



รีโอยีของสารละลายแซนแซนและผลของรูปแบบใบพัดต่อกำลังที่ใช้ในการผสม
ในถังปฏิกรณ์แบบกวน

Rheology of Xanthan Solution and the Effect of Impeller Types on Power
Consumption of Stirred - tank Reactors

ศุภราภรณ์ ปางนิติกรณ์

Supparaporn Pangnitikorn

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Biotechnology

Prince of Songkla University

๑ 2541

เลขหมู่	TP979.5.X3	๗/๕	2541	๑.๒
Bib Key	141810			

ชื่อวิทยานิพนธ์ รีโอ โลยี ของสารละลายเซนเซนและผลของรูปแบบใบพัดต่อกำลังที่ใช้ใน

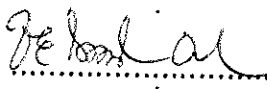
การผสมในถังปฏิกรณ์แบบกวน

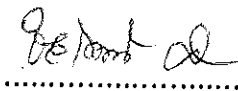
ผู้เขียน นางสาวศุภราภรณ์ ปางนิตกรณ์

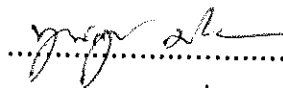
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

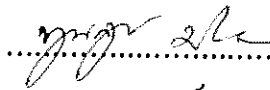
คณะกรรมการที่ปรึกษา

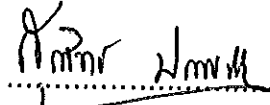
คณะกรรมการสอบ


.....ประธานกรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)

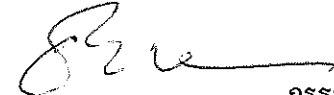

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ)

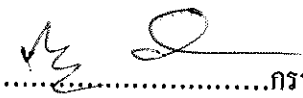

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ)

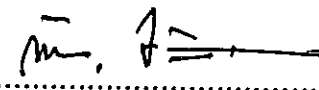

.....กรรมการ
(อาจารย์ สุรสิทธิ์ ประสารปราน)

...(ไปราชการต่างประเทศ)...กรรมการ
(อาจารย์ สุรสิทธิ์ ประสารปราน)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หันพงษ์กิตติกุล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ สันคินานาเลิศ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้าน จันท์พรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ รีโอโลยีของสารละลายแซนแรน และผลของรูปแบบใบพัดต่อกำลังที่ใช้ในการผสมในถังปฏิกรณ์แบบกวน
ผู้เขียน นางสาวศุภราภรณ์ ปางนิตกรณ
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ
ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของรูปแบบใบพัดต่อกำลังที่ใช้ในการผสมสารละลายแซนแรนในถังปฏิกรณ์ โดยศึกษาส่วนย่อยในลักษณะจำกัดให้มีอันตรกิริยาระหว่างแต่ละส่วนน้อยที่สุด

เริ่มจากการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลในส่วนย่อยของปัญหา เมื่อผลของปัจจัยต่อสิ่งต่างๆชัดเจน จึงเพิ่มความซับซ้อนที่ละชั้น โดยมีการศึกษาอย่างกว้างๆ คือ

ขั้นแรกแบ่งส่วนที่หมักโดยจุลินทรีย์โดยตรง ออกจากส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหมัก โดยใช้สารละลายแซนแรนกัมแทนบรอร์จริง ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลาย 0.07% เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ มีการพัฒนาเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยี (Rheological matching) และนำไปใช้เชื่อมโยงผลในการทดลองที่ได้จากของไหลจำลอง (model fluid) เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับบรอร์แซนแรน โดยเทียบเคียงค่า n , K และ G' พบว่าความเข้มข้นของบรอร์แซนแรนกัม (Siripattana (1992)) ส่วนใหญ่จะถูกเทียบเคียงกับค่าของสารละลายแซนแรนกัมสำเร็จที่มีค่าความเข้มข้นน้อยกว่า

ขั้นถัดมา นำสารละลายแซนแรนกัมสำเร็จหากำลังที่ใช้ในการผสมของถังปฏิกรณ์โดยใช้ใบกวน 2 แบบ คือ ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร และ 0.085 เมตร และใบกวนแบบพิตช์เบลตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร และ 0.085 เมตร โดยทดสอบจับคู่ใบกวน 6 แบบด้วยกัน พบว่าการใช้ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ขนาด 0.105 เมตร คู่กัน 2 ใบ ให้กำลังในการกวนสูงสุด และใบกวนแบบเทอร์ไบน์จะให้ค่าในการใช้กำลังสูงกว่าใบกวนแบบพิตช์เบลตประมาณ 2 เท่า ผลที่พบอีกอย่างหนึ่งก็คือ ยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดของใบกวนใหญ่ขึ้นจะให้ค่าการใช้กำลังสูงขึ้น และเมื่ออัตราเร็วรอบเพิ่มขึ้น เลขกำลังจะลดลง

Thesis Title Rheology of Xanthan Solution and the Effect of Impeller Types on Power Consumption of Stirred - tank Reactors

Author Miss Supparaporn Pangnitikorn

Major Program Biotechnology

Academic Year 1997

Abstract

Studies on the effect of impeller types on power consumption in mixing xanthan solution was carried out by the so called "the approaching of increasing complexity" which divided a whole problem into sub - problems and studied them by minimizing the interaction among the sub - problem steps.

The study started with the investigation of factors affecting the results of sub - problems. After a clear relation within a sub - problem was achieved, the complexity was increased systematically by the following steps.

Firstly, the fermentation - related part was separated from the nonfermentation - related part and the latter part was studied using the xanthan gum solution (instead of the actual broth) at the concentration 0.10, 0.25, 0.50 and 1.0% by weight mixed with 0.07% sodiumazide to prevent microbial growth. The development of rheology matching technique allows the compilation of result from experiment and result from model fluid experiment to be applied with xanthan broth by comparing the n , K and G' values. It was found that most of xanthan broth concentration was matched to xanthan gum solution of lower concentrations.

Secondly, the power consumption for mixing of xanthan gum solution of different concentrations in 2 types of blades was carried out. Turbine blades having diameters of 0.105 metre and 0.085 metre and pitch blades having diameters of 0.105 metre and 0.085 metre were used in the experiments. It was found that the combination of two 0.105 metre turbine blades consumed twice higher power than that of pitch blades. Another result showed that larger diameter of the blade, the higher power was consumed and when the speed increased the power consumption value decreased.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ชัยรัตน์ สิริพัชระ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย และแนวทางในการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคต่างๆที่พบตลอดการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. พูนสุข ประเสริฐสรรพ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ อาจารย์ สุรสิทธิ์ ประสารปธาน กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัยและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หันพงศ์กิตติคุณ กรรมการผู้แทนจากภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ตันตินานาเลิศ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเพื่อวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินการวิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ครูพรชัย ศรีไพบูลย์ ตลอดจนบุคลากรในคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆเพื่อให้การวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณอา คุณน้า พี่ๆ และน้องๆทุกคน ด้วยความเคารพอย่างสูงสุด ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจที่สำคัญที่สุดในการศึกษาตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกๆคน สำหรับกำลังใจที่มีค่า คำแนะนำ และการช่วยเหลือต่างๆตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จ สมบูรณ์ด้วยดี

สุภราภรณ์ ปางนิตกรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(11)
รายการตาราง.....	(13)
รายการภาพ.....	(14)

บทที่

I บทนำ.....	1
บทนำสั้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	1
พอลิเมอร์ชีวภาพจากจุลินทรีย์.....	1
รีโอ โลยีของบรอร์.....	3
สมบัติความหนืด.....	3
สมบัติวิสโคอิลาสติก.....	6
กรณีศึกษา - ในการผลิตแซนแรน.....	17
ความสำคัญของแซนแรนในอุตสาหกรรม.....	17
กระบวนการผลิตแซนแรน.....	18
ปัญหาในการหมักแซนแรน.....	19
ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแรน.....	21
ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์.....	21
ถังหมักแบบอากาศยก.....	22
ถังหมักแบบกวนที่ใช้ในการผลิตแซนแรน.....	23
ถังหมักสำหรับของไหลนอน - นิวโตเนียน :	
การเปรียบเทียบ.....	24
กำลังที่ใช้ในการกวนของใบพัดที่ใช้ในการผสม.....	26

	หน้า
วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น.....	33
ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis.....	33
แนวความคิดการเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นๆ.....	34
วัตถุประสงค์.....	38
2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ.....	39
วัสดุ.....	39
อุปกรณ์.....	39
วิธีการ.....	44
1. การศึกษาสมบัติทางรีโอ โลยีและการเทียบเคียงทางรีโอ โลยี	44
ของสารละลายแซนแทนกัน.....	44
1.1 การคัดเลือกสารยับยั้ง และพารามิเตอร์ในการศึกษาสมบัติทางรีโอ โลยี....	44
1.1.1 การทดสอบหาปริมาณสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ	
จุลินทรีย์เพื่อใช้ในการเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัน.....	44
1.1.2 การทดลองเพื่อหาค่าความเครียด (strain) ที่เหมาะสมที่สุดและ	
ย่านลิเนียร์วิส โคอีลาสติก.....	44
1.1.3 การคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัน.....	44
1.2 การศึกษาสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแทนกัน	
ที่เตรียมจากกัมสำเร็จ.....	44
1.2.1 การหาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแทนกัน	
มีค่าทางสมบัติทางรีโอ โลยีคงตัวและสม่ำเสมอ.....	45
1.2.2 ผลของอุณหภูมิ และเกลือต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยี	
ของสารละลายแซนแทนกัน.....	46
1.3 การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแทนกัน	
ที่เตรียมจากกัมสำเร็จกับบรอร์ที่ได้จากการหมักจริง	46
1.3.1 การศึกษาการทดสอบโดยการสั่น.....	46
1.3.1.1 สมบัติทางไดนามิกส์ (Dynamic property) ของน้ำหมัก	
แซนแทนและคุณลักษณะ โดยทั่วไป.....	46

	หน้า
ก. Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') กับ Frequency (ω).....	46
ข. ศึกษาค่า $G' - \omega$ โดยทั่วไป สำหรับบรอร์ที่เกิดจาก การหมักของแซนแรน.....	46
1.3.1.2 เปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์แซนแรนจริง กับสารละลายแซนแรนกัม.....	46
1.3.2 การศึกษาการทดสอบแบบเลื่อนเป็นวง.....	46
1.3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราการเฉือนของสารละลายแซนแรนกัม.....	46
1.3.2.2 การเทียบเคียงระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย แซนแรนกัมกับบรอร์จริงโดยพิจารณาจากค่า K และค่า n	46
1.3.2.3 การเทียบเคียงระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย แซนแรนกัมกับบรอร์จริงโดยพิจารณาจากค่า K , n และค่า C ที่เท่ากัน.....	46
2. การศึกษาการใช้กำลังในการกวน.....	47
2.1 เปรียบเทียบกำลังในการกวนของสารละลายแซนแรนกัมกับ ผลการทดลองของผู้วิจัยอื่น.....	47
2.2 เปรียบเทียบผลของความสูง ชนิด และขนาดของใบกวน ต่อการดูดกลืนกำลัง.....	47
2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรโนลด์ และค่า P_g/P_o	47
2.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อากาศ และค่า P_g/P_o	47
3 ผลและการวิจารณ์.....	49
1. ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี และการเทียบเคียงทางรีโอโลยี ของสารละลายแซนแรนกัม.....	49
1.1 ผลคัดเลือกสารยับยั้งและพาราไมเตอร์.....	49
1.1.1 ผลคัดเลือกสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับการเก็บรักษาสารละลายแซนแรนกัม.....	49
1.1.2 ผลการหาความเครียดที่เหมาะสมที่สุดและย่านวิสโคอีลาสติก.....	49

	หน้า
1.1.3 ผลการคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนที่เหมาะสม.....	50
1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแทนกัม.....	55
1.2.1 ผลการศึกษาหาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอ โลยี ของสารละลายแซนแทนกัมมีความคงตัวสม่ำเสมอ.....	55
1.2.2 ผลของอุณหภูมิ เกลือ ต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของ สารละลายแซนแทนกัม.....	55
1.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแทนกัม ที่เตรียมจากกัมสำเร็จ กับบรอร์ที่เกิดจากการหมักจริง.....	63
1.3.1 ผลการศึกษาโดยการทดสอบการสั่น (Oscillation (G' , G'' กับ ω))..	63
1.3.1.1 ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอ โลยี ของบรอร์ (Storage modulus (G') กับ frequency (ω)) ของแซนแทนจริง กับ สารละลายแซนแทนกัม (food grade).....	63
1.3.2 ผลการศึกษาโดยการทดสอบแบบเนียนเป็นวง (Rotation (K , n)).....	70
1.3.2.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราการเนียนของสารละลายแซนแทนกัม.....	70
1.3.2.2 ผลการเทียบเคียงระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย แซนแทนกัมกับบรอร์จริงโดยพิจารณาจากค่า K และค่า n	71
1.3.2.3 ผลการเทียบเคียงระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย แซนแทนกัมกับบรอร์จริงโดยพิจารณาจากค่า K , n และค่า C ที่เท่ากัน.....	71
2. ผลการศึกษาการใช้กำลังในการกวนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวน.....	76
2.1 ผลการเปรียบเทียบกำลังที่ใช้ในการกวนของของเหลว นอน - นิวโตเนียน.....	76
2.2 ผลของความสูง ชนิด และขนาดของใบกวนต่อการดูดกลืนกำลัง.....	76
2.3 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์ และค่า P_g/P_o	81
2.4 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการให้อากาศ และค่า P_g/P_o	81

	หน้า
4 สรุป.....	87
ข้อเสนอแนะ.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	99
ก การเตรียมสารละลายเซนเซนแก้มและการหาปริมาณความชื้น.....	99
ข การแปลงความเครียด (Strain) ในหน่วย rad หรือองศา (deg) เป็น % strain.....	100
ค การคำนวณหาเลขกำลัง (N_p) และเลขเร โนลด์ (N_{Re}).....	101
ง ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์ และเลขกำลังที่อัตราการให้อากาศ 0.07, 0.15, 0.30 และ 0.50 vvm ที่ระดับ 0.20, 0.25 และ 0.30 เมตร.....	102
จ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_g/P_0 และค่าเลขเร โนลด์ของใบกวนแบบ TP, TL, TS, PL และ PS ของสารละลายเซนเซนแก้มความเข้มข้น 0, 0.1, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	117
ฉ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศของใบกวนแบบ TT และ TP ของสารละลายเซนเซนแก้มความเข้มข้น 0, 0.1, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	134

ตัวย่อและสัญลักษณ์

D_s	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (มิลลิเมตร)
W	=	ความกว้างของใบพัด (มิลลิเมตร)
L	=	ความยาวของใบพัด (มิลลิเมตร)
E	=	ระยะห่างจากก้นถังถึงใบพัด (มิลลิเมตร)
H	=	ความสูงของสารละลายภายในถัง (มิลลิเมตร)
J	=	ความกว้างของตัวกีดกัน (มิลลิเมตร)
T_b	=	ความหนาของตัวกีดกัน (มิลลิเมตร)
T_{sh}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (มิลลิเมตร)
D_t	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกรณ์ (มิลลิเมตร)
G'	=	มอดูลัสสะสม (storage modulus (Pa หรือ Nm^3))
G''	=	มอดูลัสสูญเสีย (loss modulus (Pa หรือ Nm^3))
K	=	Consistency index
n	=	Plasticity or power law index
C	=	Elastic intensity index
PL	=	ใบพัดแบบ Pitched blade impeller
TL	=	ใบพัดแบบ Flat - blade impeller with center disk
TP	=	ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ และพิทเบลคคู่กัน
TT	=	ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตรคู่กัน
TS	=	ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร
PS	=	ใบพัดแบบพิทเบลค เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร
N_s	=	Aeration number
N_p	=	เลขกำลัง
N_{Re}	=	เลขเรโนลด์
τ	=	ค่าทอร์ค (N.m)
N	=	อัตราเร็วในการกวน (rpm)
ρ	=	ความหนาแน่นของสารละลาย (kg/m^3)
SPF,STR=	=	ถังปฏิกรณ์แบบกวน (stirred - tank fermentor of reactor)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

γ	=	ความเครียดเฉือน (shear strain)
γ°	=	ความเครียดเฉือนสูงสุด (maximum shear strain)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราการเฉือน คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (shear rate)(วินาที ⁻¹ , s ⁻¹)
η	=	ความหนืด (viscosity)(Pa.s)
η'	=	ความหนืดไดนามิกส์ (dynamic viscosity)(Pa.s)
η^*	=	ความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity)(Pa.s)
τ	=	แรงเค้นเฉือน (shear stress (Pa))
ω	=	พิสัยความถี่ (frequency)
P_g	=	กำลังในการกวนขณะที่ให้อากาศ (วัตต์)
P_o	=	กำลังในการกวนขณะที่ไม่ให้อากาศ (วัตต์)

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจัดวางตำแหน่งของใบกวน 6 รูปแบบ	48

รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กระบวนการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์ชนิดพอลิแซคคาไรด์ จากภายนอกเซลล์ (แซนแทรน และ อัลจิเนต).....	3
1.2 การจำแนกของไหลโดยอาศัยสมบัติทางด้านความหนืด.....	4
1.3 การไหลเลื่อนไดนามิกส์ในอุดมคติ.....	6
1.4 การไหลเลื่อนไดนามิกส์.....	7
1.5 แบบทั่วไปของกราฟ Storage modular กับ frequency ของบรอนแซนแทรน.....	12
1.6 แบบทั่วไปของกราฟ Storage modular กับ frequency และ Loss modular กับ frequency ที่แสดงจุดสิ้นสุดบริเวณเนิน (plateau zone) ที่ G' กับ G'' เท่ากัน.....	13
1.7 Storage modular กับ % strain ที่ความถี่ต่างๆกัน.....	14
1.8 Loss modular กับ % strain ที่ความถี่ต่างๆกัน.....	15
1.9 แบบทั่วไปของกราฟ Storage modular กับ frequency ที่ได้รับการทดสอบหลายชุด จากกะต่างๆ.....	16
1.10 ถังกวนที่มีบัพเฟิลและใบพัดแบบโพรเพลเตอร์พร้อมรูปแบบการไหล ในแนวแกน.....	27
1.11 รูปแบบของใบกวนที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ.....	27
1.12 รูปแบบของใบกวนที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ที่มีบัพเฟิล และใบกวน 6 ใบพร้อมงาน.....	29
1.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_p และ N_{Re} เป็นการหาความสัมพันธ์สำหรับ ใบกวนหลายชนิดและบัพเฟิลหลายตัว.....	31
1.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการหมักและ การแก้ปัญหาเป็นส่วนย่อย.....	36
2.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนที่สร้างขึ้นตามแบบ Siripattana เพื่อใช้ในการทดลอง.....	40
2.2 ชนิดและขนาดของใบกวนที่ใช้ในการกวนสารละลายแซนแทรนกัม.....	41
2.3 เครื่องมือวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี (HAAKE CV 20/cv20) พร้อมซอฟต์แวร์ควบคุม.....	43

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.4 เครื่องวัดค่าทอร์ค (motor controller) ที่ใช้หาค่ากำลังในการกวน.....	43
3.1 G' กับ % strain (rad) ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายแซนแซนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) : strain sweep 0.3 - 1 degree.....	51
3.2 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.0, 1.50 และ 2.0 โดยน้ำหนัก.....	52
3.3 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วันและ 6 เดือน.....	53
3.4 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก โดยการสุ่มตัด 3 บริเวณในถัง.....	55
3.5 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ ที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	56
3.6 ค่าเฉลี่ย η กับ shear rate ของสารละลายแซนแซนกับที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	57
3.7 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ ที่ใช้น้ำกลั่น + น้ำเกลือ และน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย.....	58
3.8 ค่าเฉลี่ย η กับ shear rate ของสารละลายแซนแซนกับ ที่ใช้น้ำกลั่น + น้ำเกลือ และน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย.....	59
3.9 G' กับ ω ของสารละลายแซนแซนกับ ที่เติมระดับเกลือร้อยละ โดยปริมาตรต่างๆกัน.....	60
3.10 ค่าเฉลี่ย η กับ shear rate ของสารละลายแซนแซนกับ ที่เติมระดับเกลือร้อยละ โดยปริมาตรต่างๆกัน.....	61
3.11 กราฟ $G' - \omega$ ของสารละลายแซนแซนกับ ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	62
3.12 การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอ โลยี ในส่วนของกราฟ $G' - \omega$	64

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.13 C (Elastic intensity index) กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมเปรียบเทียบกับบรอร์แซนแทนจริง.....	66
3.14 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัม กับความเข้มข้นของบรอร์แซนแทนจริง โดยพิจารณาจากค่า C.....	67
3.15 G'' กับ ω ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	68
3.16 G' และ G'' กับ ω ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	69
3.17 ข้อมูล τ กับ γ ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน.....	72
3.18 ข้อมูล τ กับ γ ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับบรอร์แซนแทนจริงในช่วงเวลาการหมักต่างๆ..	73
3.19 ค่าเฉลี่ย K, n กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัม เทียบกับ บรอร์แซนแทนจริง.....	74
3.20 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัม เทียบกับความเข้มข้นของ บรอร์แซนแทนจริง โดยพิจารณาจากค่า K, n และ C.....	75
3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์และเลขกำลังของไบพัดแบบเทอร์ไบน์ และพิทเบลด.....	77
3.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์และเลขกำลังของไบพัด 6 ชนิด ในสถานะที่ไม่มีอากาศ ที่ระดับ 0.20 เมตร.....	78
3.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์และเลขกำลังของไบพัด 6 ชนิด ในสถานะที่ไม่มีอากาศ ที่ระดับ 0.25 เมตร.....	79
3.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์และเลขกำลังของไบพัด 6 ชนิด ในสถานะที่ไม่มีอากาศ ที่ระดับ 0.30 เมตร.....	80

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และเลขเรโนลด์ของใบพัดแบบ TT.....	82
3.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศ ของสารละลายเซนแทรนกับความเร็วรอบละ 0 โดยน้ำหนัก.....	83
3.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศ ของสารละลายเซนแทรนกับความเร็วรอบละ 0.25 โดยน้ำหนัก.....	84
3.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศ ของสารละลายเซนแทรนกับความเร็วรอบละ 0.50 โดยน้ำหนัก.....	85
3.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศ ของสารละลายเซนแทรนกับความเร็วรอบละ 1.0 โดยน้ำหนัก.....	86

บทที่ 1

บทนำ

บทนำสั้นเรื่อง

แซนแทนกัม (Xanthan gum) เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้กันมากที่สุดในบรรดาพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากกัมอื่นๆ คือ มีลักษณะของซูโดพลาสติก (pseudoplastic) สูง ทำให้เกิดความรู้สึกขบเคี้ยวที่ดี ทำให้อาหารมีรสชาติกลมกล่อม และมีคุณสมบัติการไหลที่ดีเมื่อเติมแซนแทนกัม เป็นสารที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร

นอกจากนี้แซนแทนกัมยังใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเคมี ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้มีการนำแซนแทนกัมผสมกับของไหลที่ใช้ในการดึงน้ำมันออกจากบ่อน้ำมันที่มีน้ำมันเหลืออยู่น้อย จึงเป็นที่ต้องการของตลาดสูง ถึงแม้ว่าแซนแทนกัมจะมีราคาแพงเมื่อเทียบกับกัมชนิดอื่น ในการประยุกต์ใช้กัมหลายๆอย่างไม่สามารถใช้กัมอย่างอื่นแทนได้ เพราะต้องการคุณสมบัติพิเศษที่มีอยู่ในแซนแทนกัม แต่เนื่องจากมีปัญหาและความซับซ้อนในการหมักมีมาก และในแง่ของการผลิต ต้นทุนหลักในการผลิต คือ วัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงการใช้นำมันในการกวนและการเลือกแบบใบพัดที่เหมาะสมในการกวนใช้สารละลายแซนแทนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวน โดยศึกษาการเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นๆ คาดว่าผลการวิจัยนี้จะป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกสภาวะการหมักที่ใช้พลังงานต่ำสุด โดยไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมัก สำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม

ตรวจสอบเอกสาร

1. พอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์

แซนแทนกัมเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (polysaccharide) ที่ปลดปล่อยออกสู่ภายนอกเซลล์เชื้อ *Xanthomonas campestris*. (Kennedy and Brashaw, 1984) มีลักษณะเป็นของไหลนอน - นิวโตเนียน

พอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์อาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

ก) อินตราเซลล์ลาร์พอลิแซคคาไรด์ (Intracellular polysaccharides) ซึ่งเป็นกลไกในการเก็บกักแหล่งคาร์บอนและพลังงานสำหรับเซลล์

ข) พอลิแซคคาไรด์ที่เป็นโครงสร้าง (Structural polysaccharides) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างของเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น ลิพอพอลิแซคคาไรด์ (lipopolysaccharides)

ค) เอกโซพอลิแซคคาไรด์ (Exopolysaccharides) ซึ่งถูกปล่อยออกจากเซลล์เข้าไปสู่น้ำหมักหรืออาจจะเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ของพอลิแซคคาไรด์ภายนอกเซลล์ มีความสำคัญต่อมนุษย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก และสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย (Margaritis and Pace, 1985)

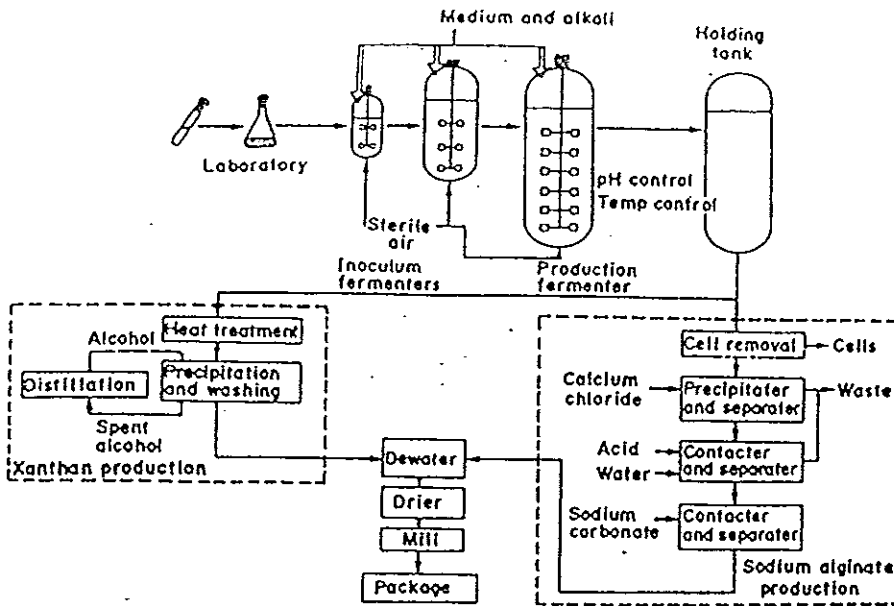
แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบหลายชนิด สำหรับบางชนิด และราบางชนิด สามารถผลิตพอลิแซคคาไรด์ พวกนี้ได้แก่ *Azotobacter vinelandii* (อัลจินต), *Alcaligenes faecalis* (เคอร์แลน), *Zymomonas mobilis* (ดีแวน), *Pseudomonas sp.*, *Sclerotium sp.* (สเคอโรกูแคน), *Xanthomonas campestris* (แซนแซน), *Leuconostoc mesenteroides* (เล็กซ์เตรน), *Aureobasidium pullulans* (พูลูแคน) และอื่นๆ (Margaritis and Zajic, 1978 ; Cottrell, 1980 และ Margaritis and Pace, 1985)

มีการนำพอลิแซคคาไรด์ภายนอกเซลล์ที่ได้จากจุลินทรีย์ไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งในอุตสาหกรรมเคมี, อาหารและยา เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ดี และเฉพาะตัว (unique) ของมัน จึงถูกใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล (gelling agent), สารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifiers), สารทำให้เกิดความคงตัว (stabilizers), สารยึดจับ (binders), สารทำให้ตกตะกอน (coagulant), สารหล่อลื่น (lubricants), สารทำให้เกิดฟิล์ม (film formers), สารเพิ่มความข้น (thickening agents) และสารทำให้กระจาย (suspending agents)

กรรมวิธีการผลิตเอกโซพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์มี 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

1. การเตรียมเชื้อ (culture preparation)
2. การหมัก (fermentation)
3. การเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ (recovery)

ปัญหาในระหว่างขั้นตอนการหมัก คือ บรอร์ซึ่งเริ่มจากของไหลนิวโคเนียนที่มีความหนืดต่ำ แล้วไปสิ้นสุดที่ของไหลนอน - นิวโคเนียนที่มีความหนืดสูงมาก ขณะที่ความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ภายนอกเซลล์เพิ่มขึ้นตามเวลา การเปลี่ยนแปลงทางรีโอโลยีจะมีอิทธิพลต่อลักษณะการผสม การถ่ายโอนความร้อน การถ่ายโอนมวลสารในการหมัก ดังนั้นการออกแบบถังหมักและการดำเนินการที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงทางรีโอโลยีของบรอร์



ภาพที่ 1.1 กระบวนการผลิตเอคโซเซลลูลาร์พอลิแซ็กคาไรด์จากจุลินทรีย์
(แซนแทนและอัลจินต)

ที่มา : Magaritis and Pace (1985)

2. รีโอโลยีของบรอร

2.1 สมบัติความหนืด (Viscous property)

ของไหลนิวโตเนียน (Newtonian fluid) คือ ของไหลที่มีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเฉือน (การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล) มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน

จากกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's viscosity law)

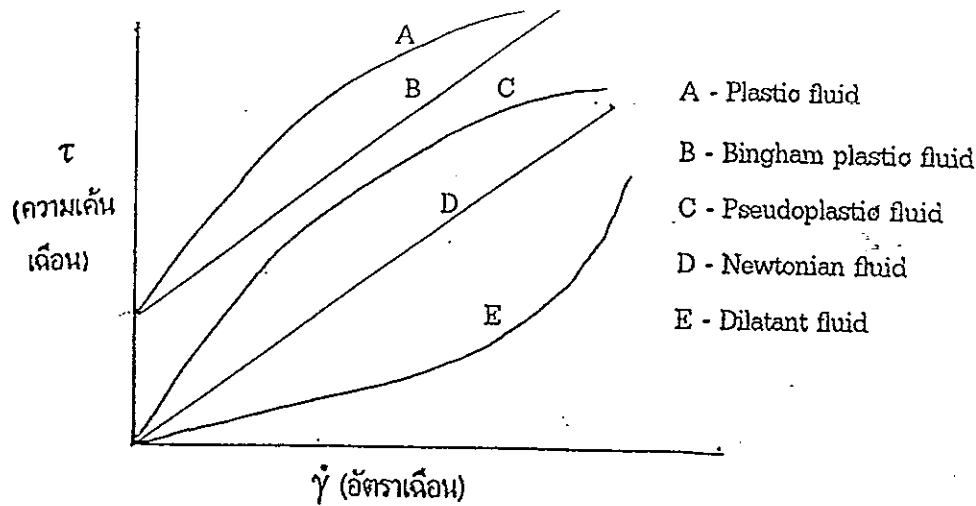
$$\tau = -\eta \left(\frac{dv}{dr} \right) \quad (1.1)$$

โดยที่ τ เป็น ความเค้นเฉือน (shear stress)

η เป็น ความหนืด มีค่าไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน

$\left(\frac{dv}{dr} \right)$ เป็น อัตราการเฉือน

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟ (ภาพที่ 1.2) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของผลการทดลองระหว่างค่า τ กับอัตราการเฉือน $-\left(\frac{dv}{dr} \right)$ สำหรับของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian) จะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และความชันของเส้นกราฟคือความหนืด (τ) ตัวอย่างของไหลนิวโตเนียน ได้แก่ น้ำ น้ำมันแร่ (mineral oils) น้ำมันดิน กากน้ำตาล (molasses) หรือยางมะตอย (bitumen)



ภาพที่ 1.2 การจำแนกของไหลโดยอาศัยสมบัติทางความหนืด
ที่มา : คัดแปลงจาก Schramm (1981)

ของไหลนอน - นิวโตเนียน (non - newtonian fluid) คือ ของไหลที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือน (ไม่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน) การเปลี่ยนแปลงความหนืดตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือนมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมในการดูดกลืนกำลังและการถ่ายโอนออกซิเจน

ของไหลนอน - นิวโตเนียน แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ของไหลที่ความหนืดคงที่ ไม่ผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน (time independent fluids)
2. ของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน (time dependent fluids)

ของไหลนอน - นิวโตเนียนอาจมีคุณสมบัติคล้ายกับยาง คือ มีความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา เรียกว่า ของไหลวิสโคอีลาสติก (viscoelastic fluids)

- ของไหลที่ความหนืดคงที่ไม่ผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน

ของไหลในกลุ่มนี้อาจแบ่งย่อยออกไปหลายชนิดตามความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนและความเค้นเฉือน ได้แก่

ก. ของไหลบิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic fluids)

เป็นของไหลที่มีความซับซ้อนทางรีโอ โลยี น้อยที่สุดถัดจากของไหลนิวโตเนียน ซึ่งแตกต่างจากของไหลนิวโตเนียน คือ จะมีจุดตัดแกน y ที่ τ_y (Yield stress) ในหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่ของไหลเริ่มไหล ของไหลชนิดนี้จะมีพฤติกรรมเหมือนของไหลนิวโตเนียน เมื่อความเค้นสูงเกินกว่าความเค้นเริ่มต้นนี้

ข. ของไหลพลาสติก (Plastic fluids)

ของไหลบางชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกับของไหลบิงแฮมพลาสติก แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนและความเค้นเฉือนไม่เป็นเส้นตรง เรียกว่า ของไหลพลาสติก ตัวอย่างของไหลชนิดนี้ ได้แก่ ซ็อกโกแลต น้ำมัน ลูบ ยาสีฟัน เนื้อเยื่อกระดูก หนืด เป็นต้น

ค. ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluids)

ของไหลนอน - นิวโตเนียนโดยทั่วไปจะจัดอยู่ในจำพวกนี้ ได้แก่ สารละลายพอลิเมอร์ น้ำมันมาของเนส ของไหลชีวภาพ (Biofluid) ลี เป็นต้น ของไหลพวกนี้จะมี ความหนืดลดลงเมื่ออัตราการเฉือนสูงขึ้น

จากสมการกฏยกกำลัง (Oswald - deWaele equation)

$$\tau = K (-dv/dr)^n \quad (1.2)$$

โดยที่ K เป็น consistency index ($N \cdot s^n/m^2$)

n เป็น flow behavior index (ไม่มีหน่วย)

ของไหลซูโดพลาสติก คือ ของไหลที่มีพฤติกรรมตามสมการ (1.2) โดยที่ n มีค่าน้อยกว่า 1 ในกรณีที่ n มีค่ามากกว่า 1 เรียกของไหลนั้นว่า "ของไหลไดเลแทน (dilatant fluid)"

Margaritis และ Bokkel (1984) ได้ศึกษา rheogram ของสารละลายแซนแรนและสารละลายเด็กซ์แครนน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสูง และสารละลายพอลิแซคคาไรด์อื่นๆ พบว่า พอลิแซคคาไรด์ภายนอกเซลล์ส่วนใหญ่มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฏยกกำลัง

- ของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน

ค. ของไหลธิโซโทรปิก (Thixotropic fluids)

ของไหลชนิดนี้มีลักษณะที่แรงเค้นเฉือนลดลงตามเวลาเมื่อเฉือนด้วยอัตราคงที่ พฤติกรรมนี้สามารถย้อนกลับได้ (reversible) นั่นคือ ถ้าหยุดการเฉือนสักระยะหนึ่ง ของไหลจะคืนสู่สภาพเดิมอีกครั้ง ของไหลพวกนี้ ได้แก่ สารละลายพอลิเมอร์ อาหารบางชนิด ลี สำหรับทฤษฎีของของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน ยังไม่ได้รับการพัฒนาให้สมบูรณ์เท่าที่ควร

ข. ของไหลรีโอเพคติก (Rheopectic fluid)

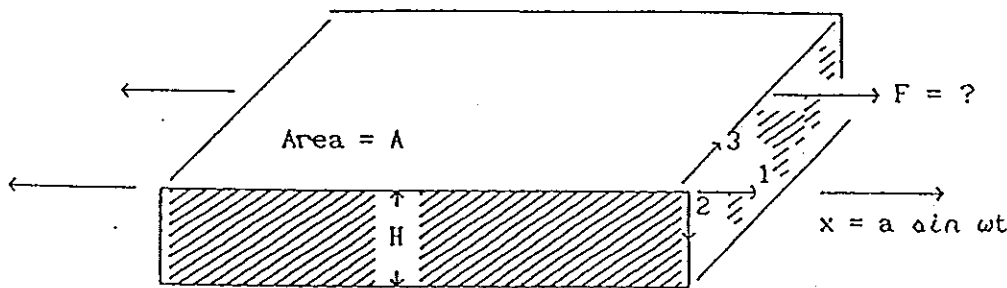
ของไหลชนิดนี้พบได้น้อยมาก มีลักษณะที่แรงเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นกับเวลาที่อัตราการเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ตัวอย่างเช่น bentonite clay suspensions

2.2 สมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic property)

สารละลายแซนแรนและพอลิเมอร์ซึ่งภาพส่วนมาก จัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า “วิสโคอีลาสติก (viscoelastic)” นั่นคือ สารละลายเหล่านี้นอกจากจะมีความหนืดซึ่งเป็นลักษณะของของเหลวแล้วยังมีความยืดหยุ่นคล้ายของแข็ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่า สารละลายเหล่านี้มีลักษณะความเป็นของเหลวและของแข็งในเวลาเดียวกัน

วิธีกำหนดมาตรฐานในการกำหนดลักษณะวิสโคอีลาสติก คือ การวัดสมบัติทางรีโอโลยี เมื่อมีการเฉือนไดนามิก (dynamic shear rheological properties) เป็นการวัดโหมดการเฉือนไดนามิกส์ (dynamic shearing mode) หรือการเฉือนสับทิศทาง ภาพที่ 1.3 เป็นภาพแสดงการเฉือนไดนามิกอุดมคติ (ideal dynamic apparatus) ในภาพจะเห็นว่าระนาบจะมีการเคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้า หรือมีการเคลื่อนที่ในรูปไซน์ในแนวแกน X (1 - direction) ด้วยแอมพลิจูด a (คือ เคลื่อนที่ได้ไกลเท่าใด) ที่ความถี่ ω (คือ เคลื่อนที่เร็วเท่าใด) ดังแสดงในภาพที่ 1.4 a ความเร็ว (U) คือ การเปลี่ยนแปลง หรืออนุพันธ์ของ x เทียบกับเวลา t

$$U = dx/dt = a\omega \cos\omega t \quad (1.3)$$



ภาพที่ 1.3 การไหลเฉือนไดนามิกในอุดมคติ (ideal dynamic shearing flow)

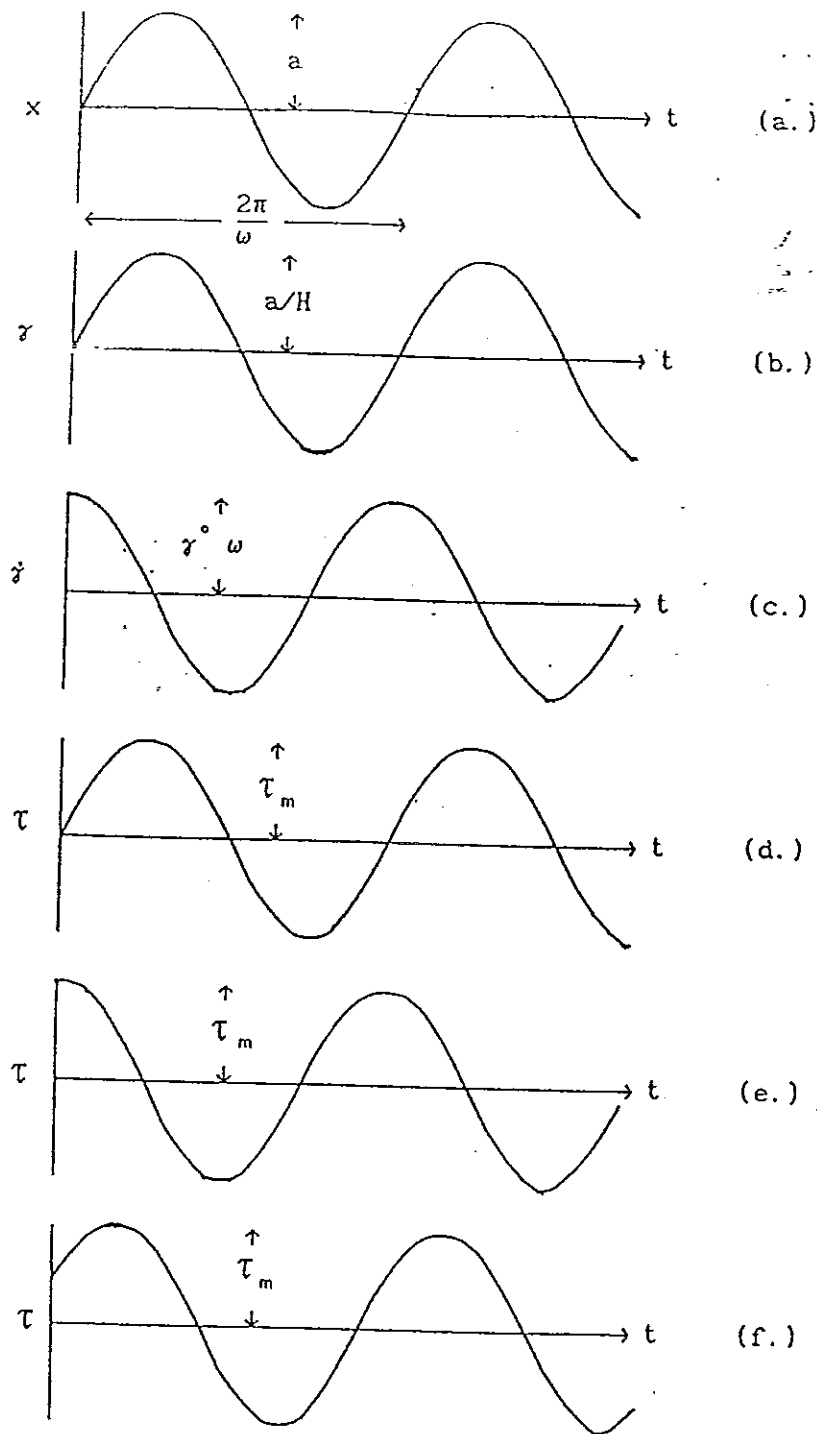
ที่มา : Mackay (1988)

กำหนดอัตราการเฉือนตามสมการ $\gamma = (U - 0)/H = U/H$ (ดูภาพที่ 1.3) จะได้

$$\gamma = (a/H) \omega \cos\omega t \quad (1.4a)$$

หรือ

$$\gamma = \gamma^0 \omega \cos\omega t \quad (1.4b)$$



ภาพที่ 1.4 การเฉือนไดนามิก (dynamic shear flow) (a) แสดงการกระจัด (displacement) ของแผ่นราบเทียบกับเวลา (b) ความเครียดเฉือน (shear strain) เทียบกับเวลา (c) อัตราเฉือนเทียบกับเวลา (d) อัตราเฉือนเทียบกับเวลาสำหรับของแข็ง (e) ความเค้นเฉือนเทียบกับเวลาสำหรับของไหลนิวโตเนียน (f) ความเค้นเฉือนเทียบกับเวลาของของไหลวิสโคอิลาสติก

ที่มา : Mackay (1988)

โดยที่ γ° เป็นความเครียดเฉือนสูงสุด (maximum shear strain) ที่กระทำต่อของไหลความเครียดเฉือน

H คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

a คือ ระนาบจะเคลื่อนที่ไปได้ไกลเท่าใด

γ เป็นฟังก์ชันกับเวลาและสัมพันธ์กับ X

โดย

$$\gamma = (X/H) = (a/H) \sin \omega t = \gamma^\circ \sin \omega t \quad (1.5)$$

γ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง γ เทียบกับเวลา แสดงการพล็อต γ และ $\dot{\gamma}$ เทียบกับเวลาได้ดังภาพที่ 1.4b และ 1.4c ตามลำดับ

ความเครียดเฉือนสูงสุด คือ ปริมาณซึ่งของไหลถูกทำให้เสียรูป (deform) และเป็นฟังก์ชันของ a (ระนาบจะเคลื่อนที่ไปได้ไกลเท่าใด) และ H (ระยะห่างระหว่างระนาบ) ถ้าระนาบล่างถูกทำให้เคลื่อนที่ไปได้ 1 เซนติเมตรแล้ว γ° จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือของไหลจะได้รับ (experience) ความเครียดร้อยละ 100 (100% strain) ค่าความเครียดเฉือนสูงสุดมีความสำคัญในการวัดรีโอโลยี

พิจารณาของแข็งที่วางอยู่ระหว่างระนาบดังภาพที่ 1.3 เมื่อระนาบด้านบนมีการเคลื่อนที่ที่ระนาบล่างก็จะมี การตอบสนองโดยการเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง แรงอยู่เฟสเดียวกันกับความเครียดเฉือน (หรือการเคลื่อนที่ X) ดังนั้น

$$F = F_m \sin \omega t \quad (1.6)$$

โดยที่ F_m คือ แรงสูงสุด สามารถหาแรงเค้นเฉือน (shear stress) จากนิยามในสมการ

$$\tau = (\tau / \gamma) (F \cdot H / A \cdot U) \quad (1.7)$$

จะได้

$$\tau = (F_m / A) \sin \omega t = \tau_m \sin \omega t \quad (1.8)$$

τ_m คือ แรงเค้นเฉือนสูงสุด

ตามที่แสดงในภาพที่ 1.4d ถ้าของไหลนิวโตเนียน เช่น น้ำ อยู่ระหว่างระนาบแรงจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามอัตราการเลื่อน เพราะว่าความหนืดคงที่ (เปรียบเทียบกับ $\tau = (F/A)$, $\eta = (\tau / \dot{\gamma}) = (F \cdot H / A \cdot U)$ และ $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}^0 \cos \omega t$ ในกรณีนี้ แรงจะมีเฟสที่ห่างจากความเครียดเลื่อนอยู่ 90 องศา ดังนั้น

$$F = F_M \cos \omega t \quad (1.9)$$

หรือ

$$\tau = (F_M / A) \cos \omega t = \tau_M \cos \omega t \quad (1.10a)$$

ซึ่งสามารถแสดงในภาพที่ 1.4e ของไหลบางชนิดแสดงพฤติกรรมอยู่ระหว่างของแข็งและของไหลนิวโตเนียน คือ มีทั้งความยืดหยุ่นและความหนืด ดังนั้น

$$\tau = \dot{\gamma}^0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (1.10b)$$

โดยที่ G' เป็น มอดุลัสสะสม (storage modulus) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-like behavior) และ G'' คือ มอดุลัสสูญเสีย (loss modulus) บอกถึงระดับความคล้ายของไหลนิวโตเนียน นอกจาก G' และ G'' แล้ว ยังมีปริมาณอื่นที่สำคัญทางรีโอโลยี ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\eta' = (G'' / \omega) \quad (1.11a)$$

$$\eta'' = (G' / \omega) \quad (1.11b)$$

และ

$$\eta^* = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} \quad (1.11c)$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (1.11d)$$

η' เป็น ความหนืดไดนามิก (dynamic viscosity)

η^* เป็น ความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity)

G^* เป็น มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)

$$\tan \delta = (G''/G') \quad (1.12)$$

สำหรับของแข็งแท้ ถ้า $\tan \delta$ หรือ δ เป็นศูนย์ และค่า δ จะเป็น 90 องศา สำหรับของไหลนิวโตเนียนแท้

Rocheftort และ Middleman (1987) ได้ศึกษามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของแซนแรนกัมเกรคอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือ ผงแห้ง (dried powder) และน้ำหมัก (fermentation broth) ในเรื่องของผลกระทบของเกลือ อุณหภูมิ และอัตราเลื่อน พบว่า G'' และ G' ของตัวอย่างผงแห้งนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นแซนแรนมากกว่า 2,000 ppm. แต่ความหนืดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของแซนแรนต่ำกว่านี้

G'' และ G' ตัวอย่างบรอร์ที่ได้จากการหมักไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักต่อการเพิ่มขึ้นของเกลือ (โดยเฉพาะสำหรับแซนแรนที่มีความเข้มข้นมากกว่า 2,000 ppm.) และยังคงระดับมอดูลัสไดนามิกที่สูงกว่าที่ความเข้มข้นแซนแรนต่ำในปริมาณเกลือที่สูง ตัวอย่างผงแห้งดูเหมือนจะมีน้ำหนักโมเลกุลปรากฏ (apparent molecular weight) สูงกว่า ดังที่ชี้ให้เห็นโดยค่ามอดูลัสที่สูงกว่า เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 2,000 ppm. ที่ความเข้มข้นเกิน 5,000 ppm. สารละลายแสดงพฤติกรรมคล้ายเจลและรีโอโลยีถูกควบคุมโดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล (intermolecular association) เมื่อโครงสร้างสารละลายถูกรบกวนโดยการเลื่อน หรืออุณหภูมิคุณสมบัติไดนามิกจะกลับสู่สภาพเดิมซ้ำ และไม่สมบูรณ์ในสภาวะที่มีเกลือต่ำ แต่จะเร็วและสมบูรณ์ในสภาวะที่มีเกลือสูง แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีระเบียบสมบูรณ์เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นเกลือ (NaCl) มากกว่า 10^{-2} โมลาร์

การศึกษาโดยการทดสอบโดยการสั่น (Oscillation (G', G'' กับ ω))

1) คุณสมบัติทางไดนามิกของน้ำหมักแซนแรน : คุณสมบัติโดยทั่วไป

1.1) Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') กับ Frequency (ω)

โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของแซนแรนสูงขึ้น ทั้ง G' และ G'' จะเพิ่มขึ้นแม้ความเข้มข้นของแซนแรนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นต่ำ ก็ส่งผลให้ G' และ G'' เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่พิสัยความถี่ต่ำ การเพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้จะชัดเจนน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของแซนแรนเพิ่มสูงขึ้น หรือ ω มีค่ามากขึ้น (ภาพที่ 1.5)

ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในสารละลายเจือจาง การสะสมพลังงานโดย elastic deformation ของ molecular chains มีค่ามากที่ความถี่ต่ำ การเลื่อน (translational motion) ของโมเลกุลเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมไหล และ G'' จะเด่น เพราะโมเลกุลยังไม่ถูกบีบไป โพลีเมอร์มีมากขึ้น พันธะโครงข่ายระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดการไหล และ G' เหนือกว่า G'' ที่ความถี่สูง

เมื่อความเข้มข้นของแซนแซนสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 1.5) การพันกันระหว่างโมเลกุลนั้นไม่มีเวลาเพียงพอที่จะแยกจากกันภายใน 1 คาบของการสั่น (oscillation) และพบว่า G' สูงขึ้น เมื่อพิสัยความถี่สูงมากๆ ซึ่งการเลื่อนเกิดขึ้นไม่ได้ (no longer possible) สารละลายจะแสดงพฤติกรรมคล้ายเจล G' มีค่าสูงกว่า G'' และ G' เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยต่อพิสัยความถี่ (Kokini and Pluthok, 1987)

สำหรับแซนแซนซึ่งเป็น crosslinkd polymer จะสังเกตเห็นบริเวณเนิน (plateau zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่ขนาดของ G'' เล็กกว่า G' (ภาพที่ 1.6) การปรากฏของบริเวณเนินบ่งชี้ถึงการเกิด entanglement coupling (Ferry, 1980) ที่ความถี่ต่ำกว่า ซึ่ง G' มีค่าเท่ากับ G'' ยังมีการพันกันรุนแรงมากกว่า ดังนั้นสารละลายจะแสดงลักษณะคล้ายของแข็ง (solid-like) มากกว่า ตัวอย่างที่ให้ไว้ในที่นี้ บริเวณเนินสิ้นสุดเมื่อ G' และ G'' มีค่าประมาณ 3 - 5 Pa

มีจุดน่าสนใจที่ว่าในช่วงการทดลอง Siripatana (1992) นั้น G' (ไม่ใช่ G'') ที่เปลี่ยนแปลงชัดเจน ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเสียรูป (deformation) ในภาพที่ 1.7 และภาพที่ 1.8 ขณะที่ G' เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความถี่เปลี่ยน แต่ G'' ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่หรือ ω ซึ่งก็ไม่น่าแปลกใจเพราะ G'' เกี่ยวข้องกับอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลโพลิเมอร์และสารละลายมากกว่า ขณะที่ G' เกี่ยวข้องอย่างมากกับความแข็ง (stiffness) ของโมเลกุลโพลิเมอร์ พอกับความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลโพลิเมอร์

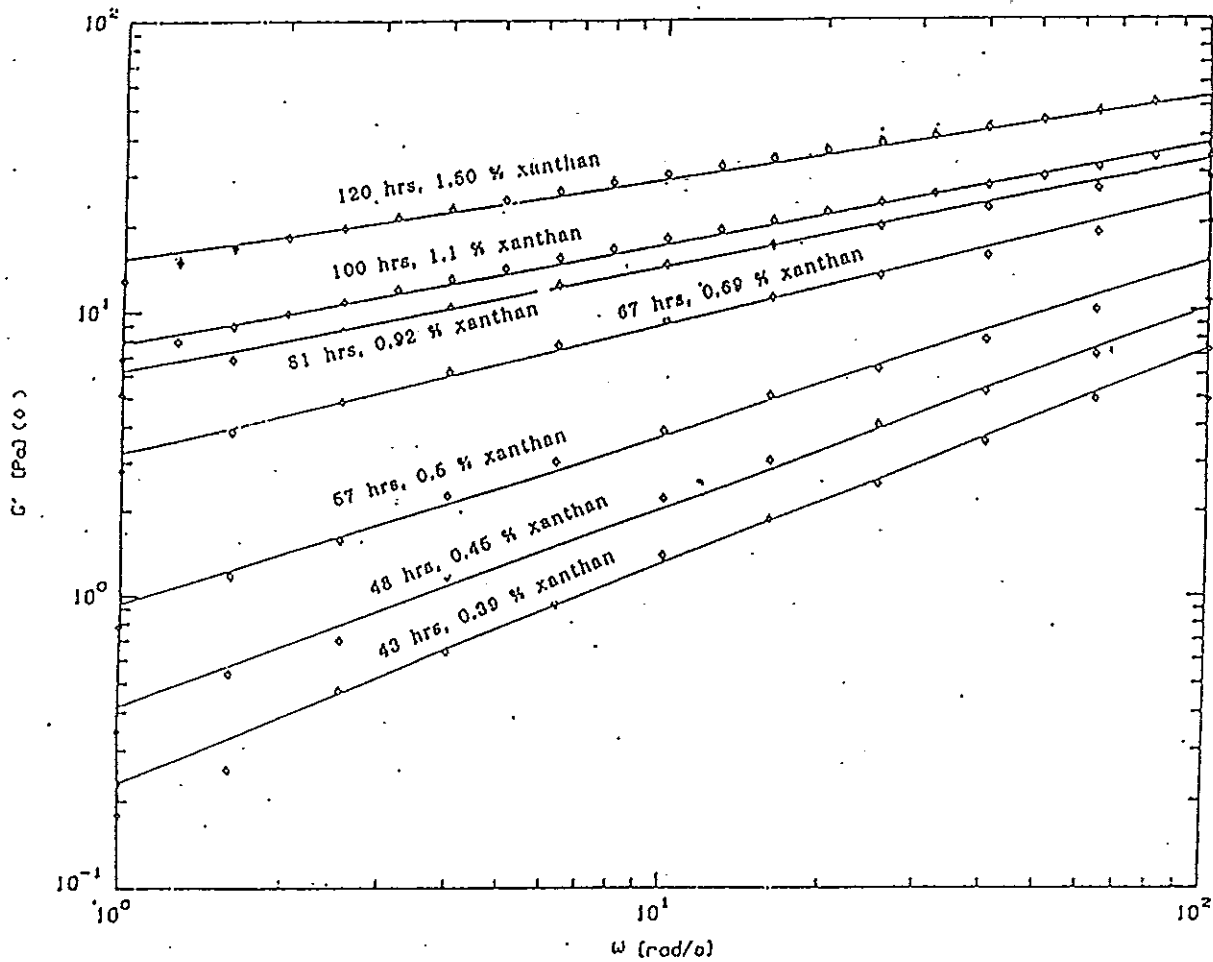
ด้วยเหตุดังกล่าว จึงมุ่งเน้นในการอภิปรายการเปลี่ยนแปลงของ G' เทียบกับปัจจัยอื่นๆ โดยไม่พิจารณาถึง G'' ควรตระหนักว่าในช่วงลิเนียร์วิสโคอีลาสติก (linear viscoelastic) นั้น G' , G'' , η^* และคุณสมบัติทางรีโอโลยีอื่นๆ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันโดย relaxation spectra ความจริงนี้เป็นที่ยอมรับกันสำหรับรีโอโลยีของโพลิเมอร์ ในระบบของไหลแซนแซน ความจริงดังกล่าวถูกอธิบายเหตุผลไว้โดย Thurston (1981a; 1981b) กล่าวอีกนัยหนึ่ง ข้อมูล G' ที่แสดงในที่นี้แฝงข้อมูลซึ่งเพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะวิสโคอีลาสติก (viscoelasticity) ของบรอร์

1.2) กราฟ $G'' - \omega$ โดยทั่วไป สำหรับบรอร์ที่เกิดจากการหมักแซนแซน

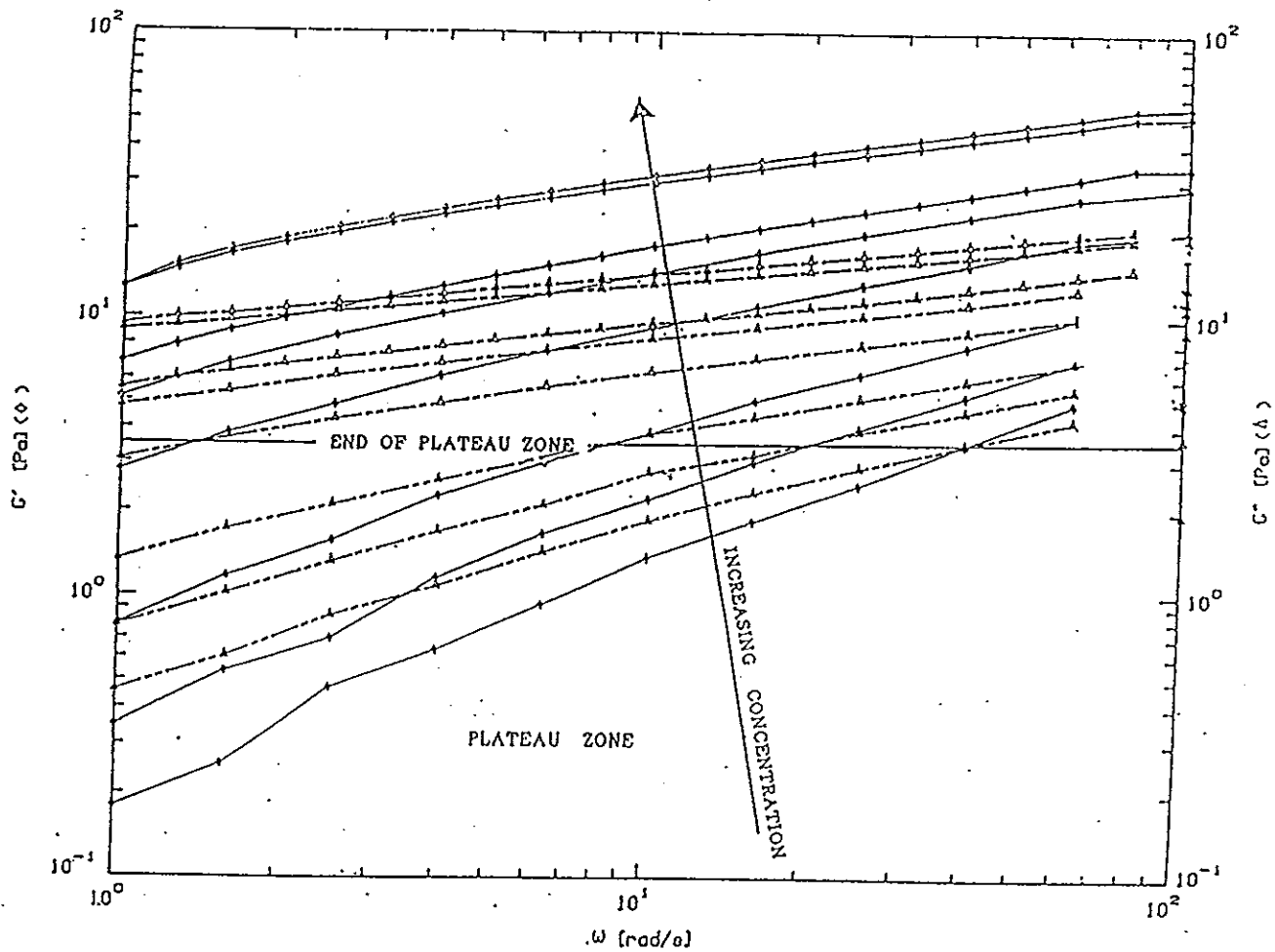
จากการเปรียบเทียบมากกว่า 10 ชุดของกราฟ $G' - \omega$ ซึ่งได้รับจากกะ (batch) การหมักต่างๆกันจะมีรูปร่างเหมือนกันในช่วง $10^{-1} - 10^2$ Pa ($1 < \omega < 100$ rad/s) (Siripattana, 1992)

กราฟ $G' - \omega$ ทั่วไปส่วนใหญ่มีแบบแผนที่ใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะ เป็นบรอร์จริงหรือที่ได้จากการละลายแซนแซนก็สำเร็จ (ภาพที่ 1.9) การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและกราฟ $G' - \omega$ ทั่วไปที่พิสัยที่สุด ซึ่งแปลงมาจากข้อมูลการทดลอง (ภาพที่ 1.5)

กระสวนของกราฟ $G' - \omega$ ทั้งหมดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการยกกำลัง ดังนี้

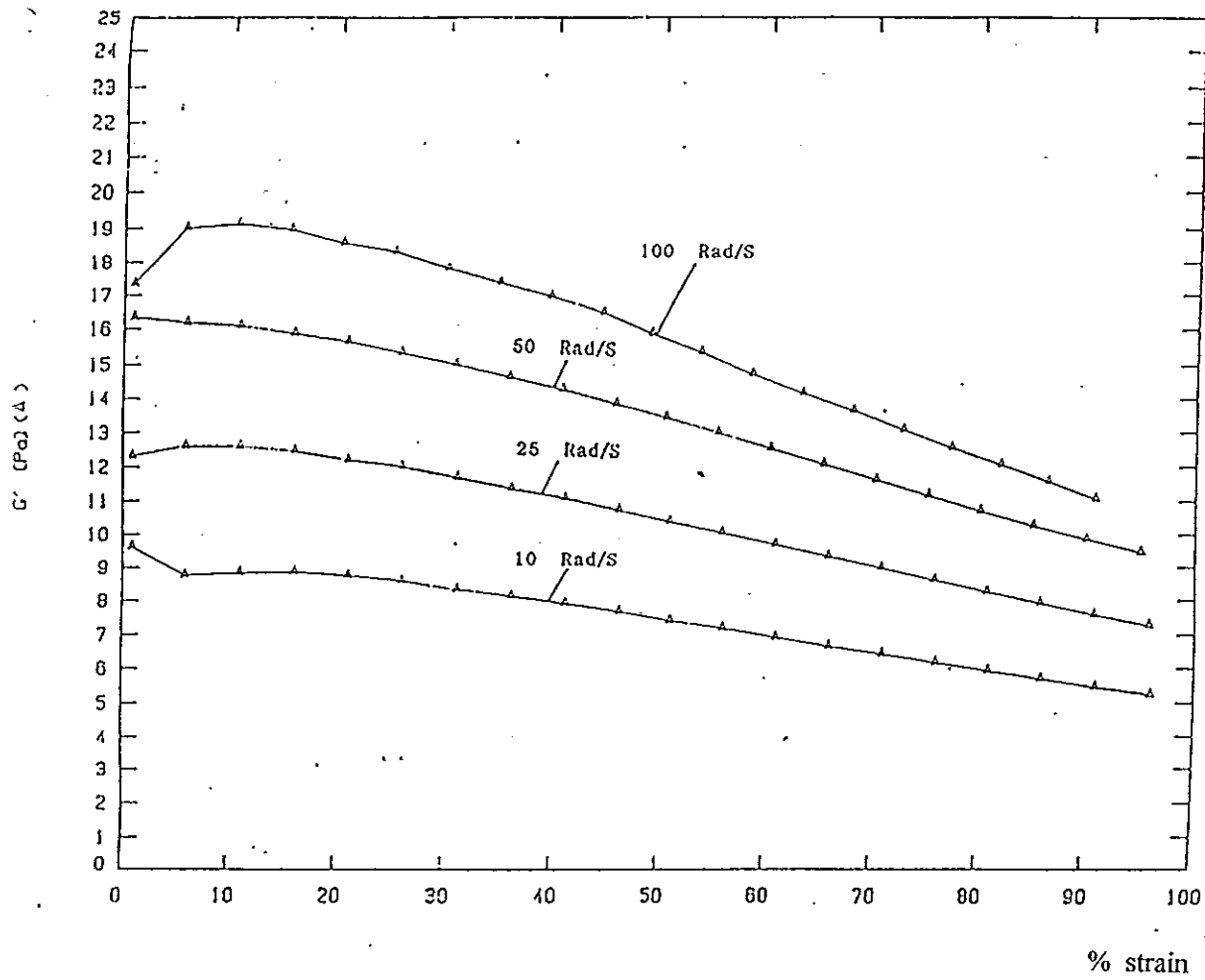


ภาพที่ 1.5 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ Storage modulus (G') กับ Frequency (ω)
 ของบรอร์แซนแซน (-) ตรงเส้นที่บ แสดงได้โดยการใ้การคำนวณจากสมการ 1.15
 ที่มา : Siripatana (1992)



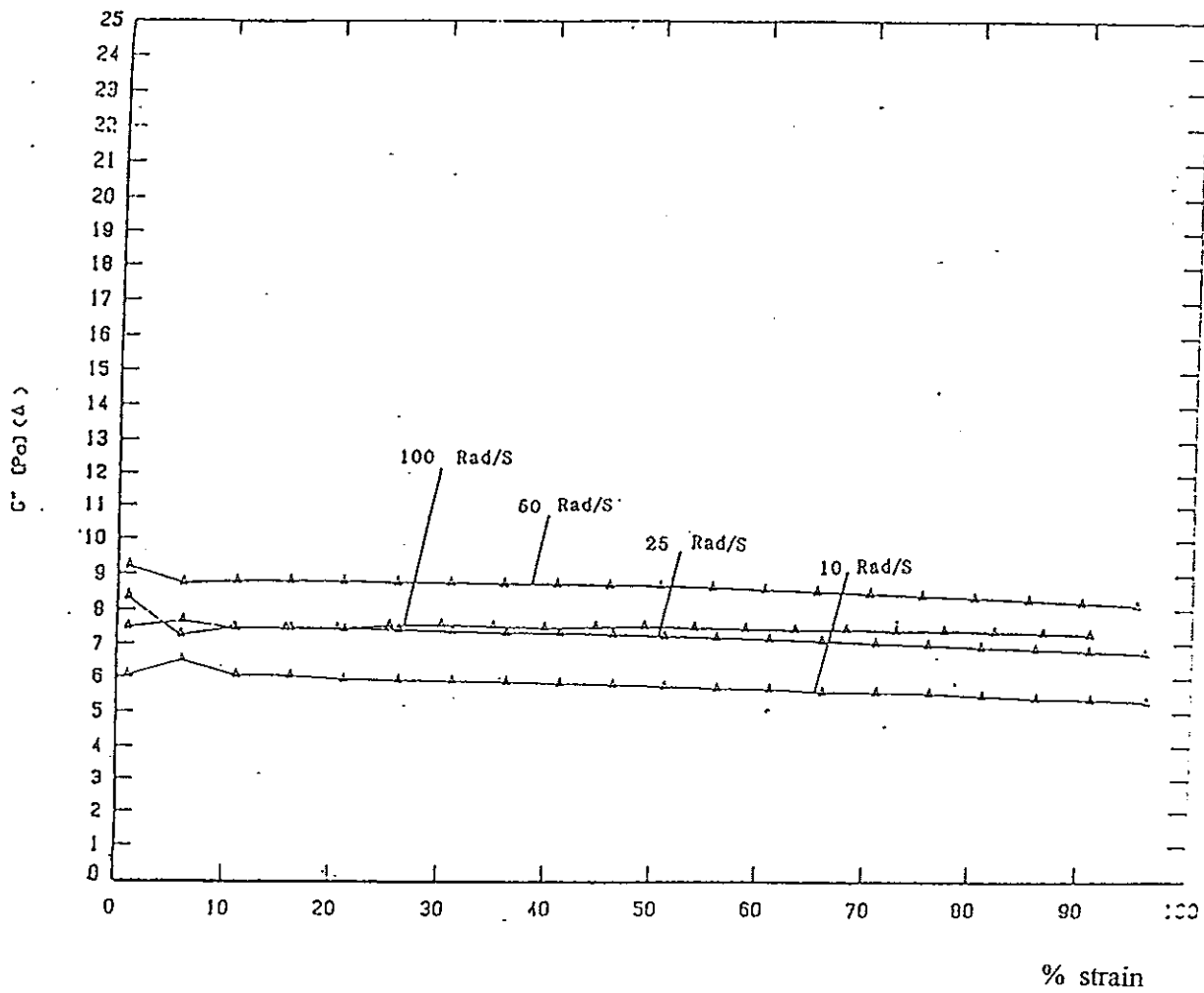
ภาพที่ 1.6 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ Storage modulus (G') กับ Frequency (ω) และ Loss modulus (G'') กับ Frequency (ω) ที่แสดงจุดสิ้นสุดบริเวณเนิน (plateau zone) ที่ G' เท่ากับ G'' (batch 6, UQM 1883)

ที่มา: Siripatana (1992)



ภาพที่ 1.7 Storage modulus (G') กับ %strain ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน (1.5% xanthan)

ที่มา: Siripatana (1992)



ภาพที่ 1.8 Loss modulus (G'') กับ %strain ที่ความถี่ต่างๆกัน (1.5% xanthan).

ที่มา: Siripatana (1992)

$$G' = C\omega^P \quad (1.13)$$

$$P = a \ln c + b \quad (1.14)$$

ซึ่งเป็นลักษณะทำนองเดียวกับ power law model ในการไหลแบบ steady shear flow C และ P หมายถึง Elastic Intensity Index และ Elasticity Index ตามลำดับ ซึ่งจะบอกว่า โครงสร้างของไหลเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อการเพิ่มของการเสียรูปเนื่องจากการสั่นที่รุนแรง 2 ตัวแปรดังกล่าว อธิบายเชิงเอมไพริคัล ถึงคุณลักษณะลิเนียร์วิสโคอีลาสติกของของไหล

ข้อมูลสำหรับบรอร์ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นเมื่อพล็อตระหว่าง เส้นโค้งของ $\ln C$ และ P ดังนั้น ข้อมูลเหล่านี้สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์เดียวกัน คือ

$$G' = C\omega^{(a \ln c + b)} \quad (1.15)$$

โดยที่ a และ b คือ พารามิเตอร์ที่บ่งว่า P ขึ้นอยู่กับ C อย่างไร ในข้อมูลชุดนี้ a และ b เป็นค่าคงที่ ($a = -0.1186$, $b = 0.5865$) สมการ 1.13 สามารถนำไปใช้สำหรับซีมิวเลชั่น สำหรับบรอร์ที่ได้จากสายพันธุ์ *X. campestris* ซึ่งถูกใช้ในงานนี้ เพราะ G' เปลี่ยนแปลงได้ง่ายต่อโครงสร้างทางเคมีของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงมีประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของบรอร์ที่เกิดจากการหมัก ขณะที่การหมักกำลังดำเนินอยู่

3. กรณีศึกษา - การผลิตแซนแทน

ของไหลนอน - นิวโตเนียน ที่เลือกใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ คือ สารละลายแซนแทนกัม ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือที่เรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ จัดเป็นเอกโซเซตูลาร์พอลิแซคคาไรด์ ที่เป็นอนุพันธ์ของการหมักด้วยเชื้อ *Xanthomonas campestris* (Kennedy and Bradshaw, 1984)

3.1 ความสำคัญและการใช้แซนแทนในทางอุตสาหกรรม

แซนแทนกัมถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ไอศกรีม และที่ไม่ใช่อาหาร เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้มข้น สารทำให้กระจาย สารทำให้เกิดความคงตัว และสารทำให้เกิดเจล ในแง่ความเป็นพิษและความปลอดภัย แซนแทนเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิแซคคาไรด์ที่มีการศึกษามากที่สุด เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกว่า สามารถใช้ผสมในอาหารได้ องค์การอาหารและยา (FDA) ได้อนุญาตการใช้แซนแทนกัมในผลิตภัณฑ์อาหารตั้งแต่ปี 1969 (Cottrell and Kang, 1978)

แซนแซนคัมเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้กันมากที่สุดในบรรดาพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์ ความสำเร็จทางการค้าเกิดจากคุณสมบัติที่มีประโยชน์และไม่เหมือนกับชนิดอื่น โดยสรุปคือ ความสามารถในการเกิดเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ที่อัตราการเขื่อนต่ำ มีความดันแตกหัก (yield stress) และมีความคงตัวในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นในช่วงกว้างและที่พีเอชและอุณหภูมิที่กว้าง (Cottrell and Kang, 1978 ; Kennedy and Bradshaw, 1984)

3.2 กระบวนการผลิตแซนแซน

จุลินทรีย์พวก *Xanthomonas* หลายชนิดสามารถสร้างพอลิแซคคาไรด์ในระหว่างการหมัก อย่างไรก็ตาม *X. campestris* ได้รับความสนใจมากที่สุด เพราะว่าเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตแซนแซนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Kennedy and Bradshaw, 1984)

ในการหมักแบบกะเริ่มคั้นโดยการเติมเชื้อ *X. campestris* การเตรียมหัวเชื้อ (inoculum) ประกอบด้วยการเลี้ยงเชื้อให้เจริญในหลายขั้นตอนและต้องมีการตรวจสอบว่าเชื้อดังกล่าวเจริญจริงก่อนที่จะเติมลงในอาหารเลี้ยงเชื้อในขั้นสุดท้าย ในกระบวนการทางการค้า เวลาที่จะขยายขนาดการเลี้ยงเชื้อในการผลิตหัวเชื้ออย่างเพียงพอ อาจจะต้องใช้เวลาหลายวัน หลังจากขั้นตอนนี้แล้วการหมักจะดำเนินต่อไปเป็นเวลา 48 - 96 ชั่วโมงภายใต้สภาวะปลอดจากเชื้ออื่น จนกระทั่งซับซ้อนอย่างใดอย่างหนึ่ง (ซึ่งปกติคือ คาร์โบไฮเดรต) ถูกใช้ไปจนหมด (Godet, 1973 ; Kennedy and Bradshaw, 1984)

แหล่งไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อมีความจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งรวมไปถึงเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของแหล่งคาร์บอนไปเป็นแซนแซน เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูง พบว่า บ่อยครั้งที่ไนโตรเจนที่เกินความต้องการทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างพอลิเมอร์ (Souw and Demain, 1979)

ตัวแปรทางกายภาพและเคมีหลายอย่างที่มีผลต่อการสร้างแซนแซนอย่างมาก ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ อัตราการให้อากาศ และการผสม ถ้าไม่มีการควบคุมพีเอช พีเอชจะมีค่าต่ำลงจนกระทั่งมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งหลังจากนั้นก็จะทำให้การสังเคราะห์แซนแซนเกิดขึ้นช้าลงอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องควบคุมให้พีเอชของอาหารตัวกลางมีค่าอยู่ที่ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือที่พีเอช 7 (Moraine and Rogovin, 1971) อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแซนแซนเป็น 28 องศาเซลเซียส (Moraine and Rogovin, 1966) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะทำให้ความหนืดของแซนแซนลดลง

Pace and Coote (1981) กล่าวว่า ความแตกต่างของความหนืดอาจเนื่องมาจากการผันแปรน้ำหนักโมเลกุลของแซนแซน (Kennedy and Bradshaw, 1984)

การสร้างแซนแทนมีความไวต่อข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนเป็นอย่างมาก (Robinson and Wang, 1988 ; Funahashi, *et al.*, 1987b และ Pons, *et al.*, 1990) การให้อากาศและการผสมเป็นปัญหาหลักในการผลิตแซนแทนเนื่องจากบรอร์มีคุณสมบัติเป็นนอน - นิวโคเนียนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

3.3 ปัญหาในการหมักแซนแทน

ในการหมักแซนแทนแบบกะ ความหนืดสัมฤทธิ์ (effective viscosity) ของน้ำหมักที่มีคุณสมบัติแบบนอน - นิวโคเนียน เพิ่มขึ้นเป็น 1,000 - 10,000 เท่าของความหนืดเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะมีการสะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพในน้ำหมัก จากนั้นเมื่อการหมักดำเนินต่อไป อัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ (specific xanthan production rate) ลดลงเนื่องจากการผลิตแซนแทนนั้นขึ้นอยู่กับการเจริญบางส่วน (partly growth - associated) (Weiss and Ollis, 1980) จึงคาดว่าแนวโน้มดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อเฟสที่เชื้อเจริญ (growth phase) สิ้นสุดลง การลดลงของอัตราการสร้างแซนแทนไม่ควรจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากเข้าสู่ stationary phase แล้ว อย่างไรก็ตามพบว่าหลังจากสิ้นสุดเฟสดังกล่าวไปแล้ว ผลผลิตจำเพาะ (specific productivity) ก็ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง Moraine and Rogovin (1973) ได้เสนอว่า ปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการนี้เกิดขึ้นด้วยเหตุผล 3 ประการ

1) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารเชิงปริมาตร $K_L a$ ลดลงเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นในของเหลวที่มีความหนืดสูง นอกจากนั้นฟองอากาศขนาดเล็กมีแนวโน้มอย่างมากในการรวมตัวกันกับฟองอื่นๆที่ลอยตัวอย่างอิสระ และทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรลดลง (DeNevers and Wu, 1971 ; Crabtree and Bridgewater, 1971 ; Narayanan, *et al.*, 1974) อย่างไรก็ตาม Ting (1975) และ Levan and Newman (1976) ได้เสนอว่า วิสโคอิลาสติซิตี (viscoelasticity) ทำให้ความเร็วปั่นปลาย (terminal velocity) และการหมุนเวียนภายในของฟองอากาศลดลง ซึ่งข้อเสนอนี้ได้รับการสนับสนุนจากข้อมูลบางส่วนจากการทดลองของ De Kee และคณะ (1990) การที่การหมุนเวียนภายในมีค่าน้อย อาจจะเป็นสาเหตุของการที่ $K_L a$ มีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความยืดหยุ่น (elasticity) ยังทำให้เวลาในการชนและการรวมตัวกันของฟองก๊าซเพิ่มขึ้น (Acharya and Ulbrecht, 1978)

ดังนั้นความยืดหยุ่นลดการรวมตัวของฟองก๊าซอย่างเห็นได้ชัด (De Kee, *et al.*, 1986) ผลรวมก็คือ การถ่ายโอนมวลสารจะดีขึ้นจากการที่ของเหลวมีคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (Zana and Leal, 1978) สำหรับในกรณีของบรอร์ที่เกิดจากการหมักแซนแทน ยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดว่า ปรากฏการณ์ที่สวนทางกันในแง่การส่งผ่านออกซิเจนของทั้งสองอย่างว่าอย่างไรนั้นมีความเด่นชัดมากกว่ากัน

Funahashi และคณะ (1987a) ศึกษาผลของอัตราการกวนและความเข้มข้นของออกซิเจน (oxygen tension) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารเชิงปริมาตร ($K_L a$) และอัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ (SPR) พบว่า SPR ลดลงเมื่อ $K_L a$ (หรืออัตราการกวน) ลดลง ถ้า $K_L a$ มีค่าน้อยกว่า $1.67 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ อย่างไรก็ตาม SPR ไม่ขึ้นอยู่กับ $K_L a$ และมีค่าคงที่ ตราบเท่าที่ $K_L a$ มากกว่า $1.67 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Peter และคณะ (1989) ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการกวนต่อการผลิตแซนแทนในถังหมักที่มีใบพัดเฟิลขนาด 10 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัดแบบอินเตอร์มิก (intermig impeller) ($d/D = 0.63$) ใช้อัตราเร็วในการกวน 200 - 800 รอบต่อนาที พบว่า การเจริญเติบโตจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วเมื่อความเร็วรอบต่ำกว่า 200 รอบต่อนาทีเท่านั้นเนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ ที่ความเร็วในการกวนสูงกว่า 200 รอบต่อนาทีไม่พบว่าอัตราการเจริญจำเพาะขึ้นอยู่กับความเร็วในการกวนแต่อย่างใด และพบว่าความเข้มข้นของแซนแทนที่ได้ในผลิตภัณฑ์หลังจากการหมัก 90 ชั่วโมงมีความแตกต่างกันอย่างมาก ยิ่งใช้อัตราเร็วในการกวนเพิ่มขึ้นมากเท่าไร ระยะเวลาที่ออกซิเจนเป็นข้อจำกัดจะยิ่งนานขึ้นเท่านั้น คือ จะทำให้สามารถให้อากาศเกิดการผสมและการถ่ายโอนมวลสารกับสารละลายที่มีความเข้มข้นมากได้ใช้เวลานานขึ้นกว่าจะเกิดปัญหา ดังนั้นในช่วงอัตราเร็ว 200-800 รอบต่อนาที ยิ่งเราใช้อัตราเร็วในการกวนสูงขึ้น ความเข้มข้นของแซนแทนในบรอร์ที่เวลาหลังจาก 90 ชั่วโมงยิ่งสูงขึ้น

2) ชั้นเมือกที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นรอบๆเซลล์และเป็นตัวกีดกันการแพร่ของสารอาหาร ซึ่ง Moraine และ Rogovin (1973) เป็นผู้ให้ความเห็นว่า อันนี้เป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งที่ทำให้การถ่ายโอนสารอาหารช้าลง Funahashi และคณะ (1987b) พบว่า SPR และอัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเลื่อน และขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือนเป็นหลัก ผลอันนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนและกลูโคสจากอาหารตัวกลางไปยังเซลล์ (ด้วยการที่มีชั้นเมือกห่อหุ้ม) และอัตราการสร้างแซนแทนก็อาจถูกจำกัดเมื่อความเค้นเฉือนที่มีค่ามากกว่า 40 ปาสคาล

Peters และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาถึงการมีอยู่ของชั้นเมือกอย่างมีระบบ เพื่อที่จะแบ่งแยกผลทางไฮโดรไดนามิกส์อันเนื่องมาจากอัตราเร็วของการกวน ต่อการมีอยู่ของชั้นเมือกออกจากผลอันเนื่องมาจากการถ่ายโอนมวลสาร การศึกษาใช้ทั้งอากาศปกติและอากาศที่ผสมออกซิเจนลงไป (oxygen enriched air) ในการเปรียบเทียบ พบว่า การหลีกเลี่ยงการขาดออกซิเจนโดยการกวนที่ความเร็วรอบสูง หรือโดยการเพิ่มความดันไอล้อยของออกซิเจนในเฟสก๊าซให้สูงขึ้น ให้ผลต่ออัตราการผลิตจำเพาะ (xanthan specific productivity) เหมือนๆกัน ผลการทดลองของเขาไม่ได้บ่งถึงผลใดๆของทางไฮโดรไดนามิกส์เนื่องจากการเพิ่มอัตราเร็วในการกวนต่ออัตราการผลิตแซนแทน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การทดลองบอกให้ทราบว่า ชั้นเมือกรอบเซลล์มีผลต่อ

อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนน้อย เพื่อที่จะยืนยันว่าข้อสรุปถูกต้อง ผู้วิจัยได้ตรวจสอบการมีอยู่ของชั้นเมือกโดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และพบว่าชั้นเมือกดังกล่าวมีจริง โดยพบในเซลล์ที่มาจากอาหารเพาะเชื้อ (agar plates) อย่างไรก็ตาม ชั้นเมือกดังกล่าวสามารถหลุดออกไปได้ง่ายเมื่อมีการเขย่าในสารละลายน้ำเบาๆ นอกจากนี้พบว่า ในตัวอย่างที่ได้จากถังหมักที่มีการกวนไม่มีอะไรที่จะบ่งบอกว่าจะมีชั้นเมือกที่มีความเข้มข้นสูงรอบผนังเซลล์

3) บรรทัดในระหว่างการหมักไม่มีการผสมกันดีพอ เป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนว่า ปัญหาการผสมในการผลิตแซนแทนเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่ข้อจำกัดของการถ่ายโอนของสารอาหาร (Moraine and Rogovin, 1973 ; Funahashi, *et al.*, 1987a, 1987b, 1988a, 1988b ; และ Solomon, 1981a, and 1981b)

Funahashi และคณะ (1987a) ได้ศึกษาการกระจายตัวของเวลาในการหมุนเวียน (circulation time) และปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (mixing region) ในถังกวนที่ประกอบด้วยสารละลายแซนแทนจนถึงระดับความเข้มข้นร้อยละ 4.6 พบว่าอาจจะแบ่งบริเวณในถังหมักออกเป็นสามส่วน คือ

ก) บริเวณที่มีการผสมในระดับไมโคร (micromixing region) บริเวณนี้การเคลื่อนที่ของของไหลในแนวรัศมีเป็นการเคลื่อนที่หลัก

ข) บริเวณที่มีการผสมในระดับมาโคร (macromixing region) เป็นบริเวณที่มีการไหลหมุนเวียนอย่างช้าๆ

ค) บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่ง (stagnant zone) ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่

หลังจากนั้น Funahashi และคณะ (1988b) ได้วิเคราะห์เรื่องราวที่เกี่ยวกับกลไก (mechanistic aspects) ของการผลิตแซนแทนในถังกวนอย่างละเอียด เขาได้แสดงให้เห็นว่า อัตราการผลิตแซนแทนสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยแบบทดลองเอ็มไพริคัล ที่ใช้ในการอธิบายบริเวณต่างๆที่เกิดการผสม และโดยการพิจารณาผลของอัตราความเค้นเฉือนต่ออัตราการผลิตแซนแทน จำเพาะ Nienow และผู้ร่วมวิจัย (1988) ได้ศึกษาปัญหาการผสมในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ใช้น้ำหมักจำลองแทนการหมักจริง

3.4 ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแทน

การจำแนกประเภทของถังปฏิกรณ์ชีวภาพนั้นมีหลายวิธี Schugerl (1982) ได้แบ่งถึงปฏิกรณ์ออกเป็นสามกลุ่มตามวิธีการให้พลังงาน คือ

1) กลุ่มที่มีกลไกเชิงกลที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่อยู่ภายใน (mechanically moved internal)

2) กลุ่มที่มีอุปกรณ์ทำให้ของไหลเกิดการไหลวนอยู่ภายนอก (external liquid pumping)

3) กลุ่มที่อาศัยหลักการอัดก๊าซ (gas compression)

นอกจากนี้เขาได้ให้ตัวอย่างของดังปฏิกรณ์จำนวนมากที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม การศึกษาเกี่ยวกับการผลิตแซนแทนกับส่วนใหญ่ ทำการทดลองโดยใช้ดังปฏิกรณ์กลุ่มแรก

3.4.1 ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ (Bubble column fermentor (BCF))

ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์จัดอยู่ในประเภทใช้หลักการอัดก๊าซ นับเป็นดังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการศึกษามากที่สุดในส่วนที่เกี่ยวข้องกับของไหลนอน - นิวโตเนียน (Godbole, *et al.*, 1982 ; Deckwer, 1985 ; Kawase and Moo-Young (1986a, 1986b, 1987b, 1990))

Deckwer (1985) ได้อธิบายช่วงการไหล (flow regime) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของก๊าซที่ความเร็วของก๊าซต่ำๆ (เช่น $U_0 < 5$ เซนติเมตรต่อวินาที) ขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวก่อนข้างจะมีความสม่ำเสมอ ช่วงนี้เรียกว่า การไหลแบบซูโคโฮโมจีนัส (pseudohomogeneous flow) ถ้าการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นเหนือจุดท่วม (flooding point) จะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ไม่สม่ำเสมอ ช่วงนี้เรียกว่า การไหลแบบเฮเทอโรจีนัส (heterogeneous flow) การไหลแบบนี้พื้นที่ผิวจำเพาะ (พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร) จะลดลง ทำให้การถ่ายโอนมวลสารมีประสิทธิภาพลดลง ถ้าดังปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ขนาดฟองอากาศจะใหญ่ขึ้น ฟองอากาศเหล่านี้มีความคงตัวสูง ทำให้เกิดเป็นชั้นของก๊าซที่เคลื่อนที่ เรียกว่า slug ในกรณีของเหลวมีความหนืดต่ำ slug flow เกิดขึ้นเฉพาะกรณีถังหมักแบบหอคอย (tower reactor) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีของน้ำหมักที่มีความหนืดสูง ทั้งที่เป็นพวกนิวโตเนียนและนอน - นิวโตเนียน อาจเกิด bubble slug ถึงแม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมักจะมีขนาดได้ถึง 30 เซนติเมตร นอกจากนั้นอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความหนืดสูง อาจจะมีฟองอากาศขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าความเร็วของก๊าซอาจจะน้อยกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที (Deckwer, 1985)

ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาบางประการ บับเบิลคอลัมน์อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหมักสำหรับระบบที่เป็นนอน - นิวโตเนียน ในอนาคตอันใกล้นี้

3.4.2 ถังหมักแบบอากาศยก (Air-lift fermentor (ALF))

ได้มีการตีพิมพ์ผลการทดลองประยุกต์ใช้ถังหมักแบบอากาศยกกับของไหลนอน - นิวโตเนียน Field และคณะ (1984) และ Young และคณะ (1987) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ของถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน พบว่า มีการเกิดการรวมตัวของฟองอากาศใกล้ตัวกับตัวกระจายอากาศ (sparger) ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของแซนแทนจะต่ำถึงร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ฟองอากาศขนาดเล็กบางส่วนที่ออกมาจากตัวกระจายอากาศซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005 เมตร จะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ใน

ช่วง 0.01 ถึง 0.02 เมตร เมื่อความเข้มข้นของแซนแรนเพิ่มขึ้นก็ยิ่งมีการรวมตัวกันของฟองมากขึ้น เมื่อทำการทดลองโดยใช้ถังหมักชนิดนี้กับสารละลายแซนแรนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าฟองก๊าซส่วนใหญ่รวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ ในบริเวณที่ใกล้กับตัวกระจายอากาศ ซึ่งฟองอากาศขนาดใหญ่เหล่านี้ลอยตัวขึ้นไปผ่าน riser โดยไม่มีการแตกเป็นฟองขนาดเล็ก และออกจากน้ำหมักไปอย่างรวดเร็ว

นอกเหนือจากการรวมตัวเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่แล้ว Young และคณะ (1987) ได้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งและการเกินโพมของของเหลว เมื่อมีความเข้มข้นของแซนแรนสูงขึ้นไปร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก ชั้นของของเหลวที่อยู่นิ่งเกิดขึ้นที่บริเวณผนังทางด้าน downcomer ของถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 เมตร เมื่อความเข้มข้นของแซนแรนสูงกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลทางด้าน riser ก็ลดลงอย่างมาก ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก มีการเกิดโพมที่มีลักษณะชุ่มฉ่ำสารละลาย มีความคงตัวสูง เกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิสระของของเหลว

Field และคณะ (1984) ได้ศึกษาการผสมในถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแรนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0 - 0.5 พบว่าไม่มีการเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง ในพิสัยความเข้มข้นดังกล่าว ถึงแม้ว่าความเร็วของของไหลจะลดลงอย่างมาก มีข้อเสนอแนะว่าอาจจะปรับปรุงความสามารถในการถ่ายโอนมวลสาร โดยการนำอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนของไหลเชิงกล (ใบพัด, บีบหมุนเวียน) เข้าช่วย

3.4.3 ถังหมักแบบกวนที่ใช้สำหรับการหมักแซนแรน

Pace และ Righelato (1980) ได้ให้คำแนะนำว่า การออกแบบถังหมักแซนแรนที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างหัวความเร็วของใบพัด (impeller velocity : head) ซึ่งควบคุมการเกิดฟองก๊าซแล้อัตราการไหลผ่านใบพัด (impeller flow) ซึ่งควบคุมการกระจายของฟองอากาศและความเป็นเนื้อเดียวกันของของเหลวตลอดทั่วทั้งถัง รวมทั้งอัตราการถ่ายโอนมวล

เป็นที่ยอมรับกันว่า ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่เป็นแผ่นตรงไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตแซนแรน (Johnson and Hubbard, 1974 ; Hubbard and Williams, 1977 ; Deckwer, *et al.*, 1985) โดยการใช้เทคนิคการมองภาพการไหล (flow visualization) Solomon และคณะ (1981b) พบว่ากำลังที่ควรใช้ในการผสมในถังกวนขนาดเล็กลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่เรียงตรงร่วมกับใบพัดแบบแผ่นเอียง (45 องศา) แทนที่จะใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์สองใบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Anderson และคณะ (1982) ซึ่งได้ใช้ใบพัดในทำนองเดียวกันสำหรับการหมักเชื้อราในถังกวน

นักวิจัยหลายกลุ่มได้ค้นหาวิธีการออกแบบใบพัด ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายโอนออกซิเจน เมื่อไม่นานมานี้มีการนำใบพัดแบบโปรเคมี (Prochem impeller) มาใช้ ซึ่งเป็นใบพัดในกลุ่มไฮโดรฟอยล์ ได้มีการยืนยันว่าใบพัดชนิดนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้ออกซิเจนได้ถึงร้อยละ 20 ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม และร้อยละ 30 - 40 ในถึงกวนขนาดเล็ก (Balmer, *et al.*, 1987 ; Eliczer, 1987)

Gbewonyo และคณะ (1987) ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายโอนออกซิเจนและการใช้พลังงานของใบพัดไฮโดรฟอยล์ (hydrofoil impellers) ในการหมักเชื้อราที่มีความหนืดสูง โดยใช้ถังหมักขนาด 800 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัดแบบโปรเคมี (Prochem impellers) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 14 นิ้ว พบว่าใบพัดแบบโปรเคมีสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานได้โดยใช้กำลังเพียงร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับที่ต้องใช้สำหรับใบพัดแบบรัชตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ($K_L a$) ที่ได้จากการใช้ใบพัดแบบโปรเคมีจะมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าที่ได้จากการใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์

Balmer และคณะ (1987) ได้ศึกษาถึงไฮโดรไดนามิกส์ของระบบก๊าซ - ของเหลวและการใช้พลังงานของเครื่องกวนแบบโปรเคมีและอินเตอร์มิกในของเหลวที่เป็นสารละลายน้ำและ CMC โดยการใช้ถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร จากการสังเกตพบว่า บริเวณที่เป็นการไหลปั่นป่วน เลขกำลัง (power number) ของใบพัดแบบโปรเคมีและอินเตอร์มิกมีค่าต่ำกว่าของรัชตันเทอร์ไบน์เมื่อเลขเรโนลด์เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วในการกวนบางช่วงของใบพัดทั้งสองชนิด ทำให้เกิดการตันและการไหลที่ขาดเสถียรภาพ

3.4.4 ถังหมักสำหรับของไหลนอน - นิวโตเนียน : การเปรียบเทียบ

แนวความคิดเกี่ยวกับการใช้ถังหมักเพื่อผลิตแซนแรนกับ มีด้วยกัน 2 แนวความคิด คือ มีนักวิศวกรรมส่วนใหญ่ยังเชื่อว่า ถังหมักแบบตั้งกวนมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารได้ดีในสภาวะที่ของเหลวมีความหนืดสูงๆ (Margaritis and Zajic, 1978 ; Pace and Righelato, 1980 ; Sittig, 1982) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bhavaraju และคณะ (1978) และ Henzler (1981) อย่างไรก็ตามยังมีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งซึ่งเป็นกลุ่มน้อย ได้พยายามหาดังปฏิกรณ์แบบอื่นที่ดีกว่า เช่น Dussap และ Gros (1985) ; Field และคณะ (1984), Stejskal และ Potucek (1985) และ Deckwer และคณะ (1990)

Dussap และ Gros (1985) ได้ศึกษาการผลิตแซนแรนในถังปฏิกรณ์แบบตั้งกวน (STF) ที่ให้อากาศ เปรียบเทียบกับแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ (BCF) ที่มีการหมุนเวียนภายนอก และถังปฏิกรณ์แบบแอร์ลิฟท์ (ALF) ที่มีข้อได้เปรียบทางด้านการถ่ายโอนออกซิเจน พบว่า ถังกวนแบบ STF ที่ใช้กับแซนแรนที่มีความเข้มข้นในช่วง 2 - 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การ

แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ำที่สุด และมีความจุในการถ่ายโอน (transfer capacity) เป็นหนึ่งในสามของถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ที่มีเวลาในการผสม (Mixing time) ที่ใกล้เคียงกัน

Schugerl (1981) ได้ศึกษาค่า $K_L a$ ภายในถังปฏิกรณ์แบบบับเบิ้ลคอลัมน์เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์แบบกวนโดยใช้สารละลาย CMC (carboxy methyl cellulose) ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 และ PAA ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 กำลังที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตร (P/V) ของถังปฏิกรณ์แบบกวนเท่ากับ 0.5 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับบับเบิ้ลคอลัมน์ พบว่า ค่า $K_L a$ ถังบับเบิ้ลคอลัมน์จะมีค่าสูงกว่า สรุปได้ว่า ตลอดช่วงของความหนืดที่ไม่สูงมากนัก (น้อยกว่า 1 Pa.s) การให้อากาศโดยใช้บับเบิ้ลคอลัมน์ (BCF) จะประหยัดกว่า

Deckwer และคณะ (1990) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ *X.campestris* ในถังกวนขนาด 70 - 1,500 ลิตร โดยใช้ Rushton turbines และใบกวนชนิด Intermig impeller ทำการเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์แบบบับเบิ้ลคอลัมน์ขนาด 50 ลิตร และถังหมักแบบอากาศยกที่มีท่อครีฟ (draft tube) ขนาด 800 ลิตร พบว่า ในถังหมักแบบถังกวนที่มีความเข้มข้นของ - แชนแชนสูงเกินกว่าร้อยละ 2 จะเกิดเป็นบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง (stagnant zones) ส่วนถังหมักบับเบิ้ลคอลัมน์และถังหมักแบบอากาศยก จะไม่เกิดเป็นบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง จนกระทั่งความเข้มข้นของ แชนแชนสูงเป็นร้อยละ 4.5 เพราะมีผลของสลักซ์ของก๊าซ (gas slug) จากการวิเคราะห์เหล่านี้ พบว่า ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์และถังหมักแบบอากาศยก มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงกว่าถังหมักแบบถังกวน และการใช้ใบกวนแบบ Rushton turbine ในถังหมักแบบถังกวนจะให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำสุด

Pons และคณะ (1990) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการหมักแชนแชนในถังกวนบับเบิ้ลคอลัมน์และถังหมักแบบกวน พบว่าความเข้มข้นของชีวมวลไม่ขึ้นกับชนิดของถังหมัก แต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่มี และพบว่าถังหมักบับเบิ้ลคอลัมน์มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำกว่า ต้องใช้เวลานานเป็นสองเท่า เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของแชนแชนที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามพบว่าลักษณะการถ่ายโอนในถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์มีความสม่ำเสมอกว่าในถังหมักแบบกวนที่ปรากฏว่ามีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้เสนอแนะว่า ควรเลือกใช้ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์เพราะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลดีกว่าถังหมักแบบอื่น ถังหมักแบบอากาศยกอาจเป็นถังหมักที่ดีกว่าในการผลิตแชนแชน แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาข้อมูลกันอย่างกว้างขวางเท่าที่ควร

การผลิตแชนแชนในอาหารเลี้ยงเชื้อ (culture medium) เมื่อแชนแชนสะสมมากขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถของอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนลดลง จากการเลี้ยงในสภาวะที่มีอากาศจึงกลายเป็นสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัดในที่สุด ความหนืดที่เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการผสมไม่ดีพอ ในถังหมักแบบถังกวนสามารถสังเกตพบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งเมื่อห่าง

จากใบพัดออกไป (Schmid, 1984 ; Deckwer and Schumpe, 1989) ได้เปรียบเทียบถังหมักต่างชนิดกันในการผลิตแซนแรน ถึงกวนที่มีกังหันใบพัดแบบ Rushton และ Intermig ถึงกวนที่มีท่อครีฟและกังหันใบพัด Kaplan, บับเบิ้ลคอลัมน์ (BC) (50 ลิตร, เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15 เมตร) และแอร์ลิฟท์ (20 ลิตร, การวนรูปภายใน (internal loop) พบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง และการผสมไม่เพียงพอในถังหมักแบบแอร์ลิฟท์ จึงคาดว่าบับเบิ้ลคอลัมน์น่าจะเป็นถังหมักที่ดีและเหมาะสมสำหรับการหมักชนิดนี้

ในส่วนของผลที่ขัดแย้งจากขั้นต้น โดยการศึกษาลักษณะการผสม (mixing characteristics) ของสารละลาย carboxymethylcellulose ในน้ำซึ่งเป็นของไหลนอน - นิวโตเนียนที่มีความหนืดสูง ในถังหมัก 2 ชนิด คือ ECL - AL (external - circulation loop airlift) และบับเบิ้ลคอลัมน์ (BC) ได้แสดงให้เห็นว่า ECL - AL เป็นตัวผสม (mixer) ที่ดี หรืออาจจะดีกว่า บับเบิ้ลคอลัมน์ (Popovic and Robinson, 1992)

Kessler และคณะ (1993) ศึกษาการผลิตแซนแรนด้วย *Xanthomonas campestris*. ในถังหมักแบบ ECL - AL ได้ความเข้มข้นของแซนแรนเมื่อสิ้นสุดการหมักประมาณ 25 กรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาในการหมักทั้งสิ้น 49 ชั่วโมง ในแต่ละครั้งของการหมักพบว่า ช่วงที่ปริมาณออกซิเจนถึงขีดจำกัดเกิดขึ้นภายหลังจากการหมักผ่านไป 36 ชั่วโมง และความหนืดของแซนแรนที่ได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่มีการศึกษามาก่อนในถังปฏิกรณ์อื่นๆต่างชนิดกัน

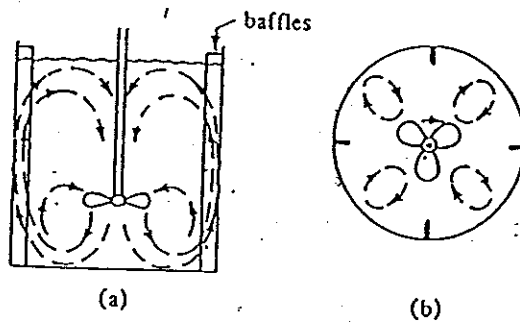
การออกแบบถังหมักแบบ ECL - AL ที่เหมาะสมสำหรับการหมักแซนแรน คือ ควรมีค่าอัตราส่วน A_D/A_B ค่อนข้างต่ำ แต่ค่า dispersion (or loop) height ค่อนข้างสูง และ orifice diameter ของตัวกระจายอากาศ (sparger) ต้องพอเหมาะที่จะทำให้ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้มีค่าน้อยที่สุด แต่ก็ต้องกันการกวาดกลับของบรธ (broth) กลับเข้าผ่านตัวกระจายอากาศ (sparger)

4. การศึกษาการใช้กำลังของใบพัดที่ใช้ในการผสม (Power Consumption of Mixing Impellers)

การประมาณกำลังเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการผสม กำลังที่ให้เพื่อการผสมและการถ่ายโอนมวลสาร การหมุนเวียนอย่างรุนแรงในการผสมภายในถังกวนจะทำให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง และมีการถ่ายโอนมวลสารที่ดี การกวนที่มีความรุนแรงจะช่วยให้บริเวณจุกอับมีการผสมที่ทั่วถึงมากขึ้น ในที่สุดพลังงานทั้งหมดที่ให้ในกระบวนการหมักจะเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้ต้องเพิ่มอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ ซึ่งทำให้ต้นทุนในการใช้พลังงานมีค่าสูงขึ้น

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวน

โดยทั่วไปของเหลวถูกกวนในถังหมักซึ่งสามารถปิดหรือเปิดเพื่อให้อากาศ ความสูงของของเหลวมีค่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก ใบพัดที่ได้ติดตั้งบนแกนที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อน (ภาพที่ 1.10) ใบกวนที่นิยมใช้ในถังหมักมีอยู่อย่างน้อย 4 ชนิด คือ

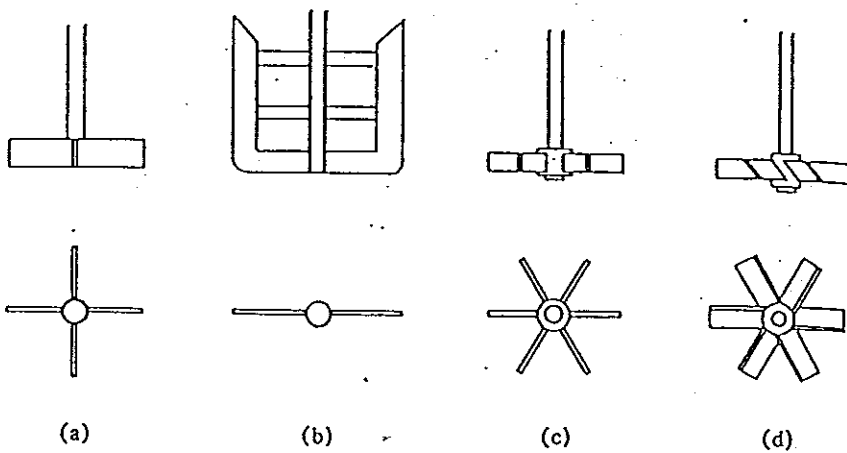


ภาพที่ 1.10 ถังกวนที่มีใบพัดและใบพัดแบบ โพรเพลเลอร์พร้อมรูปแบบการไหลในแนวแกน

(a) แสดงภาพด้านข้าง

(b) แสดงภาพด้านบน

ที่มา : Geankoplis (1993)



(a)

(b)

(c)

(d)

ภาพที่ 1.11 รูปแบบของใบกวนที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

(a) ใบกวนแบบ 4 ใบพัด

(b) ใบกวนแบบแองเคอร์ (anchor)

(c) ใบกวนแบบ 6 ใบ

(d) ใบกวนแบบเอียงทำมุม 45 องศา (pitch blade)

ที่มา : Geankoplis (1993)

1. ใบกวนแบบใบพัดเรือ 3 ใบ (Three - blade propeller) ใบพัดแบบสามใบมีลักษณะคล้ายแบบโพรเพลเลอร์ซึ่งใช้ในใบพัดเรือ (ภาพที่ 1.10) ใบพัดแบบนี้มีอัตราเร็วรอบได้ตั้งแต่ 400 ถึง 1,750 รอบต่อนาที ใช้ในของไหลที่มีความหนืดต่ำ ลักษณะของการไหลดังแสดงในภาพที่ 1.10 รูปแบบของการไหลของใบพัดเรียกว่า การไหลในแนวแกน (axial flow) โดยของไหลจะไหลลงจากใบพัดและขึ้นด้านบนทางด้านข้างของถังกวน

2. ใบกวนแบบแพคเคิล ใบพัดแบบแพคเคิลมีหลายชนิด นิยมใช้ที่ความเร็วรอบต่ำๆ ระหว่าง 20 - 200 รอบต่อนาที จะมีแบบ 2 ใบพัดและ 4 ใบพัด ที่นิยมใช้กันมากดังแสดงในภาพที่ 1.11(a) ความยาวของใบพัดมีค่าประมาณ $1/6$ ถึง $1/10$ ของความยาวใบพัด ใบพัดแบบแองเคอร์ (anchor) ซึ่งอยู่ในกลุ่มแบบดังแสดงในภาพที่ 1.11(b) ที่นิยมใช้กันมากในของเหลวที่มีความหนืด ซึ่งใบพัดจะกวาดและครูดที่ผนังของถังหมักและบางครั้งในส่วนของก้นถังหมักจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนไปที่ผนัง ใบพัดชนิดนี้ผสมได้ไม่คีนักและมักใช้ในกระบวนการกวนแป้ง สี และเครื่องสำอางค์

3. ใบกวนแบบเทอร์ไบน์

เทอร์ไบน์ซึ่งมีใบกวนเป็นใบสั้น จะใช้ความเร็วรอบสูง และใช้สำหรับของเหลวในช่วงความหนืดกว้าง เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดปกติจะอยู่ในช่วงร้อยละ 30 - 50 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ปกติใบกวนแบบเทอร์ไบน์จะประกอบด้วยใบพัด 4 หรือ 6 ใบพัด ดังแสดงในภาพที่ 1.11(c) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงใบพัดแบบ 6 ใบพร้อมงาน ใบกวนแบบนี้จะให้ลักษณะของการไหลเป็นแบบในแนวรัศมี ดังแสดงในภาพที่ 1.12 จะสามารถกระจายอากาศได้ดี ซึ่งอากาศจะถูกนำมาจากข้างล่างของใบพัดและแกนของมัน และจะถูกเหวี่ยงกระจายตัวในใบพัดแบบพิทเชลด์ (pitch blade) แสดงในภาพที่ 1.11(d) โดยที่ใบพัดเอียงทำมุม 45 องศา จะมีลักษณะการไหลที่เป็นทั้งแนวแกนและแนวรัศมี โดยใบพัดชนิดนี้นิยมใช้ในการกวนของเหลวแขวนลอย

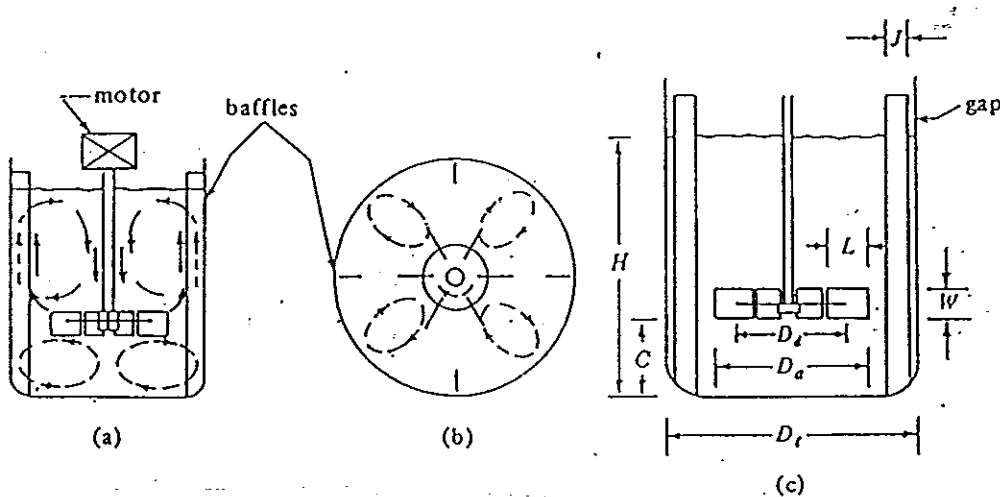
4. ใบกวนแบบเฮลิค - ริบบอน

ใบพัดชนิดนี้จะใช้กับสารละลายที่มีความหนืดสูงแต่มีความเร็วรอบต่ำ ในช่วงของการไหลแบบลามินาร์ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการผสม เพื่อทำให้เกิดการกระจายของฟองอากาศดังในกรณีการหมักจุลินทรีย์

การเลือกใบกวนและช่วงความหนืด

ความหนืดของของไหลจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเลือกชนิดของใบพัด ช่วงของความหนืดเป็นตัวบ่งชี้ถึงตัวกวน ใบพัดแบบเทอร์ไบน์จะถูกใช้ในช่วงความหนืดประมาณ 10,000 เซนติพอยต์ มีการปรับปรุงใบพัดแบบแองเคอร์ (anchor) สามารถใช้ในช่วง 50 - 500 ปาสกาล

(500,000 เซนติพอยต์) แบบเฮลิคัล (helical) และแบบริบบอน (ribbon) มักจะใช้ในช่วงประมาณ 1,000 ปาสคาล.วินาที



ภาพที่ 1.12 รูปแบบของการไหลในถังปฏิกรณ์ที่มีบัพเฟิลและใบกวน 6 ใบพร้อมงาน

(a) แสดงภาพด้านข้าง

(b) แสดงภาพด้านล่าง

(c) แสดงมิติของใบกวนและถังหมัก

ที่มา: Geankoplis (1993)

4.2 กำลังที่ใช้ในการกวน

ในการออกแบบถังหมัก ปัจจัยสำคัญในการหาค่ากำลังในการหมุนใบพัด ตั้งแต่การให้กำลังในระบบที่ไม่สามารถทำนายทางทฤษฎีได้ การหาสหสัมพันธ์สามารถนำมาใช้หาค่ากำลัง

สำหรับการหาสหสัมพันธ์ในการผสมและการกวนของของไหลนอน - นิวโตเนียน ค่าเลขกำลัง (N_p) จะหาได้จากสมการ (1.13)

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_s^5} \quad (1.16)$$

N_p คือ เลขยกกำลัง

P คือ ค่ากำลัง (จูลต่อวินาที)

N คือ อัตราเร็วรอบ (รอบต่อวินาที)

D_s คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบพัด (เมตร)

ซึ่งจะใช้สมการเดียวกันสำหรับของไหลนิวโตเนียน อย่างไรก็ตามค่าเลขเรโนลด์ของของไหลนอน - นิวโตเนียนจะซับซ้อนกว่าของไหลนิวโตเนียน เพราะความหนืดปรากฏของของไหลนอน - นิวโตเนียนมีค่าไม่คงที่ จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการเฉือน หรือความเร็วของของผสมในถังหมัก ได้มีผู้ทำการวิจัยหลายคนใช้ความหนืดเฉลี่ยปรากฏในการหาค่าของเลขเรโนลด์ (N_{re}) ดังสมการข้างล่างนี้

$$N_{re} = \frac{D_s^2 N \rho}{\mu_s} \quad (1.17)$$

ซึ่ง

- D_s คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)
 N คือ อัตราเร็วรอบ (รอบต่อวินาที)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 μ คือ ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร.วินาที)
 N_{re} คือ เลขเรโนลด์

สำหรับความหนืดเฉลี่ยสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากอัตราการเฉือน หรือ อัตราเร็วเฉลี่ยโดยวิธีข้างล่างนี้ สำหรับของไหลที่เป็นไปตามกฎกำลัง

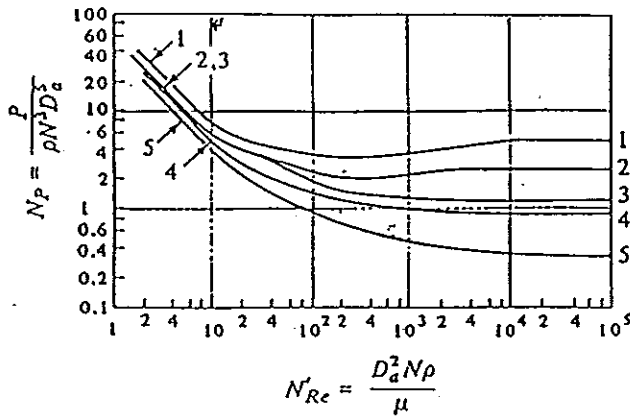
$$\tau = K \left[\frac{-dv}{dy} \right]_w^n \quad (1.18)$$

$$\mu = K \left[\frac{-dv}{dy} \right]_w^{n-1} \quad (1.19)$$

ภาพที่ 1.13 เป็นรูปของการทำสหสัมพันธ์ในการกวนสำหรับใบพัดแบบ 6 ใบพัดพร้อมงาน ในของไหลซูโดพลาสติก ของไหลนอน - นิวโตเนียน และของไหลนิวโตเนียน ซึ่งมีค่า $D_s/W = 5$, $L/W = 5/4$, $D_s/J = 10$

การไหลอยู่ในช่วงลามินาร์ในถังหมัก สำหรับค่าเลขเรโนลด์มีค่าน้อยกว่า 10 และการไหลในช่วงเทอร์บูเลนต์ในถังหมัก สำหรับค่าเลขเรโนลด์มีค่าน้อยกว่า 10^4 และในช่วงระหว่าง $10 - 10^4$ คือ อยู่ในช่วงทรานสิชั่น

การใช้กำลังจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของของไหล และความหนืดของของไหล และอัตราเร็วรอบของใบกวนและเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด ซึ่งจะมีการเขียนกราฟระหว่างเลขกำลังและเลขเรโนลด์ กำลัง คือ P ในหน่วยจูล/วินาที หรือเป็นวัตต์ ภาพที่ 1.13 เป็นความสัมพันธ์ สำหรับใบพัดที่ใช้มากในของไหลนิวโตเนียน



ภาพที่ 1.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_p และ N_{Re} เป็นการหาความสัมพันธ์สำหรับใบพัดหลายชนิดและบัพเฟิลหลายตัว

ที่มา : Rushton and Everett (1950)

กราฟเส้นที่ 1 เป็นใบพัดแบบเทอร์โบไมน์พร้อมจาน $D_a/W = 5$ บัพเฟิล 4 ตัว โดย $D/J = 12$

กราฟเส้นที่ 2 เป็นใบพัดแบบเทอร์โบไมน์แบบเปิด $D_a/W = 8$ บัพเฟิล 4 ตัว โดย $D/J = 12$

กราฟเส้นที่ 3 ใบพัด 6 ใบ แบบเทอร์โบไมน์และใบพัดเอียง 45 องศา $D/J = 12$

กราฟเส้นที่ 4 ใบพัดแบบโพรเพลเตอร์ และแบบพิทเบลค ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน $D/J = 10$ ไม่มีบัพเฟิล

กราฟเส้นที่ 5 ใบพัดแบบโพรเพลเตอร์ มีบัพเฟิล 4 ตัว $D/J = 10$

โดยการวิเคราะห์แรงที่ของเหลวกระทำต่อใบพัดสามารถอธิบายได้ในรูปสมการทั่วไป ซึ่งสามารถใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง N_p และ N_{Re} ได้ครอบคลุมทั้งช่วงลามินาร์และเทอร์บูเลนต์ โดยที่ A, B, f, α, p เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของใบพัดและรายละเอียดของถังกวน (Nagata, 1975)

$$N_p = \frac{A}{Re} + B \left[\frac{10^3 + 0.6f Re^\alpha}{10^3 + 1.6f Re^\alpha} \right]^p \quad (1.20)$$

ความสัมพันธ์เชิงเอมไพริคัลระหว่างการดูดกลืนกำลังของใบพัดแบบแพคเคิลและการขยายการประยุกต์ใช้สำหรับใบพัดชนิดอื่น ในกรณีที่ไม่มีกาให้อากาศ

Nagata (1975) ได้วิเคราะห์วิธีการกระจายความเร็วของของไหลภายในถึงทรงกระบอกที่มีบัพเฟิลที่กวนด้วยใบพัดแบบแพคเคิล ที่มีขนาดความจุและขนาดของใบพัดต่างกัน ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนกำลังของใบพัดกับสัดส่วนขนาดของถังและใบพัด ดังนี้

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left[\frac{10^3 + 1.2 N_{Re}^{0.66}}{10^3 + 3.2 N_{Re}^{0.66}} \right]^p \quad (1.21)$$

โดยที่

$$A = 14 + (b/D) [670(b/D - 0.6)^2 + 185]$$

$$B = 10 [1.3 - 4 (b/D - 0.5)^2 + 1.14(d/D)]$$

$$p = 1.1 + 4 (b/D) - 2.5(d/D - 0.5)^2 - 7(b/D)$$

b = ความกว้างของใบกวน (เซนติเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของใบกวน (เซนติเมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของถังปฏิกรณ์ (เซนติเมตร)

ผลกระทบของมุมของใบพัดที่กระทำกับแนวระนาบและความลึกของของเหลว

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ยิ่งมุมมีขนาดเล็กลง การดูดกลืนกำลังก็น้อยลง แต่อัตราการลดลงของการดูดกลืนกำลังขึ้นอยู่กับความหนืด ซึ่งถ้ากล่าวให้ชัดเจนในรูปตัวแปรไร้มิติก็ขึ้นอยู่กับการเลขเรโนลด์

Nagata (1975) ได้ทำการทดลองวัดการดูดกลืนกำลังของใบพัดแบบแพคเคิลที่มีมุมเอียงและระดับของเหลวต่างๆ พบว่า สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left[\frac{10^3 + 1.2 N_{Re}^{0.66}}{10^3 + 3.2 N_{Re}^{0.66}} \right]^p \frac{H^{(0.35+(b \cdot d))}}{D} (\sin \theta)^{1.2} \quad (1.22)$$

โดยที่

$\frac{H}{P}$ เป็นสัดส่วนระหว่างความสูงของระดับของของเหลวกับเส้นผ่านศูนย์กลาง

θ เป็นมุมที่ใบพัดทำกับแนวระดับ

Muruggesan และ Degaleesan (1993) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_o กับอัตรา
การให้อากาศ เลขฟรัด และเลขกำลัง ได้นำผลการทดลองของผู้วิจัยหลายคนมารวมกันและ
วิเคราะห์ในพิสัยตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์

เส้นผ่านศูนย์กลางถังหมัก(cm)	d_r	: 15.0 - 100.0
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (cm)	d_R	: 5.0 - 33.0
ความกว้างของใบพัด (cm)	d_w	: 0.8 - 6.6
อัตราการให้อากาศ (cm^3/sec)	Q	: 50.0 - 9100
อัตราเร็วรอบ (sec^{-1})	N	: 1.3 - 26.4
ความหนาแน่น (gm/cc)	ρ_L	: 0.858 - 1.60
ความหนืด (cP)	μ	: 0.8 - 28.0
แรงคึงผิว (dyne/cm)	γ	: 28 - 72

พบว่าข้อมูลจากนักวิจัยเหล่านั้นสามารถสรุปได้เป็นสหสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{P_g}{P_o} = 0.11 \left[\frac{Nd^3R}{Q} \right]^{0.26} \left[\frac{g}{N^2 d_r} \right]^{0.19} \left[\frac{d_r}{d_R} \right]^{0.28} \left[\frac{d_r}{d_w} \right]^{0.21} \quad (1.23)$$

5. วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (Approach of increasing complexity)

1. ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis

แม้ว่าได้มีการทดลองและสหสัมพันธ์ (correlations) ต่างๆจำนวนมากที่ทำนายตัวแปร
ที่ใช้ออกแบบดังปฏิกรณ์ แต่มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มีความเข้าใจถึงกระบวนการทางกายภาพที่
เกิดขึ้น (Siripatana, 1992)

Charles(1985a,1985b) ได้ศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ โดยประเมินสหสัมพันธ์
ที่มีผู้เสนอขึ้นเท่าที่ผ่านมาว่าสามารถที่จะเอามาใช้งานได้เพียงใด ถึงแม้ว่ารีโอโลยีของน้ำหมักจะมี
ความสำคัญมากในการขยายถังปฏิกรณ์ แต่ปรากฏว่ามีคนสนใจไม่น้อยที่จะนำความรู้ในเรื่อง
รีโอโลยีนี้มาใช้ในการขยายขนาดจริงๆ สหสัมพันธ์ส่วนใหญ่สำหรับการใช้กำลังงาน (power
consumption) และการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) มักมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

- 1) ในทุกกรณี ถังหมักมีขนาดเล็ก
- 2) ไม่มีการใช้น้ำหมักจริง
- 3) รีโอโลยีและลักษณะอื่นๆที่สำคัญ ไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างที่ควรจะเป็น

4) ปัจจัยในด้านโครงสร้างทางเรขาคณิต(geometry factor) ไม่ได้มีการศึกษาอย่างเพียงพอ

5) การศึกษาส่วนใหญ่ยังไม่เป็นระบบอย่างเพียงพอ นั่นคือ เมื่อได้ข้อมูลแล้วก็มุ่งแต่จะทำสหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้มองว่าจริงๆแล้วสหสัมพันธ์นั้นไม่ได้ตอบคำถามให้มากนัก นอกจากนี้ยังเป็นผลสรุปการทดลองแต่เพียงอย่างเดียว

สหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานและการถ่ายโอนมวลสาร K_{La} (ของของไหลนอน-นิวโตเนียน) มีความแปรปรวน (variations) มาก ยิ่งไปกว่านั้นผลที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่มีอยู่มักจะไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง (real situation) (Charles, 1985a, 1985b)

มีสหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานที่ตีพิมพ์ไว้อยู่บ้างสำหรับน้ำหมักนอน-นิวโตเนียนที่มีการให้อากาศ Charles (1985a, 1985b) แสดงข้อคิดเห็นว่า มีเพียงงานของ Taguchi และคณะ (1968) และ Michael และ Miller (1962) เท่านั้นที่ทำการทดลองไว้ในช่วงกว้าง อย่างไรก็ตามมีสิ่งตีพิมพ์ที่ทิ้งตระหนักว่า สหสัมพันธ์ทั้งสองนั้นไม่สอดคล้องซึ่งกันและกัน และที่สำคัญ ในการหมักปริมาณมาก สหสัมพันธ์ทั้งสองให้ผลที่แตกต่างกันประมาณ 2 - 3 เท่า

จะเห็นได้ว่า สหสัมพันธ์ต่างๆที่มีผู้ทำการทดลองไว้มากมายนั้น ให้ข้อสรุปที่ขัดแย้งกันเอง อีกทั้งการหาสหสัมพันธ์แบบเดิมนั้น ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ได้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการทดลองเนื่องจากไม่มีพื้นฐานความเข้าใจที่ลึกซึ้งเพียงพอที่จะเอามาใช้ในสภาวะใกล้เคียง เพราะไม่ทราบผลของปัจจัยต่างๆ เช่น ความยืดหยุ่น (elasticity) อย่างชัดเจน ทราบเพียงแต่ผลโดยรวมๆของปัจจัยเหล่านั้น

ดังนั้นจึงเกิดคำถามว่า การใช้วิธีการศึกษาในลักษณะที่รวบรวมทั้งหมด คือ แปรเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ศึกษาผล แล้วนำมาสรุป โดยที่ไม่ต้องใช้ความเข้าใจอะไรทั้งนั้น ถูกต้องดีแล้วหรือไม่ หรือว่าควรที่จะทำการทดลองศึกษาผลของปัจจัยต่างๆให้เห็นชัดเจนก่อน แล้วค่อยๆเพิ่มความซับซ้อนขึ้นมา สิ่งนี้คือต้นเหตุและจุดเริ่มต้นของวิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น เพราะแนวทางนี้ต้องการความเข้าใจมากกว่าที่จะรวบรวมสรุปดังที่ได้มีผู้ศึกษาและกระทำไว้มากแล้ว

สรุปว่าถ้าจะศึกษาให้เป็นระบบแล้ว ควรจะมีการศึกษาอย่างเป็นขั้นตอนที่มีการเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้นทีละน้อย โดยเพิ่มสิ่งที่เป็นปัจจัยเข้าไปทีละอย่าง แล้วดูว่าผลของการเพิ่มปัจจัยนั้นๆจะทำให้มีอะไรเปลี่ยนแปลงบ้าง จะทำให้เข้าใจสาเหตุและผล (cause and effect) ดีขึ้นซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำคัญเพื่อไปใช้ในการขยายขนาด

2. แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (The concept of increasing complexity procedure)

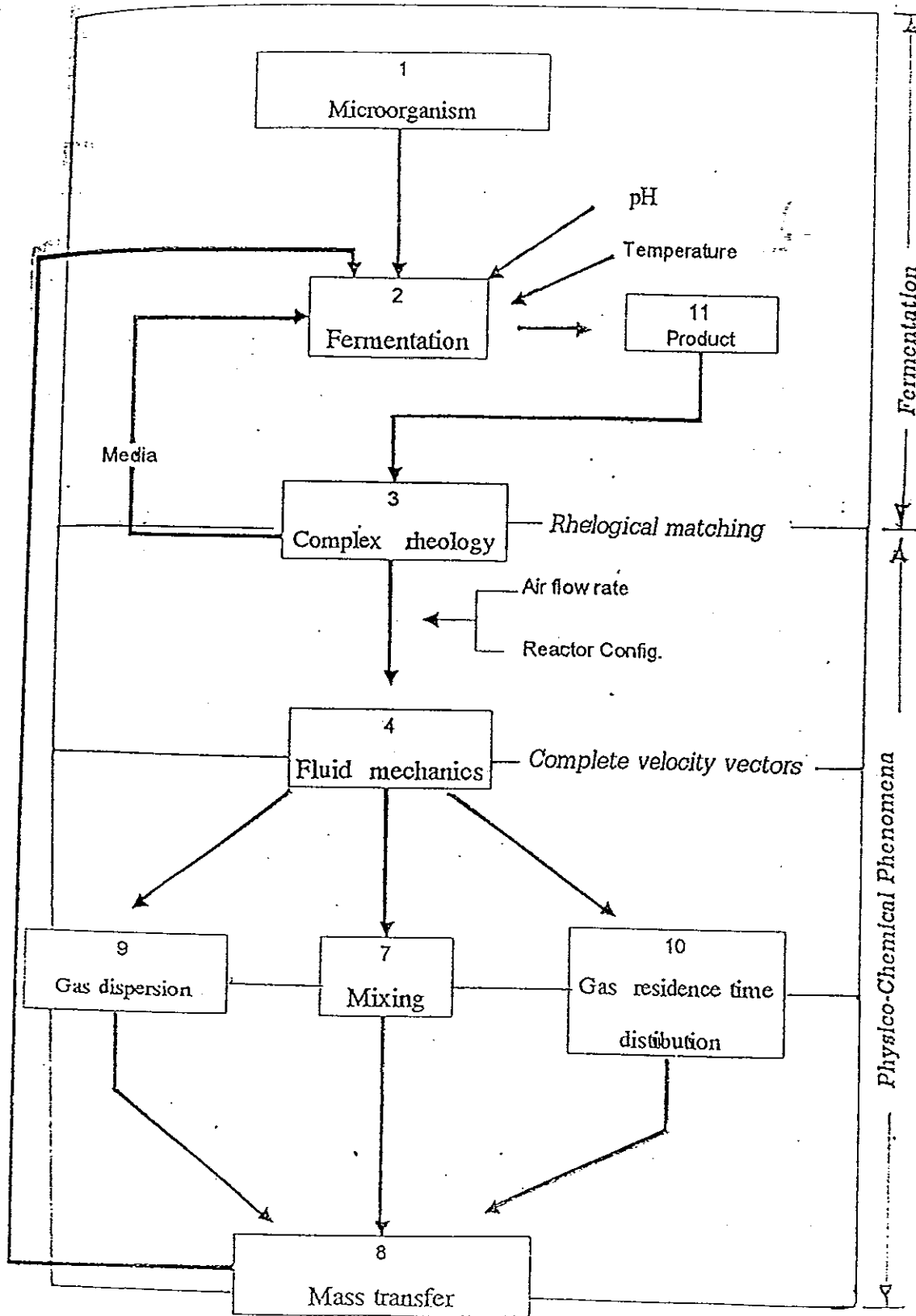
ระบบที่มีความซับซ้อน ไม่ใช่เป็นเพียงการใช้อุปกรณ์หรือคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเท่านั้นมาจัดการกับการทดลอง แต่ต้องการการทดลองที่เป็นระบบ Siripatana (1992) ได้วิจารณ์แบบวิธีการวางแผนการทดลองเชิงสถิติที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นวิธีการที่ตรงกันข้ามกับแนวทางการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ซึ่งแนวทางนี้จะจัดเรียงการทดลองในลักษณะที่ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่เราต้องการ (objective function) นั้นสามารถที่จะทดสอบแยกเป็นส่วนๆ ได้ ในขั้นต้นของการทดลอง หลังจากที่ได้ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่ต้องการนั้นชัดเจนแล้ว จึงค่อยรวมความซับซ้อนเหล่านั้น

จุดมุ่งหมายสุดท้ายของแนวทางนี้ คือ การระบุผลของแต่ละปัจจัยได้กระจ่างชัดอย่าง ที่อันตรกิริยา (interaction) จริงของค่าน้อย่างเป็นระบบ Siripatana (1992) เชื่อว่าไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล โดยการรวบรวมเอาทุกๆ สาเหตุเข้าด้วยกันระหว่างการทดลอง และหวังว่านัยสำคัญของแต่ละปัจจัยจะถูกระบุโดยวิธีการทางสถิติ ทั้งนี้เพราะ โอกาสที่จะมีข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคทางการทดลอง และแบบจำลองทางสถิติที่สมมติขึ้นนั้นเป็นไปได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง

Siripatana (1992) ได้ยกตัวอย่างการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น โดยเลือกใช้ฟรุคโตส ความเข้มข้นร้อยละ 70 เป็นของไหลพื้นฐาน (base fluid) เพราะมีความหนืด (0.1 - 0.5 Pa.s) และเป็นนิวโตเนียน เมื่อนำไปศึกษาถึงผลของความยืดหยุ่น เขาจึงเติมพอลิเมอร์ คือ สารละลายความเข้มข้นแซนแทนร้อยละ 0.1 - 0.5 (โดยน้ำหนัก) ปริมาณเล็กน้อยลงไป เพื่อให้เกิดเป็นของไหลวิสโคอีลาสติกอุดมคติ (ideal viscoelastic fluid) หรือของไหลโบเกอร์ (boger fluid) และเมื่อศึกษาถึงผลของความเป็นซูโคพลาสติก ก็จะมีพอลิเมอร์สายสั้น เช่น methacel (Dow company) ซึ่งจะให้ความไม่ยืดหยุ่น หลังจากศึกษาถึงปริมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยเป็นที่เข้าใจดีแล้ว ความซับซ้อนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ สามารถรวมเพิ่มเข้าด้วยกัน และตรวจสอบถึงความมีส่วนร่วมของแต่ละปัจจัย รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่างๆ

แนวทางนี้ต้องใช้เวลาและงบประมาณ อีกทั้งยังต้องการรายละเอียดในการวัดมากกว่า ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ความเร็วในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว การกระจายของฟองอากาศ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับบางปัญหาที่ยากมาก ไม่สามารถคาดหวังผลที่จะให้ค่าทางปฏิบัติ (practical value) ในเวลาอันสั้นได้

ในการนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัญหาการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพมาพิจารณาในกระบวนการออกแบบถึงหมักทั้งกระบวนการ พิจารณาภาพที่ 1.14 ซึ่งแสดงเหตุและผล (cause and effect) ของส่วนต่างๆ



ภาพที่ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการหมักและการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนย่อย (Problem segmentation)

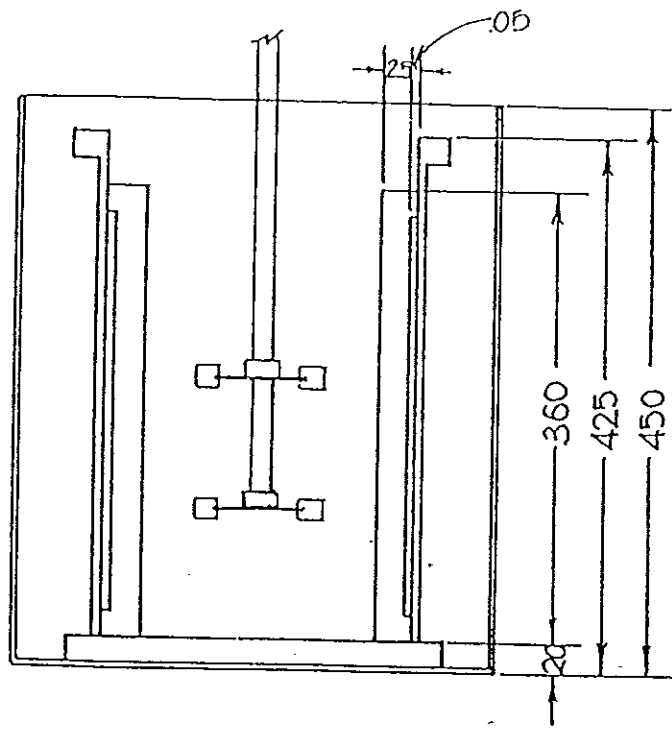
ที่มา: Siripatana (1992)

จากลักษณะของปัญหาเช่นนี้ สามารถแบ่งปัญหาเป็นส่วนๆ ดังนี้ ชั้นแรก แบ่งส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรง และอีกส่วนหนึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกัจุลินทรีย์หรือการหมักโดยตรงออกจากกันก่อน เนื่องจากถ้าทำการหมักแล้วไม่สามารถศึกษาหรือทำการทดลองอย่างลึกซึ้งได้เลย เพราะวากไลและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องมีมากเกินไป อีกทั้งปัจจัยทางชีวภาพนั้นซับซ้อน ไม่มีความสม่ำเสมอ และหากใช้บรอร์จริงในการศึกษาแล้ว จะเกิดปัญหาต่างๆ เช่น บรอร์จริงควบคุมยาก เพราะต้องอยู่ในสภาพที่ปราศจากเชื้อ การทดลองต้องใช้เวลาานาน ต้องใช้เครื่องมือราคาแพงและเทคนิคซับซ้อน ผลที่ได้มีการผันแปรสูง บ่อยครั้งการวัดไม่สามารถทำได้ ดังนั้น เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา จึงอาจแบ่งปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมัก และไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหมักออกจากกัน และการที่จะแบ่งปัญหาในส่วนนี้ได้ ก็จะต้องพบปัญหาในเรื่องบรอร์จริง - สารละลายแซนแทรนกับตำรับที่เตรียมขึ้น เพื่อแยกปัญหาในส่วนอันเนื่องมาจากการหมักออกไปก่อนนั้นอาจไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคบางอย่างที่สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมโยงผลการทดลองที่ได้จากบรอร์จำลองให้สามารถประยุกต์ใช้กับบรอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักจริงๆ เป็นที่ทราบกันดีว่า ของไหลถึงแม้จะต่างชนิดกัน ถ้ามีสมบัติทางด้านรีโอโลยีเหมือนกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสมบัติทางรีโอ โลยีดังกล่าวนั้น ไม่ใช่แค่เพียงความหนืดหรือรีโอแกรม (ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน) แต่จะต้องเหมือนกันในเรื่องสมบัติวิสโคอีลาสติกด้วย ซึ่งถ้าสารละลายเป็นสารละลายที่ต่างชนิดกัน การที่จะหาสารละลายที่มีสมบัติทางรีโอ โลยีเหมือนกับบรอร์อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเรื่องทำได้ยาก สิ่งที่ทำได้คือ พยายามเทียบเคียงสมบัติทางรีโอ โลยี (rheology matching) ซึ่งต้องหาวิธีการที่จะเทียบเคียงทางรีโอ โลยีอย่างมีระบบ

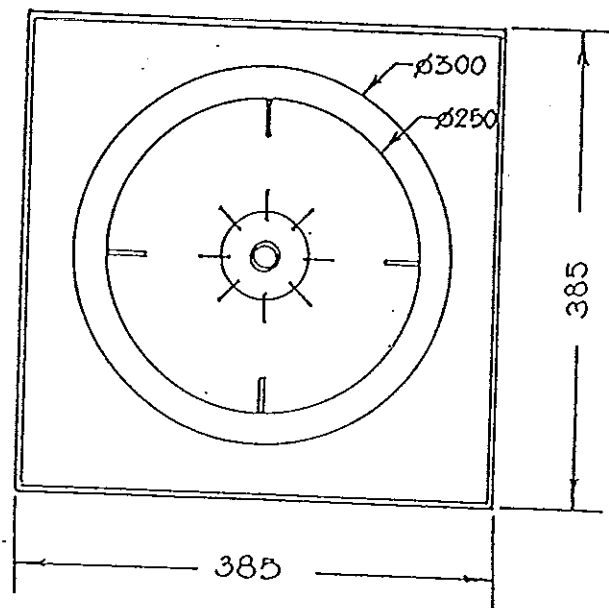
การพัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางด้านรีโอ โลยีนั้นเป็นเรื่องสำคัญที่ยังมีการสนใจกันน้อยมาก หากมีการพัฒนาวิธีการเทียบเคียงที่เชื่อถือได้ขึ้นมาก็จะช่วยให้สามารถนำผลการทดลองโดยใช้ของไหลชนิดหนึ่งมาใช้ในการออกแบบกับของไหลอีกชนิดหนึ่งได้ ถ้าของไหลทั้งสองไม่แตกต่างกันมากเกินไป หรือพอที่จะเทียบเคียงกันได้ การออกแบบและการขยายขนาดสำหรับระบบการไหลพวกพอลิเมอร์ก็คงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางรีโอ โลยี ที่อาศัยรีโอแกรมในทอมของ Power law model parameter (n และ K) และอาศัยสมบัติวิสโคอีลาสติก (G' และ G'') เป็นบรรทัดฐานในการเทียบเคียง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายเซนแทรนกันที่ได้จากการละลายกันสำเร็จ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของของไหล (Model fluid) ของเซนแทรนบรอร์
2. ศึกษาชนิดของใบกวนต่อกำลังที่ใช้ในการกวน (Power consumption) และปัญหาการผสมในการเตรียมเซนแทรน



(a)



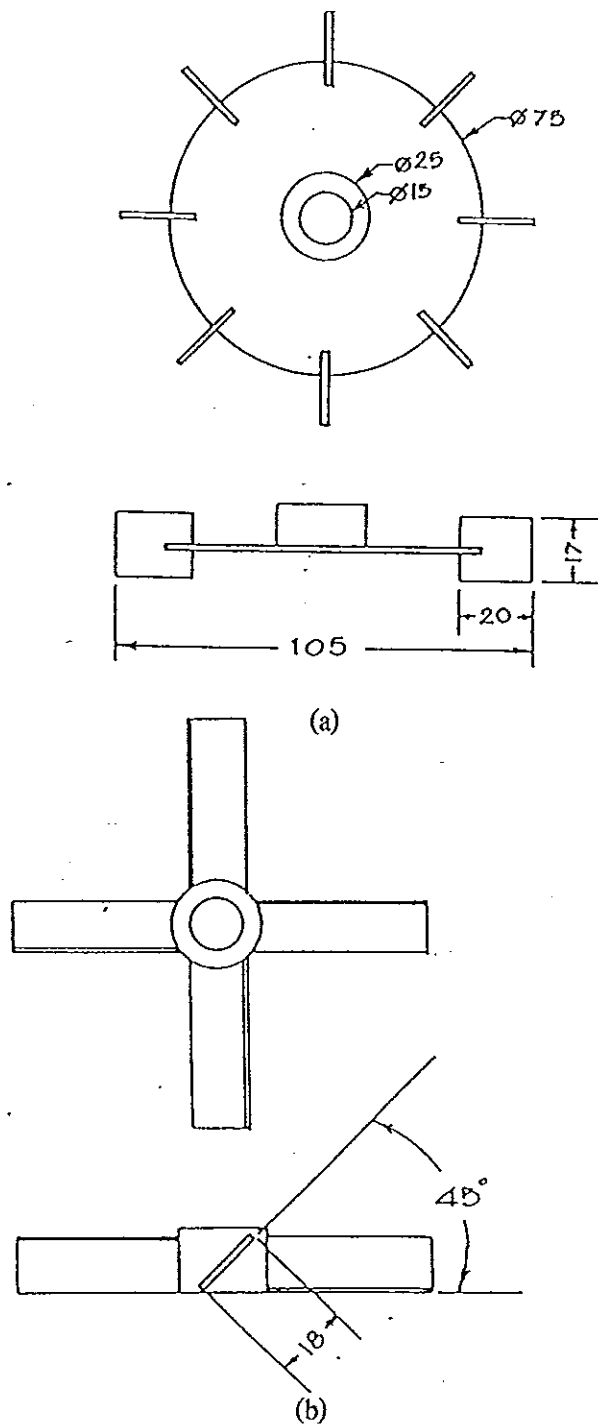
(b)

ภาพที่ 2.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนที่ใช้ในการทดลอง

(a) ถังปฏิกรณ์แบบกวนที่ใช้ศึกษากำลั่งที่ใช้ในการผสม

(b) มิติของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

ที่มา : Siripatana (1992)



ภาพที่ 2.2 ชนิดและขนาดของใยแก้วที่ใช้ในการกวนสารละลายเซนแทรนกัน (หน่วยเป็น มิลลิเมตร)

(a) ใยแก้วแบบเทอร์ไบน์

(b) ใยแก้วแบบพีทซ์เบลค

ที่มา : Siripatana (1992)

(3) ความกว้างของใบกวน (W)	=	17	มิลลิเมตร
(4) ความยาวของใบกวน (L)	ขนาดเล็ก	=	20 มิลลิเมตร
	ขนาดใหญ่	=	22 มิลลิเมตร
(5) เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบกวน (T_{sh})	=	15	มิลลิเมตร

รายละเอียดของใบกวนชนิด พืชระเบิด

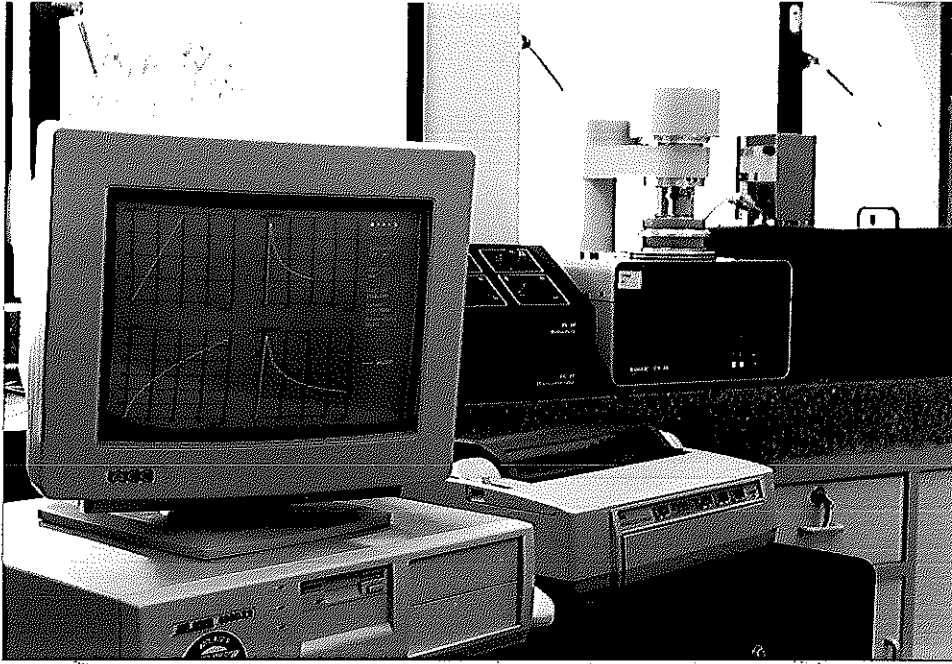
(1) เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (D) ขนาดเล็ก	=	85	มิลลิเมตร
	ขนาดใหญ่	=	105 มิลลิเมตร
(2) ความสูงของใบกวนจากก้นถัง (C)	=	85	มิลลิเมตร
(3) ความกว้างของใบกวน (W)	=	18	มิลลิเมตร
(4) ความยาวของใบกวน (L) ขนาดเล็ก	=	30	มิลลิเมตร
	ขนาดใหญ่	=	45 มิลลิเมตร
(5) เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (T_{sh})	=	15	มิลลิเมตร

ใบพัดเอียงทำมุม 45 องศาเซลเซียส

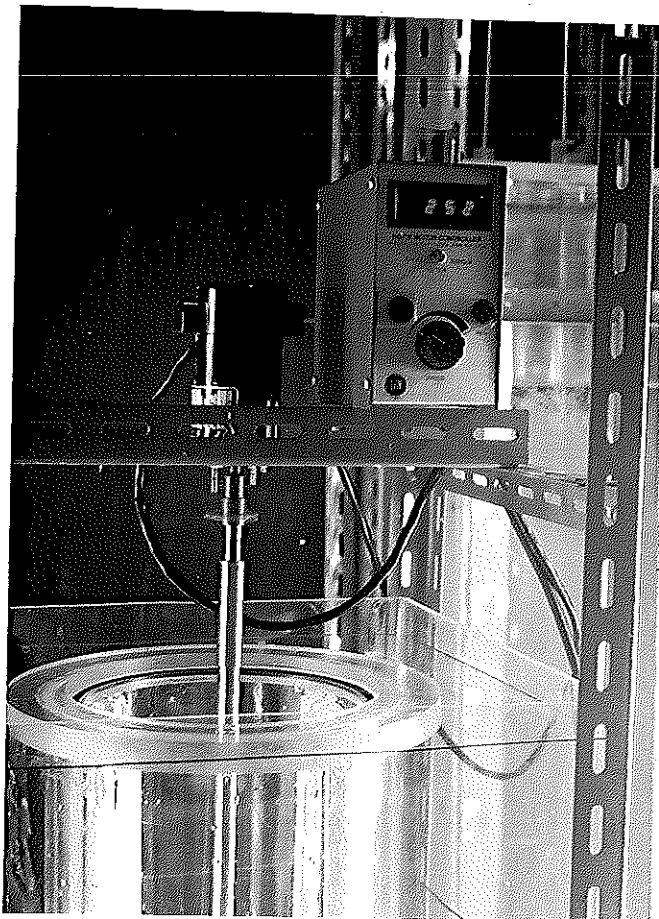
รายละเอียดของตัวกีดกั้นการไหล (Baffle)

(1) จำนวนตัวกีดกั้นการไหล	=	4	มิลลิเมตร
(2) ความกว้างของตัวกีดกั้นการไหล	=	25	มิลลิเมตร
(3) ความหนาของตัวกีดกั้นการไหล	=	10	มิลลิเมตร

- เครื่องวัดสมบัติทางรีโอโลยี (HAAKE Rotovisco RV20 / CV20) พร้อมซอฟต์แวร์ควบคุมและ
อ่างน้ำเวียนหมุนเวียนควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Heto รุ่น CB 13-25(ภาพที่ 2.3)
- มอเตอร์ขนาด 1/40 แรงม้า พร้อมใบกวน ใช้ในการเตรียมสารละลายแขวนแทนกัม
- ปั๊มอากาศ (Air Compressors) ยี่ห้อ TIGER รุ่น MK 100
- เทอร์โมมิเตอร์ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่ง รุ่น 51 K/L ของบริษัท Fluke
- Conductivity meter ยี่ห้อ ORION รุ่น 120
- Flow meter ขนาด 10 ลิตรต่อนาที รุ่น PAT 3675481 Series RMA ของบริษัท DYER
INSTRUMENT, INC.
- ไมโครคอมพิวเตอร์ 80486 หน่วยความจำ 8 เมกกะไบต์
- เครื่องวัดค่าทอร์ค รุ่น HST 210N 0029015 ของบริษัท G.K. HELLER CORP. (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.3 เครื่องวัดสมบัติทางรีโอโลยี (HAAKE Rotovisco RV20/cv20) พร้อมซอฟต์แวร์ควบคุม



ภาพที่ 2.4 เครื่องวัดค่าทอร์คที่ใช้ในการหาค่ากำลังในกวน

วิธีการ

1. การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีและการเทียบเคียงทางรีโอโลยี (Rheological matching) ของสารละลายแซนแทนกัน

1.1 การคัดเลือกสารยับยั้งและพารามิเตอร์ในการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี

การเตรียมสารละลายแซนแทนกัน ปริมาตร 250 มิลลิลิตร 8 ความเข้มข้น คือ ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก (ภาคผนวก ก.)

1.1.1 การทดสอบหาปริมาณสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์สำหรับการเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัน

1.1.1.1 เตรียมสารละลายแซนแทนกัน ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 16 ขวด

1.1.1.2 เติมสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมเอโซด์ โซเดียมไนเตรด โซเดียมเบนโซเอต และโซเดียมโพรพิโอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ลงในสารละลายแซนแทนกันที่เตรียมไว้

1.1.1.3 สังเกตและบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของสี และฟองอากาศของสารละลายที่เตรียมไว้ข้างต้น ทุกวันเป็นเวลา 30 วัน

1.1.1.4 เลือกชนิดของสารที่ใช้ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแซนแทนกันในครั้งต่อไป

1.1.2 การทดลองเพื่อหาความเครียด (strain) ที่เหมาะสมที่สุดและย่านลิเนียร์วิสโคอีลาสติก (หรือย่านที่สมบัติวิสโคอีลาสติกของของไหลมีค่าสูงและคงตัว) โดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางรีโอโลยี

1.1.2.1 นำสารละลายแซนแทนกันมาวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี เช่น ความหนืดเชิงซ้อน, มอดูลัสสะสม (Storage Modulus)(G'), มอดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus)(G'') เป็นต้น ในช่วงพิสัยความถี่ 0.05 - 10 Hz ความเครียด 0.3 - 1.0 องศา (degree)

1.1.2.2 หาย่านลิเนียร์วิสโคอีลาสติกและเลือกค่าความเครียดสูงสุดที่ย่านลิเนียร์วิสโคอีลาสติก โดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางรีโอโลยี

1.1.3 คัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกันที่ให้ค่า Loss Modulus (G'') ที่เหมาะสม

1.2 ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมปริมาตร 50 ลิตรที่เตรียมจากกัมสำเร็จ
วิธีการเตรียมสารละลายแซนแทนกัม

หาปริมาณความขึ้นของแซนแทนกัมโดยอบที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ได้ค่าเฉลี่ยของแซนแทนกัมเท่ากัน

เตรียมสารละลายแซนแทนกัมในความเข้มข้น 1% ปริมาตร 50 ลิตร กวนด้วยใบพัดเป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้แซนแทนกัมละลาย ตุ่มตัวอย่างสารละลายแซนแทนกัมเพื่อวิเคราะห์ค่าสมบัติทางรีโอโลยีจนได้ค่าที่คงที่ ซึ่งแสดงว่าสารละลายแซนแทนกัมมีความเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน

1.2.1 การหาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอโลยีคงตัว และวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทน

1.2.2 ผลของอุณหภูมิและเกลือต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทน

1.2.2.1 กำหนดค่าของอุณหภูมิที่ระดับ 21, 25 และ 29 องศาเซลเซียส และวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี (วัดค่า Storage modulus (G') เทียบกับ frequency (ω) และความหนืด (η) เทียบกับอัตราการเฉือน ($\dot{\gamma}$) จากเครื่องวัดความหนืด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ละเอียดถึง $\pm 3^{\circ}\text{C}$

1.2.2.2 ผลของเกลือที่เตรียมขึ้นในน้ำกลั่นที่มีปริมาณเกลือเค็มลงไปร้อยละ 0, 0.05, 0.10 และ 0.15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม

1.3 เปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จกับบรอร์ที่ได้จากการหมักจริง จากผลการทดลองของ Siripatana (1992)

วิธีการนี้เรียกว่า "Rheological Matching" เป็นการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยี ใน 2 ลักษณะ คือ

1.3.1 การศึกษาการทดสอบโดยการสั่น (Oscillation (G' , G'' กับ ω)) โดยวัดจากเครื่องวัดความหนืด

1.3.1.1 สมบัติทางไดนามิกส์ (Dynamic property) ของน้ำหมักแซนแทนและคุณลักษณะโดยทั่วไป (อ้างถึง Siripatana (1992))

ก. มอดูลัสสะสม (Storage modulus (G')) และมอดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus (G'')) กับค่าเฉลี่ยความถี่ (frequency (ω))

ข. ศึกษาค่า $G' - \omega$ โดยทั่วไป สำหรับบรอร์ที่เกิดจากการหมักของแซนแทน

1.3.1.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์แซนแทนจริงกับสารละลายแซนแทนกัม

1.3.2 การศึกษาโดยการทดสอบแบบเลื่อนเป็นวง (Rotation (K (Consistency index), n (Power law index)))

1.3.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และอัตราการเฉือน ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายเซนแทรนแกม กับความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก หลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน โดยเปรียบเทียบกับบรอร์เซนแทรนจริงในช่วงเวลาการหมักต่างๆ โดยเครื่องวัดสมบัติทางรีโอโลยี

1.3.2.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายเซนแทรนแกมกับบรอร์เซนแทรนจริง โดยพิจารณาจากค่า K และ n ที่เท่ากัน

1.3.2.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายเซนแทรนแกมกับบรอร์เซนแทรนจริง โดยพิจารณาจากค่า K, n และ c ที่เท่ากัน

1.3.2.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายเซนแทรนแกมกับบรอร์เซนแทรนจริง โดยพิจารณาจากค่า K, n และเฉลี่ยที่เท่ากัน

2. การศึกษาการใช้กำลังในการกวน (Power Consumption) ของไหลนอน - นิวโตเนียน

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษากำลังในการกวนในถังปฏิกรณ์แบบกวน มีดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารละลายเซนแทรนแกมร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1 โดยน้ำหนัก
2. ชนิดและรูปแบบการจัดวางตำแหน่งของใบกวน โดยใช้ใบกวนแบบ Flat - blade impeller with center disk (TB) และแบบ Pitch - blade impeller (PB) การจัดวางตำแหน่งประกอบด้วยรูปแบบทั้งหมด 6 รูปแบบ (ตารางที่ 2.1)
3. อัตราการให้อากาศมี 5 ระดับ คือ 0, 0.07, 0.15, 0.30 และ 0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที
4. อัตราเร็วรอบในการกวนมี 5 ระดับ คือ 70, 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที
5. ระดับความสูงของสารละลายเซนแทรนในถังปฏิกรณ์ก่อนให้อากาศมี 3 ระดับ คือ 0.02, 0.25 และ 0.30 เมตร

วิธีการทดลอง หาค่ากำลังที่ใช้ในการกวน

1. เติสารละลายเซนแทรนความเข้มข้นร้อยละ 0 (น้ำ) โดยน้ำหนัก ลงในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกค่าเทอร์ค โดยกำหนดความสูงของสารละลายจากก้นถังไว้ 3 ระดับ คือ 0.20, 0.25 และ 0.30 เมตร ตามลำดับ

2. ปรับอัตราเร็วรอบและอัตราการให้อากาศตามที่กำหนดไว้ บันทึกค่าเทอร์คที่ได้ ในทุกๆเวลา 2 วินาที เป็นเวลา 100 วินาที นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและคำนวณให้อยู่ในรูปค่ากำลังที่ใช้ในการกววน (P) (แสดงในภาคผนวก ข) เพื่อนำไปหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลัง (N_p) และเลขเรโนลด์ (N_{Re})

ศึกษาผลของการใช้กำลังในลักษณะของความสัมพันธ์กับเลขเรโนลด์

1. นำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับกำลังในการกววนของสารละลายแซนแทนกับผลการทดลองของผู้วิจัยอื่น

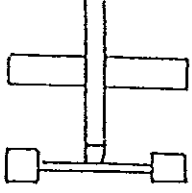
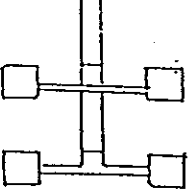
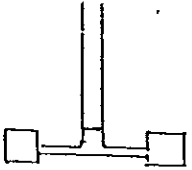
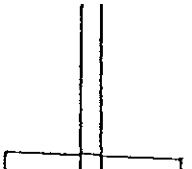
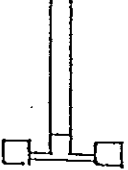
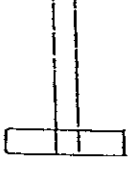
โดยเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลัง (N_p) และเลขเรโนลด์ (N_{Re})

2. เปรียบเทียบผลของความสูง ชนิด และขนาดของใบกวนต่อการดูดกลืนกำลังของสารละลายแซนแทนที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

3. เปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์ (N_{Re}) และค่า P_g/P_o ของใบกวนทั้ง 6 แบบ โดยในแต่ละแบบจะรวมทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทน

4. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_g/P_o และอัตราการให้อากาศ (N_a) ของสารละลายแซนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ของใบกวนแบบเทอร์โบใบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.105 เมตร โดยเปรียบเทียบที่อัตราเร็วรอบ 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที (สำหรับใบกวนแบบอื่นๆแสดงในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 2.1 การจัดวางตำแหน่งของใบพัด 6 รูปแบบ

ชุดการทดลอง	ขนาดและชนิดของใบพัด	รูปแสดงลักษณะการจัดวางใบพัด
1	PB ขนาดใหญ่ TB ขนาดใหญ่	
2	TB ขนาดใหญ่ TB ขนาดใหญ่	
3	TB ขนาดใหญ่	
4	PB ขนาดใหญ่	
5	TB ขนาดเล็ก	
6	PB ขนาดเล็ก	

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีและการเทียบเคียงทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม

1.1 ผลการคัดเลือกสารยับยั้งและพาราเมเตอร์ในการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี

1.1.1 ผลการคัดเลือกสารยับยั้งการเจริญการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับการเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัม

จากการทดสอบชนิดของสารที่ใช้ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรด โซเดียมเบนโซเอท และโซเดียมโพรพิโอเนต ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เริ่มมีสีเหลือง และเมื่อวางทิ้งไว้ประมาณ 7 วันจะมีสีแดงเกิดขึ้น ในบางส่วนของสารละลายมีแผ่นฝ้าขาว รา ลอยอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารละลายและมีกลิ่นเหม็นบูดเร็วกว่าเมื่อใช้ในความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และในบรรดาสารยับยั้งที่ทดสอบพบว่าการเติมโซเดียมไนเตรด และโซเดียมเบนโซเอท มีผลให้ลักษณะทางกายภาพของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะดังกล่าวข้างต้นเร็วที่สุด คือ หลังจากการเตรียมและตั้งทิ้งไว้ประมาณ 2 - 3 วัน รองลงมาคือ โซเดียมโพรพิโอเนต สารละลายมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพหลังจากตั้งทิ้งไว้ประมาณ 5 - 6 วัน ส่วนสารละลายที่มีโซเดียมเอไซด์นั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพใดๆ แม้ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานประมาณ 7 เดือน ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้โซเดียมเอไซด์ 0.07% เป็นสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากมีความเข้มข้นเพียงพอที่จะยับยั้งการเจริญของเชื้อได้ในระยะเวลาานาน

1.1.2 ผลการทดลองหาความเครียด (strain) ที่เหมาะสมที่สุดและย่านลิเนียร์วิสต์โคอีลาสติก การวัดสมบัติทางไดนามิก มีจุดประสงค์เพื่อหาช่วงลิเนียร์วิสต์โคอีลาสติก (linear - viscoelastic) ซึ่งช่วงดังกล่าวได้ถูกพัฒนาทางทฤษฎีและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป จึงทำให้ผลของการวัดสมบัติทางไดนามิก (dynamic property) ในช่วงนี้ง่ายต่อการตีความและเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยทั่วไปการทดลองทำโดยวิธีเปลี่ยนระดับความเครียด (strain sweep) ในบรอร์จริงเลือกใช้อมอดูลัสสะสม (Storage modulus (G')) ในการเปรียบเทียบมากกว่าอมอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus (G'')) เพราะ G' มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (sensitive) ของโครงสร้างของของไหลดีกว่า G''

โดยทั่วไปขณะที่ความเครียด (strain) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ไปยังร้อยละ 100 นั้น G' จะลดลง (ภาพที่ 1.7) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ส่วน G'' นั้นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยกว่า (ภาพที่ 1.8) ที่พิสัยความถี่สูงขึ้นการลดลงยิ่งเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าอัตราการแตกหักของโครงสร้าง (structure breakage) จะแปรเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของความเครียดนั้นมากขึ้น

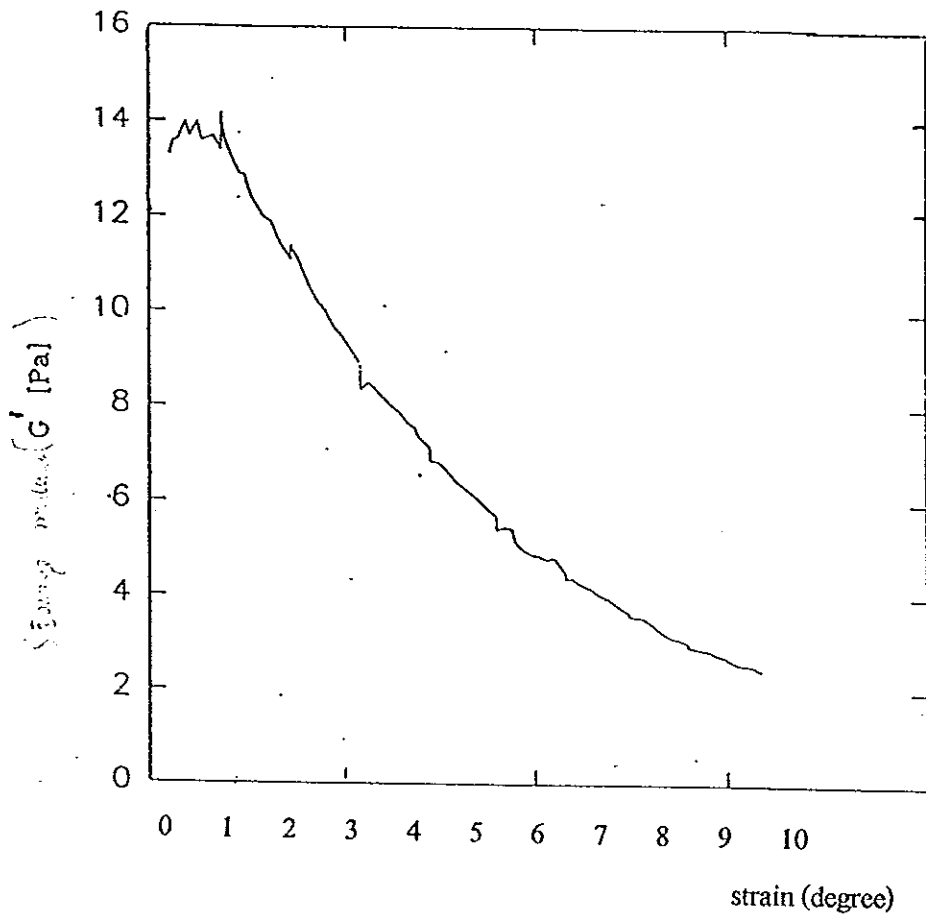
อย่างไรก็ตาม ที่ความเครียดต่ำ (ประมาณร้อยละ 0 - 25) กราฟของ G' ความเครียดค่อนข้างเรียบและคงที่ (flat) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในโครงสร้างของไหล ในช่วงนี้ของไหลเกิดการเสียรูป (deformation) ซึ่งไม่ได้เป็นการทำลายโครงสร้างอย่างชัดเจน จะเห็นว่าไม่มีจุดใดแสดงถึงจุดที่โครงสร้างเริ่มแตกออก (breakdown) อย่างเห็นได้ชัด แต่การเปลี่ยนแปลงจะเรียบ (smooth) แม้เมื่อมีการแตกหักเพิ่มขึ้นที่ร้อยละความเครียดสูงขึ้นไป พบว่า ช่วงถี่เนียร์วิสโคอีลาสติก อยู่ระหว่างร้อยละของความเครียด 0 - 25 และให้ค่า G' ความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 5

จากการทดลองนี้ เมื่อเปลี่ยนระดับความเครียดในช่วง 0.3 - 10.0 องศา (degree) พบว่า ช่วงความเครียด 0.3 - 1 องศา จะให้ค่า G' ที่สูงและค่อนข้างเสถียร (ภาพที่ 3.1) และเมื่อเปลี่ยนระดับความเครียดจาก 0.3 - 1 องศา พบว่า เมื่อความเครียดเท่ากับ 0.75 องศา จะให้ค่า G' ที่สูงและค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงเลือกความเครียดเท่ากับ 0.75 องศาในการทดลอง ส่วนพิสัยความถี่ (frequency) กำหนดตามความสามารถของเครื่อง คือ 0.05 - 10 Hz

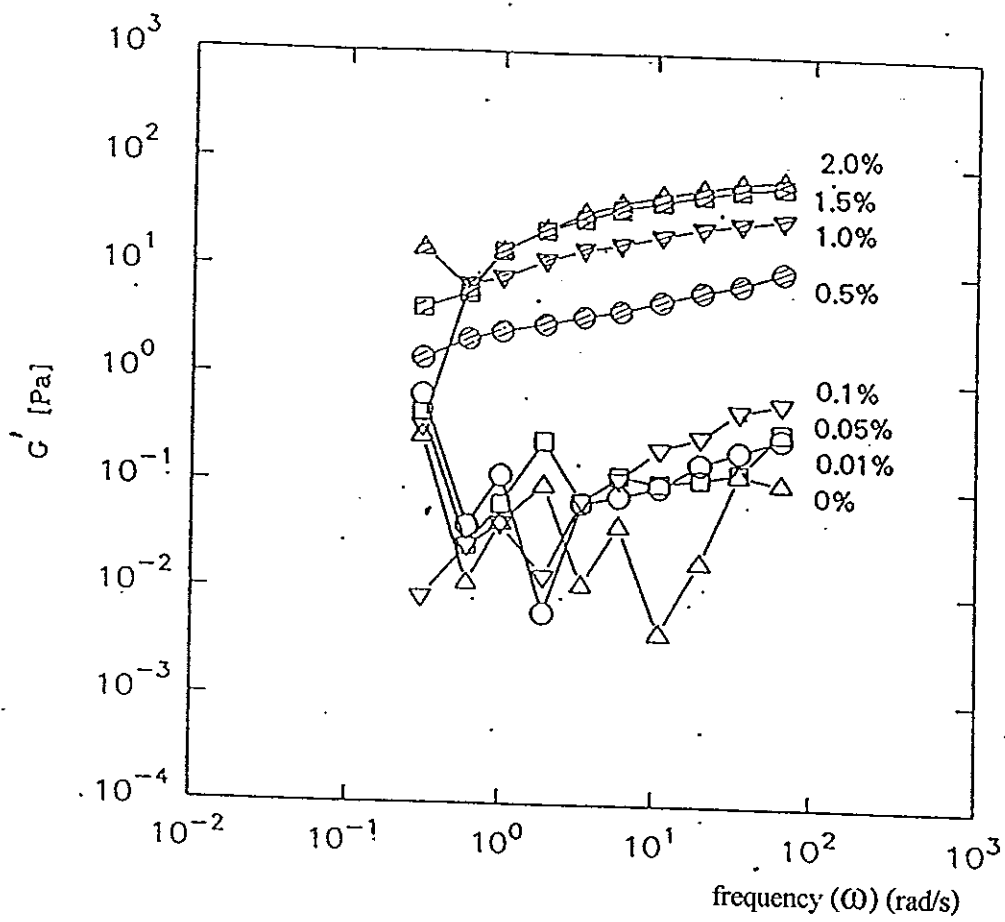
1.1.3 คัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกันที่เหมาะสม

จากการทดลองวัดสมบัติทางรีโอโลยี ของสารละลายแซนแทนกันที่เตรียมขึ้น 8 ความเข้มข้น (ร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก) ได้ผลดังภาพที่ 3.2

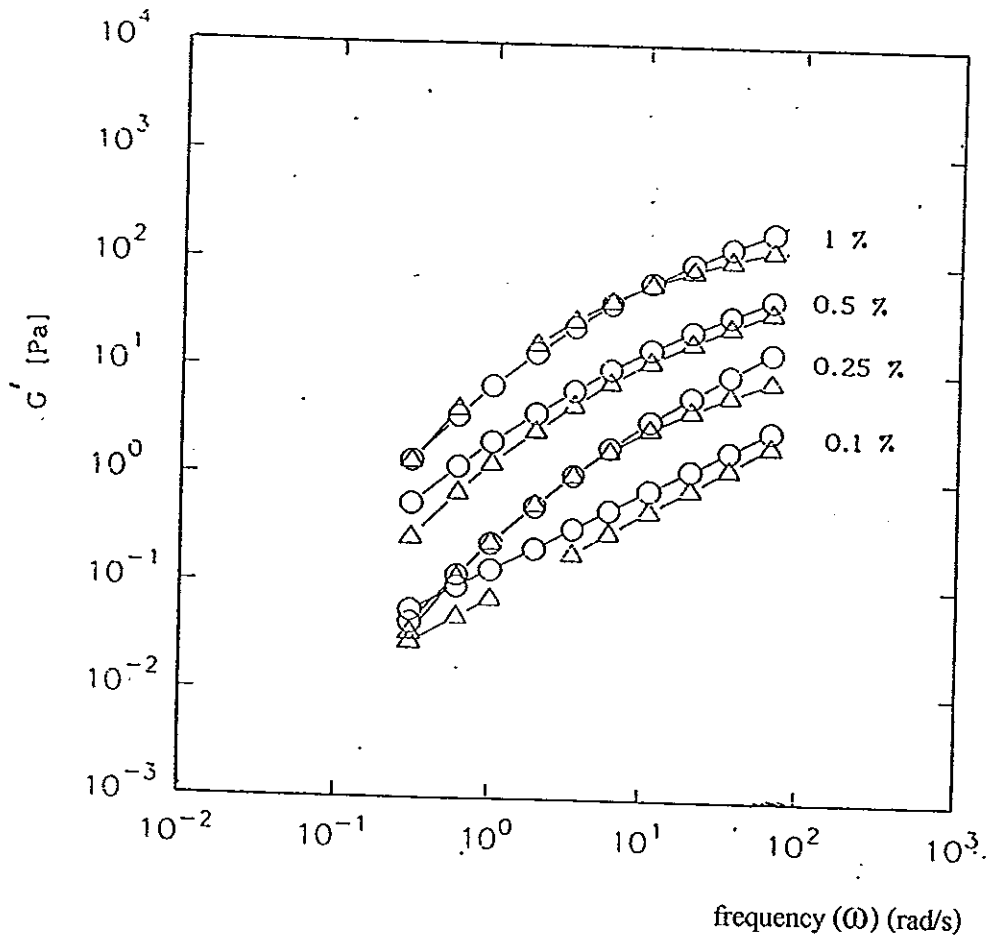
จากการทดลองพบว่า สารละลายแซนแทนกันที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก จะแสดงสมบัติทางรีโอโลยีใกล้เคียงกับน้ำ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องศึกษาเพราะเป็นช่วงคั่นของการหมัก ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการผลิตในระดับอุตสาหกรรม สำหรับสารละลายแซนแทนกันที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 1 พบความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นจึงคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกันที่เหมาะสม 4 ค่า คือ ร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



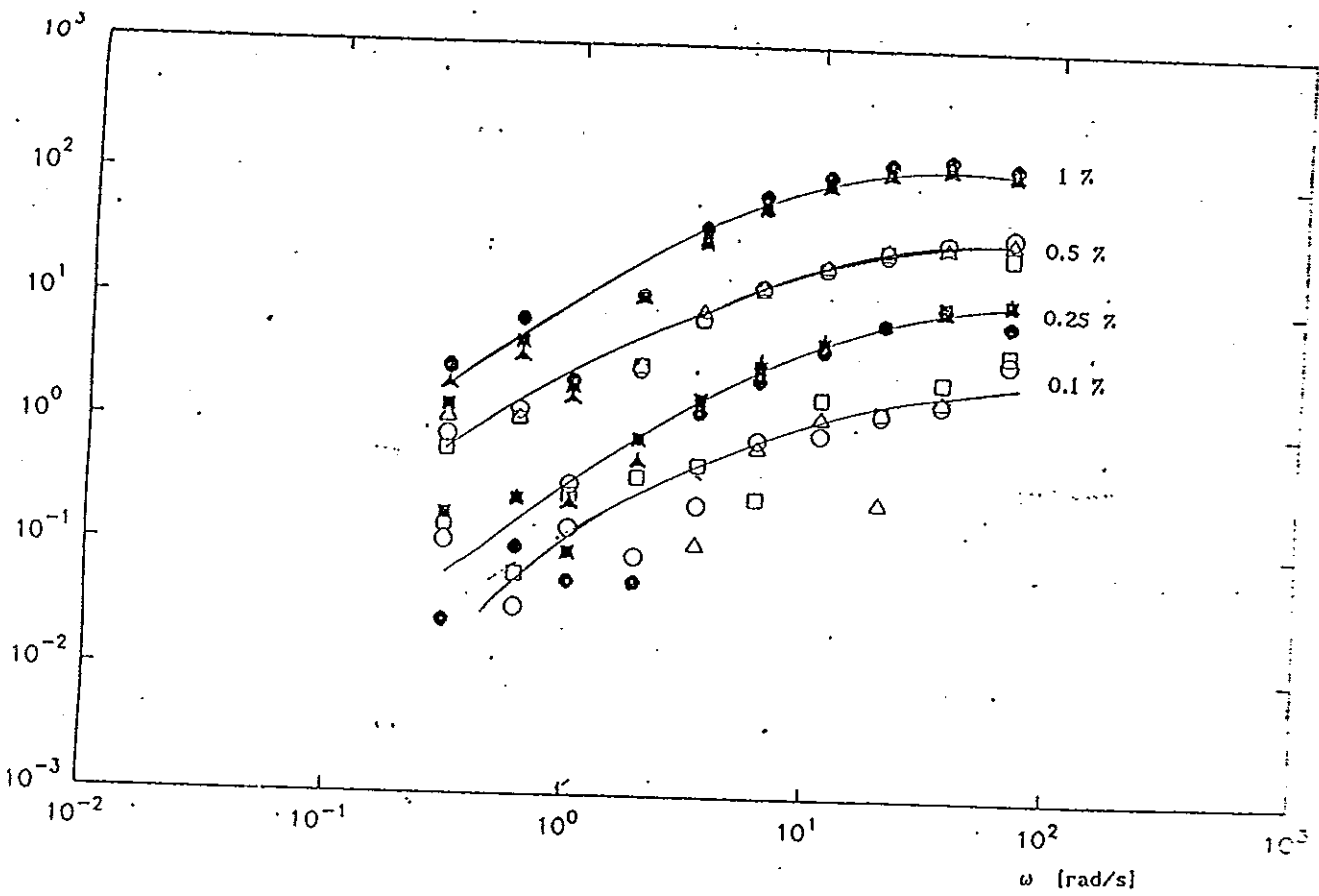
ภาพที่ 3.1 Storage modulus (G') กับ % strain ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายเซนเซนกับกับความเร็วเข้มน้หรือละ 0.5 โดยน้ำหนัก)



ภาพที่ 3.2 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.0, 1.50 และ 2.0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.3 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียม เป็นปริมาตร 50 ลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก
 (—○—) วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำ 3 ครั้ง
 (—△—) วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 180 วัน เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 3.4 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายเซนเทนกันสำเร็จที่เตรียม
เป็นปริมาตร 50 ลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก
(●, ▲, ■) หรือ (○, △, □) คือ การสุ่มตัวอย่างในดัง 3 บริเวณ

1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกม

1.2.1 ผลการหาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกมมีค่าสมบัติทางรีโอ โลยีคงตัวและสม่ำเสมอ

จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกมความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ทั้งสิ้น 2 ครั้ง หลังจากตั้งทิ้งไว้เวลานาน 30 วันและ 180 วัน พบว่า สมบัติทางรีโอ โลยีทุกความเข้มข้นของสารละลายเข้าสู่สภาวะคงตัว และคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ ± 10 (ภาพที่ 3.3) และเมื่อทดลองสุ่มคัดตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง ในถังของแต่ละความเข้มข้นมาวัดสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลาย พบว่าทั้ง 3 ตำแหน่งให้ค่าสมบัติทางรีโอ โลยีใกล้เคียงกับค่าที่สภาวะคงตัวของแต่ละความเข้มข้นนั้นๆ คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงร้อยละ ± 10 (ภาพที่ 3.4) (จากการที่ตั้งสารละลายไว้เวลานาน 180 วัน วัดค่าสมบัติทางรีโอ โลยีแต่ละความเข้มข้นจะอยู่ในสภาวะคงตัว)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า หลังจากเตรียมสารละลายแซนแรนแกมปริมาตร 50 ลิตร และตั้งทิ้งไว้เวลานาน 30 วัน คุณสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายที่เตรียม จะมีความคงตัวอย่างสม่ำเสมอ

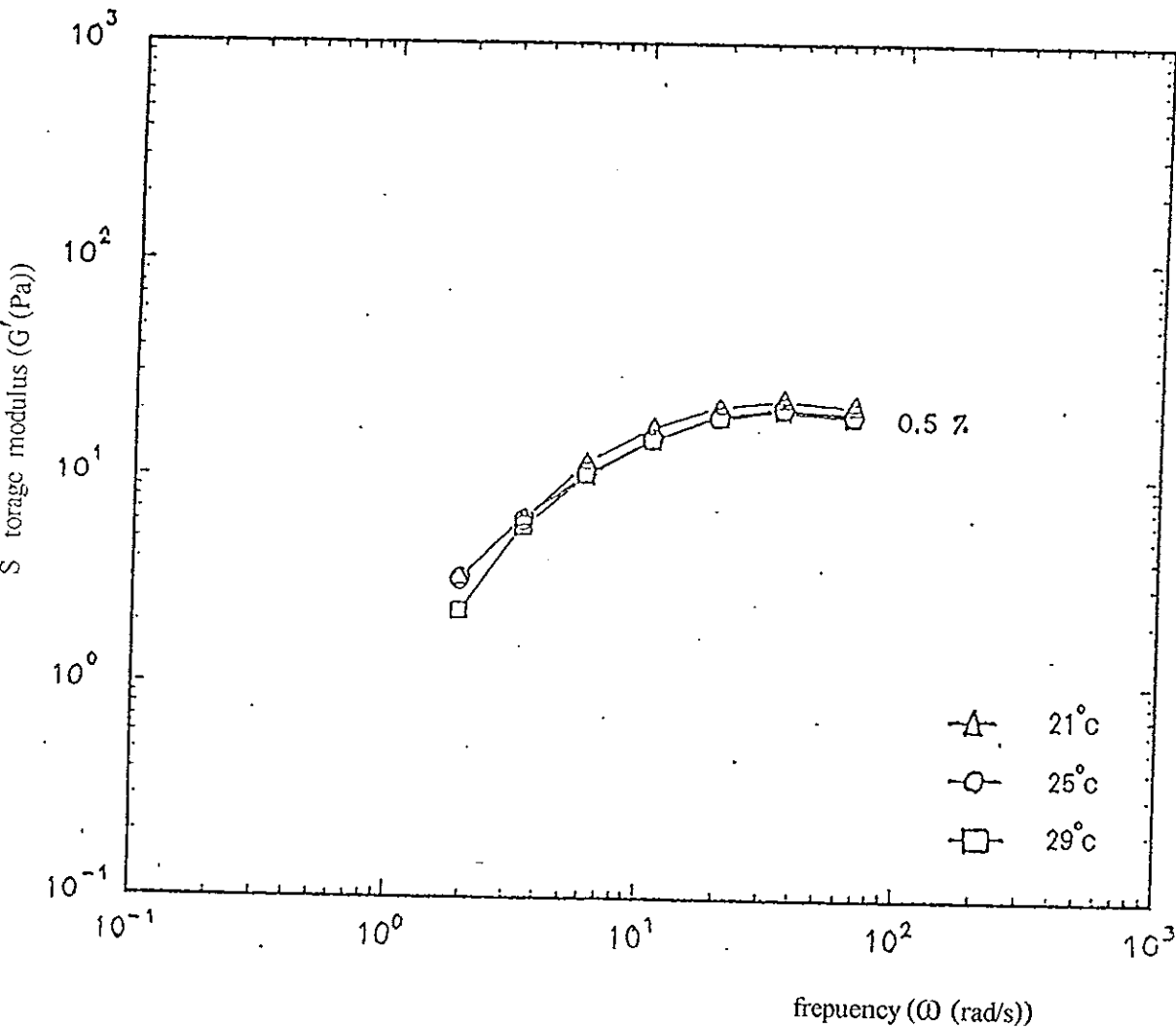
1.2.2 ผลของอุณหภูมิและเกลือต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกม

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกม

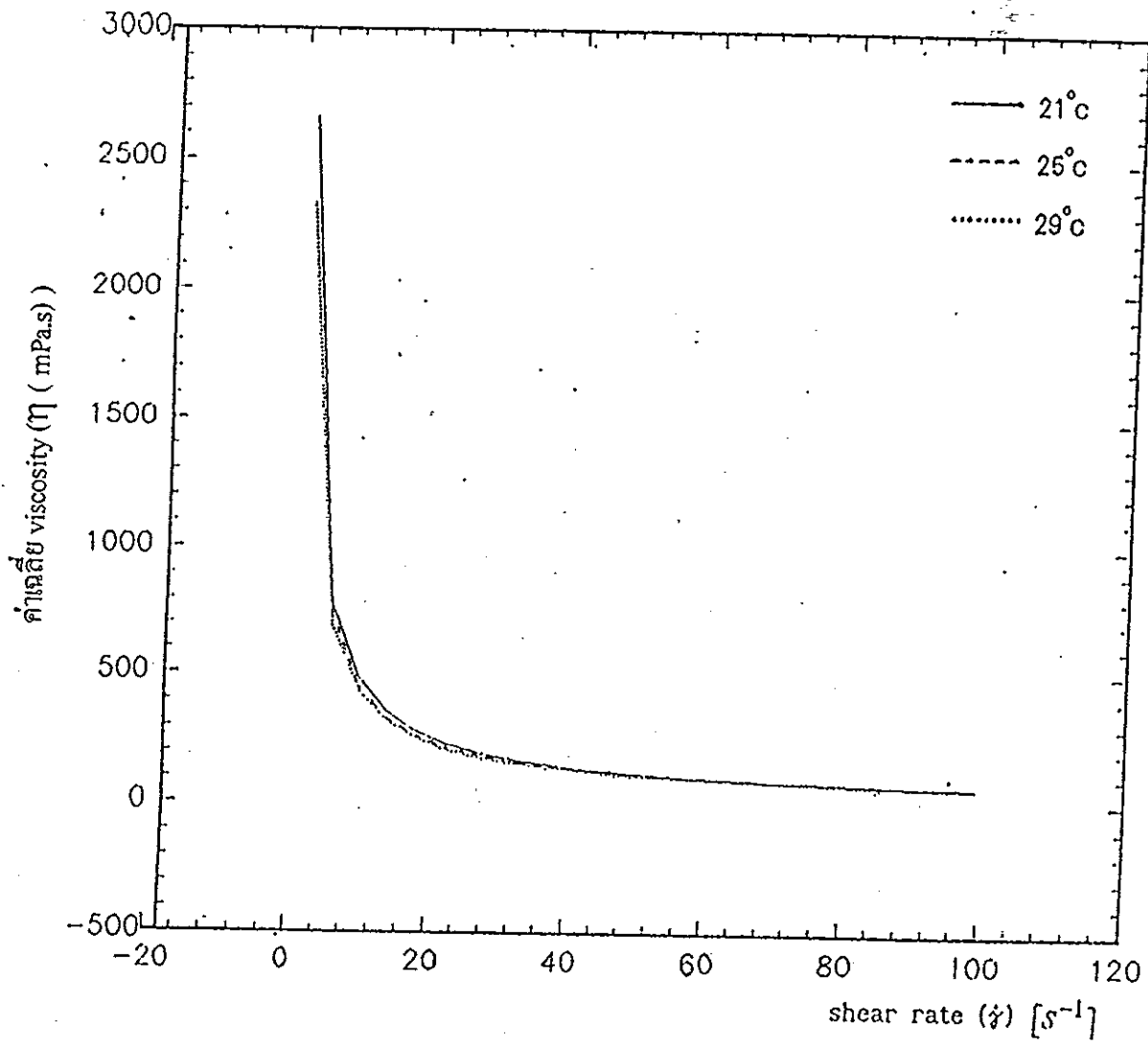
พบว่า เมื่อวัดค่า G' เปรียบเทียบกับ ω และความหนืด(η) เทียบกับอัตราเฉือน ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จที่อุณหภูมิ 21, 25 และ 29 องศาเซลเซียสเนื่องจากอยู่ในช่วงอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวให้ผลการทดลองที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ

ในด้านอิทธิพลของเกลือต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกมนั้น เมื่อวัดค่า G' เทียบกับ ω และความหนืด(η) เทียบกับอัตราเฉือน ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้นในน้ำกลั่นที่เติมเกลือ (ซึ่งเทียบได้เท่ากับน้ำกรอง) และน้ำกลั่น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.7, 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ จะเห็นว่าอิทธิพลของตัวทำละลายน้ำกรองและน้ำกลั่นต่อค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ ให้ผลออกมาในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นไม่ว่าจะใช้น้ำกรองหรือน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายกัมสำเร็จ ก็จะไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในค่าสมบัติทางรีโอ โลยีของสารละลายกัม

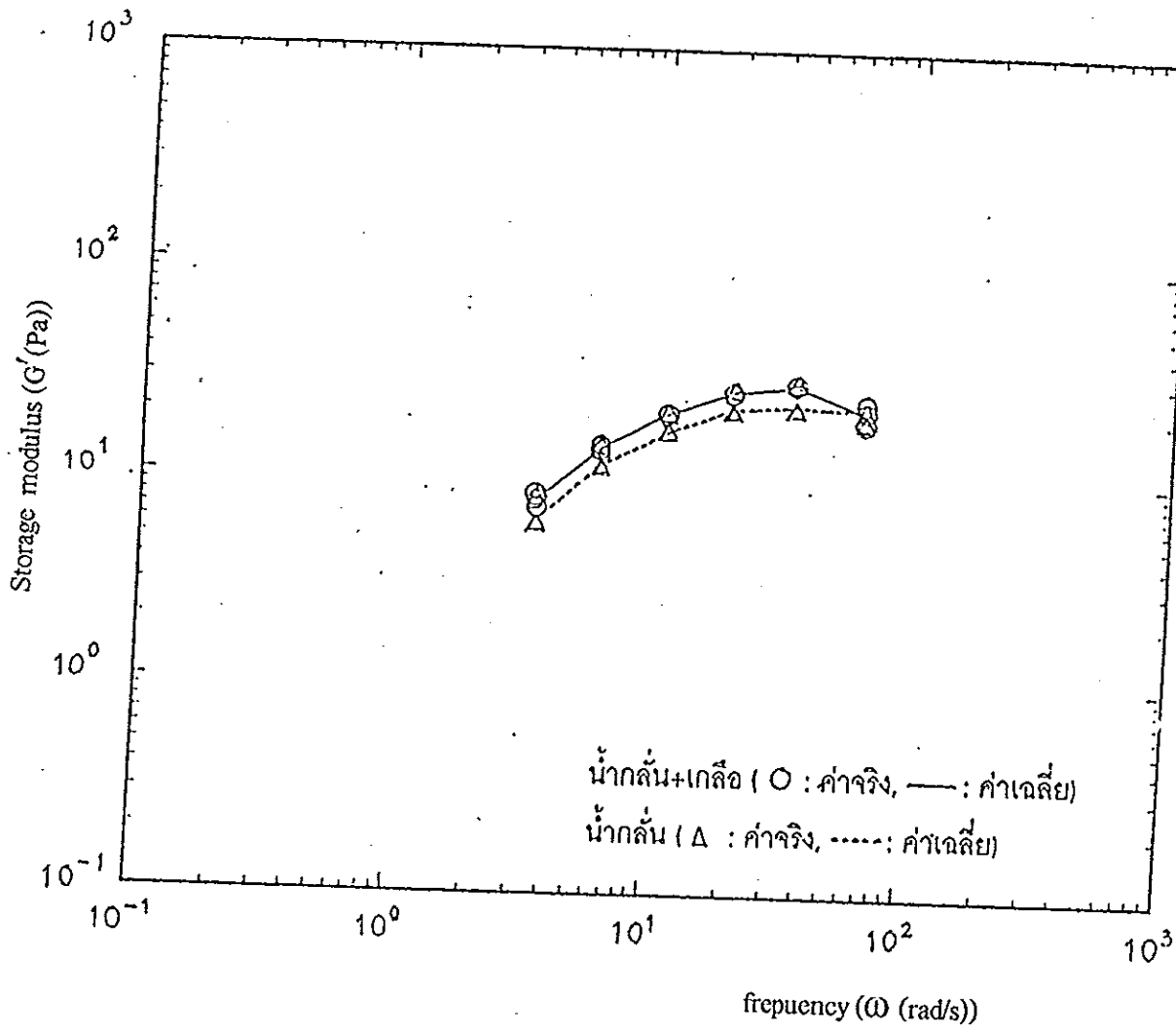
เมื่อวัดค่า G' เทียบกับ ω และความหนืด (η) เทียบกับอัตราเฉือน ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้นในน้ำกรองและและมีปริมาณเกลือเติมลงไปร้อยละ 0, 0.05, 0.10 และ 0.15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ ให้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.10, 3.11 และ 3.12 ระดับของเกลือทั้ง 4 ค่าทำให้สารละลายมีค่าความนำไฟฟ้าเป็น 1747, 3110, 4640 และ 5550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ ซึ่งระดับความเข้มข้นของเกลือดังกล่าวนี้ มีผลต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายกัมสำเร็จอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ว่าไม่มีความแตกต่าง ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาการผสม (Mixing) ซึ่งอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือ (โดยการเติมกรดลงไปเป็นเทรซเซอร์ แล้วสะเทินกลับด้วยเบส) เพิ่มลงไปในสารละลายกัมสำเร็จก็ไม่น่าจะมีผลให้ค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายกัมสำเร็จเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด



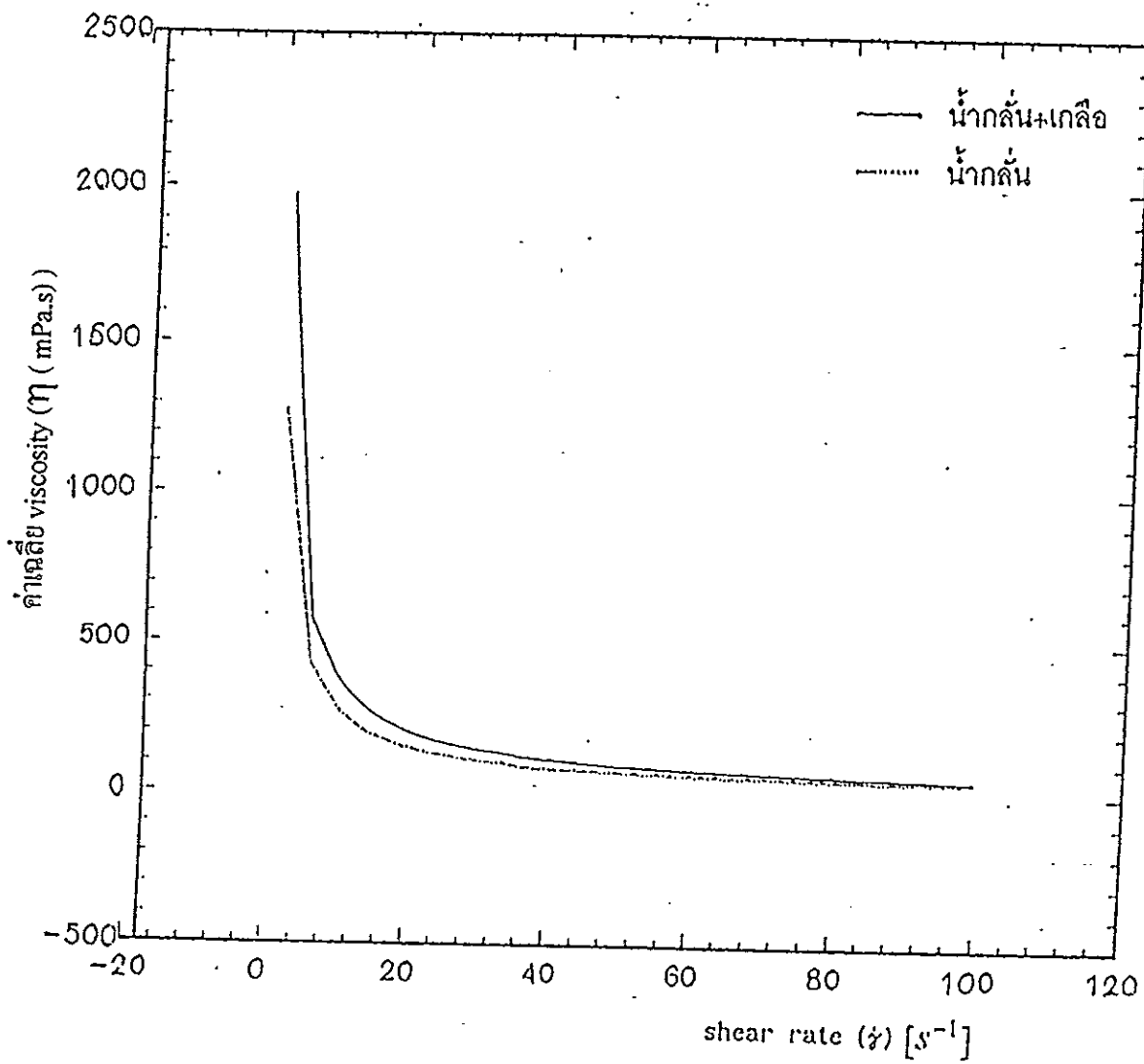
ภาพที่ 3.5 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายแซนแรนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิต่างๆกัน



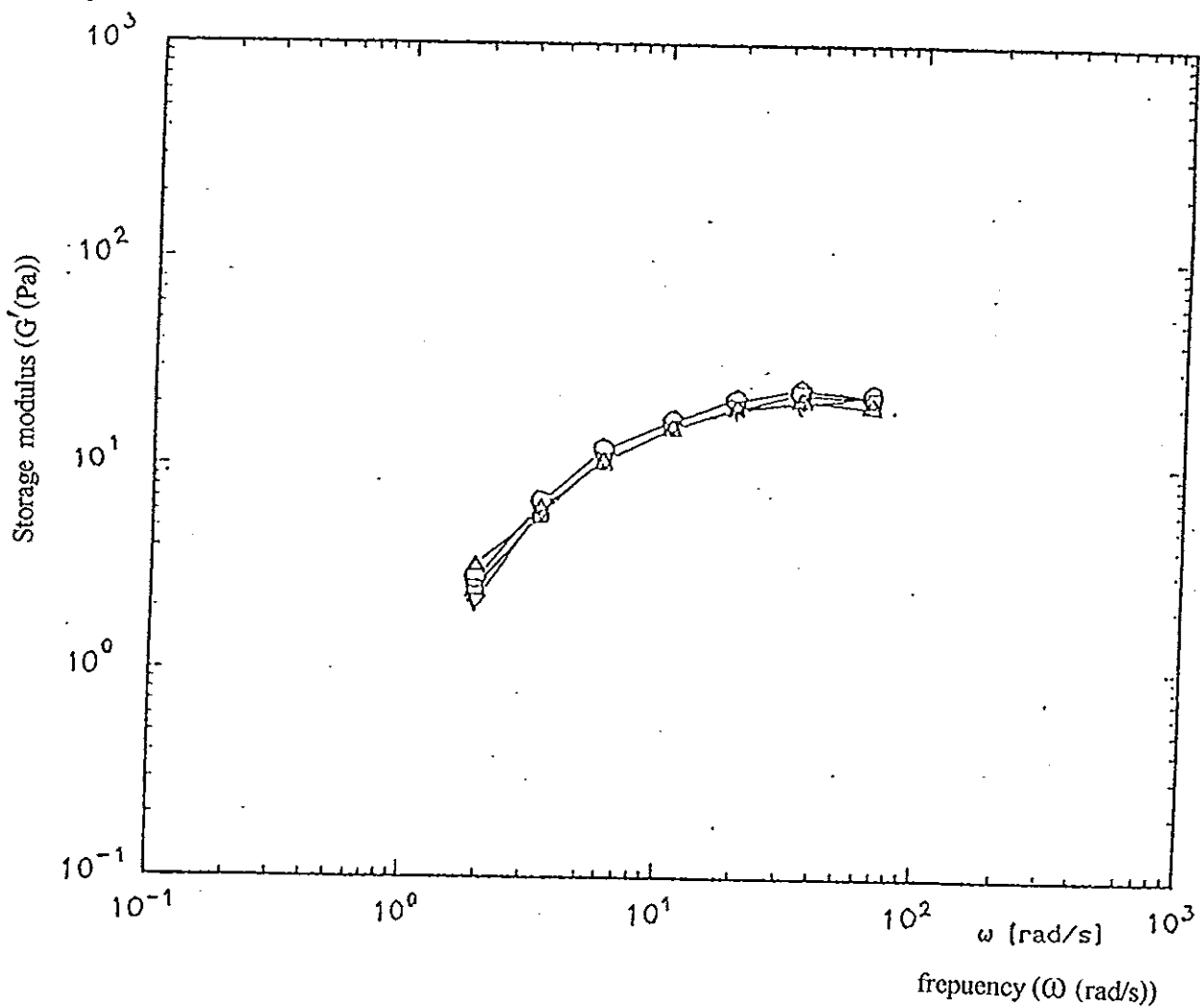
ภาพที่ 3.6 ค่าเฉลี่ย Viscosity (η) กับ shear rate ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายเซนเซนกับสำเรียงที่ อุณหภูมิต่างๆกัน



ภาพที่ 3.7 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายแซนแทนกับตำเร็จที่ใช้ น้ำกลั่น + เกลือ (NaCl) และน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

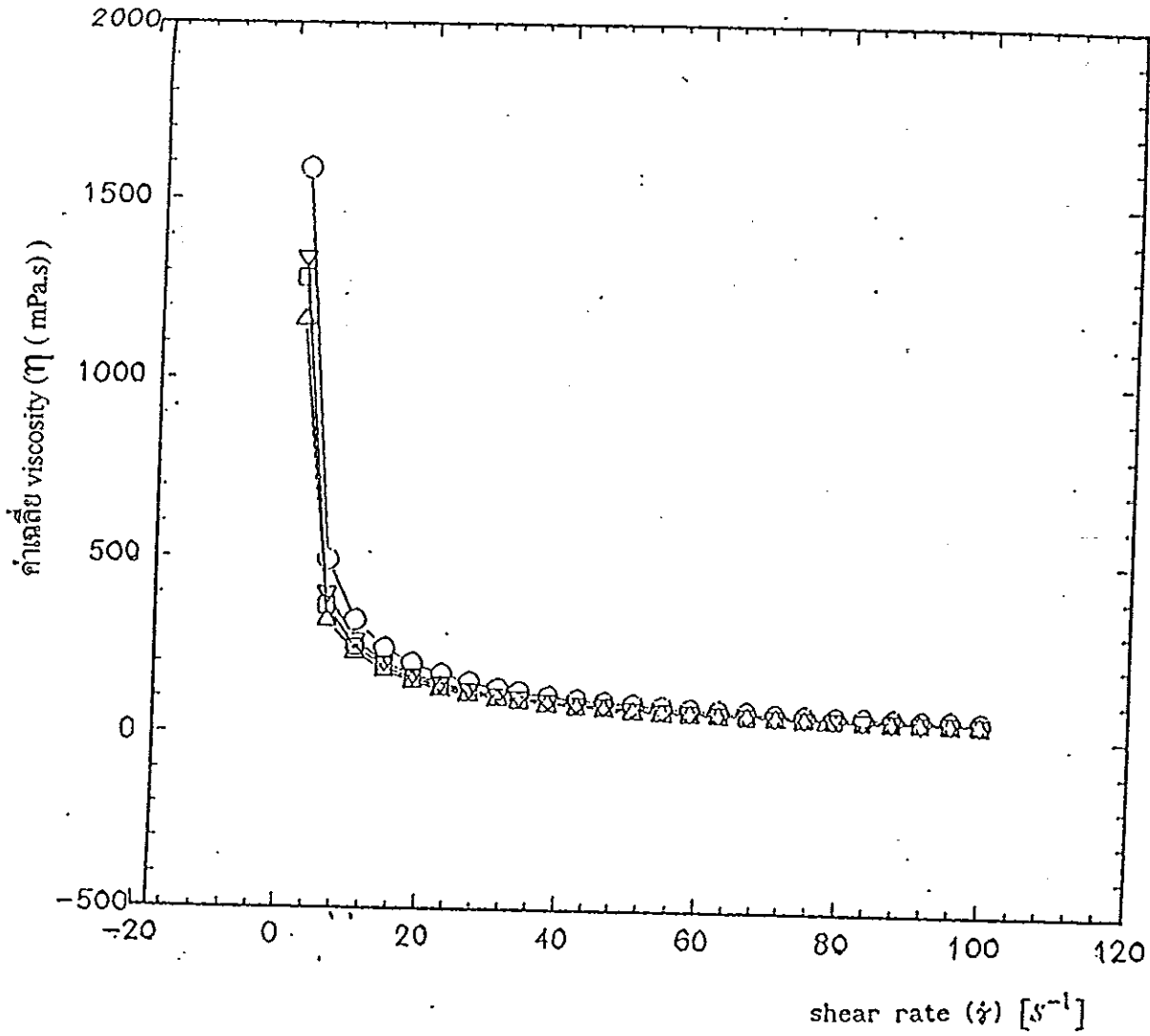


ภาพที่ 3.8 ค่าเฉลี่ย Viscosity (η) กับ shear rate ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายเซนเซนกับตำเร็จ
น้ำกลั่น + เกลือ และน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย



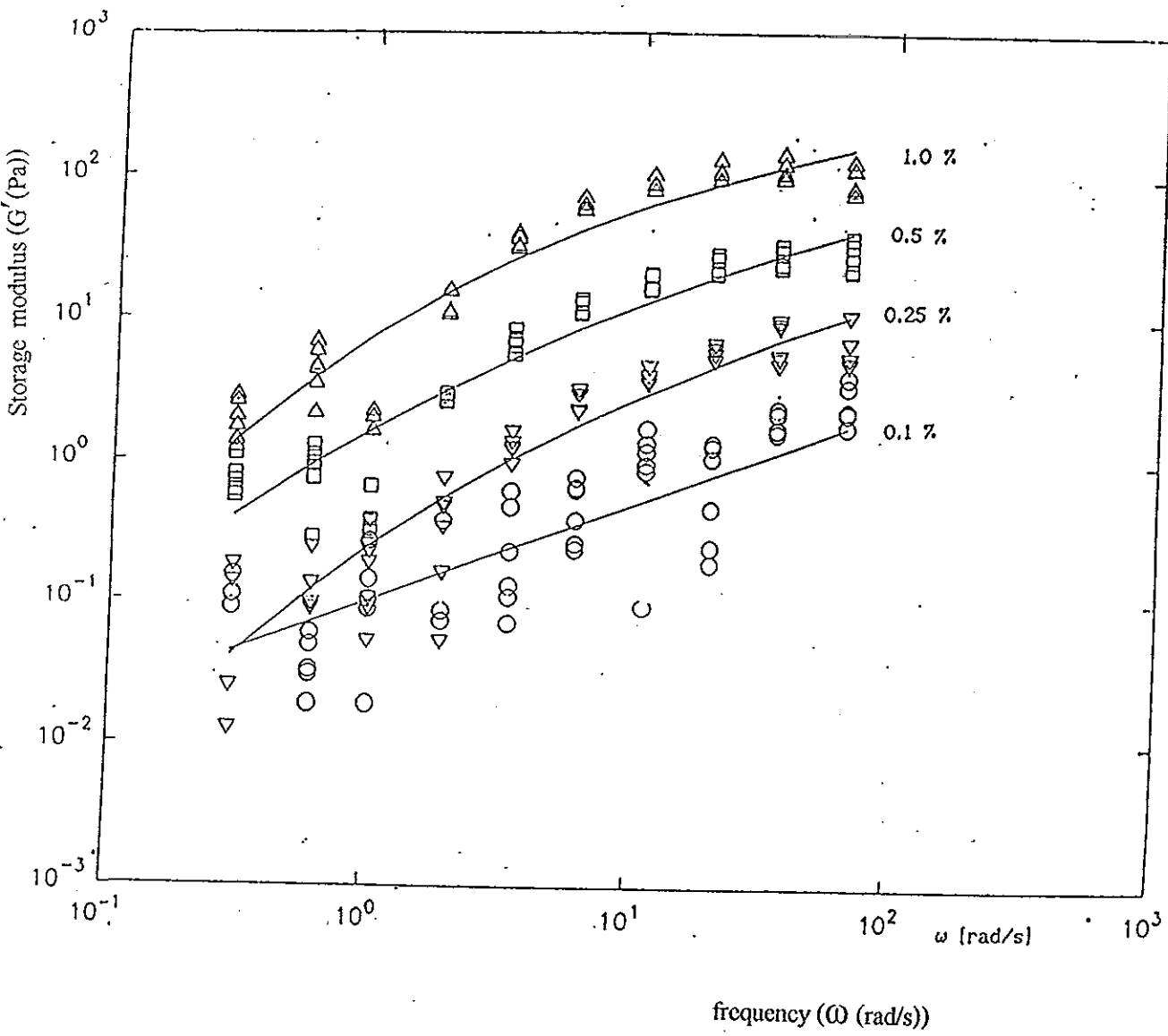
ภาพที่ 3.9 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายเซนเรนกับสำเร็จที่เค็ม
ระดับเกลือ ร้อยละโดยปริมาตรต่างๆกัน

- | | | | | |
|------|-------|---------------------------|------|------------------|
| 0 | (—○—) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 1747 | $\mu\text{S/cm}$ |
| 0.05 | (—▽—) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 3110 | $\mu\text{S/cm}$ |
| 0.1 | (—□—) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 4640 | $\mu\text{S/cm}$ |
| 0.15 | (—△—) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 5550 | $\mu\text{S/cm}$ |



ภาพที่ 3.10 ค่าเฉลี่ยของข้อมูล (η) กับ shear rate ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ
ที่เค็มระดับเกลือ ร้อยละ โดยปริมาตรต่างๆกัน

- | | | | | |
|------|-----------------|---------------------------|------|------------|
| 0 | (\circ) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 1747 | $\mu S/cm$ |
| 0.05 | (∇) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 3110 | $\mu S/cm$ |
| 0.1 | (\square) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 4640 | $\mu S/cm$ |
| 0.15 | (\triangle) | ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย | 5550 | $\mu S/cm$ |



ภาพที่ 3.11 Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของสารละลายเซนเซนกัน
ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

1.3 การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์จริงกับสารละลายเซนแทรนกันสำเร็จรูป

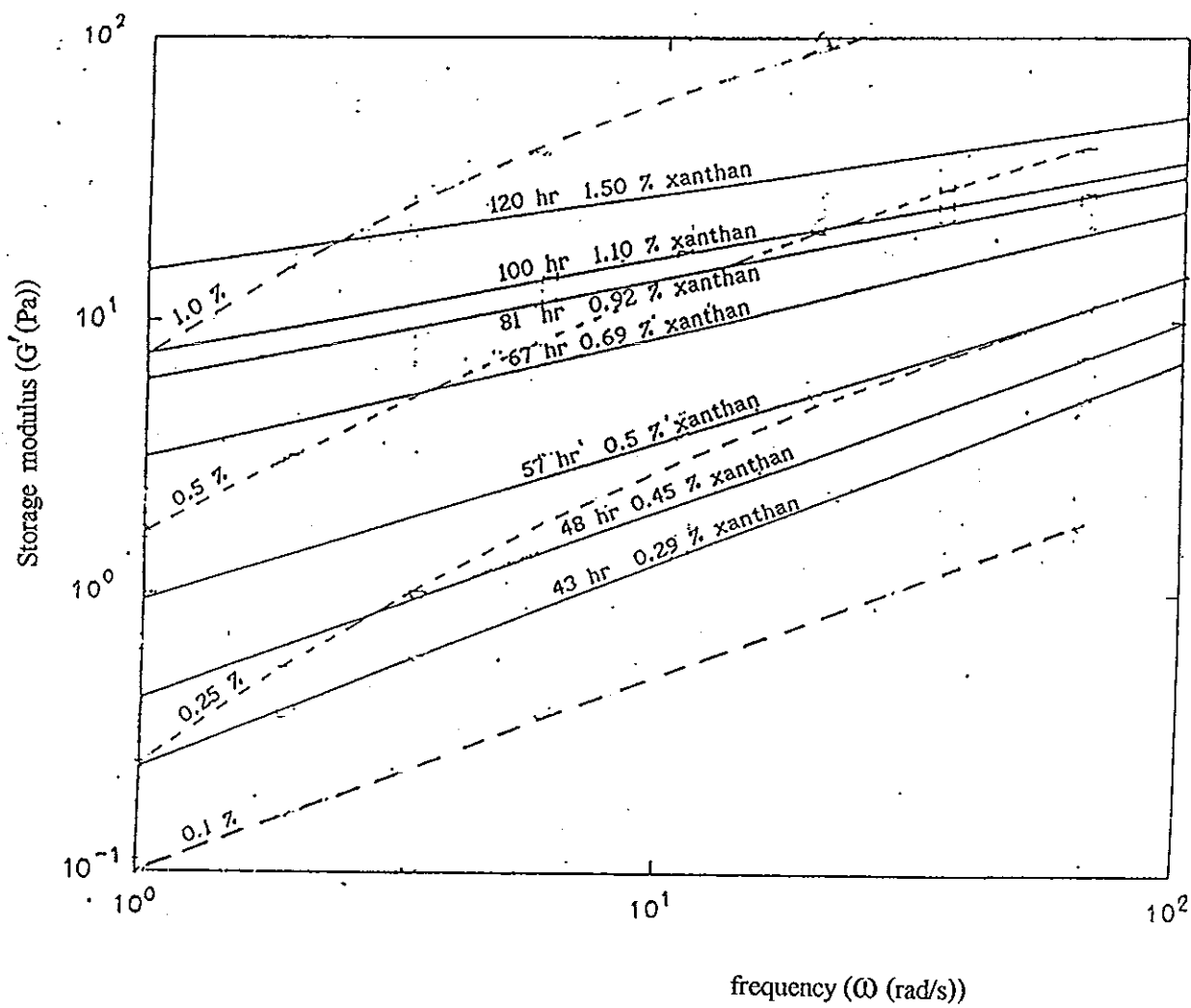
1.3.1 ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยี (Storage modulus (G') กับ frequency (ω))

สารละลายเซนแทรนกันต่างจากบรอร์เซนแทรนจริงในหลายๆด้าน ประการแรกเมื่อ ω มากกว่า 1 rad/s และความเข้มข้นเซนแทรนร้อยละ โดยน้ำหนักสูงกว่า 0.2 G' มักจะสูงกว่า G'' (เหนือบริเวณเนิน) (ภาพที่ 1.6) ประการที่สอง ความชันของ ω' จะมีความชันน้อยกว่าตัวอย่างจากบรอร์จริงอย่างเห็นได้ชัด ประการที่สาม ที่ความเข้มข้นเดียวกันสารละลายเซนแทรนกันมีค่า η และ η^* มากกว่าของบรอร์เซนแทรนจริงในช่วง shear rate 1 - 100 s^{-1} ประการสุดท้าย สารละลายเซนแทรนกันสำเร็จรูปจะเป็น shear thinning มากกว่าบรอร์เซนแทรนจริง ทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นว่าสารละลายเซนแทรนกันที่ใช้ทดสอบได้รับการบำบัด (treat) ทางกายภาพและทางเคมีในหลายๆด้าน ทำให้การพันกันหรือพันธะระหว่างโมเลกุล มีความแข็งแรงกว่าเซนแทรนธรรมชาติ จึงมีความคล้ายของแข็งและเสถียรมากกว่าเซนแทรนธรรมชาติ ขั้นตอนวิธีการตัดแปลงโครงสร้างนั้นผู้ผลิตไม่ได้เปิดเผยไว้ แต่กระนั้นผลเหล่านี้ก็ยังคงมีความคล้ายกับของ Santore และ Prud'homme (1990) ผู้ซึ่งตรวจสอบสมบัติทางรีโอโลยีของเซนแทรนที่ถูกทำให้สูญเสียสภาพธรรมชาติ (denature) แล้ว ก็ถูกให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที ตามด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น 4 โมลาร์ แล้วค่อยๆหล่อเย็น พบว่าทั้ง shear viscosity (η) และ complex viscosity (η^*) จะมีค่าสูงขึ้นในเซนแทรนที่ denature แล้ว มากกว่าในเซนแทรนธรรมชาติ ซึ่งไม่ได้บำบัดด้วยยูเรีย

Smith และ Pace (1982), Pace และ Righelato (1981) และ Margaritis และ Pace (1984) ได้อธิบายการปฏิบัติเชิงอุตสาหกรรมในการเก็บเกี่ยว (recovery) และการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี ของเซนแทรน อย่างไรก็ตามไม่สามารถอธิบายถึงผลกระทบของการบำบัดที่มากไปกว่านี้ได้ เพราะไม่ทราบขั้นตอนการตัดแปร (modification) และการทดสอบเซนแทรนกันสำเร็จรูป

จากการทดลองวัดค่า G' กับ ω ของสารละลายกันสำเร็จที่เตรียมขึ้น แสดงได้ดังภาพที่ 3.11 เมื่อพิจารณาภาพที่ 3.11 เทียบกับภาพที่ 1.5 ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 3.12 พบว่าในช่วงความถี่ต่ำๆ (0 - 6 rad/s) กราฟ $G' - \omega$ ของสารละลายกันสำเร็จแสดงลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่ของบรอร์จริงเป็นเส้นตรง และเมื่อความถี่สูงขึ้น กราฟ $G' - \omega$ ของกันสำเร็จเริ่มเป็นเส้นตรงและขนานไปกับกราฟ $G' - \omega$ ของบรอร์เซนแทรนจริง

เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ 6 - 65.4 rad/s จะเห็นได้ว่าเป็นช่วงที่กว้างเพียงพอสำหรับที่จะใช้อัตราการเฉือน (shear rate) หรือเทียบเท่าความถี่ (frequency) ในช่วงเดียวกัน กล่าวคือส่วนใหญ่แล้วบรอร์ในถังหมักจะได้รับความถี่ในช่วงนี้ ในช่วงความถี่ต่ำกว่านี้ไม่ใช่ช่วงที่เกิดขึ้นในบรอร์ส่วนใหญ่ของถังหมัก



ภาพที่ 3.12 การเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยีในส่วนของกราฟ Storage modulus (G') กับ frequency (ω) ของ (---) สารละลายแซนแทนที่ผ่านการทดลองนี้ และ (—) บรอร์แซนแทนจริง จากการทดลองของ Siripatana (1992)

จากการทดลองได้พยายามที่จะเลือกช่วงความถี่ให้ครอบคลุม แต่ไม่สามารถเลือกได้ เนื่องจากไม่สามารถเทียบเคียงกราฟ $G' - \omega$ ของสารละลายกัมสำเร็จและบรอร์จริง ตลอดช่วงความถี่ดังกล่าว (0 - 65.4 rad/s) ได้ และจากเหตุผลที่ว่าช่วงความถี่ต่ำ ไม่น่าจะมีอิทธิพลต่อการนำไปประยุกต์ใช้มากนัก เพราะเป็นช่วงอัตราการเฉือนที่มีส่วนน้อยของบรอร์เท่านั้น ในถึงหมักที่ ได้รับอัตราการเฉือนระดับนี้ เพราะปกติในการออกแบบถังหมักมักออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณที่ไม่มีการเคลื่อนที่หรือการผสมของสารละลาย (stagnant zone) อัตราการเฉือนในช่วงต่ำ ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณ stagnant zone นี้จะมีน้อยมาก ดังนั้นในการปฏิบัติเพื่อนำไปใช้งานนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเทียบเคียงรีโอโลยีของสารละลายกัมสำเร็จกับบรอร์จริงในช่วงความถี่ต่ำมาก (0- 6 rad/s)

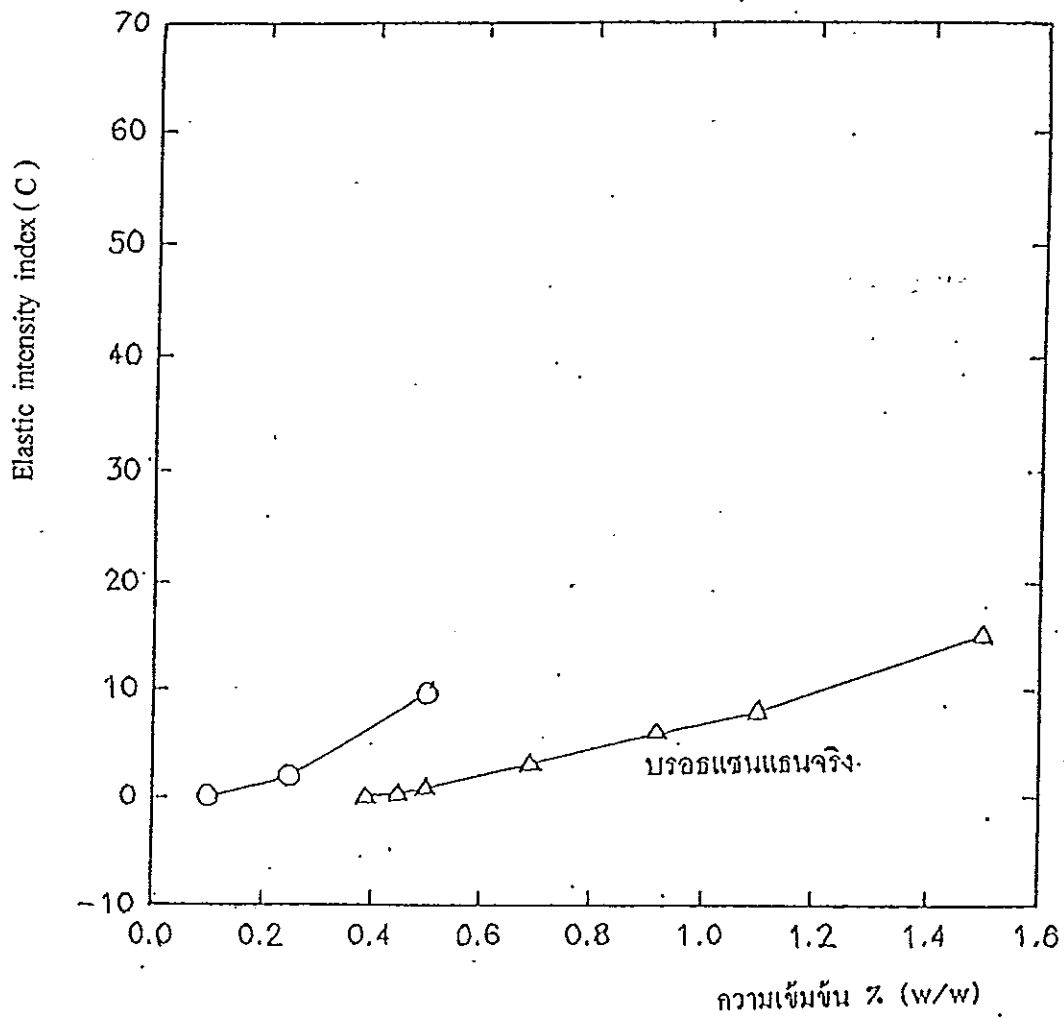
ผลการเทียบเคียงรีโอโลยีของสารละลายกัมสำเร็จกับบรอร์แซนแทรนจริง ในช่วงความถี่ที่พิจารณา (6 - 65.4 rad/s) ภาพที่ 1.5 จะเห็นได้ว่าลักษณะรูปแบบ (pattern) ของเส้นกราฟในช่วงที่เทียบเคียงนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน (ภาพที่ 3.14) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นค่าเดียวกันนั้น กราฟของสารละลายกัมสำเร็จจะอยู่สูงกว่ากราฟของบรอร์จริงเสมอ นั่นคือการใช้ความเค้น (stress) มากกว่าบรอร์จริงในการทำให้สารละลายกัมเคลื่อนที่เท่ากัน

ในการเทียบเคียง ถ้าต้องการนำผลที่ได้จากการศึกษาสารละลายกัมไปใช้กับบรอร์จริงนั้น ต้องเทียบเคียงบรอร์โดยอาศัยรีโอโลยีเป็นตัวบอก มากกว่าที่จะใช้ความเข้มข้นโดยตรงในการนำไปประยุกต์ใช้

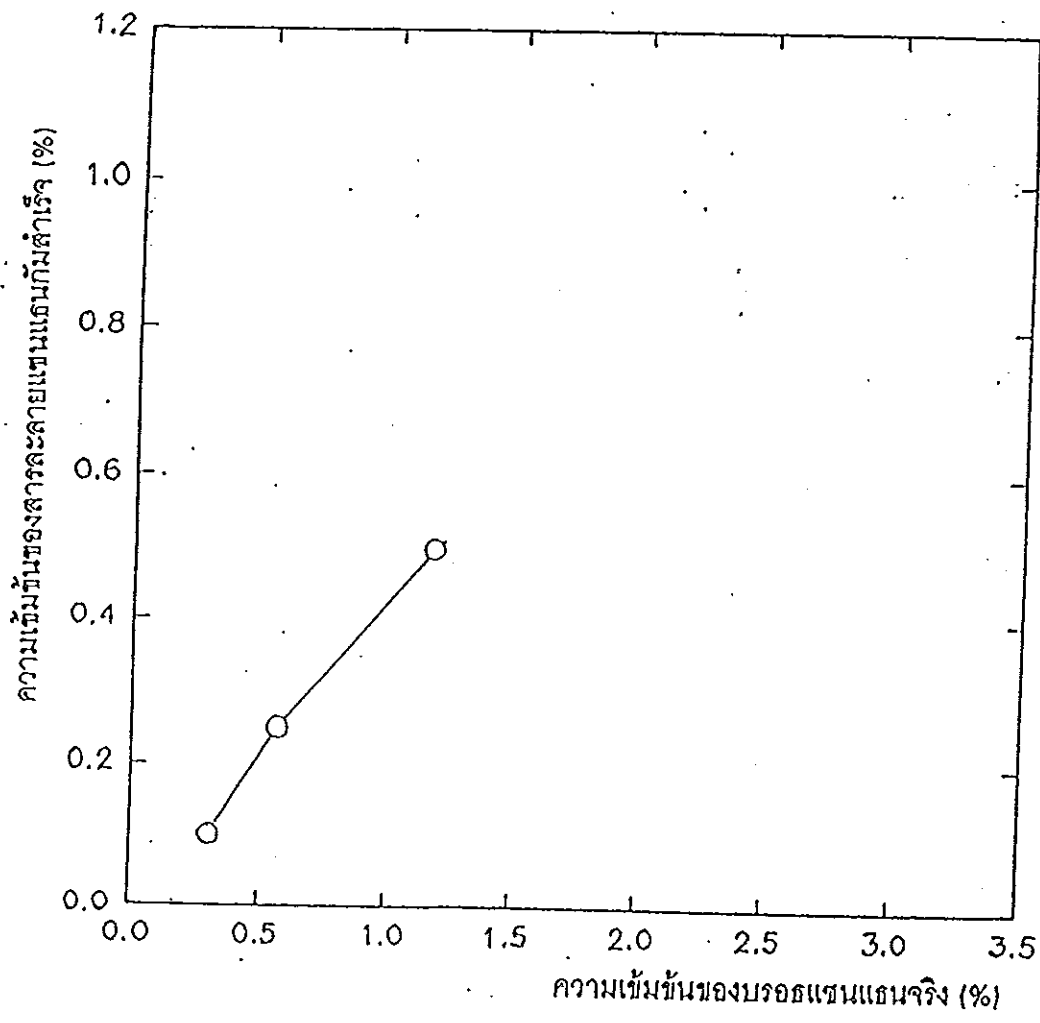
การเทียบเคียงสามารถทำได้โดยใช้สมการ (3.1) ที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ เนื่องจากลักษณะกราฟจากการทดลองที่ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการนี้เทียบเคียงในช่วงความถี่นี้ได้

จากรูปเส้นกราฟ $G' - \omega$ จากผลการทดลองนี้ไม่ขนานไปกับเส้นกราฟของบรอร์จริงทั้งเส้นนั้น อาจมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดในการทดลอง หรือปัจจัยอะไรบางอย่างที่ทำให้มีการเบี่ยงเบนไปโดยที่ไม่สามารถบอกได้ชัดเจน แต่โดยภาพรวมแล้วเส้นกราฟจากการทดลอง (สารละลายแซนแทรน) ไม่ได้แตกต่างไปจากบรอร์จริงมากนัก

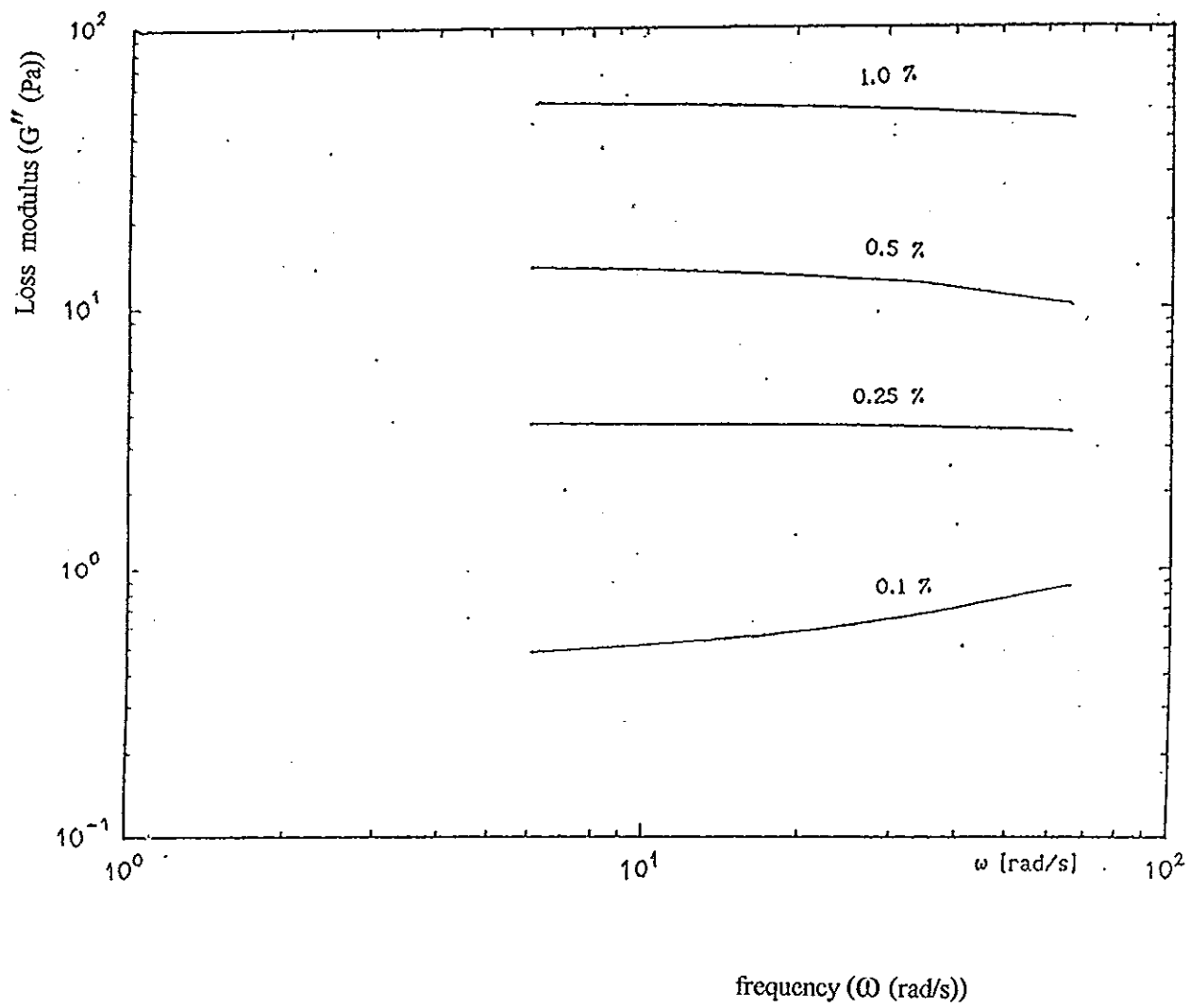
ในการเทียบเคียง สมการ (3.1) เข้ากับข้อมูลจากการทดลอง $G' - \omega$ ของสารละลายแซนแทรนกัมในช่วงที่พิจารณา เพื่อให้ได้ค่า C (Elastic intensity Index) และ P (Elasticity Index) ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลายกัมสำเร็จ และจากสมการ (3.2) พบว่า P เป็นฟังก์ชันของ C ดังนั้นจึงเลือกพิจารณา C กับความเข้มข้นของสารละลายกัมสำเร็จ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับของบรอร์จริง (ภาพที่ 3.13) เมื่อพิจารณาเทียบเคียงระหว่างความเข้มข้นของกัมสำเร็จกับความเข้มข้นของบรอร์จริงโดยพิจารณาจากค่า C ที่เท่ากันให้ผลแสดงในภาพที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้น



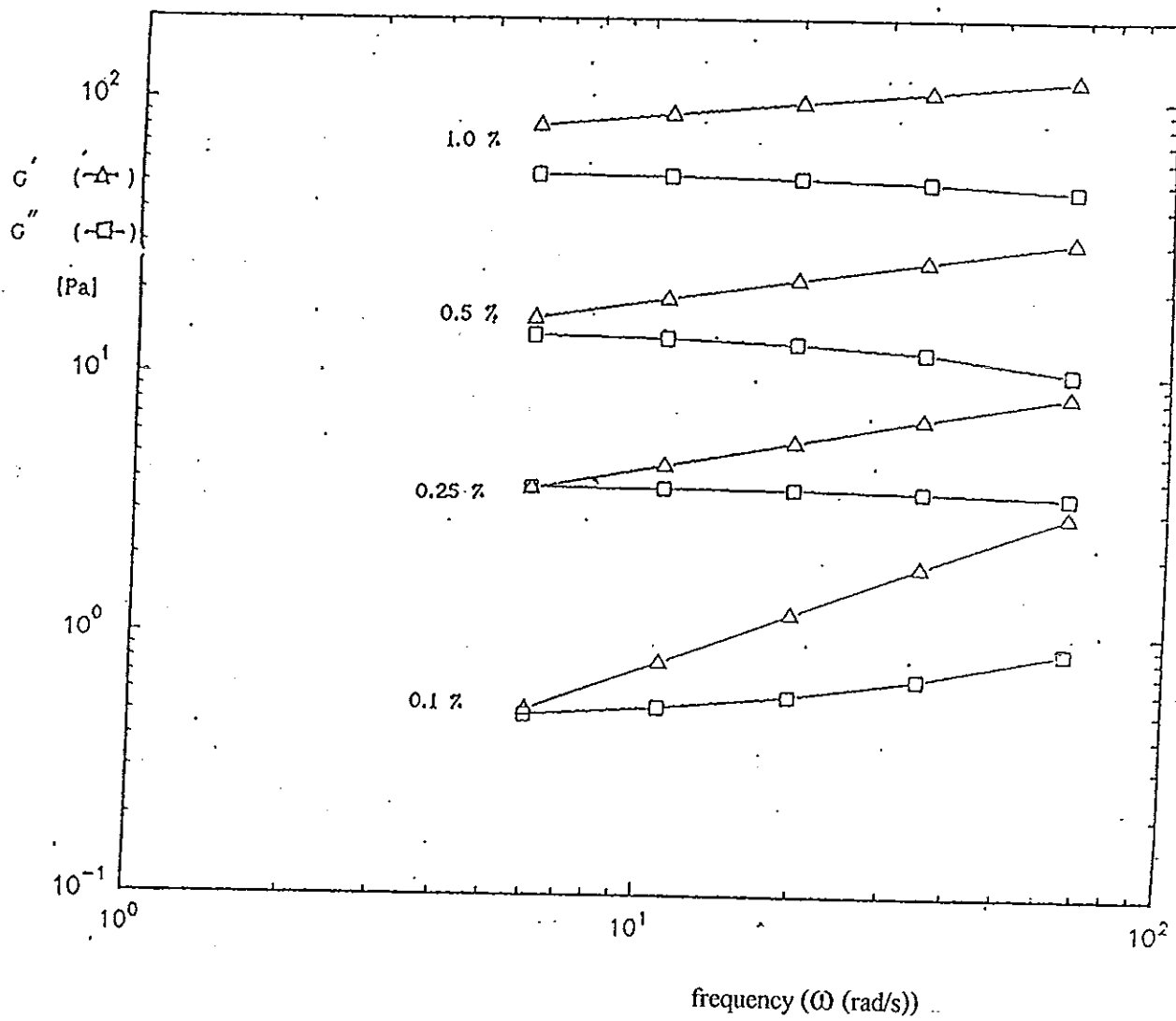
ภาพที่ 3.13 Elastic intensity index (C) กับความเข้มข้นของสารละลายเซนแทนกัม
เปรียบเทียบกับบรอดเซนแทนจริง



ภาพที่ 3.14 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแก้มต่ำเร็วกับความเข้มข้นของบรอร์แซนแรนจริง โดยการพิจารณาจากค่า Elastic intensity index (C)



ภาพที่ 3.15 Loss modulus (G'') กับ frequency (ω) ของสารละลายแซนแทนกับสำเร็จ
ความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 3.16 Storage modulus (G') และ Loss modulus (G'') กับ frequency (ω) ของสารละลาย
 แชนแรนความเข้มข้นร้อยละ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

ของบรอร์จริงจะเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของกัมสำเร็จที่มีค่าลดลง ตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของบรอร์จริงร้อยละ 0.57 โดยน้ำหนักเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของกัมร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

ในการเทียบเคียง G'' จากผลการทดลองนี้พบว่า G'' ค่อนข้างคงที่ในช่วงที่พิจารณา ภาพที่ 3.15 และค่า G' จะมีค่าเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างมากกว่า G'' (ภาพที่ 3.16) เมื่อเทียบเคียงกับกราฟ $G'' - \omega$ ของสารละลายกัมสำเร็จกับของบรอร์จริงได้ผล ซึ่งจะเห็นว่าไม่สามารถเทียบเคียงกราฟ $G'' - \omega$ ระหว่างสารละลายแซนแรนกับกับบรอร์จริงได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าหลังการถูกคัดแปลงทางกายภาพและเคมีแล้ว แซนแรนกัมมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นการใช้สารละลายกัมสำเร็จในการศึกษาเพื่อการออกแบบถังหมักจริงต้องทำอย่างระมัดระวัง และต้องรู้ข้อจำกัดอย่างชัดเจน

1.3.2 การทดสอบการเลื่อนเป็นวง (Rotation (K (consistency index), n (Pseudoplastic index))

Pinches และ Pallent (1986) ได้แสดง power-law relationship ดังนี้

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n$$

$$K = a(p)^b \quad (3.4)$$

$$n = \frac{\ln(\tau_0/K)}{\dot{\gamma}_0}$$

โดยที่

$$a = 0.051 \text{ Pa s}^n \text{ g}^{-b} \text{ L}^b$$

$$b = 2.47$$

$$\dot{\gamma}_0 = 11.7611 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_0 = 49.61 \text{ Pa}$$

p คือ ความเข้มข้นของแซนแรน หน่วย กรัมของแซนแรน/หน่วยกิโลกรัมของสารละลาย

1.3.2.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของสารละลายแซนแรนกัม หลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง τ และ γ จากข้อมูลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.17 และเมื่อเฉลี่ยค่าจากการทดลองทุกชุดข้อมูล และนำไปเทียบกับของบรอร์จริง ดังแสดงในภาพที่ 3.18 จากกราฟทั้งสองพบว่า ช่วงแรกๆที่ γ ต่ำๆ ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งมนขึ้นต่างจากของบรอร์จริง ทั้งนี้เป็นเพราะว่ายังเป็นช่วงแรกของการทดลอง โมเลกุลยังมีการพันกัน (entanglement) มากอยู่ ต่อไปเมื่อเพิ่มขึ้นสักระยะหนึ่ง โมเลกุลเริ่มจัดเรียงตัวกันมากขึ้น จึงให้กราฟออกมาค่อนข้างราบเรียบ (smooth) และใกล้เคียงบรอร์จริง

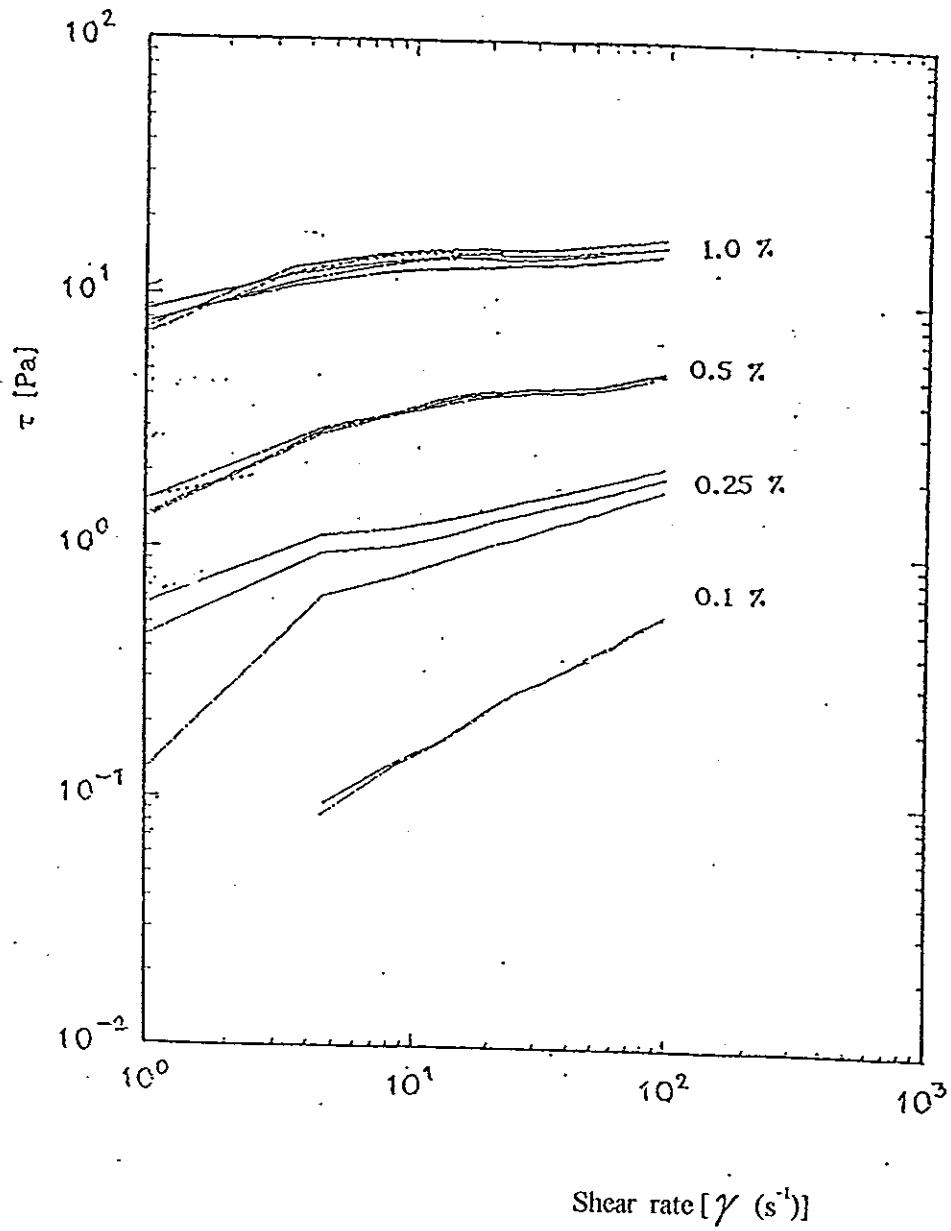
1.3.2.2 เทียบเคียงระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนกับบรอร์จริง โดยพิจารณาจากค่า K และ n ที่เท่ากัน

เมื่อพีตข้อมูลการทดลอง ค่า τ และ γ ด้วยสมการ (3.4) ได้ค่า K และ n ของสารละลาย กัมตำเรียงเทียบกับบรอร์จริง และเมื่อเฉลี่ยค่า K และ n จากข้อมูลทุกชุดข้อมูลการทดลอง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.20 เมื่อพิจารณา n กับความเข้มข้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ สารละลายแซนแรนจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงน้ำ ดังนั้นบรอร์จริงและสารละลายกัมตำเรียงจึงมีค่า n ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นกลางๆ สารละลายแซนแรนก็มีค่า n สูงกว่าของบรอร์จริง แสดงว่าสารละลายกัมจะ shear thinning มากกว่า นั่นคือ เมื่อเปลี่ยนอัตราการเฉือน สารละลายกัมสำเร็จจะอ่อนตัวลงเร็วกว่าบรอร์จริง แต่ยังคงค่าที่สูงกว่าบรอร์จริงที่ความเข้มข้นสูงๆ สารละลายกัมจะมีค่า n ใกล้เคียงกับบรอร์จริงที่ซึ่งอาจเป็นผลในระดับโมเลกุลที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ในที่นี้

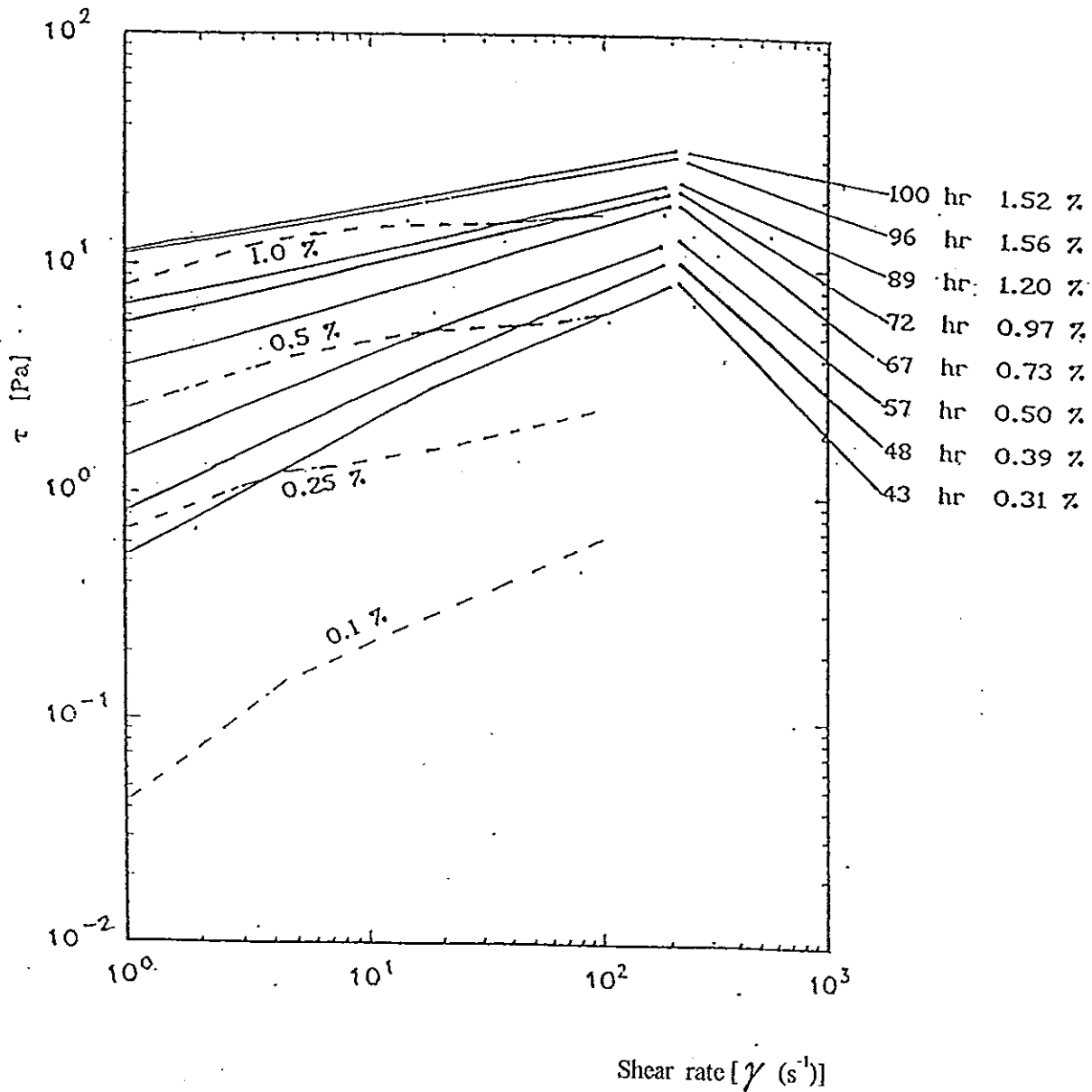
จากที่อธิบายข้างต้นสอดคล้องกับกราฟการเทียบเคียง $G' - \omega$ เช่นกัน คือ ที่อัตราการเฉือนต่ำๆและสูงๆ ค่า G' ของสารละลายกัมสำเร็จและบรอร์จริงที่มีความเข้มข้นเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกัน อธิบายโดยพิจารณาในระดับโมเลกุล ที่อัตราเฉือนต่ำๆผลการ modified ทางเคมีไม่แสดงอิทธิพล จะแสดงในช่วงกลางๆของอัตราเฉือน เมื่ออัตราการเฉือนสูง เส้นกราฟของสารละลายกัมสำเร็จจะลดลงมาเท่ากับของบรอร์จริง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่เกิดการคัดแปรไว้นั้นหายไปที่อัตราเฉือนสูงๆ ยกตัวอย่างเช่น การคัดแปรทำให้เกิดการพันกัน (entanglement) ในระดับโมเลกุล เมื่ออัตราเฉือนสูงๆทำให้การพันกันนั้นหมดไป

1.3.2.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนกับบรอร์จริง โดยพิจารณาจากค่า K , n และ c ที่เท่ากัน

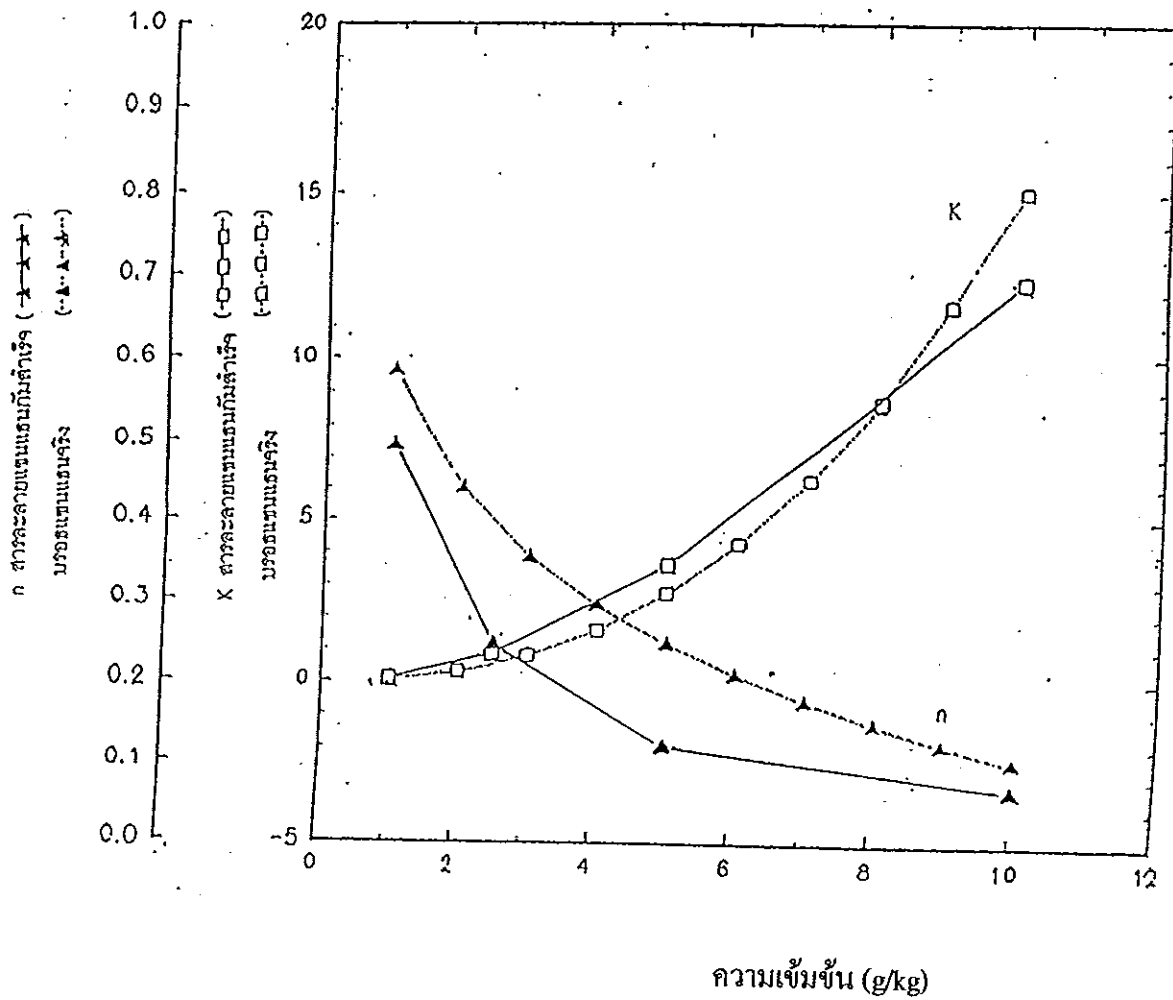
จากภาพที่ 3.19 เมื่อพิจารณาเทียบเคียงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกัมสำเร็จกับความเข้มข้นของบรอร์จริง โดยพิจารณาจากค่า K และ n ที่เท่ากันตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับที่พิจารณาเทียบเคียงความเข้มข้นจากค่า C ที่เท่ากัน ดังจะเห็นได้จากกราฟภาพที่ 3.20 นั่นคือความเข้มข้นของบรอร์จริงส่วนใหญ่จะถูกเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของกัมสำเร็จที่มีค่าลดลง



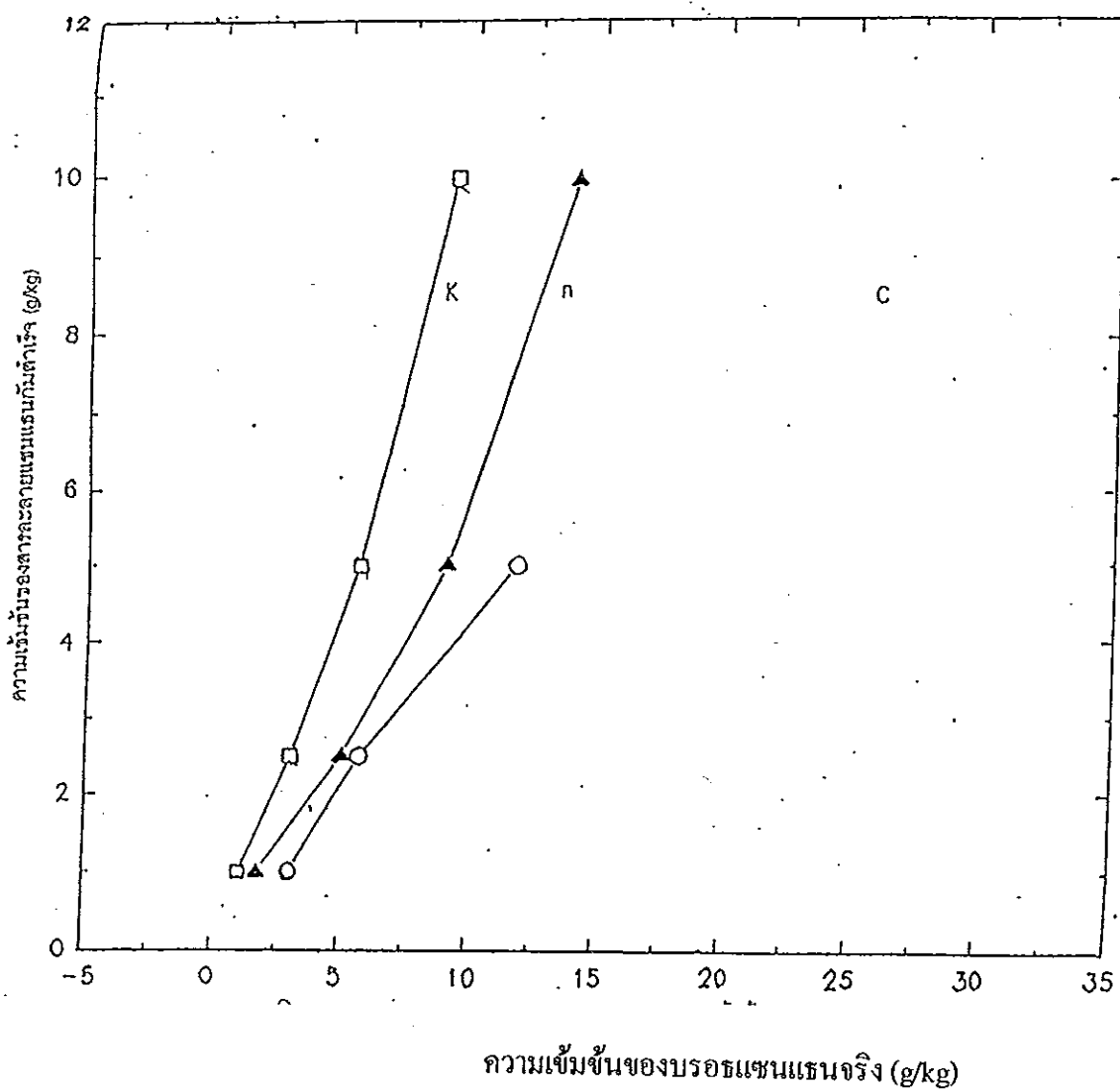
ภาพที่ 3.17 ข้อมูล Shear stress (τ) กับ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ของสารละลายเซนแทนความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)



ภาพที่ 3.18 ข้อมูล Shear stress (τ) กับ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ของ (.....) สารละลายเซนแซน ความเข้มข้น 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยนำหน้าจากการทดลองนี้เทียบกับ (—) บรรทัดจริงในช่วงเวลาการหมักต่างกันจากการทดลองของ Siripattana (1992)



ภาพที่ 3.19 ค่าเฉลี่ย Consistency index (K), Power law index (n) กับความเข้มข้นของ บรอรจริง เทียบกับสารละลายแซนแทนกับ



ภาพที่ 3.20 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกับกับบรอกแซนแซนจริง โดยพิจารณาจากค่า Consistency index (K), Power law index (n) และ Elastic intensity index (C)

G' คือ storage modulus	บอกถึง สมบัติยืดหยุ่น
G'' คือ loss modulus	บอกถึง ความเป็นของเหลว
K คือ consistency index	บอกถึง สมบัติความหนืด
n คือ pseudoplastic index	บอกถึง พฤติกรรมการไหลของของไหล

ในการทดลองต่อไปนี้ทั้งหมด สำหรับการเทียบเคียงสารละลายแซนแทรนกันสำเร็จกับบรรดแซนแทรนจริงจะใช้ภาพที่ 3.20 นี้ เพราะพิจารณาว่าความยืดหยุ่นและความหนืด แม้จะมีความสำคัญต่างกันแต่ไม่สามารถอธิบายได้ในขณะนี้

2. ผลการศึกษาการใช้กำลังในการกวนของไหลนอน - นิวโตเนียน

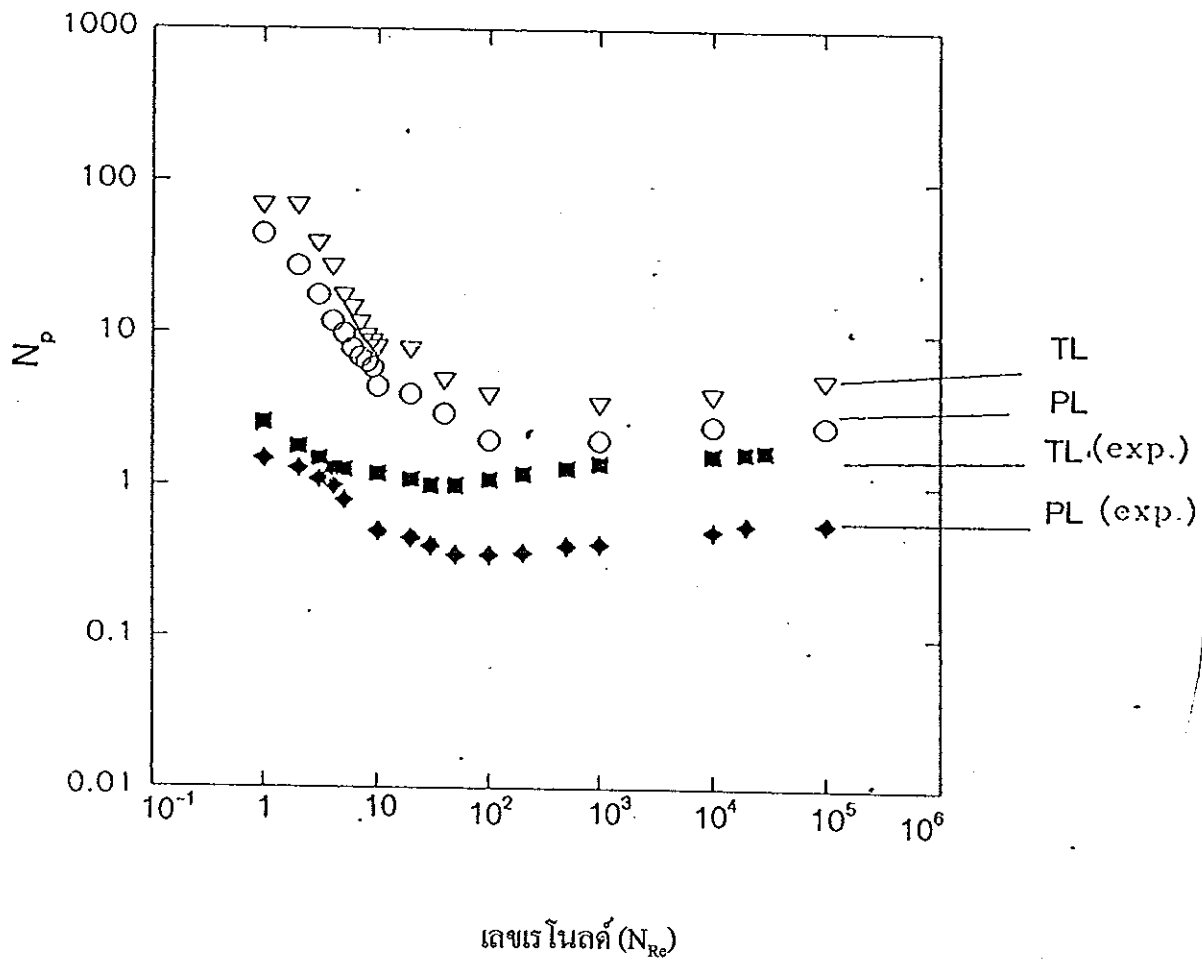
2.1 ผลการเปรียบเทียบกำลังในการกวนของไหลนอน - นิวโตเนียนกับผลการทดลองของผู้วิจัยอื่น

จากผลการทดลองโดยใช้สารละลายแซนแทรนกันที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาที่ระดับความสูงของสารละลายเท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.30 เมตร ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดกลืนกำลังของใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.105 เมตร มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Bate และคณะ (1963) ภาพที่ 3.21 ซึ่งทดลองกับของไหลนอน - นิวโตเนียน มีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งรูปแบบ ชนิด ขนาดของใบกวน และถึงกวน พบว่าที่ค่าเลขเรโนลด์ส์ค่า (ความหนืดสูง มีการไหลแบบลามินาร์) ค่าของเลขกำลังจะลดลง และเมื่อค่าเลขเรโนลด์ส์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10 - 100 (การไหลแบบทรานสิชั่น) ค่าของเลขเรโนลด์ส์มีค่าสูงกว่า 100 ค่าของเลขกำลังจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะเห็นว่าในกรณีนี้สารละลายแซนแทรนซึ่งเป็นของไหลนอน - นิวโตเนียน จะมีแนวโน้มที่จะดูดกลืนกำลังน้อยกว่าของไหลนิวโตเนียนที่มีค่าเลขเรโนลด์ส์เท่ากันและใบพัดแบบเทอร์ไบน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับใบพัดแบบพิตช์เบดลจะมีการใช้กำลังมากกว่าประมาณ 2 เท่าซึ่งหากจะพิจารณาว่าใบกวนชนิดใดเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน จะต้องศึกษาผลของการผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมว่าใบกวนชนิดใดมีค่าเวลาในการผสมน้อยและมีค่าการดูดกลืนกำลังน้อยซึ่งเป็นลักษณะที่ดีสำหรับการนำไปใช้

2.2 ผลของความสูง ชนิด และขนาดของใบกวนต่อการใช้กำลังในการกวน

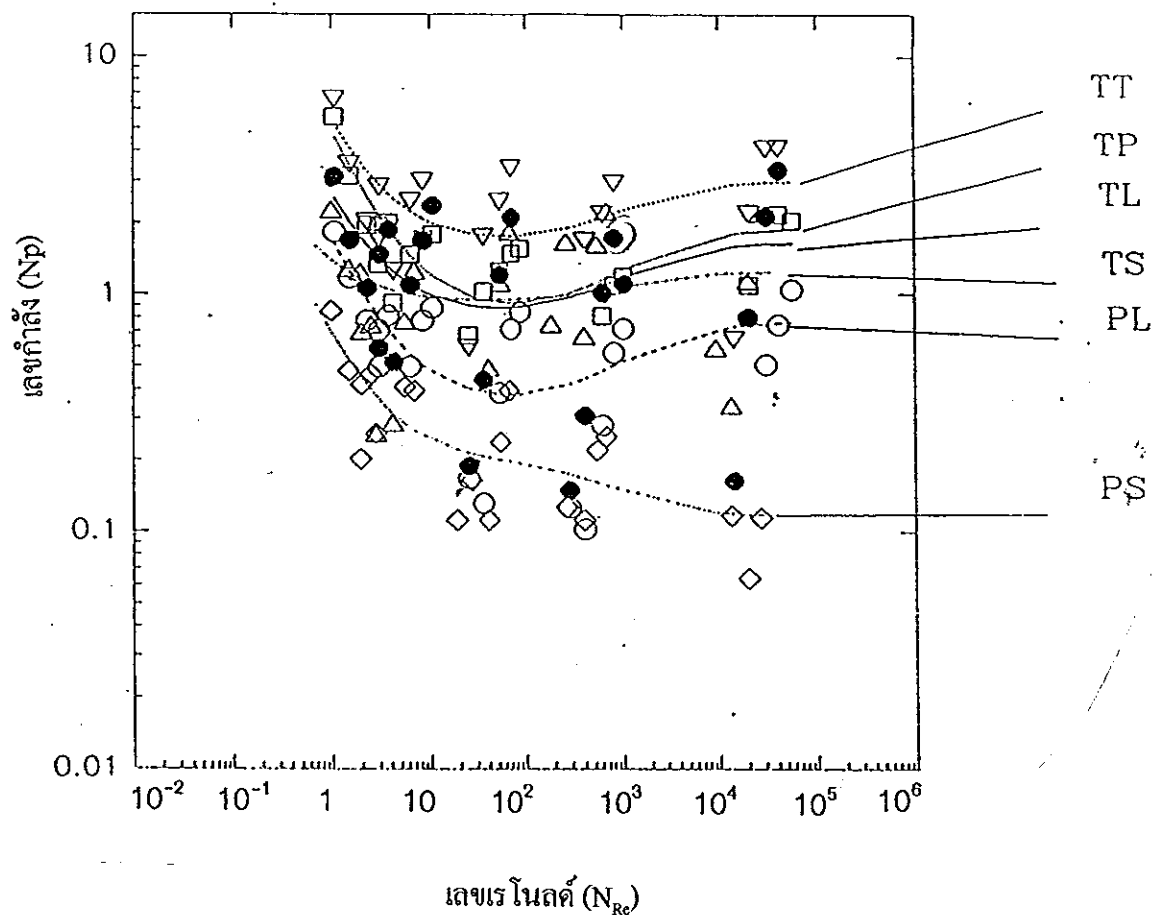
จากการทดลองโดยใช้ใบกวน 6 ชนิด โดยในการกวนสารละลายแซนแทรนกันที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่าความสูงของระดับของของเหลวไม่มีผลต่อการดูดกลืนกำลังอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นผลการทดลองที่เสนอต่อไปนี้จึงเสนอเฉพาะระดับ

ความสูงของสารละลายที่ระดับ 0.25 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.22 - 3.24 สำหรับที่ระดับความสูงของของเหลวเท่ากับ 0.20 และ 0.30 เมตร (แสดงในภาคผนวก ง)



ภาพที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเร โนลด์และเลขกำลังของไบพัดแบบเทอร์ไบน์ และพิตเบลคที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับ Bate และคณะ (1963) ในสภาวะการทดลองเดียวกัน

- (∇) ไบพัดแบบเทอร์ไบน์ขนาดใหญ่ (TL) โดย Bate และคณะ (1963)
- (\circ) ไบพัดแบบพิตเบลคขนาดใหญ่ (TL) โดย Bate และคณะ (1963)
- (\blacksquare) ไบพัดแบบเทอร์ไบน์ขนาดใหญ่ (TL) ที่ได้จากการทดลอง
- (\blacklozenge) ไบพัดแบบพิตเบลคขนาดใหญ่ (TL) ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์และเลขกำลังของใบพัดทั้ง 6 ชนิด คือ TT, TP, TL, PL, TS และ TS ในสถานะที่ไม่มีอากาศ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ระดับความสูงของของเหลวเท่ากับ 0.20 เมตร

(.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TT)

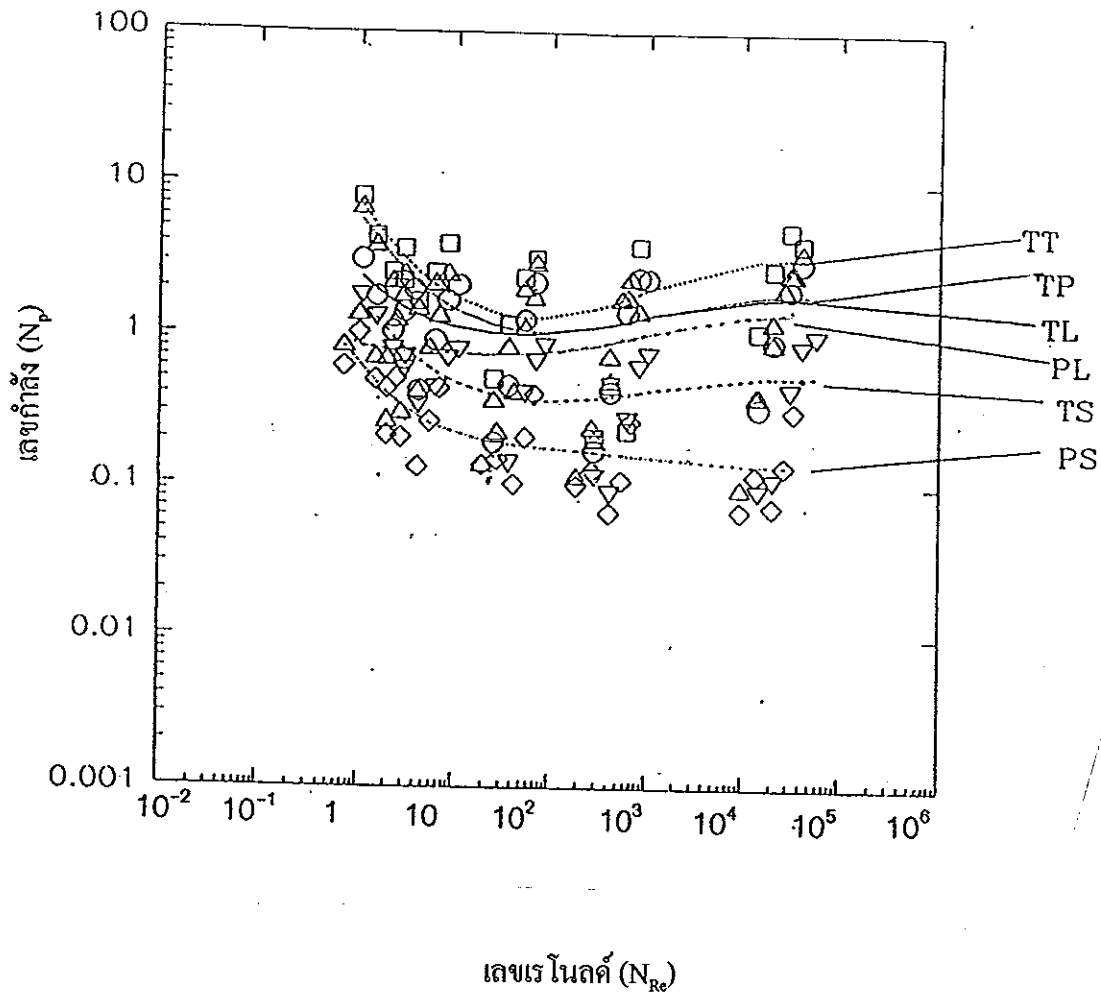
(.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์และพิทเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TP)

(——) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 1 ใบ (TL)

(- - - -) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (TS)

(- - - - -) ใบกวนแบบพิทเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบ (PL)

(- - - - -) ใบกวนแบบพิทเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (PS)



ภาพที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์และเลขกำลังของใบพัดทั้ง 6 ชนิด คือ TT, TP, TL, PL, TS และ TS ในสถานะที่ไม่มีอากาศที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ระดับความสูงของของเหลวเท่ากับ 0.25 เมตร

(.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TT)

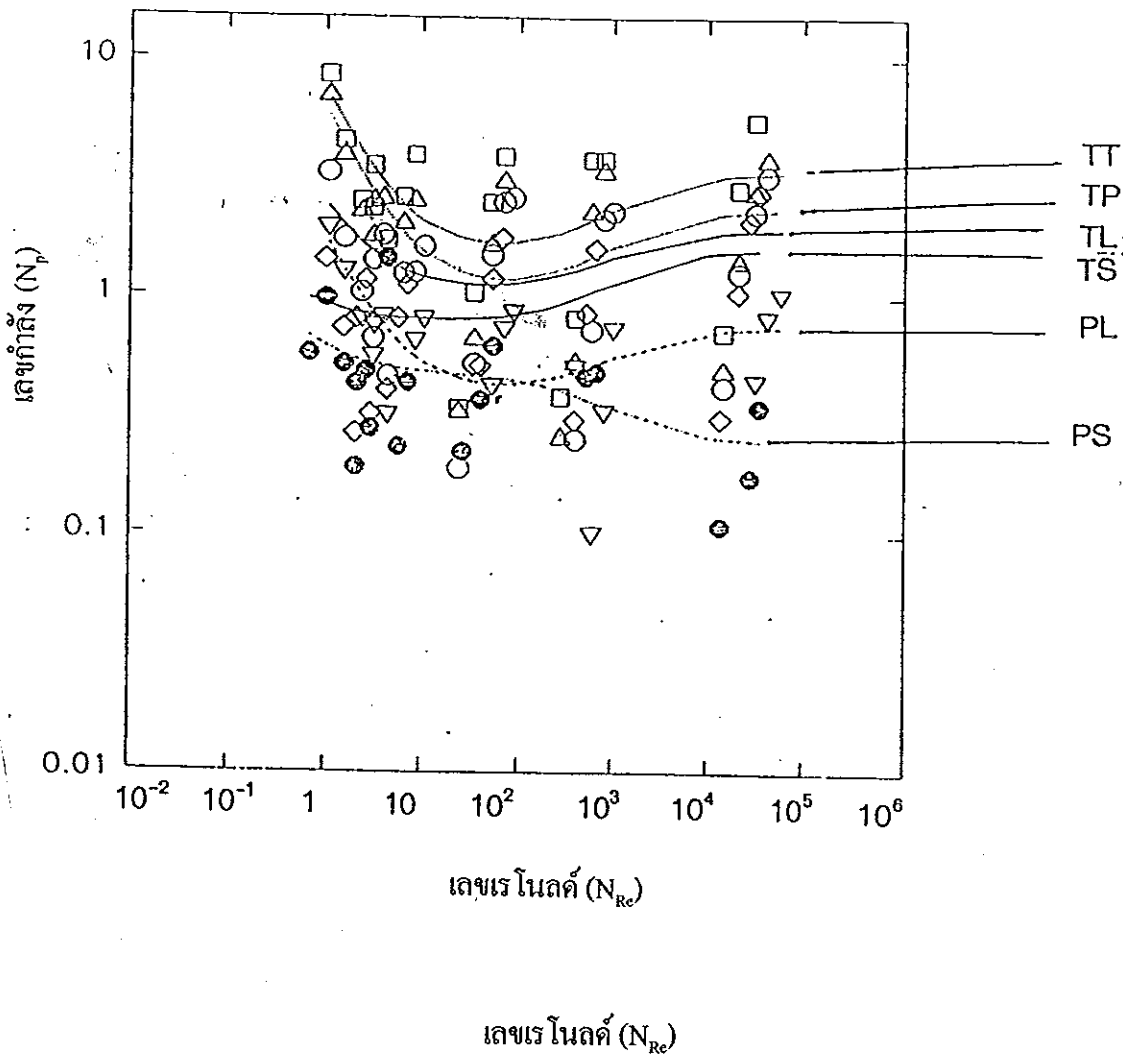
(.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์และพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TP)

(——) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 1 ใบ (TL)

(- - - -) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (TS)

(- - - - -) ใบกวนแบบพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบ (PL)

(- - - - -) ใบกวนแบบพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (PS)



ภาพที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์และเลขกำลังของใบพัดทั้ง 6 ชนิด คือ TT, TP, TL, PL, TS และ TS ในสภาวะที่ไม่มีอากาศที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ระดับความสูงของของเหลวเท่ากับ 0.30 เมตร

- (.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TT)
- (.....) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์และพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบคู่กัน (TP)
- (——) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 1 ใบ (TL)
- (- - - -) ใบกวนแบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (TS)
- (- - - -) ใบกวนแบบพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร 2 ใบ (PL)
- (- - - -) ใบกวนแบบพิตเบลคเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร 1 ใบ (PS)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเลขกำลังตรงจุดที่มีความแตกต่างกันชัดเจนที่สุด ซึ่งเลขเรโนลด์มีค่า 1.000 โดยประมาณ พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มไบพัตต์ที่มีการดูดกลืนกำลังแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรก คือ (PL, PS) กลุ่มที่ 2 คือ (TT, TP, TL) และกลุ่มที่ 3 คือ TS

การที่มีรูปแบบการวางไบพัตต์แบบเทอร์ไบน์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.105 เมตรคู่กัน จำนวน 2 ไบพัตต์ (ใช้สัญลักษณ์ TT) และไบพัตต์แบบเทอร์ไบน์และแบบพิทเบลค ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.105 เมตรคู่กัน (TP) จากกราฟพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วเมื่อไบพัตต์เพิ่มขึ้น 1 ไบพัตต์ คือ จากไบพัตต์แบบเทอร์ไบน์ (TL) เพียงใบเดียว เพิ่มจำนวนเป็น 2 ไบพัตต์ จะใช้ค่าการดูดกลืนกำลังเพิ่มเป็น 2 เท่า (ดังแสดงในภาพที่ 3.24)

จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันแต่ต่างชนิดกัน คือ ใบกวนแบบเทอร์ไบน์และใบกวนแบบพิทเบลค พบว่าใบกวนแบบเทอร์ไบน์ จะมีค่าการดูดกลืนกำลังมากกว่าแบบพิทเบลค ประมาณ 3 - 4 เท่าตลอดช่วงเลขเรโนลด์ ตั้งแต่ 1 - 1,000,000 (ตลอดช่วงของการทดลอง) ดังแสดงในภาพที่ 3.24

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าใบกวนแบบ TT, TP และ TL ไม่มีความแตกต่างในการดูดกลืนกำลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจจะเพราะว่าอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าทอร์ค มีความผันแปรในความเที่ยงตรงในการวัดค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลการทดลอง อย่างไรก็ตามโดยทางทฤษฎีแล้ว ใบกวนแบบ TT ก็มีการดูดกลืนกำลังมากกว่าใบกวนแบบ TP และ TL และใบกวนแบบ TP มีค่าการดูดกลืนกำลังมากกว่า TL ทั้งนี้เพราะการเพิ่มจำนวนไบพัตต์เข้าไป เกิดการกระทบระหว่างไบพัตต์และของเหลวมากขึ้นจึงทำให้ค่าการดูดกลืนกำลังมากกว่าการใช้ไบพัตต์เพียงใบเดียว ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.24

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรโนลด์ และค่าอัตราการใช้อากาศกับ P_g/P_o

ค่าการดูดกลืนกำลังของไบพัตต์ต่างๆที่ใช้ในการกวน เมื่อให้อัตราการใช้อากาศที่ระดับต่างๆกัน (ในช่วงอัตราการใช้อากาศเท่ากับ 0.07, 0.15, 0.30 และ 0.50 vvm)

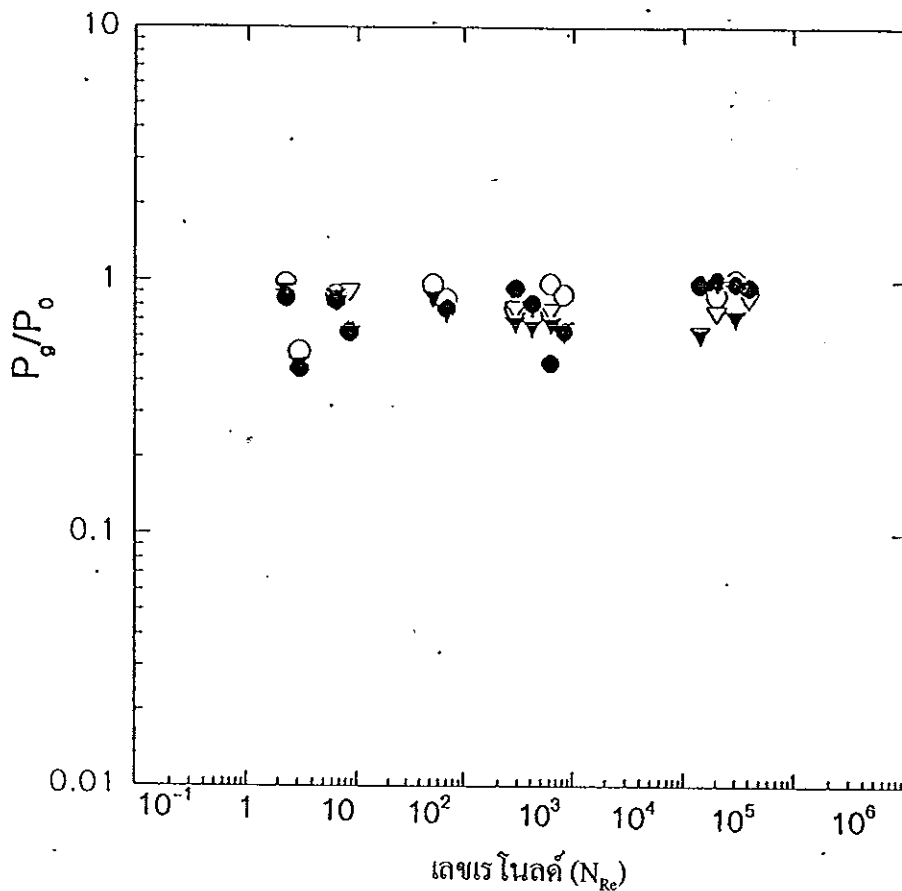
พบว่าเลขเรโนลด์ไม่มีผลต่อค่า P_g/P_o ที่ทุกระดับความเข้มข้น และทุกชนิดของไบพัตต์ (ภาพที่ 3.25) (แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก จ) ดังนั้นจึงไม่นำค่าเลขเรโนลด์ไปใช้ในการหาสหสัมพันธ์

2.4 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการใช้อากาศ และค่า P_g/P_o

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการใช้อากาศ และค่า P_g/P_o ของใบกวนแบบ PL, PS และ TS มีค่าผันแปรมาก และผลของเลขอัตราการใช้อากาศ (Na) ไม่ชัดเจน จึงพิจารณาเฉพาะใบกวนแบบ TT, TP และ TL พบว่าค่า Na และ P_g/P_o จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 0 และ 0.1 โดยน้ำหนัก ภาพที่ 3.26, 3.27, 3.28 และ 3.29 (รายละเอียด

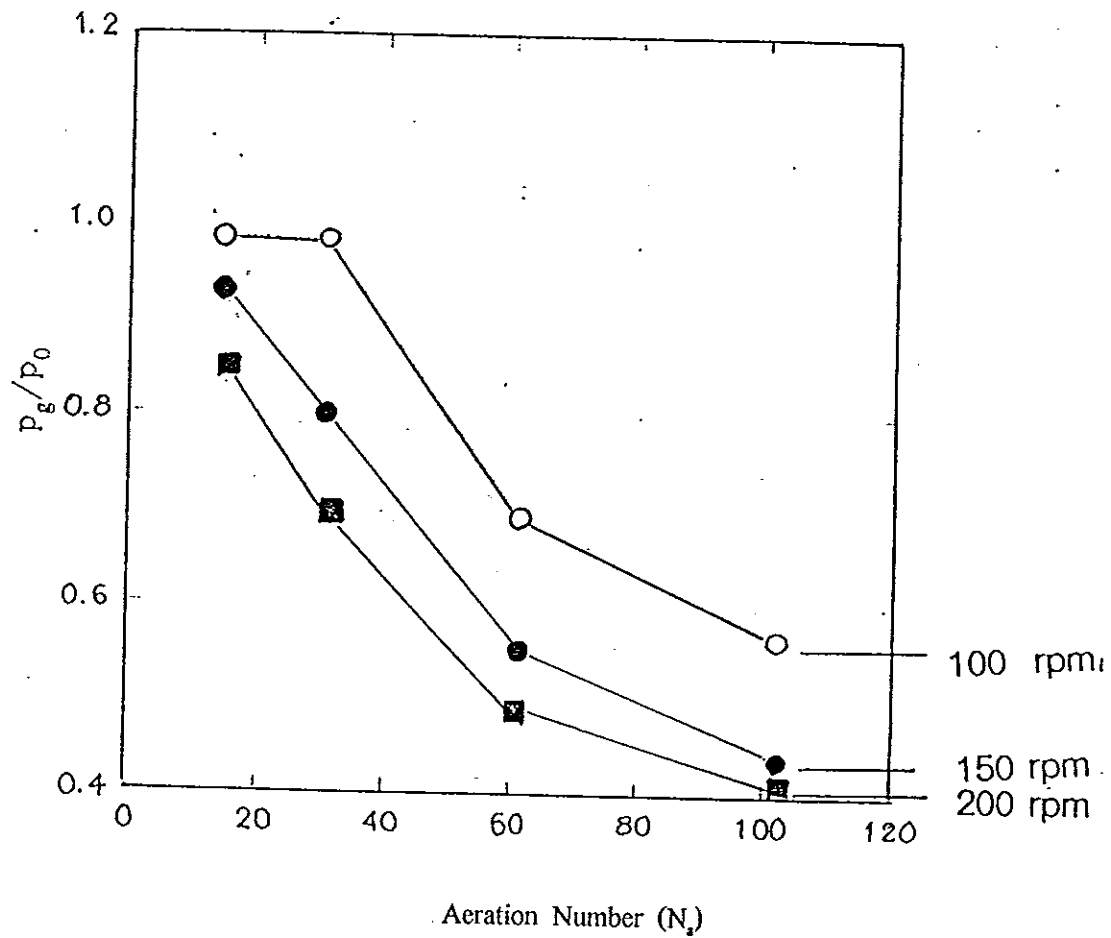
เพิ่มเติมในภาคผนวก ฉ) พบว่าใบกวนแบบ TL เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.25, 0.50 และ 1.0 ตามลำดับ ผลของอัตราการให้อากาศจะมีค่าน้อยลง สำหรับใบพัดแบบ TT มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน จะเห็นได้ว่าเมื่อระดับความเข้มข้นสูงมากอิทธิพลของการให้อากาศต่ออัตราการดูดกลืนกำลังมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นสูงจนถึงระดับร้อยละ 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก การเพิ่มอัตราการให้อากาศมีผลลดค่าน้อยมากต่ออัตราลดลงในการดูดกลืนกำลัง

สำหรับใบกวนชนิด TT และ TP ก็มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ฉ)



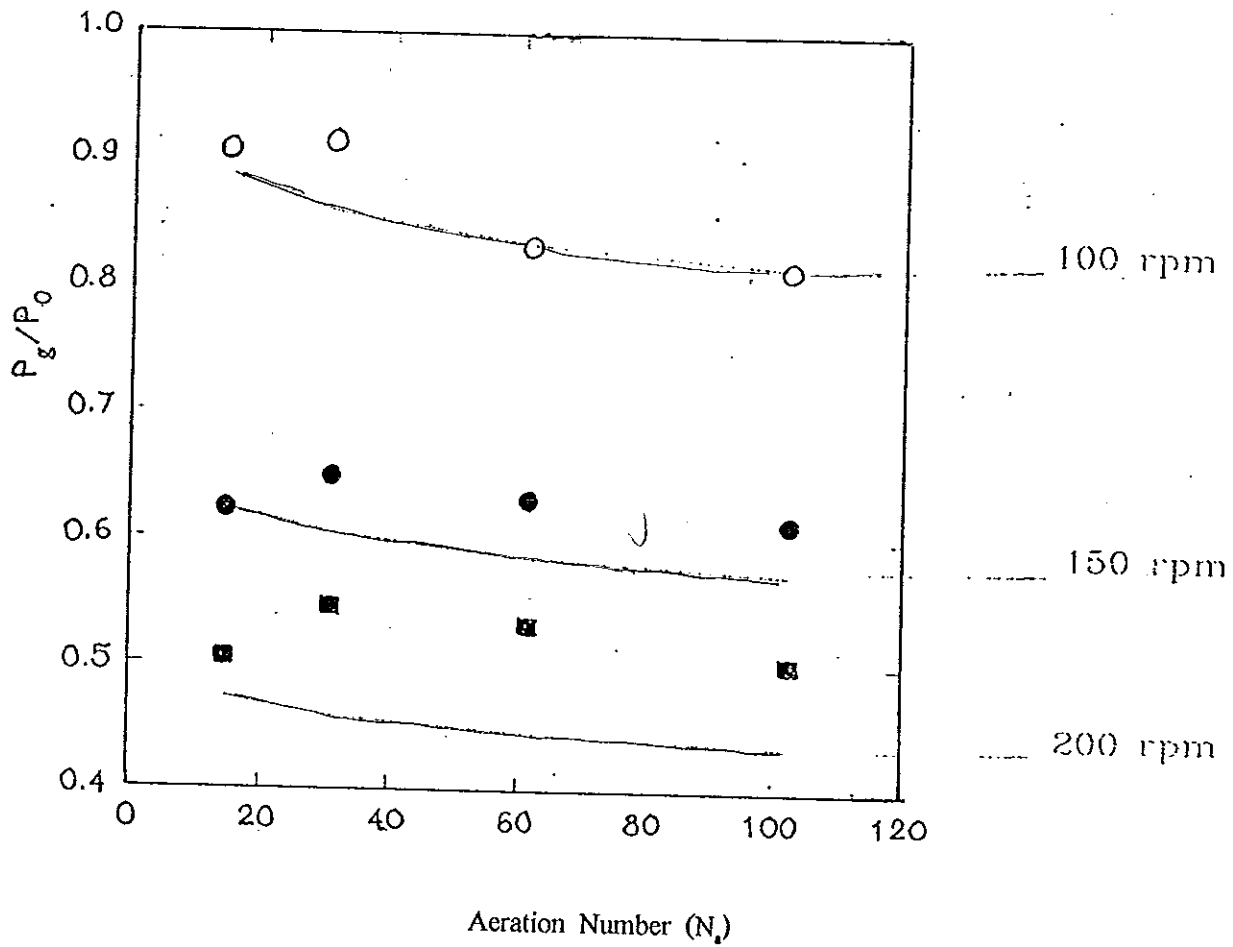
ภาพที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 และเลขเรโนลด์ของใบพัดแบบ TT ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายเซนแรนกันร้อยละ 0, 0.10, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

- (○) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.07 vvm
- (△) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.15 vvm
- (▼) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.30 vvm
- (●) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.50 vvm



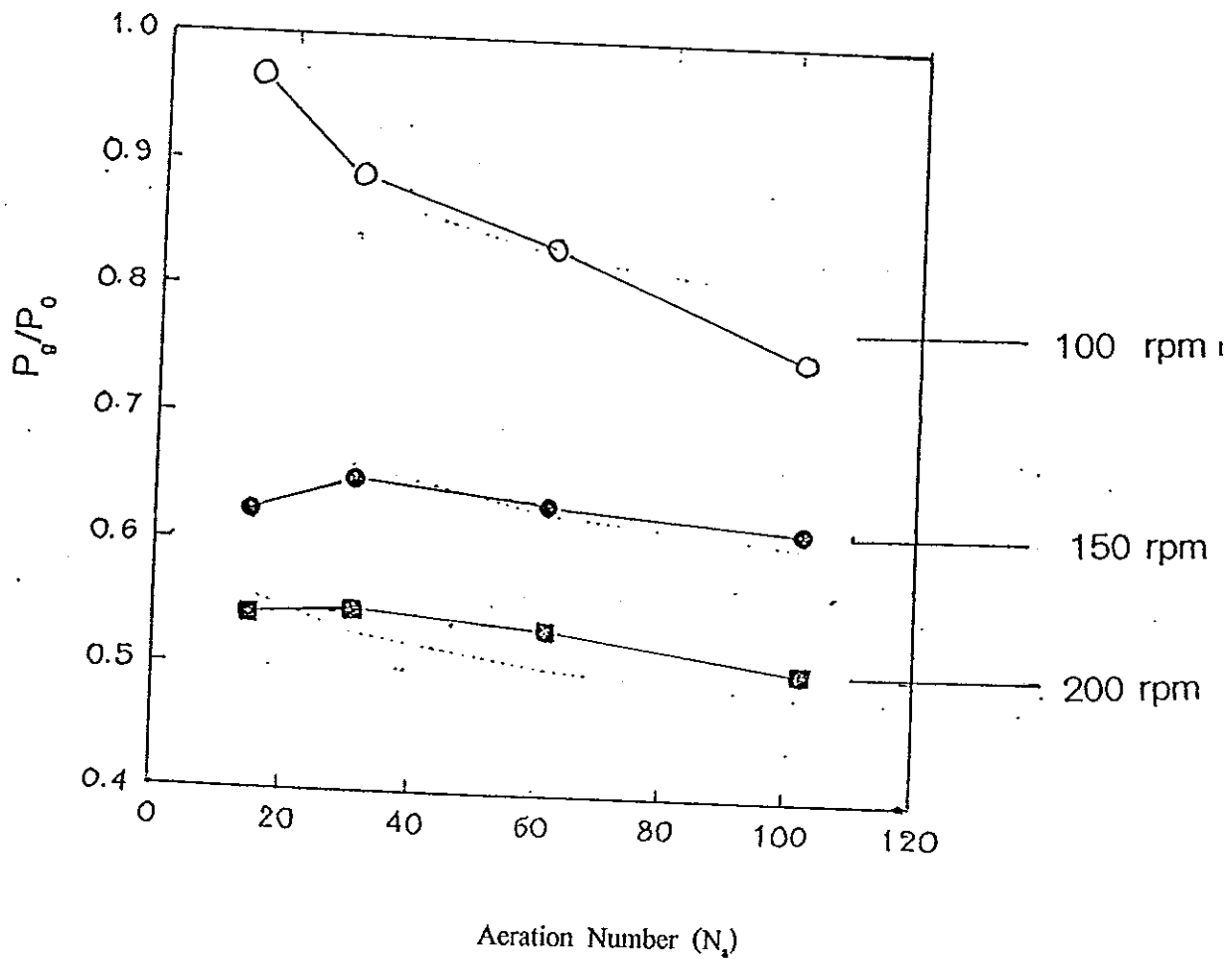
ภาพที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศของสารละลายแซนเทนกับ
ความเข้มข้น ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก โดยใช้ใบกวนแบบเทอร์ไบน์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร อัตราเร็วรอบ 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที

- (○) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.07 vvm
- (●) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.15 vvm
- (■) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.30 vvm



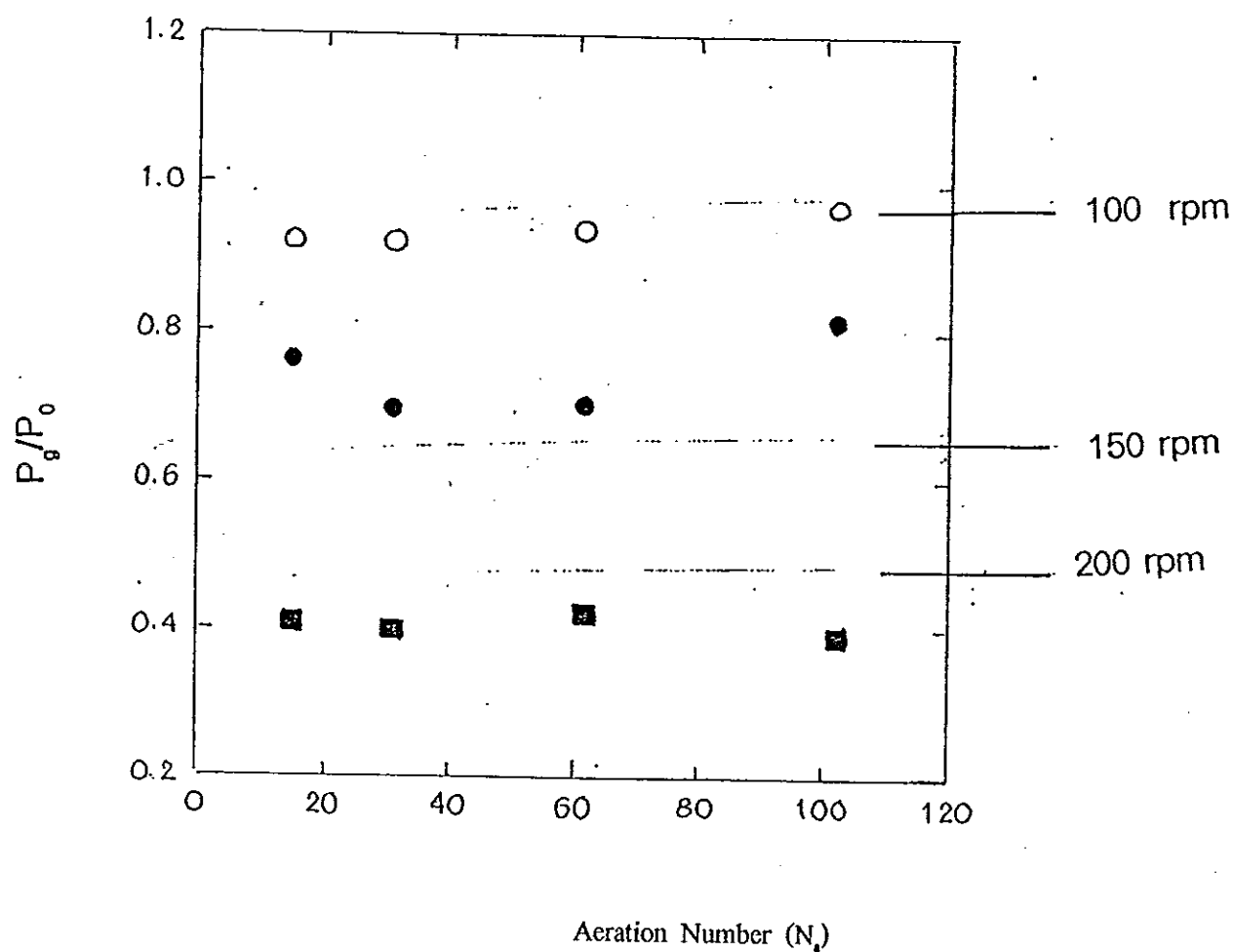
ภาพที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศของสารละลายแซนแทนกับ ความเข้มข้น ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก โดยใช้ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร อัตราเร็วรอบ 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที

- (○) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.07 vvm
- (●) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.15 vvm
- (■) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.30 vvm



ภาพที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 และอัตราการให้อากาศของสารละลายแซนแทนกับ ความเข้มข้น ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก โดยใช้ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร อัตราเร็วรอบ 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที

- (○) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.07 vvm
- (●) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.15 vvm
- (■) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.30 vvm



ภาพที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง P_g/P_0 และอัตราการให้อากาศของสารละลายแซนแรนกับ ความเข้มข้น ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก โดยใช้ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร อัตราเร็วรอบ 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที

- (○) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.07 vvm
- (●) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.15 vvm
- (■) อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.30 vvm

บทที่ 4

สรุป

จากการนำแนวความคิดในการศึกษาการเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นเข้ามาศึกษาการผสม การใช้กำลังในการกวนภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนที่ผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นส่วนแรกของการหมัก โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์โดยตรง โดยมีปัจจัยทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจะถูกละทิ้งออกจากส่วนที่ไม่เกี่ยวกับการหมัก และสุดท้ายจะเชื่อมโยงทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันอย่างมีเหตุผล โดยได้มีการพัฒนาเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยีเข้ามาเชื่อมสองส่วนเข้าด้วยกัน

จากการศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์จริง และของไหลจำลองซึ่งเลือกกรณีศึกษาโดยใช้สารละลายแซนแทนกับบรอร์แซนแทนจริง พบว่าสารที่ใช้ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์สำหรับสารละลายแซนแทนกับ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสามารถเทียบเคียงความเข้มข้นของบรอร์แซนแทนจริง ไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนที่มีค่าลดลง โดยสมบัติทางรีโอโลยีที่ใช้ในการศึกษา คือ สมบัติไดนามิก ซึ่งเป็นสมบัติของของไหลวิสโคอีลาสติก คือ ค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') กับ frequency (ω) พบว่าค่า G' มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่า G'' ที่ช่วงความถี่ 0.3 - 1.0 อดศา G' จะให้ค่าสูงและเสถียร ค่าความถี่สูงสุดคือ 0.75 อดศา สมบัติต่างๆ ทั้งทางด้านการเฉือนคงที่ (steady shear) ซึ่งเป็นสมบัติทางด้านความหนืด มาวัดค่า G' กับ ω เลือกสารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก หลังจากเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยีของของไหลจำลองและบรอร์แซนแทนจริงได้แล้ว จึงนำเอาของไหลจำลองมาใช้ในการศึกษาผลของรีโอโลยีเชิงซ้อน พบว่าความเข้มข้นของบรอร์จริงส่วนใหญ่ถูกเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของกัมสำเร็จที่มีค่าลดลง

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเกลือ พบว่าไม่มีผลใดๆต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีสำหรับอัตราการให้อากาศ ความเร็วรอบในการหมุน และลักษณะโครงสร้างของถังปฏิกรณ์ที่มีผลต่อการให้กำลังในการกวน พบว่าใบกวนแบบเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.105 เมตรคู่กัน 2 ใบ (TT) จะใช้กำลังในการกวนมากกว่าใบกวนแบบอื่นๆที่ใช้ในการศึกษาเนื่องจากใบกวนแบบเทอร์ไบน์มีการปะทะกับของไหลได้มากกว่าใบกวนแบบพิทเบลค ซึ่งจะทำให้มีผลต่ออัตราการให้กำลัง ใบกวนที่ใช้ในการกวนแบบเทอร์ไบน์และพิทเบลคคู่กัน (TP) จะใช้กำลังน้อยกว่าใบกวน

แบบเทอร์ไบน์คู่กัน (TT) 2 เท่า หากเพิ่มอัตราการให้อากาศในสารละลายเซนเซนกันจะทำให้ อัตราการใช้กำลังมีค่าลดลง และเมื่อสารละลายเซนเซนกันมีระดับความเข้มข้นสูงขึ้น อัตราการให้อากาศมีผลต่อการใช้กำลังลดน้อยลงมาก สำหรับใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร ทั้งแบบเทอร์ไบน์และพิทเบลค พบว่ามีค่าการใช้กำลังน้อยกว่า และความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรโนลด์และเลขกำลังที่ได้เป็นเพียงข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษากำลังจากรูปแบบของการกวนที่ได้สามารถนำไปใช้เชื่อมโยงต่อเนื่องไปยังการถ่ายโอนมวลสาร การหาลักษณะของการผสมที่ดี การเจริญเติบโตของเซลล์ อัตราการผลิต ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปออกแบบถึง ปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพจากจุลินทรีย์ได้ในที่สุด การศึกษาที่ต่อเนื่องเชื่อมโยง ได้แสดงในภาพที่ 1.9 โดยได้แสดงขอบเขตเส้นประแสดงการทดลองที่ได้ศึกษาไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

ในส่วนของข้อมูลการใช้กำลังในการผสมนั้นมีมากพอสมควร แต่เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำมาวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีขอบเขตจำกัดมาก การเก็บตัวอย่างที่ได้ในการทดลองไม่สามารถเก็บค่าของข้อมูลได้ในช่วงที่กว้างพอ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองต้องมีความเที่ยงตรง และเทคนิคในการเก็บตัวอย่างจะต้องมีการพัฒนาเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำ จากการศึกษาครั้งนี้ทำให้สามารถนำเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดของการศึกษาแบบการเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นมาประยุกต์ใช้ เทคนิคแนวคิดดังกล่าวยังต้องการนำไปพิสูจน์ในการประยุกต์ใช้กับงานในระดับอุตสาหกรรมจริง ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้ผลข้อสรุปที่ชัดเจนแล้วสามารถนำไปออกแบบขยายขนาด และหลังจากนั้นเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการทดลองเดิม ที่มีผู้ศึกษากันมาก โดยใช้ dimensionless analysis ศึกษาว่าแนวคิดของของการออกแบบและการขยายขนาดของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโคมีค่าการใช้กำลังน้อย มีการผสมที่ดีและให้ผลในการลดต้นทุนในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ปัญหาจากวิธีการเก็บข้อมูล

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่ากำลัง ให้ค่าทอร์ค ที่มีความผันแปรสูงมากสำหรับการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งของการทดลองทำให้ค่าทอร์คที่วัดได้มีค่าที่ผันแปรสูง
2. แกนของใบกวนที่ใช้ในการทดลอง เมื่อต่อกับมอเตอร์เกิดการหมุนที่ไม่ได้สมดุล มีผลต่อค่าทอร์คที่วัดได้ เนื่องจากมีแรงเหวี่ยงออกสู่ศูนย์กลาง

3. ปัจจัยจำกัดเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้อากาศภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมี ประสิทธิภาพในการให้อัตราอากาศได้ไม่สูงพอ เนื่องจากอุปกรณ์ไม่สามารถทนต่อแรงดันอากาศ ที่มีค่าสูงได้ จึงทำการทดลองได้ในช่วงที่จำกัด ทำให้มีผลการทดลองที่ได้ไม่ครอบคลุมเท่าที่ควร

เอกสารอ้างอิง

- Acharya., A and Ulbrecht, J. 1978. Note on the influence of viscoelasticity on coalescence rate of bubbles and drops, *AIChE J.* 24, 348.
- Anderson, C., LeGrys, G.A. and Solomons, G.L. 1982. Concept in the design of large - scale fermenters for viscous culture broth, *Chem. Eng. (London)*, February, 43 - 49.
- A.O.A.C. 1990. Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists 15th ed. Virginia : The Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Balmer, G.L., Moore, I.P.T. and Nienow, A.W. 1987. Aerated and unaerated power and mass transfer characteristic of Prochem agitators, In : *Biotechnology Progress : Scale up and mixing*, Ho, C, S. and Oldshue, J.Y. (eds.), *AIChE*, 116 - 127.
- Bate, R.L., P.L. Fondy, and R.R. Corpstein, *I & EC Des, Dev.*, 2, 4, 310, 1963.
- Bhavaraju, S.M., Russell, T.W.F. and Blanch, H.W. 1978. The design of gas sparged devices for viscous liquid system, *AIChE J.* 24, 454 - 460.
- Charles, M. 1985a. Fermentation scale - up : problems and possibilities, *Trends in Biotechnology* 3, (6), 164 - 139.
- Charles, M. 1985b. Fermentation scale - up in *Comprehensive Biotechnology*, Moo - Young, M., (ed.), Pergamon, Vol.2, pp. 57 - 75.
- Cottrell, I.W. 1980. Industrial potential of fungal and bacterial polysaccharide, *Acs Symp. Ser.*, 126, 251 - 270.

- Cottrell, I.W. and Kang, K.S. 1978. Xanthan gum, a unique bacterial polysaccharide for food application. *Dev, Ind. Microbiol.*, 19, 117 - 131.
- Crabtree, J.R. and Bridgwater, J. 1971. Bubbles coalescence in viscous liquids. *Chem. Eng. Sci.*, 26, 839 - 851.
- Deckwer, W- D, 1985. Bubble column reactors. In : *Biotechnology vo.2*, Rehm, H.J. and Reed, G. (eds), VCH, Weinheim, 444 - 464.
- Deckwer, W- D, Yonsel, S., Schluter, V. and Suh, I.S. 1990. Bubble column (air/lift) vs. Stirred tank reactor : compurison of various bioprocesses, *Proc. APBioChEC 90*, Kyngju, Korea, 461 - 466.
- De Kee, D., Carreau, P.J. and Miodarski, J. 1986. Bubble velocity and coalescence in viscoelastic liquids. *Chem. Eng. Sci.*, 41, 2273 - 2283.
- De Kee, D., Chhabra, R.P. and Dajan, A. 1990. Motion and coalescence/ of/ gas bubbles in Non - Newtonian polymer solutions, *J. Non - Newtonian fluid. Mecn.* 37, 1 - 18.
- De Nevers, N. and Wu, J.L. 1971. Bubble coalescence in viscous fluids, *AIChE. J.* 17, 182.
- Dussap, C.G., Gros, J.B. 1995. Fermentation agit'es sans organe d' agitation mecanique - Application a la production de polysaccharides exocellularies. *Bulletin de la Socie' te' Chimique de France* O. 1075 - 1082.
- Eliezer, E.D. 1987. Power absorption by the new and hybrid mixing system under gassed and ungassed condition de polysaccharides, In : *Biotechnology progress : Scale - up and mixing*. Ho, C.S. and Oldshue, J.Y.(eds.), 20 - 30.

- Elliott, J.H. 1977. Some rheological properties of gum solution, In : Extracellular Microbial polysaccharides. Sandford, P.A. and Laskin, A. (eds.), Am. Chem. Soc., Washington D.C., 144 - 159.
- Field, P.R., Mitchell, F.R. and Slater, N.K. 1984. Studies of mixing in a concentric tube air - lift reactor containing xanthan gum by means of an improved flow follower, Chem. Eng. Commun. 25, 93 - 104.
- Funahashi, H., Harada, H., Taguchi, H. and Yoshida, T. 1987a. Circulation time distribution and volume of mixing region highly viscous xanthan gum solution in a stirred vessel. J. Chem. Eng. Japan 20, 277 - 282.
- Funahashi, H., Harada, H., Taguchi, H. and Yoshida, T. 1987b. Effects of agitation by flat - blade turbine impeller on microbial production of xanthan gum. J. Chem. Eng. Japan 20, 16 - 22.
- Funahashi, H., Hirai, K.I., Yoshida, T. and Taguchi, H. 1988a. Mixing state of xanthan gum solution in an arotated and agitated fermentor - Effect of impeller size on volumes of mixing regions and circulation time distribution, J. Ferment. Technol. 66, 103 - 109.
- Funahashi, H., Hirai, K.I., Yoshida, T. and Taguchi, H. 1988b. Mechanistic analysis of xanthan gum production in stirred tank, J. Ferment. Technol. 66, 355 - 364.
- Gbewonyo, K., Dimasi, D. and Buckland, B.C. 1987. Characterization of oxygen absorption of hydrofoil impellers in viscous mycelial fermentation, In : Biotechnology progress : Mixing and scale - up, Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.), AIChE, 128 - 134.
- Gean Koplis, C.J. 1983. Transport Process and unit Operation 2nd. ed. Allyn and Bacon, Inc.

- Godbole, S.P., Hannath, M.F. and Shah, V.T. 1982. Hold up structure in highly viscous Newtonian and non - Newtonian liquids in bubble column, *Chem. Eng commun.* 16, 119 - 134.
- Godet, D. 1973. Fermentation of Polysaccharide gums, *Process Biochem.* 8, 1 : 33 - 34
- Hubbard, D.W. and Williams, C.N. 1978. Continuous/ fermenters for polysaccharide production, *Process Biochem.* 12, 10 : 11 - 13.
- Johnson, D.N. and Hubbard, D.W. 1974. Mixing by impeller/agitation in continuous flow systems containing polysaccharide solutions. *Biotechnol. Bioeng.* 16, 1283 - 1297.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1986a. Liquid Phase in bubble columns with Newtonian and non - Newtonian fluid, *Chem. Eng. Scr.* 41, 1969 - 1977.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1986b. Influence of non - Newtonian flow behavior and mass transfer in bubble columns with and without draft tubes, *Chem.Eng. Commun* 40, 67 - 83.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1987a. Influence of very small bubbles on $K_L a$ measurement in viscous microbiological cultures, *Biotechnol. Bioeng.* 30, 345 - 347.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1987b. Theoretical predictions of volumetric mass transfer coefficients in bubble columns for Newtonian and non - Newtonian fluids, *Chem. Eng. Scr.* 42, 1609 - 1607.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1988. Volumetric mass transfer coefficients in aerated stirred tank reactors with Newtonian and non - Newtonian fluids. *Chem. Eng. Res. Des.* 66, 284 - 288.

- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1989a. Liquid circulation time in concentric - tube airlift columns with non - Newtonian Fermentation broths. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 46 : 267 - 274.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1989b. Mixing time in bioreactors, *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 44, 63 - 75.
- Kawase, Y. and Moo - Young, M. 1990. Mathematical models for design of bioreactors : applications of isotropic turbulence, *Chem. Eng. J.* 43, 1319 - 1341.
- Kennedy, J.F. and Bradshaw, I.J. 1984. Production, properties and application of xanthan, *Progress in Industrial Microbiology* 19, 319 - 371.
- Kesler, W.R., Popovic, M.K. and Robinson, C.W. 1993. Xanthan production in an external circulation - loop airlift fermenter components, *Food technol*, March, 89 - 95.
- Leder, H.J. and Miescher, G.M. 1976. Process for the recovery of polysaccharide gum polymers. Apr. 25, U.S. Patent. 3, 316, 214.
- Levan, M.D. and Newman, J. 1976. The effect of surfactant on the terminal and interfacial velocities of bubble or drop. *AIChE. J.* 22, 695 - 701.
- MacKey, M.E. 1988. Rheology for the non - rheologist. University of Queensland.
- Mann, R. 1986. Gas - liquid stirred vessel mixer : towards a unified theory based on networks - of - zones. *Chem. Eng. Res.* 64, 23 - 24.
- MarGaritis, A and Pace, G.W. 1985. Microbial polysaccharides, In *Comprehensive biotechnology* (ed. M. Moo - Young). pp. 1005 - 10044. Pegamon Press.

- MarGaritis, A and Bokkel D. te. 1984. Rheology and air bubble terminal velocity measurements. In non - Newtonian polysaccharide solutions, paper presented at the 187th Annual meeting, Americal Chemical society. Philadelphia, August 26 - 38.
- MarGaritis, A and Zajic, J.E. 1978. Mixing, Mass transfer and scale - up of polysaccharide fermentation, *Biotechnol. Bioeng.* 20, 939 - 1001.
- McCabe, W.L. and Smith, J.C. 1956. Agitation and Mixing of liquid. In *Unit Operation of Chemical Engineering*. 2nd ed. pp. 241 - 279. New York. McGraw - Hill Book company, Inc.
- McNeely, W.H. 1966, 1968, 1969a, 1969b. Process for producing a polysaccharide. U.S. patent, 3, 232, 929 ; 3, 391, 061, 062 ; 3, 427, 226 ; 3, 433, 708.
- Michel, B.J. and Miller, S.A. 1962. Power requirment of gas - liquid agitated system, *AIChE J.* 8, 262 - 266.
- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1966. Kinetic of polysaccharide B - 1459 fermentation, *Biothecnol. Bioeng.* 8, 511 - 524.
- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1971. Xanthan biopolymer production at increased concentration by pH control. *Biothecnol. Bioeng.* 13, 381 - 391.
- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1973. Kinetic of xanthan fermentation. *Biothecnol. Bioeng.* 15, 225 - 237.
- Murugesan, T. and Degalessáfi, T.E. 1993. Power consumption of turbine impellers in gas - liquid contactors. *Indian. Chem. Eng.* 35 : 129 - 134.

- Narayanan, S., Goossens, L.H. and Kossen, N.W.F. 1974. Coalescence of two bubbles rising in at low Reynolds numbers, Chem. Eng. Sci. 29, 2071 - 2082.
- Nienow, A.W. and Elson, T.P. 1988. Aspects of mixing in rheologically complex fluids, Chem. Eng. Res. Des. 66, 5 - 15.
- Oliver, A.P.C. and Oosterhuis, N.M.C. 1988. Oxygen mass transfer in non - Newtonian fermentation systems, 8th Int. Biotechnol. Symp., Paris, Durand, G. and Bobichon, L. (eds.), 398 - 407.
- Pace, G.W. and Coote, S.D.J. 1981. Xanthan gum by fermentation. Eur. Pat. Appl. 32, 283A.
- Pace, G.W. and Righelato, R.C. 1980. Production of extracellular polysaccharide, Adv. Biochem. Eng. 151, 41 - 70.
- Peters, H.U., Herbst, H., Hesselink, P.G.M., Lunsdon, 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.G. and Gros, J.B. 1990. Xanthan batch fermentation : compared performances of a bubble column and a stirred tank fermentor, Bioprocess Eng. 5, 107 - 114.
- 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.
- Rocheftort, W.E. and Middleman, S. 1987. Rheology of Xanthan gum : salt, temperature and strain effects. In oscillatory and steady shear experiments. J. Rheol. 12, 329 - 335.

- Rogovin, S.P., Anderson, R.F. and Cadmus, M.C. 1961. Production of polysaccharide with *Xanthomonas campestris*. J. Biochem. Micro. Technol. Eng. 3(1), 51 - 63.
- Sandford, P.A., Pittsley, J.E., Knutson, C.A., Cudmus, M.C. and Jeans, A. 1977. In : Extracellular microbial polysaccharide. Sandford, P.A., Laskin, A. (eds.) AM. Chem. Soc., Washington D.C., 192 - 209.
- Schramm, G. 1981. Haake Viscometers : Introduction to practical viscometry.
- Schugerl, K. 1981. Oxygen transfer into high viscous media, Adv. Biochem. Eng. 19, 17 - 174.
- Schugerl, K. 1982. New bioreactors for aerobic processes, Int. Chem. Eng. 22, 591 - 609.
- Siripatana, C. 1992. Xanthan Broth Rheology and Mixing in a Stirred Tank Containing The Rheologically Complex Liquids, Rh D. Thesis, Department of Chemical Engineering University of Queensland, Australia.
- Sitting, W. 1982. The present state of fermentation reactors, J. Chem. Technol Biotechnol. 32, 47 - 58.
- Solomon, J., Nienow, A.W. and Pace, G.W. 1981a. Cavern size in agitated fluids with a yield stress, Chem. Eng. Commun. 11, 143 - 164.
- Solomon, J., Nienow, A.W. and Pace, G.W. 1981b. Flow patterns in agitated plastic and pseudoplastic viscoelastic fluids, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. 64, A1 - A13.
- Souw, P. and Demain, A.L. 1979. Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris*. NRRL B1459, Appl. Environ. Microbial 37, 1186 - 1192.
- Steiski, J. and Potucek, F. 1985. Oxygen transfer in liquid, Biotech, Bioeng. 27, 503 - 508.

- 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.
- Thuaston, G.B. 1981a. Shear rate dependence of the viscoelasticity of Polymer solutions :
1) Theoretical Model, *J. Non - Newtonian. Mech.* 9, 57 - 68.
- Thuaston, G.B. 1981b. Shear rate dependence of the viscoelasticity of Polymer solutions :
2) Xanthan gum, *J. Non - Newtonian. Mech.* 9, 69 - 78.
- Ting, R.Y. 1975. Viscielastic effects of polymers on single bubble dynamics, *AIChE J.* 21, 810 - 813.
- Wiss, R. and Ollis, D.F. 1980. Extracellular microbial polysaccharides, I. Substrate, biomass and product kinetic equations for batch xanthan gum fermentation, *Biotechnol. Bioeng.* 22, 859.
- Young, M.A., Carbonell, R.G. and Ollis, D.O. 1987. Non - Newtonian broth in airlift bioreactor, In : *Biotechnology Process : Scale - up and mixing*, *AIChE., Symp.*, Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.)
- Zana, E. and Leal, L.G. 1978. The dynamics and dissolution of Gas bubbles in viscoelastic fluid. *Int. J. Mult. Flow.* 4, 237 - 262.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายเซนเซนกันสำเร็จ

การหาปริมาณความชื้น โดยใช้ตู้อบสูญญากาศ (A.O.A.C)

อุปกรณ์

1. ตู้อบสูญญากาศ
2. ภาชนะหาความชื้น
3. เติลเคเตอร์
4. เครื่องชั่ง

วิธีการ

1. อบภาชนะหาความชื้นในตู้อบประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 - 105 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเตลเคเตอร์ประมาณครึ่งชั่วโมง ชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
2. ใส่ตัวอย่างในภาชนะหาความชื้น ชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน โดยใช้ตัวอย่างประมาณ 3 กรัม นำภาชนะหาความชื้นใส่ในตู้อบสูญญากาศ ลดความดันลงช้าๆจนเหลือประมาณ 100 มิลลิเมตรปรอท อบประมาณ 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70 องศา
3. ทิ้งให้เย็นในเตลเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ความชื้น (ร้อยละ)} = (M1 - M2) \times 100 / (M1 - M0)$$

เมื่อ

M0 = น้ำหนักภาชนะหาความชื้น (กรัม)

M1 = น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะหาความชื้นก่อนอบ (กรัม)

M2 = น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะหาความชื้นหลังอบ (กรัม)

น้ำหนักภาชนะหาความชื้น (moisture can) หลังอบแห้ง 1 ถัง	น้ำหนักภาชนะหาความชื้น (แห้ง) + น้ำหนักเซนเซนกัน (ก่อนอบ) (g) น้ำหนักเซนเซนกันลดลง	น้ำหนักภาชนะหาความชื้น + น้ำหนักเซนเซนกัน (หลังอบครั้งที่ 1)(g) (น้ำหนักน้ำ)	น้ำหนักภาชนะหาความชื้น + น้ำหนักเซนเซนกัน (หลังอบครั้งที่ 1)(g)
1. 18.777	20.712 (1.935)	20.475 0.237	20.475
2. 19.234	21.525 (2.291)	21.243 0.282	21.243
3. 18.003	20.856 (2.253)	20.577 0.279	20.577

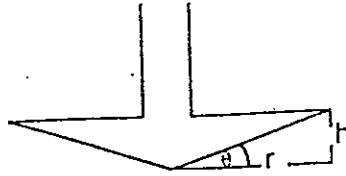
สรุปร้อยละของความชื้นของเซนเซนกันโดยเฉลี่ย

ฐานน้ำหนักสด = 12.313%

ฐานน้ำหนักแห้ง = 14.043%

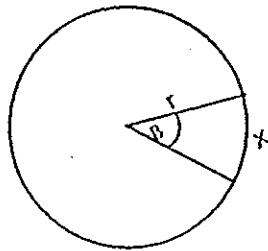
ภาคผนวก ข การเปลี่ยนแปลงความเครียด (strain) ในหน่วย rad หรือ องศา (deg) ไปเป็น % strain

จากลักษณะของ sensor PK 45 ใช้วัดสมบัติทางรีโอโลยีในโหมดไดนามิกจากด้านข้างของ sensor



$$\tan \theta = \frac{h}{r}$$

เมื่อมองจากด้านบน



$$\begin{aligned} \% \text{ strain} &= \left[\frac{x}{h} \right] \times 100 && (x \text{ rad}) \\ &= \left[\frac{\beta r}{r \tan \theta} \right] \times 100 && (\beta \text{ deg}) \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาค่าการใช้กำลัง

1. การคำนวณหาค่าเลขกำลัง (N_p) และเลขเรโนลด์ (N_{Re}) ตามวิธีการของ McCabe และ Smith (1956)

เลขกำลัง

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_s^5 \rho}$$

โดยที่

N_p = เลขกำลัง (ไม่มีหน่วย)

P = กำลัง (วัตต์)

ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

N = ความเร็ว (รอบต่อนาที)

D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

เลขเรโนลด์

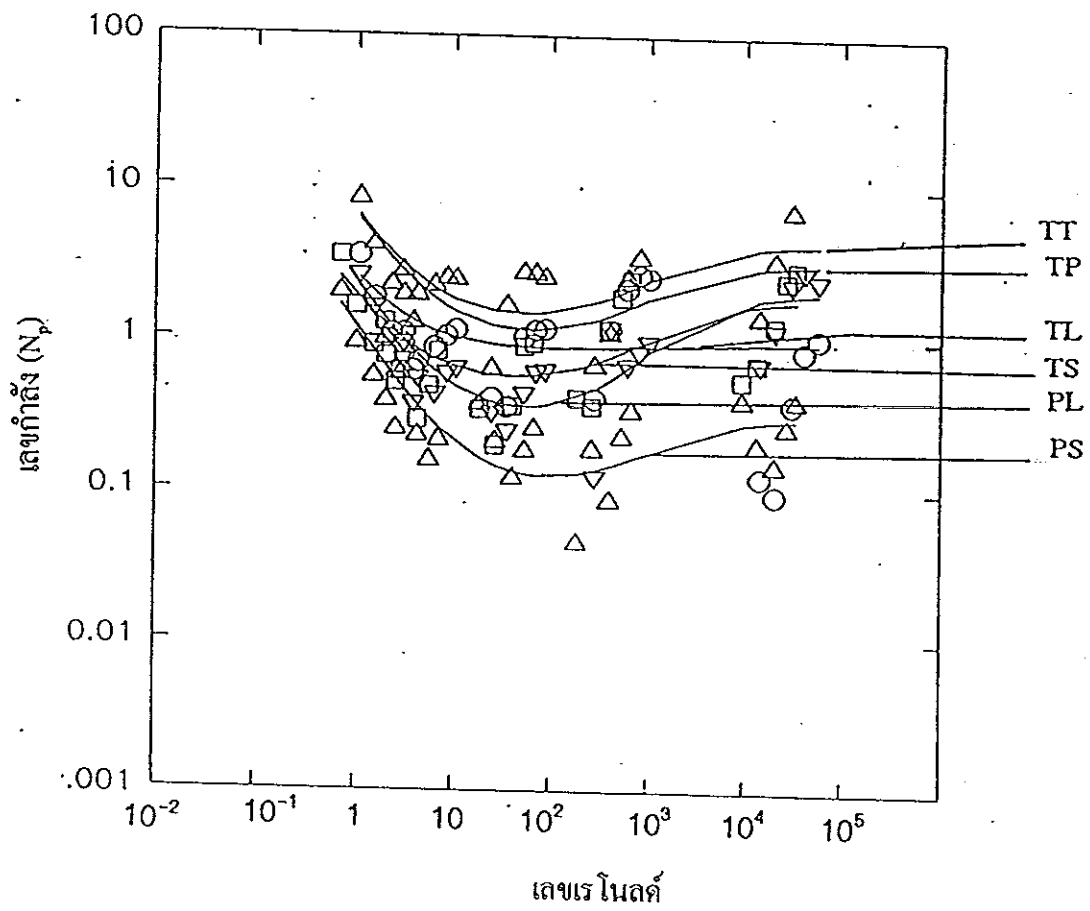
$$N_{Re} = \frac{D_s^2 N \rho}{\mu_a}$$

โดยที่

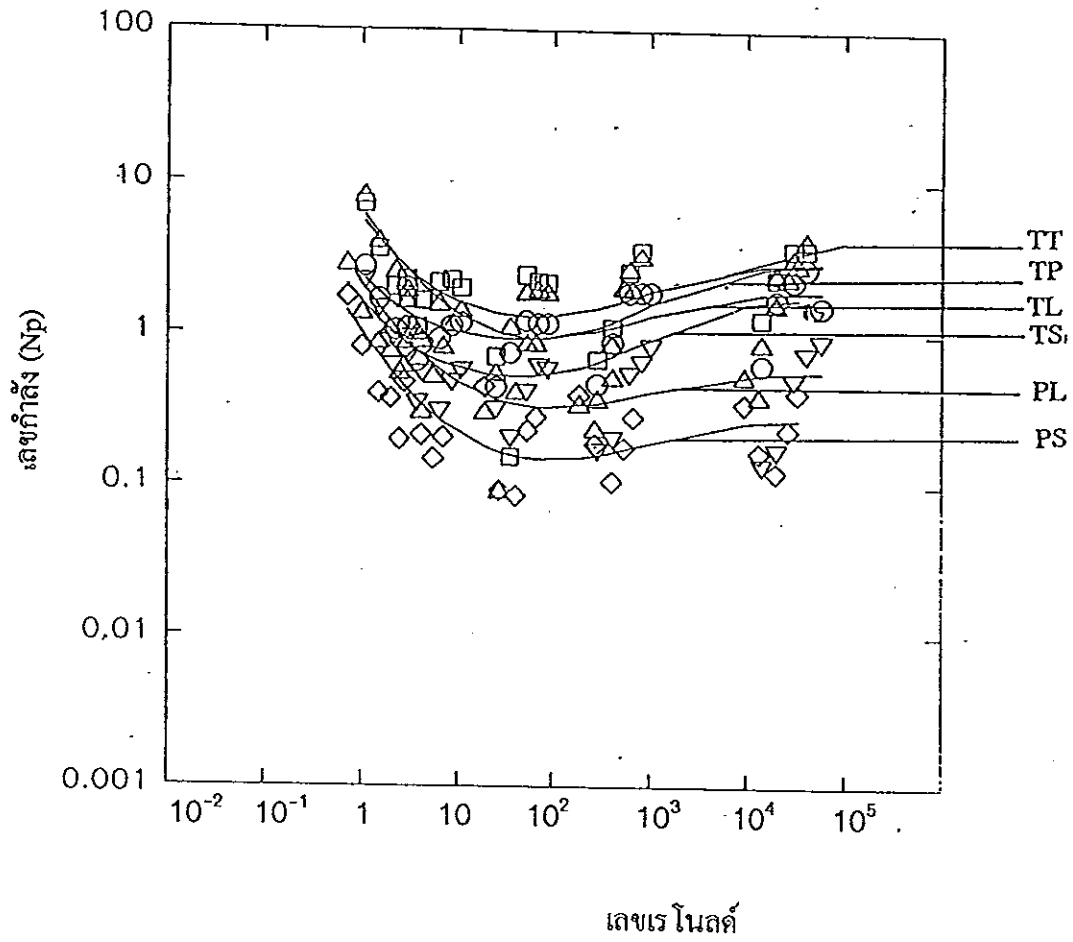
μ_a = ความหนืดเฉลี่ย (Pa.s)

ภาคผนวก ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรโนลด์และเลขกำลัง ที่อัตราการให้อากาศ (0.07, 0.15, 0.30 และ 0.50 vvm)

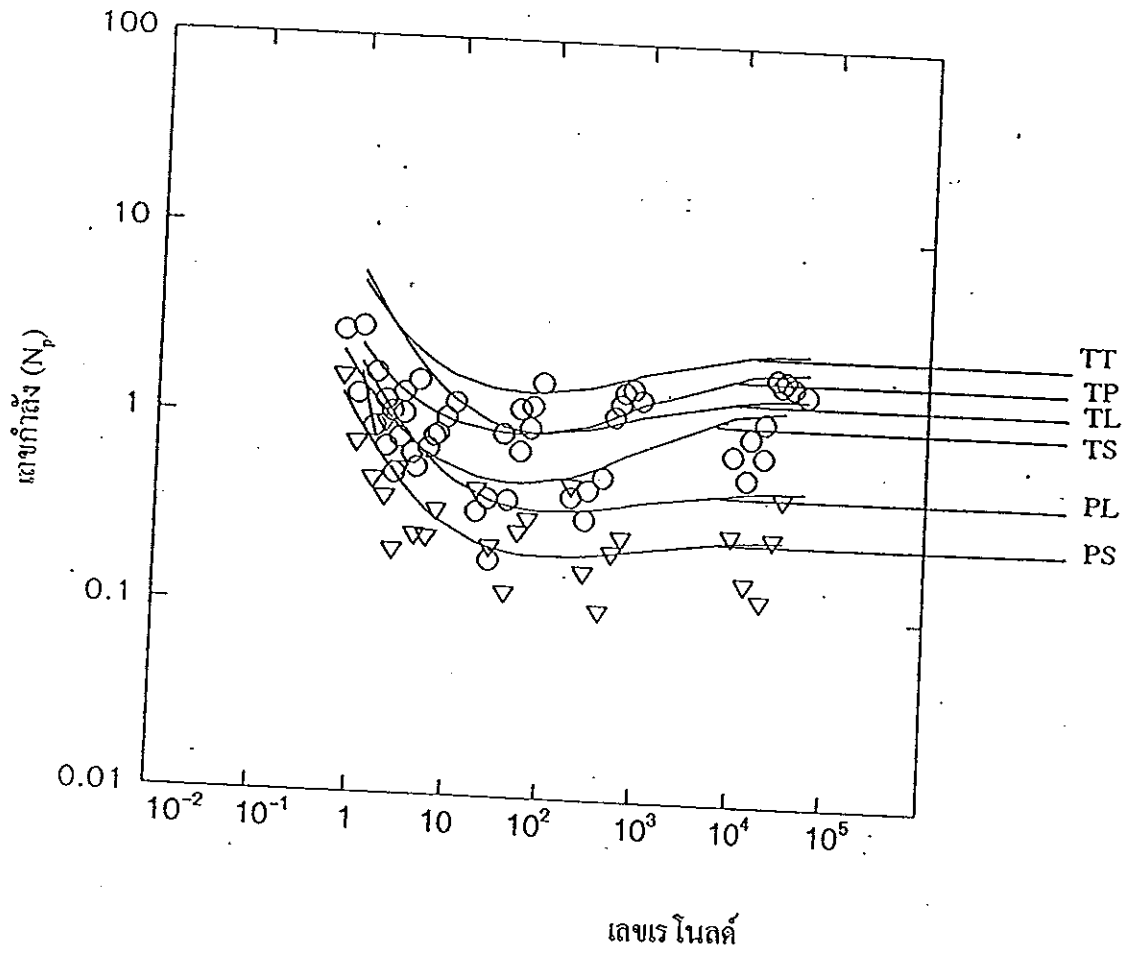
สำรวจถ่ายแขนแขนกับ ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนักที่ ระดับความสูง 0.20, 0.25 และ 0.30 เมตร



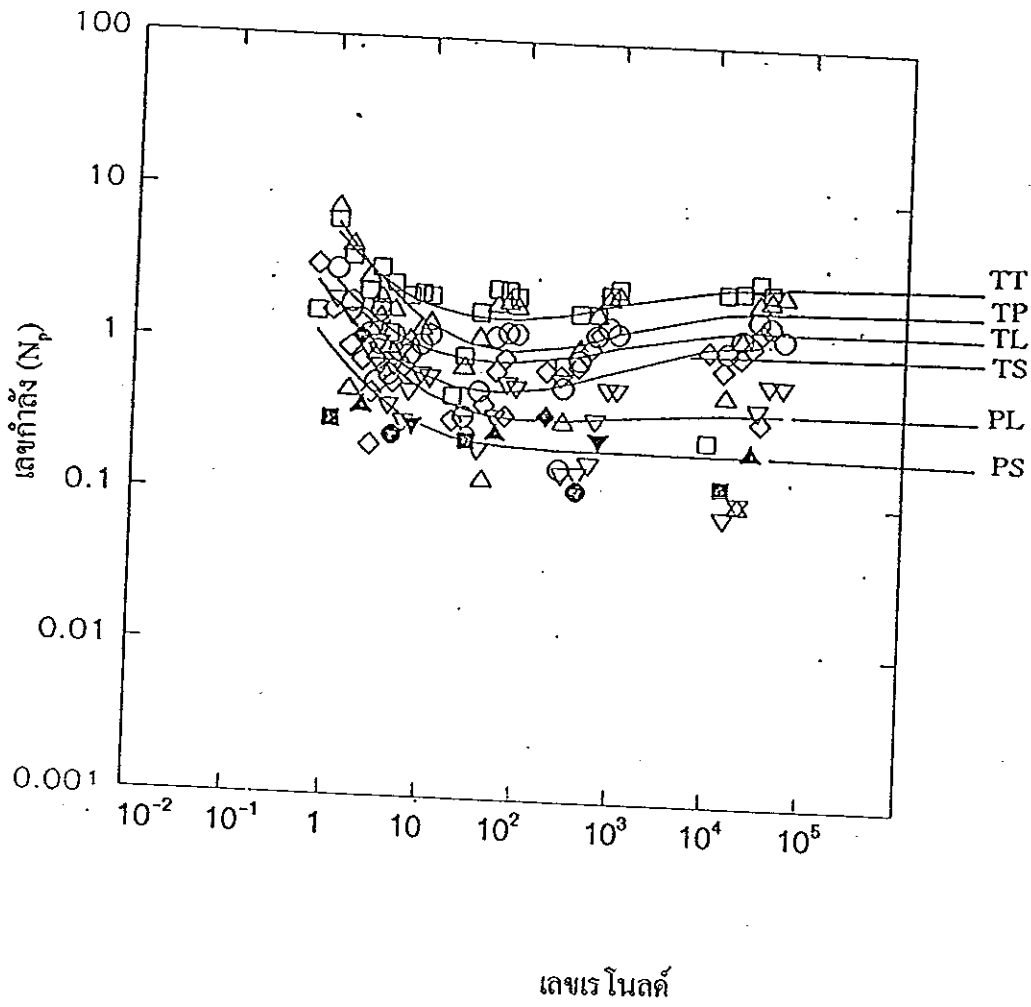
ภาพผนวกที่ ง1 สารละลายเซนเซนที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.20 เมตร
อัตราการให้อากาศ 0.07 vvm



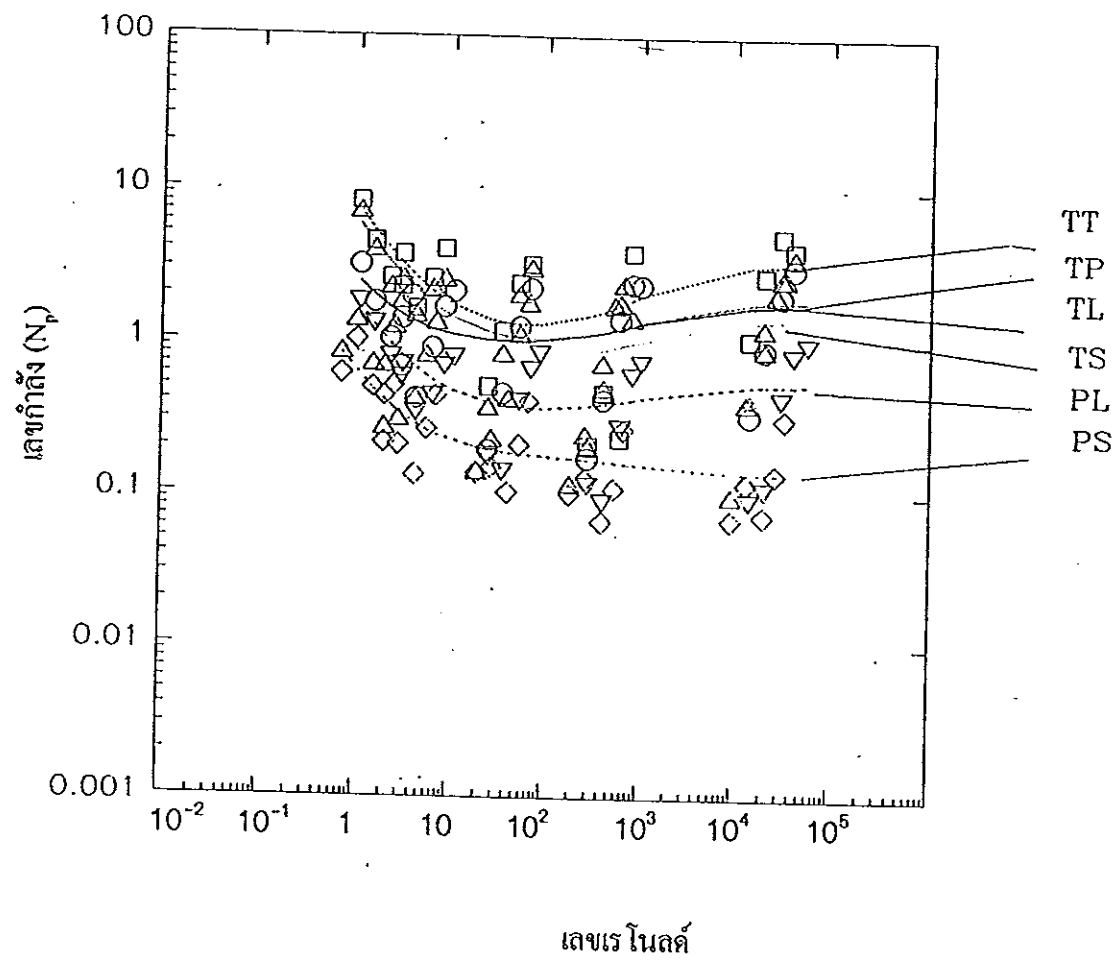
ภาพผนวกที่ 2 สารละลายเซนแรนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.20 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.15 vvm



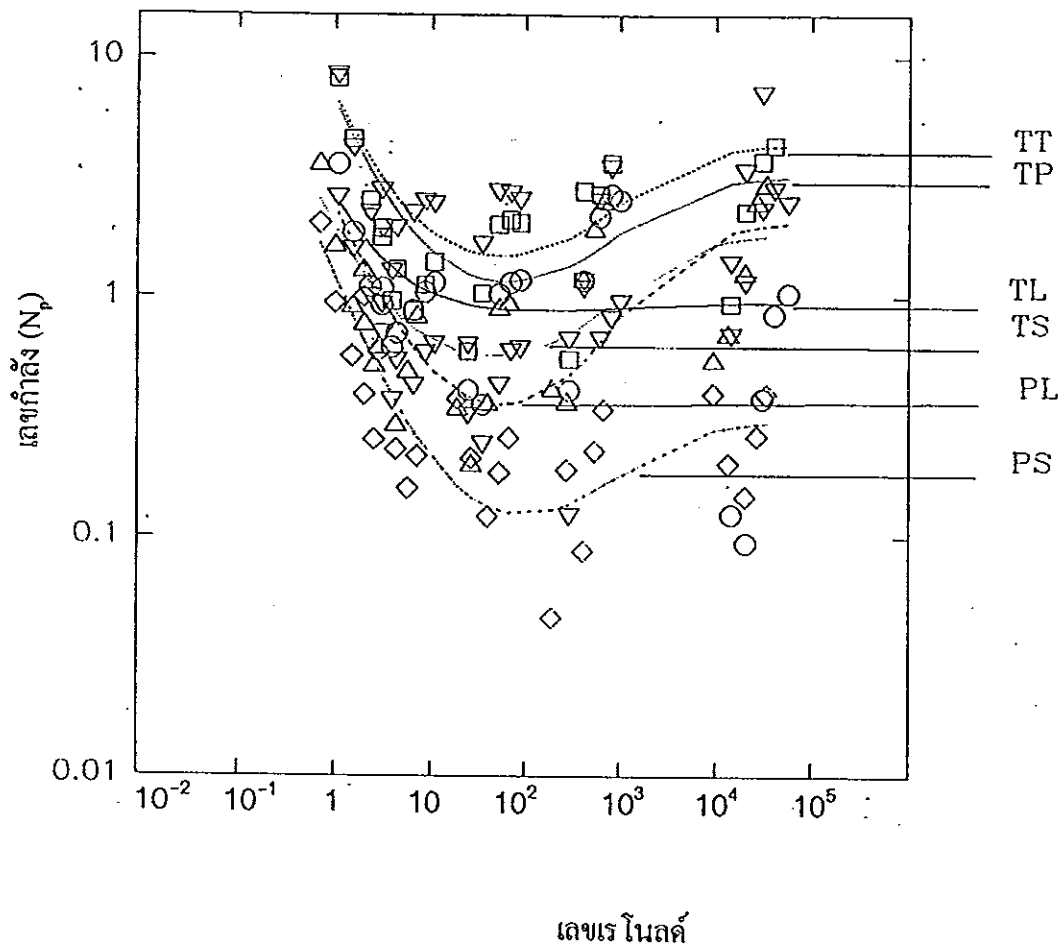
ภาพผนวกที่ 3 สารละลายเซนเซนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.20 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.30 vvm



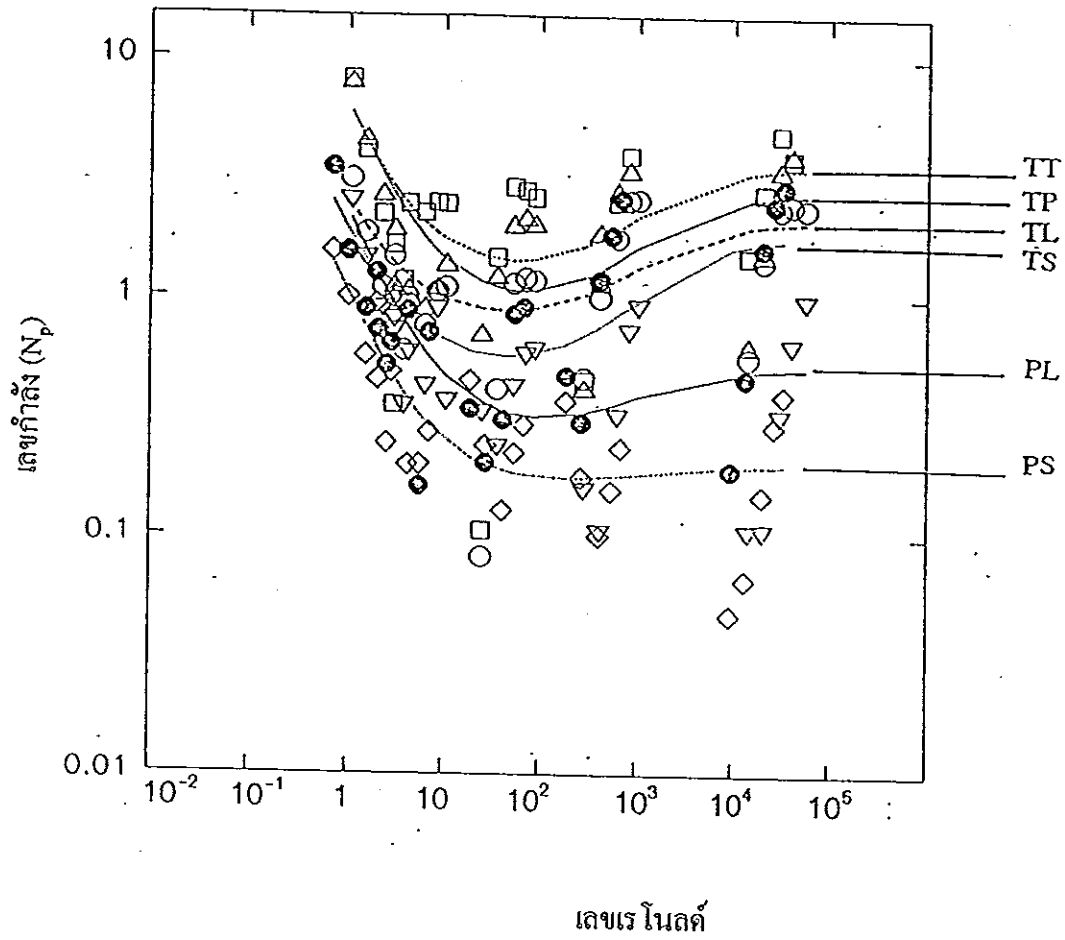
ภาพผนวกที่ 4 สารละลายแซนแทนัมที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.20 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.50 vvm



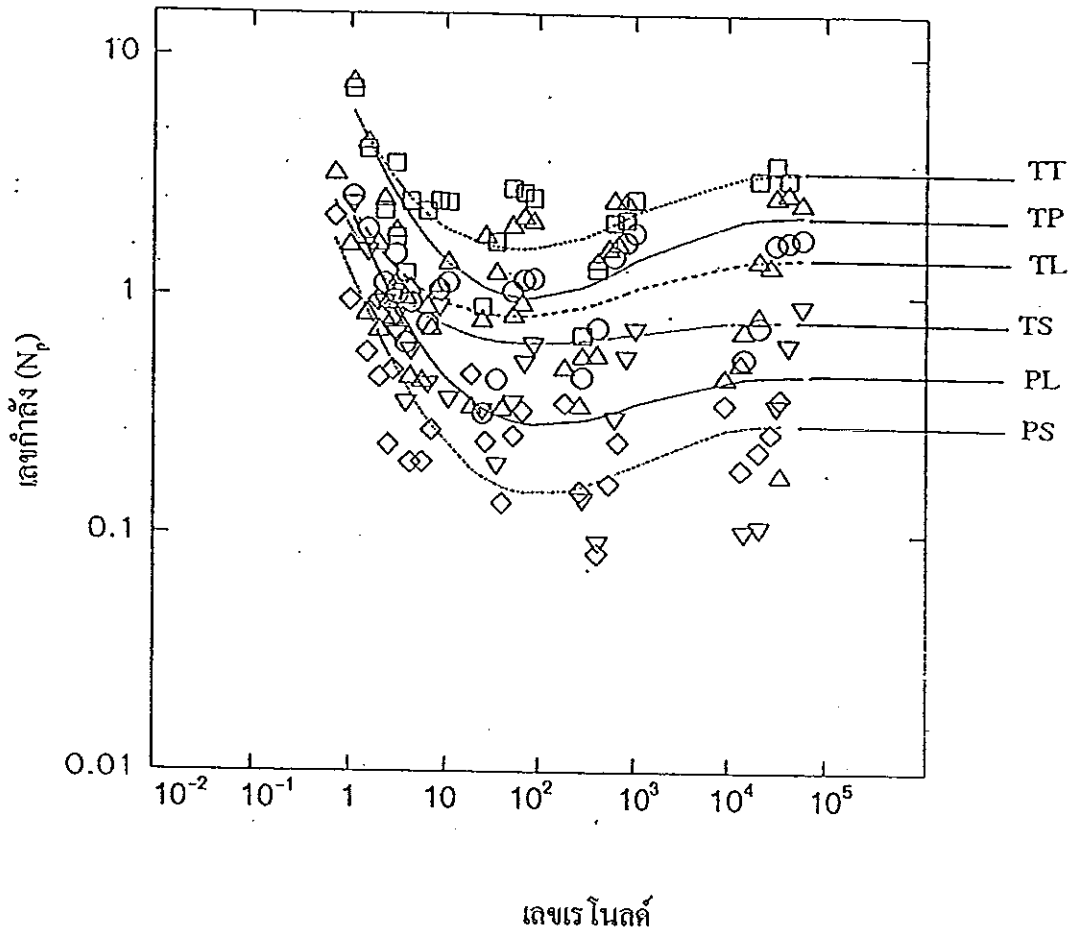
ภาพผนวกที่ 35 สारละลายแซนแรนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.20 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0 vvm



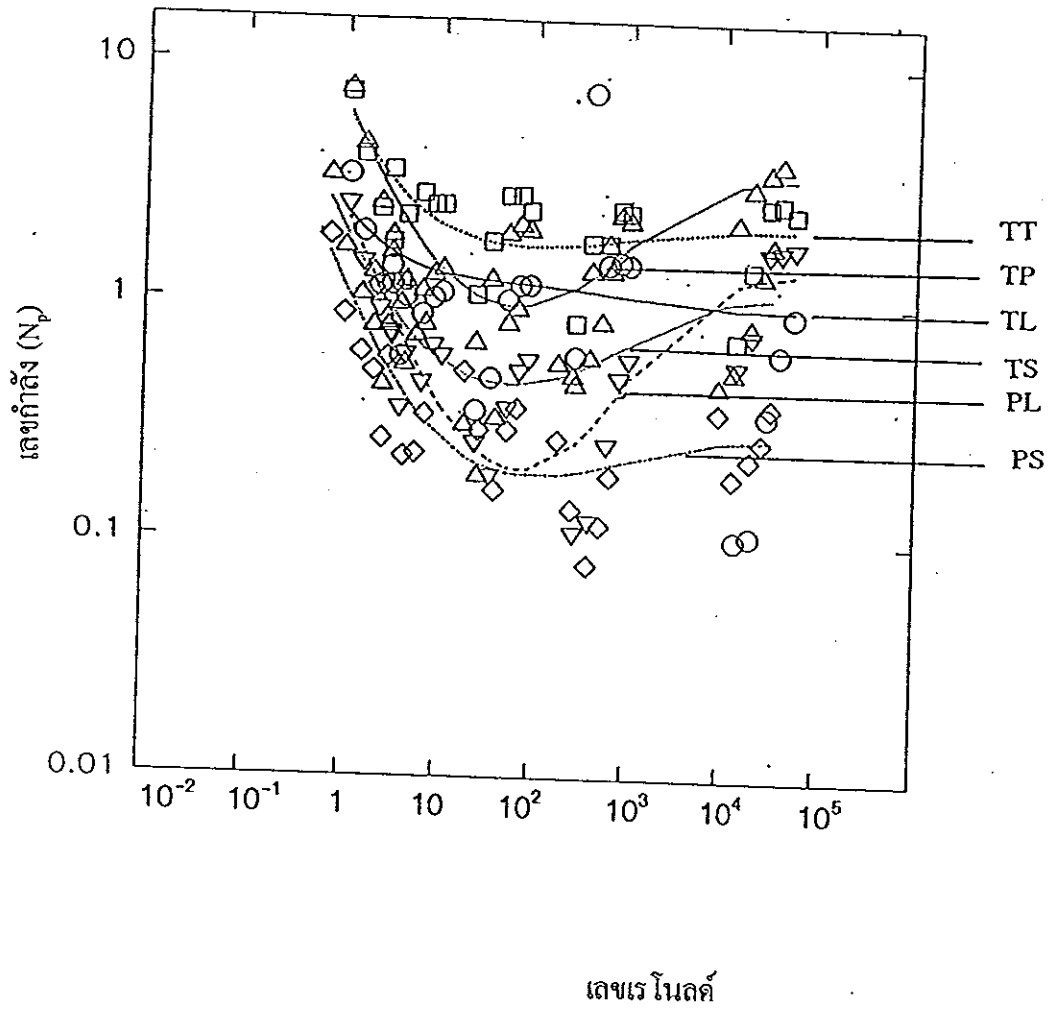
ภาพผนวกที่ ๖6 สารละลายแซนแรนทัมที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.25 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.07 vvm



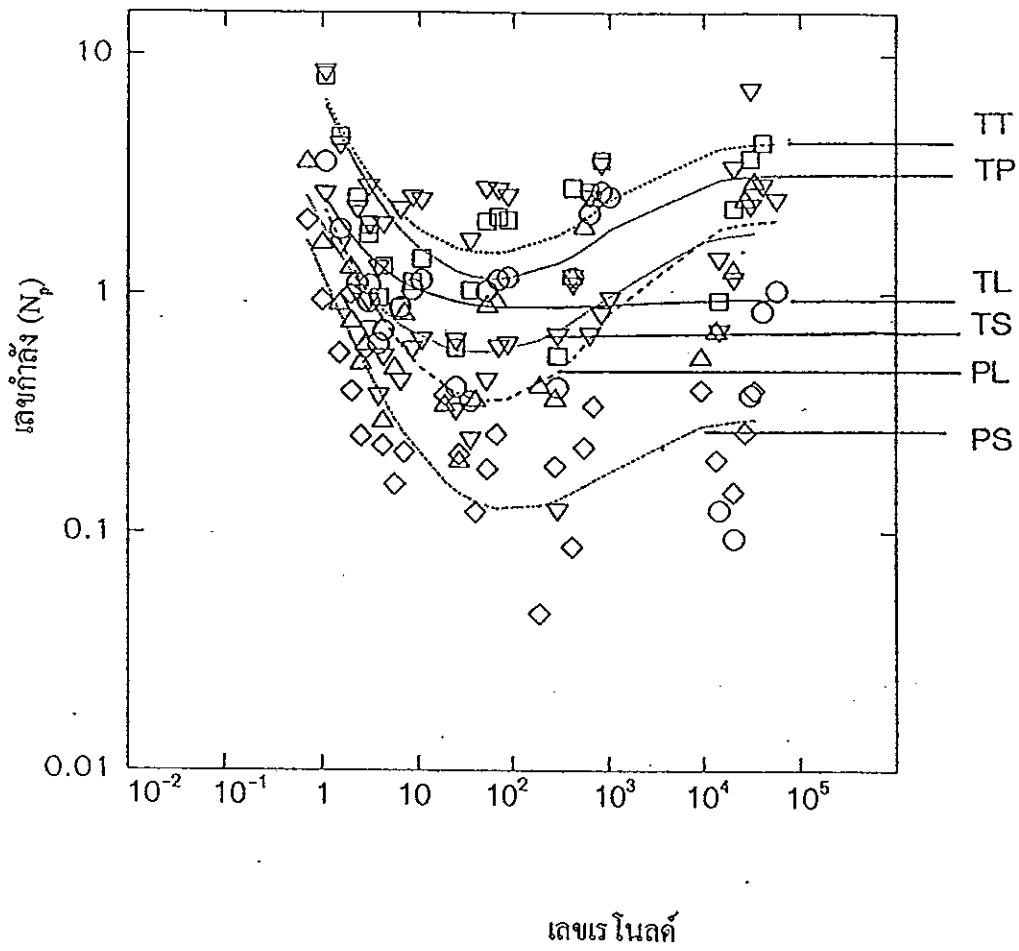
ภาพผนวกที่ 7 สารละลายเซนเซนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.25 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.15 vvm



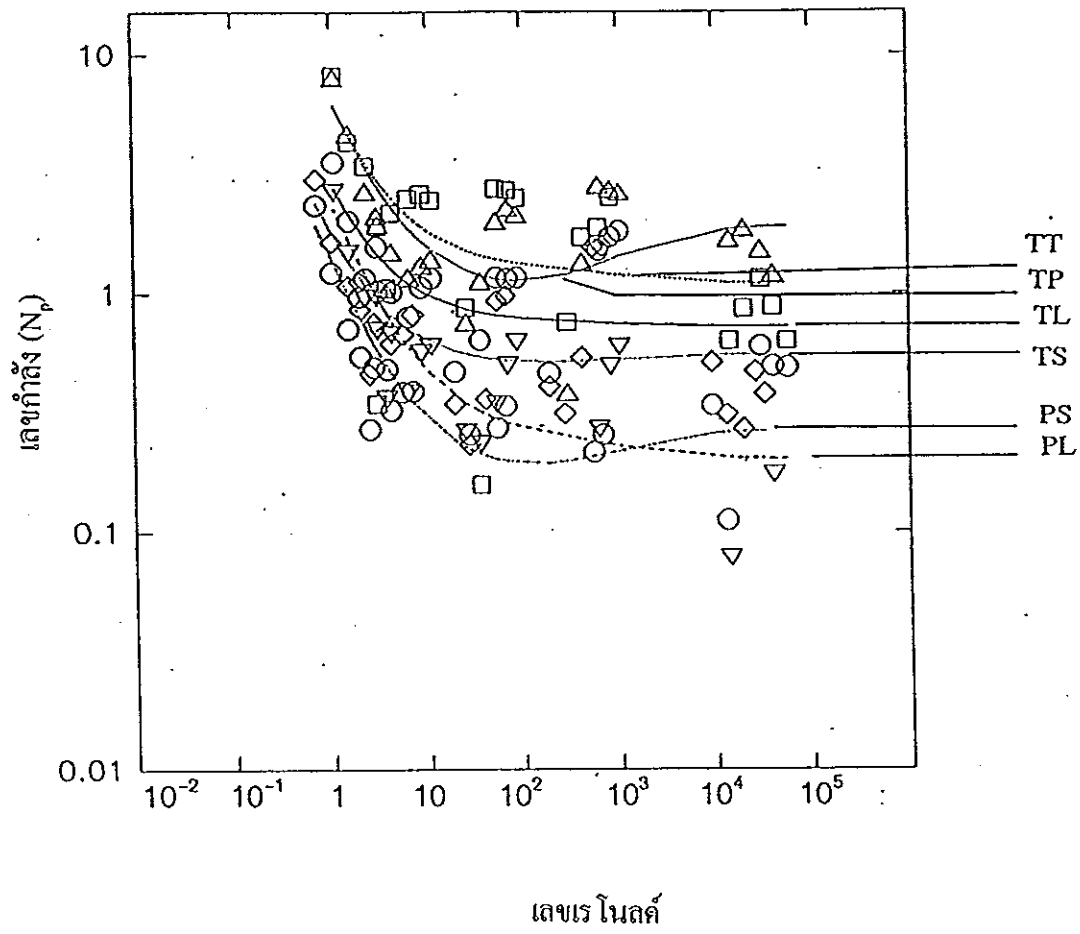
ภาพผนวกที่ 8 สารละลายเซนเซนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.25 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.30 vvm



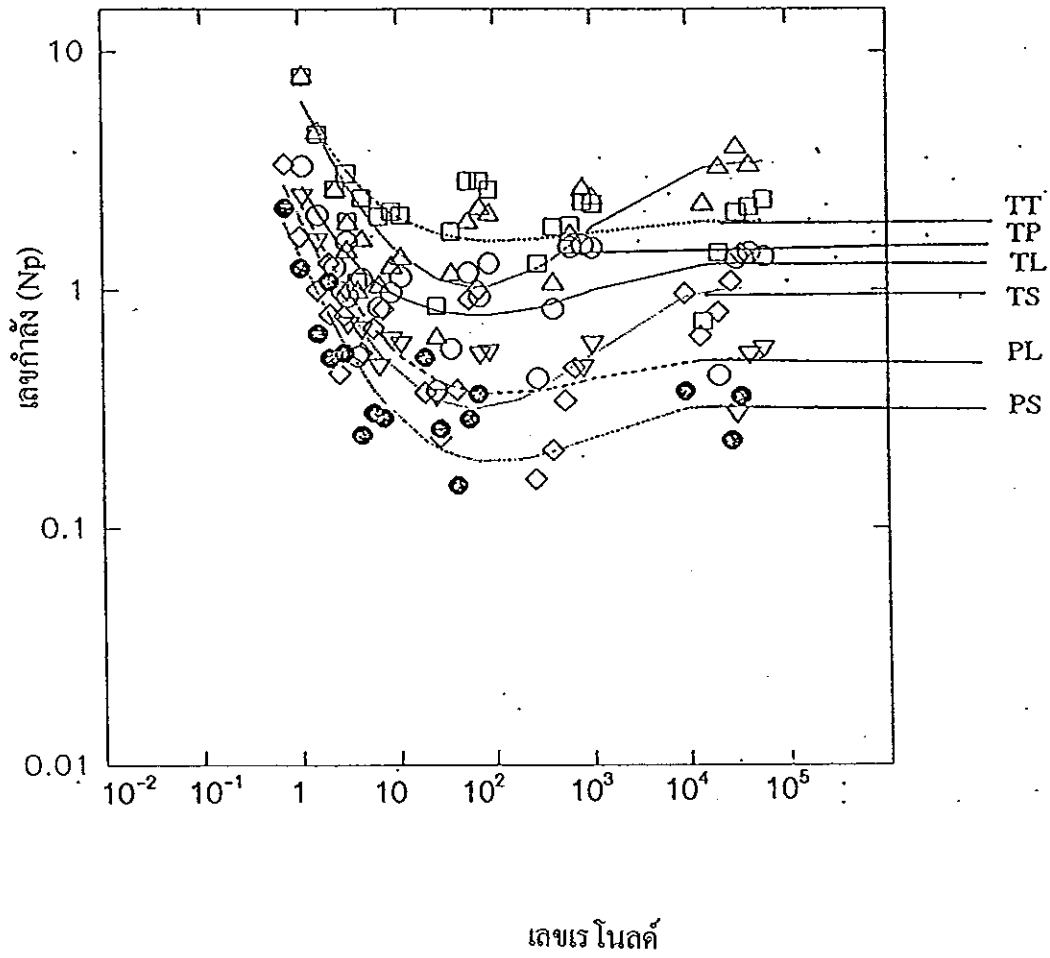
ภาพผนวกที่ 9 สารละลายแขนแขนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.25 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.50 vvm



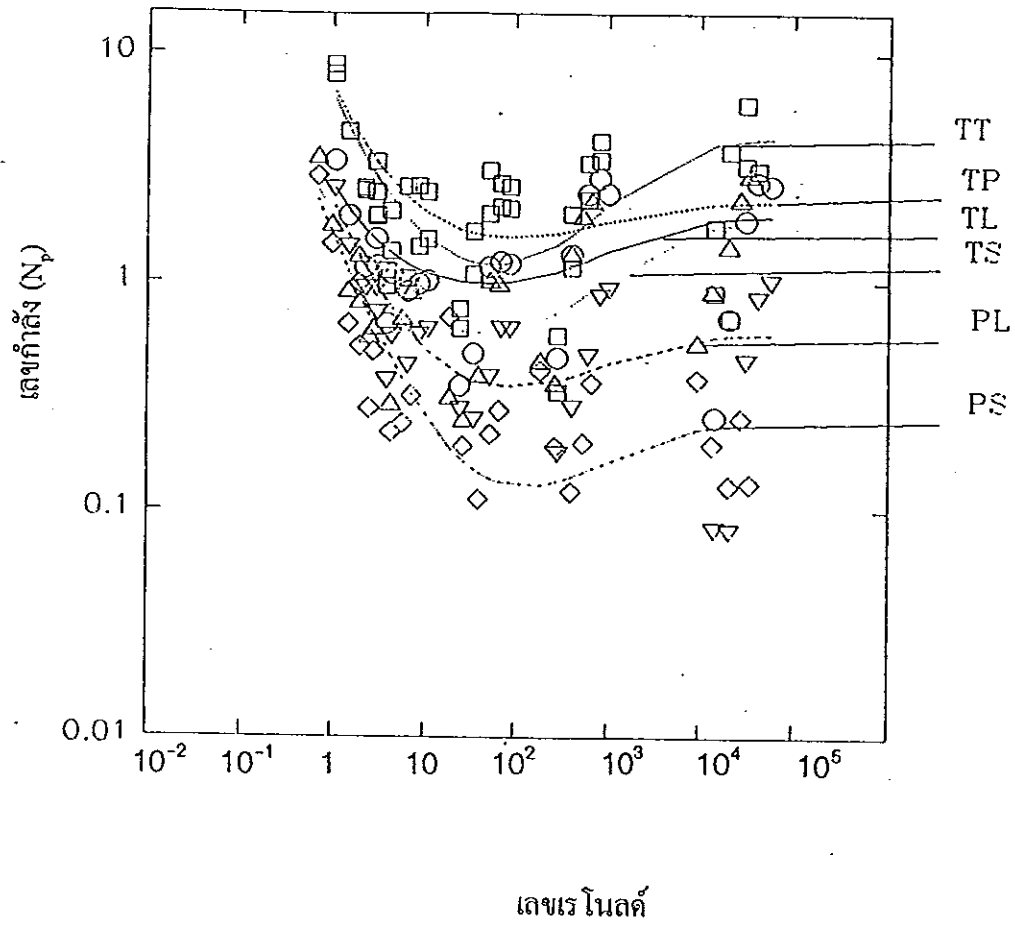
ภาพผนวกที่ 10 สารละลายเซนเซนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.30 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0 vvm



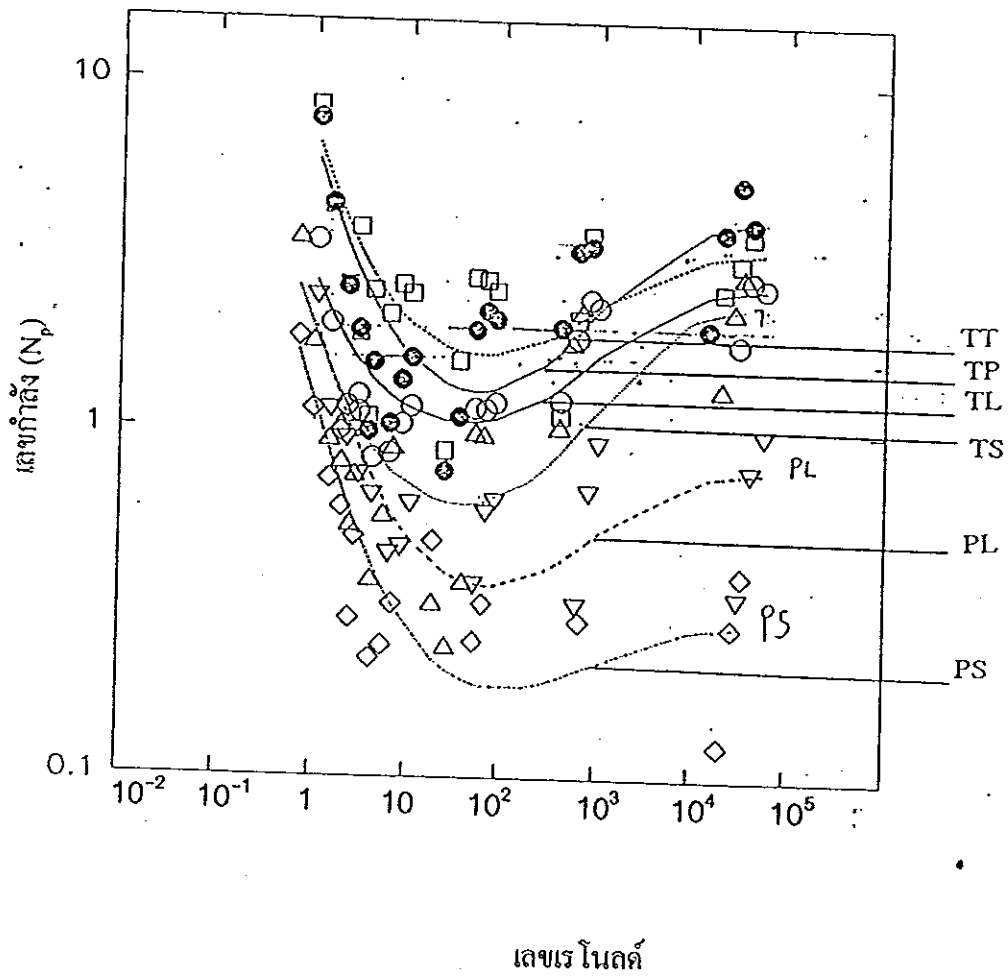
ภาพผนวกที่ ง11 สสารละลายแซนแทนกัมที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.30 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.07 vvm



ภาพผนวกที่ 12 สารละลายแซนเทนัมที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.30 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.15 vvm

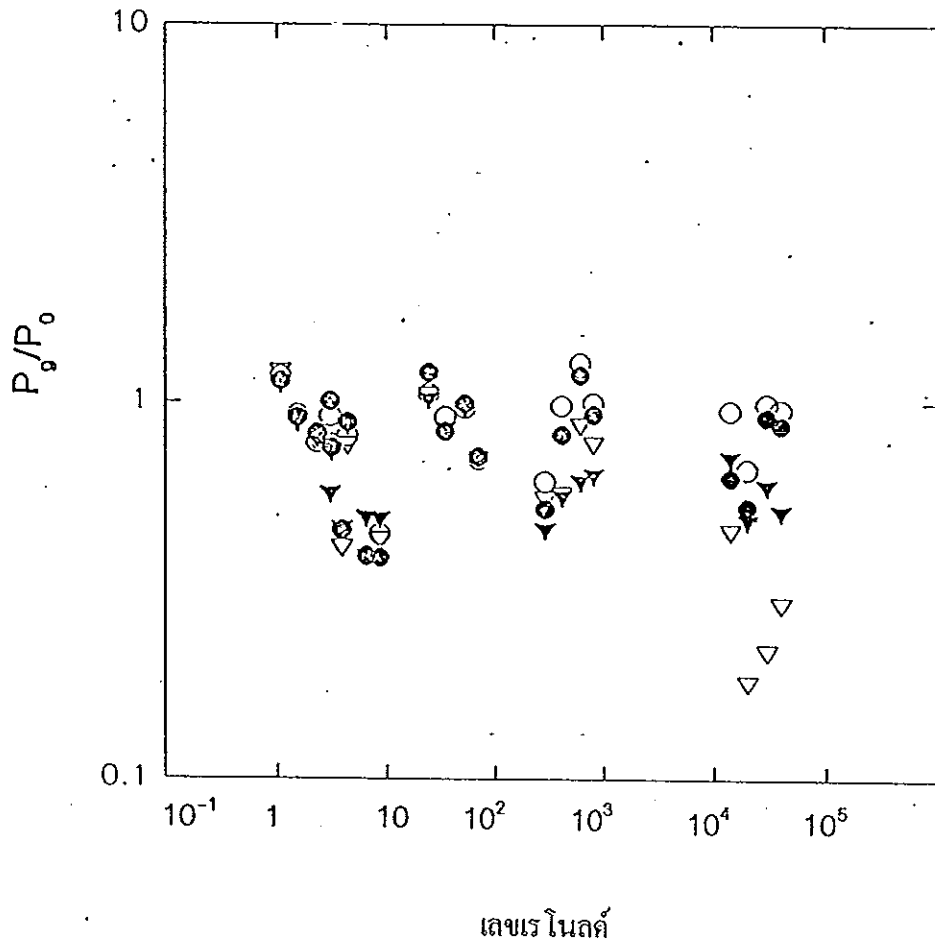


ภาพผนวกที่ 13 สารละลายเซนเทนกันที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.30 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.30 vvm

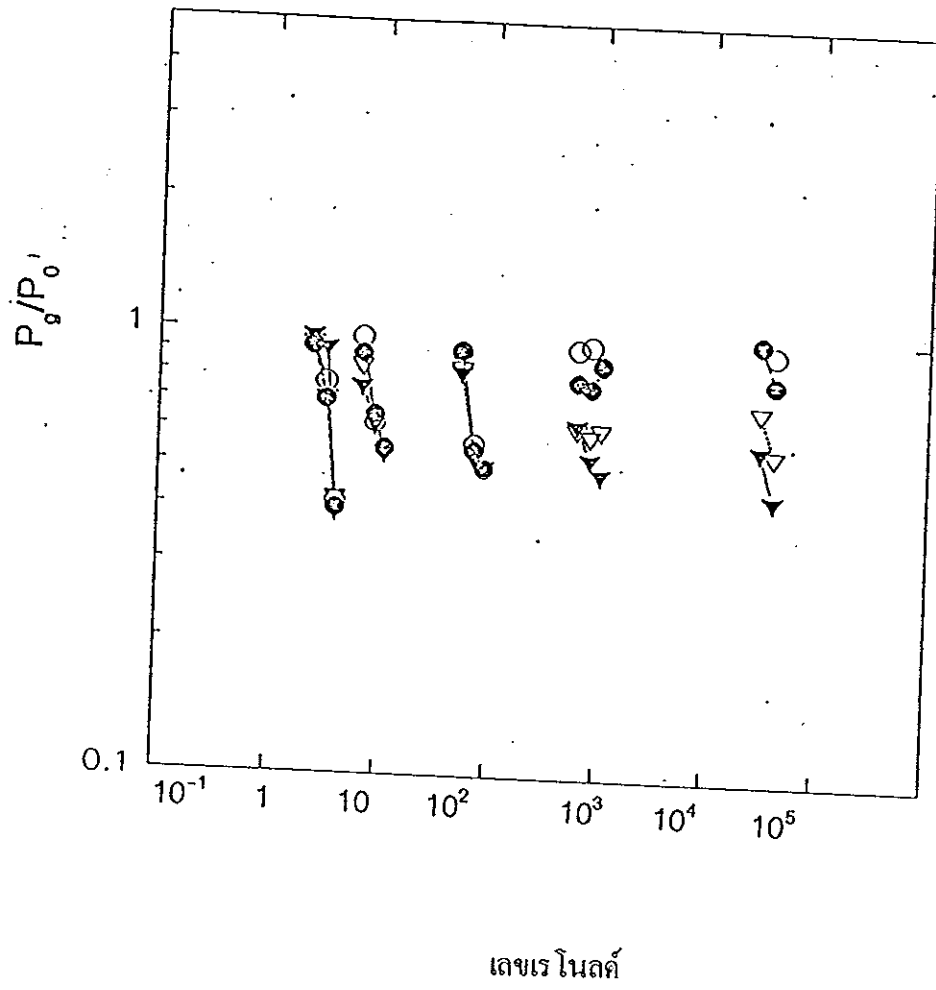


ภาพผนวกที่ ง14 สารละลายแซนแรนกับที่ระดับความสูงของสารละลาย 0.30 เมตร
อัตราการใช้อากาศ 0.50 vvm

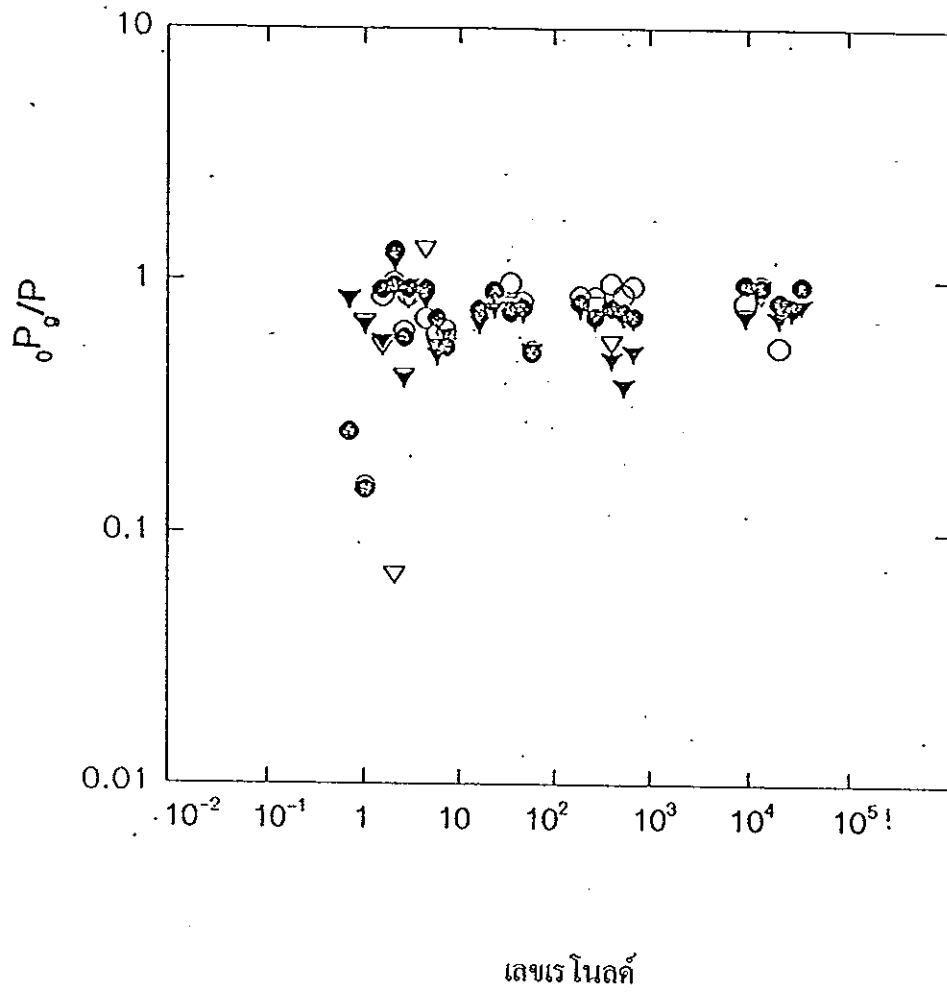
ภาคผนวก จ แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_g / P_0 และค่าเลขเรโนลด์ของใบกวนแบบ TP, TL, TS, PL และ PS , สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้น 0, 0.1, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



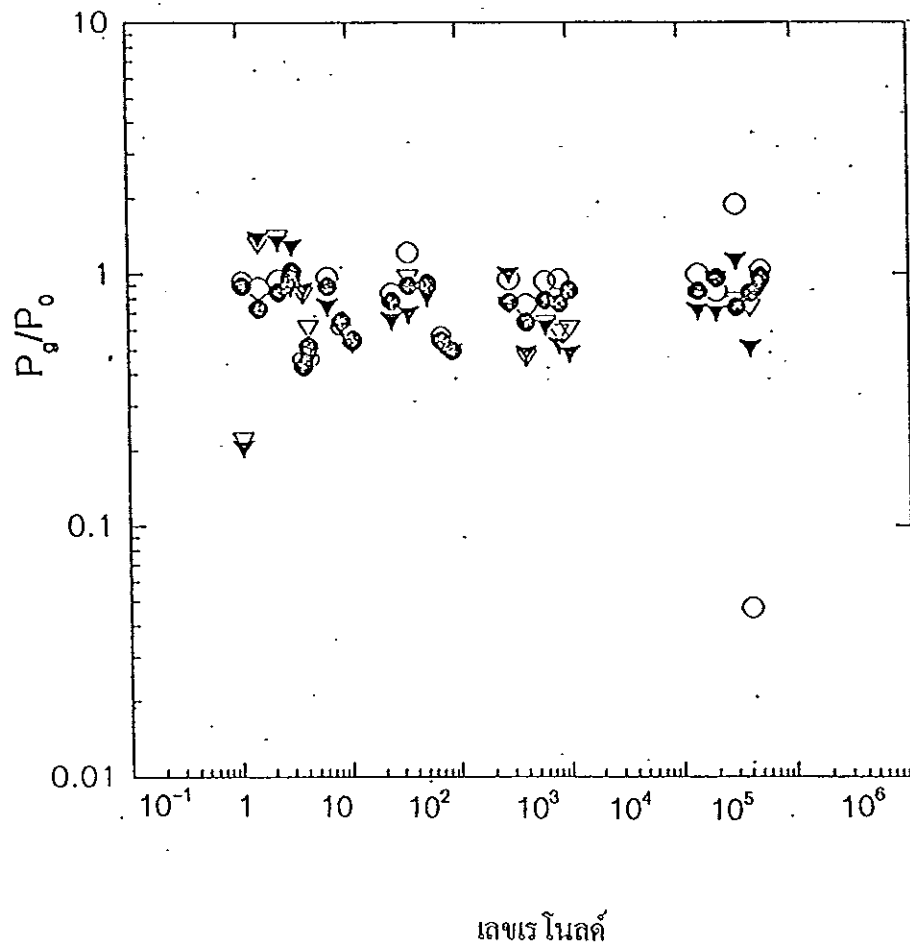
ภาพผนวกที่ ๑1 ไบควนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพิดเบลต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)



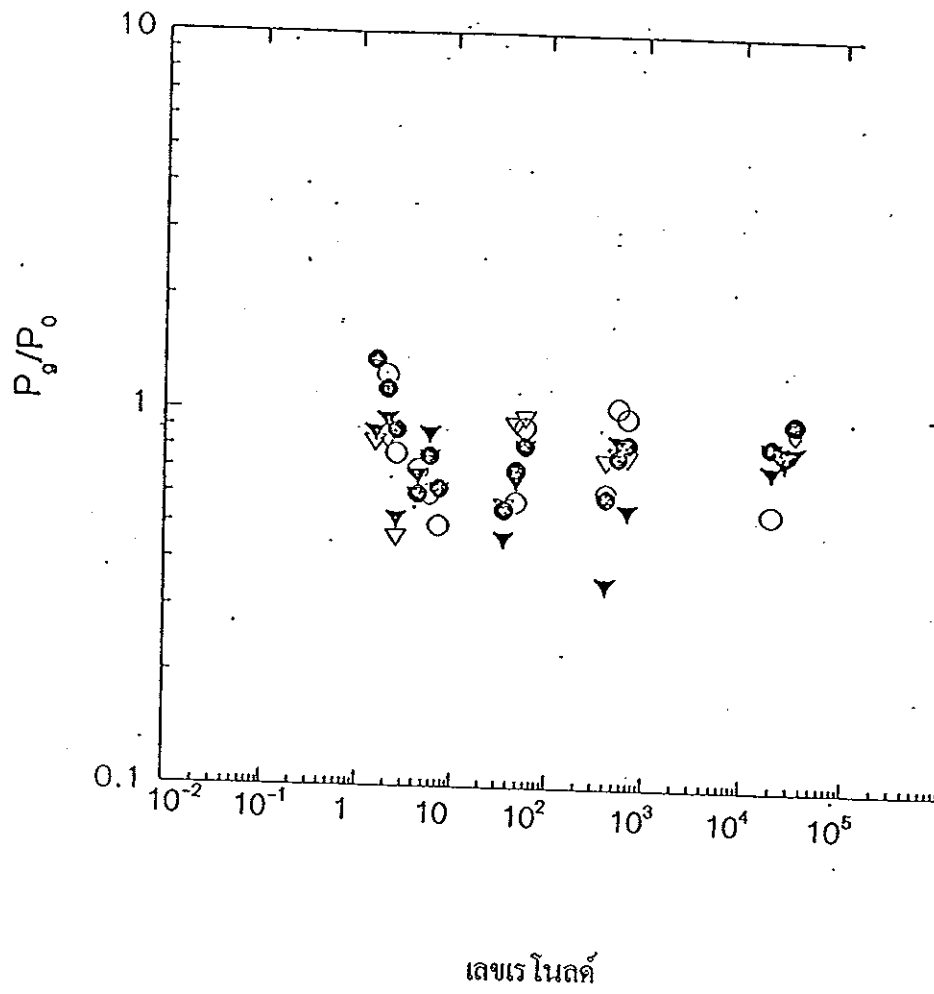
ภาพผนวกที่ ๒2 ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TL)



ภาพผนวกที่ ๓3 ไบควอนแบบเทอร์ไบน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร (TS)

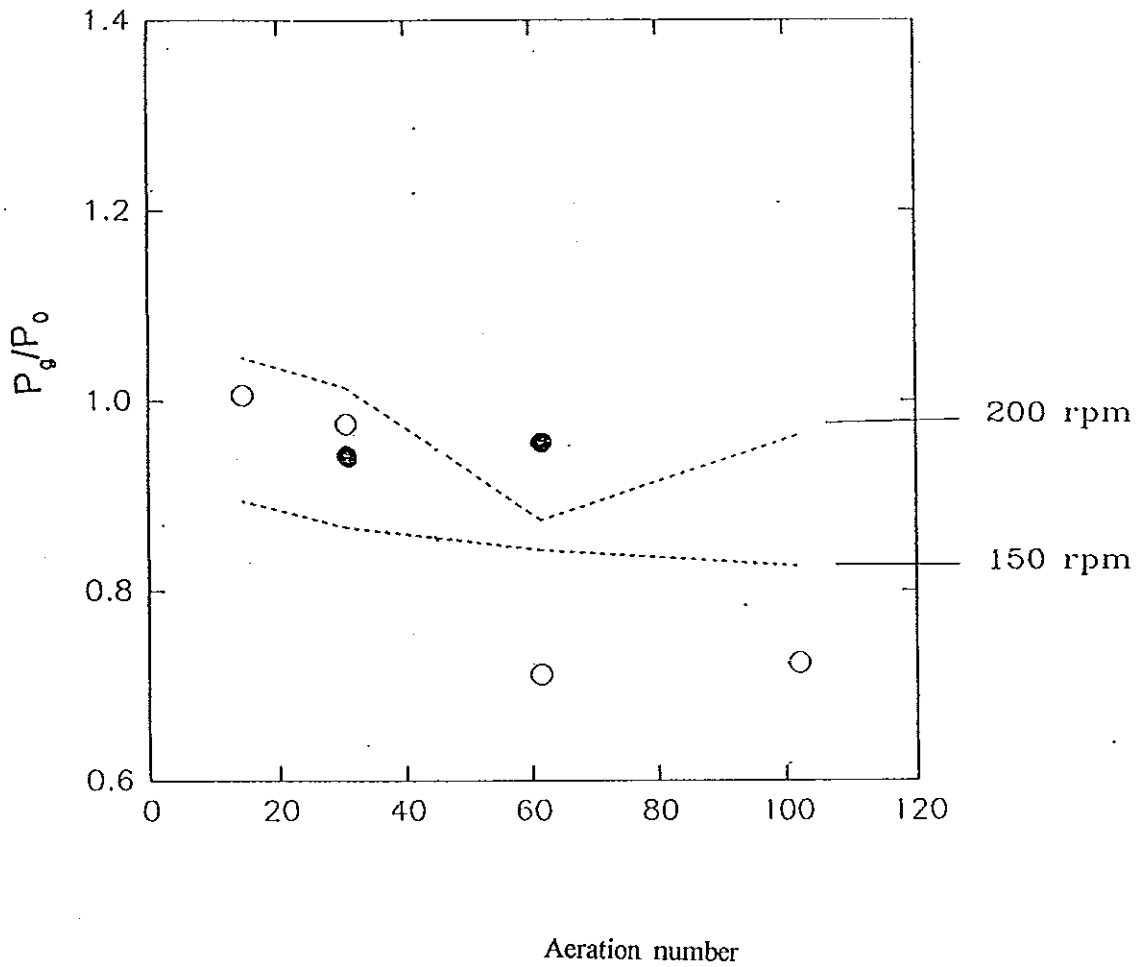


ภาพผนวกที่ ๑๔ ไบควนแบบพิดเบลด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (PL)

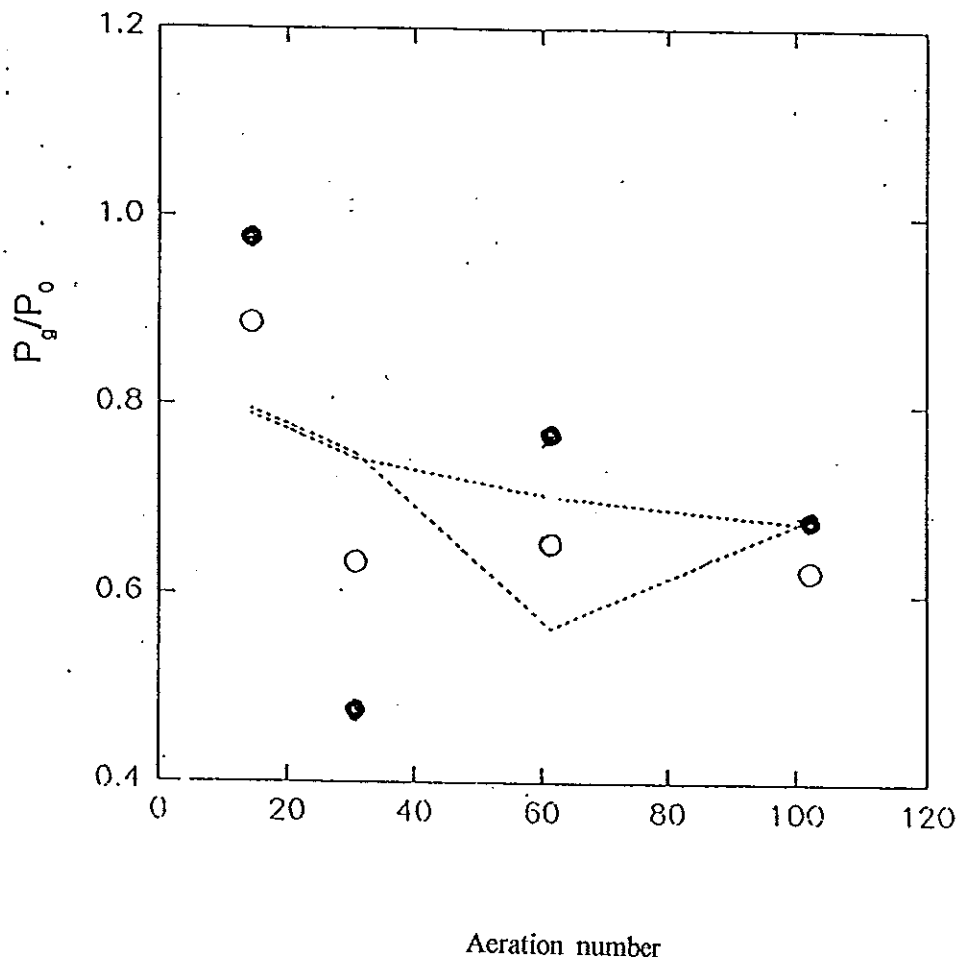


ภาพผนวกที่ จ5 ไบควอนแบบพิดเมลด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.085 เมตร (PS)

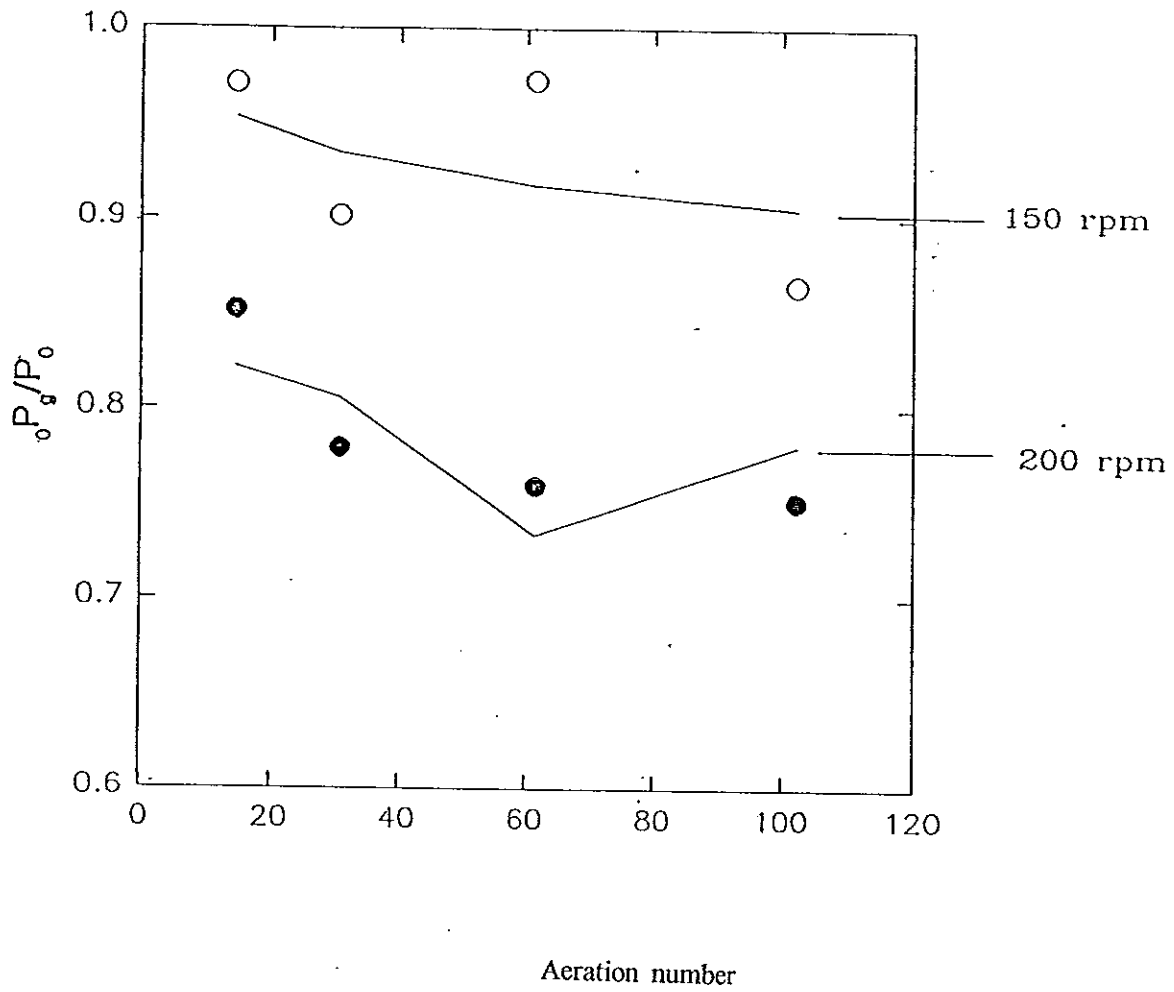
ภาคผนวก ฉ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P_2/P_1 และอัตราการให้อากาศของสารละลายแซนแทนกัม
ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.10, 0.25, 0.50 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



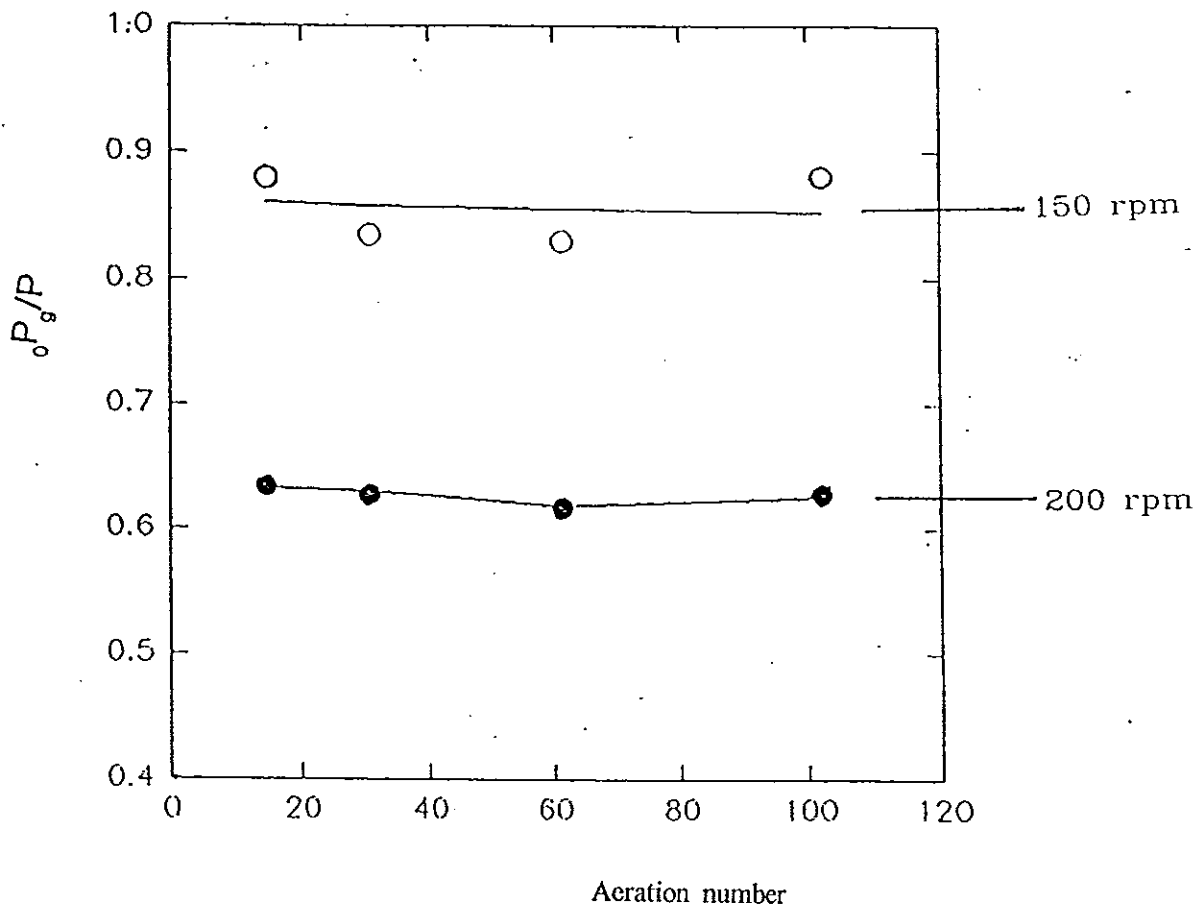
ภาพผนวกที่ ๑1 สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ ๐ โดยน้ำหนัก
 ไบกรวนแบบเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๐.๑๐๕ เมตร คู่กัน ๒ ไบ (TT)
 อัตราเร็วรอบ ๑๕๐ และ ๒๐๐ รอบต่อนาที (○, ●) ตามลำดับ



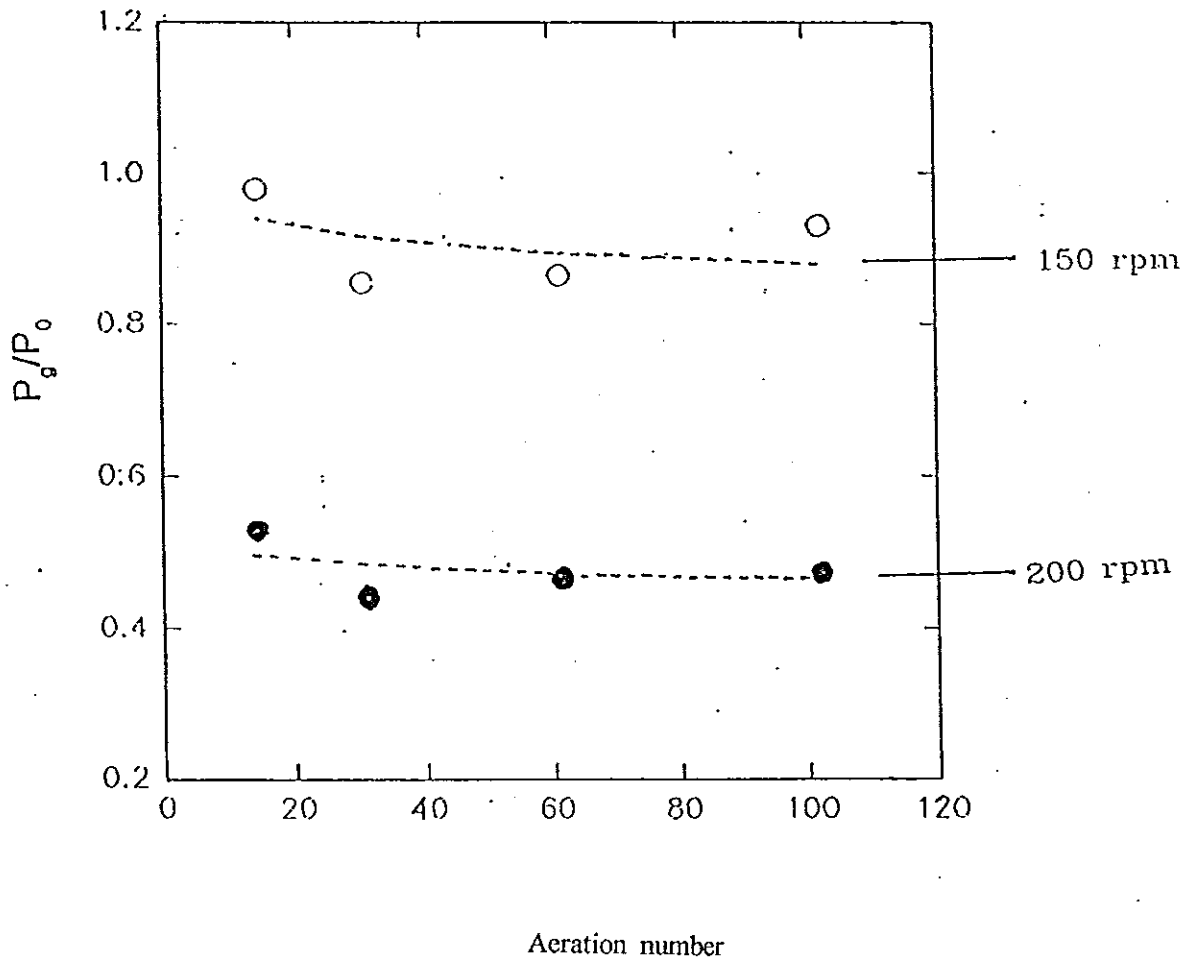
ภาพผนวกที่ ๓2 สารละลายแซนเทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก
 โบกวนแบบเทอร์โบไนซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร คู่กัน 2 โบก (TT)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (O , ●) ตามลำดับ



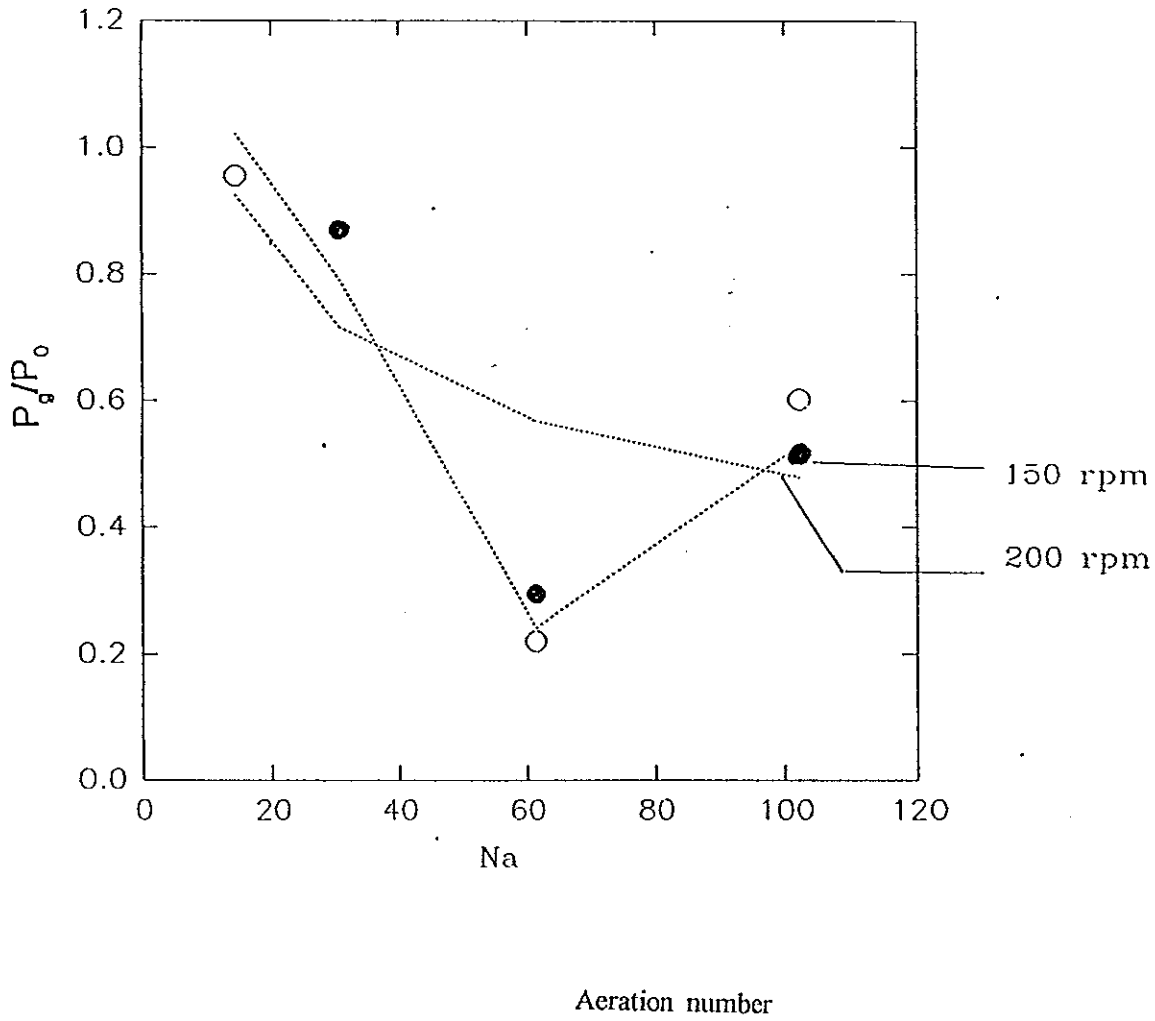
ภาพผนวกที่ ๓3 ตารางละลายเซนแทรนกับความสัมพันธ์ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก
 ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร คู่กัน 2 ใบ (TT)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (O, ●) ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ๓4 สารละลายแซนเทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก
 ไบอกรวนแบบเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร คู่กัน 2 ไบ (TT)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (\circ , \bullet) ตามลำดับ



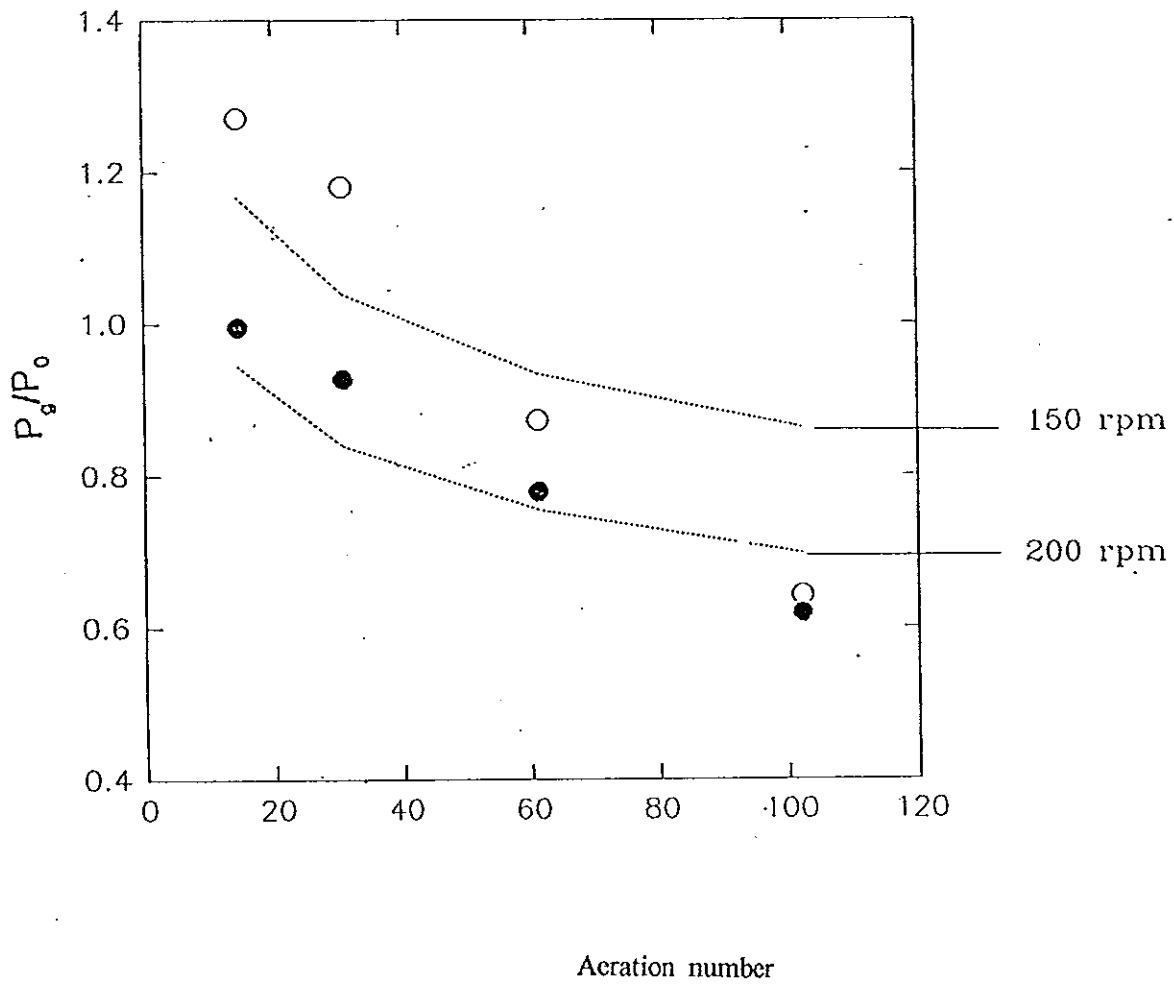
ภาพผนวกที่ ๑๕ สารละลายแซนแรนกับความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก
 ใบกวนแบบเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร คู่กัน 2 ใบ (TT)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (O , ●) ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ๖6 สารละลายแซนเทนความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ใบกวนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพิทเบลค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)

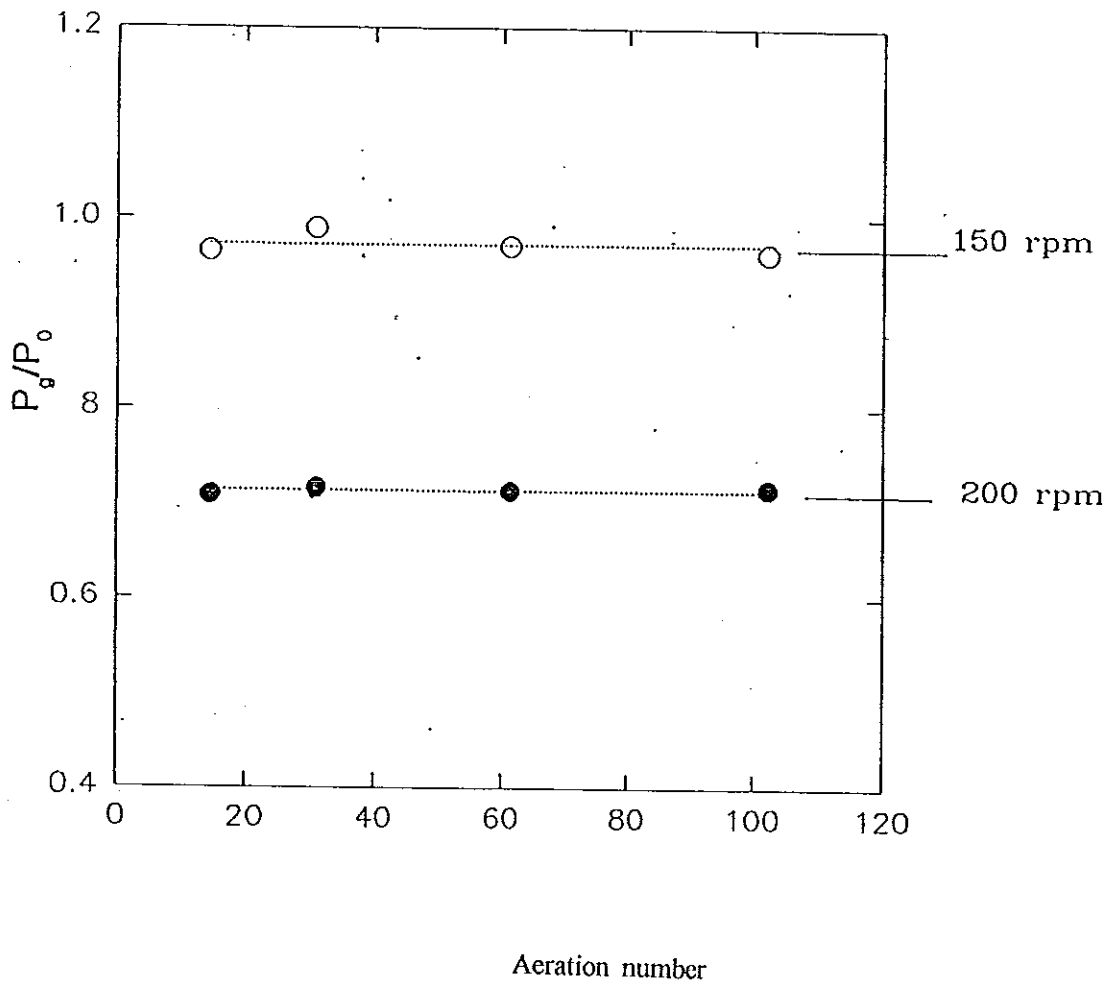
อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (○, ●) ตามลำดับ



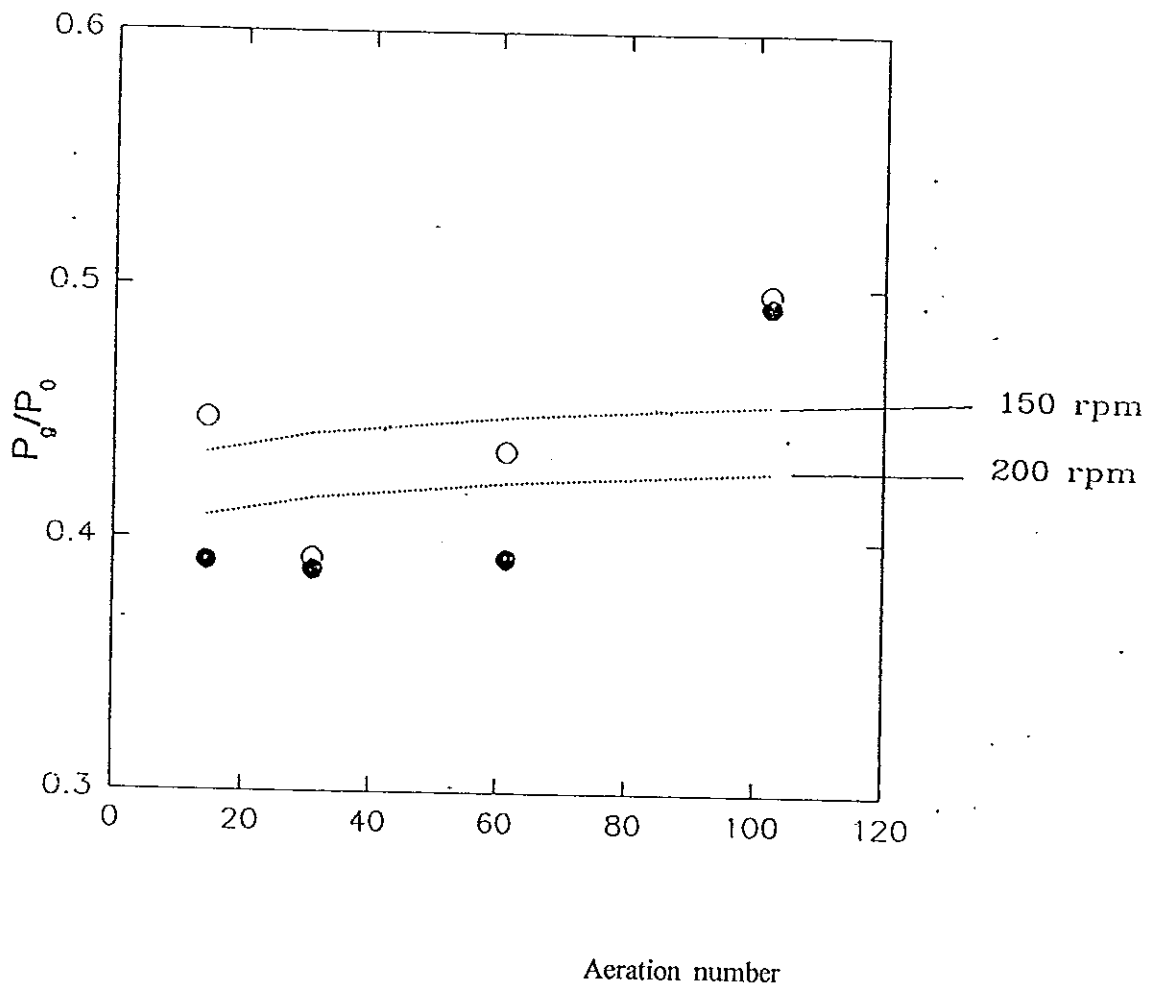
ภาพผนวกที่ ๗ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก

ใบกวนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพิทเบลค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)

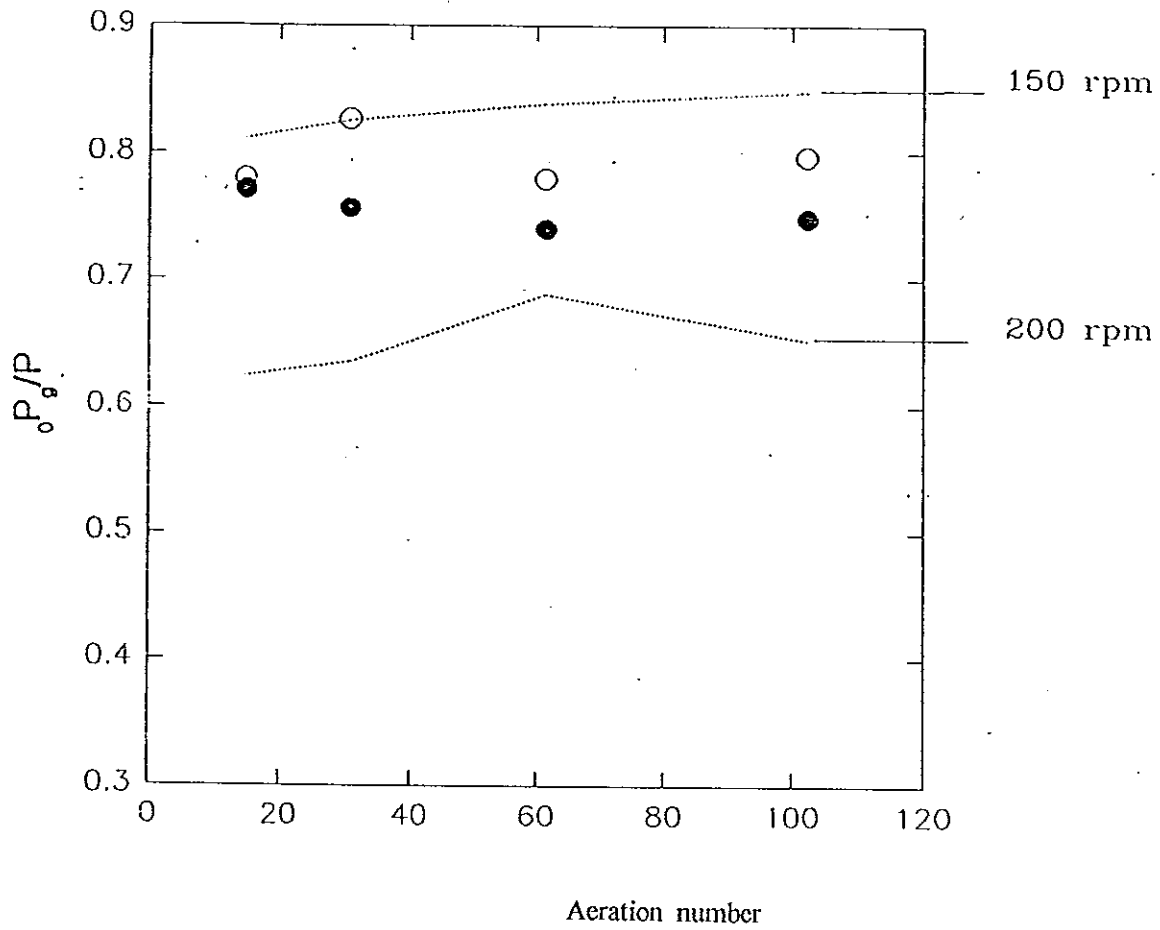
อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (○, ●) ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ๘ สารละลายแซนเทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก
 ใบกวนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพิตเบลค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (O , ●) ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ๑๑ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก
 ไบกววนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพีทเบลค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)
 อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (○, ●) ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ 10 ตารางละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

ใบกวนแบบเทอร์ไบน์คู่กับพิทเบลค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.105 เมตร (TP)

อัตราเร็วรอบ 150 และ 200 รอบต่อนาที (○, ●) ตามลำดับ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวศุภราภรณ์ ปางนิตกรณ์

วัน เดือน ปี เกิด 28 กุมภาพันธ์ 2512

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (ศส.บ)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2534