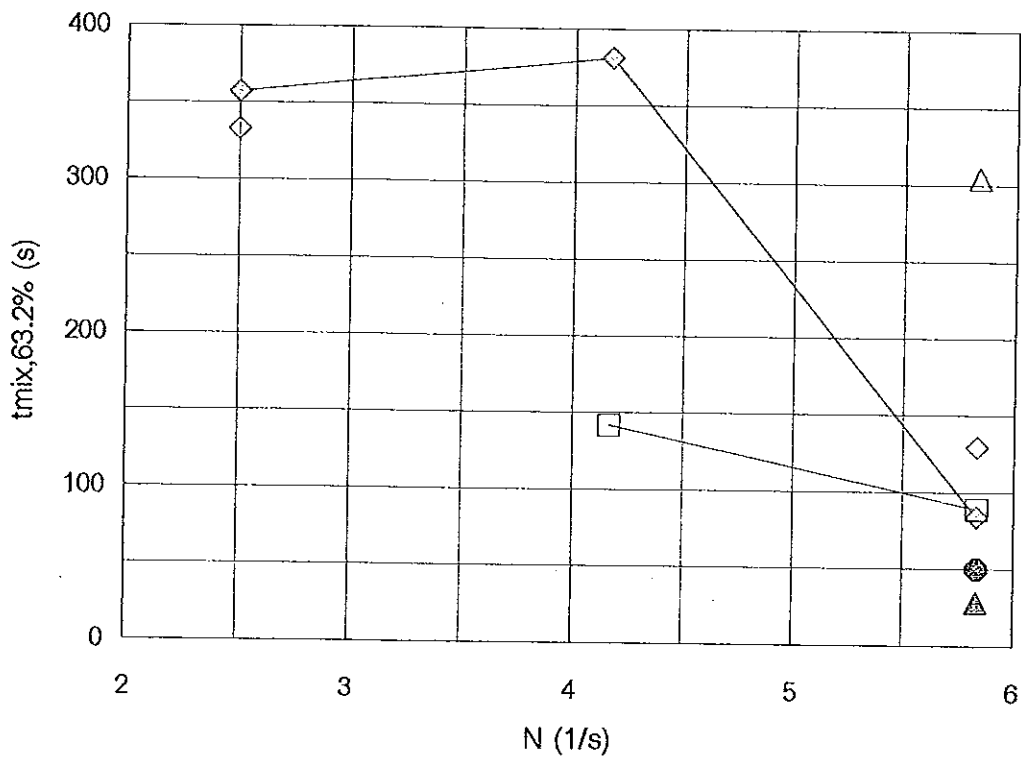
ภาพที่ 3.26 $t_{mix, 95\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (⊠) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◊) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊕) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



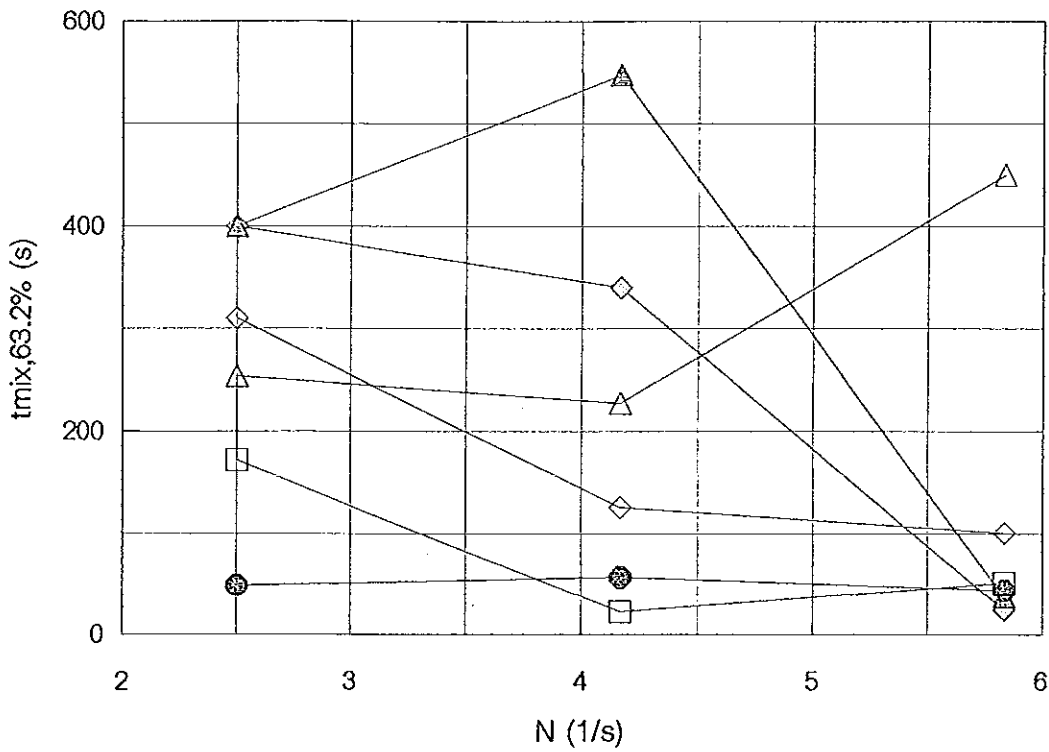
ภาพที่ 3.27 $t_{mix, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0 vvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (⊕) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◊) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



ภาพที่ 3.28 $t_{mix, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (⊞) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



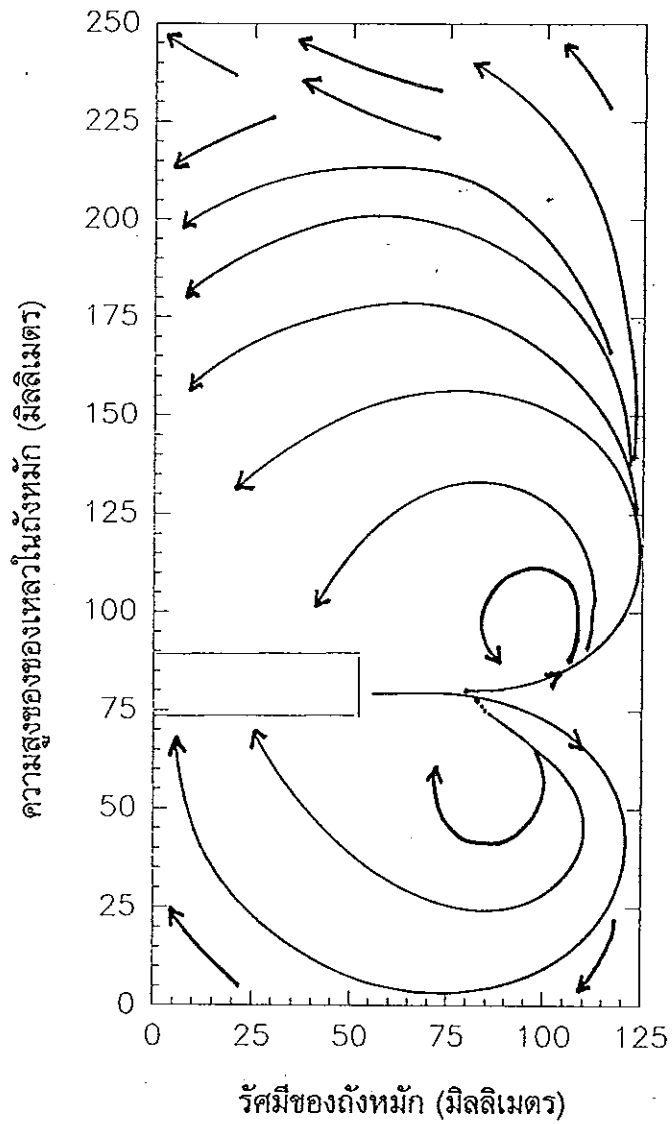
ภาพที่ 3.29 $t_{mix, 63.2\%}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ตำแหน่งทั้งสามตำแหน่งและใบพัดแบบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (◇) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (□) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▲) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (◊) ตำแหน่งที่ 1. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (⊙) ตำแหน่งที่ 2. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (△) ตำแหน่งที่ 3. ใบพัดแบบ Pitched blade turbine

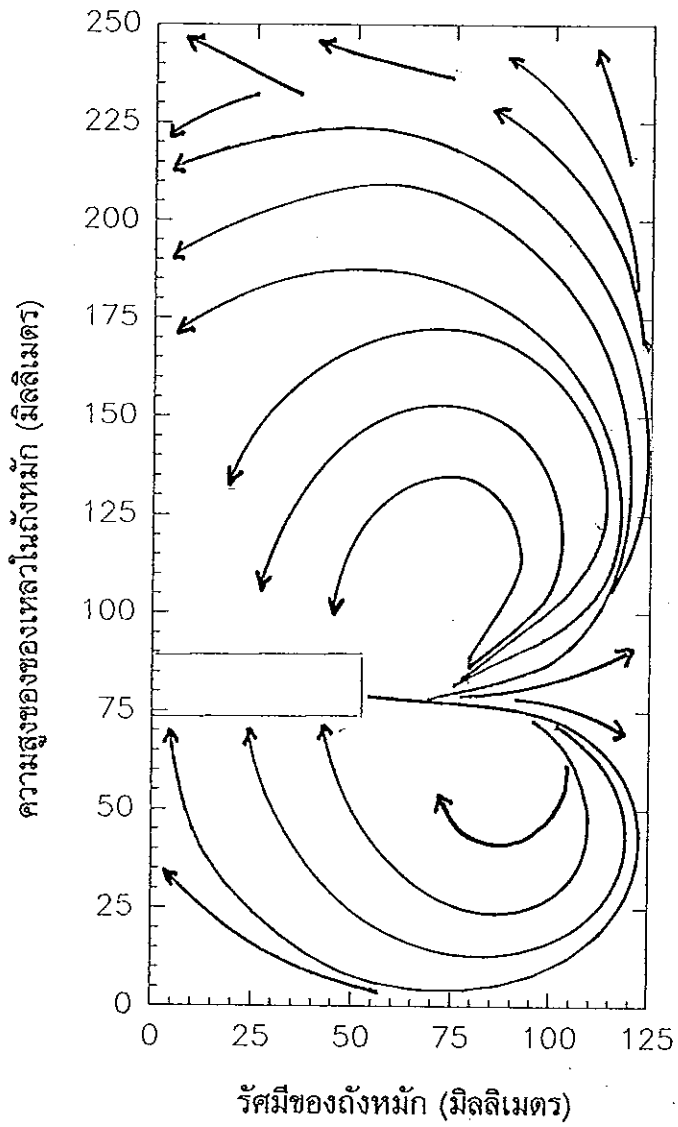
2.4 ผลการศึกษาารูปลักษณะการไหล (Flow configurations)

จากการทดลองศึกษาารูปลักษณะการไหลในถังหมักแบบกวน โดยการบันทึการูปลักษณะการไหลโดยใช้ใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบต่างๆ ใช้วิธีวาดภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เดิมลงไปในถังหมัก (แผ่นพลาสติกสีดำสี่เหลี่ยมเล็กๆ ขนาด 2x2 มิลลิเมตร) ด้วยสายตา พบว่าใบพัดทั้งสองแบบจะส่งผลให้เกิดารูปลักษณะการไหลแบบ การไหลในแนวรัศมี (radial flow) และการไหลในแนวแกน (axial flow) ตามลำดับ ตัวอย่างเช่นในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก รูปลักษณะการไหลและขอบเขตโซนของการผสมของใบพัดทั้งสองแบบจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้นจาก 2.5 รอบต่อวินาที เป็น 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าารูปลักษณะการไหลและขอบเขตโซนของการผสมไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะว่าของเหลวในถังสามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถัง แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดก็คือความรุนแรงของการไหลวนที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 และ 3.35 และเมื่อสารละลาย แซนแทนมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.1, 0.25 และ 0.5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ความรุนแรงของารูปลักษณะของการไหลและขอบเขตโซนของการผสมลดลงตามลำดับ (รายละเอียดของารูปลักษณะการไหลในแต่ละกรณีแสดงในภาคผนวก ค)

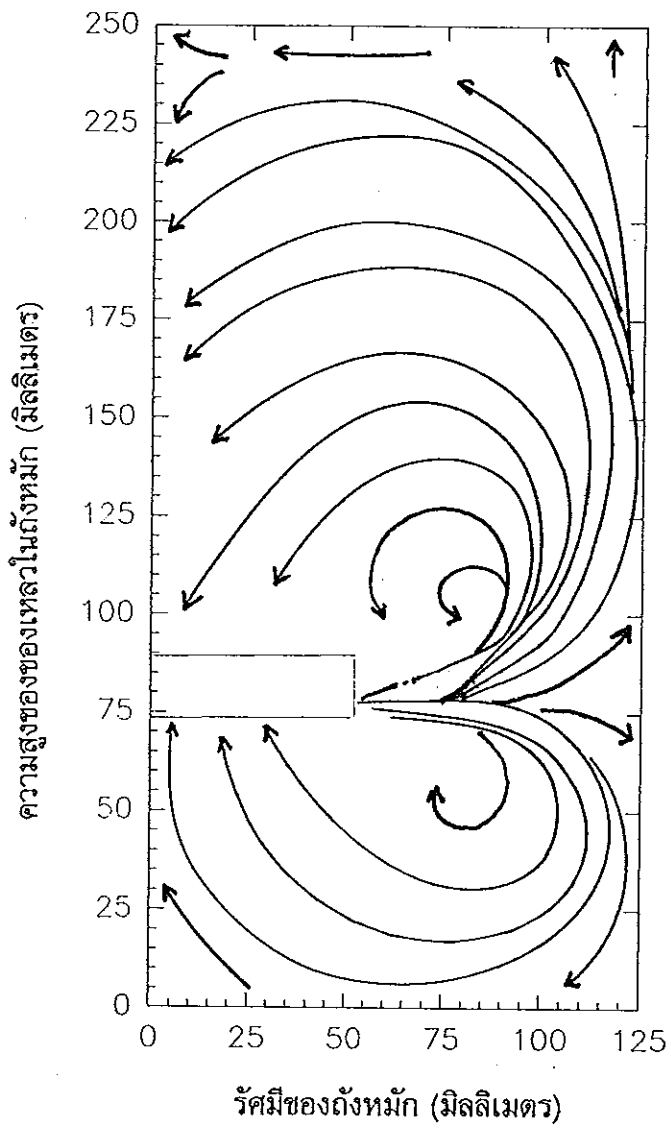
จาการูปลักษณะการไหลซึ่งรวมไปถึงขอบเขตโซนของการผสมในถังหมัก พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบในการกวนจะทำให้ารูปลักษณะการไหลและรวมถึงขอบเขตโซนของการผสมนั้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของของเหลวในถังหมักมีผลทำให้ความรุนแรงของารูปลักษณะการไหลและขอบเขตโซนของการผสมลดลง ซึ่งส่งผลให้เกิดบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่เกิดขึ้นในถังหมักอย่างเห็นได้ชัด ดังในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่สามารถสังเกตเห็นบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่แบ่งเป็นโซนอย่างชัดเจน จาการูปลักษณะการไหลดังกล่าว ทำให้มีอิทธิพลไปถึงการแพร่กระจายของของเหลวซึ่งรวมถึงอากาศในถังหมัก ถ้าของเหลวในถังหมักสามารถผสมกันได้อย่างทั่วถึงแล้วนั้นก็หมายความว่าอากาศก็สามารถแพร่กระจายไปได้ทั้งถังเช่นกัน ดังนั้นจะส่งผลให้ระบบการหมักดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกันถ้าเกิดมีบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่เกิดขึ้นในถังหมักนั้นก็แสดงว่าของเหลวรวมทั้งอากาศไม่สามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถังก็จะส่งผลในทางลบต่อระบบการหมักเช่นกัน



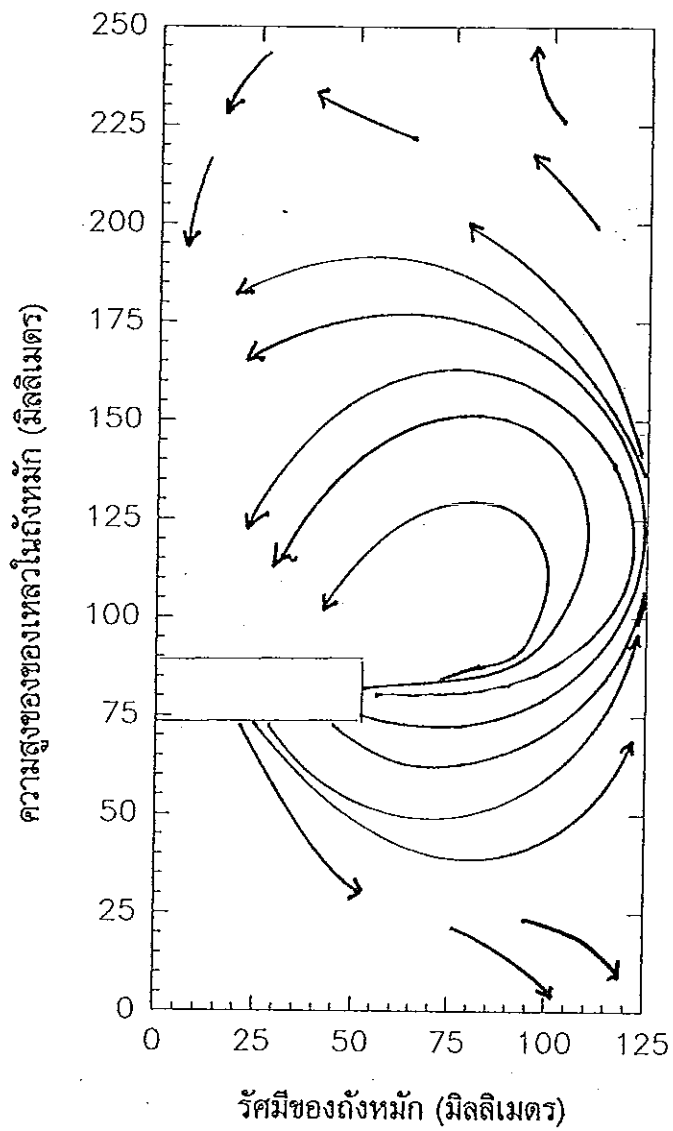
ภาพที่ 3.30 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการหมุน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



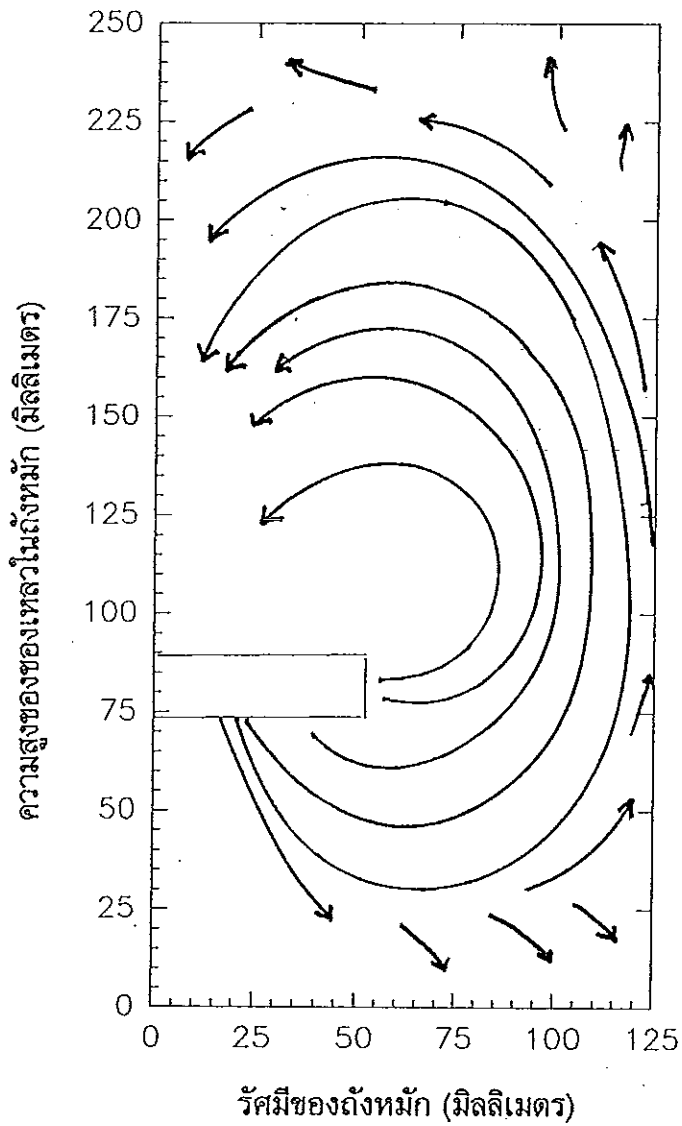
ภาพที่ 3.31 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



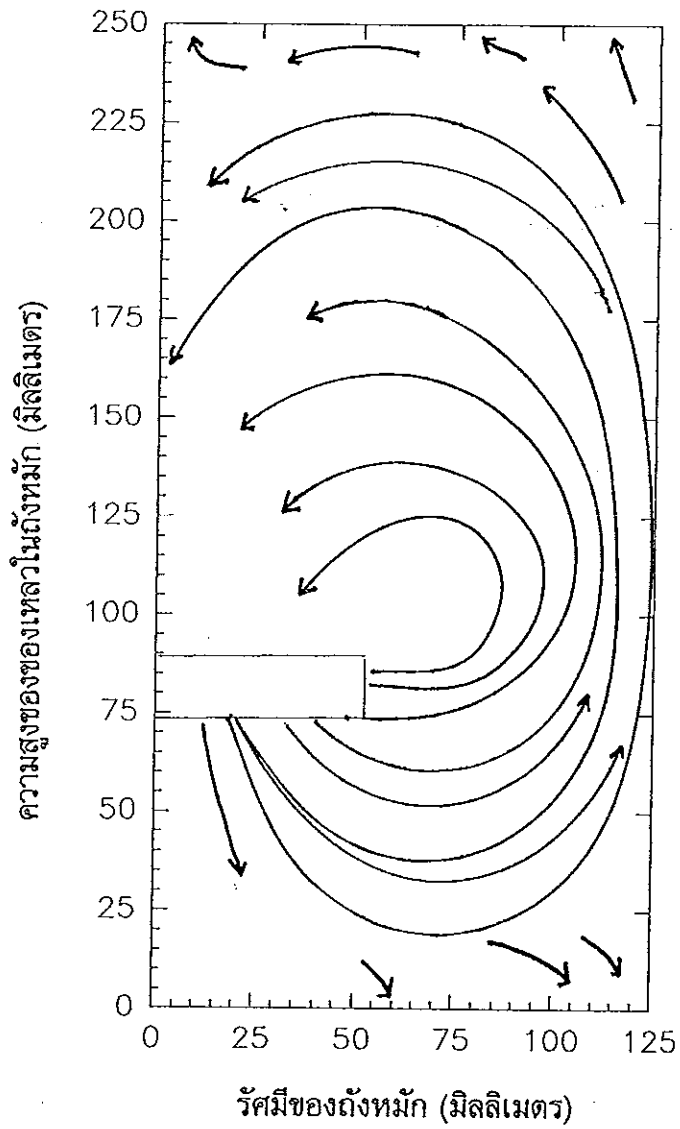
ภาพที่ 3.32 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flate blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.33 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกววน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.34 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.35 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกววน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

2.5 การศึกษาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (Volume of mixing regions)

จากการทดลองศึกษาการผสมในถังหมักแบบกวน โดยวิธีการหาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมตามวิธีการของ Funahashi และคณะ (1987b) ที่ได้ศึกษาและสังเกตรูปแบบของการไหลและการผสมในถังหมักแบบกวน พบว่าปริมาตรทั้งหมดของถังอาจแบ่งได้เป็น 3 บริเวณคือ

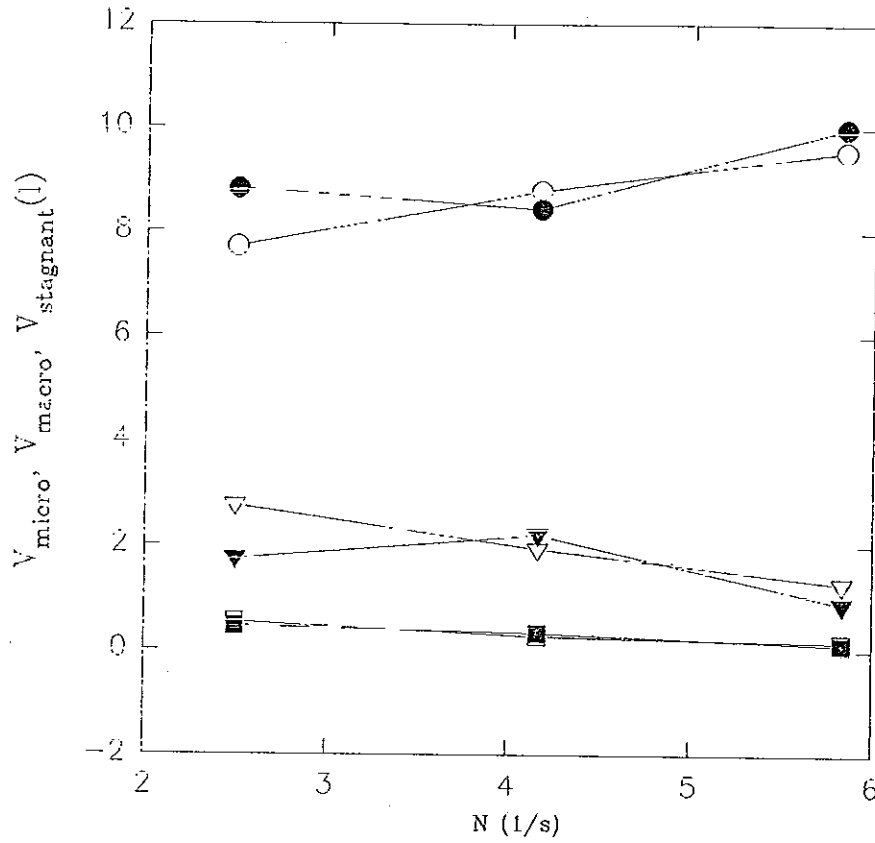
- บริเวณที่มีการผสมระดับไมโคร (micromixing region, V_{micro}) เป็นบริเวณที่ใกล้ๆ กับใบพัด ซึ่งมีการผสมกันอย่างดี จนเป็นเนื้อเดียวกันตลอดเวลา
- บริเวณที่มีการผสมระดับมาโคร (macromixing region, V_{macro}) เป็นบริเวณที่มีการไหลวนช้าแต่การไหลวนทั่วถึงกันตลอด
- บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่ง (stagnant region, $V_{stagnant}$) เป็นบริเวณที่ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่

จากผลการทดลองพบว่าความเร็วรอบในการกวนมีผลต่อปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณในถังหมักทั้งในสถานะที่มีและไม่มีการให้อากาศ เช่นในสารละลายแซนแทน ความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก V_{micro} จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนปริมาตรใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาตรของของเหลวในถัง (11 ลิตร) ในขณะที่ V_{macro} และ $V_{stagnant}$ ลดลงตามลำดับและเข้าสู่ศูนย์เมื่อ V_{micro} เท่ากับปริมาตรของของเหลวในถังทั้งหมดเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 และ 3.41 สำหรับผลของปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก พบว่าความเร็วรอบในการกวนมีผลต่อปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณในถังหมักทั้งในสถานะที่มีและไม่มีการให้อากาศเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.42, 3.43 และ 3.44 จากผลการทดลอง V_{micro} และ V_{macro} จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการกวนต่ำกว่าค่าวิกฤต (ที่ระดับความเร็วรอบในการกวนที่ทำให้ V_{macro} มีค่าสูงสุด) แต่ถ้าความเร็วรอบในการกวนสูงกว่าค่าวิกฤตนี้แล้วจะมีผลทำให้ V_{micro} เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง V_{micro} เท่ากับปริมาตรของของเหลวในถังทั้งหมด ในขณะที่ V_{macro} และ $V_{stagnant}$ ลดลงและเข้าสู่ศูนย์ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีการให้อากาศ พบว่า V_{micro} และ V_{macro} จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้นในขณะที่ $V_{stagnant}$ ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 3.45, 3.46 และ 3.47 เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณในถังหมักทั้งในสถานะที่มีและไม่มีการให้อากาศในแต่ละความเข้มข้นพบว่าให้ผลไม่แตกต่างกันในทุกกรณี

เมื่อนำผลของปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีการให้อากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3.48, 3.49 และ 3.50 พบว่าที่ N'_{Re} ต่ำ ปริมาตรทั้ง V_{micro} และ V_{macro} จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ $V_{stagnant}$ ลดลง และเมื่อ N'_{Re} สูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ($N'_{Re} = 100$) V_{micro} จะ

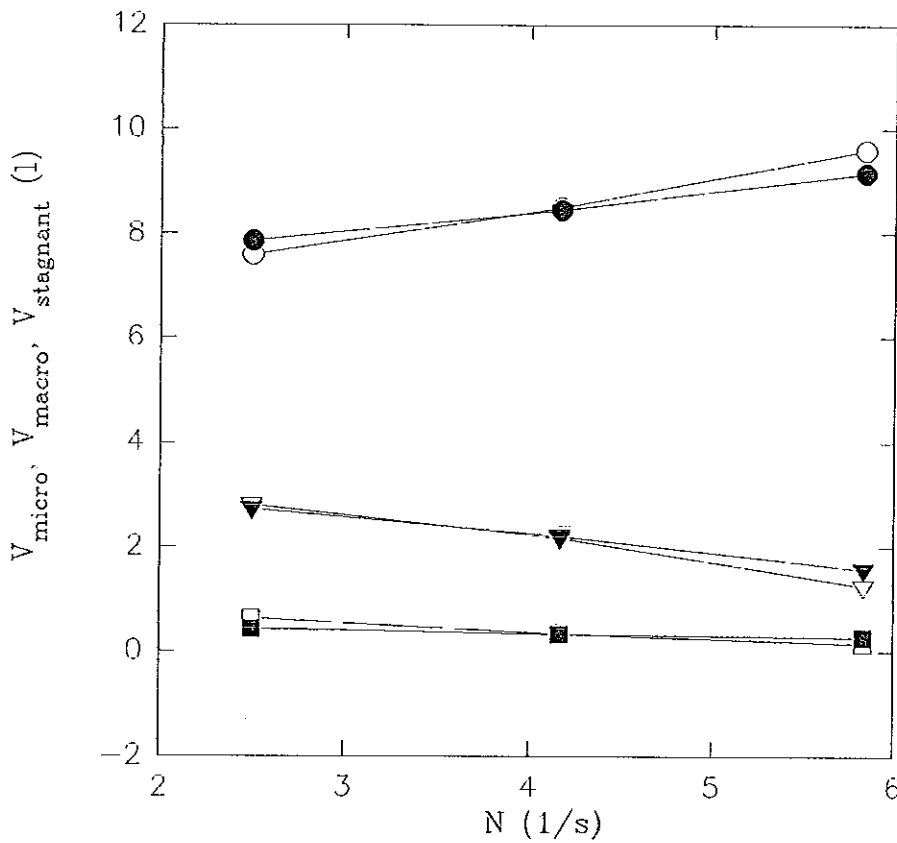
เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง V_{micro} เท่ากับปริมาตรของของเหลวที่อยู่ใต้งทั้งหมด ในขณะที่ V_{macro} และ $V_{stagnant}$ ลดลงจนในที่สุดเข้าสู่ศูนย์เมื่อ V_{micro} เท่ากับปริมาตรของเหลวที่อยู่ใต้งทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine ซึ่งต่างก็ให้ผลไม่แตกต่างกันทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีลมให้อากาศ

อย่างไรก็ตามปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณนี้น่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการพิจารณาถึงการผสมในถังหมักแบบกวนได้ไม่มากนักน้อย และใช้ประกอบในการสร้างแบบจำลองที่จะใช้ในการพิจารณาถึงการผสมที่ซับซ้อนขึ้นได้ รวมทั้งใช้เป็นแนวคิดหรือข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นสำหรับทำนายถึงการผสมในถังหมักแบบกวนได้อย่างลึกซึ้งต่อไป



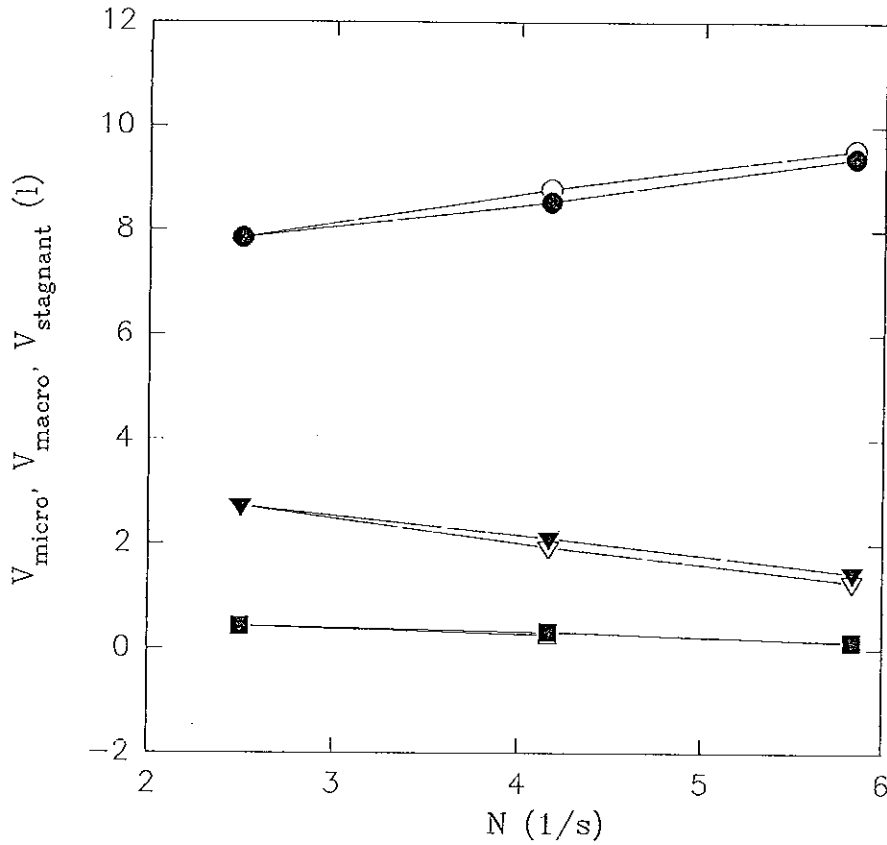
ภาพที่ 3.36 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการหมุน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



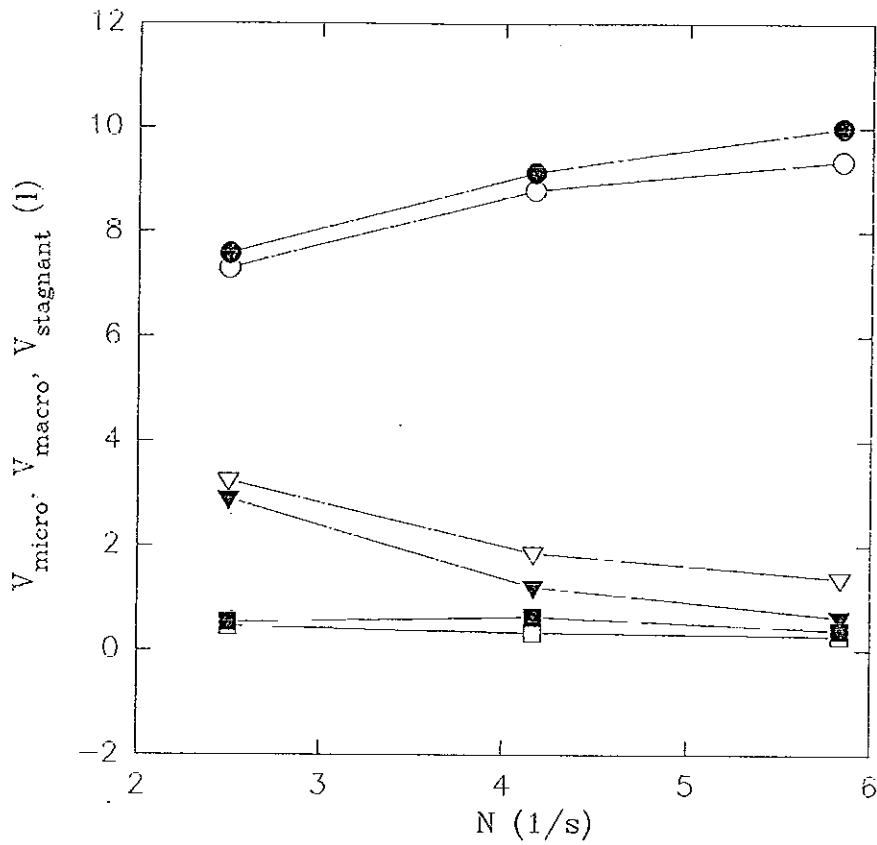
ภาพที่ 3.37 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



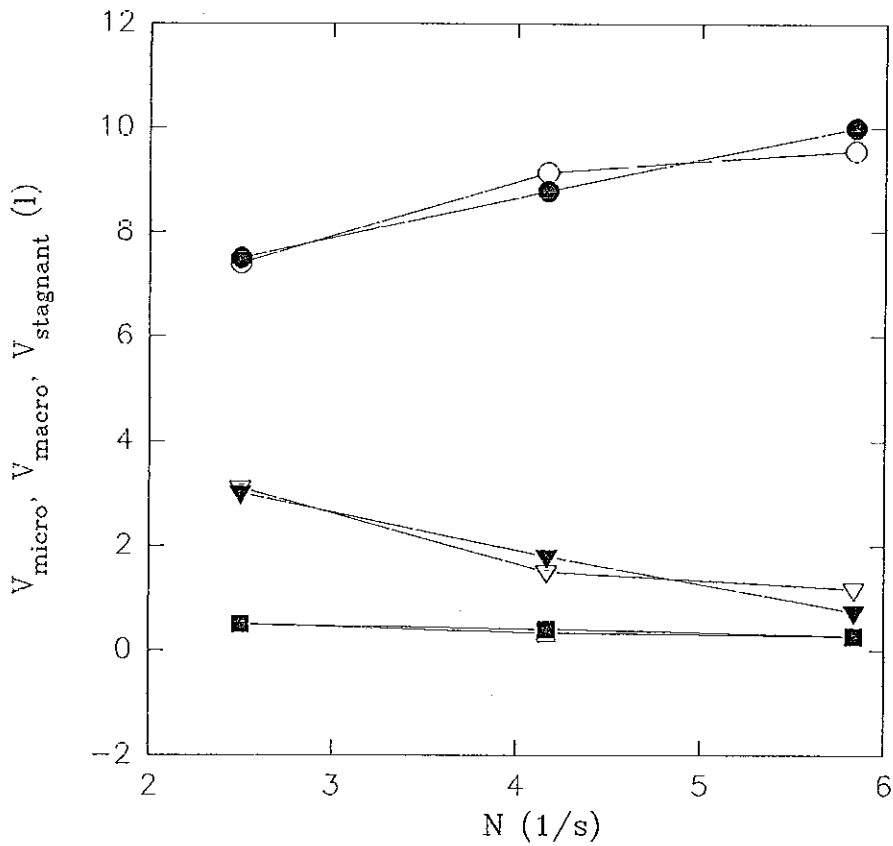
ภาพที่ 3.38 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



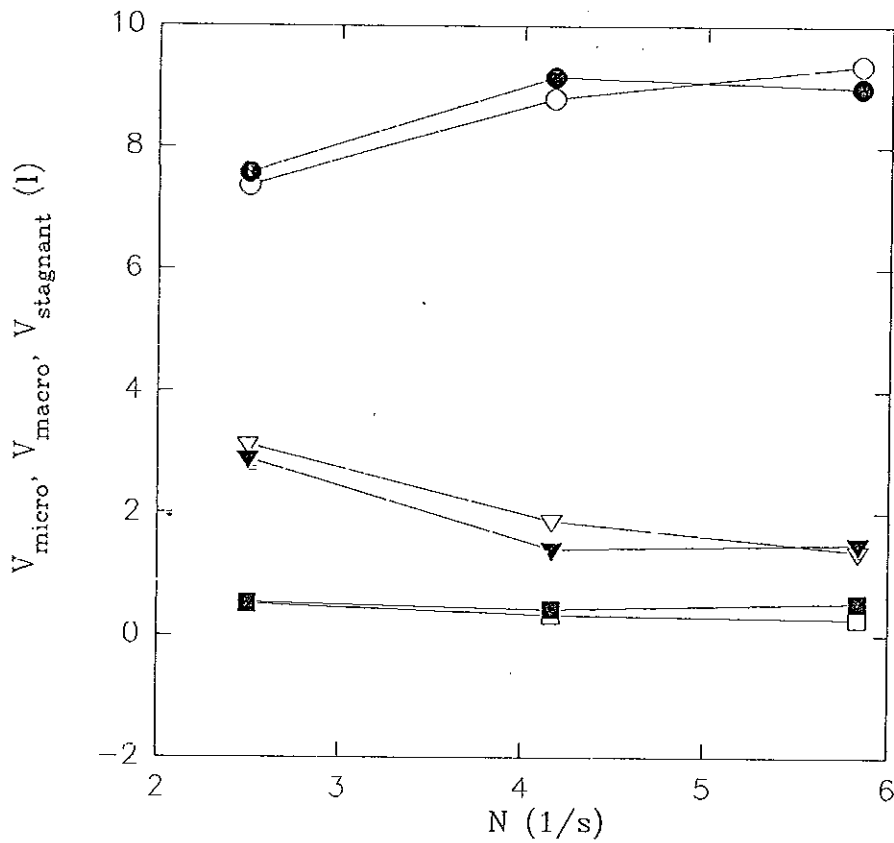
ภาพที่ 3.39 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนเทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



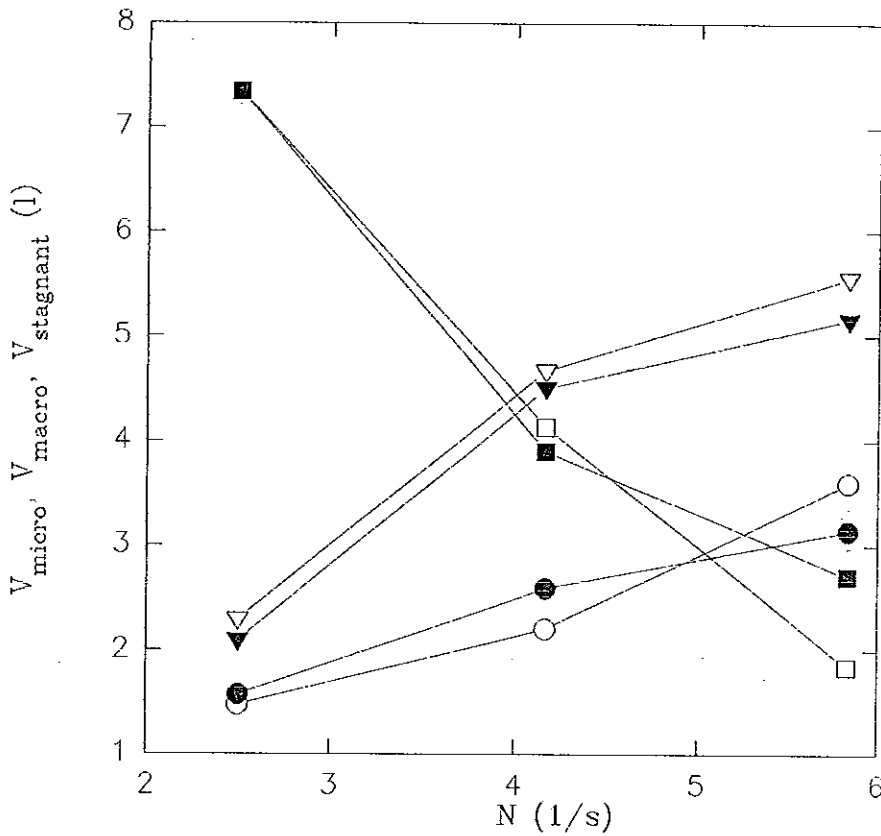
ภาพที่ 3.40 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



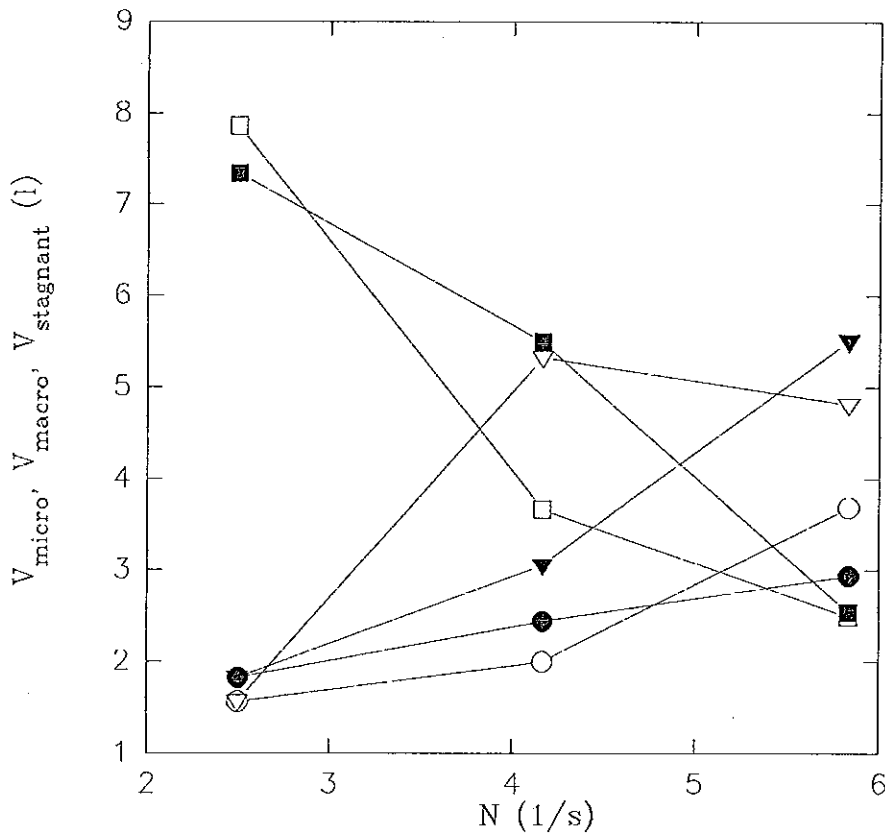
ภาพที่ 3.41 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.36 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



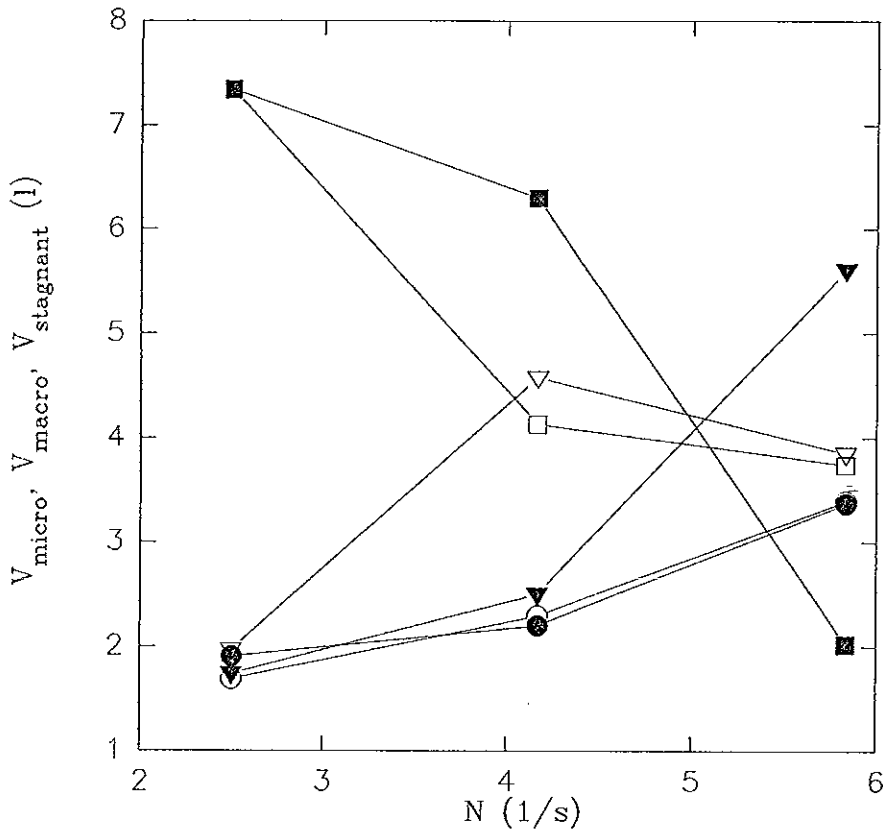
ภาพที่ 3.42 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



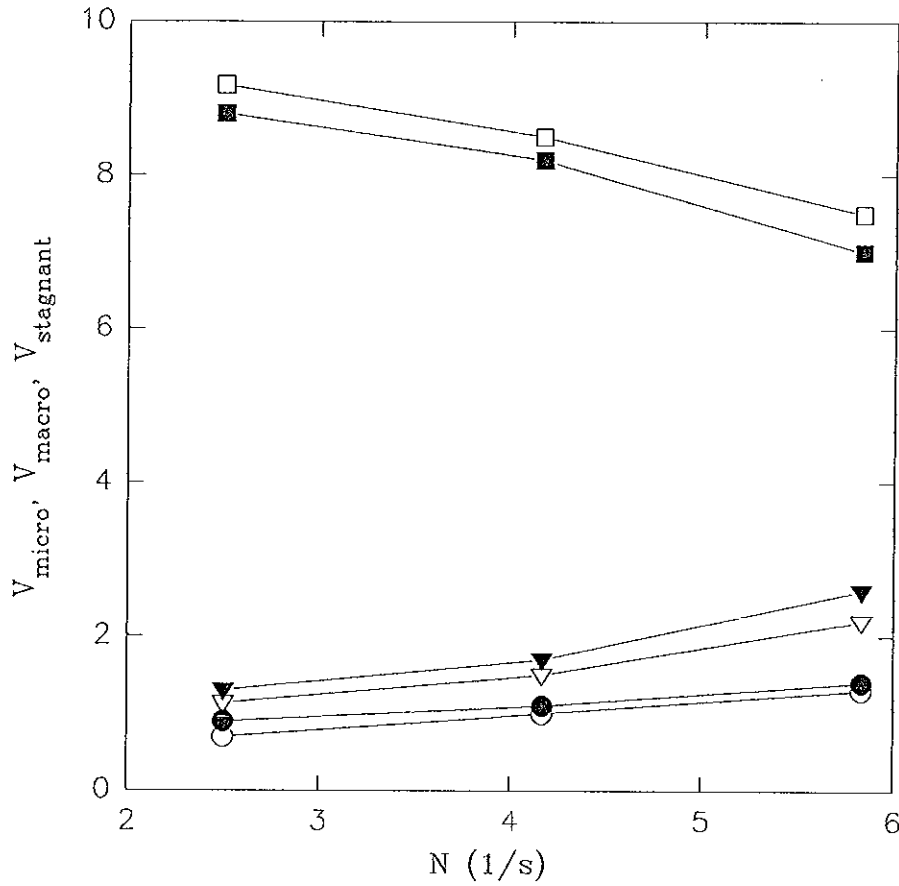
ภาพที่ 3.43 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกววน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.18 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



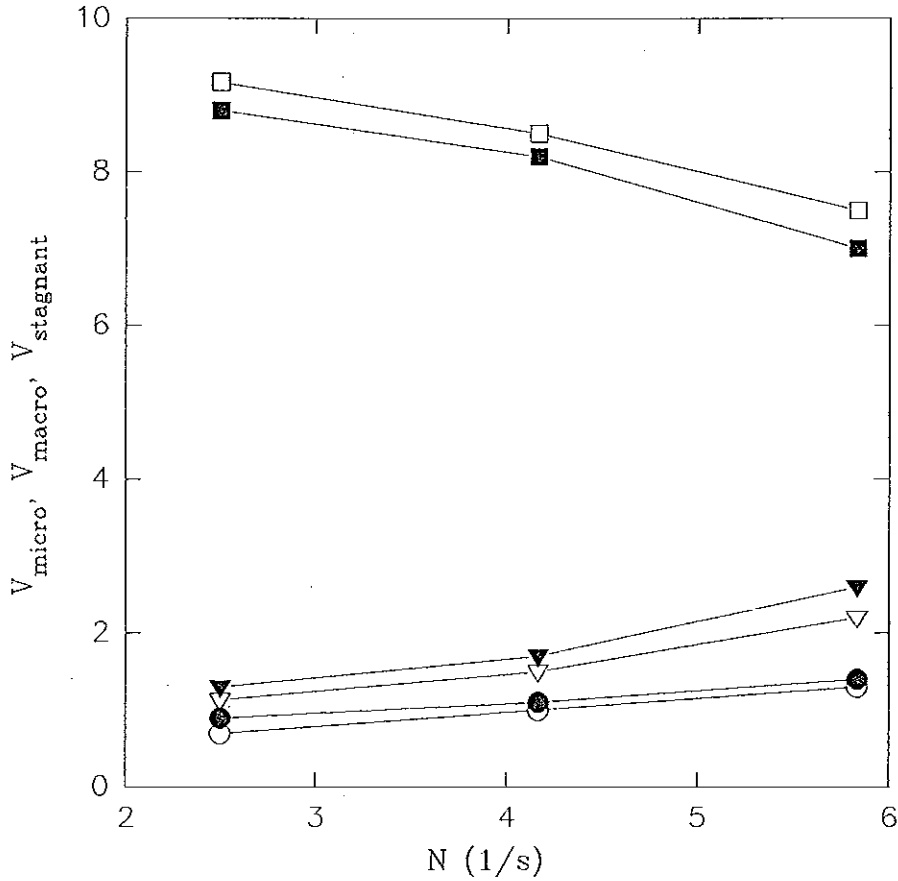
ภาพที่ 3.44 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



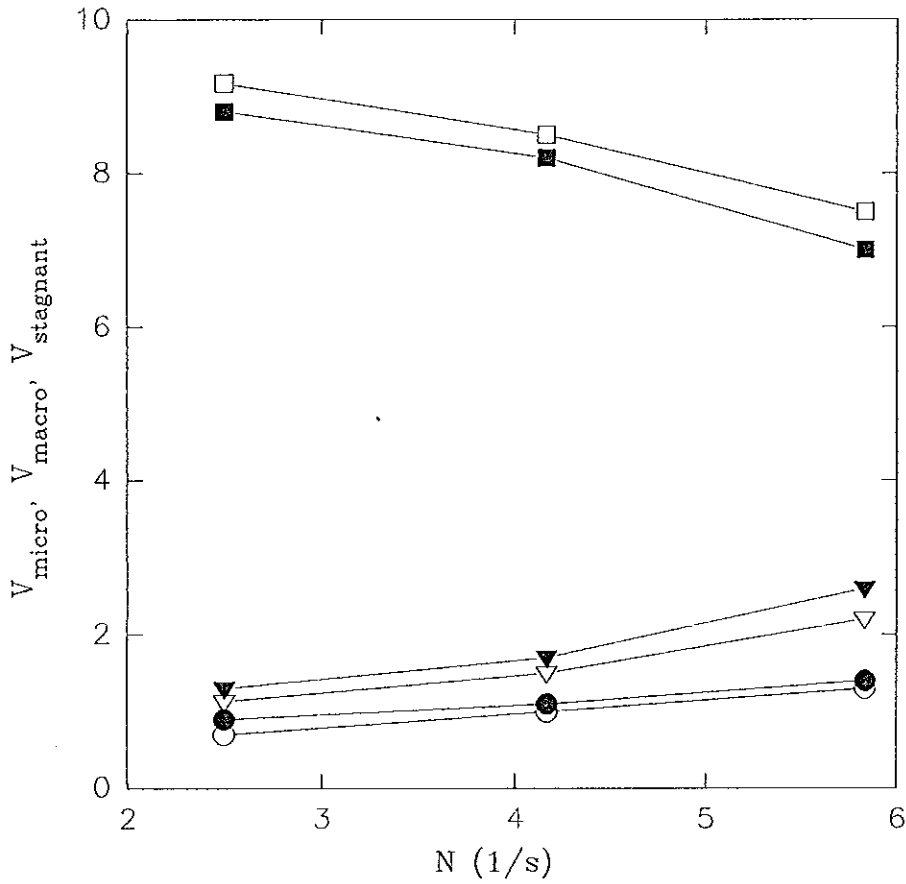
ภาพที่ 3.45 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



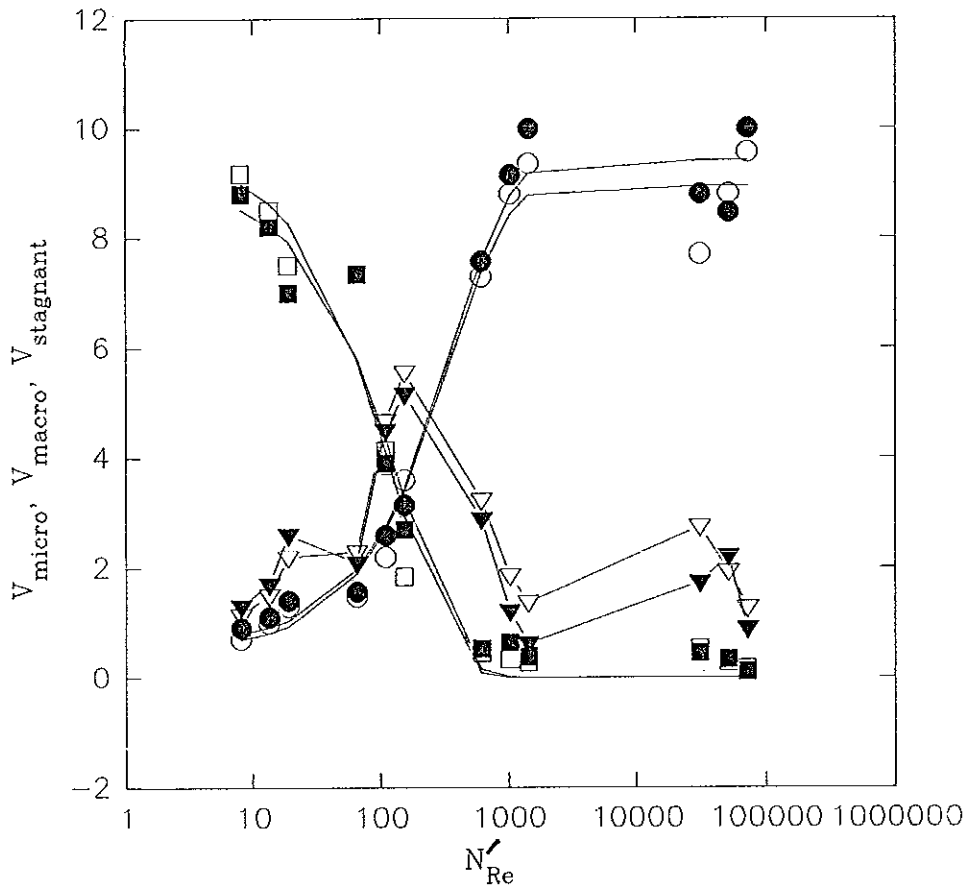
ภาพที่ 3.46 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



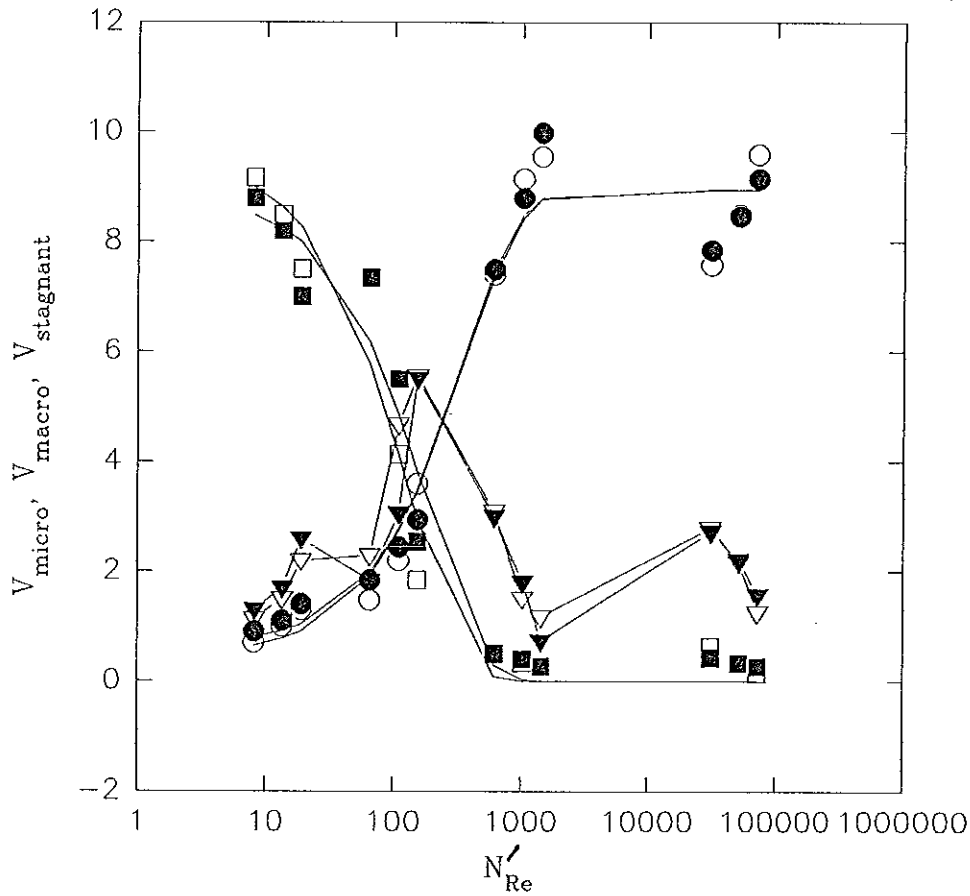
ภาพที่ 3.47 V_{micro} , V_{macro} และ V_{stagnant} กับ ความเร็วรอบในการกวน (N) ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) V_{stagnant} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) V_{stagnant} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



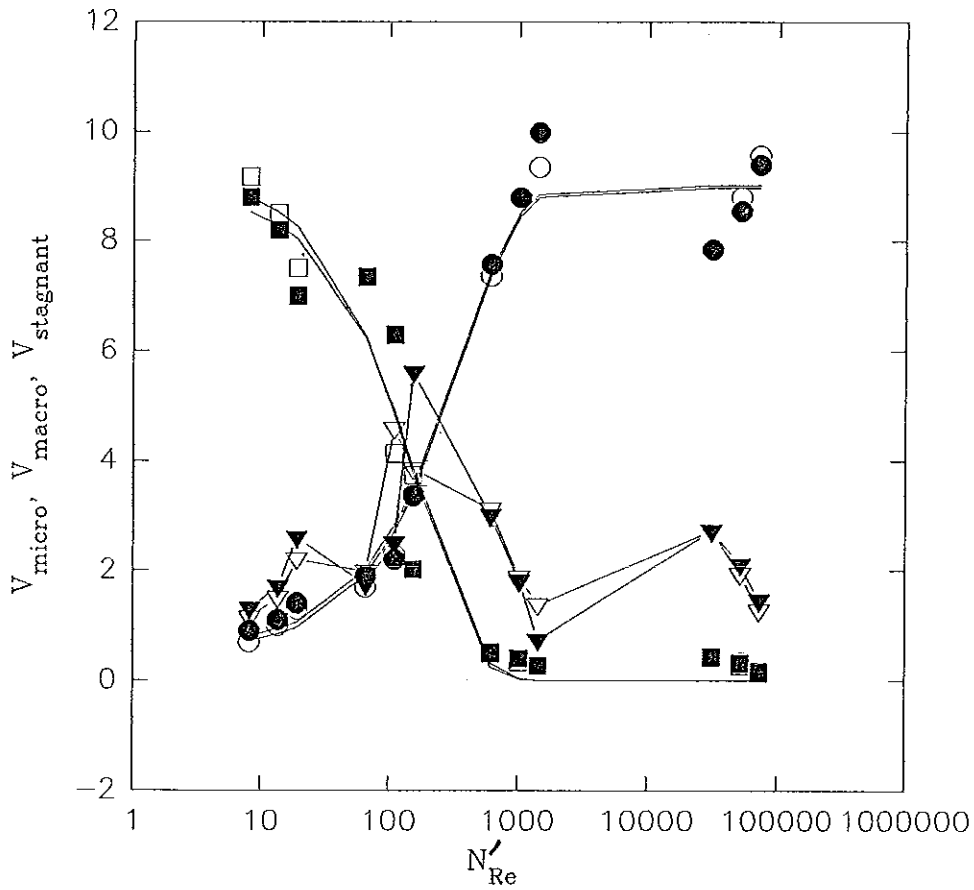
ภาพที่ 3.48 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตรา
การให้อากาศ 0 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



ภาพที่ 3.49 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตรา
การให้อากาศ 0.18 w/m

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine



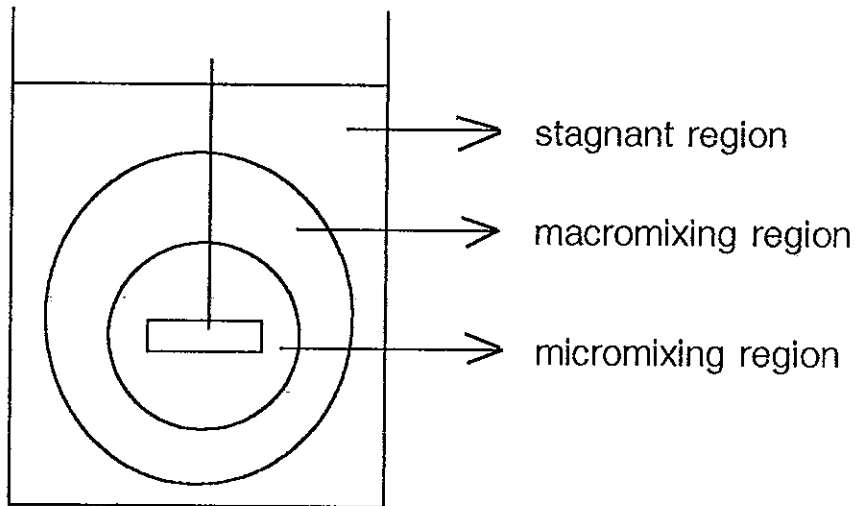
ภาพที่ 3.50 V_{micro} , V_{macro} และ $V_{stagnant}$ กับ N'_{Re} ที่ใบพัดและความเร็วรอบต่างๆ และอัตรา
การให้อากาศ 0.36 vvm

- (●) V_{micro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (▼) V_{macro} ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (■) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Flat blade turbine
- (○) V_{micro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (▽) V_{macro} ใบพัดแบบ Pitched blade turbine
- (□) $V_{stagnant}$ ใบพัดแบบ Pitched blade turbine

2.6 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับถังหมักแบบกวน

2.6.1 ผลการวิเคราะห์การซีมิวเลตแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b)

Funahashi และคณะ (1987b) ได้ศึกษาและสังเกตรูปแบบของการไหลและการผสมในถังหมักแบบกวน พบว่าปริมาตรทั้งหมดของถังอาจแบ่งได้เป็น 3 บริเวณดังภาพที่ 3.51



ภาพที่ 3.51 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของ Funahashi และคณะ (1987b)

แต่ในแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้มีโซน 2 โซน โดยไม่รวม V_{stagnant} ดังสมการ

$$-V_{\text{micro}} \left(\frac{dC_{\text{micro}}}{dt} \right) = q(C_{\text{micro}} - C_{\text{macro}}) \quad (13)$$

$$-V_{\text{macro}} \left(\frac{dC_{\text{macro}}}{dt} \right) = q(C_{\text{macro}} - C_{\text{micro}}) \quad (14)$$

กำหนดให้ $C_{\text{micro}} = C_1$, $C_{\text{macro}} = C_2$, $V_{\text{micro}} = V_1$ และ $V_{\text{macro}} = V_2$

โดยที่ C_{micro} = ความเข้มข้นของเทรชเชอร์ใน micromixing region (กรัมต่อลิตร)

C_{macro} = ความเข้มข้นของเทรชเชอร์ใน macromixing region (กรัมต่อลิตร)

V_{micro} = ปริมาตรของของเหลวใน micromixing region (ลิตร)

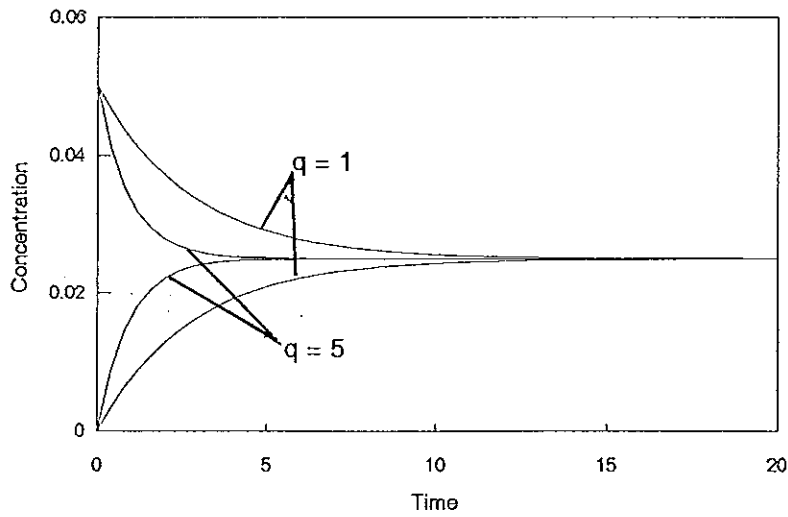
V_{macro} = ปริมาตรของของเหลวใน macromixing region (ลิตร)

q = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (ลิตรต่อวินาที)

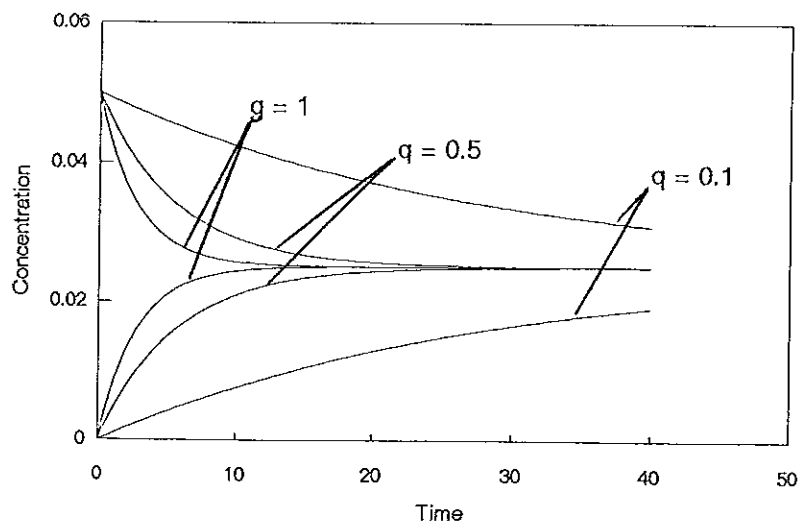
สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 กำหนดให้ทั้ง 2 โชนคือ V_1 และ V_2 มีปริมาตรเท่ากันคือ 5.5 ลิตร แต่ให้ q เปลี่ยนแปลงไป จากการซิมิวเลตได้กราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ (tracer response curve) ดังภาพที่ 3.52 พบว่าเมื่อค่า q เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 5 จะมีผลทำให้ tracer response curve มีความชันมากขึ้น และจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้เร็วขึ้น หรืออัตราการลดลงของ peak เร็วขึ้นเมื่อค่า q เพิ่มขึ้น นั่นก็แสดงว่าของเหลวในถังสามารถผสมกันได้เร็วขึ้น จึงทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการผสมลดลง เพื่อที่จะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ในทางกลับกันถ้าค่า q ลดลงจาก 1 เป็น 0.5 และ 0.1 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3.53 จะมีผลทำให้กราฟมีความชันน้อยลงและจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้ช้าลง หรืออัตราการลดลงของ peak ช้าลงเมื่อค่า q ลดลง ซึ่งหมายความว่าต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเพื่อจะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ฉะนั้นจากค่า q แสดงให้เห็นว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโชนสูงแสดงว่าของเหลวในถังสามารถผสมกันได้ดีกว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโชนที่มีค่าต่ำ

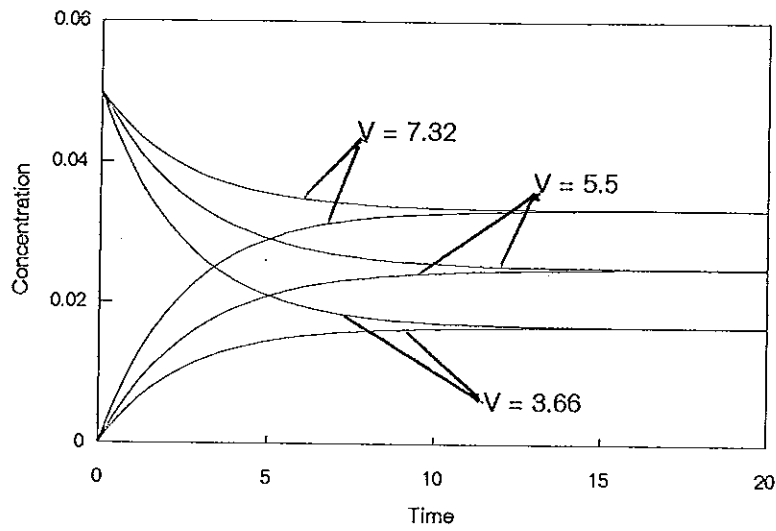
กรณีที่ 2 กำหนดให้ q คงที่ แต่ให้ V_1 และ V_2 เปลี่ยนแปลงไป จากการซิมิวเลตเมื่อกำหนดให้ V_1 เท่ากับ 7.32, 5.50 และ 3.66 จะได้ tracer response curve แสดงในภาพที่ 3.54 พบว่าในกรณีที่ของเหลวในถังสามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถังจะทำให้ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม ($V_1 + V_2$) ในที่นี้คือ V' เท่ากับปริมาตรของเหลวในถังทั้งหมด และจะมีผลทำให้ tracer response curve เปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร V_1 และ V_2 และจะเห็นได้ว่า V_1 และ V_2 เท่านั้นเป็นตัวแปรชี้ถึงการผสมเพราะว่า q เท่ากัน ซึ่งแสดงว่า V_1 มีความหมายว่าการผสมในถังย่อมดีกว่าในกรณีที่ V_1 มีค่าน้อย ส่วนในกรณีที่ของเหลวไม่สามารถผสมกันได้ทั่วทั้งถังพบว่า Tracer response curve จะไม่เข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้าย จึงทำให้ V' นั้น เปลี่ยนแปลงไปโดยจะไม่เท่ากับปริมาตรของของเหลวในถังทั้งหมด ซึ่งแสดงว่ามีบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่เคลื่อนที่ขึ้นในถังทำให้เกิดผลเสียต่อการผสมในถังหมัก



ภาพที่ 3.52 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1$ และ 5 ตามลำดับ



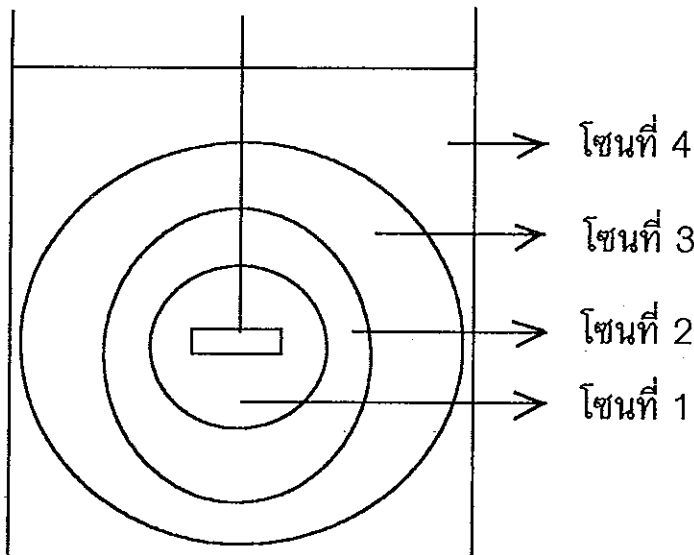
ภาพที่ 3.53 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1, 0.5$ และ 0.1 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.54 Tracer response curve ที่ได้จากกรการซึมวเลต กำหนดให้ $q = 1$ และให้ $V_1 = 7.32, 5.5$ และ 3.66 ตามลำดับ

2.6.2 ผลการวิเคราะห์การซึมวเลตแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยกำหนดให้มี 3 โซนดังภาพที่ 3.55 คือ

จากการสังเกตบริเวณในถังหมักพบว่าน่าจะมีบริเวณที่มีการผสมเป็นแบบต่อเนื่องเนื่องจากที่สารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำ ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้เหมือนกับแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b) จึงได้ทำการเพิ่มบริเวณที่มีการผสมขึ้นมาเป็น 3 โซน เพื่อให้สอดคล้องกับการวางตำแหน่ง probe ทั้งสามตำแหน่งในการทดลอง เพื่อจะดูผลการซึมวเลตว่าให้ผลได้สอดคล้องกับผลการทดลองหรือไม่ รวมทั้งการเพิ่มบริเวณที่มีการผสมเป็นหลายๆ โซน เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงของบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องที่จะได้กล่าวต่อไป



ภาพที่ 3.55 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังหมักแบบกวนของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับงานวิจัยนี้

โดยโซนที่ 4 คือ stagnant region และสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = -q_1(C_1 - C_2) \quad (15)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -q_1(C_2 - C_1) - q_2(C_2 - C_3) \quad (16)$$

$$V_3 \frac{dC_3}{dt} = -q_3(C_3 - C_2) \quad (17)$$

- โดยที่ C_1 = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในโซนที่ 1 (กรัมต่อลิตร)
 C_2 = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในโซนที่ 2 (กรัมต่อลิตร)
 C_3 = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ในโซนที่ 3 (กรัมต่อลิตร)
 V_1 = ปริมาตรของของเหลวในโซนที่ 1 (ลิตร)
 V_2 = ปริมาตรของของเหลวในโซนที่ 2 (ลิตร)
 V_3 = ปริมาตรของของเหลวในโซนที่ 3 (ลิตร)
 q_1 = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (ลิตรต่อวินาที)
 q_2 = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (ลิตรต่อวินาที)

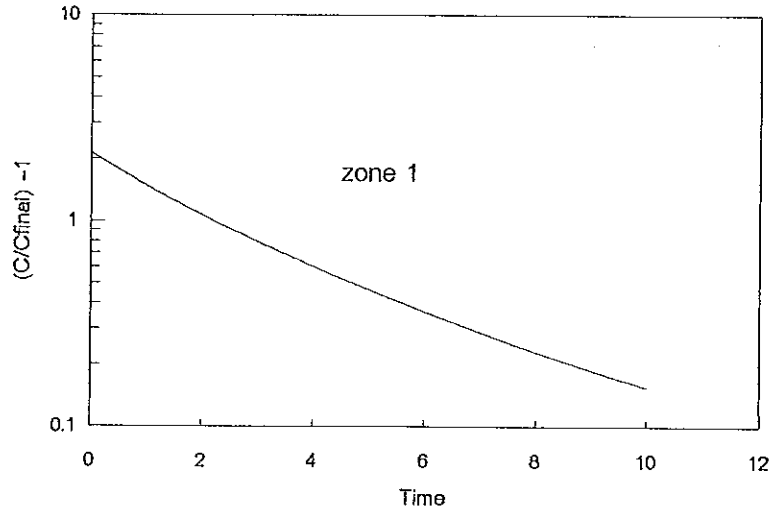
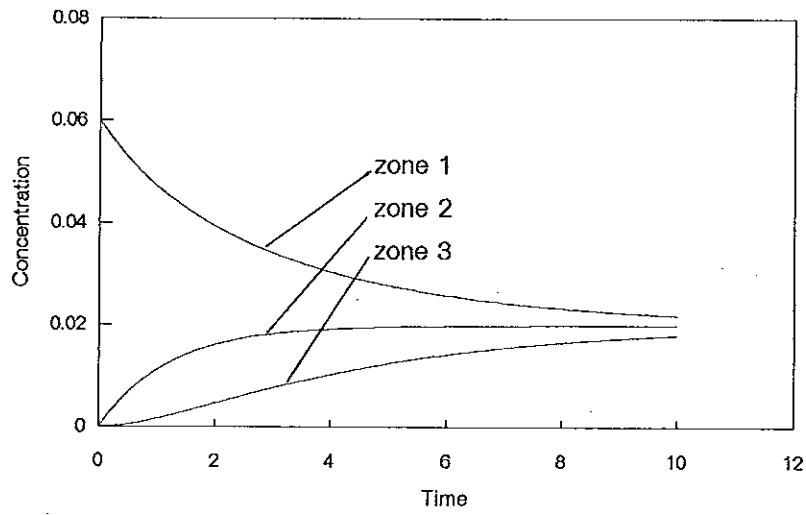
แบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 กำหนดให้ทั้ง 3 โซนคือ V_1 , V_2 , V_3 มีปริมาตรเท่ากันคือ 3.66 ลิตร และให้ $q_1 = q_2 = 1$ จากการซิมูเลตได้ tracer response curve ดังภาพที่ 3.56 พบว่า tracer response curve ให้ผลในทำนองเดียวกับแบบจำลองที่มี 2 โซน ดังภาพที่ 3.57 โดยกำหนดให้ $q = 1$ และ $V_1 = V_2 = 5.5$ แต่ต่างกับที่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา มีโซนที่ 3 เพิ่มเข้ามาเป็นต้น และถ้ากำหนดให้ $q_1 = q_2$ และมีค่ามากหรือน้อยก็ตามจะให้ผลการซิมูเลตเช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 ของแบบจำลองที่มี 2 โซนข้างต้น นอกจากนี้ถ้ากำหนดให้ $q_1 = q_2$ และ V_1, V_2, V_3 เปลี่ยนแปลงไป พบว่าจะให้ผลการซิมูเลตเช่นเดียวกับในกรณีที่ 2 ของแบบจำลองที่มี 2 โซนเพียงแต่ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา มี 3 โซนคือ V_1, V_2 และ V_3 เป็นต้น

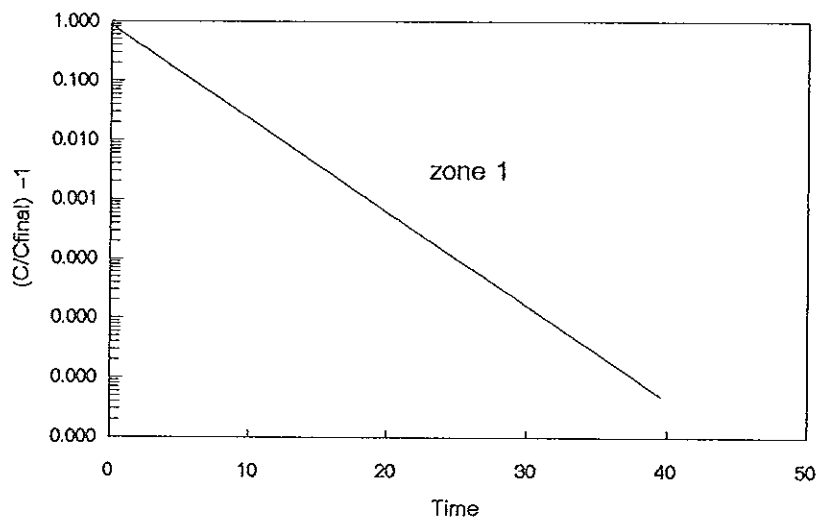
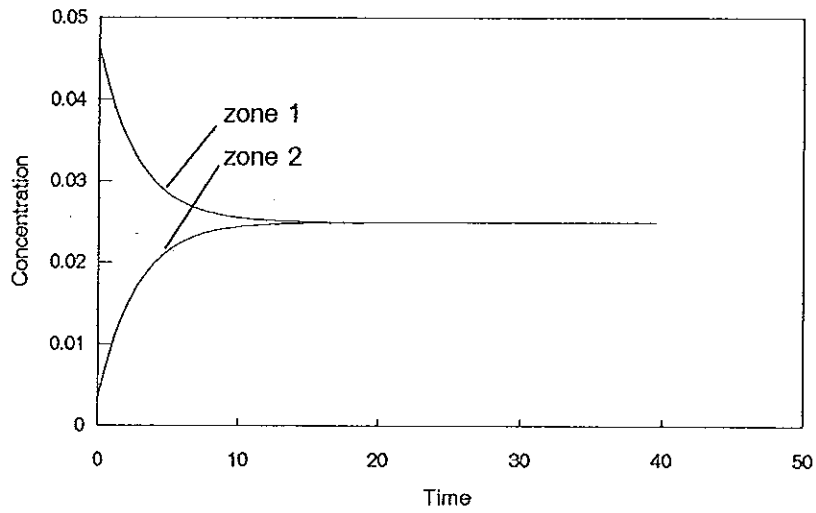
กรณีที่ 2 กำหนดให้ทั้ง 3 โซนคือ V_1, V_2, V_3 มีปริมาตรเท่ากันคือ 3.66 ลิตร และให้ q_1, q_2 แตกต่างกัน โดยให้ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.5$ จากการซิมูเลตได้ tracer response curve ดังภาพที่ 3.58 พบว่าถ้ากำหนดให้ q ต่างกันมากๆ จะทำให้เห็นจุดหักเหของกราฟหรือความชันของกราฟที่เปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจน แสดงว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซนต่างกันอย่างมากซึ่งหมายความว่า การผสมในโซนที่ 1 ไปยังโซนที่ 2 นั้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซนมีค่าสูง ($q_1 = 2$) และเมื่อมาถึงโซนที่ 3 การผสมจะช้าลงเพราะว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซนมีค่าต่ำ ($q_2 = 0.5$) ซึ่งจะมีผลทำให้กราฟมีความชันน้อยลงและจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้ช้าลง หรืออัตราการลดลงของ peak ช้าลง ซึ่งหมายความว่าต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเพื่อจะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย และเมื่อกำหนดให้ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.1$ ก็ยิ่งทำให้จุดหักเหของกราฟนั้นชัดเจนขึ้นดังภาพที่ 3.59 นอกจากนี้จะทำให้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเมื่อกำหนดให้ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.01$ ดังแสดงในภาพที่ 3.60 ฉะนั้นจากการซิมูเลตแสดงให้เห็นว่าค่า q ที่เปลี่ยนไปในแต่ละโซนมีอิทธิพลต่อการผสมเป็นอย่างมากยิ่ง เมื่อ q มีค่ามากขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการผสมน้อยลงในขณะที่ q มีค่าน้อยก็จะต้องใช้เวลาในการผสมนานมากขึ้นเพื่อที่จะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย

ดังนั้นจากการซิมูเลตสำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา พบว่า q และ V มีผลทำให้ tracer response curve เปลี่ยนแปลงไปในกรณีต่างๆ ข้างต้น และยังพบว่าแบบจำลองที่

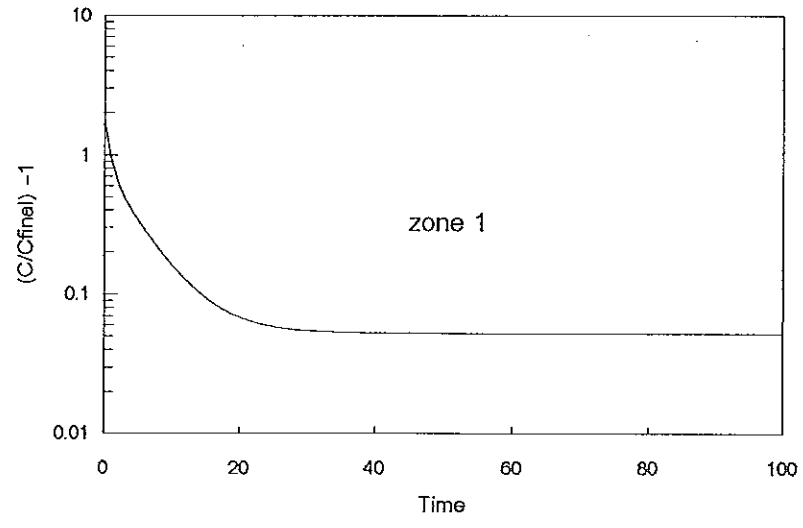
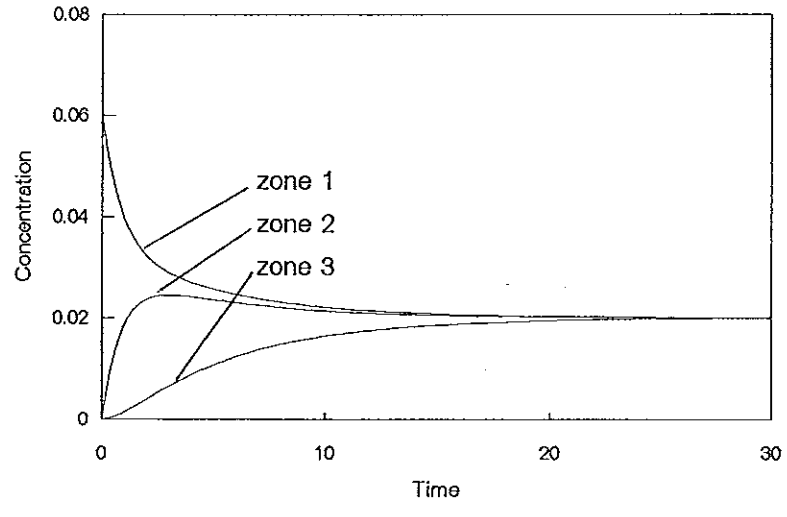
พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางกว่าแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b) เพราะว่าแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b) เป็นเพียงกรณีหนึ่งของแบบจำลองที่เราพัฒนาขึ้นมา เพียงแต่กำหนดให้ $q_2 = 0$ และ $V_3 = 0$ ก็จะเป็นแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b)



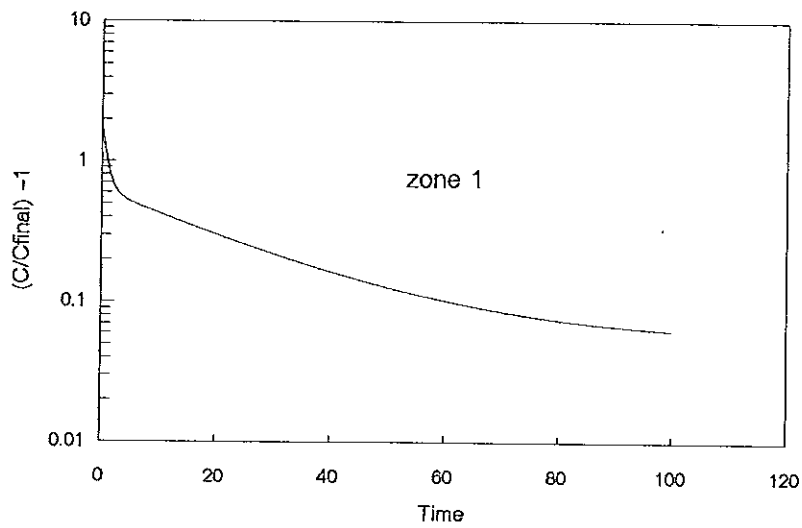
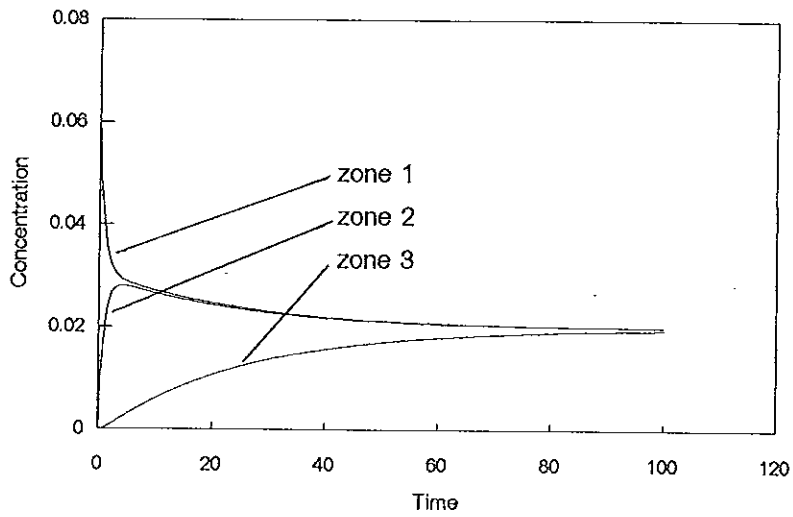
ภาพที่ 3.56 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = q_2 = 1$



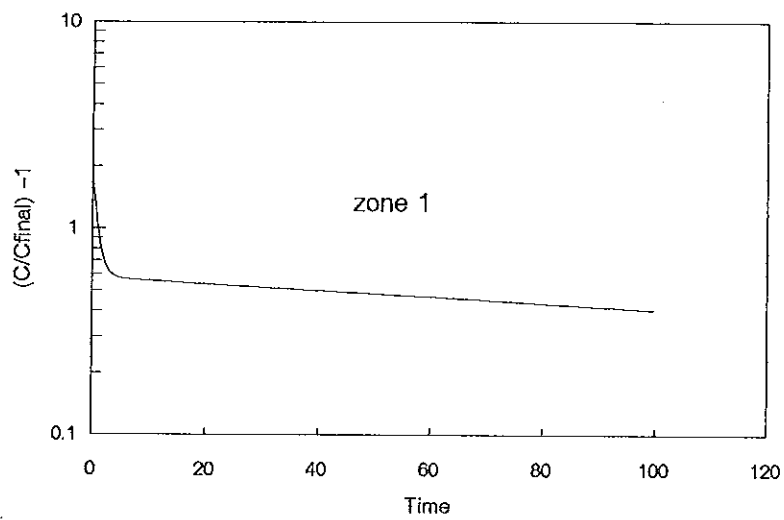
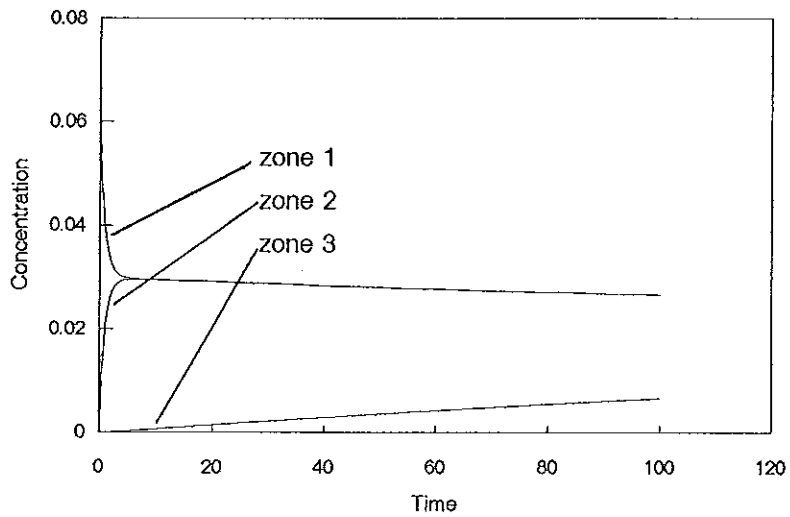
ภาพที่ 3.57 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = 5.5$ และ $q = 1$



ภาพที่ 3.58 Tracer response curve ที่ได้จากการฉีดสาร กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.5$



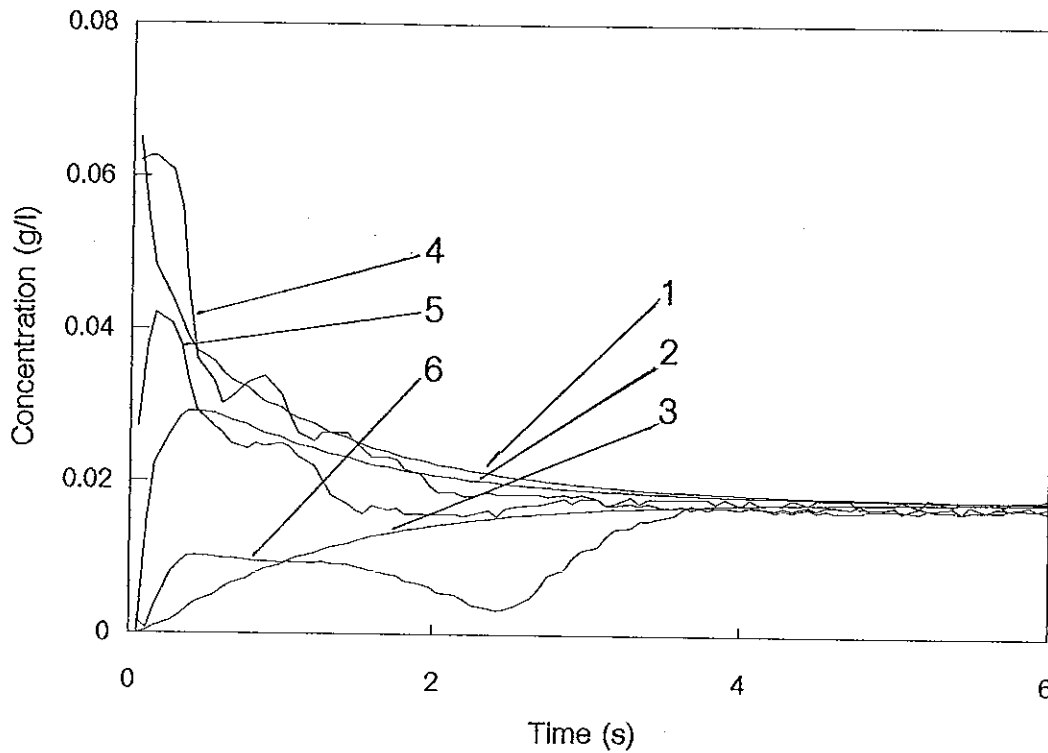
ภาพที่ 3.59 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.1$



ภาพที่ 3.60 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_3 = 3.66$ และ $q_1 = 2$ และ $q_2 = 0.01$

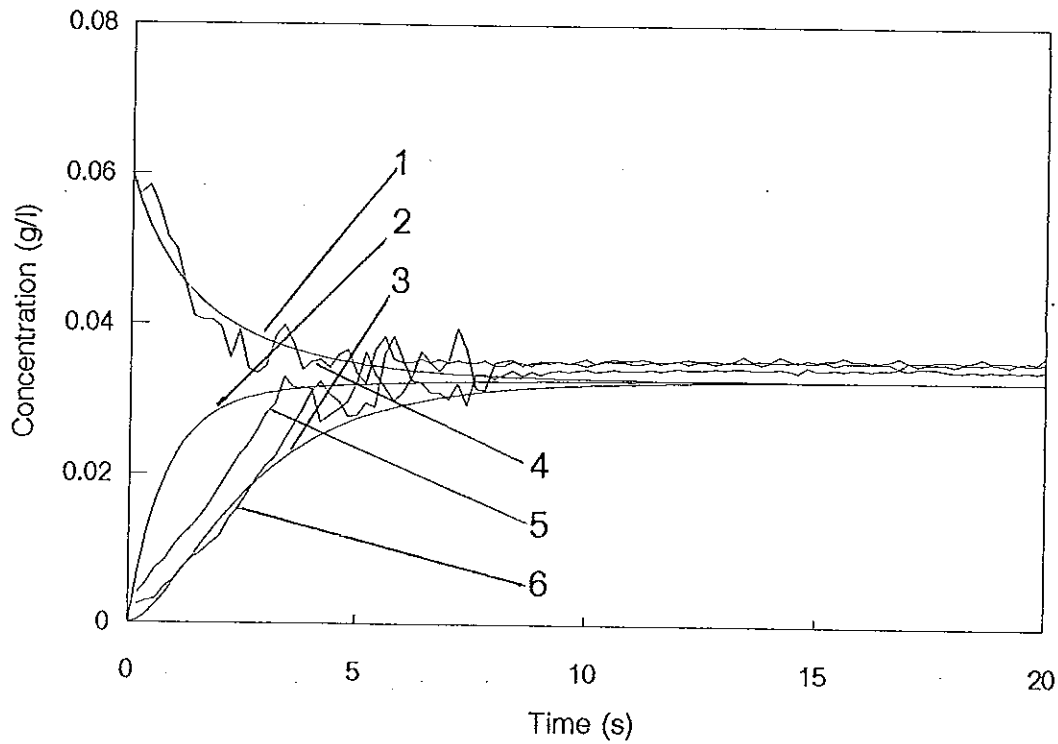
2.6.3 ผลการเทียบเคียงกราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ (tracer response curve) ระหว่างแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลที่ได้จากการทดลอง

จากผลการทดลองศึกษาการผสมโดยใช้วิธีการติดตามการตอบสนองของเทรเซอร์ในถังหมักแบบกวนโดยใช้ pH meter ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเทรเซอร์ที่เติมลงไป เมื่อเทียบเคียงผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการซิมูเลตโดยใช้แบบจำลองที่มี 3 โซนที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าลักษณะกราฟการตอบสนองของเทรเซอร์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทำซิมูเลชันไม่ว่าจะเป็นใบพัดแบบ Flat blade turbine และใบพัดแบบ Pitched blade turbine ดังแสดงในภาพที่ 3.61, 3.62, 3.63 และ 3.64 แต่การซิมูเลตนี้ก็ไม่ได้ให้ผลการซิมูเลตที่ถูกต้องมากเท่าใดนักเพียงแต่อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่าเท่านั้นเพราะเป็นเพียงการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ โดยประมาณเพื่อให้ได้ tracer response curve ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองเท่านั้น ฉะนั้นถ้าจะทำการซิมูเลตให้ได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำแล้วควรมีการเขียนโปรแกรม model fitting สำหรับการซิมูเลชัน ที่จะต้องนำ optimization technique เข้ามาใช้ซึ่งจะได้มีการพัฒนาต่อไปในอนาคต นอกจากนี้จะทำให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำแล้วยังสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์ข้อมูลเช่นกัน



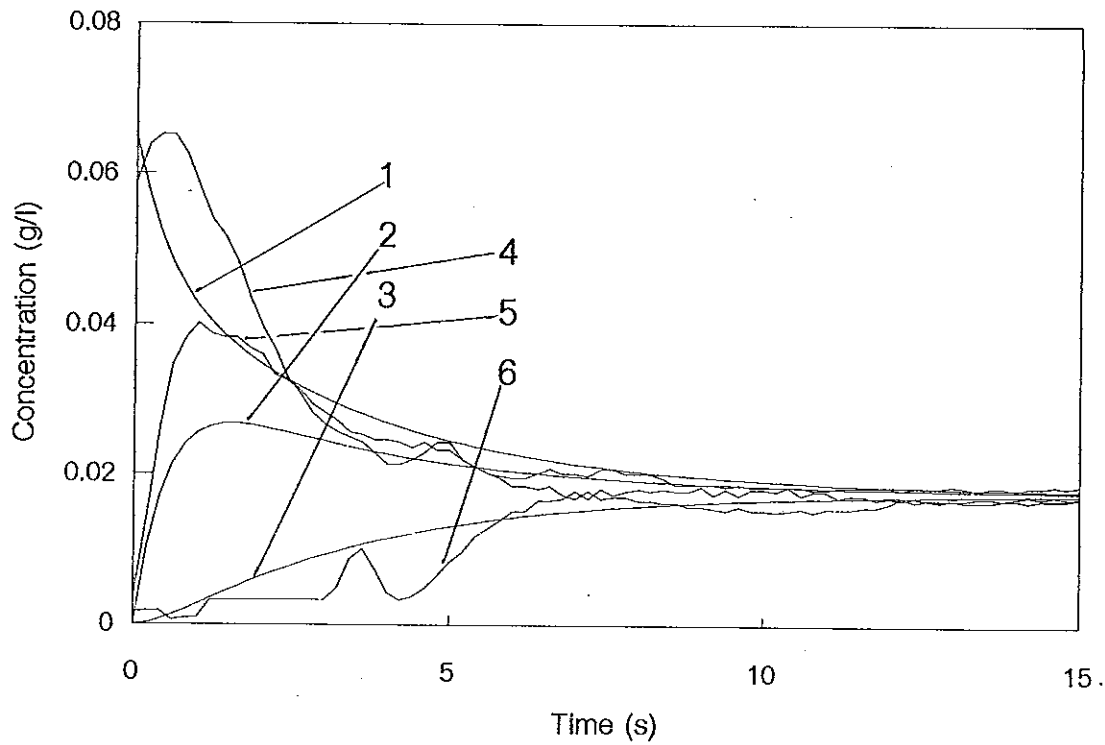
ภาพที่ 3.61 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ)

- (1) โซนที่ 1 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (2) โซนที่ 2 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (3) โซนที่ 3 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (4) โซนที่ 1 ของผลการทดลอง
- (5) โซนที่ 2 ของผลการทดลอง
- (6) โซนที่ 3 ของผลการทดลอง



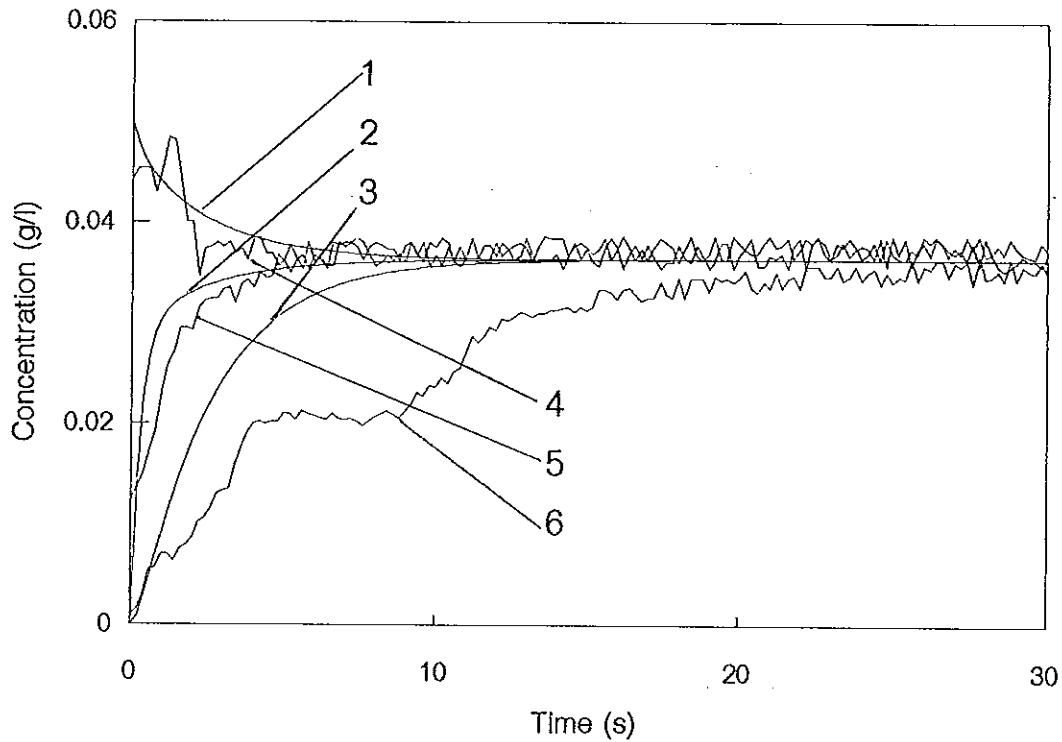
ภาพที่ 3.62 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

- (1) โซนที่ 1 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (2) โซนที่ 2 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (3) โซนที่ 3 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
- (4) โซนที่ 1 ของผลการทดลอง
- (5) โซนที่ 2 ของผลการทดลอง
- (6) โซนที่ 3 ของผลการทดลอง



ภาพที่ 3.63 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการชิมิวเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ)

(1) โซนที่ 1 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (2) โซนที่ 2 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (3) โซนที่ 3 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (4) โซนที่ 1 ของผลการทดลอง
 (5) โซนที่ 2 ของผลการทดลอง
 (6) โซนที่ 3 ของผลการทดลอง



ภาพที่ 3.64 การเทียบเคียงระหว่าง ผลการซิมูเลต กับ ผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

(1) โซนที่ 1 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (2) โซนที่ 2 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (3) โซนที่ 3 ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
 (4) โซนที่ 1 ของผลการทดลอง
 (5) โซนที่ 2 ของผลการทดลอง
 (6) โซนที่ 3 ของผลการทดลอง

2.6.4 แบบจำลองทั่วไปสำหรับการผสมแบบหลายโซน (Generalized mixing zone model)

แบบจำลองสำหรับการผสมแบบหลายโซนนี้ได้กำหนดให้ปริมาตรทั้งหมดของถังหมักแบบกวนแบ่งออกเป็นหลายบริเวณหรือหลายโซน โดยการแบ่งโซนให้มีจำนวนมาก ดังสมการ

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = -q_1(C_1 - C_2) \quad (18)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -q_1(C_2 - C_1) - q_2(C_2 - C_3) \quad (19)$$

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = -q_{i-1}(C_i - C_{i-1}) - q_i(C_i - C_{i+1}) \quad (20)$$

$$V_n \frac{dC_n}{dt} = -q_{n-1}(C_n - C_{n-1}) \quad (21)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของทรูเชอร์วีนแต่ละโซน (กรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของของเหลวในแต่ละโซน (ลิตร)

q = อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (ลิตรต่อวินาที)

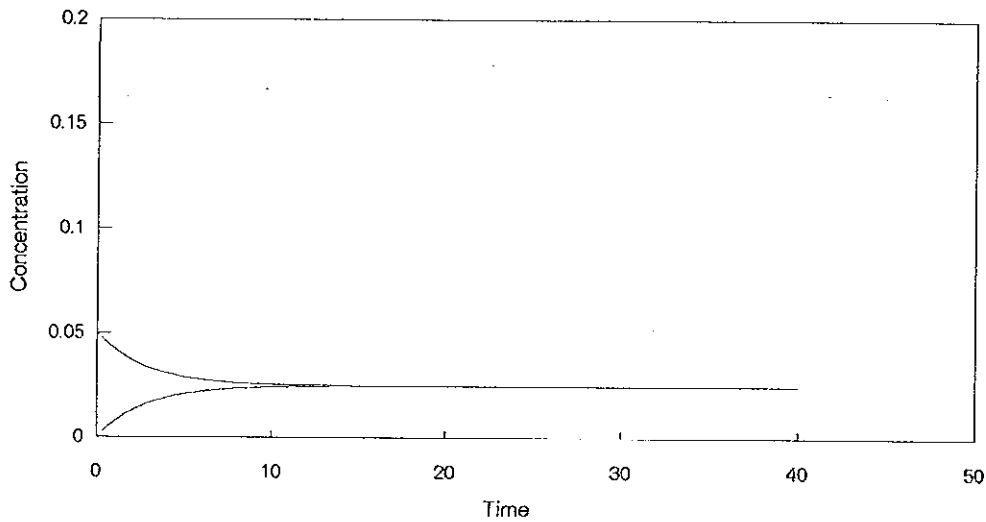
$i = 3, 4, 5 \dots n$

ในที่นี้ใช้ 10 โซนเป็นตัวอย่างแสดงให้เห็นผลของการซีมิวเลต และสามารถแสดงผลการซีมิวเลตได้ดังนี้

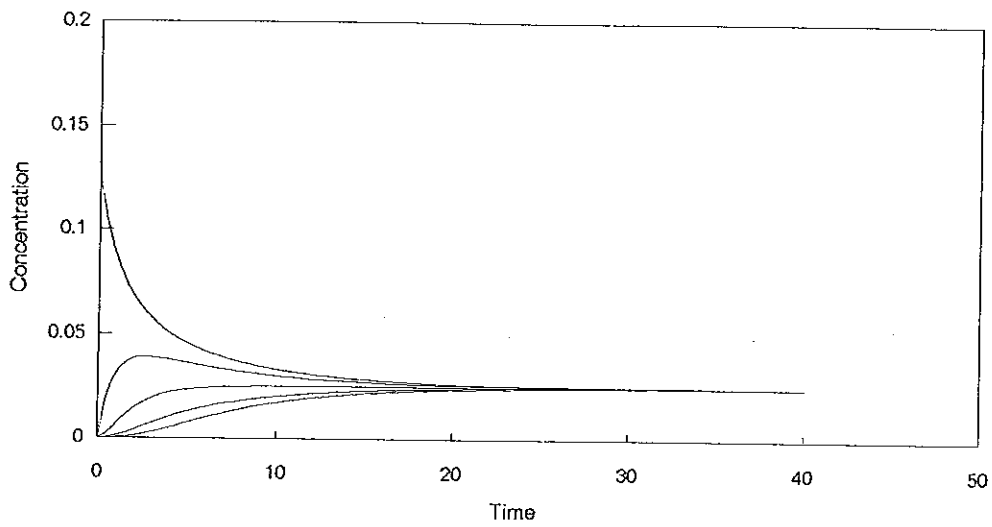
2.6.4.1 ผลของจำนวนโซนต่อการเปลี่ยนแปลงของกราฟการตอบสนองของทรูเชอร์ที่ได้จากการซีมิวเลต

จากการซีมิวเลชันได้กำหนดให้บริเวณในถังหมักแบบกวนแบ่งออกเป็น 2 โซน, 5 โซน, 10 โซน และ 20 โซน โดยกำหนดให้อัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (q) มีค่าเท่ากัน จากผลการซีมิวเลตพบว่า การเพิ่มจำนวนโซนมีผลทำให้กราฟการตอบสนองของทรูเชอร์เปลี่ยนแปลงคือ จะต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อจะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย แสดงว่าของเหลวในถังผสมกันได้ช้าลงเมื่อจำนวนโซนเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการผสมลดลง หรืออีกนัยหนึ่งการเพิ่มจำนวนโซนในถังหมักให้มากขึ้นจะทำให้ลักษณะการผสมเป็น plug flow มากขึ้น จึงต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.65, 3.66, 3.67 และ 3.68 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มจำนวนโซน (i) ให้มากขึ้นไปอีกจนเข้าใกล้ infinity แบบจำลองก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนโซนน้อยลง และมีแนวโน้มที่จะขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (q)

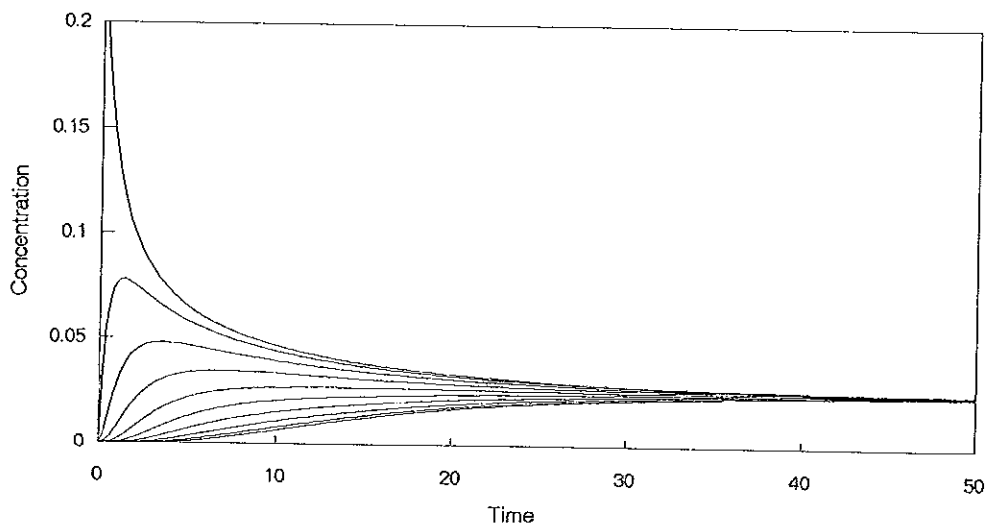
เพียงอย่างเดียว จากการสังเกตแนวโน้มของเวลาที่ใช้ในการผสมเมื่อจำนวนโชนเพิ่มมากขึ้นพบว่า ถ้าต้องการที่จะใช้แบบจำลองในลักษณะที่ให้ q เป็นพารามิเตอร์เพียงอย่างเดียว จะสามารถทำได้ โดยให้ความคลาดเคลื่อนน้อยมากถ้า i มากกว่า 10 เป็นต้น



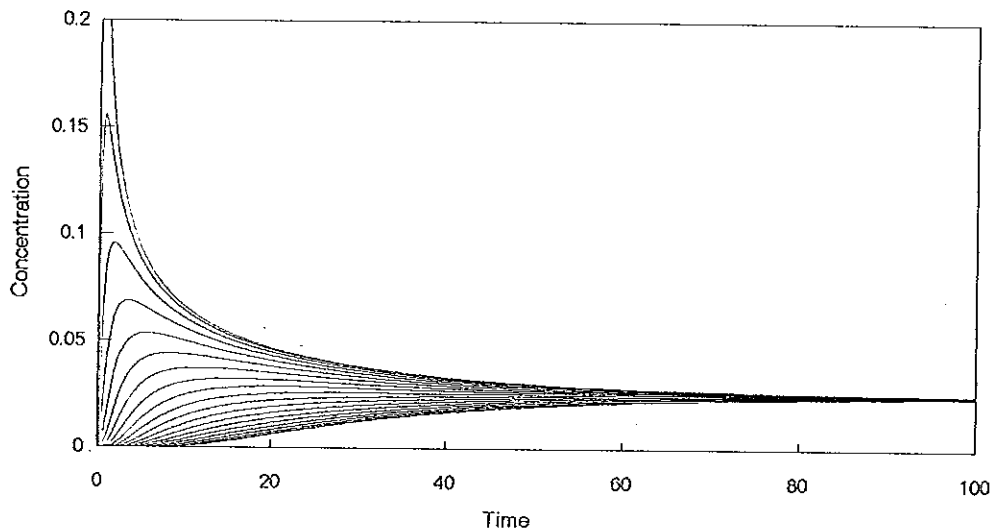
ภาพที่ 3.65 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 2 โชนมี ปริมาตรเท่ากันคือ 5.5 ลิตร และให้ $q = 1$



ภาพที่ 3.66 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 5 โซนมี ปริมาตรเท่ากันคือ 2.2 ลิตร และให้ $q = 1$



ภาพที่ 3.67 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 10 โซนมี ปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และให้ $q = 1$



ภาพที่ 3.68 Tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลต กำหนดให้แบ่งเป็น 20 โซนมี ปริมาตรเท่ากันคือ 0.55 ลิตร และให้ $q = 1$

2.6.4.2 ผลของอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (q) ต่อการเปลี่ยนแปลงของกราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ที่ได้จากการชิมิวเลต

เนื่องจากมีพารามิเตอร์จำนวนมากโดยเฉพาะอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซน (q) จึงได้กำหนดให้ q และจำนวนโซน (i) มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง และสมการเอกไปเนลเซียลเพื่อสะดวกต่อการชิมิวเลต ซึ่งสมการทั้งสองน่าจะสอดคล้องกับความเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในถังหมัก เช่น สมการเส้นตรงแสดงการลดลงของค่า q อย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่สมการเอกไปเนลเซียลค่า q จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะลดลงเป็นอัตราส่วนที่น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป หมายความว่าอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโซนในช่วงแรกเมื่อฉีดเทอร์ชเซอร์ลงไปจะสูงและจะลดลงตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไปตามรูปสมการทั้งสองดังแสดงในภาพที่ 3.69 และสามารถแสดงผลการชิมิวเลตได้ดังนี้

ก. กำหนดให้ q และ จำนวนโซน (i) มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$q_i = q + (-mi) \quad (22)$$

สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 กำหนดให้ m มีค่าคงที่ แต่ให้ q เปลี่ยนแปลงไป และให้ ปริมาตรทั้ง 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร จากการชิมิวเลตได้กราฟการตอบสนองของ

เทรซเซอร์ ดังภาพที่ 3.70, 3.71, 3.72 พบว่าเมื่อค่า q เพิ่มขึ้นจาก 0.001 เป็น 0.1 และ 1 ตามลำดับ จะมีผลทำให้ tracer response curve มีความชันมากขึ้น และจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้เร็วขึ้น เมื่อค่า q เพิ่มขึ้น แสดงว่าของเหลวในถังสามารถผสมกันได้เร็วขึ้น จึงทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการผสมลดลง เพื่อที่จะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ในทางกลับกันถ้าค่า q ลดลง จะมีผลทำให้กราฟมีความชันน้อยลงและจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้ช้าลง หรืออัตราการลดลงของ peak ช้าลงเมื่อค่า q ลดลง ซึ่งหมายความว่าต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเพื่อจะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ซึ่งให้ผลการซิวิตเช่นเดียวกับแบบจำลองที่มี 2 โซน เพียงแต่มีโซนที่ 3 ถึงโซนที่ 10 เพิ่มเข้ามาเป็นต้น

กรณีที่ 2 กำหนดให้ q มีค่าคงที่ แต่ให้ m เปลี่ยนแปลงไป และให้ปริมาตรทั้ง 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร จากการซิวิตพบว่ามีผลทำให้ tracer response curve เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 เพราะค่า m เป็นตัวกำหนดค่า q ถ้า m มีค่ามากจะมีผลทำให้ค่า q มีค่าน้อยและในทางกลับกัน

ข. กำหนดให้ q และ จำนวนโซน (i) มีความสัมพันธ์เป็นสมการเอกไปเนล เชียลคือ

$$q_i = q \exp(-mi) \quad (24)$$

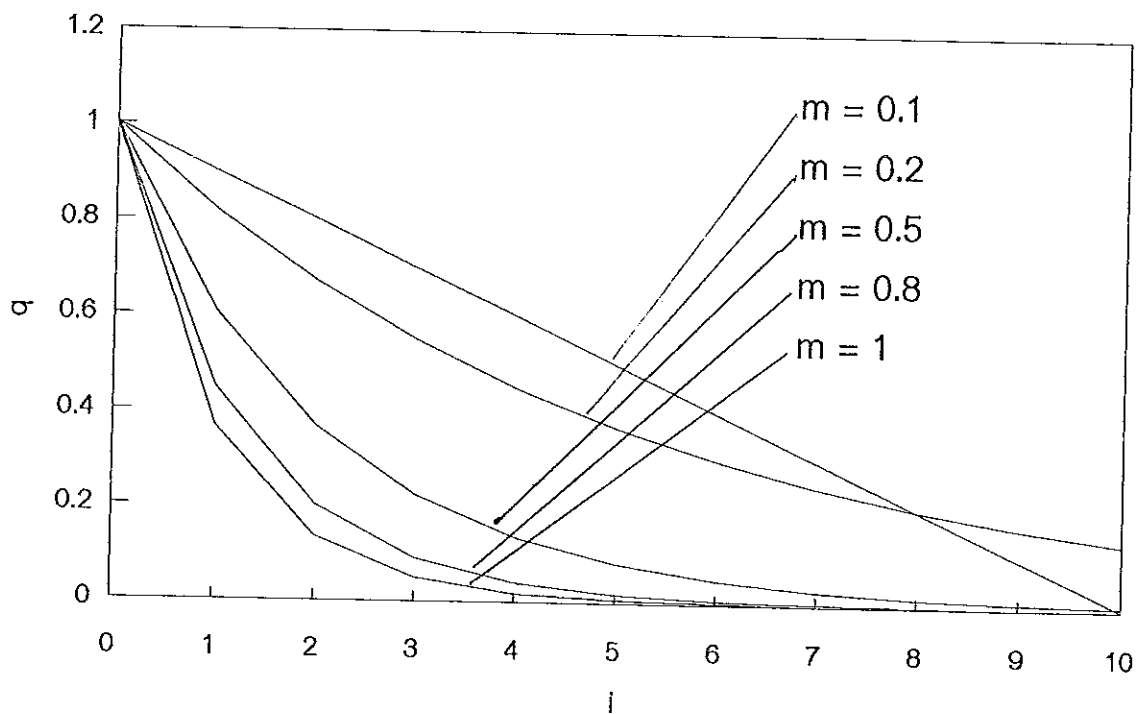
สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 กำหนดให้ m มีค่าคงที่ แต่ให้ q เปลี่ยนแปลงไป และให้ปริมาตรทั้ง 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร จากการซิวิตได้กราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ (tracer response curve) ดังภาพที่ 3.73, 3.74, 3.75 พบว่าเมื่อค่า q เพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.1 และ 1 ตามลำดับจะมีผลทำให้ tracer response curve มีความชันมากขึ้น และจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้เร็วขึ้น เมื่อค่า q เพิ่มขึ้น แสดงว่าของเหลวในถังสามารถผสมกันได้เร็วขึ้น จึงทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการผสมลดลง เพื่อที่จะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย ในทางกลับกันถ้าค่า q ลดลง จะมีผลทำให้กราฟมีความชันน้อยลงและจะเข้าสู่ค่าความเข้มข้นสุดท้ายได้ช้าลง หรืออัตราการลดลงของ peak ช้าลงเมื่อค่า q ลดลง จึงต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเพื่อจะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย

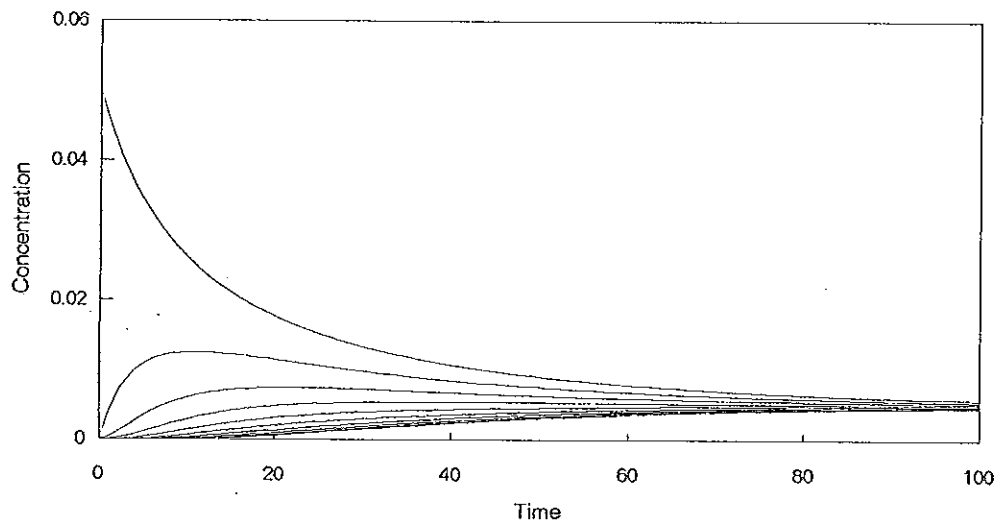
กรณีที่ 2 กำหนดให้ q มีค่าคงที่ แต่ให้ m เปลี่ยนแปลงไป และให้ปริมาตรทั้ง 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร จากการซิวิตพบว่ามีผลทำให้ tracer response curve เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 เพราะค่า m เป็นตัวกำหนดค่า q ถ้า m มีค่ามากจะมีผลทำให้ค่า q มีค่าน้อยและในทางกลับกัน เพียงแต่การลดลงของค่า q เป็นไปตามสมการเอกไปเนลเชียลเท่านั้นเอง

ดังนั้นจากแบบจำลองสำหรับการผสมแบบหลายโซน ที่ได้กำหนดให้บริเวณของถังหมักแบบกวนแบ่งออกเป็นหลายบริเวณหรือหลายโซน โดยการแบ่งโซนให้มีจำนวนมาก พบว่า

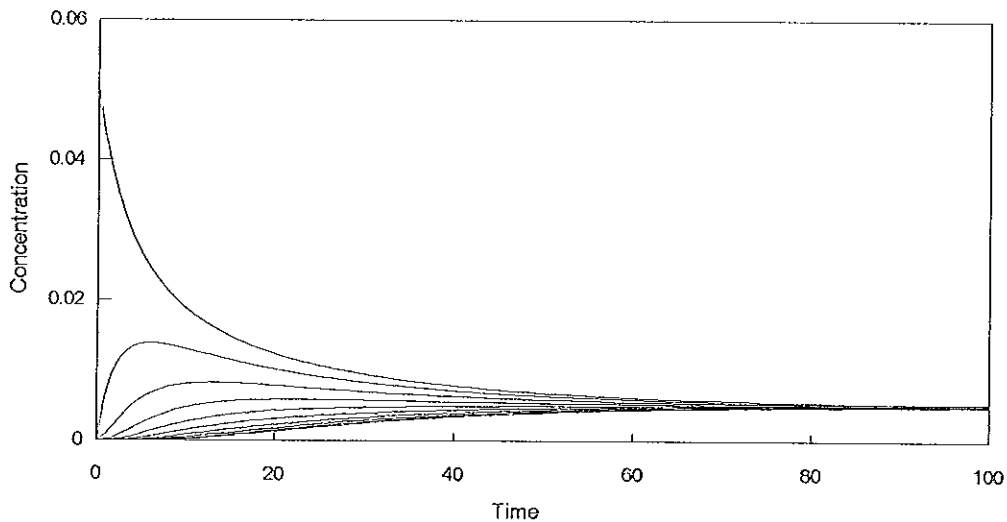
สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางกว่าแบบจำลองของ Funahashi และคณะ (1987b) หรือแม้แต่แบบจำลองที่มี 3 โชน และจากแบบจำลองสำหรับการผสมแบบหลายโชนนี้ถ้ามีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ก็จะสามารถกลับมาเป็นแบบจำลองแบบ 3 โชน และแบบจำลอง 2 โชน ของ Funahashi และคณะ (1987b) ได้เช่นกัน เพราะว่าแบบจำลองทั้งสองแบบนี้เป็นเพียงกรณีหนึ่งของแบบจำลองสำหรับการผสมแบบหลายโชน



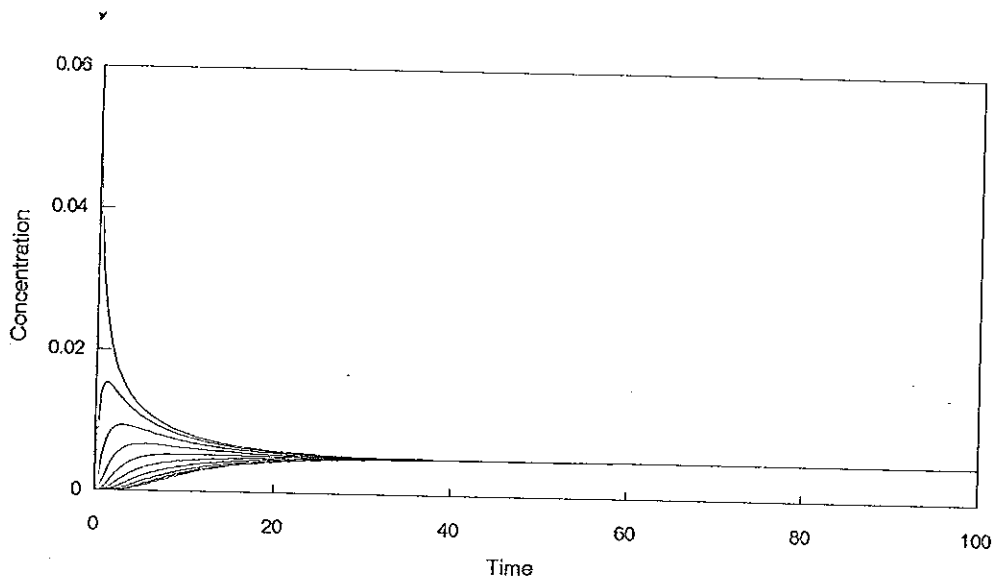
ภาพที่ 3.69 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างโชน (q) กับ จำนวนโชน (l) ในรูปของสมการเส้นตรง ($m=0.1$) และสมการเอกโปเนนเชียล ($m=0.2, 0.5, 0.8, 1$)



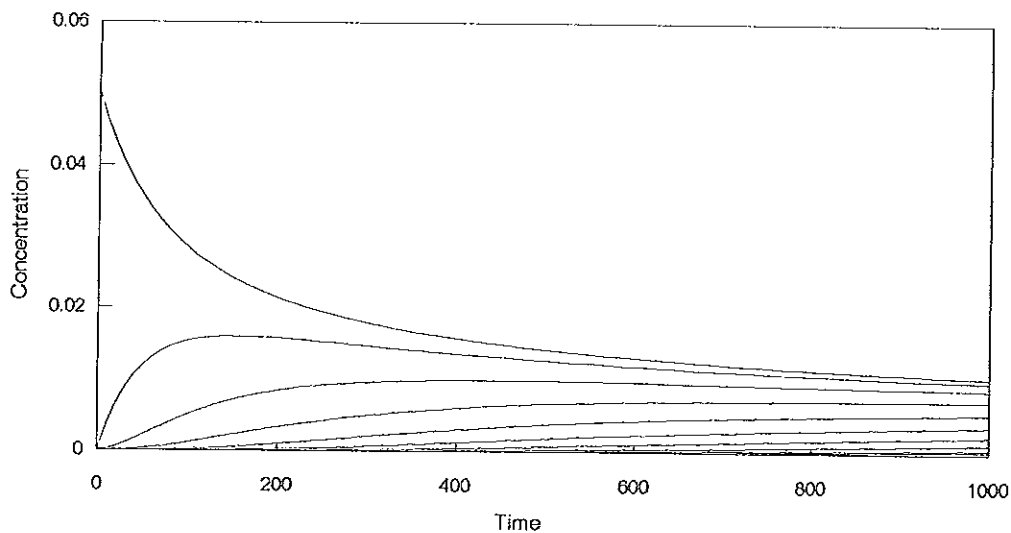
ภาพที่ 3.70 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 0.001$



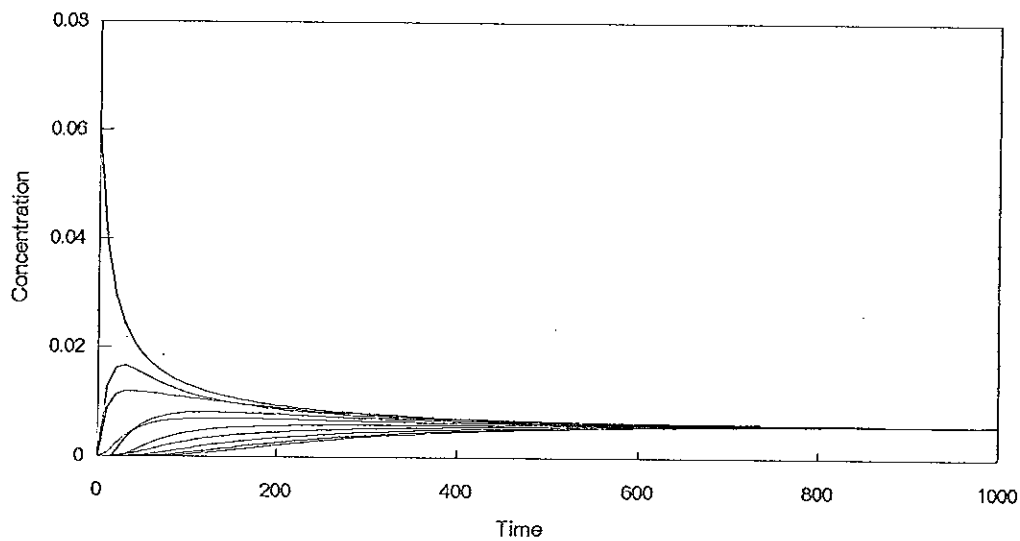
ภาพที่ 3.71 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 0.1$



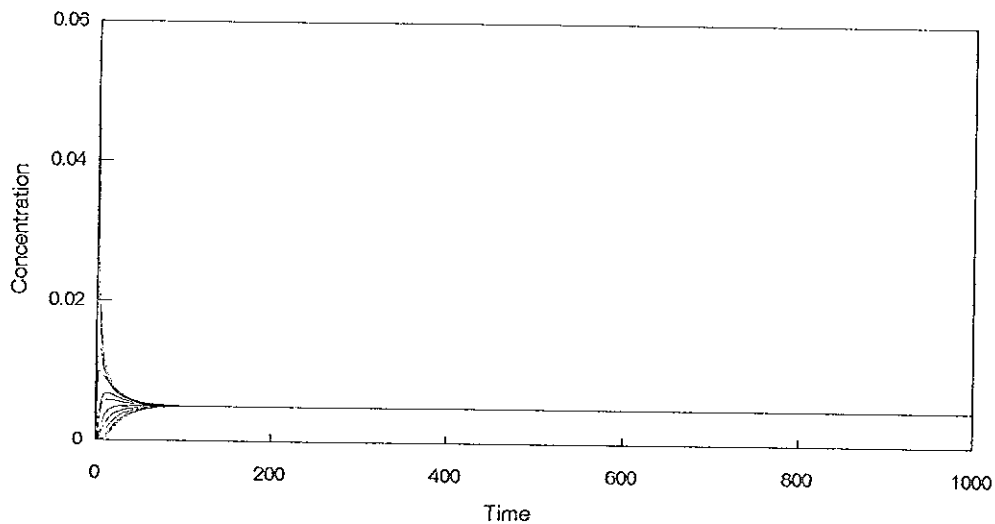
ภาพที่ 3.72 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็น 10 โชนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 1$



ภาพที่ 3.73 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกโปเนนเชียล แบ่งเป็น 10 โชนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 0.01$



ภาพที่ 3.74 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกไปเนลเซียล แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 0.1$



ภาพที่ 3.75 Tracer response curve ที่ได้จากการซิมูเลต โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่เป็นสมการเอกไปเนลเซียล แบ่งเป็น 10 โซนมีปริมาตรเท่ากันคือ 1.1 ลิตร และกำหนดให้ $m = 0.1$, $q = 1$

บทที่ 4

สรุป

การนำแนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นเข้ามาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การส่งผ่านและการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้โพลีเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียนนั้น ในขั้นต้นเป็นการแยกปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรงออกจากปัญหาในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหมัก โดยจะต้องสามารถเชื่อมต่อทั้งสองส่วนนี้เข้าด้วยกันได้อย่างสมเหตุสมผล งานวิจัยในครั้งนี้เป็นงานขั้นเริ่มต้น และได้เลือกกระบวนการละลายแซนแทนกัมสำเร็จ-บรอกแซนแทนจริงเป็นกรณีศึกษา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเชื่อมโยงของไหลจำลองกับบรอกที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักจริง โดยใช้เทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอลยี (Rheological matching)

ในการศึกษาการผสมในถังหมักแบบกวนในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วน คือ กำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม, gas hold up และ การผสม ส่วนแรกเป็นการศึกษากำลังที่ใช้ในการกวนและการผสม พบว่ากำลังที่ใช้ในการกวนขึ้นอยู่กับอัตราการให้อากาศและความเร็วรอบในการกวนไม่ว่าจะเป็นในสารละลายน้ำและในสารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นต่าง ๆ และยังพบว่าใบพัดแบบ Flat blade turbine ใช้กำลังในการกวนมากกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine ถึง 2-4 เท่าในทุกกรณี

ส่วนที่สองเป็นการศึกษา hold-up พบว่าที่สารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำ ๆ ($<0.1\%$) ใบพัดแบบ Flat blade turbine จะให้ผลของ hold-up ที่สูงกว่าใบพัดแบบ Pitched blade turbine อย่างไรก็ตาม hold-up ก็ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ ความเร็วรอบในการกวนและอัตราการให้อากาศ สำหรับสารละลายแซนแทนความเข้มข้นสูง E_0 จะไม่สามารถทำนายได้ทั้งหมด แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กก็จะส่งผลให้ E_0 มีค่าสูง ในทางกลับกันถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลให้ E_0 มีค่าต่ำ

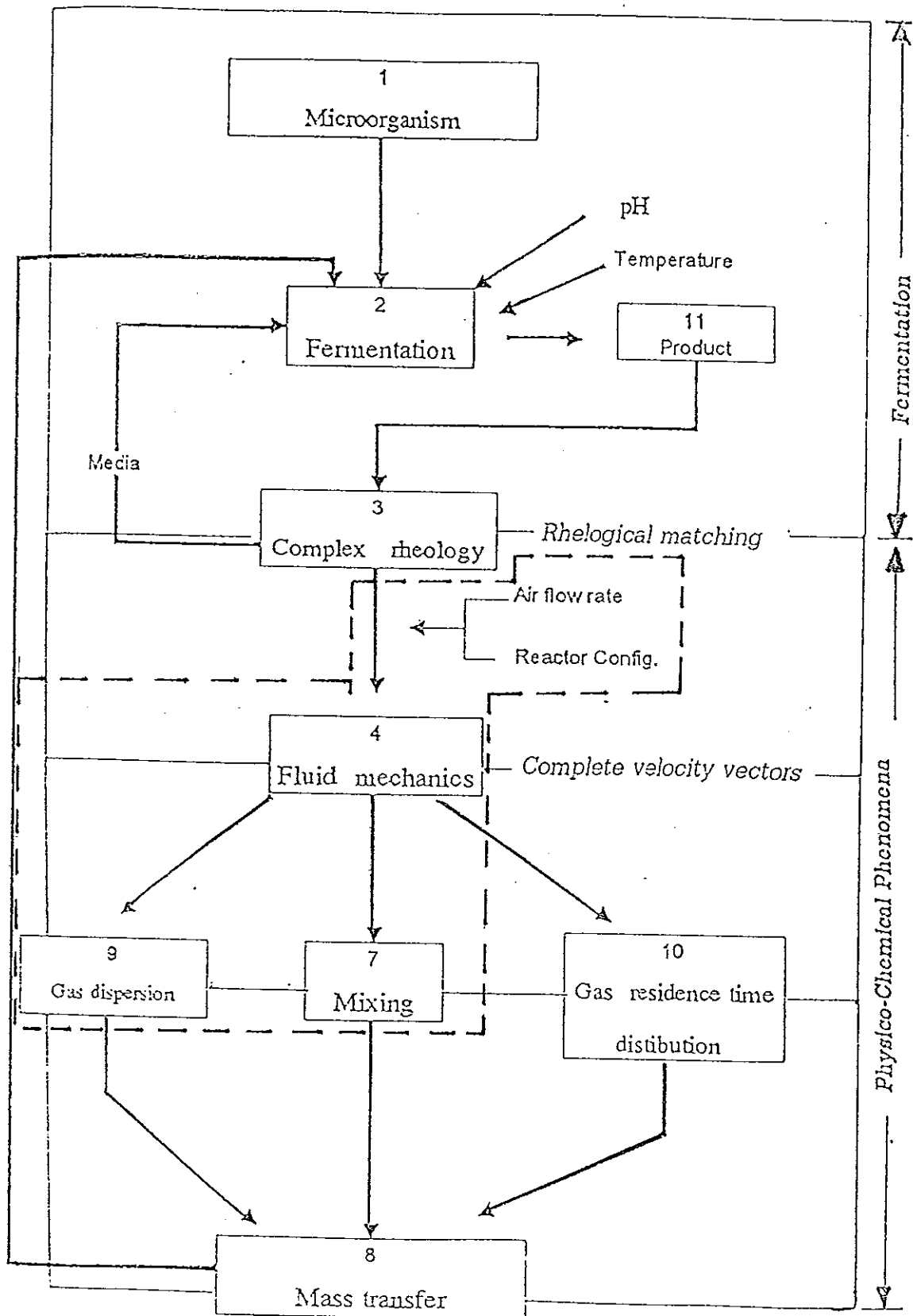
ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการผสมโดยใช้เทคนิคการติดตามการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ทั้งสามจุดในถังหมักแบบกวน ชั้นแรกศึกษาเวลาที่ใช้ในการผสม พบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมที่ได้จากกราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์นั้นสามารถใช้วิเคราะห์ได้เพียงในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ($<0.1\%$) ส่วนในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นสูงไม่สามารถใช้เวลาที่ใช้ในการผสมในการวิเคราะห์ถึงการผสมได้ เพราะว่าต้องใช้เวลาในการผสมนานมาก และเวลาที่ใช้ในการผสมทั้งสามจุดก็แตกต่างกันอย่างมากทำให้ไม่สามารถทำนายถึงการผสมทั้งถังได้ จึงควรใช้ปัจจัยอื่นๆ ในการวิเคราะห์ถึงการผสม ในขั้นถัดมาจึงศึกษาหาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม พบว่าในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นต่ำ ($<0.1\%$) ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับไมโครจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้นจนปริมาตรเท่ากับของเหลวในถังทั้งหมด ในขณะที่ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมระดับมาโครและปริมาตรของบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่ลดลง สำหรับในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นสูง ปริมาตรของ

บริเวณที่มีการผสมระดับไมโครและมาโครจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการกวนเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาตรของบริเวณที่ของไหลไม่เคลื่อนที่ลดลง และปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมนี้เองที่น่าจะใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของการผสมในถังหมักแบบกวนได้ดีกว่าเวลาที่ใช้ในการผสม

หลังจากนั้นจึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การผสมในถังหมักแบบกวนขึ้นมาใหม่ โดยแบ่งงานออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกการศึกษาทางทฤษฎีได้แก่ การพัฒนาและการซิมูเลตแบบจำลองแล้วนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองของนักวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษามาแล้ว เพื่อใช้อธิบายถึงกลไกการผสมในถังหมักแบบกวนโดยวิธีการติดตามการตอบสนองของเทอร์ชอร์ ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้อย่างกว้างขวางกว่าแบบจำลองของนักวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษามาแล้ว และแบบจำลองดังกล่าวก็เป็นเพียงกรณีหนึ่งของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมา ส่วนที่สองเป็นการเทียบเคียงผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการซิมูเลชันของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน แต่การซิมูเลตยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก จึงควรมีการพัฒนาการเขียนโปรแกรม model fitting สำหรับการซิมูเลชัน ซึ่งจะต้องนำ optimization technique เข้ามาใช้เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้สนใจที่จะศึกษาต่อไปเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ง่ายสะดวกและรวดเร็วขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลข้างต้นเป็นเพียงเบื้องต้นของการวิจัยขั้นต่อไป เพื่อการออกแบบดังปฏิกิริยชีวภาพสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างมีระบบ และสำหรับการศึกษาการผสมในถังหมักแบบกวนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยในครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปัจจัยและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการผสมในของไหลจำลองซึ่งเลือกสารละลายแซนแทนกัมเป็นกรณีศึกษา แต่สิ่งที่น่าสนใจเป็นประโยชน์อย่างยิ่งคือ การนำผลจากการศึกษาในของไหลจำลองมาใช้เป็นบรรทัดฐานในการเลือกรายละเอียดของถังหมัก และกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการผลิตแซนแทนในกระบวนการหมักจริงด้วยเชื้อ *Xanthomonas campestris* ATCC 13951 ที่จะมีการวิจัยต่อไปในอนาคต เพื่อเป็นการสนับสนุนผลการทดลองว่าสอดคล้องและสัมพันธ์กันแค่ไหน และนอกจากนี้ควรจะต้องมีการศึกษาในส่วนถัดไปต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.76 โดยที่ขอบเขตเส้นประแสดงถึงงานวิจัยที่ได้ศึกษาไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน แล้วนำทั้งหมดไปใช้ในการออกแบบและขยายขนาดถังหมักแบบกวนสำหรับผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างมีระบบ



ภาพที่ 3.76 ขอบเขตงานวิจัยในที่นี่ (เส้นประ) และแนวทางการศึกษาต่อ

เอกสารอ้างอิง

- ยุพดี สันติวุฒน์. 2538. รีโโอลิของของโกลนอน-นิวโตเนียนและการผสมในถังปฏิกรณ์แบบ
อากาศยก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Ahmad, M. N., Holland, C. R. and Mckay, G. 1994. Mass transfer studies in
batch fermentation : mixing characteristic. J. Food. Eng. 23: 145-158
- Baig, S. and Ahmad, H. S. 1995. Effect of agitation and rotation speed on the
production of extracellular polysaccharide by *Xanthomonas campestris*
PCSIR B-52 J. Ferment. Bioeng. 79: 572-578.
- Betz, D. A. 1979. Xanthan gum a biosynthesis polysaccharide for the food
industry. Food. Technol. (Australia) 31: 11-16.
- Cadmus, M. C., Knutson, C. A., Lagoda, A. A., Pittsey, J. E. and Burton, K. A.
1978. Synthetic media for production of quality xanthan gum 20 liter
fermenters. Biotechnol. Bioeng. 20: 1003-1014.
- Charles, M. 1985a. Fermentation scale-up: problem and possibilities, Trends
Biotechnol. 3 (6): 134-139.
- Charles, M. 1985b. Fermentation design and scale-up. In Comprehensive
Biotechnology. (Moo-Young, M. ed), Pergamon, Vol. 2, pp. 57-75.
- Chisti, Y. and Moo-Young. 1993. Aeration and mixing in vortex fermenters. J.
Chem. Tech. Biotechnol. 58: 331-336.
- Cieszkowski, J. and Dylag, M. 1994. Conditions of gas dispersion in a three-
phase reactor with mechanical agitation. Intern. Chem. Eng. 34:518-526.
- Dawes, I. W. and Sutherland, I. W. 1992. Microbial Physiology. Vol.4. Oxford :
Blackwell.
- Demain, A. L., Mass, W., and Muenster, P. S. 1981. Process for the
fermentation production of xanthan gum with organic acid. U. S. Patent
4,245,046.
- Funahashi, H., Hirai, K.-I., Yoshida, T. and Taguchi, H. 1988. Mechanistic
analysis of xanthan gum production in a stirred tank. J. Ferment. Technol.
66: 355-364.

- Funahashi, H., Machara, M. and Taguchi, H. 1987a. Effect of agitation by flat-blade turbine impeller on microbial production of xanthan gum. *J. Chem. Eng. Japan*. 20: 16-22.
- Funahashi, H., Machara, M. and Taguchi, H. 1987b. Circulation time distribution and volume of mixing region in highly viscous xanthan gum solution in a stirred tank vessel. *J. Chem. Eng. Japan*. 20 : 277-282.
- Geankoplis, C. J. 1983. *Transport Processes and Unit Operation*. 2nd. ed. Allyn and Bacon, Inc.
- Godet, P. 1973. Fermentation of polysaccharide gum, *Process Biochem.* 8 (1): 33-34
- Gonzales, R., John, M. R., Greenfield, P. F. and Pace, G. W. 1989. Xanthan gum precipitation using ethanol. *Process Biochem.* 200-203.
- Greaves, M. and Barigou, M. 1988. Estimation of gas hold-up and impeller power in a stirred vessel reactor. *Chem. Eng. Sym. Ser.* 108: 235-255.
- Jana, A. K. and Ghosh, P. 1995. Xanthan biosynthesis in continuous culture: Citric acid as an energy source. *J. Ferment. Bioeng.* 80: 485-491
- Kawase, Y. and Moo-Young, M. 1990. Mathematical model for design of bioreactor : Application of kolmogoroff' s theory of isotropic turbulence. *Chem. Eng. J.* 43: B19-B41.
- Kennedy , J. F and Bradshaw, I. J. 1984. Production , properties and application of xanthan, *Progress in Industrial Microbiology.* 19: 319-371
- Lader, H. J. and Miescher, G. M. 1967. Process for the recovery of polysaccharide gum polymer. U. S. Patent 3,316,241.
- Margaritis, A. and Pace, G. W. 1985. Microbial Polysaccharide. In *Comprehensive Biotechnology* (ed. M. Moo-Young). pp. 1005-1044. Pergamon Press.
- McCabe, W. L. and Smith, J. C. 1956. Agitation and Mixing of Liquid. In *Unit Operation of Chemical Engineering*. 2 nd ed. pp. 241-279. New York. McGraw -Hill Book Company, Inc.

- Michael, B. J. and Miller, S. A. 1962. Power requirement of gas-liquid agitated system. *AIChE J.* 8: 262-266
- Moraine, R. A. and Rogovin, P. 1966. Kinetics of polysaccharide B-1459 fermentation. *Biotechnol. Bioeng.* 8: 511-524
- Moraine, R. A. and Rogovin, P. 1971. Xanthan biopolymer production at increased concentration by pH control. *Biotechnol. Bioeng.* 13: 381-391
- Moraine, R. A. and Rogovin, P. 1973. Kinetics of xanthan fermentation. *Biotechnol. Bioeng.* 15: 225-237.
- Murugesan, T. and Degaleesan, T. E. 1993. Power consumption of turbine impellers in gas-liquid contactors. *Indian Chem. Eng.* 35: 129-134.
- Pace, G. W. and Coote, S. D. J. 1981. Xanthan gum by fermentation. *Eur. Pat. Appl.* 32,283A
- Pedersen, A. G., Bundgaard-Nielsen, M., Nielsen, J. and Villadsen, J. 1994. Characterization of mixing in stirred tank bioreactors equipped with Rushton turbines. *Biotechnol. Bioeng.* 44: 1013-1017.
- Peter, H.-U., Herbst, H., Hesselink, P. G. M., Lunsdorf, H., Schumpe, A. and Deckwer, W-D. 1989. The influence of agitation rate on xanthan production by *Xanthomonas campestris*. *Biotechnol. Bioeng.* 34 : 1393-1397.
- Pons, A., Dussap, C. and Gron, J. B. 1990. Xanthan batch fermentation : Compared performances of a bubble column and a stirred tank fermenter. *Bioprocess. Eng.* 5: 107-114.
- Riet, Klaas van t. and Tramper, J. 1991. *Basic Bioreactor Design*. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Robinson, D. K. and Wang, D. I. C. 1988. A transport controlled bioreactor for the simultaneous production and concentration of xanthan gum. *Biotechnol. Prog.* 4: 231-241
- Roman, R. V. and Tudose, R. Z. 1996. Studies on transfer processes in mixing vessels: hydrodynamic of the modified Rushton turbine agitators in gas-liquid dispersions. *Chem. Eng.* 61: 83-93.

- Sanchez, A., Martinez, A., Torres, L. and Galindo, E. 1992. Power consumption of three impeller combination in mixing xanthan fermentation broth. *Process Biochem.* 27: 351-365.
- Sandford, P. A. 1979. Exocellular microbial polysaccharide. *Adv. Carbohydrate Chem. Biochem.* 36: 265-313.
- Siripatana, C. 1992. Xanthan Both Rheology and Mixing in a Stirred Tank Containing the Rheologically Complex Liquids. Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Queensland, Australia.
- Souw, P. and Demain, A. L. 1979. Nutrition studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B 1459. *Appl. Environ. Microbiol.* 37: 1186-1192.
- Taguchi, H. and Miyamota, S. 1966. Power requirement in non-Newtonian fermentation broth. *Biotechnol. Bioeng.* 13: 43-54.
- Taguchi, H., Imamaka, T., Teramoto, S., Takatsa, M. and Sato, M. 1968. Scale-up of glucoamylase fermentation by *Endomyces sp.* *J. Ferment. Technol.* 46, 823.
- Takennaka, K. and Takahashi, K. 1996. Local gas holdup and gas recirculation rate in an aerated vessel equipped with a Rushton turbine impeller. *J. Chem. Eng. Japan.* 29: 799-804.
- Tatterson, G. B. 1991. Gas dispersion in agitated tanks. In *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks*. pp. 417-517. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Vanderslice, R. W., Patrick, S. and Colo, B. 1989. Polysaccharide polymer made by *Xanthomonas*. U. S. Patent. 4,868,293.
- Zaidi, A., Ghosh, P., Schumpe, A. and Deckwer, W. D. 1991. Xanthan production in a plunging jet reactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 35: 330-333.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การคำนวณหาค่า เลขกำลัง (power number) และเลขเรย์โนลด์ (reynold number) ตามวิธีการของ McCabe และ Smith (1956)

เลขกำลัง

$$N_P = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho}$$

โดยที่

N_p = เลขกำลัง (ไม่มีหน่วย)

P = กำลัง (วัตต์)

ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

N = ความเร็ว (รอบต่อวินาที)

D_a = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

ตัวอย่าง การคำนวณหาเลขกำลังในสารละลายน้ำ (ความหนาแน่น 997.08 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.105 เมตร ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที (จากการทดลองใช้กำลังในการกวนเท่ากับ 1.45 วัตต์)

แทนค่า

$$N_P = \frac{1.45}{(2.5)^3 (0.105)^5 (997.08)}$$

$$N_P = 7.29$$

ฉะนั้นเลขกำลังเท่ากับ 7.29

เลขเรย์โนลด์

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_a}$$

โดยที่

μ_a = ความหนืดเฉื่อย (Pa.s)

ตัวอย่าง การคำนวณหาเลขเรย์โนลด์ในสารละลายน้ำ (ความหนาแน่น 997.08 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.105 เมตร ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที (ความหนืดของน้ำเท่ากับ 0.8937 Pa.s)

แทนค่า

$$N_{Re} = \frac{(0.105)^2(2.5)(997.08)}{(0.8937 \times 10^{-3})}$$

$$N_{Re} = 30750.83$$

ฉะนั้นเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 30750.83

ส่วนเลขเรย์โนลด์สำหรับสารละลายแซนแทนกัมมัน เป็น Modified Reynolds number (N'_{Re}) สามารถหาได้จากสมการของ McCabe และ Smith (1956) ดังนี้

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N_p}{\mu a} = \frac{D_a^2 N^{2-n} p}{11^{n-1} K}$$

โดยที่

K = consistency index

n = flow behavior index

ค่าคุณสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง consistency index และ plasticity or power law index (K, n)

ความเข้มข้นของสารละลายแซนแทน	0.1%	0.25%	0.5%	1.0%
K	0.09709	0.8842	4.5333	8.2703
n	0.4167	0.2118	0.1109	0.0634

2. การคำนวณ Hold-Up ตามวิธีการของ Cieszkowski และ Dylag (1994)

Hold-Up (E_g)

$$E_g = \frac{\Delta h}{h + \Delta h}$$

โดยที่

Δh = ความสูงของของเหลวที่เพิ่มขึ้น (เมตร)

h = ความสูงของของเหลวเดิม (เมตร)

ตัวอย่าง การคำนวณหา Hold-Up ในสารละลายน้ำ ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที และอัตราการให้อากาศ 0.18 vvm. จากการทดลองวัดความสูงของของเหลวที่เพิ่มขึ้นได้เท่ากับ 2.83 มิลลิเมตร จากความสูงของของเหลวเดิม 250 มิลลิเมตร

แทนค่า

$$E_g = \frac{0.00283}{0.250 + 0.00283}$$

$$E_g = 0.01119$$

ฉะนั้น Hold-Up ในสารละลายน้ำ ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที และอัตราการให้อากาศ 0.18 wvm เท่ากับ 0.01119

3. การคำนวณปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (Volume of mixing region)

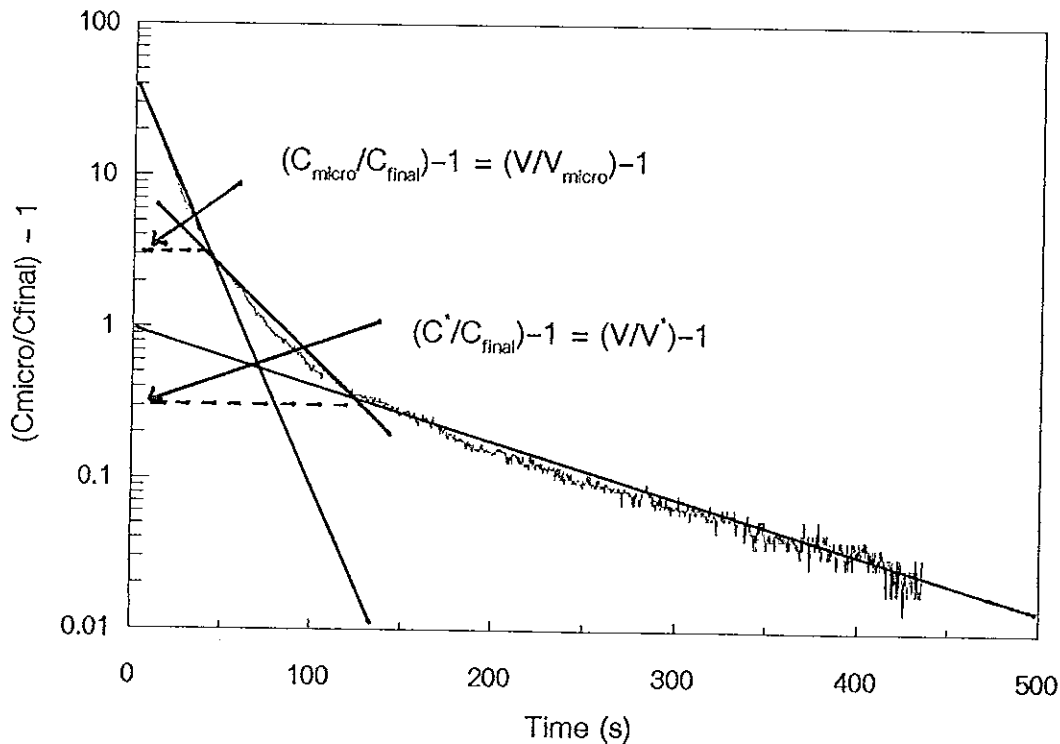
Funahashi และคณะ (1987b) ได้ศึกษาและสังเกตรูปแบบของการไหลและการผสมในถังหมักแบบกวน พบว่าปริมาตรทั้งหมดของถังอาจแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ

และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$-V_{\text{micro}} \left(\frac{dC_{\text{micro}}}{dt} \right) = q(C_{\text{micro}} - C_{\text{macro}}) \quad (1)$$

$$-V_{\text{macro}} \left(\frac{dC_{\text{macro}}}{dt} \right) = q(C_{\text{macro}} - C_{\text{micro}}) \quad (2)$$

ตัวอย่าง การหาปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที (ปริมาตรของสารละลายในถัง (V) = 11 ลิตร)



จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในถังหมักสามารถแบ่งได้เป็นสามบริเวณ คือ a, b และ c ที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่เติมเข้าไป ที่แพร่จาก V_{micro} ไปยัง V_{macro} และ V_{stagnant} ตามลำดับ ดังนั้น C_{micro} และ V_{micro} สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่จุดเปลี่ยนจาก a ไปยัง b ดังภาพ และ C' กับ V' สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่จุดเปลี่ยนจาก b ไปยัง c ดังภาพ และถ้าไม่มี V_{stagnant} อยู่ในถังหมัก V_{macro} จะได้จากปริมาตรของเหลวในถังทั้งหมดลบด้วย V_{micro} ($V - V_{\text{micro}}$) เป็นต้น

จากกราฟสามารถหา V_{micro} และ V' ได้จากจุดตัดบนแกน y ดังภาพ (จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟการตอบสนองของเทรซเซอร์ของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณในถังหมักแบบกวน)

$$(V/V_{\text{micro}}) - 1 = 3$$

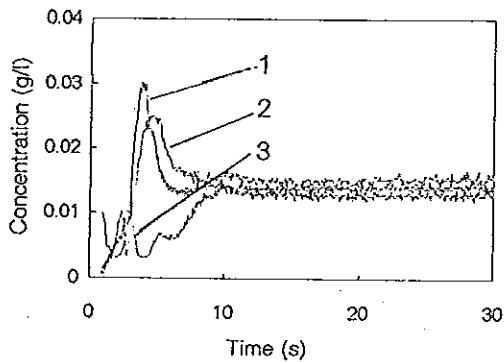
$$\text{ดังนั้น } V_{\text{micro}} = 2.75 \text{ ลิตร}$$

$$(V/V') - 1 = 0.3$$

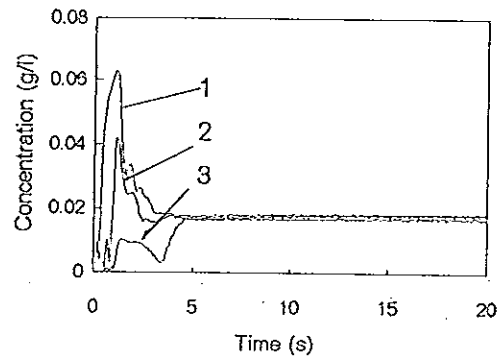
$$\text{ดังนั้น } V' = 8.46 \text{ ลิตร}$$

ดังนั้นสามารถหา V_{macro} ได้เท่ากับ $(V' - V_{\text{micro}}) = 5.71$ ลิตร และหา V_{stagnant} ได้เท่ากับ $(V - V') = 2.54$ ลิตร ตามลำดับ

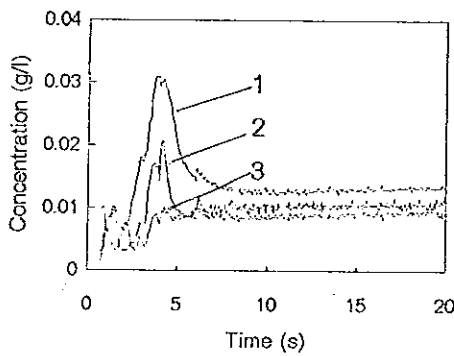
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองกราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ทั้งสามตำแหน่งในถังหมัก



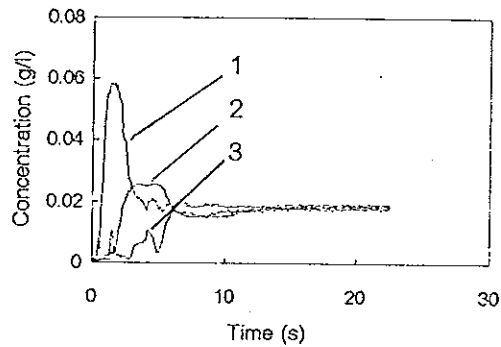
(1)



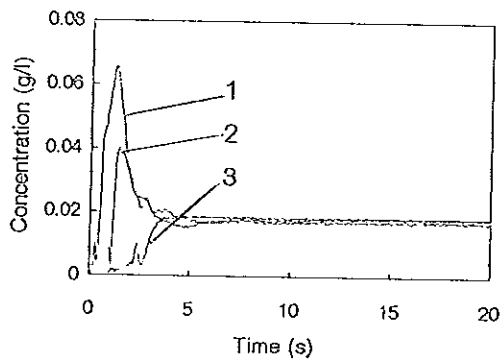
(2)



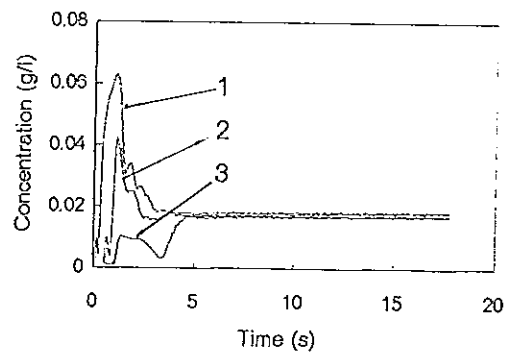
(3)



(4)

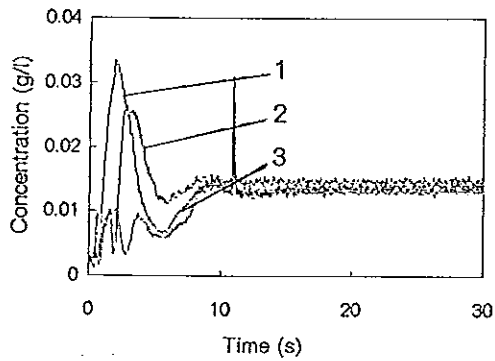


(5)

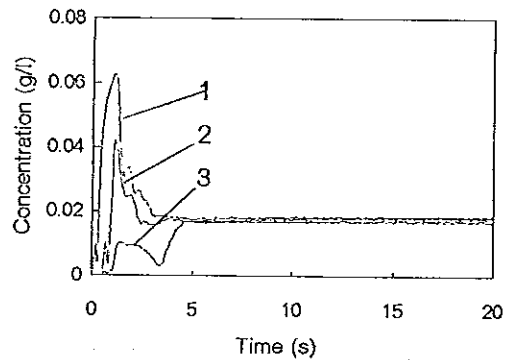


(6)

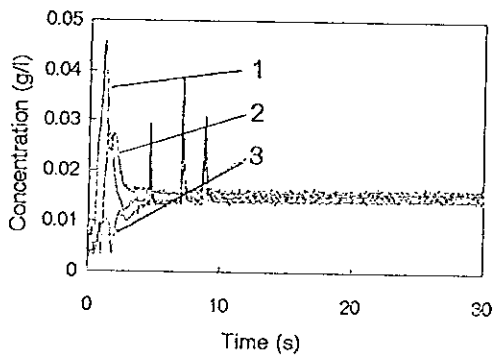
ภาพภาคผนวกที่ ข1 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) ที่อัตราการให้อากาศ 0 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (5), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



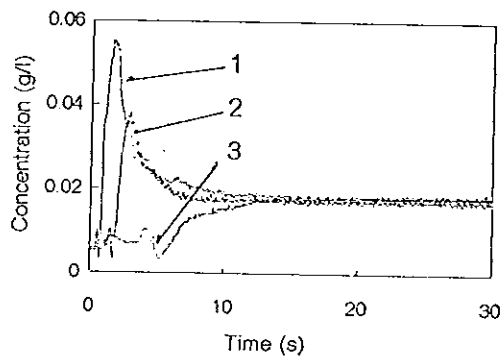
(1)



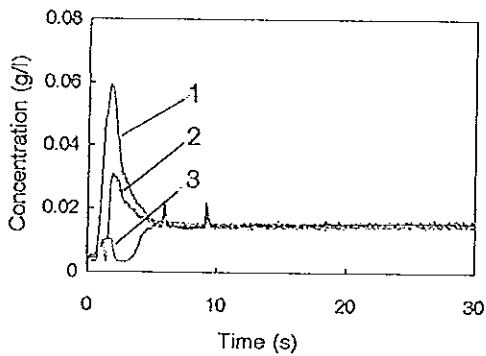
(2)



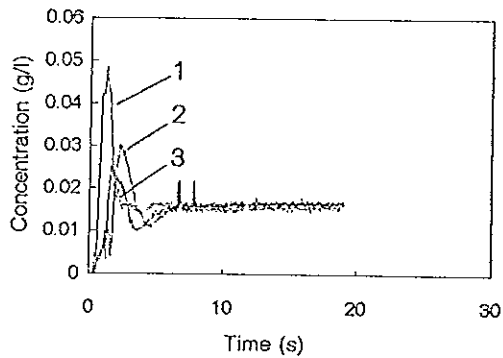
(3)



(4)

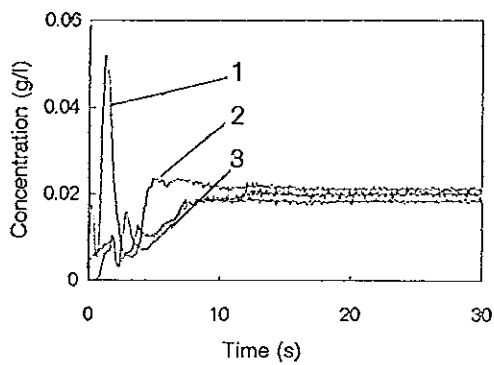


(5)

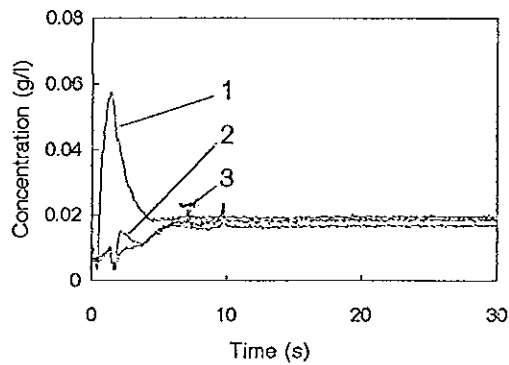


(6)

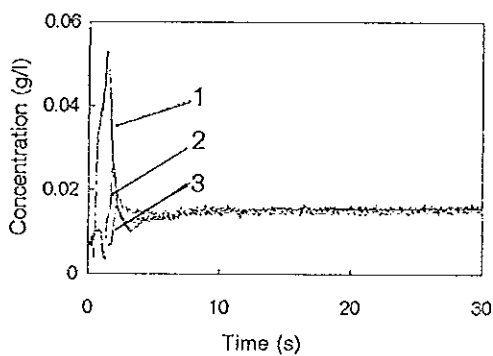
ภาพภาคผนวกที่ ข2 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) ที่อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (5), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



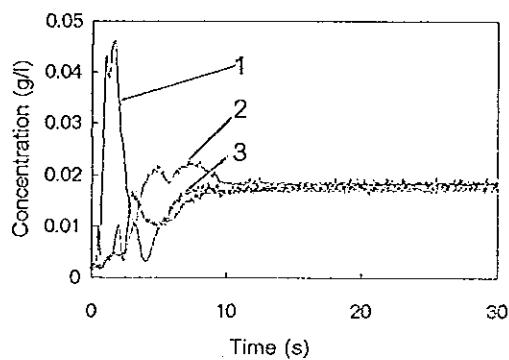
(1)



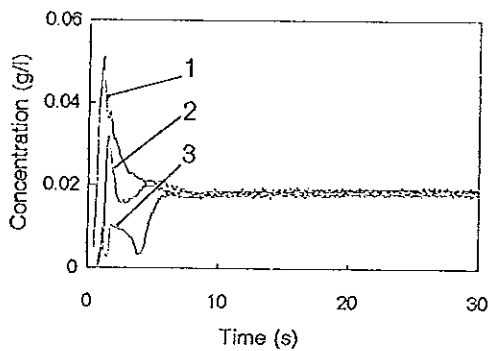
(2)



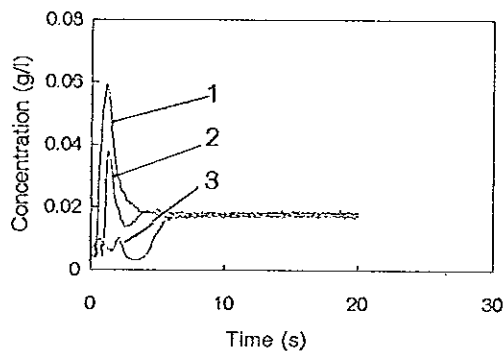
(3)



(4)

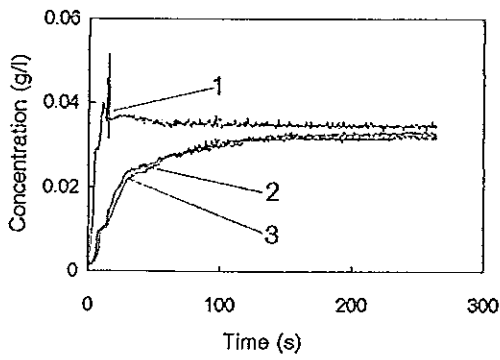


(5)

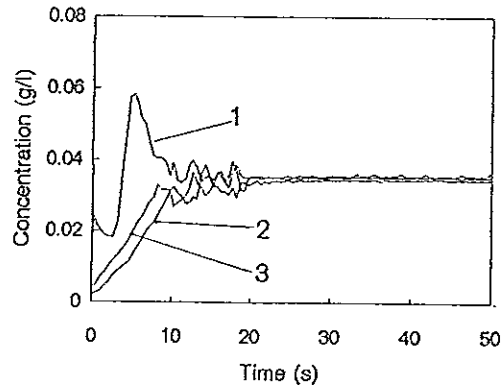


(6)

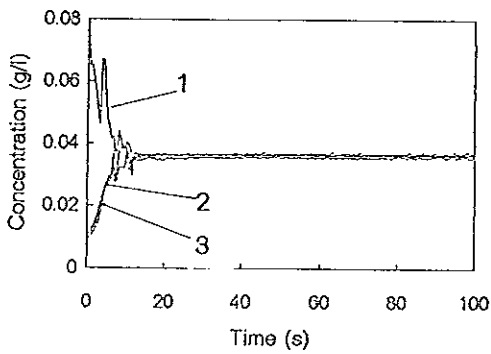
ภาพภาคผนวกที่ ข3 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (น้ำ) ที่อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (5), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



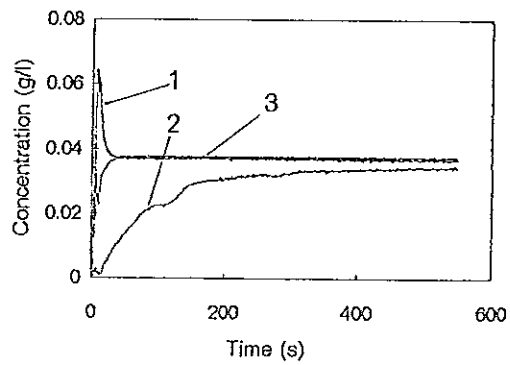
(1)



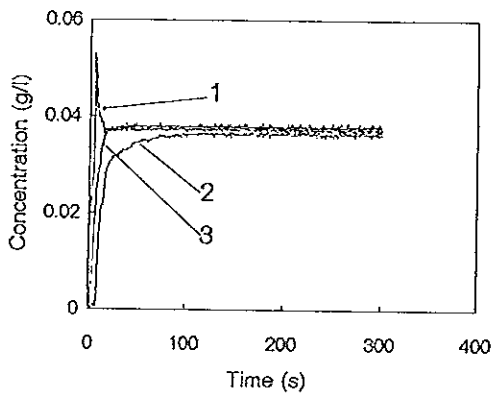
(2)



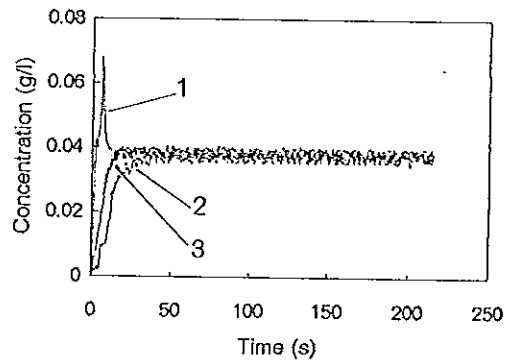
(3)



(4)

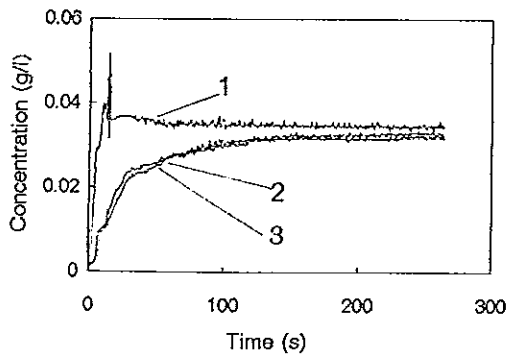


(5)

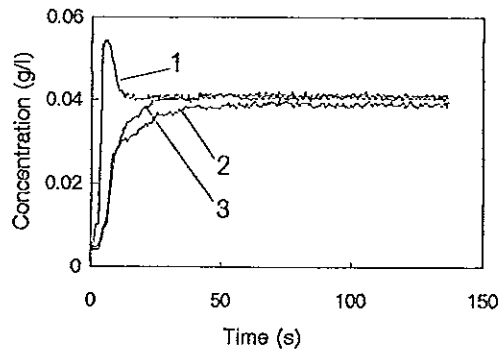


(6)

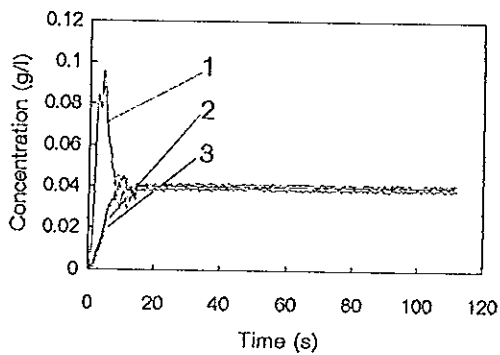
ภาพภาคผนวกที่ ข4 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (5), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



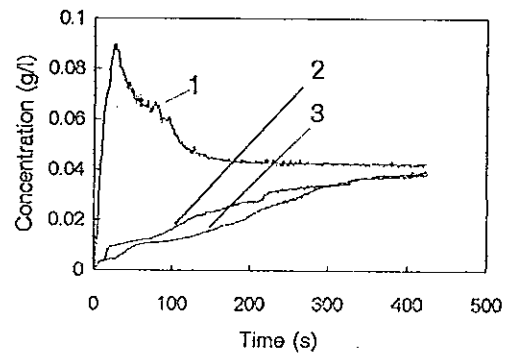
(1)



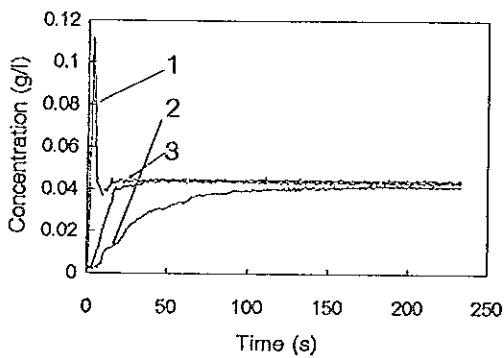
(2)



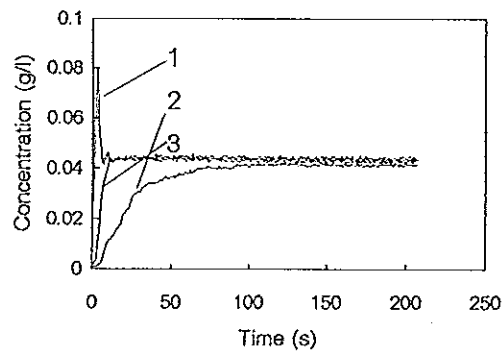
(3)



(4)

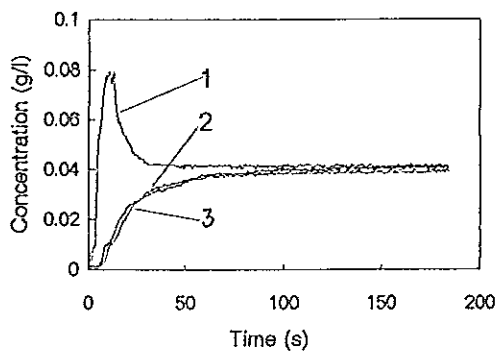


(5)

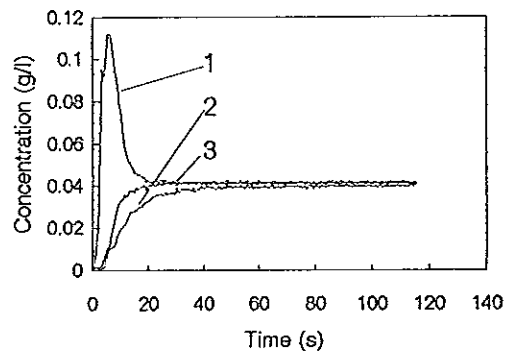


(6)

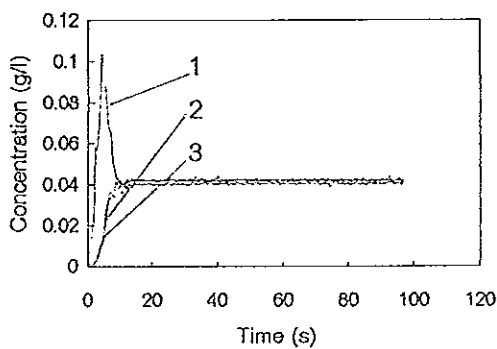
ภาพภาคผนวกที่ ข5 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (5), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



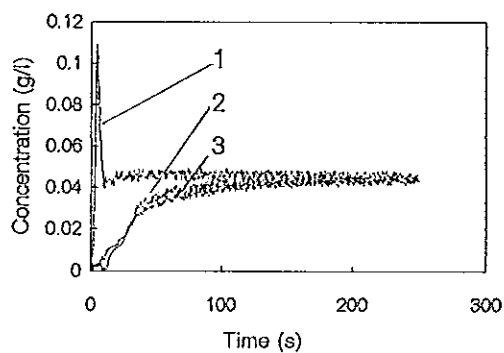
(1)



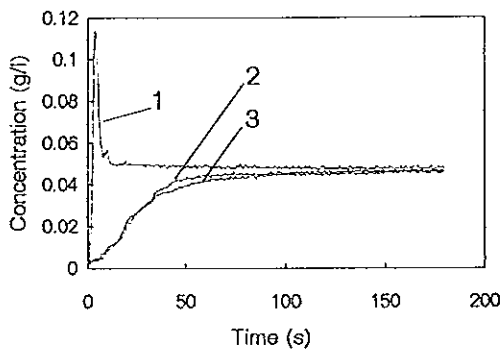
(2)



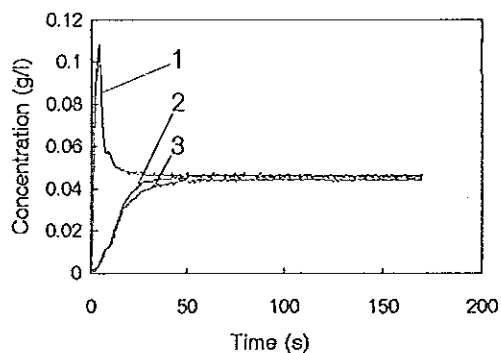
(3)



(4)

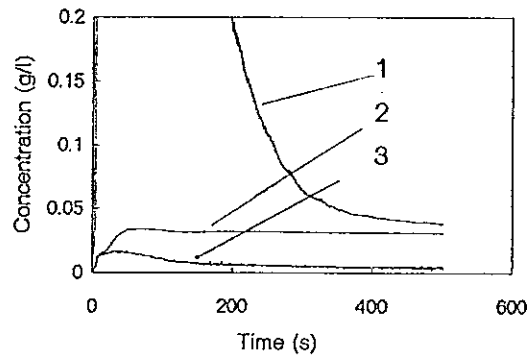
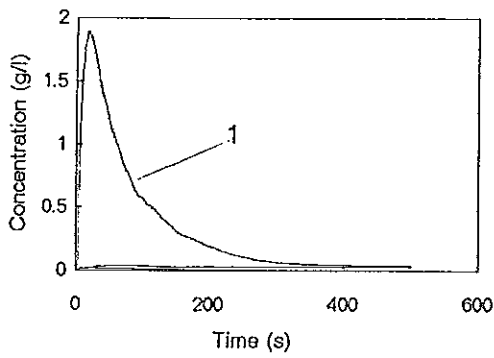


(5)

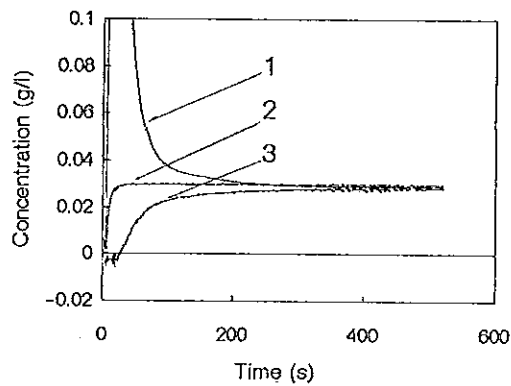
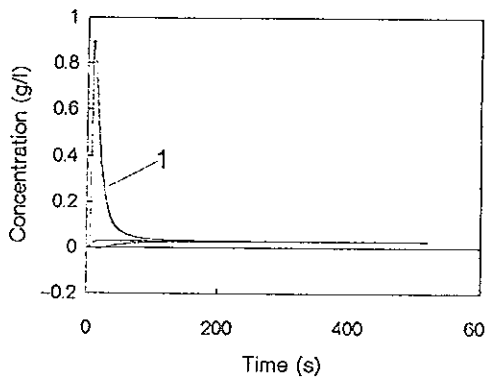


(6)

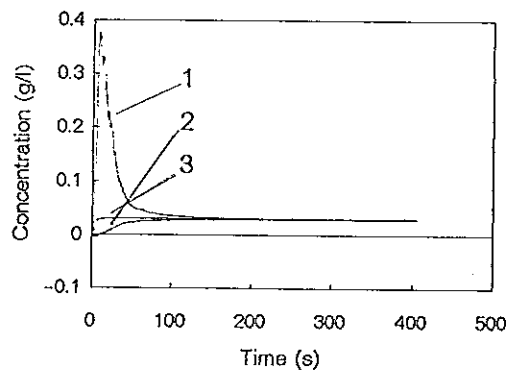
ภาพภาคผนวกที่ ข6 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm
 (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ
 (4), (4), (6) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการ กวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)

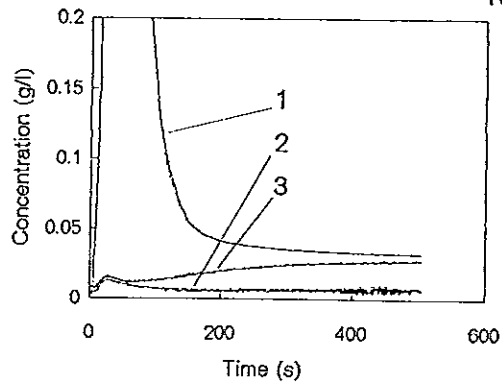
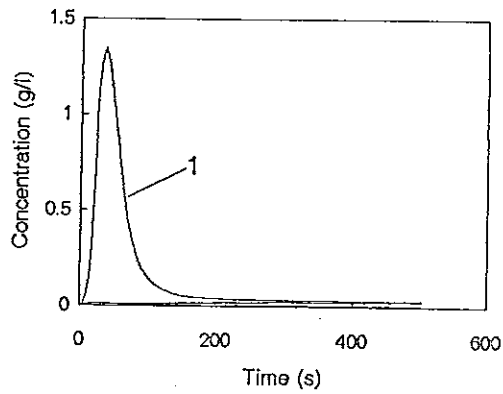


(2)

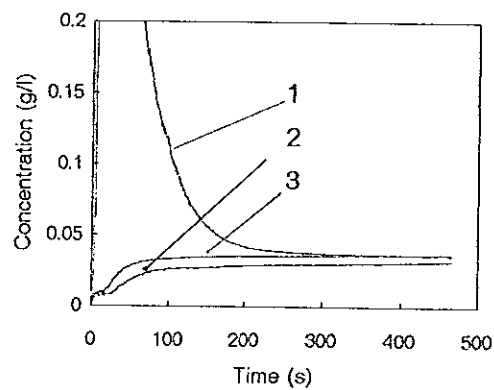
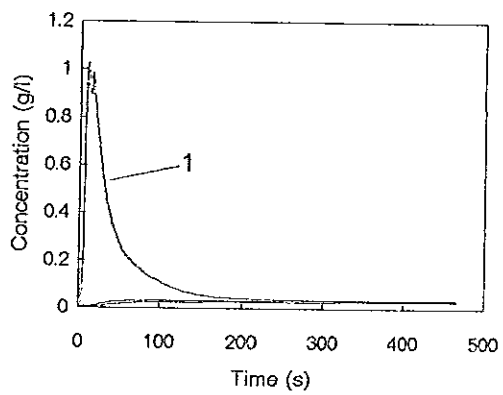


(3)

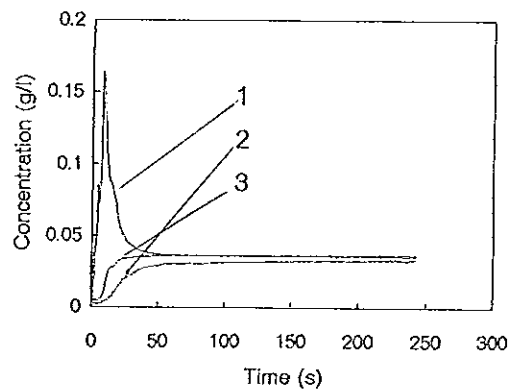
ภาพภาคผนวกที่ ข7 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น
ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0 vvm
(1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน
2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)

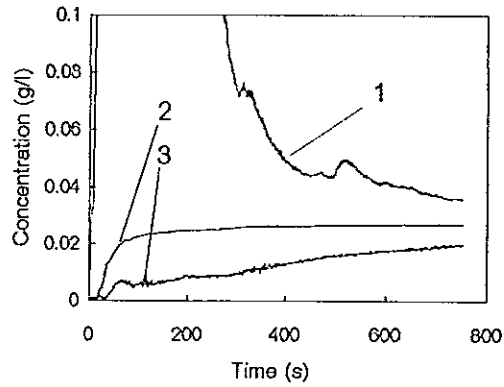
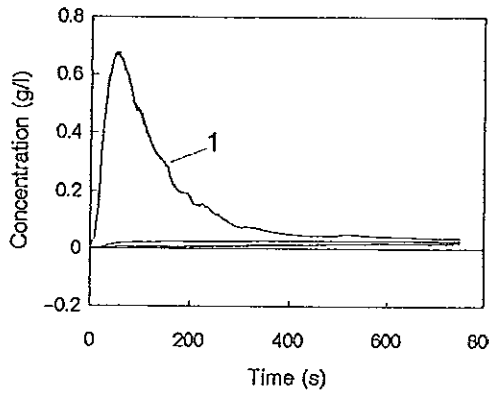


(2)

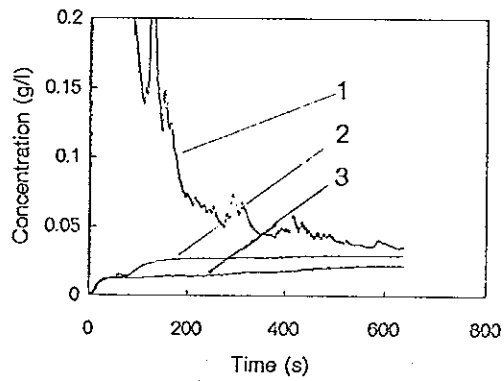
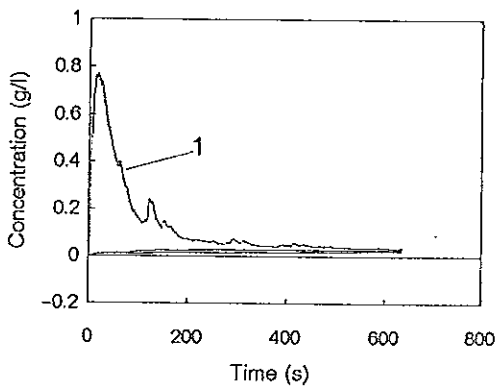


(3)

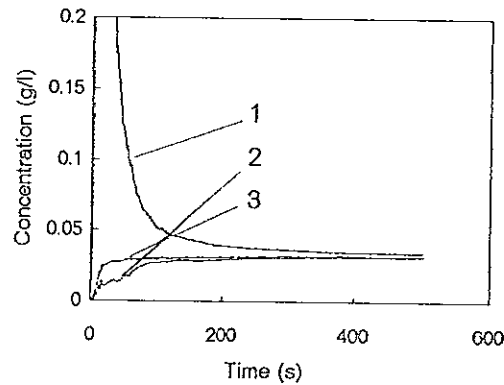
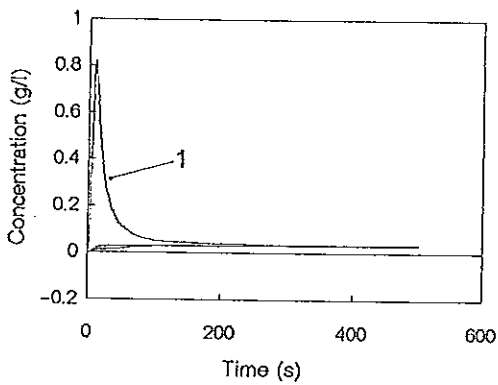
ภาพภาคผนวกที่ ข8 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น
ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0 w/m
(1), (2), (3) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการ
กวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)

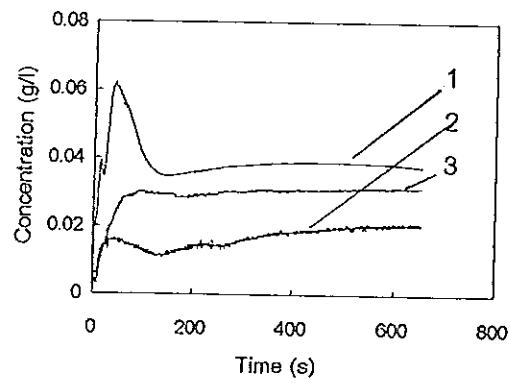


(2)

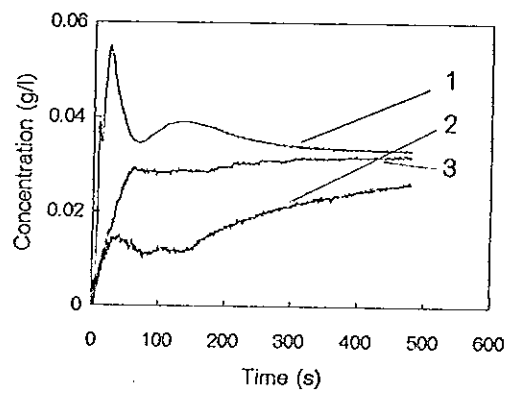


(3)

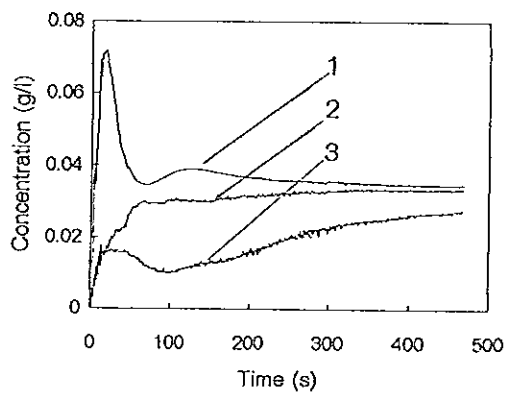
ภาพภาคผนวกที่ ข9 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแรนความเข้มข้น
ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการใช้แสง 0.18 w/cm²
(1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน
2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)

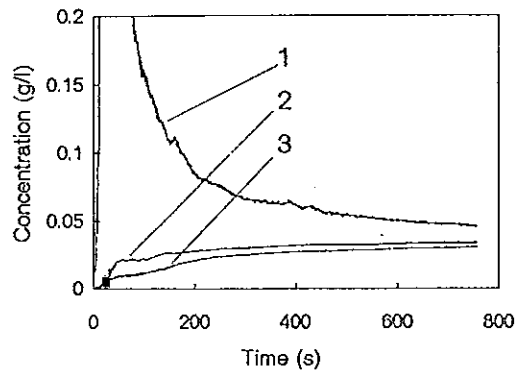
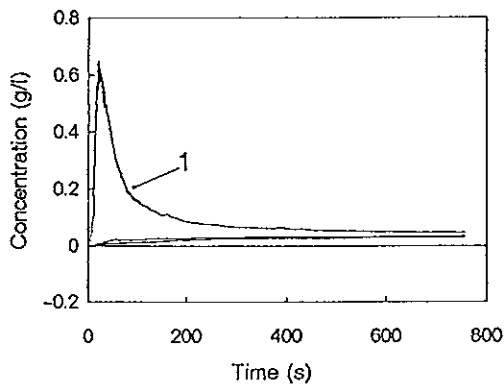


(2)

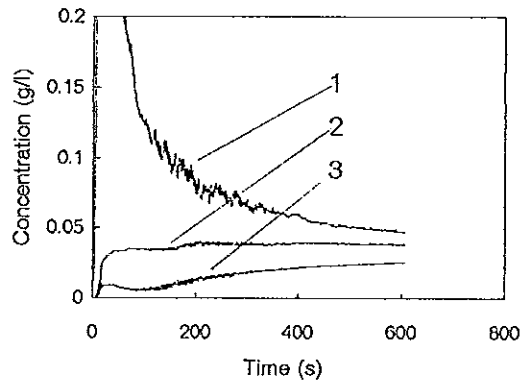
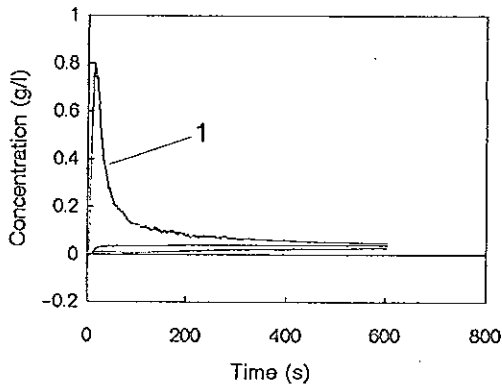


(3)

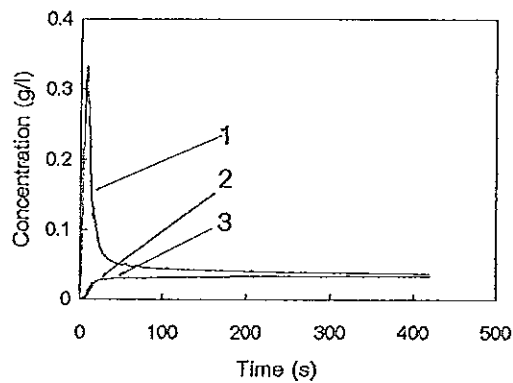
ภาพภาคผนวกที่ ข10 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.18 vvm (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการ กวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)

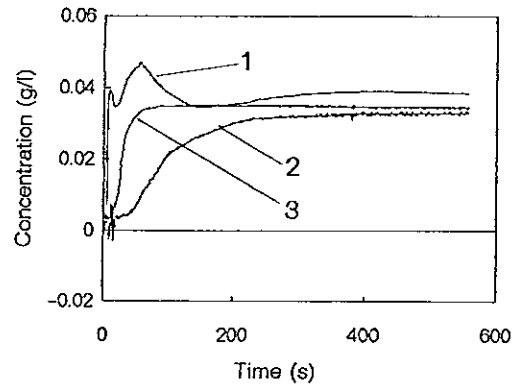


(2)

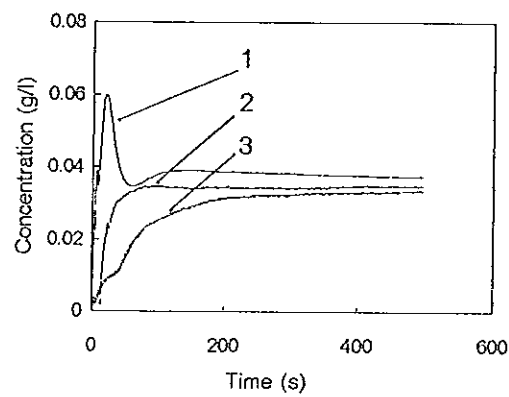


(3)

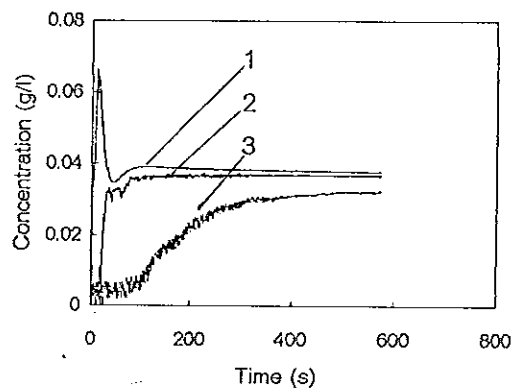
ภาพภาคผนวกที่ ข11 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Flat blade turbine ความเร็วรอบในการกวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ



(1)



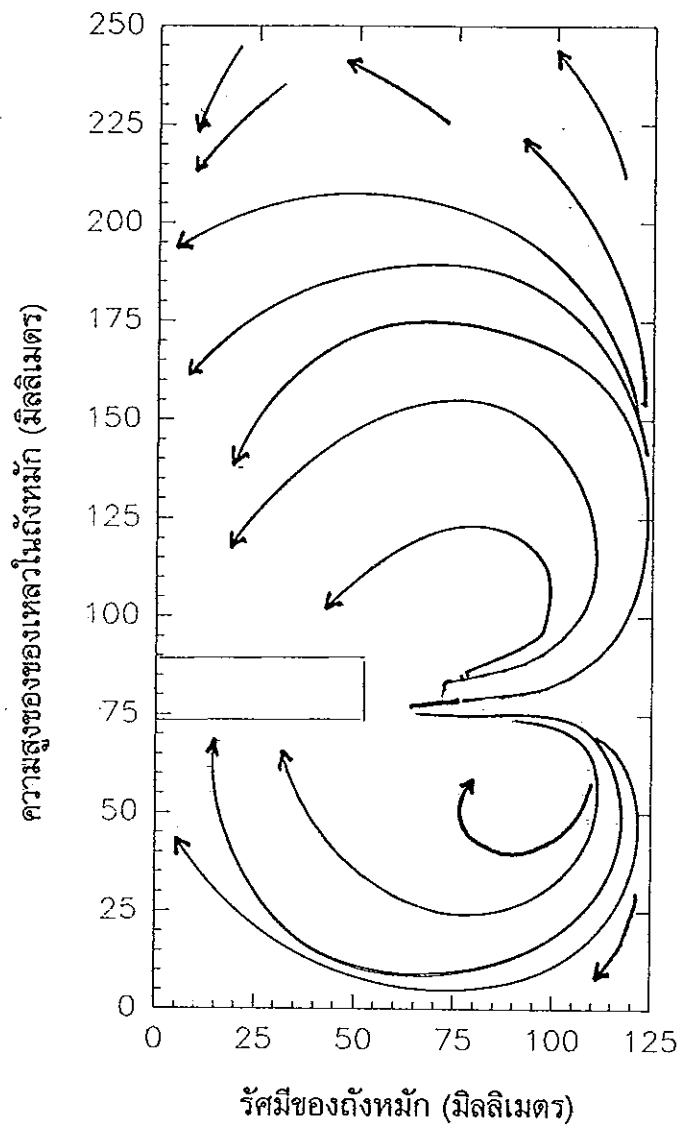
(2)



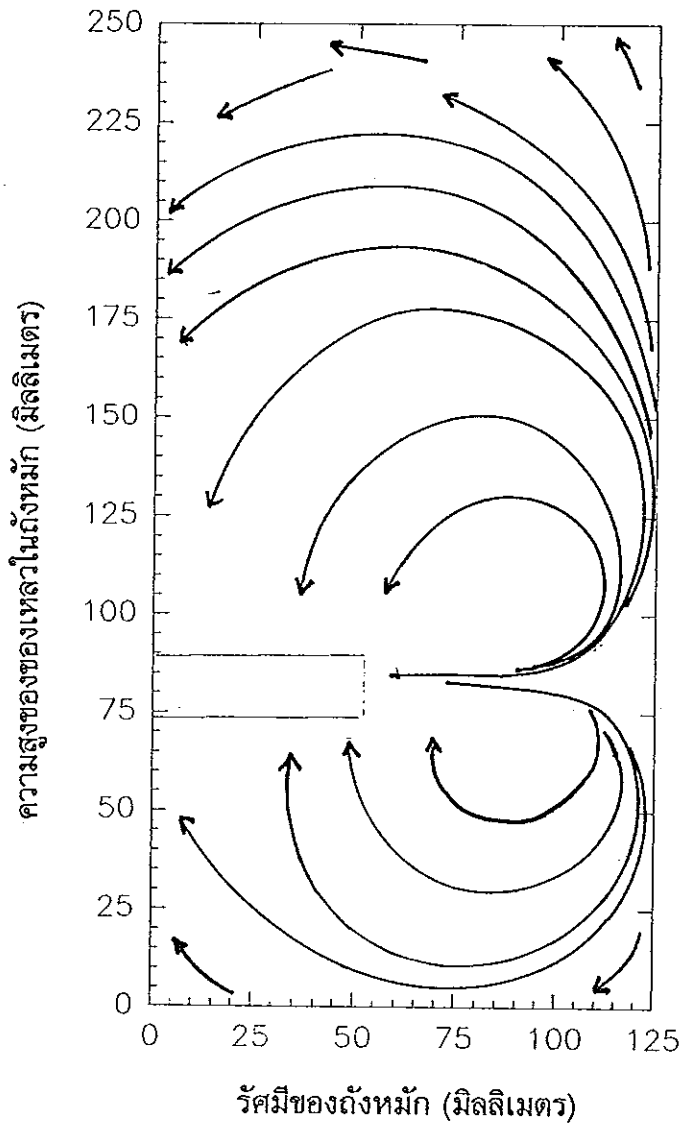
(3)

ภาพภาคผนวกที่ ข12 กราฟการตอบสนองของเทอร์ชเซอร์ ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้น ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้อากาศ 0.36 vvm (1), (2), (3) ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ความเร็วรอบในการ กวน 2.5, 4.166 และ 5.833 รอบต่อวินาที ตามลำดับ

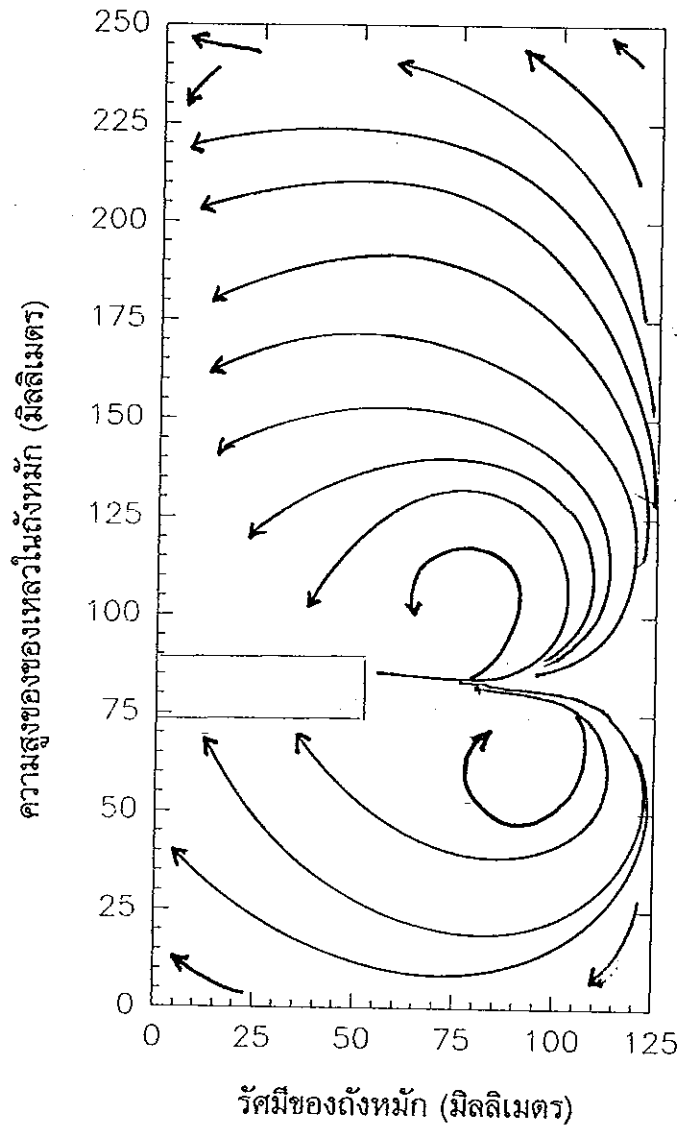
ภาคผนวก ค. ผลการทดลองรูปลักษณะการไหล



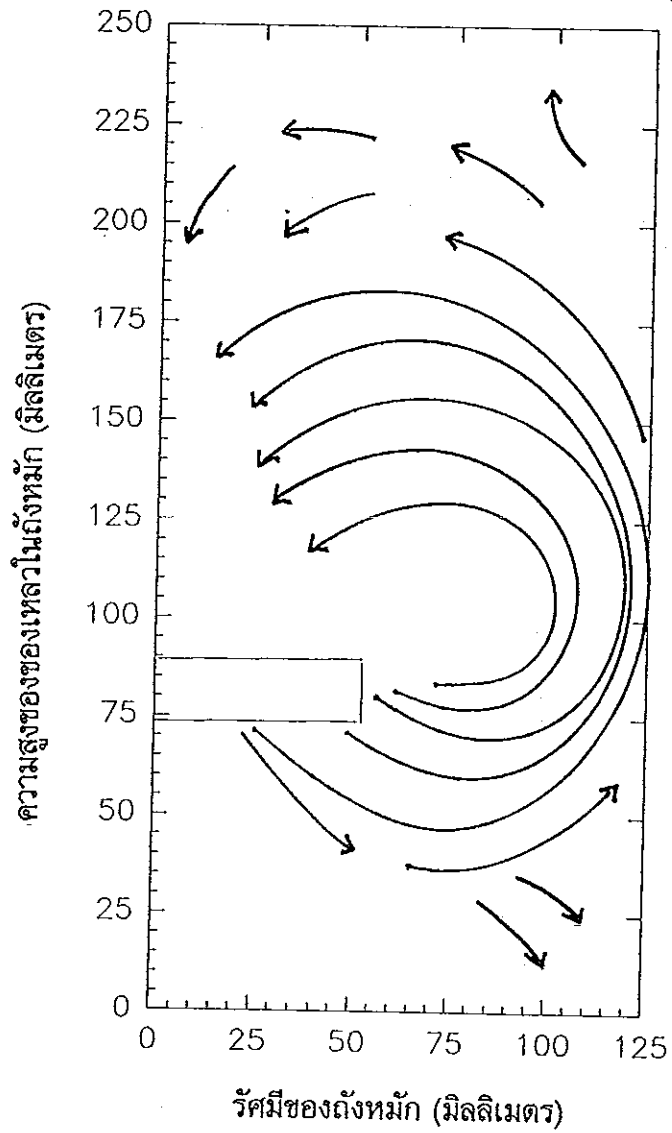
ภาพภาคผนวกที่ ค1 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



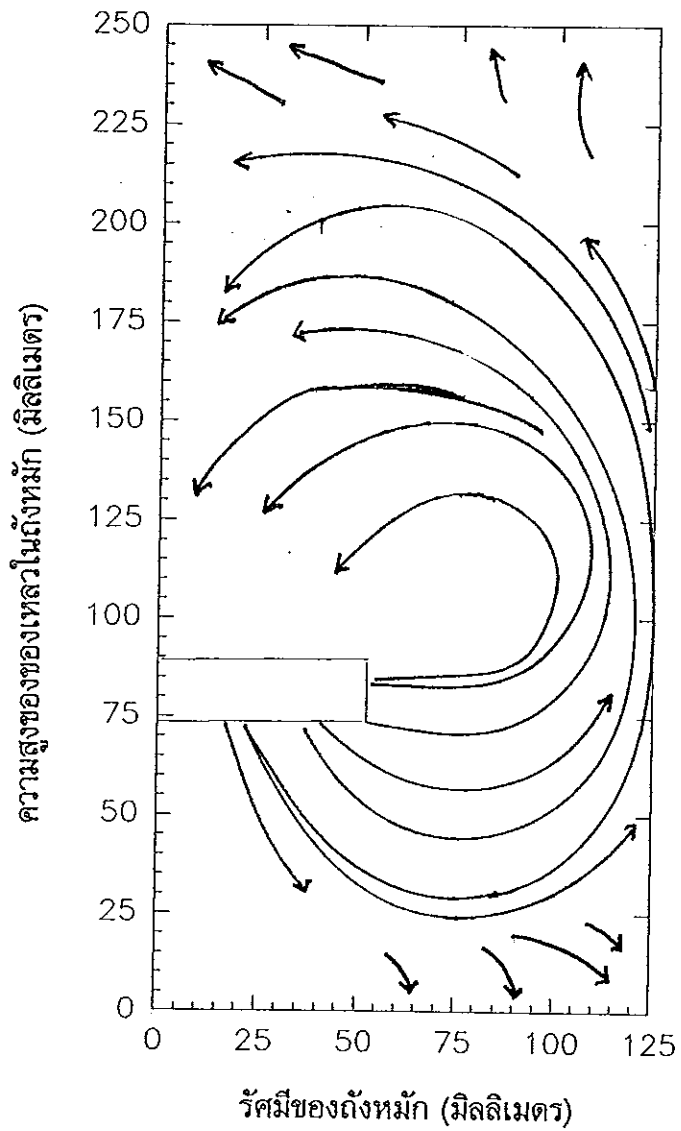
ภาพภาคผนวกที่ ค2 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกววน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



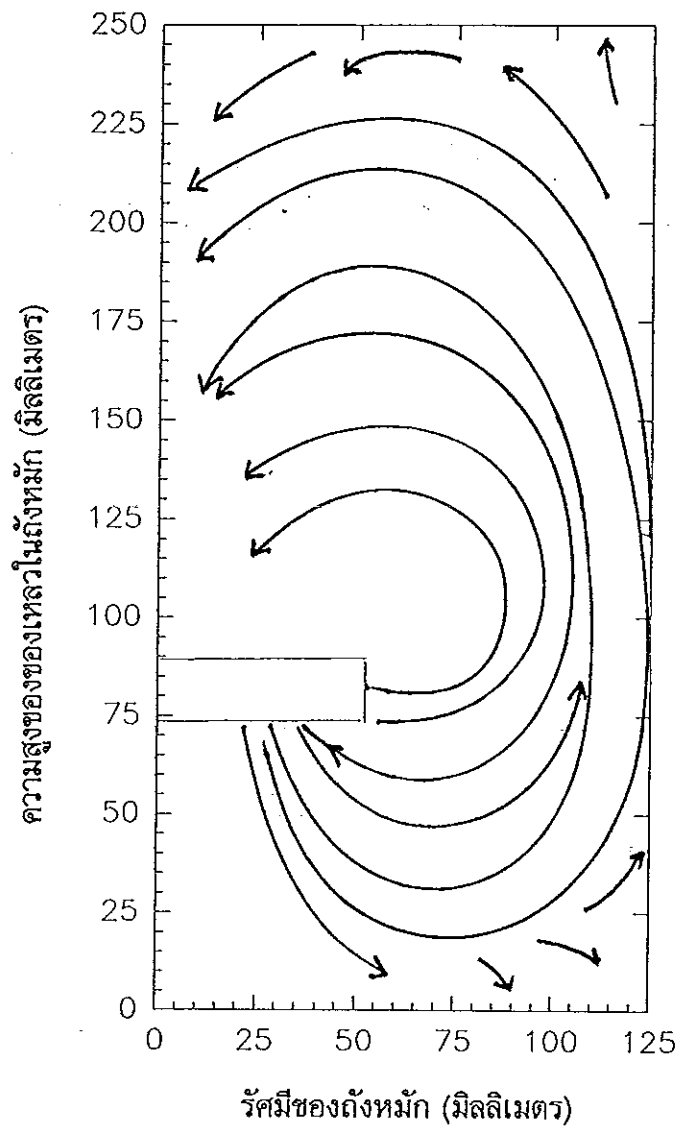
ภาพภาคผนวกที่ ค3 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



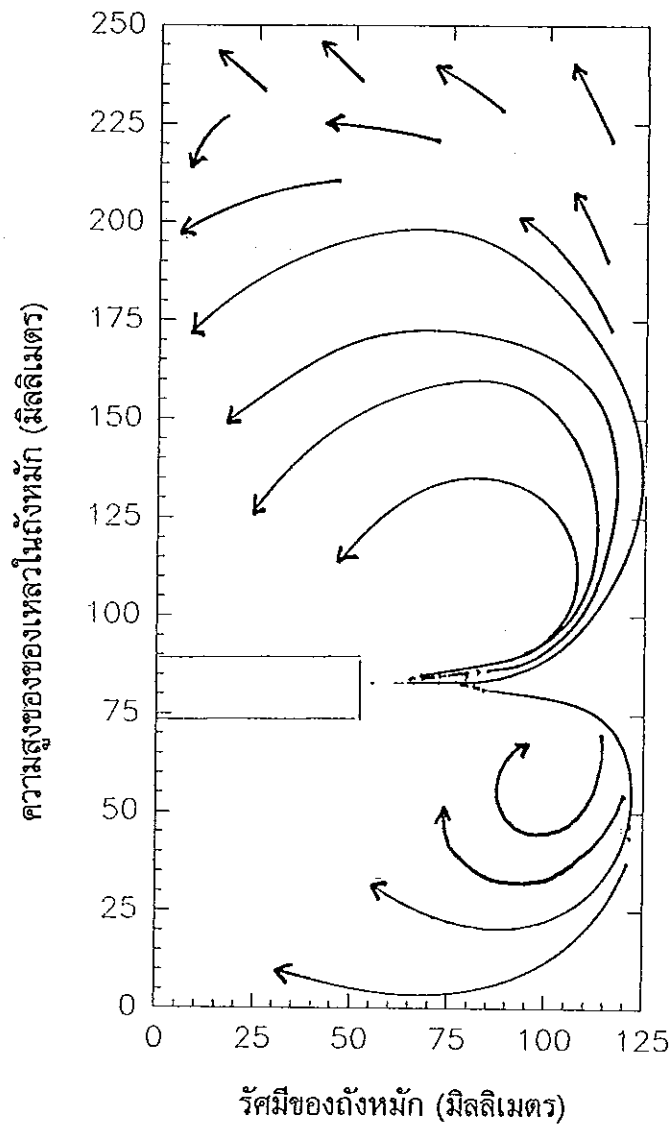
ภาพภาคผนวกที่ ค4 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแซนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



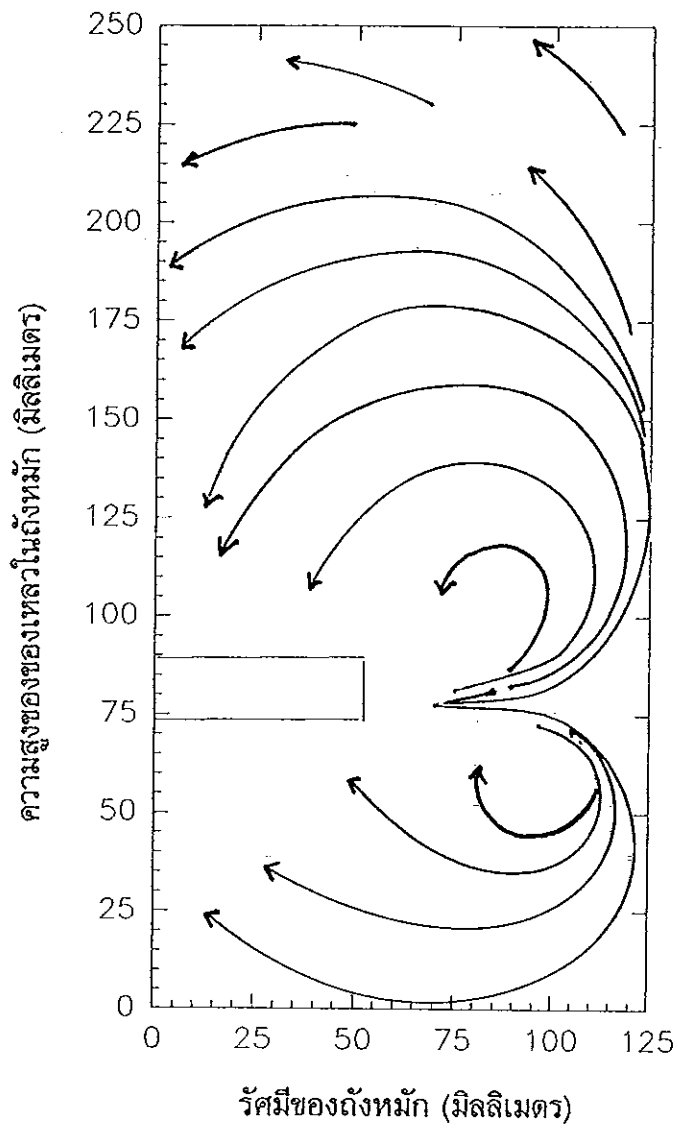
ภาพภาคผนวกที่ ค5 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



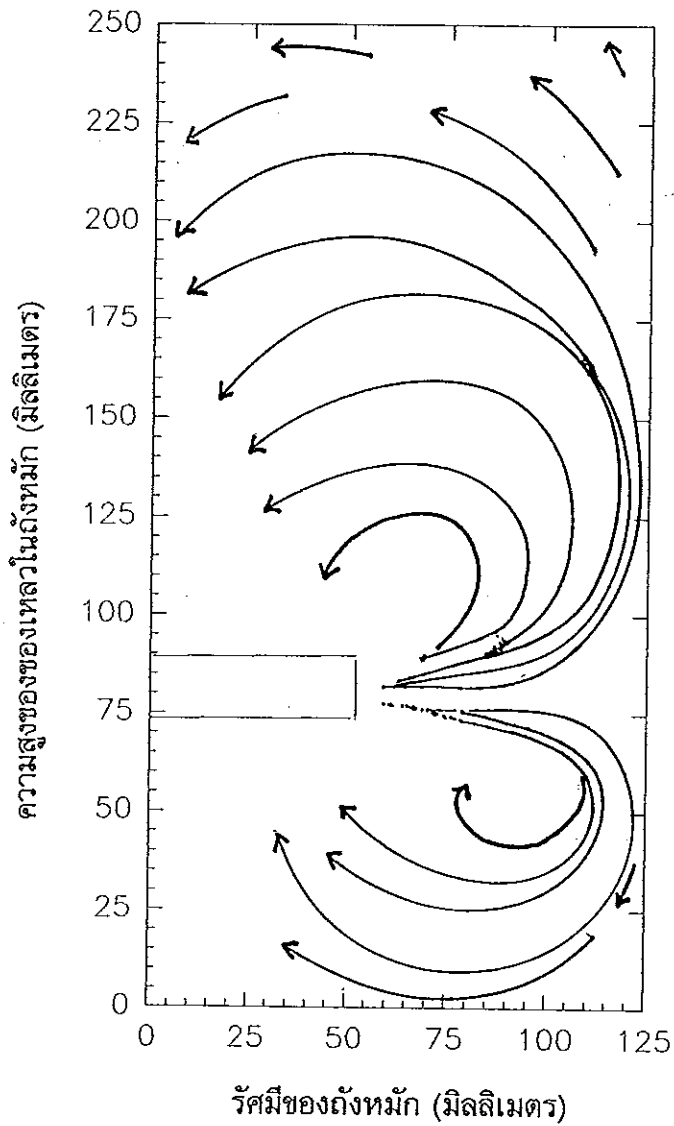
ภาพภาคผนวกที่ ค6 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก



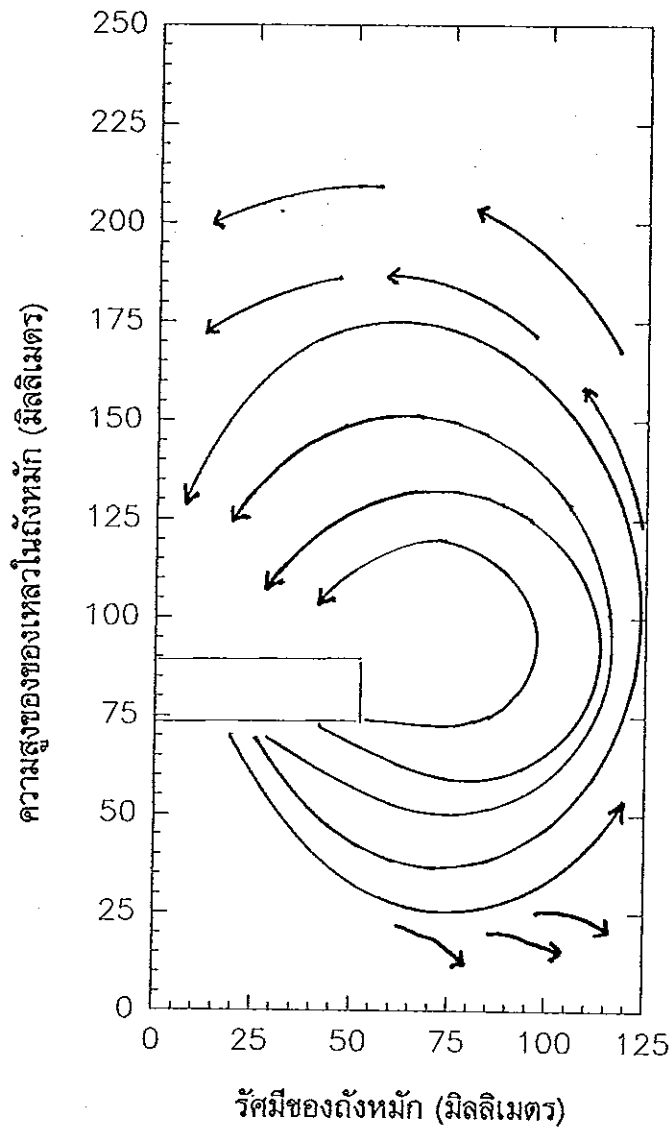
ภาพภาคผนวกที่ ค7 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



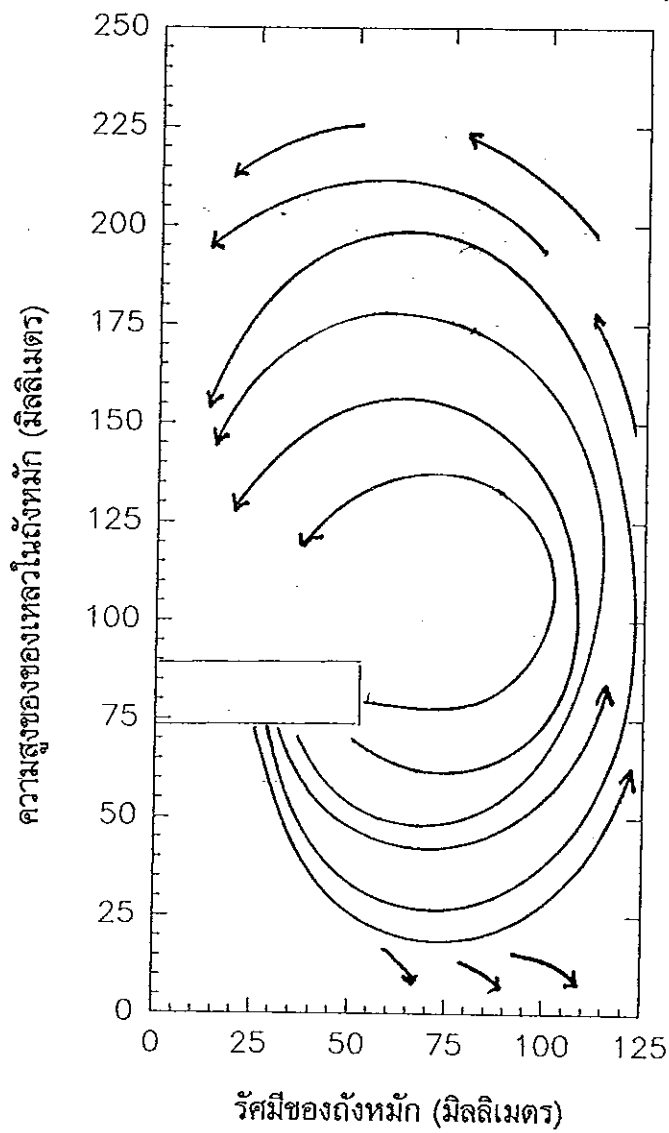
ภาพภาคผนวกที่ ค8 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



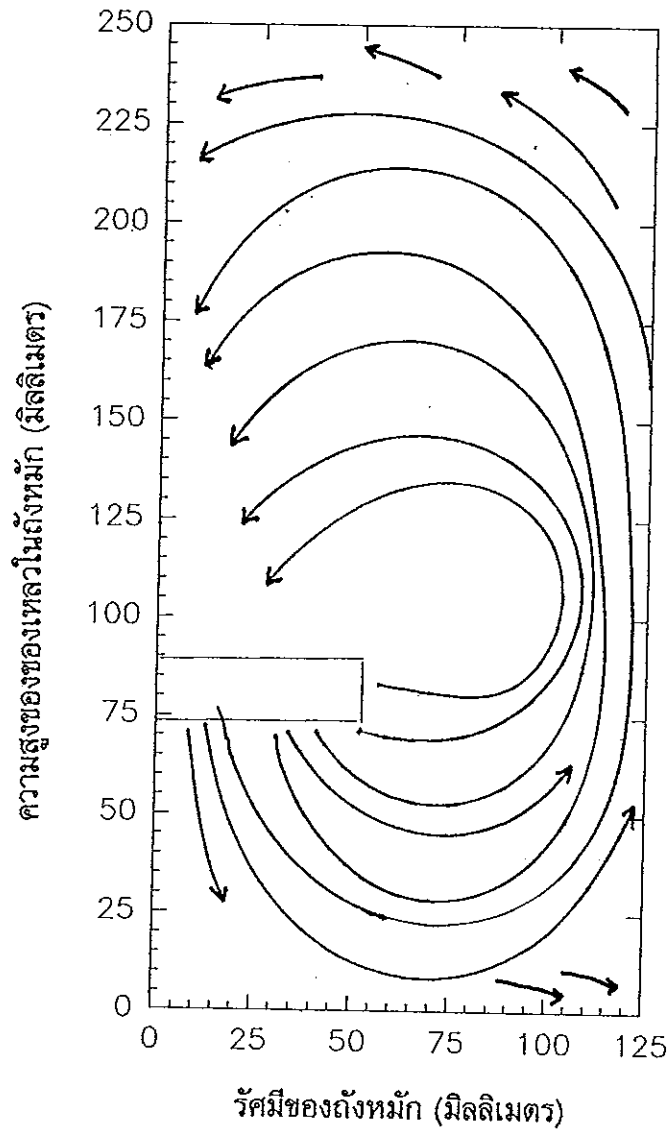
ภาพภาคผนวกที่ ค9 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



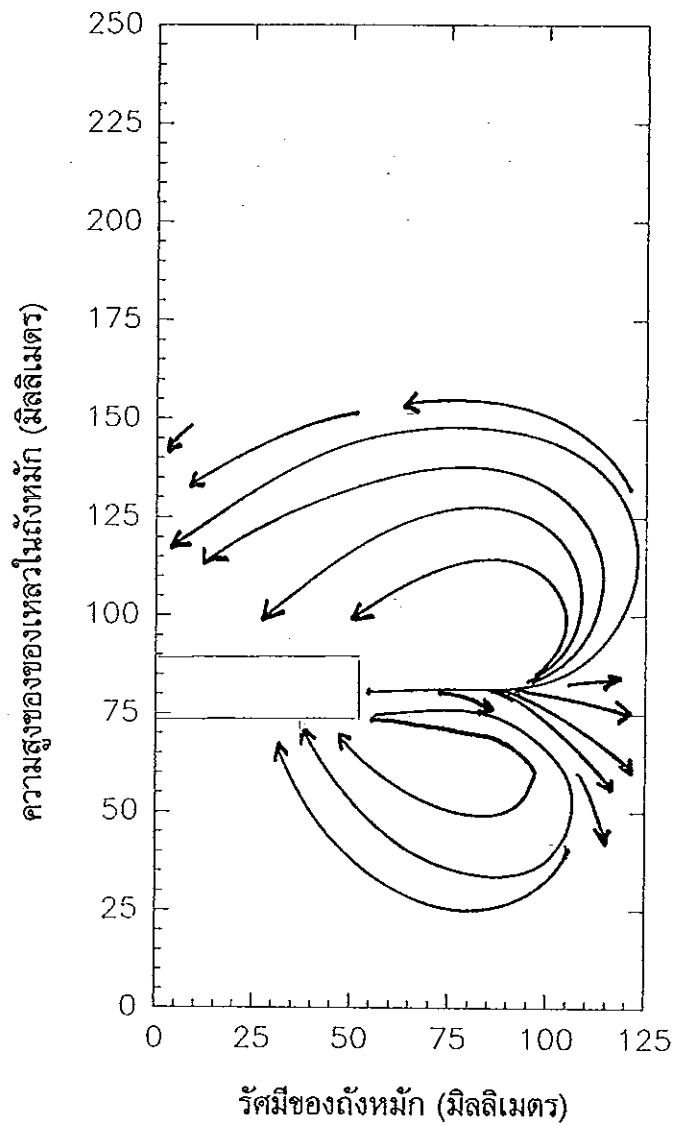
ภาพภาคผนวกที่ ค10 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



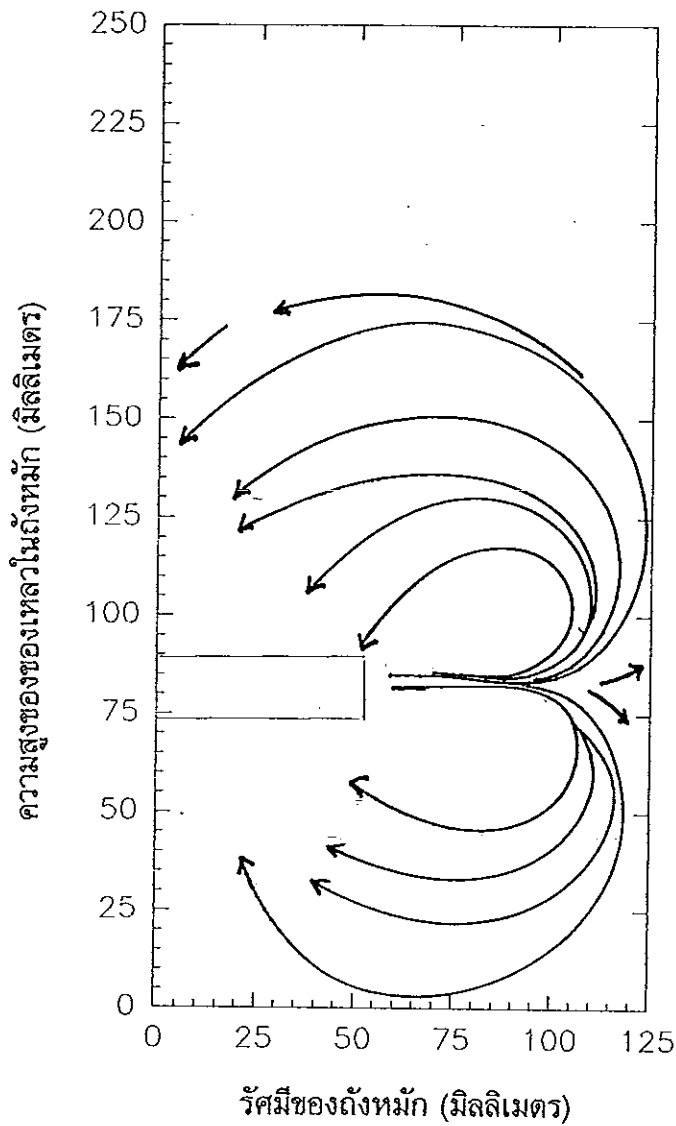
ภาพภาคผนวกที่ ค11 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



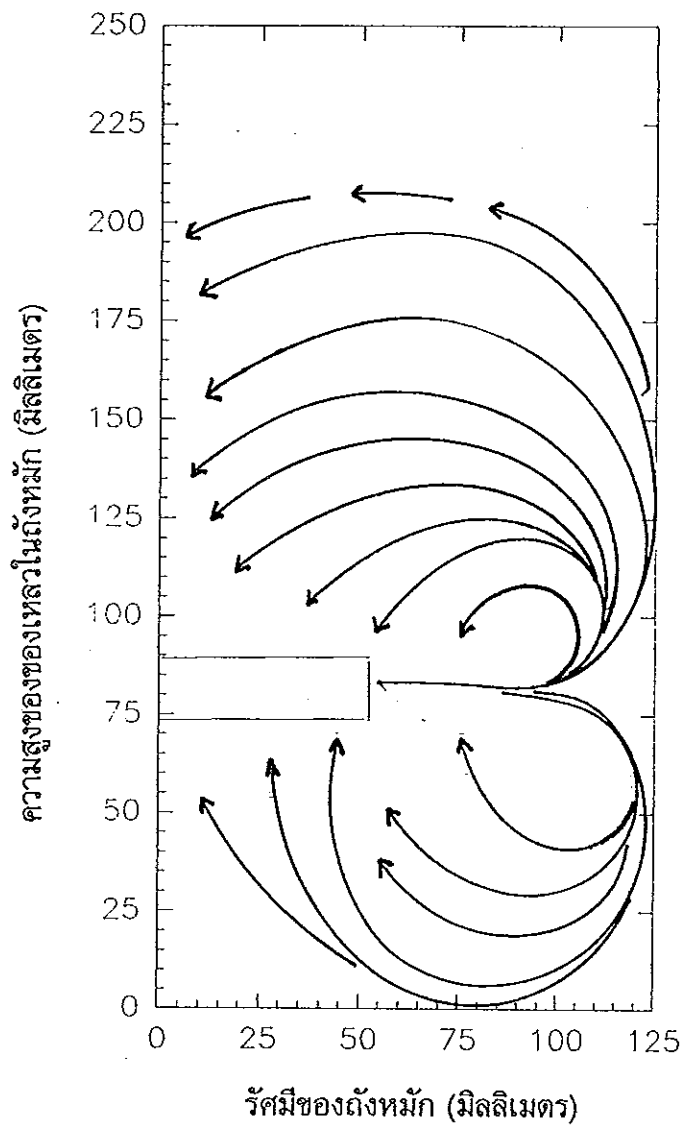
ภาพภาคผนวกที่ ค12 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



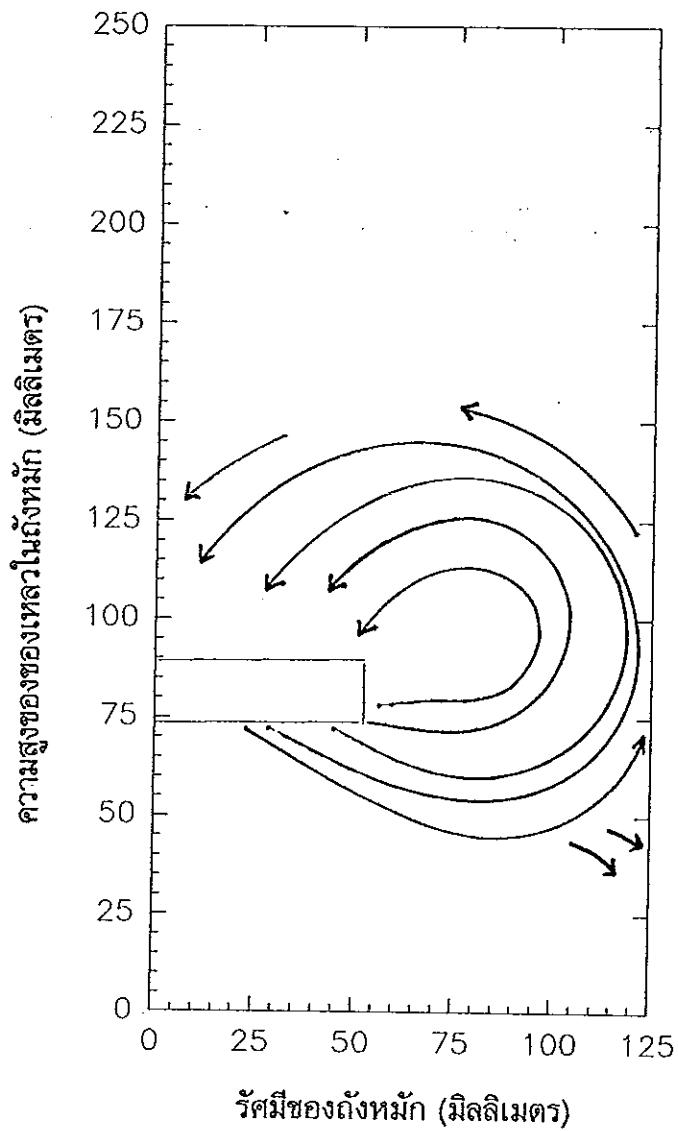
ภาพภาคผนวกที่ ค13 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



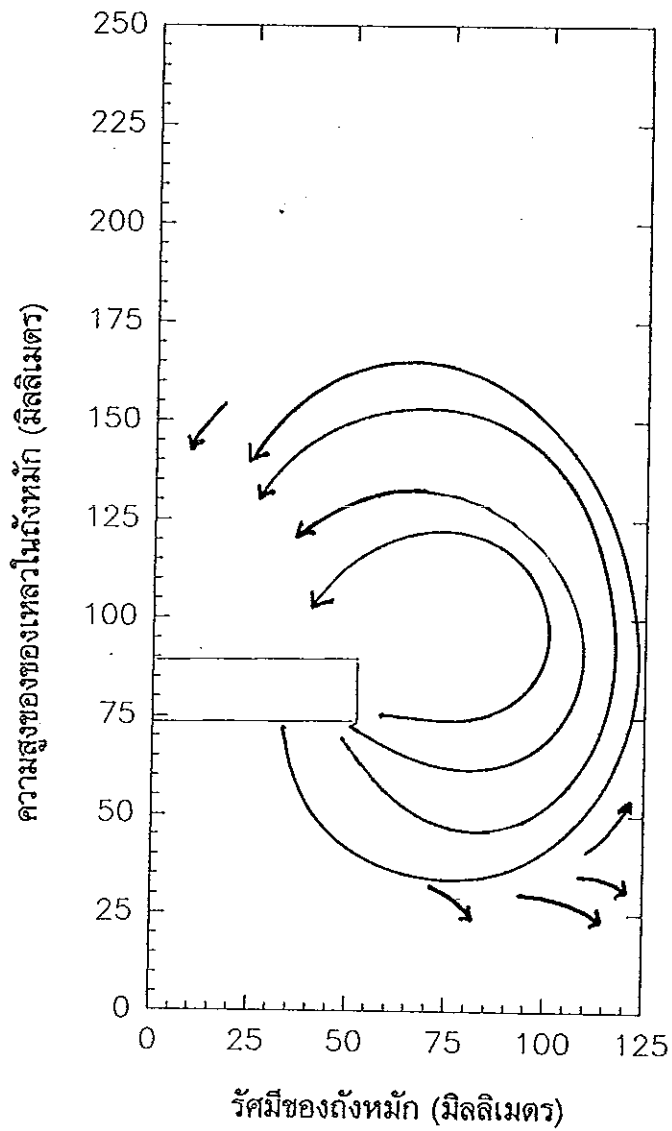
ภาพภาคผนวกที่ ค14 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการหมุน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



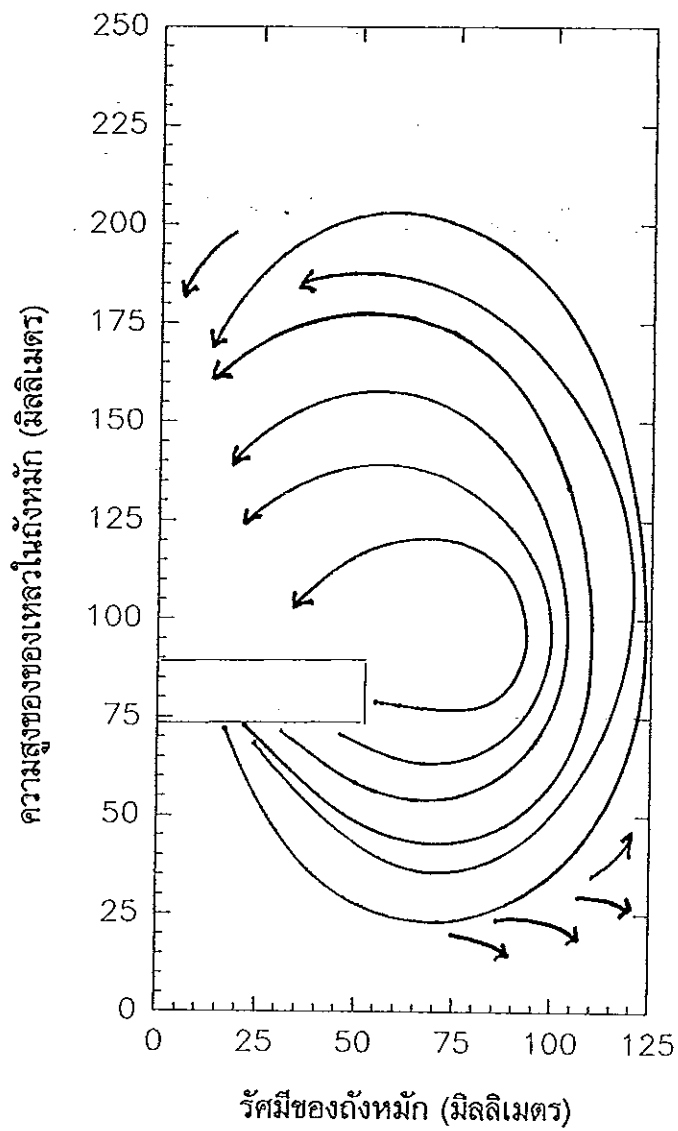
ภาพภาคผนวกที่ ค15 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Flat blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



ภาพภาคผนวกที่ ค16 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 2.5 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



ภาพภาคผนวกที่ ค17 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 4.166 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



ภาพภาคผนวกที่ ค18 รูปลักษณะการไหลสำหรับใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ความเร็วรอบในการกวน 5.833 รอบต่อวินาที ในสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย ภาณุมาศ บุญผดุง

วัน เดือน ปี เกิด 10 มกราคม 2516

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาสัตวศาสตร์)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (คณะเกษตรศาสตร์บางพระ)	2538

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการการศึกษา)

ทุนพัฒนาบุคลากรของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
(คณะเกษตรศาสตร์บางพระ)