



รีโพลยีของของไหลนอน-นิวโตเนียนและการผสมใน

ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

Rheology of Non-Newtonian Fluid and

Its Mixing in Air-lift Reactor

ยุพดี สันติวุฒน์

Yuppadee Suntiwut

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2538


เลขที่	QA 929.5 ๗๗๖ ๘๕๓๘	๐.๒
Bib Key	๘๒๖๗๘	

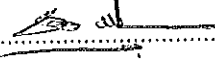
(1)


ชื่อวิทยานิพนธ์      รีโอไลย์ของของไหลนอน-นิวโตเนียนและการผสมในถังปฏิกรณ์  
แบบอากาศยก  
ผู้เขียน              นางสาวยุพดี สันติคุณัน  
สาขาวิชา              วิศวกรรมเคมี

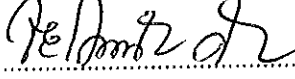
คณะกรรมการที่ปรึกษา


คณะกรรมการสอบ

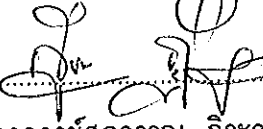
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

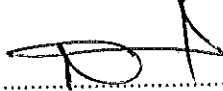
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร)

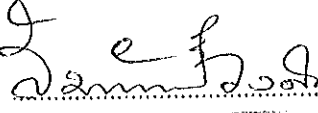
.....กรรมการ  
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัตนะ)

.....กรรมการ  
(ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัตนะ)

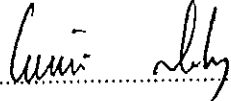
.....กรรมการ  
(อาจารย์สุกวรณ ภูิระวนิชย์กุล)

.....กรรมการ  
(อาจารย์สุกวรณ ภูิระวนิชย์กุล)

.....กรรมการ  
(ดร. สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สัมพันธ์ วงศ์นาวา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....  
(ดร. ไพรัตน์ สงวนไทร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	รีโวลยีของของไหลนอน-นิวโตเนียนและการผสมในถังปฏิกรณ์ แบบอากาศยก
ผู้เขียน	นางสาวยุพดี สันติวฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2538

### บทคัดย่อ

การศึกษาปรากฏการณ์ส่งผ่าน และการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียนอาจทำได้โดยใช้แนวคิด (concept) ที่เรียกว่า "การศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น" (Approach of increasing complexity) ซึ่งแบ่งแยกปัญหาออกเป็น ส่วนย่อยโดยที่มีอันตรกิริยาระหว่างแต่ละส่วนน้อยที่สุด ในขั้นต้นของการทดลองเป็นการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละส่วนย่อยของปัญหา หลังจากที่ได้ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่เราต้องการศึกษานั้นชัดเจนแล้ว จึงค่อยรวมความซับซ้อนเหล่านั้นเพิ่มขึ้นทีละขั้น

ในการศึกษานี้ ขั้นแรกของการศึกษา คือการแบ่งแยกส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรงออกจากส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหมัก โดยการนำของไหลจำลอง (model fluid) เข้ามาใช้ในการศึกษาแทนบรอร์จริง โดยเลือกระบบสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ-บรอร์แซนแรนแกมจริง เป็นกรณีศึกษา ในขั้นนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโวลยี (Rheological matching) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเชื่อมโยงผลการทดลองที่ได้จากของไหลจำลองให้สามารถประยุกต์ใช้กับบรอร์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการหมักจริง ๆ จากการเทียบเคียงค่า  $n$ ,  $K$  และ  $G'$  พบว่า ความเข้มข้นของบรอร์แซนแรนแกมจริงส่วนใหญ่จะถูกเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จที่มีค่าความเข้มข้นลดลง

ขั้นถัดมาเรานำสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จซึ่งเป็นของไหลจำลอง มาใช้ในการศึกษากลไกการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งการศึกษาในขั้นนี้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาทางทฤษฎีได้แก่ การพัฒนา ซิมิวเลต และประมาณค่าพารามิเตอร์

ของแบบจำลอง แล้วเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่าง ๆ ที่มีการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ เพื่อใช้อธิบายกลไกการผสมในถังปฏิกรณ์ พบว่าแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีความยืดหยุ่นดีกว่าหลาย ๆ แบบจำลองที่มีการตีพิมพ์มาก่อน ส่วนที่สองเป็นการทำการทดลองเพื่อศึกษาการผสม, ไฮโดรไดนามิกส์, เวลาในการวนครบรอบ ( $t_c$ ) และเวลาในการผสม ( $t_m$ ) โดยใช้วิธีติดตามการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรเซอร์ และเทคนิคการติดตามอนุภาค คุณค่าที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้คือ การพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูล และนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อให้เห็นแนวทางการวิเคราะห์ แต่จะไม่เน้นคุณค่าของผลการทดลองในเชิงวิเคราะห์ จากการทดลองพบว่าเมื่อ gas superficial velocity ( $u_{sg}$ ) สูงขึ้น การกระจายของฟองอากาศหนาแน่นมากขึ้น  $t_c$  และ  $t_m$  มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่ค่อยชัดเจน เมื่อนำผลทั้งสองส่วนที่ได้มาเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ยังไม่จัดอยู่ในระดับที่ดีนัก จึงควรมีการพัฒนาเทคนิคการเก็บข้อมูลในการผสมให้เร็วขึ้น

ดังกล่าวข้างต้นเป็นเพียงเบื้องต้นของการวิจัยขั้นต่อ ๆ ไป เพื่อการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างมีระบบ

Thesis Title            Rheology of Non-Newtonian Fluid and Its Mixing in Air-lift Reactor  
Author                    Miss Yuppadee Suntiwiut  
Major Program            Chemical Engineering  
Academic Year            1995

### Abstract

A Study on transport phenomena and mixing in bioreactor containing non-newtonian fluid can be done by so called "the approach of increasing complexity". Here, the whole problems are divided into many sub-problems which are manageable and possess minimum interaction. Initially many factors affecting the behaviour of sub-problems must be studied and well understood. Afterward, they must be put together properly.

In this study, firstly, the problem is divided into fermentation related and non-related by employing model fluid as a representative of real broths. Xanthan gum solutions - Xanthan broth system was chosen as a case study. In this step, the technique called rheological matching is developed in order to utilize the compiled results derived from model fluid to real fermentation broth. By matching  $n$ ,  $K$  and  $G'$ , it was found that the concentrations of real xanthan broths were match to the model fluids of lower concentrations.

Mixing of the model fluid in air-lift reactor was also studied. The work comprises of two sections: 1) The development of volumetric backmixing model, network -of-zone model and the simulation and parameter estimation of network-of-zone model. It was found that the model developed in this work is more flexible and realistic than the most published models. 2) Hydrodynamics and the measurement of circulation time ( $t_c$ ) and mixing time ( $t_m$ ). The preliminary study of  $t_c$  and  $t_m$  by using tracer response and particle tracking technique has contributed to the development of measurement techniques and parameter estimation.

The experiment result is of less value because of rather poor measurement technique, however.

Experimental data reveals that increasing of gas superficial velocity ( $u_{sg}$ ) results in higher gas hold up and decreasing  $t_c$  and  $t_m$ . Although, the trend is not so obvious due to the experimental techniques. The network-of-zone model developed can also described experimental data considerably well, although it is seen that a faster technique of collecting data must be developed.

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

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาศริต ทองอุไร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัย และการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่พบ ตลอดการวิจัย รวมทั้งคำแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาจารย์สุภวรรณ ภูริวงนิชย์กุล กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัย และตรวจทานแก้วิทยานิพนธ์ ดร. สุธรรม สุขมณี กรรมการผู้แทนจากภาค วิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สัมพันธ์ วงศ์นาวา กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้วิทยานิพนธ์ ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนการศึกษาตลอดสองปีการศึกษา และทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัย คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เชื้อเพื่อสถานที่ และวัสดุ อุปกรณ์ ในการดำเนินการวิจัยด้วยดี ตลอดจน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เชื้อเพื่ออุปกรณ์ และช่วยประสานงานกับบัณฑิตวิทยาลัย ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ครูพรชัย ศรีไพบลุยย์ ตลอดจนบุคลากร ในคณะอุตสาหกรรมเกษตร และบุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้การวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณน้ำ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคน ด้วยความเคารพรักอย่างที่สุด ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งในการศึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ทุก ๆ คน สำหรับกำลังใจ คำแนะนำ และการช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ ด้วยดี

ยุพดี สันติคุณณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(14)
รายการตาราง.....	(19)
รายการภาพประกอบ.....	(20)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
ตรวจเอกสาร.....	1
พอลิเมอร์ชีวภาพจากจุลินทรีย์.....	1
รีโอโลยีของบรอร์.....	4
สมบัติความหนืด.....	4
สมบัติวิสโคอิลาสติก.....	6
การผสม.....	12
นิยามและมโนทัศน์ของการผสม.....	12
การผสมระดับจุลภาคและการผสมระดับมหภาค.....	12
การผสมแบบปั่นป่วน.....	12
เวลาในการผสมและเวลาในการวนครบรอบ.....	14
คุณภาพของการผสมในสารผสมที่เป็นของเหลว.....	17
รูปลักษณะการไหล.....	20
รูปลักษณะการไหลของฟองใน downcomer zone.....	24



แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการผสมในถัง	
ปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	25
กรณีศึกษา-การผลิตแซนแทน.....	30
ความสำคัญและการใช้แซนแทนในทางอุตสาหกรรม.....	30
กระบวนการผลิตแซนแทน.....	30
ปัญหาในการหมักแซนแทน.....	32
ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแทน.....	34
ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์.....	35
ถังหมักแบบอากาศยก.....	35
ถังหมักแบบกวนที่ใช้สำหรับการหมักแซนแทน.....	36
ถังหมักสำหรับของไหลนอน-นิวโตเนียน :	
การเปรียบเทียบ.....	37
วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น.....	39
ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis.....	39
แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น.....	41
วัตถุประสงค์.....	45
2 แนวคิดและการพัฒนา.....	46
การพัฒนาแบบจำลองการผสมย้อนกลับ.....	46
แบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร.....	46
แบบจำลองโครงข่ายของโซน.....	51
ผลเฉลยของแบบจำลอง network-of-zone.....	56
ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	56
ผลเฉลยเชิงตัวเลข.....	59
ผลการวิเคราะห์การซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone.....	60
ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง network-of-zone กับ	
แบบจำลอง ของ Merchuk and Yungler (1990).....	60
ผลของเซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์	
(largest well-mixed cell).....	60
ผลของ S.....	63

ผลของ N.....	67
การพัฒนาวิธีการประมาณพารามิเตอร์.....	71
3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ.....	79
วัสดุ.....	79
อุปกรณ์.....	79
วิธีการ.....	82
ก. การสร้างและพัฒนาถังปฏิกรณ์ชีวภาพจำลองแบบอากาศยก	
ขนาด 20-30 ลิตร.....	82
ข. การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม	
และการเทียบเคียงทางรีโอโลยี.....	85
การเตรียม, คัดเลือกสารละลาย และพารามิเตอร์ในการศึกษา	
สมบัติทางรีโอโลยี.....	85
การเตรียมสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ.....	85
การทดสอบหาสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม	
สำหรับการเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัม.....	85
การหาความขึ้นในผงแซนแทนกัมสำเร็จรูป.....	85
การเตรียมสารละลายแซนแทนกัมปริมาตร 250 มิลลิลิตร	
8 ความเข้มข้น คือร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0,	
1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก.....	85
การทดลองเพื่อหาค่าความเครียด (strain) ที่เหมาะสมที่สุด	
และย่านลิเนียร์วิสโคอิลาสติก.....	86
การวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี.....	86
การคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลาย	
แซนแทนกัมที่เหมาะสม.....	86
การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม	
ปริมาตร 50 ลิตร ที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จรูป.....	86

การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม ที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จกับบรอนที่เกิดจากการหมักจริงเพื่อสามารถโยง กลับไปยังสมบัติทางรีโอโลยีของบรอนในสภาวะการหมักจริง.....	86
ค. การศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น.....	87
การพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษากลไกการผสม.....	87
การศึกษาไฮโดรไดนามิกในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	87
การศึกษาเวลาในการวนครบรอบ ( $t_u$ ) ของของไหลในถัง ปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น.....	87
การศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยวิธีติดตาม การตอบสนองของความเข้มข้นของเทรเซอร์.....	87
4 ผลและวิจารณ์.....	88
ก. ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีและการเทียบเคียงทางรีโอโลยี.....	88
ผลการเตรียม, คัดเลือกสารละลาย และพารามิเตอร์ในการศึกษา สมบัติทางรีโอโลยี.....	88
ผลการทดสอบหาสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม สำหรับการเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัม.....	88
ผลการทดลองหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด สมบัติทางไดนามิก.....	88
ผลการวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยีเพื่อคัดเลือกความ เข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เหมาะสม.....	91
ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม ปริมาตร 50 ลิตรที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จ.....	95
ผลการศึกษาหาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอโลยีของสาร ละลายแซนแทนกัมมีความคงตัวและสม่ำเสมอ.....	95
ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ, เกลือ ต่อค่าสมบัติทาง รีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ.....	95

ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทน	
กัมที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จ กับบรธที่เกิดจากการหมักจริง.....	96
การศึกษาโดยการทดสอบโดยการสั่น (Oscillation ( $G'$ , $G''$ กับ $\omega$ )).....	96
Dynamic property ของ Xanthan broth :	
คุณลักษณะโดยทั่วไป.....	96
Storage moduli ( $G'$ ) และ Loss moduli ( $G''$ )	
กับ frequency ( $\omega$ ).....	96
กราฟ $G' - \omega$ โดยทั่วไปสำหรับบรธที่เกิด	
จากการหมักแซนแทน.....	108
การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของบรธแซนแทน	
จริงกับสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ (food grade).....	112
การศึกษาโดยการทดสอบแบบเจ็อนเป็นวง (Rotation ( $K$ , $n$ )).....	123
ข. ผลการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	133
ผลการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก.....	133
ผลการศึกษาเวลาในการวนครบรอบของของไหลใน	
ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น.....	138
ผลการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยวิธีติดตาม	
การตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรเซอร์	
(tracer response).....	140
5 สรุป.....	153
ข้อเสนอแนะ.....	156
บรรณานุกรม.....	164
ภาคผนวก.....	177
ก เทคนิค finite difference สำหรับแบบจำลองการหมุนเวียนที่มี	
การผสมย้อนกลับ (Backmixing-circulation model).....	177
ข การแปลงความเครียด (strain) ในหน่วย rad หรือ องศา (deg)	
ไปเป็น % strain.....	178

ค	รายละเอียดลักษณะการไหล การกระจายของฟองอากาศ ในน้ำ, สาระละลายแทนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก.....	179
ง	ตัวอย่างภาพของอนุภาคที่ได้จากเทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique).....	192
จ	นิยาม "เวลาที่ใช้ในการผสม (mixing time: $t_m$ )" ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	198
ฉ	The coefficient of determination ( $r^2$ ).....	201
	ประวัติผู้เขียน.....	202

### ตัวย่อและสัญลักษณ์

$A^*, A_1, A_2$	=	ค่าพารามิเตอร์จากการประมาณแบบจำลอง network-of-zone
$A_D$	=	พื้นที่หน้าตัด downcomer zone
$A_R$	=	พื้นที่หน้าตัด riser zone
ALF	=	ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (air-lift fermentor)
BC, BCF	=	ถังปฏิกรณ์แบบบับเบิลคอลัมน์ (bubble column fermentor)
$B_0$	=	Bodenstein number $\left(\frac{uL}{D}\right)$
C	=	elastic intensity index ในสมการที่ (4.1 และ 4.2) = ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจ ในรูป 5.3
$C_D$	=	ความเข้มข้นเดิมของเทรซเซอร์หรือองค์ประกอบที่เราสนใจที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้วในถัง ก่อนที่จะมีการเติมเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจ ลงไปใหม่
$C_\infty$	=	ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจที่เวลา $t = \infty$ หลังการเติมเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจลงไปใหม่
$C_i$	=	ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจในโซน หรือ เซลล์ที่ $i$ ( $i=1, 2, 3\dots$ )

### ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$C_0$	=	ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจใน gas separator zone ที่เวลาเริ่มต้นของแบบจำลอง Merchuk and Yunger (1990) ในสมการ (1.22)
$C_{in}$	=	ความเข้มข้นที่ทางเข้าของเทรซเซอร์หรือองค์ประกอบที่เราสนใจ
$C_n$	=	ความเข้มข้นที่เซลล์ หรือสเตจ ของเทรซเซอร์หรือองค์ประกอบที่เราสนใจ
$C_{out}$	=	ความเข้มข้นที่ทางออกของเทรซเซอร์ หรือองค์ประกอบที่เราสนใจ
CMC	=	carboxymethylcellulose
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (dispersion coefficient)
$D_c$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ หรือถังปฏิกรณ์ (column diameter)
$D_0$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อดราฟ (draft tube diameter)
f	=	การผสมกลับ นิยามเป็นอัตราส่วนของการไหลกลับระหว่างสเตจ ต่อการไหลโดยการพาไปข้างหน้าสุทธิ ในรูป 2.3
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
$G'$	=	มอดุลัสสะสม (storage modulus) (Pa หรือ $N/m^2$ )
$G''$	=	มอดุลัสสูญเสีย (loss modulus) (Pa หรือ $N/m^2$ )
$H_L$	=	ความสูงของของไหลเมื่อยังไม่มีการให้อากาศ

### ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

K	=	consistency index
$K_L a$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (the volumetric mass transfer coefficient) (วินาที <sup>-1</sup> ; s <sup>-1</sup> )
n	=	plasticity or power law index (-)
N	=	จำนวนเซลล์ หรือ สเตจ
$N_i$	=	จำนวนเซลล์ในโซนที่ i (i = 1, 2, 3...)
$N_{รวม}$	=	จำนวนเซลล์รวมทั้งหมดของถังปฏิกรณ์
P	=	elasticity index ในสมการ (4.1)
	=	Volumetric Peclet number ในสมการ (2.3)
p	=	ความเข้มข้นของสารละลายแซนแทน (g/kg) ในสมการ (4.3)
Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$r^2$	=	the coefficient of determination
S	=	ความเข้มของการแยกจากกัน (the intensity of segregation) ใน สมการ (1.20)
	=	ตัวแปรในแบบจำลองของ Merchuk and Yunger (1990) ใน สมการ (1.23)
SPR	=	อัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ (specific xanthan production rate)
STF, STR	=	ถังปฏิกรณ์แบบตั้งกวน (stirred-tank fermentor or reactor)



### ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$t$	=	เวลา (วินาที)
$t_c$	=	เวลาในการวนครบรอบ (circulation time)
$t_m$	=	เวลาในการผสม (mixing time)
$u_{sg}$	=	gas superficial velocity (ระยะทาง/เวลา)
$V_i$	=	ปริมาตรของของเหลวในโซน หรือ เซลล์ที่ $i$ ( $i=1, 2, 3\dots$ )
$\alpha^*, \alpha_1, \alpha_2$	=	ค่าพารามิเตอร์จากการประมาณแบบจำลอง network-of-zone
$\gamma$	=	ความเครียดเฉือน (shear strain)
$\gamma^0$	=	ความเครียดเฉือนสูงสุด (maximum shear strain)
$\dot{\gamma}, \left(-\frac{dv}{dr}\right)$	=	อัตราการเฉือน คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (shear rate) (วินาที <sup>-1</sup> ; s <sup>-1</sup> )
$\delta$	=	การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ในสมการ (1.17)
$\delta$	=	การเบี่ยงเบนสัมพัทธ์สัมบูรณ์เฉลี่ย ในสมการ (1.16)
$\delta_{max}$	=	การเบี่ยงเบนสัมพัทธ์สูงสุด ในสมการ (1.15)
$\delta, \tan \delta$	=	ตัวแปรทางรีโอโลยีตัวหนึ่งซึ่งระบุตามสมการ (1.12)
$\eta$	=	ความหนืด (viscosity) (Pa.s)
$\eta'$	=	ความหนืดไดนามิก (dynamic viscosity) (Pa.s)
$\eta^*$	=	ความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity) (Pa.s)

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\Lambda$	=	ระดับของการเบี่ยงเบน	ในสมการ	(1.19)
$\sigma$	=	การเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
$\tau$	=	แรงเค้นเฉือน (shear stress) (Pa)		
	=	เวลาเรชีเดนซ์เฉลี่ยของอนุภาคของไหล	ในสมการ	(2.3)
$\tau_i$	=	เวลาเรชีเดนซ์ของของเหลวในโซนหรือเซลล์ที่ $i$ ( $i=1, 2, 3, \dots$ )		
$\tau_m$	=	แรงเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress) (Pa)		
$\tau_y$	=	ค่าความเค้นที่ของไหลเริ่มไหล (yield stress) (Pa)		
$\omega$	=	พิสัยความถี่ (frequency) (Rad/s; Hz)		
$\theta$	=	เวลาไร้มิติ (dimensionless time) $\left(\frac{t}{\tau}\right)$	(-)	
$\theta_c$	=	เวลาในการวนครบไร้มิติ (dimensionless circulation time) มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{t_c \cdot u_{sg}}{H_L}\right)$	(-)	
$V$	=	ปริมาตรทั้งหมดของถังปฏิกรณ์	ในรูป	2.1

## รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1	สรุปเวลาในการผสมและเวลาในการวนครบรอบ จากผู้ที่ได้ศึกษาไว้ก่อน	16
2	ผลการศึกษาเวลาในการวนครบรอบ ( $t_c$ ) ของของไหล น้ำ, สารละลาย แซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ $u_{\infty}$ ต่าง ๆ กัน	138
3	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของน้ำ กรณีข้อ ก. มี constraint	144
4	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของน้ำ กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint	145
5	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ก. มี constraint	146
6	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint	147
7	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ก. มี constraint	148
8	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของ สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint	149

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 กระบวนการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์ชนิดแซนแธนและอัลจิเนต	3
1.2 การจำแนกของไหลโดยอาศัยสมบัติทางด้านความหนืด	5
1.3 การไหลเฉือนไดนามิกในอุดมคติ	7
1.4 การไหลเฉือนไดนามิก	8
1.5 สัณฐาน (configuration) ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก	19
1.6 ทิศทางการไหล (flow path) และบริเวณวอร์เท็กซ์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อระบายภายใน	23
1.7 กระบวนการไหล (flow patterns) ใน downcomer zone	24
1.8 แบบจำลองไฮโดรไดนามิกส์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่เสนอขึ้นโดย Merchuk et al. (1988,1990)	26
1.9 การตอบสนอง (response) ของแบบจำลองต่อพัลส์ของเทรเซอร์เมื่อใช้ตัวแปร S 2 ค่า (S=3, S=7)	27
1.10 Bodenstein number $B_0$ เป็นฟังก์ชันของตัวแปร S ในแบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990)	28
1.11 เวลาในการผสมเป็นฟังก์ชันของตัวแปร S ในแบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990)	28
1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมักและการแบ่งปัญหาเป็นส่วนย่อย (problem segmentation)	43
2.1 สมดุลดิฟเฟอเรนเชียลเชิงปริมาตร	47
2.2 แบบจำลองการหมุนเวียนที่มีการผสมแบบย้อนกลับ	49
2.3 แบบจำลอง stepwise model หรือ simple network-of-zone model	52
2.4 แบบจำลอง network-of-zone ที่มีการวน	54
2.5 การเปรียบเทียบผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone กับแบบจำลองของ Merchuk et al.(1990) เมื่อ $N_1=1$ และเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนที่เหลือ ( $N=N_2=N_3=N_4$ ) มากขึ้น	61

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.6 การซิมิวเลตแสดงผลของ largest well-mixed cell กรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์รวม ( $N_{รวม}$ มากขึ้น)	62
2.7 การซิมิวเลตแสดงผลของ largest well-mixed cell กรณีที่ 2 ; S=1 โดย $N_1=N_2=N_3=N_4=1$ $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$ $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$	64
2.8 การซิมิวเลตแสดงผลของ largest well-mixed cell กรณีที่ 3 ; S=2 โดย $N_1=N_2=N_3=N_4=1$ $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$ $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$	65
2.9 การซิมิวเลตแสดงผลของ largest well-mixed cell กรณีที่ 3 ; S=4 โดย $N_1=N_2=N_3=N_4=1$ $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$ $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$	66
2.10 ผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของ ปริมาตรสอดคล้องกับในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$ และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 12 หน่วยปริมาตร ทุกเซลล์) , S=9 , $N_{รวม}=10$ และ สังเกตผลที่ (ไซน,เซลล์) ต่าง ๆ	68
2.11 ผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของ ปริมาตรสอดคล้องกับในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$ และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 6 หน่วยปริมาตร ทุกเซลล์) , S=9 , $N_{รวม}=20$ และ สังเกตผลที่ (ไซน,เซลล์) ต่าง ๆ	69

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.12 ผลการซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของ ปริมาตรสอดคล้องกับในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$ และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 3 หน่วยปริมาตร ทุกเซลล์) , $S=9$ , $N_{รวม}=40$ และ สังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ	70
2.13 กระบวนการไหลของถังปฏิกรณ์แบบลูก	71
2.14 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และสังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย $N_1:N_2:N_3:N_4=$ $1:1:1:1$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์ ; $S=6$ และ $N_{รวม}=20$ )	73
2.15 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และสังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย $N_1:N_2:N_3:N_4=$ $7:3:7:3$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์ ; $S=3.71$ และ $N_{รวม}=20$ )	74
2.16 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และสังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย $N_1:N_2:N_3:N_4=$ $3:7:7:3$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์ ; $S=10.67$ และ $N_{รวม}=20$ )	75
2.17 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และสังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย $N_1:N_2:N_3:N_4=$ $2:4:6:8$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์ ; $S=19$ และ $N_{รวม}=20$ )	76

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
2.18	ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และสังเกตผลที่ (ไซน, เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย $N_1:N_2:N_3:N_4 = 8:6:4:2$ ; ขนาดเซลล์ในไซนที่ 1 เป็น 2, ไซนที่ 2 เป็น 3, ไซนที่ 3 เป็น 4 และ ไซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์; $S=2.75$ และ $N_{tot}=20$ )	77
2.19	การเปรียบเทียบ $v/c$ lag จากที่คำนวณตามทฤษฎี กับที่ได้จากข้อมูลการซิมิวเลต	78
3.1	ถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่สร้างและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง	81
3.2	เครื่องมือวัดสมบัติทางรีโอโลยี (Haake CV 20) ที่สามารถวัดได้ทั้ง steady shear และ dynamic shear properties และสามารถควบคุมอุณหภูมิในการวัดได้ละเอียดถึง $\pm 0.3^\circ C$	83
3.3	ไดอะแกรมแสดงการจัดระบบฮาร์ดแวร์สำหรับระบบศึกษากลศาสตร์ของของไหล ในถึงปฏิกรณ์จำลองแบบอากาศยก โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique)	84
4.1	$G'$ กับ % strain ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน (1.5 % xanthan)	89
4.2	$G''$ กับ % strain ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน (1.5 % xanthan)	90
4.3	$G'$ กับ strain (rad) ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) : strain sweep 0.3-10 deg	92
4.4	$G'$ กับ strain (rad) ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) : strain sweep 0.3-1 deg	93
4.5	$G'$ กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก	94
4.6	$G'$ กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตรความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน และ 6 เดือน	97

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.7 G' กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตรความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก โดยการผสมตัก 3 บริเวณในถัง	98
4.8 G' กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	99
4.9 ข้อมูลการกระจาย $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	100
4.10 ค่าเฉลี่ย $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	101
4.11 G' กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่ใช้น้ำกลั่น+เกลือและน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย	102
4.12 ข้อมูลการกระจาย $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่ใช้น้ำกลั่น+เกลือ และน้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย	103
4.13 ค่าเฉลี่ย $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่ใช้น้ำกลั่น+เกลือ และน้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย	104
4.14 G' กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เติมระดับเกลือร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน	105
4.15 การกระจายของข้อมูล $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เติมระดับเกลือร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน	106
4.16 ค่าเฉลี่ยของข้อมูล $\eta$ กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เติมระดับเกลือร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน	107
4.17 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ G'- $\omega$ ของบรอร์แซนแทน	109
4.18 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ G'- $\omega$ และ G''- $\omega$ ที่แสดงจุดสิ้นสุดบริเวณเนิน (plateau zone) ที่ G' เท่ากับ G'' (Batch 6, UQM 1883)	110
4.19 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ G'- $\omega$ ที่ได้รับจากการพล็อตหลายชุดของข้อมูล จากกะ (batches) ต่าง ๆ	111



รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.20 กราฟ $G'-\omega$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	114
4.21 การเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยีในส่วนของกราฟ $G'-\omega$	115
4.22 กราฟ $G'-\omega$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่ช่วง $\omega = 6-65.4$ rad/s	116
4.23 C (elastic intensity index) กับความเข้มข้นของสารละลายแกมส์สำเร็จ เปรียบเทียบกับบรอนจริง	118
4.24 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จกับความเข้มข้นของแซนแทนบรอนจริง โดยพิจารณาจากค่า C	119
4.25 $G''$ กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	120
4.26 $G'$ และ $G''$ กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก	121
4.27 $G''$ กับ $\omega$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เทียบกับบรอนจริง	122
4.28 ข้อมูล $\tau$ กับ $\dot{\gamma}$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก วัดหลังจาก ตั้งทิ้งไว้ 30 และ 37 วัน	126
4.29 ค่าเฉลี่ย $\tau$ กับ $\dot{\gamma}$ ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เทียบกับบรอนจริง ที่ช่วงเวลาการหมักต่าง ๆ	127
4.30 ข้อมูล K, n กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ เทียบกับบรอนจริง	128
4.31 ค่าเฉลี่ย K, n กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จ เทียบกับบรอนจริง	129

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.32 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จกับความเข้มข้นของแซนแทนบรอนจริง โดยพิจารณาจากค่า K และ n	130
4.33 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จกับความเข้มข้นของแซนแทนบรอนจริง โดยพิจารณาจากค่า K,n และ C	131
4.34 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จกับความเข้มข้นของแซนแทนบรอนจริง โดยพิจารณาผลโดยเฉลี่ยจากค่า K, n และ C	132
4.35 ตัวอย่างลักษณะการไหล การกระจายของฟองอากาศในน้ำและสารละลายแซนแทนกัมใน downcomer zone ที่อัตราการให้อากาศต่าง ๆ กัน	137
4.36 ผลของ $u_{\text{sg}}$ ต่อ $t_{\text{g}}$ ที่ได้จากการทดลอง	139
4.37 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำ ที่ระดับความสูงน้ำ 85 เซนติเมตร, อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	141
4.38 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความสูงสารละลาย 85 เซนติเมตร, อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	142
4.39 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความสูงสารละลาย 85 เซนติเมตร, อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	143
4.40 ตัวอย่างการฟิตเส้นที่ลากเชื่อมจุดยอดของกราฟด้วยสมการ exponential ที่ใช้ประมาณผลเฉลี่ยของแบบจำลอง network-of-zone ตามกรณีข้อ ก. มี constraint และข้อ ข. ไม่มี constraint	150
4.41 $t_{\text{m}}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $u_{\text{sg}}$ กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint	151

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ของข้อมูลการทดลองในส่วนต่าง ๆ ที่เชื่อมโยงต่อกันไป เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบถังหมัก	155
5.2 ขอบเขตงานวิจัยในที่นี้ (เส้นประ) และแนวทางการศึกษาต่อ	157
5.3 tracer response curve ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับ tracer response curve ที่น่าจะแสดงกลไกการผสมที่เกิดขึ้นจริง	159
5.4 ค่า pH ที่อ่านได้เมื่อเวลาผ่านไป ของเครื่อง pH meter หลังจากหยุดกรดลงในน้ำ	160
5.5 การใช้ pH electrode หลาย ๆ ตัว ต่อเข้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์	161
5.6 ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ใช้ในการวิจัย เมื่อมองจากด้านบน (a) ชนิดถังเติม (b) ชนิดผ่าซีก	162

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

พอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียน ซึ่งมีปัญหาและความซับซ้อนในระหว่างการผลิตอย่างมาก แต่ในขณะเดียวกันความต้องการการใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ชีวภาพมีสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแซนแทนกัม เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้กันมากที่สุดในบรรดาพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์ (Cottrell and Kang, 1978 และ Kennedy and Bradshaw, 1984) เนื่องจากคุณสมบัติที่มีประโยชน์และไม่เหมือนกับกัมชนิดอื่น

งานวิจัยนี้เป็นงานขั้นเริ่มต้น เพื่อศึกษากลศาสตร์การไหล การผสม ของของไหลนอน-นิวโตเนียน โดยใช้แซนแทนกัมเป็นกรณีศึกษา และทำการศึกษาในดังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยใช้แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (Concept of increasing complexity procedure) ผลจากการวิจัยขั้นต้นนี้คาดว่าจะข้อมูลพื้นฐานของการวิจัยขั้นต่อ ๆ ไป เพื่อการออกแบบดังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพอย่างมีระบบ

#### ตรวจเอกสาร

##### 1. พอลิเมอร์ชีวภาพจากจุลินทรีย์

พอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์อาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- ก ) อินตราเซลล์ลาร์พอลิแซคคาไรด์ (Intracellular polysaccharides) ซึ่งเป็นกลไกในการเก็บกักแหล่งคาร์บอนและพลังงานสำหรับเซลล์
- ข ) พอลิแซคคาไรด์ที่เป็นโครงสร้าง (Structural polysaccharides) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ ยกตัวอย่าง เช่น ลิพอพอลิแซคคาไรด์ (lipopolysaccharides)
- ค ) เอกโซพอลิแซคคาไรด์ (Exopolysaccharides) ซึ่งถูกปล่อยออกจากเซลล์เข้าไปสู่อบรอบ หรืออาจจะเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์

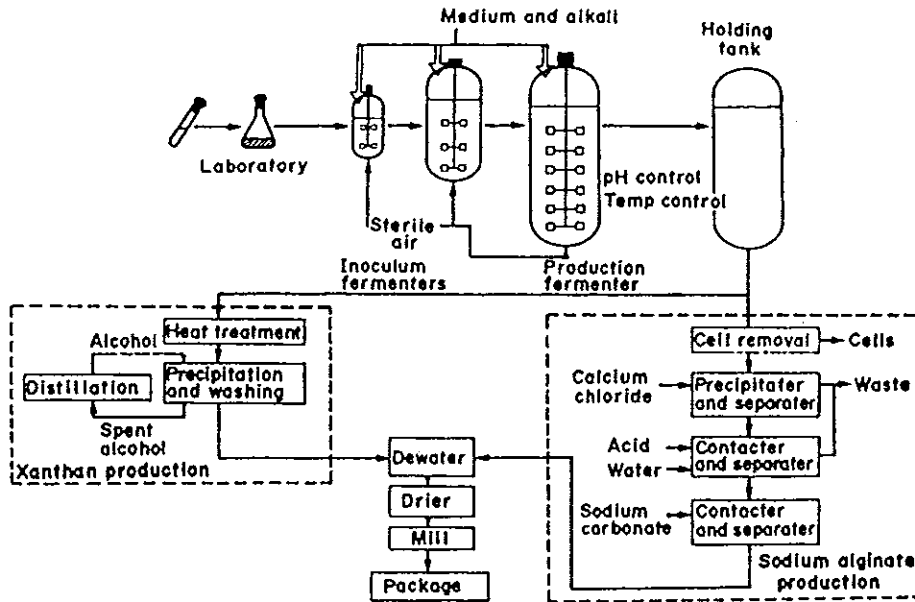
เอคโซพอลิแซคคาไรด์ มีความสำคัญต่อมนุษย์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพราะว่ามันสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก และสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย (Margaritis and Pace, 1985)

แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบหลายชนิด สำหรับบางชนิด และราหลายชนิด สามารถผลิตเอคโซพอลิแซคคาไรด์ พวกนี้ได้แก่ *Azobacter vinelandii* (อัลจินต), *Alcaligenes faecalis* (เคอร์เดน), *Zymomonas mobilis* (ลิแวน), *Pseudomonas sp.*, *Scerotium sp.* (สเคอโรกูแคน), *Xanthomonas campestris* (แซนแธม), *Leuconostoc mesenteroides* (เด็กซ์เตรน), *Aureobasidium pullulans* (พูลูแลน) และอื่น ๆ (Margaritis and Zajic, 1978; Cottrell, 1980 และ Margaritis and Pace, 1985)

เอคโซพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์ ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งในอุตสาหกรรมเคมี, อาหารและยา เพราะมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่มีค่า (novel) และเฉพาะตัว (unique) จึงนำมาใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล (gelling agent), อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifiers), สารทำให้เกิดการคงตัว (stabilizers), สารยึด, จับ (binders), สารทำให้ตกตะกอน (coagulants), สารหล่อลื่น (lubricants), สารทำให้เกิดฟิล์ม (film formers), สารเพิ่มความข้น (thickening agents) และสารทำให้แขวนลอย (suspending agents)

กรรมวิธีการผลิตเอคโซพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. การเตรียมเชื้อ (Culture preparation)
2. การหมัก (Fermentation)
3. การเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ (Recovery)



ภาพประกอบ 1.1 กระบวนการผลิตพอลิแซคคาไรด์จากจุลินทรีย์ชนิด แซนแธน และ อัลจิเนต

ที่มา : Magaritis and Pace (1985)

ปัญหาในระหว่างขั้นตอนการหมัก คือบรอร์ซึ่งเมื่อเริ่มต้นหมักมีสมบัติเป็นของไหลนิวโตเนียนที่มีความหนืดต่ำ จนเมื่อสิ้นสุดการหมักจะมีสมบัติเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียนที่มีความหนืดสูงมาก ขณะที่ความเข้มข้นของเอคโซพอลิแซคคาไรด์เพิ่มขึ้นตามเวลา การเปลี่ยนแปลงทางรีโอโลยี เช่นนี้ มีอิทธิพลอย่างมาก (profound) ต่อลักษณะการผสม (mixing), การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer), การถ่ายโอนความร้อน (heat transfer) ของการหมักเอคโซพอลิแซคคาไรด์ ดังนั้นการออกแบบถังหมักและการดำเนินการหมักที่เหมาะสมจึงต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงทางรีโอโลยีนี้

## 2. รีโอโลยีของบรอธ

### 2.1 สมบัติความหนืด (Viscous property)

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

จากกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's viscosity law)

$$\tau = -\eta (dv / dr) \quad (1.1)$$

โดยที่  $\tau$  คือ แรงเค้นเฉือน (shear stress),  $\eta$  เป็นความหนืด มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน และ  $-(dv / dr)$  คืออัตราการเฉือน (shear rate) เมื่อพิจารณาเส้นกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของผลการทดลองระหว่างค่า  $\tau$  กับ  $-(dv / dr)$  ในภาพประกอบ 1.2 สำหรับของไหลชนิดนิวโตเนียน จะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและความชันของเส้นกราฟคือความหนืด ( $\eta$ ) ตัวอย่างของไหลนิวโตเนียน ได้แก่ น้ำ, (mineral oils), น้ำมันดิน หรือยางมะตอย (bitumen), กากน้ำตาล (mollasses)

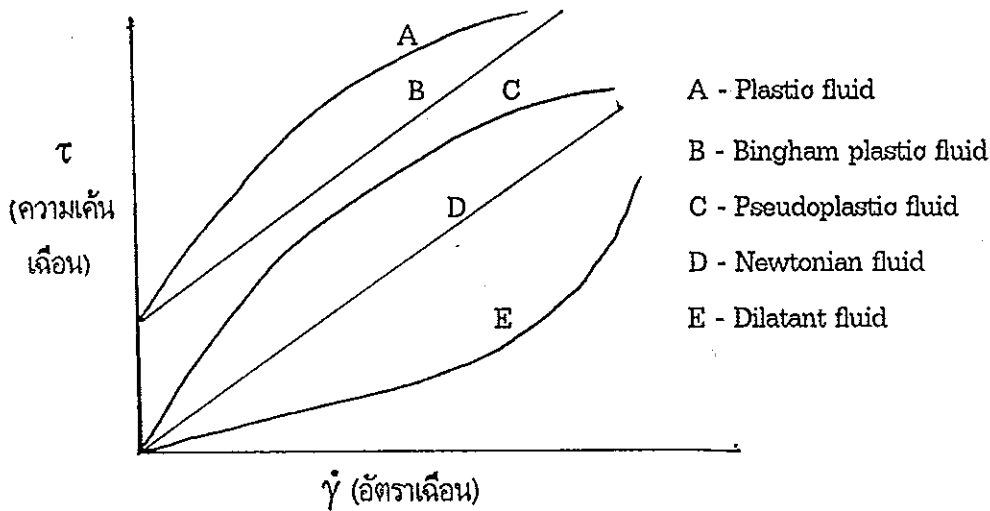
ของไหลนอน-นิวโตเนียน (non-newtonian fluid) คือ ของไหลที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือน (ไม่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน) การเปลี่ยนแปลงความหนืดตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการเฉือนนี้มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมในการดูดกลืนกำลังและการถ่ายโอนออกซิเจน

ของไหลนอน-นิวโตเนียน แบ่งเป็น สองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ

- ของไหลที่ความหนืดคงที่ ไม่ผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน (Time independent fluid)

- ของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน (Time dependent fluid)

ของไหลนอน-นิวโตเนียน อาจมีคุณสมบัติคล้ายกับยางคือ มีความยืดหยุ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา เรียกว่า ของไหลวิสโคอิลาสติก (viscoelastic fluid)



ภาพประกอบ 1.2 การจำแนกของไหลโดยอาศัยสมบัติทางด้านความหนืด  
ที่มา : ดัดแปลงจาก Schramm (1981)

- ของไหลที่ความหนืดคงที่ไม่ผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน

ก. ของไหลบิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic fluid)

เป็นของไหลที่มีความซับซ้อนทางรีโอโลยีที่น้อยที่สุดถัดจากของไหลนิวโตเนียน ซึ่งแตกต่างจากของไหลนิวโตเนียน คือจะมีจุดตัดแกน  $\gamma$  ที่  $\tau_y$  (yield stress) ในหน่วย  $N/m^2$  ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่ของไหลเริ่มไหล ของไหลชนิดนี้จะมีพฤติกรรมเหมือนของไหลนิวโตเนียน เมื่อความเค้นสูงเกินกว่าความเค้นเริ่มต้นนี้

ข. ของไหลพลาสติก (Plastic fluid)

ของไหลบางชนิด มีลักษณะคล้ายคลึงกับของไหลบิงแฮมพลาสติก แต่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนและความเค้นเฉือนไม่เป็นเส้นตรง เราเรียกว่า ของไหลพลาสติก ตัวอย่างของไหลชนิดนี้ ได้แก่ ช็อคโกแลต น้ำมัน สบู่ ยาสีฟัน เนื้อเยื่อกระดูก เนย เป็นต้น

ค. ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid)

ของไหลนอนนิวโตเนียนโดยทั่วไป จะจัดอยู่ในจำพวกนี้ ได้แก่ สารละลายพอลิเมอร์ น้ำมันมายองเนส ของไหลชีวภาพ สี เป็นต้น ของไหลพวกนี้จะมีความหนืดลดลงเมื่ออัตราการเฉือนสูงขึ้น



จากสมการ power-law (Oswald-deWaele equation)

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

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

n : flow behavior index (ไม่มีหน่วย)

ของไหลซูโดพลาสติกคือของไหลที่มีพฤติกรรมตามสมการ (1.2) โดยที่ n มีค่าน้อยกว่า 1 ในกรณีที่ n มีค่ามากกว่า 1 เราเรียกของไหลนั้นว่า “ของไหลไดเลแทน (dilatant fluid)”

Margaritis and te Bokkel (1984) ได้ศึกษาไรโอแกรม (rheogram) ของสารละลายแซนแทน, สารละลายเด็กซ์เตรนน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสูง และสารละลายพอลิแซคคาไรด์อื่นๆ พบว่าเฮคไซพอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่มีพฤติกรรมเป็นไปตาม power-law model

- ของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน

ก. ของไหลทิกซ์โทรปิก (Thixotropic fluid)

ของไหลชนิดนี้มีลักษณะที่แรงเค้นเฉือนลดลงตามเวลาเมื่อเฉือนด้วยอัตราคงที่ พฤติกรรมนี้สามารถย้อนกลับได้ (reversible) นั่นคือถ้าหยุดการเฉือนสักกระยะหนึ่ง ของไหลจะคืนสู่สภาพเดิมอีกครั้ง ของไหลพวกนี้ได้แก่ สารละลายพอลิเมอร์ อาหารบางชนิด สี สำหรับทฤษฎีของของไหลที่ความหนืดผันแปรตามความยาวนานของการเฉือน ยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร

ข. ของไหลรีโอเพคติก (Rheopectic fluid)

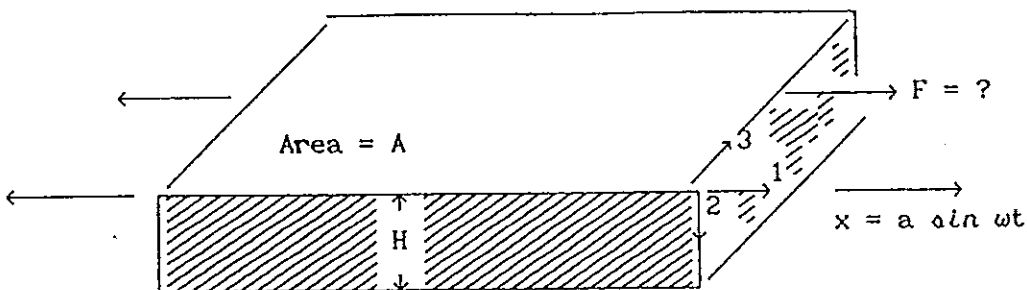
ของไหลชนิดนี้พบได้น้อยมาก มีลักษณะที่แรงเค้นเฉือน แปรผกผันแบบเพิ่มขึ้นกับเวลาที่อัตราการเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ตัวอย่างเช่น bentonite clay suspensions

## 2.2 สมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic property)

สารละลายแซนแทนและพอลิเมอร์ชีวภาพส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า “วิสโคอิลาสติก (viscoelastic)” นั่นคือสารละลายเหล่านี้นอกจากจะมีความหนืดซึ่งเป็นลักษณะของของเหลวแล้ว ยังมีความยืดหยุ่นคล้ายของแข็ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าสารละลายเหล่านี้มีลักษณะความเป็นของเหลวและของแข็งในเวลาเดียวกัน

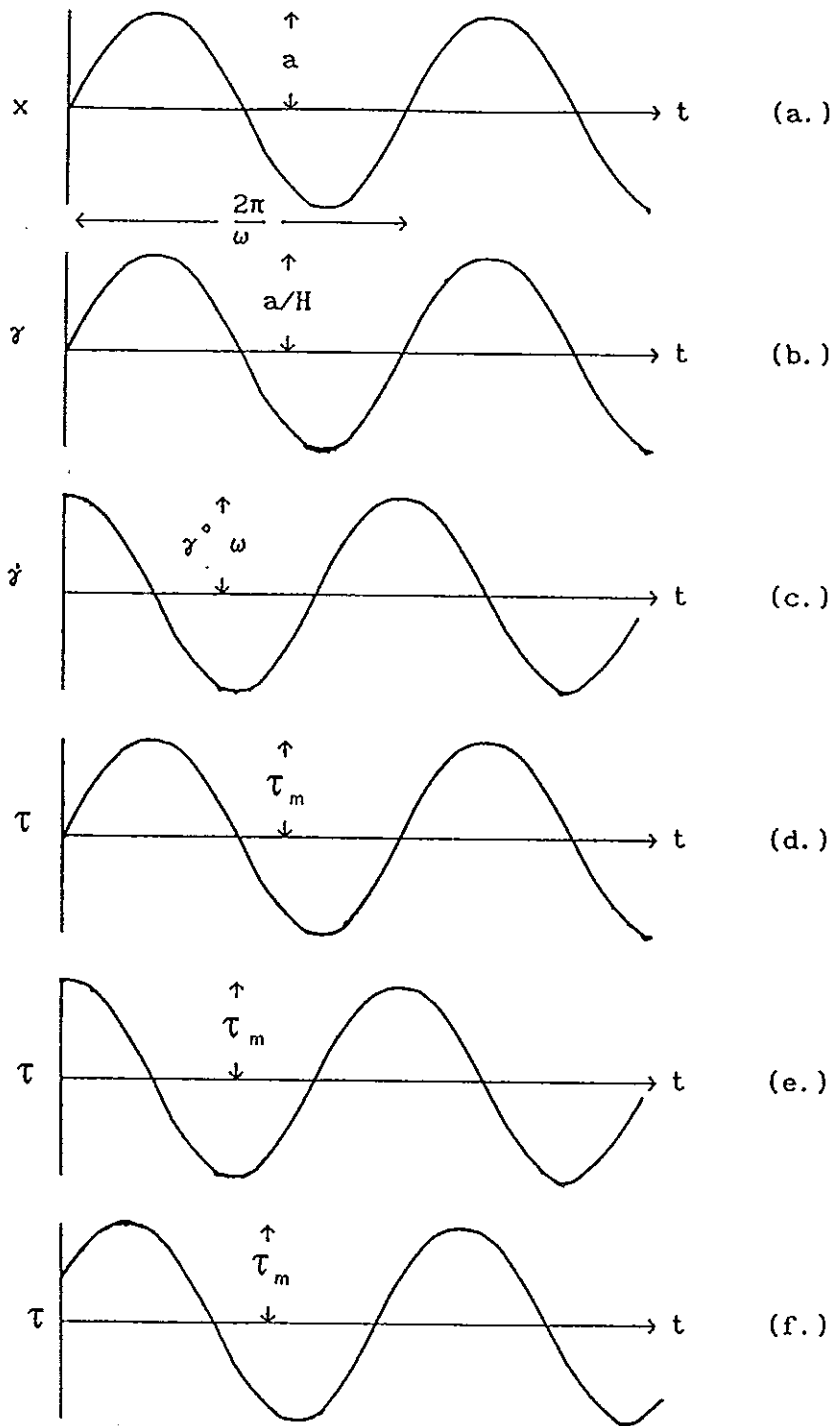
วิธีการมาตรฐานในการกำหนดลักษณะวิสโคอีลาสติก คือการวัดสมบัติทางรีโอโลยีเมื่อมีการเฉือนไดนามิก (dynamic shear rheological properties) เป็นการวัดในโหมดการเฉือนไดนามิก (dynamic shearing mode) หรือการเฉือนสับทิศทาง ภาพประกอบ 1.3 เป็นภาพแสดงเครื่องเฉือนไดนามิกในอุดมคติ (ideal dynamic shear apparatus) ในรูปจะเห็นว่าระนาบล่างเคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้า หรือ มีการเคลื่อนแบบรูปซายน์ในแนวแกน x (1-direction) ด้วยแอมพลิจูด  $a$  (คือเคลื่อนไปได้ไกลเท่าใด) ที่ความถี่  $\omega$  (คือเคลื่อนที่เร็วเท่าใด) แสดงดังภาพประกอบ 1.4a ความเร็วคืออัตราการเปลี่ยนแปลงหรืออนุพันธ์ของ  $x$  เทียบกับ เวลา  $t$

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



ภาพประกอบ 1.3 การไหลเฉือนไดนามิกในอุดมคติ (Ideal dynamic shearing flow)

ที่มา : Mackay (1988)



ภาพประกอบ 1.4 การเฉือนไดนามิก (dynamic shear flow) (a) แสดงการกระจัดของแผ่น  
 ราบเทียบกับเวลา (b) ความเครียดเฉือน (shear strain) เทียบกับเวลา  
 (c) อัตราการเฉือนเทียบกับเวลา (d) ความเค้นเฉือนเทียบกับเวลา  
 สำหรับของแข็ง (e) ความเค้นเฉือนเทียบกับเวลาของ ของไหลนิวโตเนียน  
 (f) ความเค้นเฉือนเทียบกับเวลา ของของไหลวิสโคอิลาสติก

ที่มา : Mackay (1988)

โดยกำหนดอัตราการเฉือนตามสมการ  $\dot{\gamma} = (U - 0) / H = U / H$  จะได้

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

หรือ

$$\dot{\gamma} = \gamma^\circ \omega \cos \omega t \quad (1.4b)$$

โดยที่  $\gamma^\circ$  เป็นความเครียดเฉือนสูงสุด (maximum shear strain) ที่กระทำต่อของไหล ความเครียดเฉือน,  $\gamma$  เป็นฟังก์ชันกับเวลาและสัมพันธ์กับ  $x$  โดย

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

$\dot{\gamma}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\gamma$  เทียบกับเวลา แสดงการพล็อต  $\gamma$  และ  $\dot{\gamma}$  เทียบกับ เวลาได้ดังภาพประกอบ 1.4b และ 1.4c ตามลำดับ

ความเครียดเฉือนสูงสุด,  $\gamma^\circ$  คือปริมาณซึ่งของไหลถูกทำให้เสียรูป (deform) และเป็นฟังก์ชันของ  $a$  (ระนาบจะเคลื่อนที่ได้ไกลเท่าใด) และ  $H$  (การแยกกันของระนาบ) ถ้า ระนาบล่างถูกทำให้เคลื่อนที่ไป 1 เซนติเมตร ที่สูงสุดของมัน และระนาบถูกทำให้แยกจากกัน โดย 1 เซนติเมตร แล้ว  $\gamma^\circ$  จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือของไหลจะได้รับ (experience) ความเครียด ร้อยละ 100 (100% strain) ค่าความเครียดเฉือนสูงสุดมีความสำคัญในการวัดทางรีโอโลยี

เพื่อให้เข้าใจว่าการทดลองนี้ต้องการจะแสดงอะไร ขั้นแรกเราพิจารณาถึง ของแข็งที่ถูก วางอยู่ระหว่างระนาบดังภาพประกอบ 1.3 ตลอดเวลาที่ระนาบบนมีการเคลื่อนที่ ระนาบล่างก็จะ มีการตอบสนองโดยการเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง แรงอยู่เฟสเดียวกัน (in phase) กับความเครียดเฉือน (หรือการเคลื่อนที่,  $x$ ) ดังนั้น

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

โดยที่  $F_M$  คือแรงสูงสุด เราสามารถหาแรงเค้นเฉือน (shear stress) จากนิยามในสมการ

$$\eta = (\tau / \dot{\gamma}) = (F.H / A.U)$$

จะได้

$$\tau = (F_M / A) \sin \omega t = \tau_m \sin \omega t \quad (\text{solid}) \quad (1.7)$$

$\tau_m$  คือแรงเค้นเฉือนสูงสุด และตามที่แสดงในภาพประกอบ 1.4d ถ้าของไหลนิวโตเนียน เช่น น้ำ อยู่ระหว่างระนาบ แรงจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามอัตราการเฉือนเพราะว่าความหนืดคงที่ (เปรียบเทียบ  $\tau = (F / A)$ ,  $\eta = (\tau / \dot{\gamma}) = (F.H / A.U)$  และ  $\dot{\gamma} = \gamma^\circ \omega \cos \omega t$ ) ในกรณีนี้ แรงจะมีเฟสที่ห่างจากความเครียดเฉือนอยู่  $90^\circ$  ดังนั้น

$$F = F_M \cos \omega t \quad (1.8)$$

หรือ

$$\tau = (F_M / A) \cos \omega t = \tau_m \cos \omega t \quad (1.9)$$

ซึ่งสามารถแสดงดังภาพประกอบ 1.4e

ของไหลบางชนิดแสดงพฤติกรรมอยู่ระหว่างของแข็งและของไหลนิวโตเนียน คือ มีทั้งยืดหยุ่นสมบูรณ์ (ของแข็ง) และความหนืด (นิวโตเนียน) ของไหลเหล่านี้เรียกเป็น "วิสโคอิลาสติก" ของไหลกลุ่มนี้เมื่อได้รับแรงเค้นเฉือน แรงเค้นเฉือนจะเปลี่ยนตามเวลา ดังแสดงในภาพประกอบ 1.4f ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\tau = \gamma^\circ (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (1.10)$$

โดยที่  $G'$  ถูกเรียกเป็น มอดูลัสสะสม (storage modulus) แสดงถึงพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-like behaviour) ของของไหล และ  $G''$  คือ มอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) บ่งถึงระดับความคล้ายของไหลนิวโตเนียน นอกจาก  $G'$  และ  $G''$  แล้วยังมีปริมาณอื่น ๆ ที่สำคัญทางรีโอโลยี ซึ่งนิยามดังนี้

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

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

และ

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

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

$\eta'$  หมายถึง ความหนืดไดนามิก (dynamic viscosity)

ตัวแปรทางรีโอโลยีอีกตัวแปรหนึ่งซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง  $G''$  และ  $G'$  ก็คือ

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

ถ้า  $\tan \delta$  หรือ  $\delta$  เป็น ศูนย์ วัสดุนั้นเป็นของแข็งแท้ และ  $\delta$  เป็น  $90^\circ$  สำหรับของไหลนิวโตเนียนแท้

Rochefort and Middleman (1987) ได้ศึกษาผลกระทบของเกลือ, อุณหภูมิ และอัตราการเฉือน ต่อ dynamic moduli ของแซนแทนกัมเกรดอุตสาหกรรม 2 ชนิด คือ ผงแห้ง (dried powder) และบรอร์ที่ได้จากการหมัก (fermentation broth) พบว่า  $G'$  และ  $G''$  ของตัวอย่างผงแห้งนั้นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น สำหรับแซนแทนที่มีความเข้มข้น มากกว่า 2000 ppm แต่จะลดลงที่ความเข้มข้นแซนแทนต่ำกว่านี้

$G'$  และ  $G''$  ของตัวอย่างบรอร์ที่ได้จากการหมักไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักต่อการเพิ่มขึ้นของเกลือ (โดยเฉพาะสำหรับแซนแทนที่มีความเข้มข้น มากกว่า 2000 ppm) และยังคงระดับ dynamic moduli สูงที่ความเข้มข้นแซนแทนต่ำ เมื่อเกลือมีความเข้มข้นที่สูง ตัวอย่างผงแห้งดูน่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลปรากฏ (apparent molecular weight) สูงกว่า ดังที่ชี้ให้เห็นโดยค่า moduli ที่สูงกว่า เมื่อแซนแทนที่มีความเข้มข้น มากกว่า 2000 ppm ที่ความเข้มข้นแซนแทนเกิน 5000 ppm สารละลายแสดงพฤติกรรมคล้ายเจลและรีโอโลยีถูกควบคุมโดยความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล (intermolecular association) เมื่อโครงสร้างสารละลายถูกรบกวนโดยการเฉือน หรืออุณหภูมิ นั้นการคืนสภาพของสมบัติไดนามิกจะช้า และไม่สมบูรณ์ในสภาวะที่มีเกลือต่ำ แต่จะเร็วและสมบูรณ์ในสภาวะที่มีเกลือสูง แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีระเบียบสมบูรณ์จะได้รับเมื่อความเข้มข้นเกลือ (NaCl)  $> 10^2$  โมลาร์ หลังจากจุดนี้นั้นยังไม่มีการบินที่ผลกระทบของเกลือไว้

### 3. การผสม (Mixing)

#### 3.1 นิยามและมโนทัศน์ของการผสม

*การผสม* คือกระบวนการลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneity) ของระบบ สิ่งที่อยู่ในระบบจะมีการผสมอย่างสมบูรณ์ถ้าองค์ประกอบที่กำหนด ณ ตำแหน่งใด ๆ มีความเหมือนกันที่ทุก ๆ ตำแหน่งของระบบ การผสมอาจระบุได้โดย 2 ตัวแปร คือ ขนาดของการผสม (scale of mixing) และ ความเข้มของการผสม (intensity of mixing)

#### 3.2 การผสมระดับจุลภาคและการผสมระดับมหภาค (Macro and Micromixing)

การผสมอาจแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ

- 1) การผสมในระดับไมเลกุล เรียกว่า *การผสมระดับจุลภาค* เป็นการผสมที่เกิดจากการแพร่ในระดับไมเลกุล หรือโดยการแตกย่อยของเอดดี้ชั้นปลาย (terminal eddies)
- 2) การผสมในระดับที่ใหญ่กว่าขนาดไมเลกุล ที่เกิดจากการพาธรรมชาติ หรือการพาบังคับ โดยที่การแพร่เชิงไมเลกุลนั้นไม่มีนัยสำคัญ เรียกว่า *การผสมระดับมหภาค*

การศึกษาการผสมส่วนใหญ่ในการหมักแซนแซนนั้น มุ่งเน้นการผสมระดับมหภาคเป็นหลัก ทั้งนี้เพราะ *Xanthomonas campestris* ใช้สารอาหาร (nutrients) ได้ค่อนข้างช้า (Galindo, et al., 1988) ตราบใดที่สารอาหารสามารถเคลื่อนย้ายมายังเซลล์ได้อย่างเพียงพอ ก็จะสามารถรักษาระดับต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ที่เพียงพอไว้ได้ การผสมในระดับจุลภาคจึงไม่เป็นขั้นตอนจำกัด (limiting step) การใช้สารอาหารของจุลินทรีย์ จากผลการทดลองของ Funahashi, et al., (1987 b) และ Peter, et al., (1989) มีความสอดคล้องกับสมมติฐานนี้ กล่าวคือตราบเท่าที่ความเข้มของการกวนเพียงพอ การเพิ่มความเร็วไม่ทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่มการผสมระดับจุลภาคโดยการทำให้กลุ่มก้อนเล็ก ๆ สุกตายนั่นแตกย่อยออกไปอีก (breaking terminal eddy) โดยการเพิ่มความปั่นป่วนรุนแรงมากขึ้น จะไม่ช่วยทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนดีขึ้น ดังนั้นขั้นตอนจำกัดคือ อัตราการใช้สารอาหารภายในเซลล์ ส่วนการผสมระดับจุลภาคและมหภาคนั้นไม่มีผลโดยตรง ถ้าความเข้มในการผสมเพียงพอ

#### 3.3 การผสมแบบปั่นป่วน (Turbulent mixing)

เราอาจพิจารณาการผสมในอีกแง่มุมหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “การผสมแบบปั่นป่วน” กระบวนการผสมเริ่มต้นด้วยการแพร่กระจาย (dispersion) ซึ่งมีนิยามว่า เป็นการทำให้ก้อนของไหล (lump) แยกออกจากกัน ซึ่งก่อให้เกิด สารผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวในระดับมหัพภาค (macroscopically uniform mixture) หากการปั่นป่วนของขนาดของก้อนของไหล สามารถถูกทำให้ลดลงจนกระทั่งไม่สามารถลดขนาดลงได้อีกโดยการกระทำปั่นป่วนที่รุนแรง ในขณะเดียวกัน

การแพร่เชิงโมเลกุล จะทำให้เกิดการกระจายที่เป็นเนื้อเดียวของโมเลกุลทุกชนิดที่เกี่ยวข้องในระดับที่เล็กกว่าระดับจุลทรรศน์ (submicroscopic)

การศึกษาการผสมแบบปั่นป่วนเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก จนกระทั่งเมื่อ Komolgoroff ได้เสนอทฤษฎีของ Kolmogoroff ว่าด้วยเรื่องความปั่นป่วนไอโซทรอปิก (Kolmogoroff 's theory of isotropic turbulence (Komolgoroff, 1941, 1942, 1943 อ้างโดย Siripatana, 1992)

Kawase and Moo-Young (1990) ได้ศึกษาทฤษฎีของ Kolmogoroff ว่าประสบความสำเร็จแค่ไหนในการนำมาประยุกต์ใช้ ในการจำลองและออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และได้สรุปประเด็นพิจารณาที่ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ทฤษฎี เพื่อหารูปแบบของสหสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่าง สภาวะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์ กับตัวแปรในการผสมต่าง ๆ ซึ่งได้แก่สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน (axial dispersion coefficient), กำลังที่ใช้ในการผสม, เวลาในการผสม, ขนาดฟองอากาศ, พื้นที่ผิวจำเพาะ, gas hold up และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารและความร้อน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ที่มีอยู่นั้นเป็นการศึกษาของไหลนิวโตเนียนที่เรย์โนลด์นัมเบอร์มากกว่า 1500 ส่วนการศึกษาของไหลนอน-นิวโตเนียน มีเพียงเล็กน้อยและอยู่ในวงจำกัด เช่น การศึกษาของ Kawase and Moo-Young (1986a, 1986b, 1988) Kawase, et al., (1987a, 1987b) ศึกษาการผสมและการถ่ายโอนในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและแบบอากาศยก ซึ่งดูเหมือนว่าทฤษฎีน่าจะให้ผลที่สมเหตุสมผล แต่อย่างไรก็ตาม Kawase and Moo-Young (1989b) ได้ศึกษาการผสมและการถ่ายโอนในถังปฏิกรณ์แบบตั้งกวาง ผลของการทำนายมีความขัดแย้งกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ยิ่งไปกว่านั้น ข้อมูลสำหรับสารละลายแซนแทนเจ็จในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ทดลองโดย Fields, et al., (1984) ไม่เป็นไปตามทฤษฎีดังกล่าว (Kawase and Moo-Young, 1986a) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายแซนแทนมีความเป็นซูโดพลาสติกสูงเป็นพิเศษ (ดรรชนีชี้กำลัง (power law index) :  $n < 0.5$  )

ในการผสมของไหลที่มีความซับซ้อนทางรีโอโลยีเช่น น้ำหมักแซนแทนนั้น เราคาดว่า การกระจายของการใช้พลังงานในถังปฏิกรณ์มีช่วงกว้างหลายระดับ ทำให้ไม่สามารถใช้ทฤษฎีนี้ได้ ดังนั้นอาจจะต้องประยุกต์ใช้ ทฤษฎี anisotropic แทน อย่างไรก็ตาม ความเข้าใจการผสมแบบปั่นป่วนของของไหลนอน-นิวโตเนียนเป็นส่วนที่น่าสนใจ ความรู้ที่มีเหล่านี้จะทำให้เราค้นพบวิธีปฏิบัติ ให้ปัญหาที่ซับซ้อนนี้ง่ายขึ้น แต่กว่าจะบรรลุซึ่งขั้นนี้ได้จะต้องมีการทุ่มเทศึกษาอีกมาก



### 3.4 เวลาในการผสมและเวลาในการวนครบรอบ (Mixing and Circulation times)

เวลาในการผสม ( $t_m$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการวัดระดับของความเป็นเนื้อเดียวกัน มีนิยามว่าเป็นเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ระดับของความเป็นเนื้อเดียวกันตามที่ระบุไว้ หลังจากเติมพัลส์ (pulse) ของเทรเซอร์ (เช่น กรดหรือเบส สารละลายเกลือเข้มข้น ของไหลร้อน) ลงในมวลที่มีการกวนอย่างต่อเนื่อง

Kawase and Moo-Young (1989a) ได้วัดเวลาในการวนครบรอบของของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อค้ำฟอยภายใน ปริมาตร 40 ลิตร ด้วยการใส่ตัวกลางของไหล (media) ที่จำลองขึ้นให้มีช่วงสมบัติทางรีโอโลยีที่กว้าง พบว่าเวลาในการวนครบรอบลดลงเมื่อตัวกลางของไหลมีลักษณะ shear thinning มากขึ้น และอิทธิพลของลักษณะโครงสร้างของท่อค้ำฟอย ต่อเวลาในการวนครบรอบนั้นพบว่าขึ้นอยู่กับความเป็น shear thinning ของตัวกลางของไหล และเขายังได้พัฒนา สหสัมพันธ์กึ่งทฤษฎี สำหรับตัวกลางของไหลในการหมักทั้งที่เป็นนิวโตเนียน ( $n=1$ ) และนอน-นิวโตเนียน ( $n<1$ ) ดังต่อไปนี้

$$\theta_c = 8.3n^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{A_D}{A_R}\right)^{-1.3n-0.8} \left(\frac{U_{sg}^2}{gD_c}\right)^{1/3} \quad (1.13)$$

ท่อค้ำฟอยที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.089, 0.113 และ 0.146 เมตร อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของ downcomer zone ต่อ riser zone ( $A_D / A_R$ ) เป็น 0.176-0.675 แผ่นรูพรุนมีรู ประมาณ 20 รู กระจายเป็นวงแหวนรอบกึ่งกลาง (central cone) วัดเวลาในการวนครบรอบโดยใช้อนุภาคของแข็งเป็นเทรเซอร์ ซึ่งลอยอย่างอิสระอยู่ในของเหลวและสังเกตเวลาในการวนครบ 1 รอบ ของมัน 50 ครั้ง พบว่าผลของ superficial gas velocity ( $U_{sg}$ ) ในช่วง 1-6 เซนติเมตร / วินาที ต่อเวลาในการวนครบรอบของของเหลวในสารละลาย CMC (carboxymethyl cellulose) เมื่ออัตราการให้อากาศต่ำ ๆ เวลาในการวนครบรอบลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่ม  $U_{sg}$  ที่อัตราการให้อากาศสูง ๆ เวลาในการวนครบรอบจะไม่ขึ้นกับ  $U_{sg}$  นอกจากนี้ Bello (1981) และ Weiland (1984) (อ้างโดย Kawase and Moo-Young (1989a)) รายงานไว้ว่า เวลาในการวนครบรอบลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัด downcomer zone

ในตัวกลางของไหลที่มีลักษณะแบบ shear thinning ฟองอากาศใหญ่ ๆ ซึ่งเกิดขึ้นจากการรวมตัวของฟองอากาศเล็ก ๆ เป็นสาเหตุให้เวลาในการวนครบรอบของของเหลวลดลง ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อค้ำฟอยภายใน แสดงรูปแบบการไหลเวียนชัดเจน (well-defined) กว่าที่พบในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ของเหลวที่ไหลใน downcomer zone มีรูปแบบ

การไหลที่ชัดเจนกว่า ส่วนใน riser zone ทิศทางการไหลหลักคือทิศขึ้น (upward) แต่การเคลื่อนที่ของฟองอากาศไม่เป็นระเบียบ (chaotic) และยังพบการเคลื่อนที่ของของไหลในทิศทาง (downward) ด้วยฟองอากาศขนาดใหญ่ (เมื่อเทียบกับช่องว่างของวงแหวน) ทำให้การไหลใน riser zone มีไฮโดรไดนามิกส์ที่ซับซ้อน ฟองอากาศขนาดเล็กเคลื่อนที่ขึ้นในวงแหวนและวนเข้าสู่ท่อดริฟท์ ปฏิกิริยาการนี้จะมีนัยสำคัญเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้น ผลการทดลองและข้อมูลก่อนหน้าชี้ให้เห็นว่า อิทธิพลของลักษณะโครงสร้างของท่อดริฟท์ที่มีต่อเวลาในการวนครบรอบของของเหลวนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเป็น shear thinning ในตัวกลางของไหลที่เป็นนอน-นิวโตเนียน อิทธิพลของลักษณะโครงสร้างของท่อดริฟท์ ต่อเวลาในการวนครบรอบของของเหลวจะยิ่งเด่นชัดขึ้น เมื่อเพิ่มระดับความเป็น shear thinning

Weiland (1984 อ้างโดย Kawase and Moo-Young (1989a)) วัดเวลาในการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อดริฟท์บรรจุอยู่ภายใน ปริมาตร 54 ลิตร ( $D_o / D_c = 0.59$ ) สังเกตพบว่าเวลาในการผสมสารละลาย CMC ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ( $n = 0.8$ ) มีค่าน้อยกว่าเวลาในการผสมน้ำ ถ้าพิจารณาว่า เวลาในการผสมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาในการวนครบรอบ ผลของ Weiland ก็สอดคล้องกับแนวโน้มของ Kawase and Moo-Young (1989a)

Guy, et al., (1986 อ้างโดย Kawase and Moo-Young (1989a)) วัดเวลาในการวนครบรอบในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่มีแผ่นรูพรุนซึ่งมีการกระจายของรูมากกว่าครึ่งหนึ่งของแผ่น พบว่า เวลาในการวนครบรอบของสารละลาย CMC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มระดับความเป็น shear thinning แต่อย่างไรก็ตามในสารละลาย Separan เวลาในการวนครบรอบไม่ขึ้นกับระดับความเป็น shear thinning

Onken and Weiland (1980, 1981 อ้างโดย Kawase and Moo-Young (1989a)) พบว่า เวลาในการวนครบรอบในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการวนรูปภายนอก เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเติมสารละลาย CMC ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักลงในน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน (axial dispersion coefficient) แปรผกผันกับเวลาในการวนครบรอบ

Fields, et al., (1984 อ้างโดย Kawase and Moo-Young (1989a)) รายงานความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงเวลาในการวนครบรอบของของเหลว เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นแซนแทนกัม เขาระบุว่าสารละลายแซนแทนกัมเป็นนอน-นิวโตเนียน แต่ไม่ได้วัดสมบัติทางรีโอโลยีของมัน เวลาในการวนครบรอบของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่าของน้ำ ในขณะที่ความเข้มข้นของกัมในช่วง ความเข้มข้นร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนัก

นั้นมีค่าเวลาในการวนครบรอบมากกว่าน้ำ อนึ่ง สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำ สำหรับทุกความเข้มข้นของกัม

Margaritis and Sheppard (1981) ศึกษาผลของลักษณะโครงสร้างของท่อดริฟและระบบการให้อากาศ (air-sparging system) ต่อการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขนาด 14 ลิตร พบว่าการมีท่อดริฟช่วยให้รูปแบบการไหลเวียนของของเหลวเสถียรขึ้น และให้เวลาในการผสม ( $t_m$ ) ที่สูงกว่า ( $t_m=13-32, 14-40$  วินาที และ  $20-48, 26-50$  วินาที) ที่ได้รับจากกรณีไม่มีท่อดริฟ ( $t_m=14-34$  วินาที) อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้การมีท่อดริฟ 2 ท่อส่งผลให้เวลาในการผสม ( $t_m=20-48$  และ  $26-50$  วินาที) มากกว่า กรณีที่มีท่อดริฟท่อเดียว ( $t_m=13-32$  และ  $14-40$  วินาที) โดยมีช่วงอัตราการให้อากาศที่เขาใช้ในการทดลองคือ 0-6 VVM. (volume of gas per volume of liquid per minute)

ตาราง 1 สรุปเวลาในการผสมและเวลาในการวนครบรอบ จากผู้ที่ได้ศึกษาไว้ก่อน

อ้างอิงจาก

**ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อดริฟภายใน**

- $t_c$  ลดลง เมื่อตัวกลางของไหลมีลักษณะ shear thinning มากขึ้น
  - อิทธิพลของลักษณะโครงสร้างของท่อดริฟต่อเวลาในการวนครบรอบขึ้นอยู่กับความเป็น shear thinning ของตัวกลางของไหล
  - $\theta_c = 8.3n^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{AD}{AR}\right)^{-1.3n^{-0.8}} \left(\frac{U_{sg}^2}{gD_c}\right)^{1/3}$
  - ในสารละลาย CMC  $u_{sg}$  1-6 ซม./วินาที  
ที่อัตราการให้อากาศต่ำ ๆ  $t_c$  ลดลง เมื่อ  $u_{sg}$  เพิ่มขึ้น  
ที่อัตราการให้อากาศสูง ๆ  $t_c$  ไม่ขึ้นกับ  $u_{sg}$
  - $t_c$  ลดลง เมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของบริเวณ downcomer zone
  - $t_m$  ของสารละลาย CMC ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่า  $t_m$  ของน้ำ
- Kawase and Moo-Young (1989a)  
  
Bello (1981) และ Weiland (1984)  
  
Weiland (1984)

- $t_c$ ของสารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักมีค่าน้อยกว่าของน้ำ	}	Fields, et al.,(1984)
- $t_c$ ของสารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.3-0.5 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าของน้ำ		
$t_m$ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขนาด 14 ลิตร ช่วงอัตราการให้อากาศ 0-6 WVM	}	Margaritis and Sheppard (1981)
ที่ไม่มีทอดร่าฟ $t_m = 14-34$ วินาที		
ที่มีทอดร่าฟท่อเดียว $t_m = 13-32$ และ $14-40$ วินาที		
ที่มีทอดร่าฟ 2 ท่อ $t_m = 20-48$ และ $26-50$ วินาที		
<b>ในถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ</b>		
- $t_c$ ของสารละลาย CMC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มระดับความเป็น shear thinning	}	Guy, et al., (1986)
- $t_c$ ของสารละลาย Separan ไม่ขึ้นกับระดับความเป็น shear thinning		

3.5 คุณภาพของการผสมในสารผสมที่เป็นของเหลว (Goodness of mixing in liquid mixture)

พิจารณาการผสมของของเหลว ที่ผสมกันได้ 2 ชนิด คือ ของเหลว A และของเหลว B เรากำหนดให้ความเข้มข้นไร้หน่วย  $a$  เป็นสัดส่วนเชิงปริมาตร ณ บริเวณใด ๆ (local volume fraction) ขององค์ประกอบ A ดังนั้นสัดส่วนเชิงปริมาตร ณ บริเวณใด ๆ ขององค์ประกอบ B เป็น  $1 - a$  ในที่นี้ให้ A เป็นของเหลวที่มีสัดส่วนเชิงปริมาตร ณ บริเวณใด ๆ น้อยกว่าและมีสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ย  $\bar{a}$  นั่นคือหลังจากผสมเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์แล้ว ( $t \rightarrow \infty$ ) ความเข้มข้นสุดท้ายในภาชนะผสมทั้งหมด เป็น  $\bar{a}$  (นั่นคือความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงอีก) ที่เวลา  $t$  ใด ๆ normalized frequency distribution  $f(a)$  ของความเข้มข้น ณ บริเวณหนึ่ง ๆ ( $a$ ) ในปริมาตรการผสมทั้งหมด เมื่ออินทิเกรต frequency distribution จะพบว่า

$$\int_0^1 f(a) da = 1 \tag{1.14}$$

ที่เวลา  $t$  ใด ๆ เราจะพบว่าว่ามีทางเป็นไปได้อย่างน้อยที่สุด 5 ทาง สำหรับระบุนสถานะของระบบก่อนที่จะถึงความเป็นเนื้อเดียวกันสุดท้าย (Hiby, 1981 อ้างโดย Siripatana, 1992)

- 1 การเบี่ยงเบนสัมพัทธ์สูงสุด (The maximum relative deviation)

$$\delta_{\max} = \Delta a_{\max} / \bar{a} \quad (1.15)$$

โดย  $\Delta a$  คือปริมาณ  $|a - \bar{a}|$

- 2 การเบี่ยงเบนสัมพัทธ์สัมบูรณ์เฉลี่ย (The mean absolute relative deviation)

$$\bar{\delta} = \frac{\overline{\Delta a}}{\bar{a}} = \frac{1}{\bar{a}} \int_0^1 \Delta a f(a) da \quad (1.16)$$

- 3 การเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (The relative standard deviation)

$$\delta = \sigma / \bar{a} \quad (1.17)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ รากที่สองของความแปรปรวน  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \overline{(\Delta a)^2} = \int_0^1 (\Delta a)^2 f(a) da \quad (1.18)$$

- 4 ระดับของการเบี่ยงเบน (The degree of deviation)

$$\Lambda = \overline{\Delta a} / (\overline{\Delta a})_0 \quad (1.19)$$

โดยที่ตัวห้อย 0 แสดงถึงค่าเริ่มต้นที่การเริ่มกระบวนการผสม ระดับการเบี่ยงเบนนี้หมายถึง ค่าเฉลี่ยของการเบี่ยงเบนเมื่อเทียบกับค่าการเบี่ยงเบนนั้นที่เวลาเริ่มต้นกระบวนการผสม

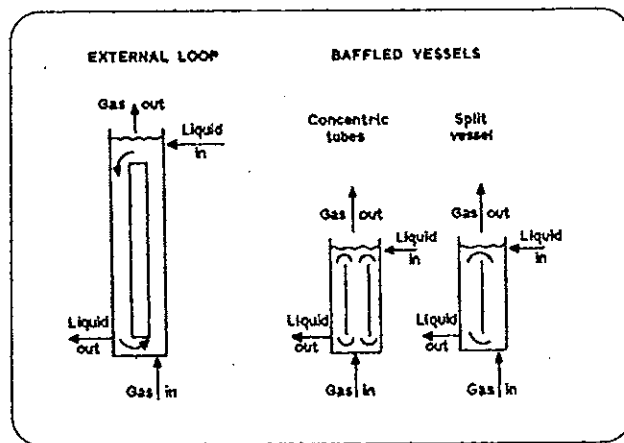
- 5 ความเข้มของการแยกจากกัน (The intensity of segregation)

$$S = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \frac{(a - \bar{a})^2}{\bar{a}(1 - \bar{a})} \quad (1.20)$$

ขั้นที่ยากที่สุดในการศึกษากระบวนการผสม มิใช่การเลือกเกณฑ์ (criteria)ใดเกณฑ์หนึ่ง ดังกล่าวข้างต้น แต่อยู่ที่ว่าเราจะทำอย่างไรให้เกณฑ์เหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับข้อมูลที่ได้รับจากการทดลอง

ในการศึกษาประสิทธิภาพการผสมโดยทั่วไปไม่ได้ใช้เกณฑ์รวมของทั้งถัง(global criteria) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในทางปฏิบัติมักนิยมใช้เวลาในการผสม (mixing time,  $t_m$ ) ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในถัง

หากพิจารณาในแง่รูปร่างลักษณะ (morphological point of view) ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยก แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังภาพประกอบ 1.5



ภาพประกอบ 1.5      สัณฐาน (configuration) ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก  
ที่มา :           Merchuk (1986)

ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน

1. Riser zone เป็นส่วนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกซึ่งมีการไหลในทิศขึ้น ก๊าซจะถูกนำเข้าสู่ปฏิกรณ์ที่ฐานของส่วนนี้

2. Downcomer zone ส่วนนี้จะขนานกับส่วน riser zone และเชื่อมต่อกับส่วน riser zone ที่ส่วนบนและล่าง ส่วนที่ต่อกันนี้จะเกิดการวอกกลับ (diverse shapes) การแพร่กระจายวนกลับซ้ำอีกครั้งใน downcomer zone ในทิศลง แรงขับเคลื่อนของการวนกลับซ้ำนี้ คือความต่างของความหนาแน่นเฉลี่ยหรือความดันซึ่งว่าด้วยแรงกดของน้ำ (hydrostatic pressure) ระหว่าง 2 ส่วนนี้ อันเนื่องมาจากสัดส่วนก๊าซใน downcomer zone มีค่าต่ำกว่า

3. Base zone ส่วนใหญ่แล้วในการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกนั้น ส่วนที่เชื่อมต่อด้านล่างระหว่าง riser zone และ downcomer zone ซึ่งถือว่าเป็นส่วนของไหลเคลื่อนผ่านใน

เวลาสั้นจึงไม่พิจารณาว่าจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมโดยรวมของถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตาม การออกแบบในส่วนนี้มีอิทธิพลต่อ ความเร็วของของเหลวและการไหลของส่วนที่เป็นของแข็ง

4. Gas separation zone ส่วนนี้เป็นส่วนบนสุดของถังหมักซึ่งเชื่อมระหว่าง riser zone และ downcomer zone มีหน้าที่อย่างเด่นชัดในการเชื่อมติดต่อกันของสองส่วนนี้ ในส่วน gas separation zone นี้ จะมีการวนกลับซ้ำของของเหลวและการแยกตัวของก๊าซ

### 3.6 รูปลักษณะการไหล (Flow configurations)

รูปลักษณะการไหลในแต่ละส่วนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก มีความแตกต่างกันไป และมีอิทธิพลอย่างลึกซึ้งต่อพฤติกรรมโดยรวมของมัน การไหลแบบ 2 เฟส (two-phase flow) ใน riser zone มีความคล้ายคลึงกับการไหลไปทางเดียวกันในทิศทางขึ้น ของบับเบิลคอลัมน์

ก๊าซเข้าสู่ระบบเริ่มต้นผ่านอุปกรณ์การกระจายก๊าซใน riser zone (บางที่อาจมีการติดตั้งใน downcomer zone ด้วย เพื่อช่วยในการไหลวน) ความแตกต่างหลัก ๆ ระหว่างถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและบับเบิลคอลัมน์ คือความเร็วของของเหลว ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ความเร็วของของเหลวมีค่าสูงกว่า เรามักจะนำบับเบิลคอลัมน์มาใช้เป็นถังปฏิกรณ์ในระบบกะ (batch system) ซึ่งมีความเร็วสุทธิของของเหลวเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม แม้แต่ในกรณีความเร็วของของเหลวไม่เป็นศูนย์ในระบบต่อเนื่อง ความเร็ว superficial ของของเหลวมักจะไม่สูงกว่า 0.05 เมตร/วินาที เพื่อให้ของเหลวมีเวลาเรซิเดนซ์ (residence time) ในถังปฏิกรณ์เพียงพอ

ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ความเร็วของของเหลวอาจมากกว่าที่พบใน บับเบิลคอลัมน์ซึ่งไหลแบบต่อเนื่องหลายเท่า บางครั้งความเร็วของของเหลวอาจสูงมากซึ่งจะทำให้เวลาเรซิเดนซ์ของก๊าซใน riser zone ลดลง และลดประสิทธิภาพการดูดซึมออกซิเจน ดังในกรณีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ICI's 50000 t year<sup>-1</sup> สำหรับผลิตโปรตีนเซลล์เดียว ('Proteen') ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ใช้กันในการผลิตบ่อยครั้งมีการใส่ชุดของแผ่นกั้น (baffles) ที่ช่องว่างเป็นระยะ ๆ เพื่อเพิ่มการแตกของฟองและลดการวนกลับของของเหลว Merchuk (1986a) อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988) เปรียบเทียบรูปแบบการไหลในบับเบิลคอลัมน์และถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกว่า เราอาจจะพิจารณาการไหลใน riser zone ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกว่าเป็นการทับซ้อน (superimposition) ของการไหล 2 ส่วน คือ (1) การไหลตรงซึ่งสอดคล้องกับการไหลวนเนื่องจากแรงขับของความหนาแน่น (density-driven circulation) ผ่านช่องว่างของถังแบบอากาศยก และ (2) การวนกลับซ้ำภายใน (internal recirculation) ซึ่งเกิดเมื่อความเร็วสัมพัทธ์ ก๊าซ-ของเหลว (gas-liquid relative velocity) ใน riser zone มีค่าสูงมาก ๆ

การวนกลับซ้ำภายใน หมายถึง ลูป (loop) ที่เกิดขึ้นโดยการวนกลับบริเวณใดบริเวณหนึ่งของของเหลวภายใน riser zone เอง ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นไปกับฟองอากาศแล้ววนกลับมายังด้านล่างของ riser zone บางครั้งติดเอาฟองอากาศเล็ก ๆ ลงมาด้วย การวนกลับซ้ำภายในนี้เป็นกลไกหลักของการผสมในบับเบิ้ลคอลัมน์ดั้งเดิม เมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นลูปจะใหญ่ขึ้นและครอบคลุมตลอดทั้งความยาวคอลัมน์ ซึ่งเรียกว่า recirculation regime ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก กลไกเช่นนี้มีอิทธิพลน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับในบับเบิ้ลคอลัมน์ มันจะปรากฏเพียงเมื่อความต้านทานต่อการไหลในวงจรถูกตัดมาจาก downcomer zone หรือการสะท้อน 180 องศา จากด้านบนและด้านล่าง ความดันที่ลดลงซึ่งเกิดจากความหนืดทั้งใน riser zone และ downcomer zone และอุปสรรคที่เกิดขวางการไหลในระบบมีค่ามากเกินไป ส่งผลให้ฟองอากาศไม่สามารถทำให้ของไหลเกิดการวนได้ ในกรณีนี้การไหลใน riser zone จะมีความปั่นป่วนมากขึ้น และเกิดลูปที่ไม่เป็นระเบียบซ้อนทับกันบนรูปแบบการไหลขึ้นทั่วไป มักจะเกิดเมื่อออกแบบให้มีสิ่งกีดขวางการไหลวน หรือที่อัตราการไหลของก๊าซสูง ๆ

downcomer zone คือบริเวณที่มีการไหลลง ซึ่งอาจจะเป็นเฟสเดียว หรือไหลมาด้วยกันสองเฟส ขึ้นอยู่กับการออกแบบทางเรขาคณิตและสภาวะการดำเนินงานในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก Patel, et al., (1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988) ศึกษาคุณลักษณะใน downcomer zone ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกทรงกระบอกผ่าซีก (split) โดยศึกษา local gas hold up, local variation ของ sauter mean diameter และความเร็วในการวนครบรอบของของเหลว เขาสรุปว่ามี 2 บริเวณที่แตกต่างกันใน downcomer zone คือบริเวณที่มีการแตกออกของฟอง ส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณด้านบน และการรวมตัวกันบ้างในด้านล่าง

อย่างไรก็ตามโดยทั่ว ๆ ไปการสังเกตศึกษามักจำกัดอยู่ที่คอลัมน์ที่มีความสูงซึ่งค่อนข้างสั้น ความสูงมีอิทธิพลอย่างมากต่อความเร็วของเหลว และเพราะการที่มีคอลัมน์สั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดค่าความเร็ว ในกรณีการไหลลงด้วยกันของ ก๊าซ-ของเหลว ความเร็วการไหลขั้นสุดท้ายของฟองเป็นค่าวิกฤต เมื่อความเร็วของเหลวเพิ่มขึ้นเหนือค่าวิกฤตนี้ ลักษณะการไหลเปลี่ยนอย่างเห็นได้ชัด (Siegel, Merchuk and Schugerl, 1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988)

Merchuk and Siegel (1988) กล่าวว่าในการศึกษาการไหลของสองเฟสใน downcomer zone ของ คอลัมน์ผ่าซีกสูง 4 เมตร พบว่า ที่ความเร็วของเหลวสูงขึ้น พฤติกรรมของฟองเปลี่ยนจากการไหลแบบสั่น (oscillating flow) โดยที่มีการปะทะกันระหว่างฟองแล้วเกิดการรวมตัว จากนั้นฟองก็จะไหลไปเป็นเส้นตรง โดยที่ฟองอากาศส่วนใหญ่มีทิศทางการไหลลงเป็นเส้น



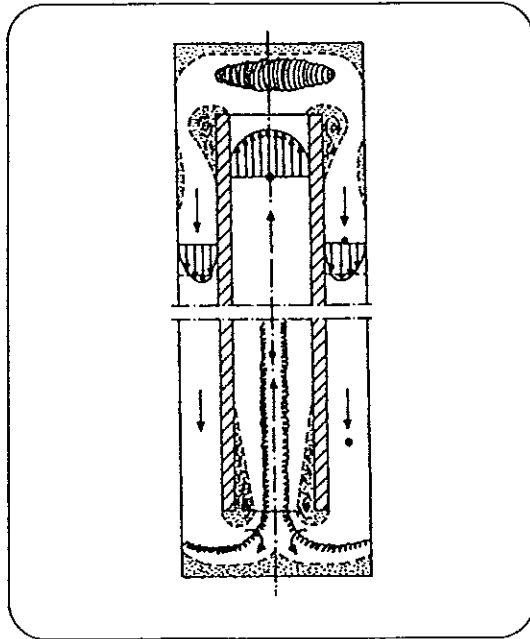
ตรงและชัดเจน ในกรณีหลังนี้การปะทะกันระหว่างฟองอากาศไม่ค่อยเกิดขึ้นและการรวมตัวกันนั้นจึงเกิดขึ้นน้อยมากในบริเวณการไหลที่อยู่ตัวแล้ว (ความเร็วสูงขึ้น)

การปรับปรุงรายละเอียดการออกแบบของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกขนาดใหญ่ที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง คือการใช้ตัวพ่นอากาศตัวที่สองติดตั้งไว้ใกล้ด้านบนของ downcomer zone การใช้ระบบพ่นอากาศสองตัว สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนในกระบวนการที่ต้องใช้อากาศ ซึ่งมีความต้องการออกซิเจนสูง ก๊าซใหม่ถูกนำเข้าไปยัง downcomer zone และช่วยในการวนลงตามทางในถังปฏิกรณ์ ฟองก๊าซจาก riser zone ซึ่งจะถูกใช้ออกซิเจนหมดไปและเหลือแต่คาร์บอนไดออกไซด์ สามารถถูกกำจัดออกจากระบบได้เกือบหมดใน gas separation zone การพ่นก๊าซผ่านหัวพ่นที่สองให้ความสะดวกในแง่ของความถี่ของความต้องการพลังงานของระบบ เพราะความดันสถิตย์ (static head) เหนือหัวพ่นที่สองจะมีค่าน้อยกว่า ที่เหนือหัวพ่นหลักมาก Siegel and Merchuk (1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988) ได้ใช้หัวพ่นที่สองเป็นอุปกรณ์สำหรับคำนวณการวนกลับซ้ำของก๊าซ

gas separation zone เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ บทบาทของส่วนนี้ถูกมองข้ามโดยนักวิจัยหลายท่าน และนี่อาจจะเป็นเหตุผลของความขัดแย้งของข้อมูลที่พบในผลการวิจัยในเรื่องเดียวกัน ถ้าประสิทธิภาพการปล่อยอากาศออกไปมีมากขึ้น จะทำให้มีฟองน้อยลงที่วนกลับซ้ำไปยัง downcomer zone จากนั้นความเร็วของเหลวจะเพิ่มขึ้น เพราะความต่างในความหนาแน่นเฉลี่ยระหว่าง riser zone และ downcomer zone เพิ่มขึ้น ดังนั้น gas separation zone แสดงอิทธิพลต่อ hold up ใน downcomer zone และต่อความเร็วของเหลว เพราะ gas hold up ใน riser zone ขึ้นอยู่กับความเร็วของเหลว อิทธิพลของ gas separation zone จึงเป็นดังที่กล่าวนั้น

ประสิทธิภาพของการปล่อยอากาศออกไปขึ้นอยู่กับ การออกแบบทางเรขาคณิตและขึ้นอยู่กับความสูงของของเหลวเหนือแผ่นกั้น riser zone และ downcomer zone ( โอกาสที่ว่าฟองจะแยกออกไปขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหลขึ้นอิสระ (ซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดฟองและความเร็วของเหลว) และทางโคจร (trajectory) และความเร็วของเหลวที่ผ่านจาก riser zone ไป downcomer zone (Siegel and Merchuk (1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988))

Blenke, et al., (1969 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988) ได้อธิบายว่า ที่ส่วนบนของถังปฏิกรณ์ที่มีรูปและท่อคล้ายภายในจะสร้างบริเวณวอร์เท็กซ์ (vortex) ขึ้นสองบริเวณ บริเวณแรกเหนือท่อคล้ายโดยตรง และอีกบริเวณอยู่รอบ ๆ บริเวณรอบนอกด้านข้างที่ต่ำลงมา (ภาพประกอบ 1.6) ดังนั้นทางโคจรของของเหลวบางครั้งซับซ้อนและอาจมีหลายรูปก่อนถึงบริเวณการไหลที่อยู่ตัวใน downcomer zone



ภาพประกอบ 1.6 ทางกำรไหล (flow path) และบริเวณวอร์เท็กซ์ ในดั่งปฏิกรณ์แบบ อากาศยกที่มีท่อร้ำฟภายใน

ที่มา : Blenke, et al., (1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988))

Thomas and Jane (1986 อ้างโดย Merchuk and Siegel, 1988) ได้ศึกษาทางโคจรและวอร์เท็กซ์ไว้บ้างแต่ไม่มาก เขาได้ศึกษาเวลาในการวนครบรอบในดั่งปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยสังเกตอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวและสังเกตการไหลวนเป็นเกลียว (convolution) ของอนุภาคที่หายตาไว้ โดยการไหลวนกลับเข้าไปที่ส่วนบนของ downcomer zone ที่เป็นวงแหวน เขาอธิบายว่า “ ..การเคลื่อนที่เป็นสายภายในกลุ่มก้อนคล้ายกันหอย (toroidal ซึ่งสัมผัสกับพื้นผิวด้านนอกของท่อร้ำฟ และคงตัว (sustain) อยู่ได้โดยการหมุนเหวี่ยงจากบริเวณส่วนที่เป็นวอร์เท็กซ์ (vorticity shed) เข้าไปใน riser zone ที่เกิดการแยกปรากฏออกมาจากปาก (lip) ของท่อร้ำฟ อิทธิพลเหล่านี้พบว่าเพิ่มขึ้นทั้งในแง่ความถี่และพลังงานเมื่อระดับของเหลวลดลง (decrease) เขาได้แสดงผลของเวลาในการวนครบรอบที่วัดได้ในรูปฮิสโตแกรม (histograms) ซึ่งมีลักษณะปลาย (tail) ยาว ปลายเหล่านี้เกิดจากทางโคจรที่วกไปเวียนมา (excursion) และการติดเป็นพัก ๆ (intermittent) ของอนุภาค โดยกลุ่มก้อนเอ็ดดี้ (eddies)

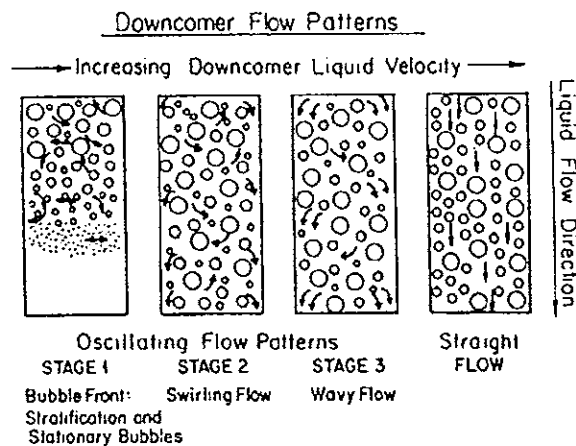
จากการสังเกตข้างต้นทั้งหมด เป็นพื้นฐานที่ทำให้เข้าใจว่า ทำไมลักษณะไฮโดรไดนามิกส์ของดั่งปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อร้ำฟอยู่ภายใน ซึ่งมีรายละเอียดแตกต่างกัน จึงมีพฤติกรรมที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าท่อร้ำฟหรือวงแหวนที่ใช้เป็น riser zone นั้น เป็นอย่างไร

โดยเฉพาะกรณีในอุปกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งผลกระทบเนื่องจากทางออก (end effect) มีอิทธิพลอย่างมาก

### 3.7 รูปลักษณะการไหลของฟองใน downcomer zone (Bubble flow configuration in the downcomer)

จากการสังเกตด้วยสายตาและภาพถ่าย Siegel, et al., (1986) พบรูปลักษณะการไหล (flow configurations) 2 แบบ คร่าว ๆ จาก downcomer zone ที่ความเร็วของเหลวมีค่าสูง พบการไหลของฟองเป็นแนวตรง (straight) ซึ่งระบุโดยการไหลวนของฟองที่ส่วนมากจะมีรูปแบบการไหลลงที่ปราศจากการสั่นไหล (flow oscillation) ซึ่งระบุได้และมีความชัดเจน

การไหลอีกลักษณะหนึ่ง ฟองอากาศมีการไหลแบบสั่น เกิดขึ้นเมื่อของเหลวมีความเร็วต่ำ และมีเวลาเรซิดนซ์ใน gas-liquid separation zone สั้น การไหลแบบสั่นมีรูปแบบการไหลที่ต่างกัน 3 สภาวะ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.7



ภาพประกอบ 1.7 กระบวนการไหล (flow patterns) ใน downcomer zone

ที่มา : Siegel, et al., (1986)

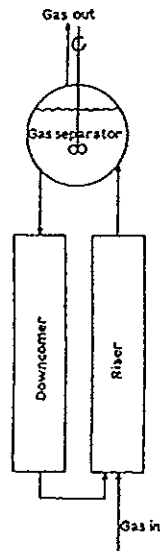
ระหว่างการดำเนินการที่มีเวลาพักตัวใน gas-liquid separator น้อย พบว่าที่อัตราการให้อากาศต่ำมาก ๆ (น้อยกว่า 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที, superficial gas velocity น้อยกว่า 2.0 เซนติเมตร/วินาที) การแยกของเฟสก๊าซ-ของเหลว ใน gas-liquid separation zone เกิดขึ้นเกือบจะสมบูรณ์ เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของเหลวเพิ่มขึ้นด้วย ฟองถูกพาเข้าไปในสายการไหลสู่ downcomer zone การไหลของสารผสมของเหลว-ก๊าซใน downcomer zone นั้นไม่แน่นอน (erratic) ด้านหน้าของฟองเคลื่อนที่ลง downcomer zone เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศ ฟองในส่วนหน้าแสดงรูปแบบการไหลแบบหมุน (swirling) คล้ายกับที่

พบในบับเบิลคอลัมน์ อย่างไรก็ตามที่แตกต่างกับบับเบิลคอลัมน์ คือ ฟองใหญ่กว่าจะหนีขึ้นไป ฟองขนาดกลาง (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม.) ปรากฏที่ระดับกลาง (mid-level) และอยู่นิ่ง (stagnate) ขณะที่ฟองเล็ก ๆ (เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มม.) ถูกพาลงตามคอลัมน์ เป็นรูปแบบที่สอดคล้องกับขนาดของฟองตลอดความยาวของ downcomer zone โดยที่ขนาดฟองลดลงจากบนสู่ล่างของคอลัมน์ ภายใต้อุสภาวะเหล่านี้ การคำนวณแสดงให้เห็นว่า downcomer zone มีความเร็วของเหลว-ก๊าซสัมพันธ์ (relative gas-liquid velocity) ต่ำ (ความเร็วก๊าซใน downcomer zone มีค่าน้อยกว่าความเร็วของเหลวเล็กน้อย) จึงทำให้ gas hold up ใน downcomer zone สูงมากด้วย

เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศสูงขึ้นอีก ฟองส่วนหน้าก็จะไปถึงด้านล่างของ downcomer zone และถูกนำกลับไปใน riser zone อย่างไรก็ตามยังสามารถพบการสั่นของฟองให้เห็นอยู่ (persist) แม้ว่าก๊าซจะถูกนำกลับไปยัง riser zone เมื่อความเร็วของเหลวเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลวนใน downcomer zone จะถูกแทนที่เป็นพัก ๆ ด้วยการไหลแนวตรง และรูปแบบการไหลแบบคลื่น (wave flow pattern) เป็นพฤติกรรมเนื่องจากการสั่นไหลเป็น ระยะ ๆ (sporadic) ลักษณะการไหลจะปรับตัวให้เสถียรขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้อากาศ

### 3.8 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Mathematical model for mixing in air-lift reactors)

Merchuk and Siegel (1988) และ Merchuk and Yungler (1990) ได้เสนอแบบจำลองของการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยการแบ่งโซนต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.8 ซึ่งนับว่าเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุด สำหรับการแสดงปรากฏการณ์การถ่ายโอนในถังปฏิกรณ์ และได้มีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถ ซิมูเลตการผลิตโปรตีนเซลล์เดียวที่ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ (Merchuk, et al., 1980 และ Merchuk and Stein, 1981 อ้างโดย Merchuk and Yungler (1990))



ภาพประกอบ 1.8 แบบจำลองไฮโดรไดนามิกส์ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ที่เสนอขึ้น โดย Merchuk, et al., (1988, 1990)

ที่มา : Merchuk, et al., (1990)

แบบจำลองนี้มีแนวคิดว่างปฏิกรณ์แบบอากาศยก สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือ ส่วนที่เป็น riser zone และ downcomer zone ซึ่งเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของของไหลแบบ plug flow และส่วนที่สอง คือ ส่วน gas separation zone ซึ่งเป็นส่วนที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ (perfectly mixed section) หรือ CSTR สมมติว่าฉีดเทรเซอร์ (ideal pulse of tracer) เข้าไปใน gas separator ที่เวลา  $t=0$  ในแบบจำลองนี้ ตัวห้อย 1 บ่งชี้ว่าเป็นตัวแปรของส่วนที่มีการไหลแบบ plug flow (riser zone และ downcomer zone) ส่วนตัวห้อย 2 ใช้บ่งชี้ตัวแปรของส่วน CSTR  $\tau$  เป็น เวลาเรซิเดนซ์ (residence time) เมื่อทำดุลมวลของ tracer บริเวณ gas separation zone จะได้สมการต่อไปนี้

$$V_2 \frac{dc_2}{dt} = Q(c_1 - c_2) \quad (1.21)$$

โดยที่  $Q$  เป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของ ของเหลวที่ไหลวน  $V$  เป็นปริมาตรของของเหลวแต่ละโซน  $c$  เป็นความเข้มข้น  $c_0$  เป็นความเข้มข้นใน gas separation zone ที่เวลาเริ่มต้น ถ้าให้ภาวะเริ่มต้น (initial condition)

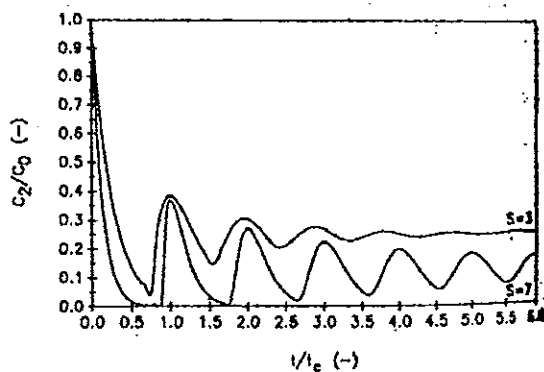
$$t = 0 \quad c_2 = c_0 \quad (1.22)$$

เมื่อให้ riser zone และ downcomer zone มีการไหลแบบ plug flow Merchuk and Yungler (1990) ได้ให้ผลเฉลยดังนี้คือ

$$\frac{c_2}{c_0} = \sum_{n=0}^k \frac{1}{n!} (t' - nS)^n \exp(-t' + nS) \quad (1.23)$$

$$\text{ในที่นี้ } k = \text{int}\left(\frac{t}{\tau_1}\right), \quad t' = \frac{t}{\tau_2}, \quad S = \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

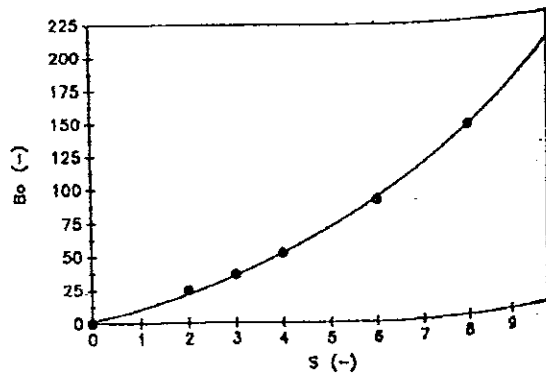
ภาพประกอบ 1.9 แสดงผลของการซิมูเลตโดยใช้ S 2 ค่า Merchuk and Yungler (1990) ได้ให้ข้อสังเกตว่าถ้าตัดส่วนแรก ๆ ของกราฟ ( $0 < t < \tau$ ) ออกแล้ว การตอบสนองจะคล้ายกับการตอบสนองจริงในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก



ภาพประกอบ 1.9 การตอบสนอง (response) ของแบบจำลอง ต่อ พัลส์ของ tracer เมื่อใช้ ตัวแปร S 2 ค่า ( $S=3, S=7$ )

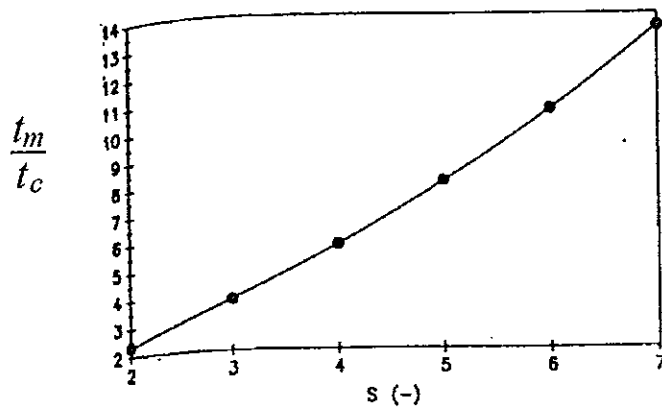
ที่มา : Merchuk (1990)

ภาพประกอบ 1.10 แสดงผลของ S ค่าต่าง ๆ ต่อ Bodenstein number ( $B_0$ ) โดยที่  $B_0 = \frac{uL}{D}$  ( $u$  = ความเร็วของของไหล,  $L$  = ความยาวเฉลี่ยของรูป และ  $D$  = dispersion coefficient) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของปริมาตร S ซึ่งหมายถึงการเพิ่มส่วน plug flow ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ทำให้การผสมลดลง (หรือ  $B_0$  เพิ่มขึ้น)



ภาพประกอบ 1.10 Bodenstein number  $B_0$  เป็นฟังก์ชันของตัวแปร  $s$  ในแบบจำลอง  
ที่มา : Merchuk (1990)

จากกราฟที่ขีมิวิตขึ้นในภาพประกอบ 1.9 เขาได้สร้างกราฟของเวลาในการผสมที่เป็นฟังก์ชันของ  $s$  ดังภาพประกอบ 1.11 ซึ่งเวลาในการผสม  $t_m$  ซึ่งเป็นเวลาที่ต้องการเพื่อให้เหลือความไม่เป็นเนื้อเดียวกันร้อยละ 5



ภาพประกอบ 1.11 เวลาในการผสมเป็นฟังก์ชันของตัวแปร  $s$  ในแบบจำลอง  
ที่มา : Merchuk (1990)

จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $s$  เพิ่ม เวลาในการผสมก็เพิ่มขึ้น เห็นได้ชัดว่าถ้าเพิ่มปริมาตรในส่วนของ gas separation zone จะเพิ่มการผสมในถังปฏิกรณ์

จากผลการซีมิวเลตของแบบจำลองดังกล่าว มีข้อสังเกตที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งคือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในส่วน gas separation zone มีอิทธิพลอย่างมากต่อเวลาในการผสม นั้น ถูกทำนายไว้อย่างถูกต้อง ซึ่งอิทธิพลเหล่านี้ไม่สามารถพิสูจน์ได้จาก แบบจำลอง single dispersion coefficient ที่ Fields and Slator (1983) และอีกหลาย ๆ คนเสนอขึ้น หรือจากแบบจำลอง multiple-compartment ของ Warnecke, et al., (1985) สำหรับ loop reactor ที่ไม่พิจารณา gas separation zone

อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ Merchuk, et al., (1988, 1990) เสนอขึ้นข้างต้นนั้นมีจุดอ่อนในส่วน gas separation zone ซึ่งจริง ๆ แล้วเป็นบริเวณที่มีการผสมในระดับปริมาณหนึ่ง (finite mixing) ไม่ใช่เป็นการผสมอย่างสมบูรณ์ร้อยละ 100 ตามที่แบบจำลองเสนอ และในส่วน riser zone และ downcomer zone ซึ่งแบบจำลองกล่าวว่าเป็น plug flow ที่ไม่มีการผสมย้อนกลับ (backmixing) ทั้ง ๆ ที่ความจริงแล้วมีการผสมย้อนกลับ ในการวิจัยของเราจึงได้พัฒนาแบบจำลองที่จะใช้อธิบายกลไกการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 2



#### 4. กรณีศึกษา - การผลิตแซนแทน

ของไหลนอน-นิวโตเนียน ที่เลือกใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ คือ สารละลายแซนแทนกัม เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือที่เราเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ จัดเป็น เอคไซเซลลูลาร์พอลิแซคคาไรด์ ที่เป็นอนุพันธ์ของการหมักด้วยเชื้อ *Xanthomonas campestris* (Kennedy and Bradshaw, 1984)

##### 4.1 ความสำคัญและการใช้แซนแทนในทางอุตสาหกรรม

แซนแทนกัมถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร และที่ไม่ใช่อาหาร เพื่อให้สารละลายมีความข้นสูงขึ้น (thickening agent) ทำให้เกิดการแขวนลอยที่ดี (suspending agent) ทำให้เกิดการคงตัว (stabilizing agent) และทำให้เกิดเจล (gelling agent) ในแง่ความเป็นพิษและความปลอดภัย แซนแทนนับเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิแซคคาไรด์ ที่ได้มีการศึกษามากที่สุด เป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกว่า สามารถใช้ผสมในอาหารได้ องค์การอาหาร และยา (FDA) ได้อนุญาตการใช้แซนแทนกัม ในผลิตภัณฑ์อาหาร ตั้งแต่ปี 1969 (Cottrell and Kang, 1978)

แซนแทนกัมเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้กันมากที่สุด ในบรรดาพอลิแซคคาไรด์ที่ได้จากจุลินทรีย์ ความสำเร็จทางการค้า เกิดจากคุณสมบัติที่มีประโยชน์และไม่เหมือนกับกัมชนิดอื่น โดยสรุปคือ ความสามารถในการเกิดเป็นสารละลาย ที่มีความหนืดสูง ที่อัตราการเข็นต่ำ มียิวด์สเตรส (yield stress) และมีความคงตัวในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นในช่วงกว้าง ที่พีเอช และอุณหภูมิในช่วงกว้าง (Cottrell and Kang, 1978 และ Kennedy and Bradshaw, 1984)

##### 4.2 กระบวนการผลิตแซนแทน

จุลินทรีย์พวก *Xanthomonas* หลายชนิดสามารถสร้าง พอลิแซคคาไรด์ ในระหว่างการหมัก อย่างไรก็ตาม *X.campestris* ได้รับความสนใจมากที่สุดเพราะว่ามันเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตแซนแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Kennedy and Bradshaw, 1984)

ในการหมักแบบกะเราเติมเชื้อ *X.campestris* ที่บริสุทธิ์ลงในตัวกลางที่ประกอบด้วยสารอาหารที่จำเป็นทั้งหมด การเตรียมหัวเชื้อ (inoculum) ประกอบด้วยการเลี้ยงเชื้อ ให้เจริญในหลายขั้นตอน และต้องมีการตรวจสอบว่าเชื้อดังกล่าวเจริญจริง ก่อนที่จะใส่เข้าไปในตัวกลางอาหารเลี้ยงเชื้อ ในขั้นสุดท้ายในกระบวนการทางการค้า เวลาที่จะขยายขนาดการเลี้ยงเชื้อ ในการผลิตหัวเชื้ออย่างเพียงพอ อาจจะต้องใช้เวลาหลายวัน หลังจากขั้นตอนนี้แล้ว การหมักจะดำเนินต่อไปเป็นเวลา 48 - 96 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะปลอดจากเชื้ออื่น จนกระทั่งซบสเตรท อย่างใดอย่างหนึ่ง (ซึ่งปกติก็คือ คาร์โบไฮเดรต) ถูกใช้ไปจนหมด (Godet, 1973 และ Kennedy and Bradshaw, 1984)

แหล่งไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อ มีความจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งรวมไปถึงเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของ

แหล่งคาร์บอนไปเป็นแซนแรนเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่าง คาร์บอนต่อ ไนโตรเจน มีค่าสูง มีการพบว่า บ่อยครั้งที่ไนโตรเจนที่เกินความต้องการทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างพอลิเมอร์ (Souw and Demain, 1979)

มีตัวแปรทางกายภาพและเคมีหลายอย่าง ที่มีผลต่อการสร้างแซนแรนอย่างมาก ได้แก่ พีเอช, อุณหภูมิ, อัตราการให้อากาศ และการผสม ถ้าไม่มีการควบคุมพีเอช พีเอชจะมีค่าต่ำลงจนกระทั่งมีค่าน้อยกว่า 5 ซึ่งหลังจากนั้นก็ทำให้สารละลายแซนแรนเกิดขึ้นช้าลงอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องควบคุมให้พีเอชของอาหารตัวกลางมีค่าอยู่ที่ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือที่พีเอช 7 (Moraine and Rogovin, 1971) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแซนแรนเป็น 28 องศาเซลเซียส (Moraine and Rogovin, 1966) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะทำให้ความหนืดของแซนแรนลดลง (Pace and Coote, 1981) ความแตกต่างของความหนืดอาจเนื่องมาจากการผันแปรน้ำหนักโมเลกุลของแซนแรน (Kennedy and Bradshaw, 1984)

การหมักดำเนินไปในสภาวะที่มีอากาศ เป็นที่ทราบกันว่า การสร้างแซนแรนมีความไวต่อข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนเป็นอย่างมาก (Robinson and Wang, 1988; Funahashi, et al., 1987b และ Pons, et al., 1990) การให้อากาศและการผสมเป็นปัญหาหลักในการผลิตแซนแรนเนื่องจากบรอร์มีคุณสมบัติเป็นนอน-นิวโตเนียน (non-newtonian) มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

ในการตกตะกอนแซนแรนกัม Mcneely (1966) ทำการตกตะกอนกัมโดยใช้เมธานอล 5 เท่าของสารละลายแซนแรน ในปี 1967 O'Connell ศึกษาเปรียบเทียบสารที่ใช้ในการตกตะกอนกัมโดยใช้แอลกอฮอล์เช่น เมทิลแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ พบว่าการใช้แอลกอฮอล์ 55 ส่วน ต่อสารละลายแซนแรน 45 ส่วน จะให้ผลิตภัณฑ์ที่สูงสุด Lader and Miescher (1967) พบว่าการตกตะกอน 2 ครั้งโดยการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วงพีเอช 5 - 6 แล้วจึงเติมเมธานอลลงไปร้อยละ 25 โดยปริมาตร จะให้กัมที่บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น

ในปี 1982 Inkson และ Wilkinson ทำการปรับปรุงวิธีตกตะกอนแซนแรนจากวิธีของ Collin, et al., (1971) และวิธีของ Corley, et al., (1979) โดยเติมตัวทำละลายจำพวกไอโซบิวทานอล เมธานอล อะซีโตน เป็นต้น ลงไปในสารละลายด้วยอัตราส่วน 0.8 ต่อ 1 แล้วนำไปให้ความร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส และทำการกรองขณะร้อน หลังจากนั้นเติมตัวทำละลายอีกครั้งด้วยอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ของตัวทำละลายต่อสารละลายแซนแรน ทำให้แซนแรนกัมตกตะกอนออกมาโดยวิธีนี้จะทำให้ได้กัมที่มีความหนืดและความบริสุทธิ์สูงมาก

### 4.3 ปัญหาในการหมักแซนแทน

ในการหมักแซนแทนแบบกะ ความหนืดสัมฤทธิ์ (effective viscosity) ของน้ำหมักที่มีคุณสมบัติแบบนอน-นิวโตเนียน เพิ่มขึ้นเป็น 1000 - 10000 เท่าของความหนืดเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะมีการสะสมของพอลิเมอร์ชีวภาพในน้ำหมัก จากนั้นเมื่อการหมักดำเนินต่อไป อัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ (specific xanthan production rate) ลดลง เนื่องจากว่าการผลิตแซนแทนนั้นขึ้นอยู่กับ การเจริญบางส่วน (partly growth - associated) (Weiss and Ollis, 1980) เราจึงคาดว่าแนวโน้มดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อเฟสที่เชื้อเจริญ (growth phase) สิ้นสุดลง การลดลงไม่ควรจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องหลังจากเข้าสู่ stationary phase แล้ว อย่างไรก็ตามกลับพบว่าหลังจากสิ้นสุดเฟสดังกล่าวไปแล้ว ผลผลิตจำเพาะ (specific productivity) ก็ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง Morain and Rogovin (1973) ได้เสนอว่าปรากฏการณ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการนี้เกิดขึ้นด้วยเหตุผล 3 ประการ

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารเชิงปริมาตร  $K_L a$  ลดลงเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ในของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น แซนแทนบรอน ฟองอากาศขนาดเล็กมีแนวโน้มอย่างมากในการรวมตัวกันกับฟองอื่น ๆ ที่ลอยตัวอย่างอิสระ และทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรลดลง (DeNevers and Wu, 1971; Crabtree and Bridgewater, 1971 and Narayanan, et al., 1974) อย่างไรก็ตาม Ting (1975) และ Levan and Newman (1976) ได้เสนอว่า วิสโคอิลาสติกซิตี (viscoelasticity) ทำให้ความเร็วปั่นปลาย (terminal velocity) และ การหมุนเวียนภายในของฟองอากาศลดลง ซึ่งข้อเสนอนี้ได้รับการสนับสนุนจากข้อมูลบางส่วนจากการทดลองของ De Kee, et al., (1990) การที่การหมุนเวียนภายในมีค่าน้อยอาจจะจะเป็นสาเหตุหลักของการที่  $K_L a$  มีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ความยืดหยุ่น (elasticity) ยังทำให้เวลาในการชนและการรวมตัวกันของฟองก๊าซเพิ่มขึ้น (Acharya and Ulbrecht, 1978) ดังนั้นความยืดหยุ่นลดการรวมตัวของฟองก๊าซอย่างเห็นได้ชัด (De Kee, et al., 1986) ผลรวมก็คือการถ่ายโอนมวลสารจะดีขึ้นจากการที่ของไหลมีคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (Zana and Leal, 1978) สำหรับในกรณีของบรอนที่เกิดจากการหมักแซนแทน ยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดว่าปรากฏการณ์ที่สวนทางกันในแง่การส่งผ่านออกซิเจนของทั้งสองอย่างว่าอย่างไรมีความเด่นชัดมากกว่ากัน

Funahashi et al., (1987b) ได้ศึกษาผลของอัตราการกวน และความเข้มข้นของออกซิเจน (oxygen tension) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารเชิงปริมาตร ( $K_L a$ ) และอัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ (SPR) พบว่า ถ้า  $K_L a$  มีค่าน้อยกว่า  $1.67 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  SPR ลดลง เมื่อ  $K_L a$  (หรืออัตราการกวน) ลดลง อย่างไรก็ตาม SPR ไม่ขึ้นอยู่ กับ  $K_L a$  และมีค่าคงที่ตราบเท่าที่  $K_L a$  มากกว่า  $1.67 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$  Peter, et al., (1989) ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการกวนต่อการผลิตแซนแทนในถังหมักที่มีบัพเฟิล ขนาด 10 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัดแบบอินเตอร์มิก (intermig impeller) เขาใช้

อัตราเร็วในการกวน 200 - 800 รอบต่อนาที พบว่าการเจริญเติบโตของเซลล์จะขึ้นอยู่กับ อัตราเร็วเมื่อความเร็วรอบต่ำกว่า 200 รอบต่อนาทีเท่านั้น เนื่องจากออกซิเจนไม่เพียงพอ เมื่อความเร็วในการกวนสูงกว่า 200 รอบต่อนาที ไม่พบว่าอัตราการเจริญจำเพาะขึ้นอยู่กับความเร็วในการกวนแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามกรณีที่เราศึกษาในไมโซกรณีของอัตราการผลิตแซนแทน ถึงแม้ว่าเราจะไม่พิจารณาการทดลองที่ใช้ความเร็วในการกวนเป็น 200 รอบต่อนาที พบว่าความเข้มข้นของแซนแทนที่ได้ในผลิตภัณฑ์หลังจากการหมัก 90 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมาก ยิ่งใช้อัตราเร็วในการกวนเพิ่มขึ้นมากเท่าไร เวลา ณ จุดที่ออกซิเจนจะเป็นข้อจำกัด จะยิ่งห่างออกไปมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในช่วงอัตราเร็ว 200 - 800 รอบต่อนาทีนั้น ยิ่งเราใช้อัตราเร็วในการกวนสูงขึ้น ความเข้มข้นของแซนแทนในบรอตที่เวลาหลังจาก 90 ชั่วโมงยิ่งสูงขึ้น

2. ชั้นเมือกที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นรอบ ๆ เซลล์และเป็นตัวกีดกันการแพร่ของสารอาหาร ซึ่ง Moraine and Rogovin (1973) เป็นผู้ให้ความเห็นว่าอันนี้เป็นสาเหตุหลักอย่างหนึ่งที่ทำให้การถ่ายโอนสารอาหารช้าลง Funahashi, et al., (1987) พบว่า SPR และอัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะ (specific oxygen uptake rate) ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน แต่ขึ้นอยู่กับความเค้นเฉือนเป็นหลัก พวกเขาตีความว่า ผลอันนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายโอนออกซิเจน และกลูโคสจากอาหารตัวกลางไปยังเซลล์ (ด้วยการที่มีชั้นเมือกห่อหุ้ม) และอัตราการสร้างแซนแทนก็อาจถูกจำกัดเมื่อความเค้นเฉือนมีค่ามากกว่า 40 ปาสคาล

เมื่อไม่นานมานี้ Peters, et al., (1989) ได้ทำการศึกษาถึงการมีอยู่ของชั้นเมือกอย่างมีระบบ เพื่อที่จะแบ่งแยกผลทางไฮโดรไดนามิกส์ อันเนื่องมาจากอัตราเร็วของการกวน ต่อการมีอยู่ของชั้นเมือกออกจากผลอันเนื่องมาจากการถ่ายโอนมวลสาร เขาได้ใช้ทั้งอากาศปกติและอากาศที่เติมออกซิเจนลงไป (oxygen enriched air) ในการเปรียบเทียบ เขาพบว่า การหลีกเลี่ยงการขาดออกซิเจนโดยใช้การกวนที่ความเร็วสูง หรือโดยการเพิ่มความดันไอลอยของออกซิเจนในเฟสก๊าซให้สูงขึ้น ให้ผลต่ออัตราการเกิดผลผลิตจำเพาะ เหมือน ๆ กัน ผลการทดลองของเขาไม่ได้บ่งถึงผลใด ๆ ของทางไฮโดรไดนามิกส์เนื่องจากการเพิ่มอัตราเร็วในการกวนต่ออัตราการผลิตแซนแทน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือการทดลองของเขาบอกให้เราทราบว่าชั้นเมือกรอบเซลล์มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนออกซิเจนน้อย เพื่อที่จะยืนยันว่าข้อสรุปของเขาถูกต้อง เขาได้ตรวจสอบการมีอยู่ของชั้นเมือกโดยส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและพบว่าชั้นเมือกดังกล่าวมีจริง โดยพบในเซลล์ที่มาจากเพาะเชื้อ (agar plates) อย่างไรก็ตามชั้นเมือกดังกล่าวสามารถหลุดออกไปได้ง่ายเมื่อมีการเขย่าในสารละลายน้ำเบา ๆ นอกจากนั้นเขาพบว่าในตัวอย่างที่ได้จากถังหมักที่มีการกวน ไม่มีอะไรที่จะบ่งบอกว่าจะมีแซนแทนที่มีความเข้มข้นสูงรอบผนังเซลล์เลย

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

Funahashi, et al., (1987a) ได้ศึกษาการกระจายตัวของเวลาในการหมุนเวียน (circulation time) และปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม (mixing region) ในถังกวนที่ประกอบด้วยสารละลายแซนแทนจนถึงระดับความเข้มข้นร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนักพบว่าเราอาจจะแบ่งบริเวณในถังหมักออกเป็นสามส่วน คือ

ก ) บริเวณที่มีการผสมในระดับไมโคร (micromixing region) บริเวณนี้การเคลื่อนที่ของไหลในแนวรัศมีเป็นการเคลื่อนที่หลัก

ข ) บริเวณที่มีการผสมในระดับมาโคร (macromixing region) เป็นบริเวณที่มีการไหลหมุนเวียนอย่างช้า ๆ

ค ) บริเวณที่ของไหลอยู่นิ่ง (stagnant zone) ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่

หลังจากนั้น Funahashi et al., (1988b) ได้วิเคราะห์เรื่องราวที่เกี่ยวกับกลไก (mechanistic aspects) ของการผลิตแซนแทนในถังกวนอย่างละเอียด เขาได้แสดงให้เห็นว่า อัตราการผลิตแซนแทนสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยแบบจำลองเอมไพริคัล ที่ใช้ในการอธิบายบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดการผสม และโดยการพิจารณาผลของอัตราความเค้นเฉือนต่ออัตราการผลิตแซนแทนจำเพาะ Nienow, et al., (1988) ได้ศึกษาปัญหาการผสมในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ใช้น้ำหมักจำลองแทนการหมักจริง

#### 4.4 ถังหมักที่ใช้ในการผลิตแซนแทน

การจำแนกประเภทของถังปฏิกรณ์ชีวภาพนั้นมีหลายวิธี Schugerl (1982) ได้แบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็นสามกลุ่มตามวิธีการให้พลังงาน คือ

1 ) กลุ่มที่มีกลไกเชิงกลที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่อยู่ภายใน (mechanically moved internal)

2 ) กลุ่มที่มีอุปกรณ์ทำให้ของไหลเกิดการไหลวนอยู่ภายนอก (external liquid pumping)

3 ) กลุ่มที่อาศัยหลักการอัดก๊าซ (gas compression)

นอกจากนี้เขาได้ให้ตัวอย่างของถังปฏิกรณ์จำนวนมากที่อยู่ในแต่ละกลุ่ม การศึกษาเกี่ยวกับการผลิตแซนแทนกัมส่วนใหญ่ ทำการทดลองในปฏิกรณ์กลุ่มแรก

#### 4.4.1 ถังหมักแบบบับเบิลคอลัมน์ (Bubble column fermentor (BCF))

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

Deckwer (1985) ได้อธิบายช่วงการไหล (flow regime) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของก๊าซ ที่ความเร็วของก๊าซต่ำ ๆ (เช่น  $U_0 < 5$  เซนติเมตรต่อวินาที) ขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวค่อนข้างจะมีความสม่ำเสมอ ช่วงนี้เราเรียกว่า การไหลแบบซูโดโฮโมจีนัส (pseudohomogeneous flow) ถ้าการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นเหนือจุดท่วม (flooding point) จะเกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ไม่สม่ำเสมอ ช่วงนี้เราเรียกว่า การไหลแบบเฮเทอโรจีนัส (heterogeneous flow) ดังนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะ (พื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร) ลดลง ทำให้การถ่ายโอนมวลสารมีประสิทธิภาพลดลง ถ้าถังปฏิกรณ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ขนาดฟองอากาศจะใหญ่ขึ้น ฟองอากาศเหล่านี้มีความคงตัวสูง ทำให้เกิดเป็นชั้นของก๊าซที่เคลื่อนที่ เรียกว่า slug ในกรณีที่ของเหลวมีความหนืดต่ำ slug flow เกิดขึ้นเฉพาะกรณีถังหมักแบบหอคอย (tower reactor) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีของน้ำหมักที่มีความหนืดสูง ทั้งที่เป็นพวกนิวโตเนียน และนอน-นิวโตเนียน อาจเกิด bubble slug ถึงแม้ว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมักจะมีขนาดใหญ่ถึง 30 เซนติเมตร นอกจากนั้นอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความหนืดสูง อาจจะมีฟองอากาศขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าความเร็วของก๊าซอาจจะน้อยกว่า 5 เซนติเมตรต่อวินาที (Deckwer, 1985)

ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาบางประการ บับเบิลคอลัมน์อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ในการหมักสำหรับระบบที่เป็น นอน-นิวโตเนียน ในอนาคตอันใกล้

#### 4.4.2 ถังหมักแบบอากาศยก (air - lift fermentor ( ALF))

ได้มีการตีพิมพ์ผลการทดลองประยุกต์ใช้ถังหมักแบบอากาศยกกับของไหลนอน-นิวโตเนียน Field, et al., (1984) และ Young, et al., (1987) ได้ศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ของถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแซนแทน เขาพบว่ามีการเกิดการรวมตัวของฟองอากาศใกล้กับตัวกระจายอากาศ (sparger) ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของแซนแทนจะต่ำถึงร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก ฟองอากาศขนาดเล็กบางส่วนที่ออกมาจากตัวกระจายอากาศซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.005 เมตร จะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.02 เมตร เมื่อความเข้มข้นของแซนแทนเพิ่มขึ้นก็ยิ่งมีการรวมตัวกันของฟองมากขึ้น เมื่อทำการทดลองโดยใช้ถังหมักชนิดนี้กับสารละลายแซนแทนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าฟองก๊าซส่วนใหญ่รวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ ในบริเวณที่ใกล้กับตัวกระจาย

อากาศซึ่งฟองอากาศขนาดใหญ่เหล่านี้ลอยตัวขึ้นไปผ่าน riser โดยไม่มีการแตกเป็นฟองขนาดเล็ก และออกจากน้ำหมักไปอย่างรวดเร็ว

นอกเหนือจากการรวมตัวเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่แล้ว Young et al., (1987) ได้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่งและการเกิดโฟมของของเหลว เมื่อความเข้มข้นของแชนแธนสูงขึ้นไปร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนัก ชั้นของของเหลวที่อยู่นิ่งเกิดขึ้นที่บริเวณผนังทางด้าน downcomer zone ของถังที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.14 เมตร เมื่อความเข้มข้นของแชนแธนสูงกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลทางด้าน riser ก็ลดลงอย่างมาก ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึง 0.4 โดยน้ำหนัก มีการเกิดโฟมที่มีลักษณะชุ่มด้วยสารละลาย มีความคงตัวสูง เกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิสระของของเหลว

Field et al., (1984) ได้ศึกษาการผสมในถังหมักแบบอากาศยกที่บรรจุด้วยสารละลายแชนแธนที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 0 - 0.5 โดยน้ำหนักเขาพบว่าไม่มีการเกิดบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง ในพิสัยความเข้มข้นดังกล่าว ถึงแม้ว่าความเร็วของของไหลจะลดลงอย่างมาก เขาได้ให้ข้อเสนอแนะว่าเราอาจจะปรับปรุงความสามารถในการถ่ายโอนมวลสาร โดยการนำอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนของไหลเชิงกล (ใบพัด, บีบหมุนเวียน) เข้าช่วย

#### 4.4.3 ถังหมักแบบกวนที่ใช้สำหรับการหมักแชนแธน

Pace and Righelato (1980) ได้ให้คำแนะนำว่าการออกแบบถังหมักแชนแธนที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างหัวความเร็วของใบพัด (impeller velocity head) ซึ่งควบคุมการเกิดฟองก๊าซและอัตราการไหลผ่านใบพัด (impeller flow) ซึ่งควบคุมการกระจายของฟองอากาศ และความเป็นเนื้อเดียวกันของของเหลวตลอดทั่วทั้งถัง รวมทั้งอัตราการถ่ายโอนมวล

เป็นที่ยอมรับกันว่าใบพัดแบบเทอร์โบไนท์ที่เป็นแผ่นตรง ไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตแชนแธน (Johnson and Hubbard, 1974; Hubbard and Williams, 1977 และ Deckwer et al., 1990)

โดยการใช้เทคนิคการมองภาพการไหล (flow visualization) Solomon et al. (1981b) พบว่ากำลังที่ต้องใช้ในการผสมในถังกวนขนาดเล็กลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้ใบพัดแบบเทอร์โบไนท์ที่เรียบตรงร่วมกับใบพัดแบบแผ่นเฉียง (45 องศา) แทนที่จะใช้ใบพัดแบบเทอร์โบไนท์สองใบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Anderson et al. (1982) ซึ่งได้ใช้ใบพัดในทำนองเดียวกันสำหรับการหมักเชื้อราในถังกวน

นักวิจัยหลายกลุ่มได้ค้นหาวธีการออกแบบใบพัด ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายโอนออกซิเจน เมื่อไม่นานมานี้มีการนำใบพัดแบบโปรเคมี (Prochem impeller) มาใช้ซึ่งเป็น

ใบพัดในกลุ่มไฮโดรฟอยล์ ได้มีการยืนยันว่าใบพัดชนิดนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้ออกซิเจนถึงร้อยละ 20 ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม และร้อยละ 30 - 40 ในถังกวนขนาดเล็ก (Balmer et al., 1987 and Eliezer, 1987)

Gbewonyo et al., (1987) ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายโอนออกซิเจน และการใช้พลังงานของใบพัดไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoil impellers) ในการหมักเชื้อราที่มีความหนืดสูง โดยใช้ถังหมักขนาด 800 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัดแบบโปรเคมี (Prochem impellers) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 14 นิ้ว เขาพบว่าใบพัดแบบโปรเคมีสามารถเพิ่มความสามารถในการทำงานได้โดยใช้กำลังเพียงร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับที่ต้องใช้สำหรับใบพัดแบบรัสตันเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ( $K_L a$ ) ที่ได้จากการใช้ ใบพัดแบบโปรเคมีจะมีค่าเป็น 2 เท่า ของค่าที่ได้จากการใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์

Balmer et al. (1987) ได้ศึกษาถึงไฮโดรไดนามิกส์ของระบบก๊าซ - ของเหลวและการใช้พลังงานของเครื่องกวนแบบโปรเคมีและอินเตอร์มิกในของเหลวที่เป็นสารละลายน้ำ และ CMC โดยการใช้ถังหมักที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เมตร เขาได้สังเกตพบบริเวณที่เป็นการไหลปั่นป่วนเลขกำลัง (power number) ของใบพัดแบบโปรเคมีและอินเตอร์มิกมีค่าต่ำกว่าของรัสตันเทอร์ไบน์เมื่อเลขเรย์โนลด์เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าในความเร็วในการกวนบางช่วง ใบพัดทั้งสองชนิดทำให้เกิดการสั่น และการไหลที่ขาดเสถียรภาพ

#### 4.4.4 ถังหมักสำหรับของไหลนอน-นิวโตเนียน : การเปรียบเทียบ

แนวความคิดเกี่ยวกับการใช้ถังหมักเพื่อผลิตแซนแทนกัน มีด้วยกัน 2 แนวความคิดคือ มีนักวิศวกรรมส่วนใหญ่ยังเชื่อว่า ถังหมักแบบถังกวน มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดี ในสภาวะที่ของเหลว มีความหนืดสูง ๆ (Margaritis and Zajic, 1978; Pace and Righelato, 1980 และ Sitting, 1992) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bhavaraju, et al., (1978) and Henzler (1981) อย่างไรก็ตามยังมีนักวิจัยกลุ่มหนึ่ง ซึ่งเป็นกลุ่มน้อย ได้พยายามหาถังปฏิกรณ์แบบอื่นที่ดีกว่า เช่น Dussap and Gros (1985), Field, et al., (1984); Stejskal and Potucek (1985) และ Deckwer, et al., (1990)

ถึงแม้ว่านักวิจัยส่วนใหญ่จะมีความเชื่อว่า ถังหมักแบบใช้การกวนเชิงกลจะเหมาะสมที่สุดในการผลิตแซนแทน Dussap and Gros (1985) ได้ศึกษาการผลิตแซนแทนในถังปฏิกรณ์แบบถังกวน (STF) ที่ให้อากาศ เปรียบเทียบ กับแบบบับเบิลคอลัมน์ (BCF) ที่มีการหมุนเวียนภายนอก และถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALF) ที่มีข้อได้เปรียบทางด้านการถ่ายโอนออกซิเจน พบว่าถังกวนแบบ STF ที่ใช้กับแซนแทนที่มีความเข้มข้นในช่วง 2 -30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ำที่สุด และมีความสามารถในการถ่ายโอน (transfer



capacity) เป็นหนึ่งในสามของถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ที่มีเวลาการผสม (mixing time) ที่ใกล้เคียงกัน

Schugerl (1981) ได้ศึกษาโดยใช้สารละลาย CMC ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และ PAA ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก กำลังที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตร (P / V) ของถังหมักแบบถังกวนเท่ากับ 0.5 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับบับเบิ้ลคอลัมน์ พบว่าค่า  $K_L a$  ในบับเบิ้ลคอลัมน์จะมีค่าสูงกว่า เขาสรุปได้ว่า ตลอดช่วงของความหนืดไม่สูงมากนัก ( $\eta < 1$  Pa.s) การให้อากาศโดยใช้บับเบิ้ลคอลัมน์ (BCF) จะประหยัดกว่า

Deckwer, et al., (1990) ได้ศึกษาพฤติกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ *X. campestris* ในถังกวนขนาด 70 - 1,500 ลิตร โดยใช้ Rushton turbines และใบกวนชนิด Intermig impeller ทำการเปรียบเทียบถึงปฏิกรณ์แบบบับเบิ้ลคอลัมน์ ขนาด 50 ลิตร และถังหมักแบบอากาศยก ที่มีท่อ draft tube ขนาด 800 ลิตร พบว่า ในถังหมักแบบถังกวนที่มีความเข้มข้นของเซนแทรนสูงเกินกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนักจะเกิดเป็นบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง ส่วนถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ และถังหมักแบบอากาศยก จะไม่เกิดเป็นบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง จนกระทั่งความเข้มข้นของเซนแทรนสูงเป็นร้อยละ 4.5 เพราะมีผลของสลักซ์ของก๊าซ (gas slugs) จากการวิเคราะห์ของเขาเหล่านี้พบว่า ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ และถังหมักแบบอากาศยก มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงกว่าถังหมักแบบถังกวน และการใช้ใบกวนแบบ Rushton turbine ในถังหมักแบบถังกวนจะให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำสุด

Pons, et al., (1990) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการหมักเซนแทรนในถังกวนแบบบับเบิ้ลคอลัมน์ และถังหมักแบบถังกวน พบว่าความเข้มข้นของชีวมวล ไม่ขึ้นกับชนิดของถังหมัก แต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนที่มี เขาพบว่าถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลต่ำกว่า ต้องใช้เวลานานเป็นสองเท่า เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเซนแทรนที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามพบว่าลักษณะการถ่ายโอนในถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์มีความสม่ำเสมอกว่าในถังหมักแบบถังกวนที่ปรากฏว่ามีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่เกิดขึ้น เขาได้เสนอแนะว่าควรเลือกใช้ถังหมักแบบบับเบิ้ลคอลัมน์เพราะให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลดีกว่าถังหมักแบบอื่น ถังหมักแบบอากาศยกอาจเป็นถังหมักที่ดีกว่า ในการผลิตเซนแทรน แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาข้อมูลกันอย่างกว้างขวางเท่าที่ควร

การผลิตเซนแทรนในอาหารเพาะเลี้ยง (culture medium) เมื่อเซนแทรนสะสมมากขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถของอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนลดลง จากการเพาะเลี้ยง

ในสภาวะที่มีอากาศจึงกลายเป็นสภาวะที่ปริมาณออกซิเจนจำกัดในที่สุด ความหนืดที่เพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการผสมไม่เพียงพอ ในถังหมักแบบถังกวน สามารถสังเกตพบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง ที่ระยะทางแน่นอนหนึ่ง ๆ จากใบพัด (Schmid, 1984; และ Deckwer and Schumpe, 1989)

Herbst, et al., (1989) ได้เปรียบเทียบถังหมักต่างๆชนิดกันในการผลิตแซนแทน ได้แก่ ถังกวนที่มีกังหันใบพัดแบบ Rushton และ Intermig, ถังกวนที่มีท่อกราฟและกังหันใบพัด Kaplan, BC (50 ลิตร, เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 ม.) และ ALF (20 ลิตร, การวนลูปภายใน (internal loop)) พบบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง และการผสมไม่เพียงพอในถังหมักแบบอากาศยก จึงคาดว่า บับเบิ้ลคอลัมน์น่าจะเป็นถังหมักที่ดีและเหมาะสมสำหรับการหมักชนิดนี้ ในส่วนของผลที่ขัดแย้งจากข้างต้น โดยการศึกษาลักษณะการผสม (mixing characteristics) ของสารละลาย CMC ในน้ำซึ่งเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียน ที่มีความหนืดสูง ในถังหมัก 2 ชนิด คือ ECL - AL (external-circulation loop airlift) และบับเบิ้ลคอลัมน์ (BC) ได้แสดงให้เห็นว่า ECL - AL เป็นตัวผสม (mixer) ที่ดี หรืออาจจะดีกว่า บับเบิ้ลคอลัมน์ด้วยซ้ำ (Popovic and Robinson, 1992)

Kessler, Popovic and Robinson (1993) ศึกษาการผลิตแซนแทนด้วย *Xanthomonas campestris* ในถังหมักแบบ ECL- AL ได้รับความเข้มข้นของแซนแทนในตอนท้ายสูงประมาณ 25 กรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาในการหมักทั้งสิ้น 49 ชั่วโมง ในแต่ละรอบ พบช่วงที่ปริมาณออกซิเจนถึงขีดจำกัดภายหลังการหมักผ่านไป 36 ชั่วโมง ความหนืดของแซนแทนที่ได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับที่มีการศึกษามาก่อนในถังปฏิกรณ์อื่นๆ ต่างชนิดกัน การจัดการและออกแบบถังหมักแบบ ECL - AL ที่เหมาะสมสำหรับการหมักแซนแทนนั้นควรมีค่าอัตราส่วน  $A_D / A_R$  ค่อนข้างต่ำ แต่ค่า dispersion (or loop) height ค่อนข้างสูง orifice diameter ของ air sparger ต้องพอเหมาะที่จะทำให้ค่าพลังงานที่ใช้จำเพาะมีค่าน้อยที่สุด แต่ก็ต้องป้องกันการไหลย้อนกลับของบรอกซ์ (broth) กลับเข้าผ่าน air sparger

## 5. วิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (Approach of increasing complexity)

### 5.1 ความสำเร็จและความล้มเหลวของ Dimensionless analysis

แม้ว่าได้มีการทดลองและสหสัมพันธ์ (correlations) ต่าง ๆ จำนวนมากที่ทำนายตัวแปรที่ใช้ออกแบบถังปฏิกรณ์ แต่มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่สามารถใช้อธิบายกระบวนการทางกายภาพที่เกิดขึ้น (Siripatana, 1992)

Charles (1985a, 1985b) ได้ศึกษาการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ โดยประเมินสหสัมพันธ์ที่มีผู้เสนอขึ้นเท่าที่ผ่านมา ว่าสามารถที่จะเอามาใช้งานได้เพียงใด เขาสรุปว่า ถึงแม้ว่า ริโอโลยีของน้ำหมัก จะมีความสำคัญมากในการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ แต่ปรากฏว่ามีคนสนใจน้อยที่จะนำความรู้ในเรื่องริโอโลยีนี้มาใช้ในการขยายขนาดจริง ๆ สหสัมพันธ์ ส่วนใหญ่สำหรับการใช้

กำลังงาน (power consumption) และการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) มักจะมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1. ในทุกกรณี ดังหมักมีขนาดเล็ก
2. ไม่มีการใช้น้ำหมักจริง
3. รีโอดีและลักษณะอื่น ๆ ที่สำคัญ ไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างที่ควรจะเป็น
4. ปัจจัยในด้านโครงสร้างทางเรขาคณิต (geometry factor) ไม่ได้มีการศึกษาอย่างเพียงพอ

พอ

5. การศึกษาส่วนใหญ่ยังไม่เป็นระบบอย่างเพียงพอ นั่นคือเมื่อได้ข้อมูลแล้วก็มุ่งแต่จะหาสหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้มองว่าจริง ๆ แล้วสหสัมพันธ์นั้นไม่ได้ตอบคำถามให้เรามากนัก นอกจากว่าเป็นผลสรุปการทดลองแต่เพียงอย่างเดียว

สหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานและการถ่ายโอนมวลสาร  $K_L a$  (ของของไหลนอน-นิวโตเนียน) แสดงความแปรปรวน (variations) มาก ยิ่งไปกว่านั้นผลที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่มีอยู่ มักจะไม่ตรงกับสภาวะจริง (real situation) (Charles, 1985a, 1985b)

มีสหสัมพันธ์สำหรับการใช้กำลังงานที่ตีพิมพ์ไว้บ้างสำหรับบรอนอน-นิวโตเนียนที่มีการให้อากาศ Charles (1985a, 1985b) แสดงข้อคิดเห็นว่ามีเพียงงานของ Tagushi, et al., (1968) และ Micheal and Miller (1962) เท่านั้นที่ทำการทดลองไว้ในช่วงกว้าง อย่างไรก็ตามมีสิ่งสำคัญที่พึงตระหนักว่า สหสัมพันธ์ทั้งสองนั้นไม่สอดคล้องซึ่งกันและกัน และที่สำคัญ ในการหมักปริมาณมากสหสัมพันธ์ทั้งสองให้ผลที่แตกต่างกันประมาณ 2 - 3 เท่า

จะเห็นว่าสหสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่มีผู้ทำการทดลองไว้มากมายนั้น ให้ข้อสรุปที่ขัดแย้งกันเอง อีกทั้งการหาสหสัมพันธ์แบบเดิม ๆ นั้น ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ได้เฉพาะในขอบเขตที่เขาทำการทดลองเนื่องจากไม่มีพื้นความเข้าใจที่ลึกซึ้งเพียงพอที่จะเอามาใช้ในสภาวะใกล้เคียง เพราะไม่ทราบผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยืดหยุ่น (elasticity) อย่างชัดเจน ทราบเพียงแต่ผลโดยรวม ๆ ของปัจจัยเหล่านั้น

ดังนั้นเราจึงเกิดคำถามขึ้นว่า การที่เราใช้วิธีการศึกษาในลักษณะที่รวบรวมทั้งหมด คือ แปรเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ศึกษาผล แล้วนำมาสรุป โดยที่ไม่ต้องใช้ความเข้าใจอะไรนั้น ถูกต้องดีแล้วหรือไม่ หรือว่าเราควรที่จะทำการทดลองศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ให้เห็นชัดเจนก่อน แล้วค่อย ๆ เพิ่มความซับซ้อนขึ้นมา สิ่งนี้คือต้นเหตุ, จุดเริ่ม ของวิธีการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น เพราะแนวทางนี้ต้องการความเข้าใจมากกว่าที่จะรวบรวมสรุปดังที่ได้มีผู้ศึกษาและกระทำไว้มากแล้ว

สรุปได้ว่าถ้าเราจะศึกษาให้เป็นระบบแล้ว เราควรจะมีการศึกษาอย่างเป็นขั้นตอนที่มีการเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้นทีละน้อยโดยเพิ่มสิ่งที่เป็นปัจจัยเข้าไปทีละอย่าง ๆ แล้วดูผลของมันว่าผลของการเพิ่มปัจจัยนั้น ๆ จะทำให้มีอะไรเปลี่ยนแปลงบ้าง จะทำให้เราเข้าใจ เหตุและผล (cause and effect) ดีขึ้น แล้วมันจะเป็นพื้นฐานสำคัญเพื่อไปใช้ในการขยายขนาด

## 5.2 แนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น (The concept of increasing complexity procedure)

ระบบที่มีความซับซ้อน ไม่ใช่แค่เพียงว่าเราจะสามารถใช้อุปกรณ์ หรือคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเท่านั้นที่จะมาจัดการกับการทดลอง แต่เราต้องการการทดลองที่เป็นระบบ Siripatana (1992) ได้วิจารณ์แบบวิธีการวางแผนการทดลองเชิงสถิติที่ว่ามันมีประสิทธิภาพสูงนั้น เป็นวิธีการที่ตรงข้ามกับแนวทางการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ซึ่งแนวทางนี้นั้น เราจะจัดเรียงการทดลองในลักษณะที่ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่เราต้องการ (objective function) นั้นสามารถที่จะทดสอบแยกเป็นส่วน ๆ ได้ ในขั้นต้นของการทดลอง หลังจากที่ได้ผลของแต่ละปัจจัยต่อสิ่งที่เราต้องการนั้นชัดเจนแล้ว จึงค่อยรวมความซับซ้อนเหล่านั้นเพิ่มขึ้น

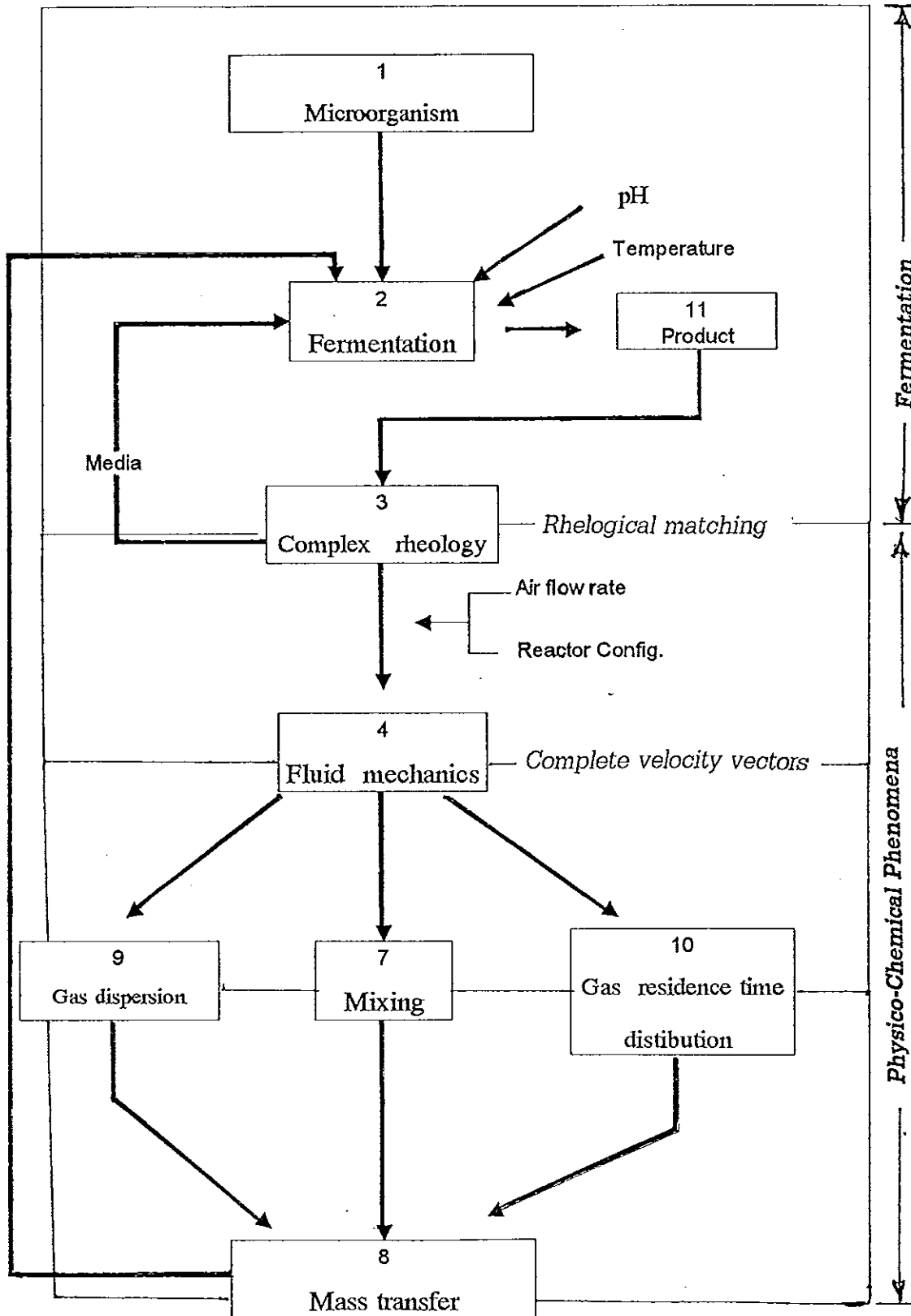
จุดมุ่งหมายสุดท้ายของแนวทางนี้คือ ระบุผลของแต่ละปัจจัยได้กระจ่างชัดอย่างที่อันตรกิริยาจริงของมันเป็น Siripatana (1992) เชื่อว่าเราไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง, ปริมาณความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล โดยการรวบรวมเอาทุก ๆ สาเหตุเข้าด้วยกันระหว่างการทดลอง และหวังว่านัยสำคัญของแต่ละปัจจัยจะถูกระบุโดยวิธีการทางสถิติ ทั้งนี้เพราะโอกาสที่จะมีข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคทางการทดลอง และแบบจำลองทางสถิติที่สมมติขึ้นนั้นเป็นไปได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ปัญหามีความซับซ้อนสูง

Siripatana (1992) ได้ยกตัวอย่างการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นโดย เลือกใช้ฟลูคโตส ความเข้มข้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เป็นของไหลพื้นฐาน (base fluid) เพราะมันมีความหนืดสูง (0.1 - 0.5 Pa.s) และเป็นของไหลนิวโตเนียน เมื่อนำไปศึกษาถึงผลของความยืดหยุ่น เขาจึงเติมพอลิเมอร์ (เช่น แชนแทนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 - 0.5 โดยน้ำหนัก) ปริมาณเล็กน้อยลงไป เพื่อให้เกิดเป็นของไหลวิสโคอีลาสติกอุดมคติ (ideal viscoelastic fluid) หรือของไหลโบเกอร์ (boger fluid) และเมื่อศึกษาถึงผลของความเป็นซูโดพลาสติก ก็จะได้เติมพอลิเมอร์สายสั้น เช่น methacel (Dow company) ซึ่งจะให้ความไม่ยืดหยุ่น หลังจากศึกษาถึงปริมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยเป็นที่เข้าใจดีแล้ว ความซับซ้อนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ สามารถรวมเพิ่มเข้าด้วยกัน และตรวจสอบถึงความมีส่วนร่วมของแต่ละปัจจัย รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่าง ๆ

แนวทางนี้ต้องใช้เวลาและงบประมาณ อีกทั้งยังต้องการรายละเอียดในการวัดมากกว่า ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ความเร็วในเฟสก๊าซและเฟสของเหลว, การกระจายของขนาดฟองอากาศ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับบางปัญหาที่ยากมาก ๆ เราไม่สามารถคาดหวังผลที่จะให้ค่าทางปฏิบัติ (practical value) ในเวลาอันสั้นได้

ในการนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัญหาการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพ เราลองมาพิจารณา ในกระบวนการออกแบบถึงหมักทั้งกระบวนการ พิจารณาภาพประกอบ 1.12 ซึ่งแสดงเหตุและผล (cause and effect) ของส่วนต่าง ๆ

จากลักษณะของปัญหาเช่นนี้ เราสามารถแบ่งปัญหาเป็นส่วน ๆ ดังนี้ ชั้นแรก แบ่งส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรง และอีกส่วนหนึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับการหมักหรือจุลินทรีย์โดยตรงออกจากกันก่อน เนื่องจากถ้าทำการหมักแล้ว เราไม่สามารถศึกษาหรือทำการทดลองอย่างลึกซึ้งได้เลย เพราะว่ากลไกและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องมีมากเกินไป อีกทั้งปัจจัยทางชีวภาพนั้นซับซ้อน ไม่มีความสม่ำเสมอ และหากใช้บรอร์จริงในการศึกษาแล้ว จะเกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น บรอร์จริงควบคุมยาก เพราะต้องอยู่ในสภาพที่ปราศจากเชื้อ การทดลองต้องใช้เวลา นาน ต้องใช้เครื่องมือและเทคนิคที่ซับซ้อนและมีราคาแพง ผลที่ได้มีความผันแปรสูง ป้อยครั้ง การวัดไม่สามารถทำได้ ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาลง เราจึงอาจแบ่งปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมัก และไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการหมักออกจากกัน และการที่เราจะแบ่งปัญหาในส่วนนี้ได้ เราก็จะพบปัญหาในเรื่องบรอร์ซึ่ง บรอร์จริง - บรอร์ปลอมหรือของไหลจำลอง (สารละลายแซนแทนก็สำเร็จที่เราเตรียมขึ้น เพื่อแยกปัญหาในส่วนอื่นเนื่องมาจากการหมักออกไปก่อน) นั้น อาจไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาเทคนิคบางอย่างที่สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมโยงผลการทดลองที่ได้จากบรอร์จำลอง ให้สามารถประยุกต์ใช้กับบรอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักจริง ๆ เป็นที่ทราบกันดีว่า ของไหลถึงแม้จะต่าง ชนิดกัน ถ้ามีสมบัติทางด้านรีโอโลยีเหมือนกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสมบัติทางรีโอโลยีดังกล่าวนี้ไม่ใช่แค่เพียงความหนืด หรือรีโอแกรม (ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน) แต่จะต้องเหมือนกันในเรื่องสมบัติวิสโคอิลาสติก ด้วย ซึ่งถ้าเป็นสารละลายที่ต่างชนิดกัน การที่จะหาสารละลายที่มีสมบัติทางรีโอโลยีเหมือนกับบรอร์อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก สิ่งที่เราทำได้ก็คือพยายามเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยี (rheological matching) ซึ่งเราต้องหาวิธีการที่จะเทียบเคียงทางรีโอโลยีอย่างมีระบบ



ภาพประกอบ 1.12

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการหมัก และการแบ่งปัญหาเป็นส่วนย่อย (problem segmentation)

การพัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางด้านรีโอโลยีนั้นเป็นเรื่องสำคัญที่ยังมีการสนใจกันน้อยมาก หากมีการพัฒนาวิธีการเทียบเคียงที่เชื่อถือได้ขึ้นมา ก็จะช่วยให้เราสามารถนำผลการทดลองโดยใช้ของไหลชนิดหนึ่ง มาใช้ในการออกแบบกับของไหลอีกชนิดหนึ่งได้ ถ้าของไหลทั้งสองไม่แตกต่างกันมากเกินไป หรือพอที่จะเทียบเคียงกันได้ การออกแบบและการขยายขนาดสำหรับระบบการไหลของพวกพอลิเมอร์ก็คงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ เราได้พัฒนาวิธีการเทียบเคียงทางรีโอโลยี ที่อาศัยรีโอแกรม ในเทอมของ Power law model parameter ( $n$  และ  $K$ ) และอาศัยสมบัติวิสโคอิลาสติก ( $G'$  และ  $G''$ ) เป็นบรรทัดฐานในการเทียบเคียง

หลังจากที่ได้ทำการเทียบเคียงทางรีโอโลยีแล้ว จึงเริ่มศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ในส่วนถัดไป คือ ผลของรีโอโลยี อัตราการไหลของอากาศ และลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ ต่อกลศาสตร์ของของไหลโดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique) ซึ่งผลที่จะได้ในขั้นตอนนี้คือ กระบวนการไหล (flow pattern) ซึ่งก็คือกลศาสตร์ การไหลที่แสดงออกในรูปแบบที่แสดงเวกเตอร์

ในทางทฤษฎีเป็นการนำกระบวนการไหลที่ได้ไปซิมิวเลต การกระจายของก๊าซ (gas dispersion), การผสม (mixing), การกระจายของเวลาเรซิเดนซ์ของก๊าซ (gas residence time distribution) และ การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายของโซน (network of zone model) (Siripatana, 1992)

ในทางปฏิบัติเป็นการแปรเปลี่ยน รีโอโลยี, อัตราการไหลของอากาศ และลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ เพื่อให้ได้กลศาสตร์การไหลในสภาวะนั้น ๆ และศึกษาผลของกลศาสตร์การไหลต่อ การกระจายของก๊าซ, การผสม, การกระจายของเวลาเรซิเดนซ์ของก๊าซ และ การถ่ายโอนมวลสาร แล้วนำผลการทดลองที่ได้เทียบกับผลที่ได้จากการซิมิวเลตเพื่อดูความสอดคล้อง ของผลการทดลองกับผลการทำนายของแบบจำลอง

สรุปขั้นตอนในการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพื่อการออกถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพโดยการหมักจุลินทรีย์ ในงานวิจัยขั้นสมบูรณนี้ได้ดังนี้

1. ศึกษารีโอโลยี ที่ซับซ้อน
2. ศึกษาผลของรีโอโลยีเชิงซ้อนที่มีต่อกลศาสตร์การไหล โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาคหรือเทคนิคอื่น ๆ
3. ศึกษาผลของกลศาสตร์การไหลที่มีต่อการกระจายของฟองอากาศ, การผสม, การกระจายของขนาดและเวลาเรซิเดนซ์ของฟองอากาศ

4. ศึกษาผลของการกระจายของอากาศ, การผสม, การกระจายของขนาดและเวลาเรซีเดนซ์ของฟองอากาศ ที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสาร

5. ศึกษาผลของการถ่ายโอนมวลสาร ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการเจริญและการสร้างพอลิเมอร์ชีวภาพของจุลินทรีย์

เมื่อเข้าใจอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีต่อกันแบบแยกส่วนแล้ว จึงค่อยนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบและขยายขนาดระบบการผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. สร้างและพัฒนาถังปฏิกรณ์ชีวภาพจำลองแบบอากาศยก ขนาด 20-30 ลิตร เพื่อใช้ในการศึกษาการผสม

2. ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม ที่ได้จากการละลายกัมสำเร็จ ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทน (model fluids) ของบรอร์ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการหมัก

3. พัฒนาและชิมูเลตแบบจำลอง เพื่อใช้อธิบายกลไกการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพจำลองแบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้นและทดสอบแบบจำลองโดยใช้ผลการทดลอง



## บทที่ 2

### แนวคิดและการพัฒนา

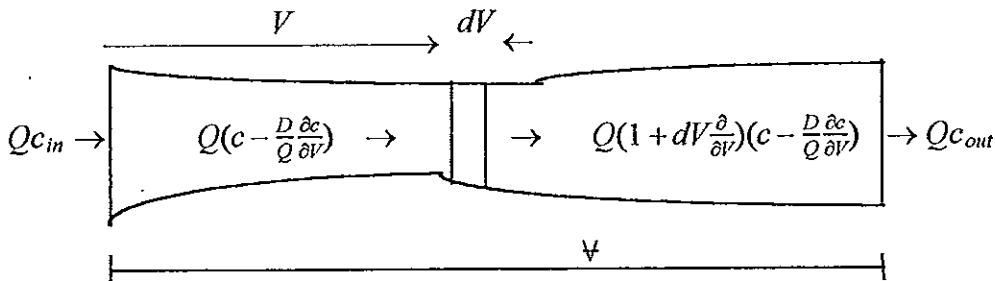
#### 1. การพัฒนาแบบจำลองการผสมย้อนกลับ (Development of backmixing model)

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าแบบจำลองของ Merchuk and Yunger (1990) มีจุดอ่อนอยู่ที่สมมติฐานที่ไม่เป็นจริง จึงไม่สามารถนำมาใช้อธิบาย ปฏิกิริยาการผสมที่มีความเบี่ยงเบนไปจากข้อสมมติดังกล่าวมากได้ ในขณะที่เดียวกันแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยหลายท่านก็ไม่ได้พิจารณาความสำคัญของส่วน gas separation zone จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้อธิบายการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองที่มีความยืดหยุ่นสูงสำหรับอธิบายปฏิกิริยาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก หรือถังปฏิกรณ์แบบอื่นที่มีการวนเป็นรูป โดยมีข้อสมมุติที่ใกล้เคียงกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง มากขึ้น และไม่มีควมซับซ้อนเกินไปจนทำให้การนำมาประยุกต์ใช้ยุ่งยากเกินไป

##### 1.1 แบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร (Volumetric backmixing models)

backmixing model ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งได้มีการพัฒนาโดยนักวิจัยหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Mecklenburgh and Hartland (1975) มีข้อจำกัดอยู่ประการหนึ่งก็คือ แบบจำลองเหล่านี้มักจะกำหนดให้ความเร็วของของไหลคงที่ตลอดคอลัมน์ นั่นคือเป็นการกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดคงที่ตลอดถังปฏิกรณ์ ถึงแม้ว่าข้อจำกัดอันนี้สามารถแก้ไขได้ไม่ยากนักโดยการแบ่งถังปฏิกรณ์ออกเป็นส่วยย่อยหลายส่วน ซึ่งในแต่ละส่วนอาจจะสามารถประมาณได้ว่าของไหลมีความเร็วเฉลี่ยคงที่ แต่การใช้งานนั้นจะมีความยุ่งยากมาก สำหรับการไหลใน loop reactor และถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกนั้น ทางแก้ไขความยุ่งยากอันนี้ที่สะดวกที่สุดก็คือการพัฒนาแบบจำลองใหม่ที่ใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรแทนการใช้ความเร็วเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนา ทั้งนี้ก็เพราะถึงแม้ว่าในถังปฏิกรณ์เหล่านี้ ความเร็วของของไหลจะผันแปรตามตำแหน่ง แต่อัตราการไหลเชิงปริมาตรนั้นเกือบจะคงที่ การใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรในการพัฒนาแบบจำลอง จึงสามารถลดความยุ่งยากได้อย่างมาก

n. Volumetric differential backmixing : unsteady state injection



$$C = c - \frac{D \partial c}{Q \partial V}$$

ภาวะขอบเขต

$$Qc_{in} = QC$$

$$c_{in} = C$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$QC = Q\left(C + \frac{\partial c}{\partial V} dV\right) + \frac{\partial c}{\partial t} dV$$

$$-Q \frac{\partial C}{\partial V} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

ภาวะขอบเขต

$$\left\{ \begin{array}{l} QC = Qc_{out} \\ c = c_{out} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = c = c_{out} \\ \text{or } D \frac{\partial c}{\partial V} = 0 \end{array} \right\}$$

ภาพประกอบ 2.1 แสดงสมดุลดิฟเฟอเรนเชียลเชิงปริมาตร (volumetric differential balance) ของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) คงที่ แต่ความเร็วไม่คงที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งที่พิจารณา ให้ D เป็นสัมประสิทธิ์การกระจายเชิงปริมาตร (volumetric dispersion coefficient) มีค่าคงที่ตลอดถังปฏิกรณ์ ให้  $\forall$  เป็นปริมาตรรวมของถังปฏิกรณ์ จะได้สมการดุลมวลและภาวะขอบเขตดังในภาพประกอบ 2.1

ทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น

$$-Q \left( \frac{\partial c}{\partial V} - \frac{D}{Q} \frac{\partial^2 c}{\partial V^2} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.1)$$

หรือ

$$-Q \frac{\partial c}{\partial V} - D \frac{\partial^2 c}{\partial V^2} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.2)$$

ทำให้อยู่ในรูปไร้หน่วย (dimensionless form)

$$-\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{1}{P} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c}{\partial \theta} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\theta = \frac{t}{\tau}$ ,  $\tau = V/Q$ ,  $z = V/V$ ,  $P = VQ/D$

$\tau$  คือ เวลาเรซิเดนซ์เฉลี่ยของอนุภาคของไหลภายในถังปฏิกรณ์จากเวลาที่เริ่มเข้าไปจนกระทั่งออกจากถัง

$P$  คือ volumetric Peclet number ซึ่งถ้าพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์คงที่  $P$  จะมีค่าเท่ากับ Peclet number ดั้งเดิม  $P^*$  ทั้งนี้ก็เพราะว่าในกรณีนี้  $V = AL$  และ  $Q = Au$

$$P = \frac{(AL)(Au)}{D}, \quad P^* = \frac{Lu}{D^*} \quad (2.4)$$

ดังนั้น volumetric Peclet number จะเป็นตัวเดียวกันกับ  $P^*$  (conventional Peclet number) ในกรณีนี้ก็ต่อเมื่อ  $D = D^* A^2$  เท่านั้น ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

ในกรณีที่ความเร็วของของไหลคงที่ตลอดคอลัมน์ หรือนั่นคือพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์คงที่ และเราสามารถใส่สมการต่อไปนี้ซึ่งเสนอโดย Mecklenburgh and Hartland (1975)

$$-u \frac{\partial C^*}{\partial l} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad -u \frac{\partial}{\partial l} \left( c - \frac{D^*}{u} \frac{\partial c}{\partial l} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.5)$$

แทนค่า  $\partial l = \frac{1}{A} \partial V$  จะได้

$$-uA \frac{\partial}{\partial V} \left( c - \frac{D^* A}{u} \frac{\partial c}{\partial V} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.6)$$

normalized สมการ (2.6) โดยใช้ตัวแปร  $\theta, \tau, z$

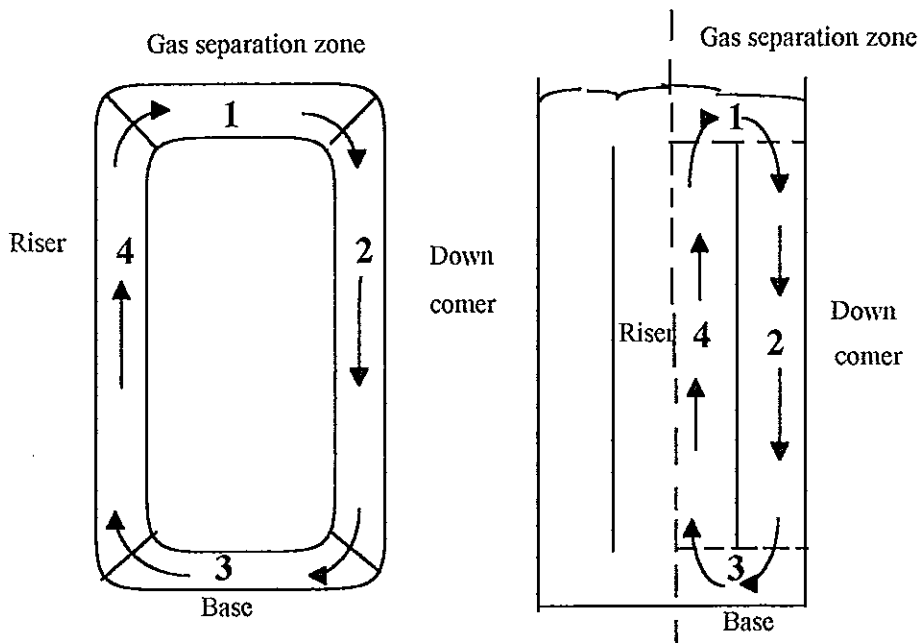
$$-\frac{Q}{V} \frac{\partial}{\partial z} \left( c - \frac{D^* A}{Vu} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{Q}{V} \frac{\partial c}{\partial \theta} \quad (2.7)$$

$$-\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{D^* A^2}{QV} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c}{\partial \theta} \quad (2.8)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (2.3) และ (2.8) จะได้ว่า

$$D = D^* A^2 \quad \text{และ} \quad P = P^* \quad (\text{ถ้า } A \text{ มีค่าคงที่})$$

ข. แบบจำลองการหมุนเวียนที่มีการผสมแบบย้อนกลับ (Backmixing-circulation model)



ภาพประกอบ 2.2 แบบจำลองการหมุนเวียนที่มีการผสมแบบย้อนกลับ

พิจารณาดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกหรือดังปฏิกรณ์ที่เป็นรูปชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 ในดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกสามารถแบ่งได้ 4 บริเวณ ดังนี้ บริเวณที่ 1 คือ gas separation zone บริเวณที่ 2 คือ downcomer zone บริเวณที่ 3 คือ base zone และบริเวณที่ 4 คือ riser zone โดยมีสมมติฐานต่อไปนี้

- 1) ในบริเวณหนึ่ง ๆ ขนาดของ backmixing มีค่าคงที่ แต่ต่างกันไปในแต่ละบริเวณ
- 2) ไม่มี liquid channeling เกิดขึ้น และ transverse mixing อาจเกิดขึ้นในระดับที่จำกัด และปรากฏการณ์เช่นนั้นพิจารณาโดยใช้การรวมเข้ากัน (lumping) กับ volumetric backmixing โดยพิจารณาให้เทียบเท่ากับขนาดเซลล์ที่เล็กลง
- 3) ไม่จำเป็นต้องตั้งสมมติฐานให้พื้นที่หน้าตัดคงที่ตลอดทั้งคอลัมน์ เพียงแต่ตั้งสมมติฐานให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลวในรูปการวน มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นจริงสำหรับกรณี

การไหลในถังปฏิกรณ์ที่มีรูป ในบริเวณการไหลที่เสถียรแล้ว (well-developed flow region)

กำหนดสมมติฐานต่อไป คือใช้สมการ (2.3) ในแต่ละบริเวณ นั่นคือ

สำหรับ gas separation zone :

$$-\frac{\partial c_1}{\partial z_1} + \frac{1}{P_1} \frac{\partial^2 c_1}{\partial z_1^2} = \frac{\partial c_1}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

โดยมีภาวะขอบเขตดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ที่ } z_1 = 0, c_1 &= c_{4,out} \\ z_1 = 1, c_1 &= c_{1,out} \end{aligned}$$

เช่นเดียวกัน ในบริเวณอื่น ๆ

downcomer zone :

$$-\frac{\partial c_2}{\partial z_2} + \frac{1}{P_2} \frac{\partial^2 c_2}{\partial z_2^2} = \frac{\partial c_2}{\partial \theta} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } z_2 = 0, c_2 &= c_{1,out} \\ z_2 = 1, c_2 &= c_{2,out} \end{aligned}$$

base zone :

$$-\frac{\partial c_3}{\partial z_3} + \frac{1}{P_3} \frac{\partial^2 c_3}{\partial z_3^2} = \frac{\partial c_3}{\partial \theta} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } z_3 = 0, c_4 &= c_{3,out} \\ z_3 = 1, c_4 &= c_{4,out} \end{aligned}$$

riser zone :

$$\frac{\partial c_4}{\partial z_4} + \frac{1}{P_4} \frac{\partial^2 c_4}{\partial z_4^2} = \frac{\partial c_4}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ } z_4 = 0, c_4 &= c_{3,out} \\ z_4 = 1, c_4 &= c_{4,out} \end{aligned}$$

โดยที่ตัวห้อยตัวแรกแสดงโซน ตัวที่สองซึ่งเป็น in หรือ out บ่งชี้ว่าเป็นของกระแสที่ กำลังเข้าหรือออกจากโซนดังกล่าว นอกจากนี้ต้องมีการกำหนดสภาวะเริ่มต้นก่อนที่จะสามารถ หาผลเฉลยได้ สภาวะเริ่มโดยปกติจะถูกกำหนดอย่างชัดเจน แบบจำลองนี้จะต้องหาผลเฉลย โดยเทคนิคเชิงตัวเลข สำหรับในกรณีของการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ finite difference technique (รายละเอียดมีอยู่ในภาคผนวก ก)

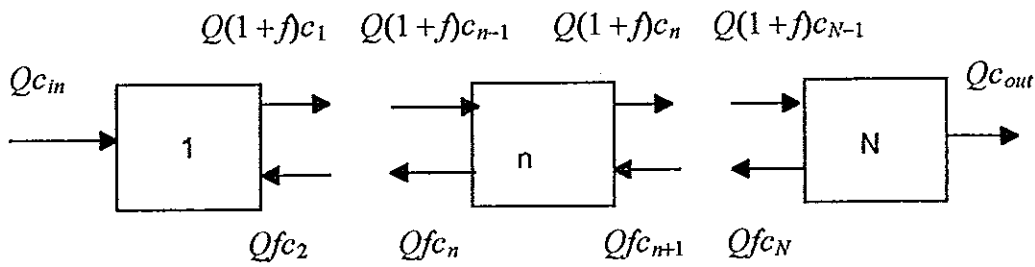
## 1.2 แบบจำลองโครงข่ายของโซน (Network-of-zone model)

### ค. Stepwise model หรือ Simple network-of-zone model

stepwise model เป็น network-of-zone model แบบหนึ่งซึ่ง network-of-zone model เป็นแบบจำลองที่รวมรูปร่างต่าง ๆ ของโครงข่ายเซลล์ (cell network) ที่มีการผสมและการแลกเปลี่ยนมวลคงที่ เข้าไว้ด้วยกัน ในที่นี้ stepwise model คือ network-of-zone model ที่มีกลุ่มของสเตจ (stage) ที่ต่อกันเป็นอนุกรม ในแต่ละสเตจมีปริมาณที่บรรจุอยู่คงที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (uniform) เนื่องจาก การผสมที่สมบูรณ์ (well mixing) ในแบบจำลองที่จะอธิบายต่อไปนี้จะยอมให้มีการผสมกลับ (back flow) ระหว่างสเตจ อย่างไรก็ตามการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างสเตจ ถูกจำกัดอยู่เพียงหนึ่งมิติ

ความคล้ายคลึงของ stagewise backmixing model และ volumetric backmixing model เป็นเรื่องที่แสดงให้เห็นได้ไม่ยากนัก เพราะ stagewise backmixing model ก็คือ volumetric backmixing model ที่มีจำนวนสเตจจำกัด

ถ้าเราสมมติให้ขนาดของเซลล์คงที่ และยอมให้มี back flow โดยตัวแปร  $f$  ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของมวลไหลกลับระหว่างสเตจ ต่อ มวลไหลโดยการพาไปข้างหน้าสุทธิ



ภาพประกอบ 2.3 แบบจำลอง stepwise model หรือ simple network-of-zone model

รายละเอียดที่มาก มีอยู่ใน Mecklenburgh and Hartland (1975) ซึ่งให้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Q[c_{n-1} - c_n + f(c_{n+1} - 2c_n + c_{n-1})] = V_n \frac{dc_n}{dt} \quad (2.13)$$

โดยที่  $c_{in}$  คือความเข้มข้นที่ทางเข้าขององค์ประกอบที่เราสนใจ

$c_n$  คือความเข้มข้นที่เซลล์ หรือสแตก  $n$  ใด ๆ ขององค์ประกอบที่เราสนใจ

$c_{out}$  คือความเข้มข้นที่ทางออกขององค์ประกอบที่เราสนใจ

$V_n$  คือปริมาตรของเซลล์ใด ๆ

$n = 1, 2, 3 \dots N$  ;  $N$  คือจำนวนเซลล์หรือสแตกทั้งหมด

ซึ่งทำให้อยู่ในรูปไร้หน่วย

$$c_{n-1} - c_n + f(c_{n+1} - 2c_n + c_{n-1}) = \frac{1}{N} \frac{dc_n}{d\theta} \quad (2.14)$$

โดยที่  $\theta = \frac{t}{\tau}$  คือเวลาไร้มิติ (dimensionless time)

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง stepwise model และ differential backmixing model เราใช้การประมาณอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับที่สอง ดังนี้ (ที่  $\theta$  คงที่)

$$c_{n+1} \approx c_n + \frac{1}{N} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{1}{2N^2} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \dots \quad (2.15)$$

$$c_{n-1} \approx c_n - \frac{1}{N} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{1}{2N^2} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \dots$$

แทนลงไปใน (2.14) และทำให้เป็นรูปแบบที่ง่ายได้ดังนี้

$$-\frac{\partial c}{\partial z} + \frac{(f + \frac{1}{2})}{N} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c_n}{\partial \theta} \quad (2.16)$$

โดยการเปรียบเทียบกับสมการ (2.3) จะได้ว่า

$$\frac{1}{P} = \frac{f + \frac{1}{2}}{N} \quad (2.17)$$

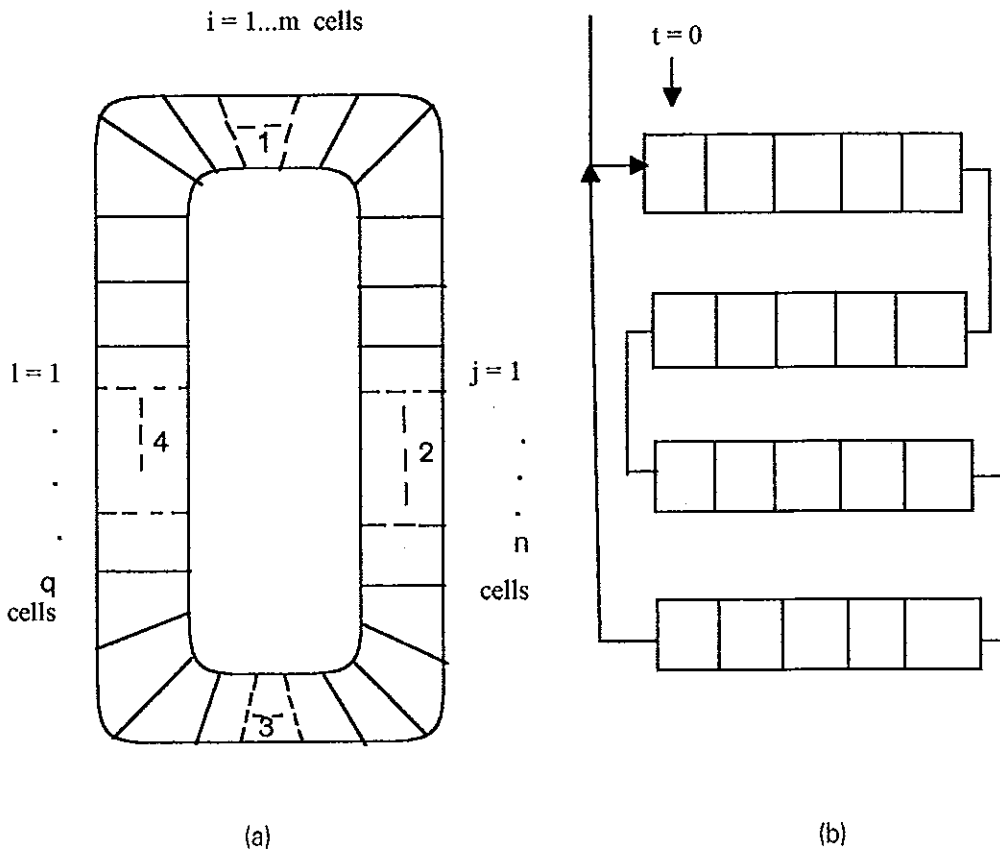
ซึ่งเหมือนกับที่ Mecklenburgh and Hartland (1975) แสดงไว้

พารามิเตอร์  $f$  และ  $N$  แสดงถึง การผสมอันเนื่องมาจาก การไหลกลับ และ การผสมภายในสเตรตามลำดับ เป็นเรื่องยากในการวัดขนาดของ  $f$  และ  $f$  มักมีค่าน้อยในแต่ละหน่วยสเตรจ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้แบบจำลองนี้ในการประมาณกระบวนการแบบต่อเนื่อง มักจะให้  $f$  เป็นค่าคงที่อยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 เนื่องผลกระทบของ  $f$  สามารถจัดให้อยู่ใน  $N$  และเพื่อทำให้ปัญหาง่ายขึ้น เรามักละ  $f$  ทิ้ง ( $f = 0$ ) ซึ่งจะไม่ลดประโยชน์ของแบบจำลอง เพราะผลกระทบของ  $N$  จะถูกปรับเปลี่ยนไปด้วย ในกรณีนี้

$$P = 2N \quad (2.18)$$



ง. แบบจำลอง network-of-zone ที่มีการวน (Circulating network-of-zone model)



ภาพประกอบ 2.4 แบบจำลอง network-of zone ที่มีการวน

วิธีที่ง่ายที่สุดของการวิเคราะห์แบบจำลอง network-of-zone ที่มีการวน คือ พิจารณาแบ่งถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกออกเป็น 4 โซน จากนั้นกำหนดภาวะขอบเขตบนทุก ๆ เซลล์ ในทุก ๆ โซน

โซน 1                      gas separation zone                      ;  $i = 1, 2, 3 \dots m$

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = Q(c_{i-1} - c_i) \tag{2.19}$$

$$\tau_i \frac{dc_i}{dt} = c_{i-1} - c_i \quad , \quad \tau_i = \frac{V_i}{Q}$$

ภาวะขอบเขตที่  $i = 1$  ,  $c_{i-1} = c_{l=q} = c_q$

โซน 2                      downcomer zone                      ; j = 1,2,3...n

$$\tau_j \frac{dc_j}{dt} = c_{j-1} - c_j \quad , \quad \tau_j = \frac{V_j}{Q} \quad (2.20)$$

ภาวะขอบเขตที่

$$j = 1 \quad , \quad c_{j-1} = c_{i=m} = c_m$$

โซน 3

base zone                      ; k = 1,2,3...p

$$\tau_k \frac{dc_k}{dt} = c_{k-1} - c_k \quad , \quad \tau_k = \frac{V_k}{Q} \quad (2.21)$$

ภาวะขอบเขตที่

$$k = 1 \quad , \quad c_{k-1} = c_{j=n} = c_n$$

โซน 4

riser zone                      ; l = 1,2,3...q

$$\tau_l \frac{dc_l}{dt} = c_{l-1} - c_l \quad , \quad \tau_l = \frac{V_l}{Q} \quad (2.22)$$

ภาวะขอบเขตที่

$$q=1 \quad , \quad c_{q-1} = c_{k=p} = c_p$$

ภาวะเริ่มต้นที่

$$t = 0 \quad c_{i=1} = c_0$$

$$c_i = 0 \quad , \quad i = 2, 3, 4...m$$

$$c_j = 0 \quad , \quad j = 1, 2, 3, 4...n$$

$$c_k = 0 \quad , \quad k = 1, 2, 3, 4...p$$

$$c_l = 0 \quad , \quad l = 1, 2, 3, 4...q$$

โดยที่  $c_0$  คือความเข้มข้นในแต่ละเซลล์ของโซนต่าง ๆ

## 2. ผลเฉลยของแบบจำลอง network-of-zone

### 2.1 ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution)

เราสามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของแบบจำลอง network-of-zone (สมการ 2.19 ถึง 2.22) ได้หลายวิธี อย่างไรก็ตามในที่นี้เราเสนอวิธีหาผลเฉลยโดยวิธีลาปลาซทรานสฟอร์ม (Laplace transform) และ หลักการทับซ้อน (principle of superposition)

เพื่อให้ปัญหาง่ายขึ้น เราจะพิจารณานุกรมของโครงข่าย เป็น 4 โซน ต่อกัน ดังในภาพประกอบ 2.4 b และสมการ (2.19) ถึง (2.22) ใช้ Laplace transform โดยสมมติว่า ที่  $t < 0$  ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ ในทุก ๆ เซลล์ เป็น ศูนย์

ในรูปลาปลาซพารามิเตอร์

โซน 1

$$\frac{c_i(s)}{c_{i-1}(s)} = \frac{1}{\tau_i s + 1}, \quad i = 1, 2, 3 \dots m$$

โซน 2

$$\frac{c_j(s)}{c_{j-1}(s)} = \frac{1}{\tau_j s + 1}, \quad j = 1, 2, 3 \dots n$$

โซน 3

$$\frac{c_k(s)}{c_{k-1}(s)} = \frac{1}{\tau_k(s) + 1}, \quad k = 1, 2, 3 \dots p$$

โซน 4

$$\frac{c_l(s)}{c_{l-1}(s)} = \frac{1}{\tau_l(s) + 1}, \quad l = 1, 2, 3 \dots q$$

กำหนดให้  $C_{i=0} = C_0$  คือ ที่ทางเข้า  
 $C_q$  คือ ที่ทางออก

ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) ที่ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ทางออก กับ ที่ทางเข้า เป็นดังนี้

(สมมติให้ปริมาตรเซลล์ในแต่ละโซนมีขนาดเท่ากัน)

$$\frac{c_q(s)}{c_0(s)} = \frac{1}{(\tau_i s + 1)^m (\tau_j s + 1)^n (\tau_k s + 1)^p (\tau_l s + 1)^q}$$

กรณีที่ 1      แบบจำลอง 2 โซน (2-zone model)

ถ้าเราสมมติว่า ขนาดของเซลล์ในโซน 2, 3 และ 4 มีขนาดเท่ากันดังนั้น

$$\frac{c_q(s)}{c_0(s)} = \frac{\tau_i^M \tau_j^N}{\tau_i^M (\tau_i s + 1)^M (\tau_j s + 1)^N \tau_j^M} \quad , \quad N=n+p+q, M=m$$

$$= \left( \frac{1}{\tau_i^M \tau_j^N} \right) \left( \frac{1}{(s + \alpha_i)^M (s + \alpha_j)^N} \right) \quad , \quad \alpha_i = \frac{1}{\tau_i}$$

$$= \alpha_i^M \alpha_j^N \left( \frac{1}{(s + \alpha_i)^M (s + \alpha_j)^N} \right) \quad , \quad \alpha_j = \frac{1}{\tau_j}$$

$$\frac{c_q(s)}{c_0(s)} = \alpha_i^M \alpha_j^N F(s) \quad , \quad F(s) = \frac{1}{(s + \alpha_i)^M (s + \alpha_j)^N}$$

ตามหลักการของ partial fraction (principle of partial fraction) จะได้ว่า

$$F(s) = \frac{A_1}{s + \alpha_i} + \frac{A_2}{(s + \alpha_i)^2} + \frac{A_3}{(s + \alpha_i)^3} + \dots + \frac{A_M}{(s + \alpha_i)^M} + \frac{B_1}{s + \alpha_j} + \frac{B_2}{(s + \alpha_j)^2} + \frac{B_3}{(s + \alpha_j)^3} + \dots + \frac{B_N}{(s + \alpha_j)^N}$$

$$A_M = [(s + \alpha_i)^M F(s)]_{s=-\alpha_i}$$

$$A_{M-1} = \frac{d}{ds} [(s + \alpha_i)^M F(s)]_{s=-\alpha_i}$$

$$A_{M-2} = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{ds^2} [(s + \alpha_i)^M F(s)]_{s=-\alpha_i}$$

$$A_1 = \frac{1}{(M-1)!} \frac{d^{M-1}}{ds^{M-1}} [(s + \alpha_i)^M F(s)]_{s=-\alpha_i}$$

$$A_M = (s + \alpha_j)^{-N} \Big|_{s=-\alpha_i} = (\alpha_j - \alpha_i)^{-N}$$

$$A_{M-1} = -N(s + \alpha_j)^{-N-1} \Big|_{s=-\alpha_i} = (-N)(\alpha_j - \alpha_i)^{-N-1}$$

$$A_{M-2} = \frac{1}{2!}(-N)(-N-1)(s + \alpha_j)^{-N-2} \Big|_{s=-\alpha_i}$$

$$= \frac{1}{2!}(-N)(-N-1)(\alpha_j - \alpha_i)^{-N-2}$$

$$A_{M-3} = \frac{1}{3!}(-N)(-N-1)(-N-2)(s + \alpha_j)^{-N-3} \Big|_{s=-\alpha_i}$$

$$= \frac{1}{3!}(-N)(-N-1)(-N-2)(\alpha_j - \alpha_i)^{-N-3}$$

$$A_1 = \frac{1}{(M-1)!}(-N)(-N-1)(-N-2)\dots(-N-(M-2))(s + \alpha_j)^{-N-(M-1)} \Big|_{s=-\alpha_i}$$

ซึ่งสรุปได้ว่า

$$A_{M-r} = \frac{(-1)^r (N+r-1)!}{r! (N-1)!} (\alpha_j - \alpha_i)^{-(N+r)} \quad , \quad r = 1, 2, \dots, M$$

เช่นเดียวกัน

$$B_s = \frac{(-1)^s (M+s-1)!}{s! (M-1)!} (\alpha_i - \alpha_j)^{-(M+s)} \quad , \quad s = 1, 2, \dots, N$$

$$f(t) = e^{-\alpha_1 t} \sum_{r=1}^M \left[ \frac{(-1)^r (N+r-1)!}{r! (N-1)!} (\alpha_j - \alpha_i)^{-(N+r)} \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} \right]$$

$$+ e^{-\alpha_2 t} \sum_{s=1}^N \left[ \frac{(-1)^s (M+s-1)!}{s! (M-1)!} (\alpha_i - \alpha_j)^{-(M+s)} \frac{t^{s-1}}{(s-1)!} \right]$$

หรือ

$$c_q(t) = \alpha_i^M \alpha_j^N \left\{ e^{-\alpha_1 t} \sum_{r=1}^M \left[ \frac{(-1)^r (N+r-1)!}{r! (N-1)!} (\alpha_j - \alpha_i)^{-(N+r)} \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} \right] \right. \\ \left. + e^{-\alpha_2 t} \sum_{s=1}^N \left[ \frac{(-1)^s (M+s-1)!}{s! (M-1)!} (\alpha_i - \alpha_j)^{-(M+s)} \frac{t^{s-1}}{(s-1)!} \right] \right\}$$

เมื่อนำ superposition principle มาประยุกต์ใช้ เราได้ผลเฉลยสำหรับการวนลูปแบบปิด (closed-loop circulation)

$$C_q(t) = \alpha_i^M \alpha_j^N \left\{ e^{-\alpha_1 t} \sum_{\varpi=1}^{\infty} \sum_{r=1}^M \left[ \frac{(-1)^r (\varpi N+r-1)!}{r! (\varpi N-1)!} (\alpha_j - \alpha_i)^{-(\varpi N+r)} \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} \right] \right. \\ \left. + e^{-\alpha_2 t} \sum_{\varpi=1}^{\infty} \sum_{s=1}^N \left[ \frac{(-1)^s (\varpi M+s-1)!}{s! (\varpi M-1)!} (\alpha_i - \alpha_j)^{-(\varpi M+s)} \frac{t^{s-1}}{(s-1)!} \right] \right\}$$

ทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายยิ่งขึ้น

$$C_q(t) = \alpha_i^M \alpha_j^N \left\{ e^{-\alpha_1 t} \sum_{\varpi=1}^{\infty} \sum_{r=1}^M \left[ \binom{\varpi N+r-1}{r} (\alpha_j - \alpha_i)^{-(\varpi N+r)} \frac{t^{r-1}}{(r-1)!} \right] \right. \\ \left. + e^{-\alpha_2 t} \sum_{\varpi=1}^{\infty} \sum_{s=1}^N \left[ \binom{\varpi M+s-1}{s} (\alpha_i - \alpha_j)^{-(\varpi M+s)} \frac{t^{s-1}}{(s-1)!} \right] \right\} \quad (2.23)$$

ผลเฉลยในสมการ (2.23) สามารถนำไปใช้ในการศึกษาการตอบสนองของเทรซเซอร์ในกรณีที่มีแค่เพียง 2 โชนได้

## 2.2 ผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical methods)

สมการ (2.19) ถึง (2.22) สามารถหาผลเฉลยเชิงเลขได้โดยใช้ตัวอินทิเกรตมาตรฐาน เช่น Runge Kutta , Multistep method ซึ่งให้ผลของการซิมูเลตดังนี้

### ผลการวิเคราะห์การซิมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone

ก. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง network-of-zone กับ แบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990)

เมื่อซิมิวเลตโดยใช้แบบจำลอง network-of-zone ที่กำหนดให้มีจำนวนเซลล์ใน gas separation zone เป็น 1 และค่อย ๆ เพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนที่เหลือ (โดยที่  $N_2 = N_3 = N_4 =$  จำนวนเซลล์ในแต่ละโซน) พบว่า เมื่อจำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างเพิ่มมากขึ้น ลักษณะของ tracer response curve ที่ได้จะใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990) ดังในภาพประกอบ 2.5 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่ม N ในโซนส่วนล่างมากขึ้น ลักษณะการผสมในโซนส่วนล่างจะเข้าใกล้ plug flow มากขึ้น โดยที่ลักษณะการผสมใน gas separation zone เป็น perfect mixing ( $N = 1$ ) ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990)

แต่ในการซิมิวเลตโดยใช้แบบจำลอง network-of-zone ของเรานั้นมีข้อจำกัดตรงที่ไม่สามารถเพิ่มจำนวนเซลล์ให้มากเกินไปได้ ทั้งนี้เป็นเพราะข้อจำกัดของโปรแกรมในการซิมิวเลชัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลอง network-of-zone ที่เราพัฒนาขึ้นนั้นสามารถใช้ได้กว้างขวางกว่าแบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990) เพราะ แบบจำลองของ Merchuk and Yungler (1990) เป็นเพียงกรณีหนึ่งของ แบบจำลอง network-of-zone ที่เราพัฒนาขึ้น

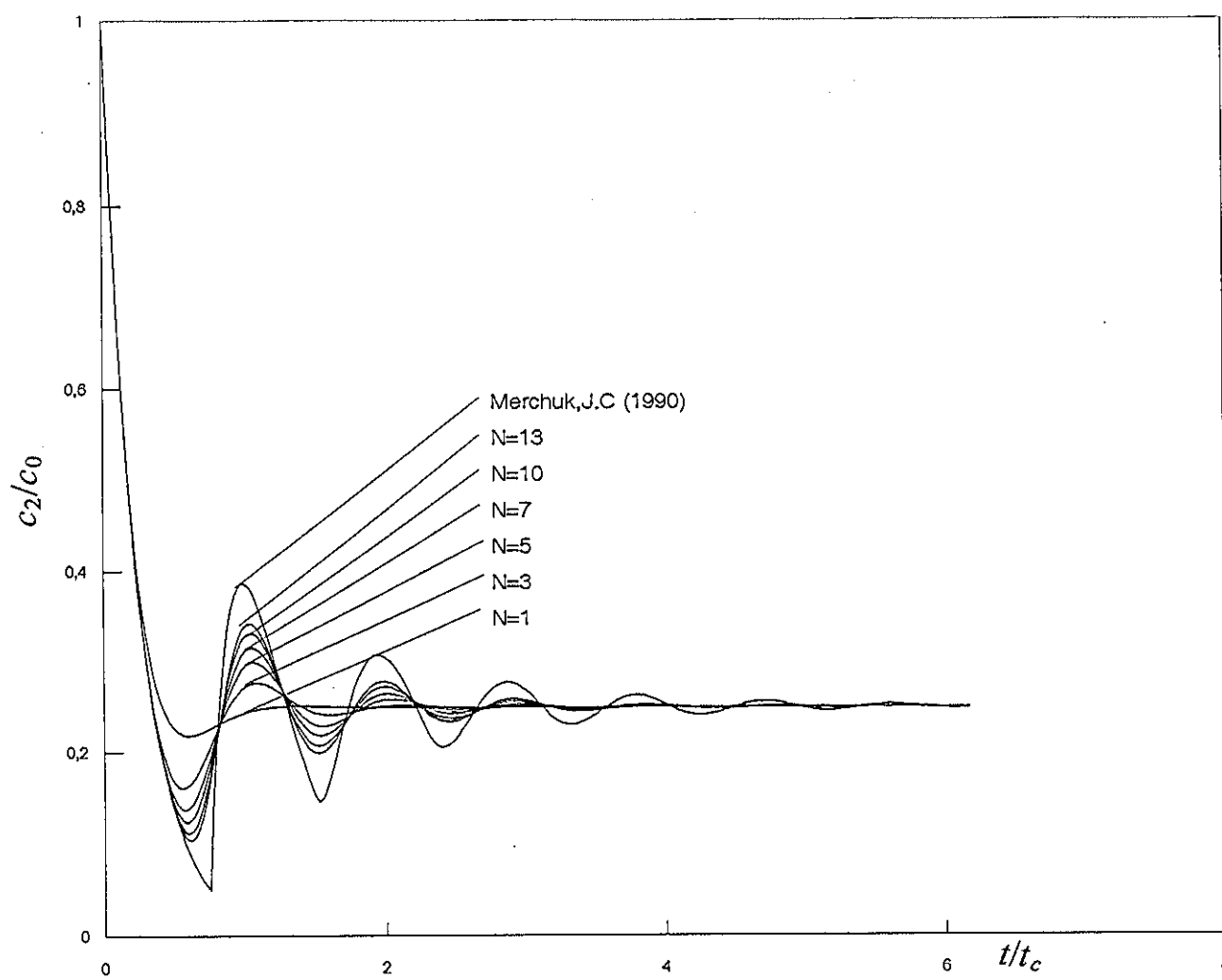
ข. ผลของเซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ (largest well-mixed cell)

แบ่งการพิจารณาเป็น 4 กรณี

กรณีที่ 1 กำหนดให้แต่ละเซลล์มีการผสมดีเท่ากันหมดทุก ๆ เซลล์ (uniform backmixing) จากการซิมิวเลต พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์รวม ( $N_{\text{รวม}}$ ) มากขึ้น (4, 8, 10, 20 และ 40) พบว่าอัตราการลดลงของพีคช้าลง นั่นคือ เส้นกราฟที่  $N_{\text{รวม}}$  มีค่าสูง จะเข้าสู่ค่าคงที่ได้ช้ากว่า ดังภาพประกอบ 2.6 ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อ  $N_{\text{รวม}}$  สูงขึ้น ลักษณะการผสมจะเข้าใกล้ plug flow มากขึ้น จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้นเพื่อที่จะให้เส้นกราฟเข้าสู่ค่าคงที่สุดท้าย จากการทดลองทำซิมิวเลชัน ได้ข้อสรุปในกรณีที่ 1 ดังนี้ คือ

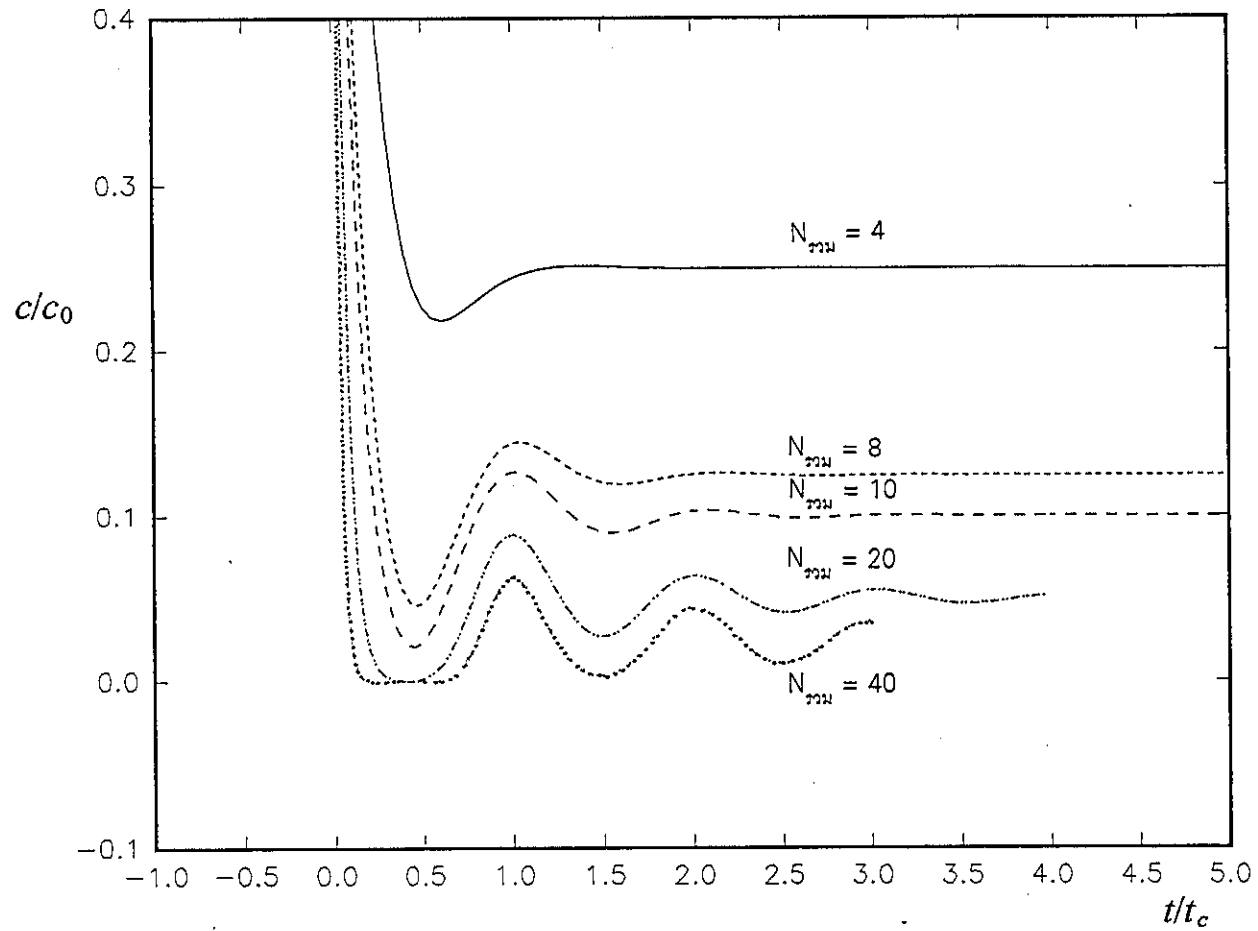
1 เมื่อจำนวนเซลล์รวม ( $N_{\text{รวม}}$ ) มากขึ้น ซึ่งก็คือ P มากขึ้น (เพราะ  $P = 2N$ ) อัตราการลดลงของพีค ช้าลง

2 ปริมาตรสัมพัทธ์ของแต่ละโซนไม่มีผลต่อการผสม



ภาพประกอบ 2.5 การเปรียบเทียบผลการขีมิวเลตแบบจำลอง network-of-zone กับ แบบจำลองของ Merchuk et al.(1990) เมื่อ  $N_1=1$  และเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนที่เหลือ ( $N=N_2=N_3=N_4$ ) มากขึ้น





ภาพประกอบ 2.6 การขีมิวเลตแสดงผลของ largest well-mixed cell กรณีที่ 1 เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์รวม ( $N_{wm}$  มากขึ้น)

3 มีหลักฐานอีกทางจาก O. Levenspiel (p.294-295, 1972) ที่กำหนดให้แต่ละเซลล์มีการผสมดีเท่ากันหมดทุกเซลล์ ซึ่งให้ผลที่ได้สอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองดังกล่าวจึงเป็นกรณีหนึ่งของแบบจำลอง network-of-zone นั่นคือ แบบจำลอง network-of-zone ของเรานั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางกว่า

กรณีที่ 2 กำหนดให้เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีปริมาตรเป็น  $1/2$  เท่าของปริมาตรทั้งหมด ได้ tracer response curve ดังภาพประกอบ 2.7

กรณีที่ 3 กำหนดให้เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีปริมาตรเป็น  $1/3$  เท่าของปริมาตรทั้งหมด ได้ tracer response curve ดังภาพประกอบ 2.8

กรณีที่ 4 กำหนดให้เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีปริมาตรเป็น  $1/5$  เท่าของปริมาตรทั้งหมด ได้ tracer response curve ดังภาพประกอบ 2.9

จากกราฟในภาพประกอบ 2.7, 2.8 และ 2.9 ถ้ากำหนดให้ largest well-mixed cell คือ gas separation zone ซึ่งจะทำให้แบบจำลอง network-of-zone นั้นใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Merchuk and Yunger (1990) แต่แบบจำลอง network-of-zone นั้น ยังยอมให้มี backmixing เกิดขึ้นได้ในโซนส่วนล่าง ในขณะที่ แบบจำลองของ Merchuk and Yunger (1990) กำหนดให้โซนส่วนล่างนั้นมีการผสมแบบ plug flow

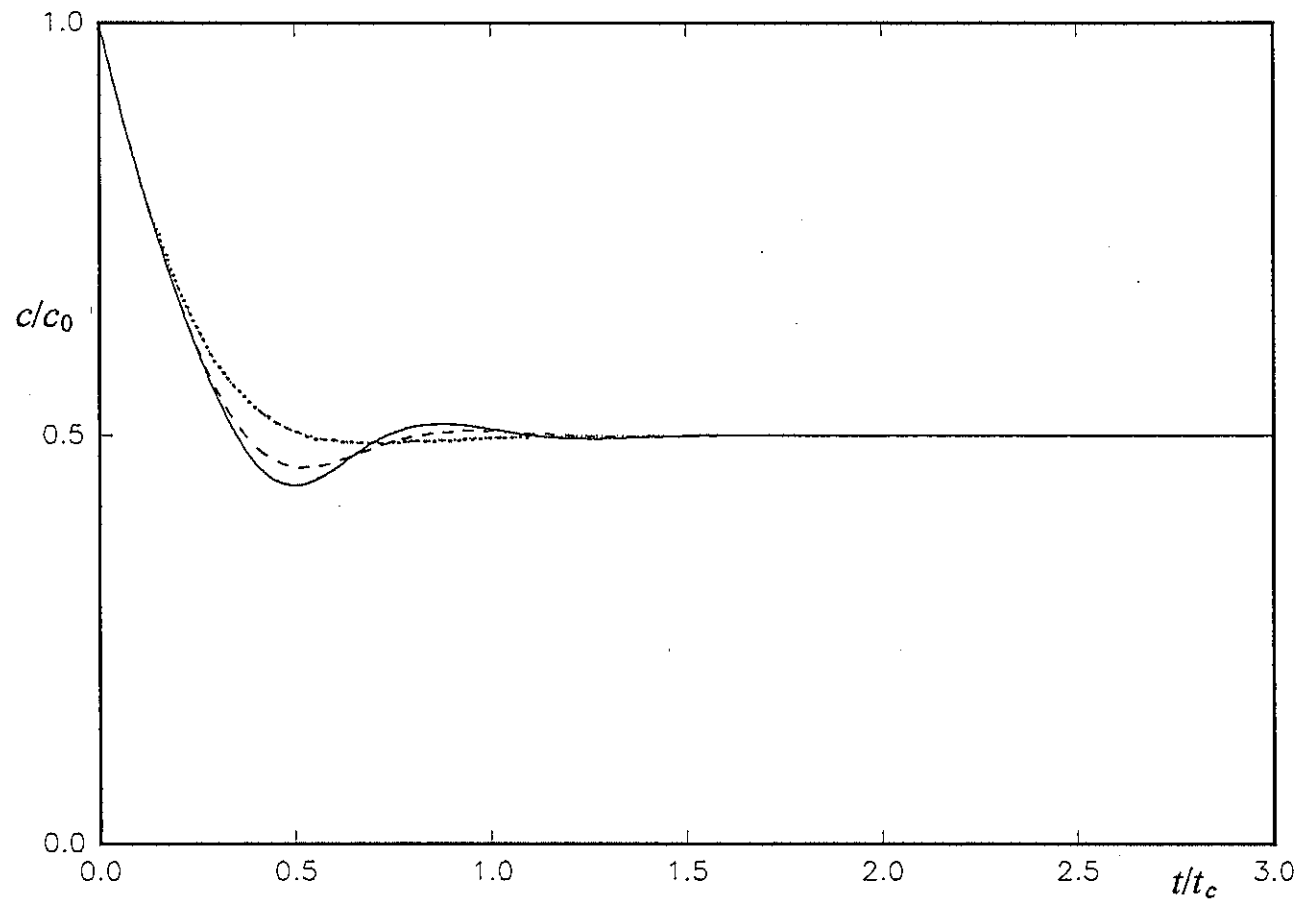
จากกราฟ พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์ในโซนส่วนล่างมากขึ้น นั่นคือ เพิ่มลักษณะการผสมให้เป็น plug flow มากขึ้น พบว่า tracer response curve ที่ได้จะใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลองของ Merchuk and Yunger (1990) มากขึ้น จึงเป็นการยืนยันอีกครั้งหนึ่งว่า แบบจำลอง network-of-zone ของเรานั้นใช้งานได้ในช่วงกว้างกว่า

ค. ผลของ  $S$  (อัตราส่วนของเวลาเรซีเดนซ์ในโซนที่ 1 riser และ downcomer zone ต่อเวลาเรซีเดนซ์ในโซนที่ 2 gas separation zone ตามแบบจำลองของ Merchuk and Yunger, 1990)

ผลการシมิวเลตตามกรณีที่ 2, 3 และ 4 ในข้อ ข. เมื่อพิจารณาผลของ  $S$  โดยกำหนดให้เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ คือ gas separation zone นั้น พบว่า

1. เมื่อ  $S$  มีค่ามากขึ้น ( $S = 1$ ,  $S = 2$  และ  $S = 4$  ตามภาพประกอบ 2.7, 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ) นั้น อัตราการลดลงของพีค ซ้ำลง

2. เมื่อศึกษาความสำคัญเชิงเปรียบเทียบ (relative importance) ของปริมาตรเซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ นั่นคือ ศึกษาว่า ปริมาตรของบริเวณที่มี degree of mixing สูง ซึ่งจะมีค่า dispersion coefficient สูงด้วยนั้น จะมีผลต่อ tracer response curve อย่างไร

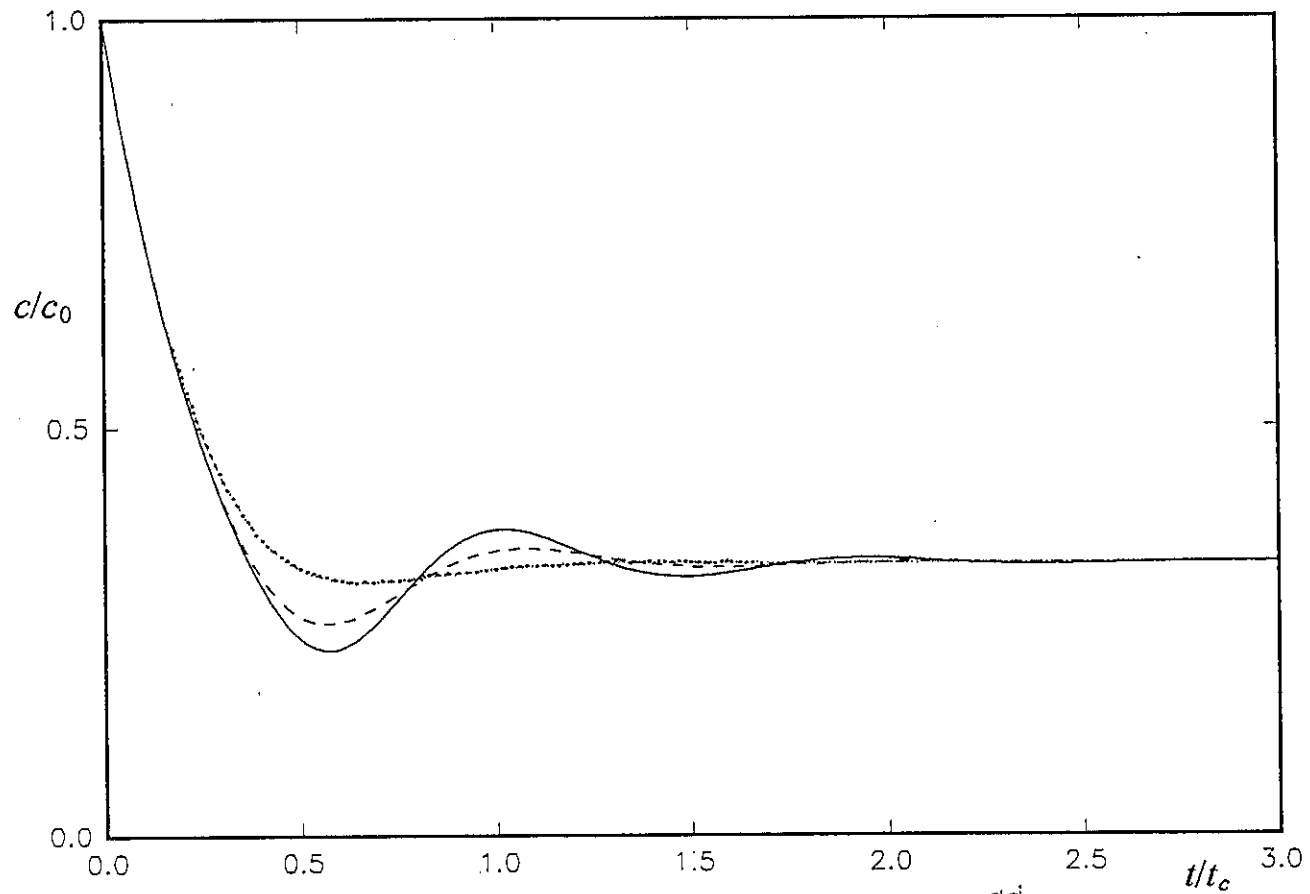


ภาพประกอบ 2.7 การขีมิวเลตแสดงผลของ Largest well-mixed cell กรณีที่ 2 ; S=1

โดย .....  $N_1=N_2=N_3=N_4=1$

-----  $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$

—————  $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$

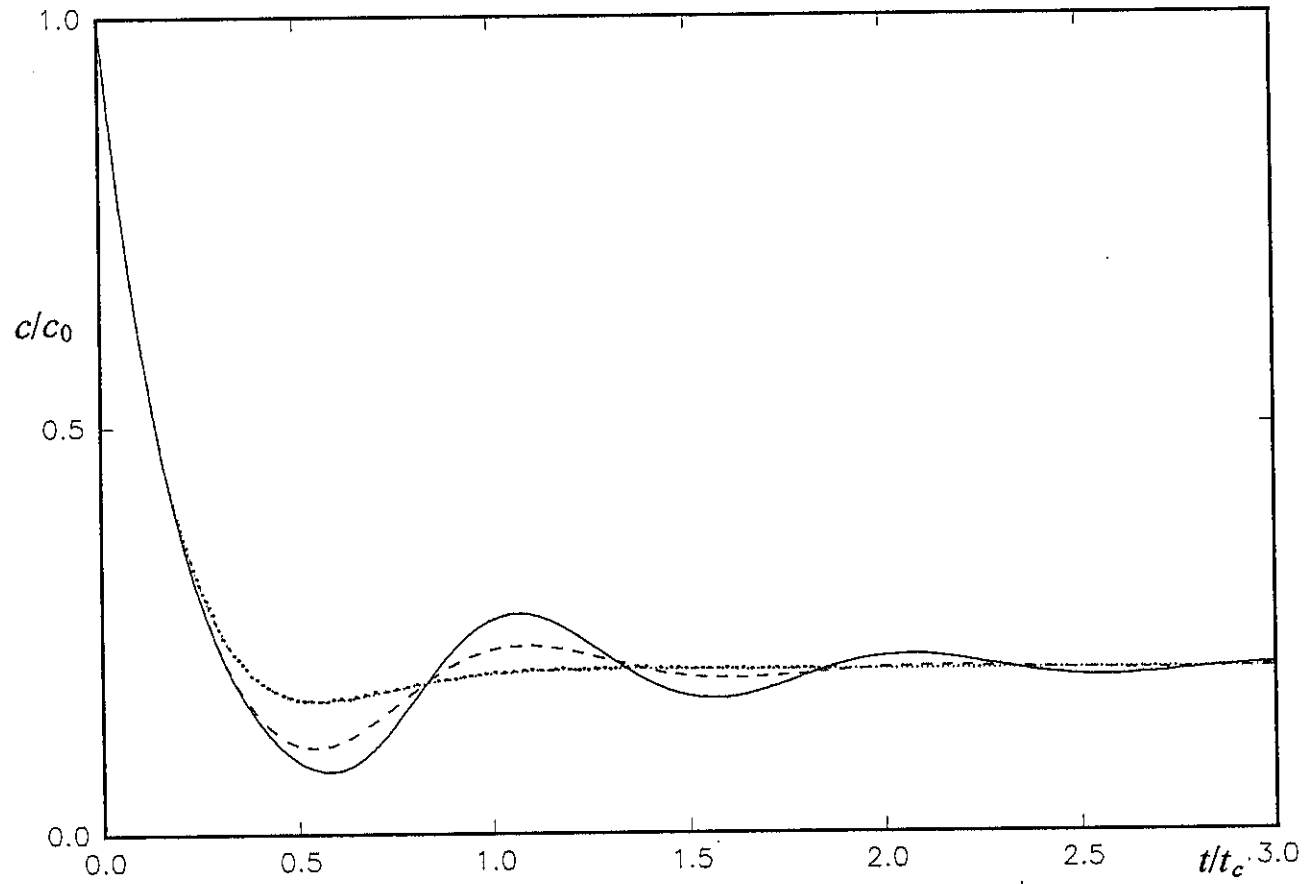


ภาพประกอบ 2.8 การขมิมวลแสดงผลของ Largest well-mixed cell กรณีที่ 3 ; S=2

โดย .....  $N_1=N_2=N_3=N_4=1$

-----  $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$

————  $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$



ภาพประกอบ 2.9 การซิมูเลตแสดงผลของ Largest well-mixed cell กรณีที่ 3 ; S=4

โดย .....  $N_1=N_2=N_3=N_4=1$ .

-----  $N_1=1 ; N_2=N_3=N_4=3$

—————  $N_1=1 ; N_2=7 ; N_3=N_4=6$

ผลจากการชิมิวเลตพบว่า เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีผลต่อ tracer response curve คือ ถ้าปริมาตรของเซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมด จะมีอิทธิพลทำให้ tracer response curve ที่ได้จากการชิมิวเลตมีลักษณะคล้ายหรือเทียบเท่ากับ tracer response curve ที่ได้จากเซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์นั้นเพียงเซลล์เดียว

ถ้าปริมาตรของเซลล์ที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ มีขนาดเล็กลง ก็จะมีอิทธิพล ต่อ tracer response curve น้อยลง

ถ้าปริมาตรของเซลล์ที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์มีขนาดเท่ากับกับปริมาตรของเซลล์อื่น ๆ ก็จะกลายเป็นกรณีที่ 1 ซึ่งทุก ๆ เซลล์ เป็น uniform mixing ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

3. เมื่อพิจารณาขนาดของเซลล์เทียบกับ ค่า D พบว่า ถ้าเซลล์มีปริมาตรมากจะมีค่า D มาก เนื่องจาก

$$P = \frac{uL}{D} = \frac{\nabla Q}{D}$$

$$D = \frac{\nabla Q}{P} = \frac{\nabla Q}{2N}$$

ถ้าคิด 1 เซลล์

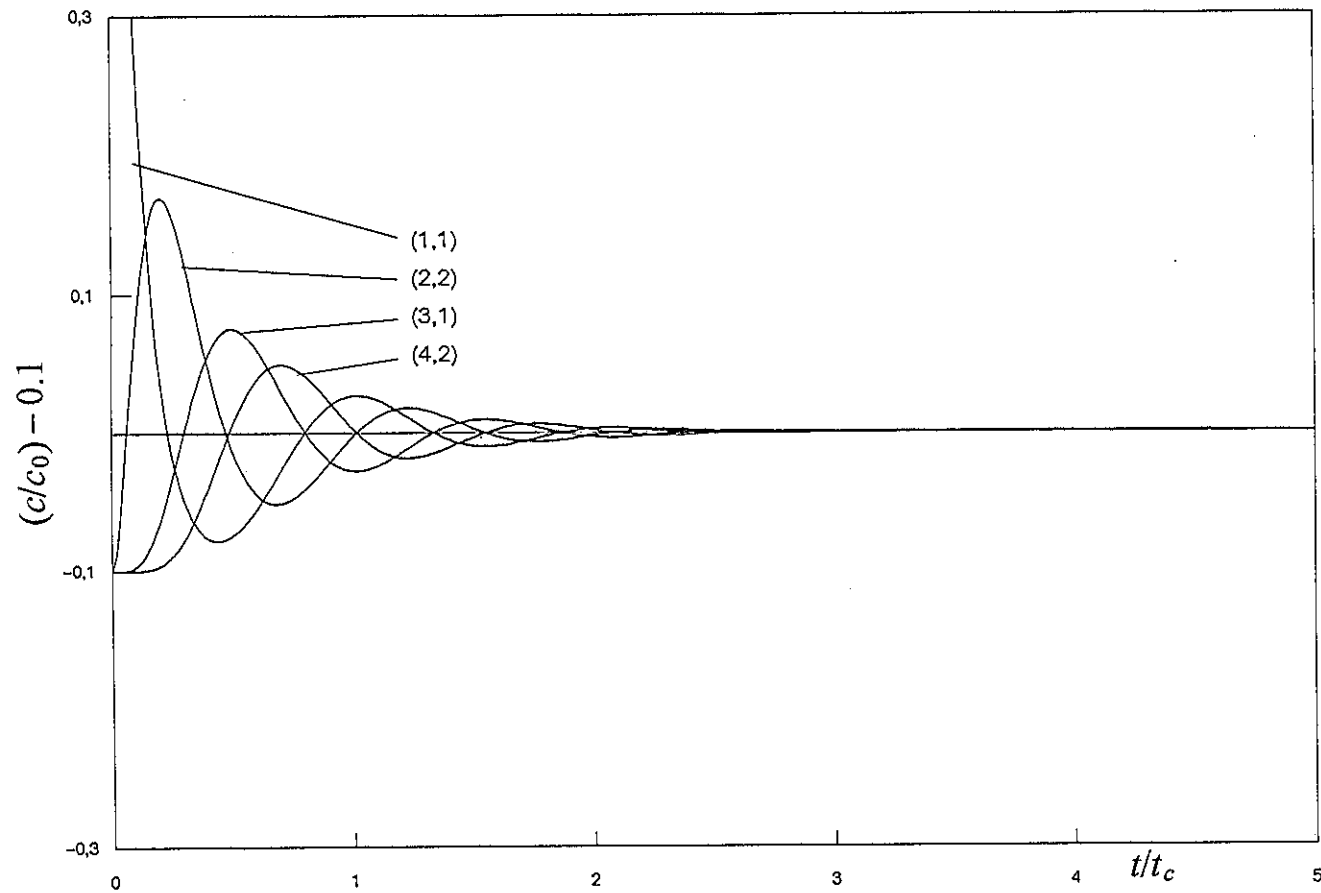
$$D = \frac{\nabla Q}{2}$$

จะเห็นว่า D แปรผันโดยตรงกับ  $\nabla$  ดังนั้นเซลล์ที่มีปริมาตรมาก จะมีค่า D มาก

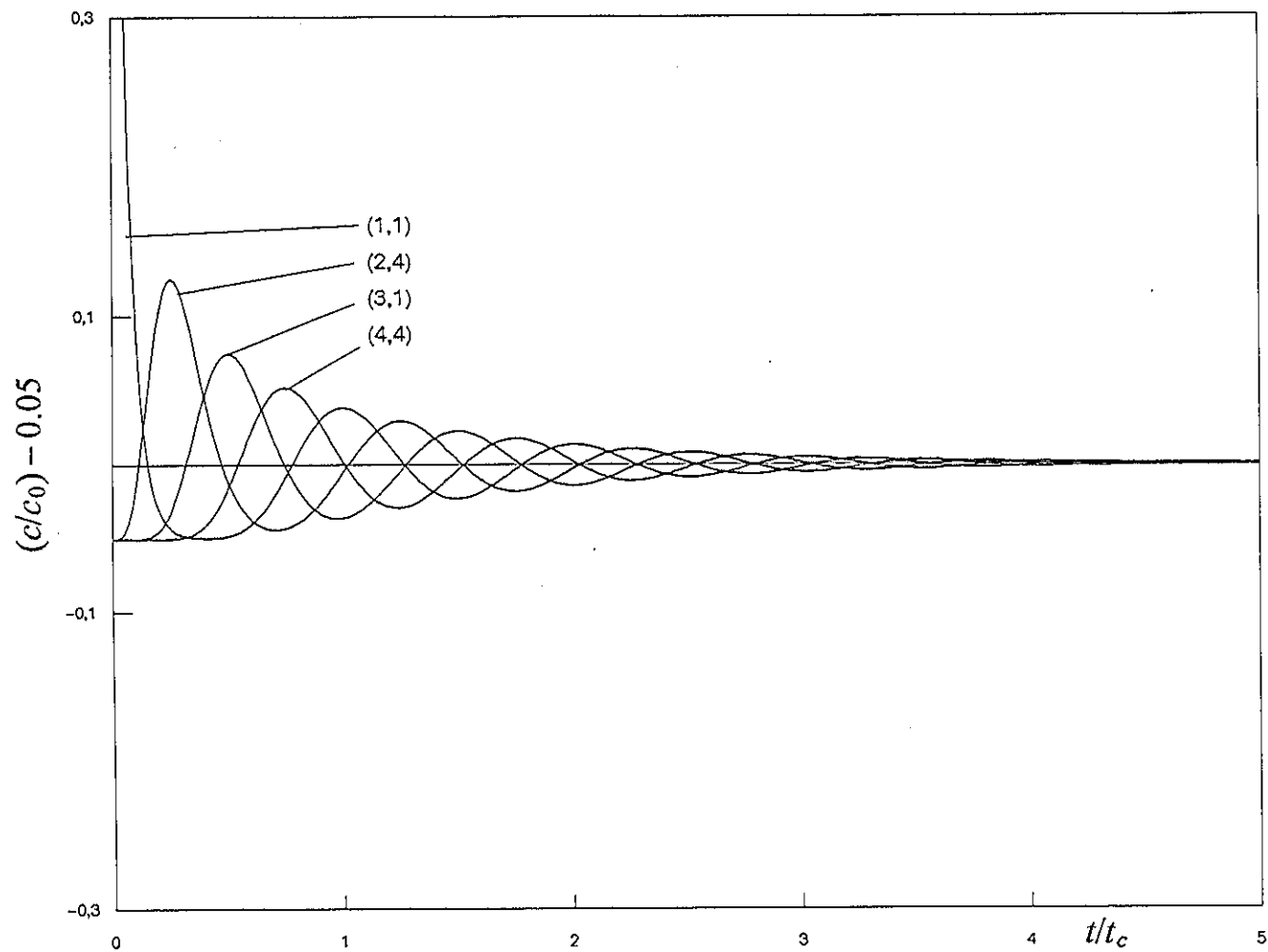
ง. ผลของ N

ผลการชิมิวเลตตามกรณีที่ 2, 3 และ 4 เมื่อพิจารณาผลของจำนวนเซลล์ในโซนส่วนอื่น ๆ (downcomer, base และ riser) โดยกำหนดให้เซลล์ที่ใหญ่ที่สุดที่มีการผสมอย่างสมบูรณ์ คือ gas separation zone นั้น พบว่า เมื่อจำนวนเซลล์ในโซนส่วนอื่น ๆ มากขึ้น (3, 9 และ 19 ตามลำดับ) ลักษณะการผสมในโซนเหล่านั้นก็จะเป็น plug flow มากขึ้น จึงต้องใช้เวลาในการผสมนานขึ้น อัตราการลดลงของพีคจึงช้าลง ตามภาพประกอบ 2.7, 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

ผลการชิมิวเลตตามกรณีที่สอดคล้องกับสัดส่วนปริมาตรจริงของแต่ละโซนในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้นใช้ในการวิจัย ( $V_1 : V_2 : V_3 : V_4$  มีค่าประมาณ 1 : 4 : 4 : 1) พบว่าเมื่อ S คงที่ ถ้าเพิ่มจำนวนเซลล์รวมมากขึ้น (จำนวนเซลล์รวมเป็น 10, 20 และ 40) จะทำให้ลักษณะการผสมเป็น plug flow มากขึ้น อัตราการลดลงของพีคจะช้าลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10, 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

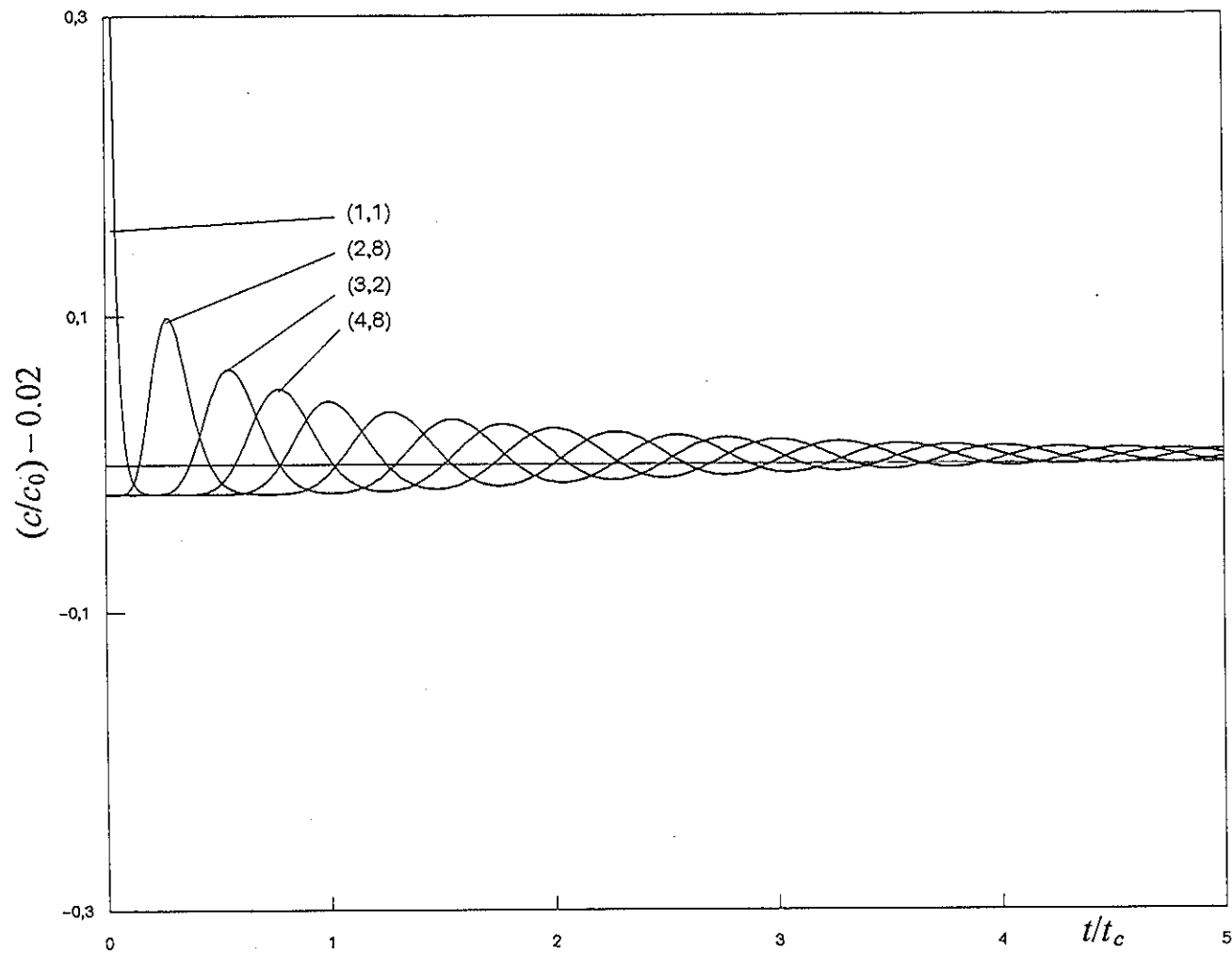


ภาพประกอบ 2.10 ผลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของปริมาตรสอดคล้องกับ  
 ในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$  และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 12 หน่วยปริมาตร  
 ทุกเซลล์),  $S=9$ ,  $N_{mix}=10$  และ สังเกตผลที่ (ไซน,เซลล์) ต่าง ๆ



ภาพประกอบ 2.11 ผลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของปริมาตรสอดคล้องกับ  
 ในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$  และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 6 หน่วยปริมาตร  
 ทุกเซลล์) ,  $S=9$  ,  $N_{รวม}=20$  และ สังเกตผลที่ (ไซน,เซลล์) ต่าง ๆ

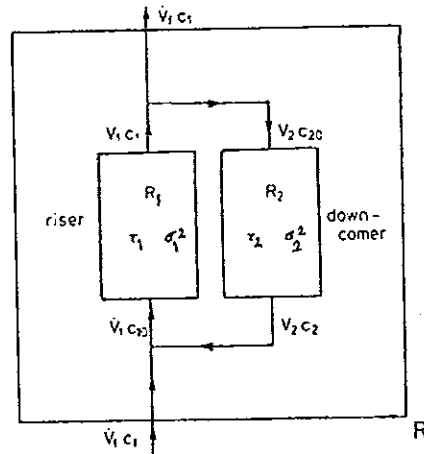




ภาพประกอบ 2.12 ผลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยมีสัดส่วนของปริมาตรสอดคล้องกับ  
 ในถังปฏิกรณ์จริง ( $V_1:V_2:V_3:V_4=1:4:1:4$  และ ขนาดของเซลล์เท่ากับ 3 หน่วยปริมาตร  
 ทุกเซลล์) ,  $S=9$  ,  $N_{max}=40$  และ สังเกตผลที่ (ไซน,เซลล์) ต่าง ๆ

### 3. การพัฒนาวิธีการประมาณพารามิเตอร์ (Development Method of Parameter Estimation)

Warnecke, et al., (1985) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับ ถังปฏิกรณ์แบบลูป (loop reactor) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 โซน ตามภาพประกอบ 2.13



ภาพประกอบ 2.13 กระบวนการไหลของถังปฏิกรณ์แบบลูป  
ที่มา : Warnecke, et al., (1985)

นักวิจัยกลุ่มนี้ได้พยายามที่จะนำผลเฉลยที่ได้มาใช้งาน ซึ่งในการที่จะนำมาใช้งานได้นั้น เขาต้องทำให้ได้วิธีการประมาณพารามิเตอร์ที่ง่าย เขาได้แสดงวิธีการให้เห็นว่า ผลเฉลยของเขาเหล่านั้นสามารถที่จะประมาณได้โดยสมการ

$$E(t) \approx a_0 e^{s_0 t} + 2p_1 e^{-x_1 t} \cos(y_1 t + \varphi_1) \quad , \quad t \rightarrow \infty$$

โดยที่  $E(t)$  คือการกระจายของเวลาเรซิเดนซ์ (residence time distribution) ในถังปฏิกรณ์แบบลูป  $a_0, s_0, p_1, x_1, y_1$  และ  $\varphi_1$  เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถหาได้จากการเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ทั้งนี้ แบบจำลองของเขานั้นคิดการวนกลับของก๊าซด้วย

เราได้ข้อสรุปว่าถ้าแบบจำลองของเขามี 2 โซน จะสามารถประมาณได้ด้วยเทอมที่เป็น exponential เพียง 1 เทอม (exponential เทอมแรกเป็นส่วนที่ได้จากการวนกลับของก๊าซ) แต่ในกรณีการวิจัยของเรา ถ้าคิดเป็น 3 โซน เราอาจจะประมาณได้ด้วยเทอมที่เป็น exponential 2

เทอม และถ้าคิดเป็น 4 โชน เราก็อาจจะประมาณได้ด้วยเทอมที่เป็น exponential 3 เทอม และจากผลเฉลยแบบจำลองที่เราเสนอไว้ก่อนหน้านี้ (สมการ (2.23)) ก็แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า มันมีเทอมที่เป็น exponential อยู่ 2 เทอม สำหรับ 2 โชน แต่ในกรณีถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยอกที่เราแบ่งออกเป็น 4 โชนนั้น ต้องการเทอมที่เป็น exponential 3 เทอม โดยประมาณ อีก 1 เทอมที่เหลือซึ่งมีค่าน้อยกว่าเทอมอื่นมากจึงละทิ้งไป

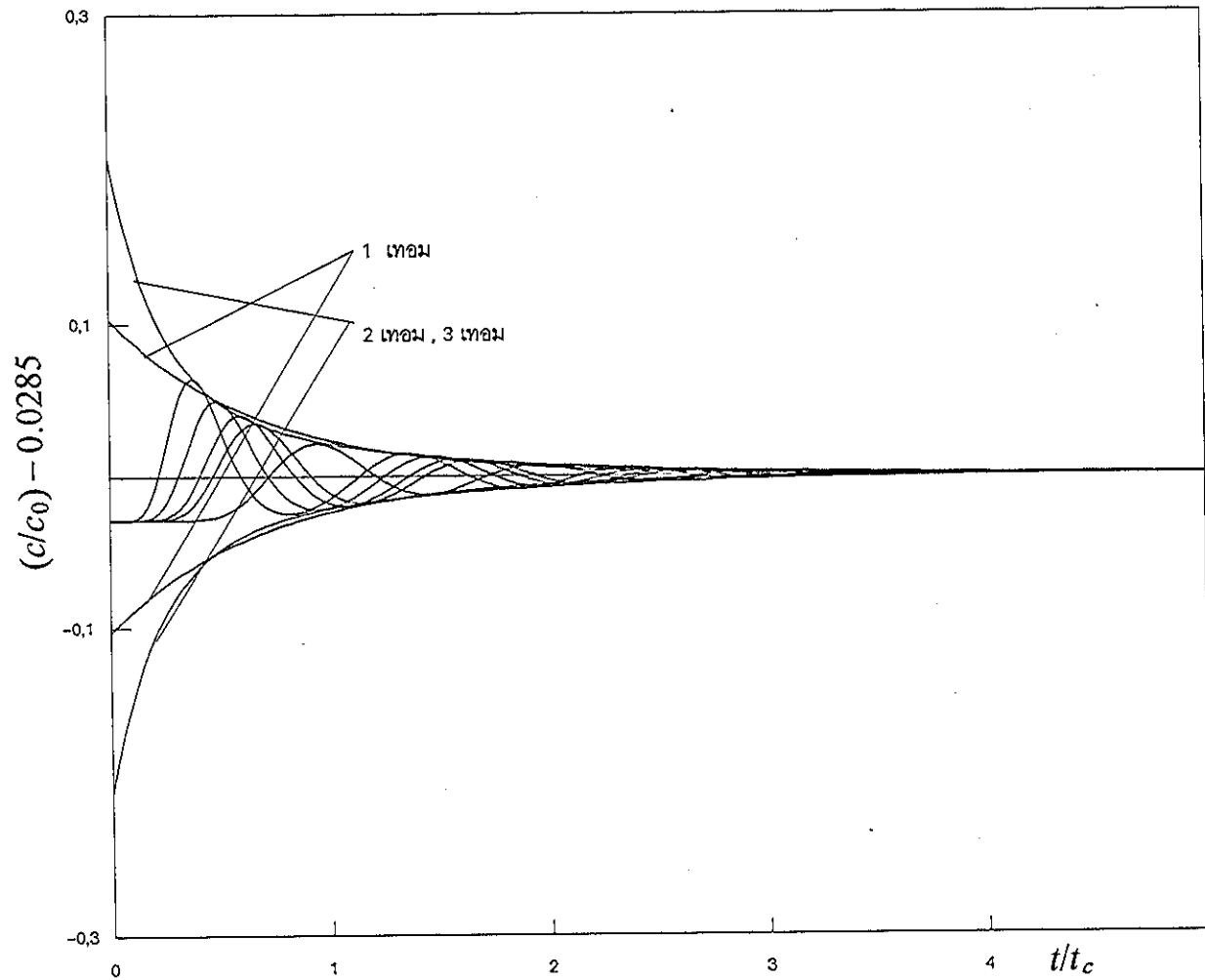
ดังนั้น การประมาณพหามิตเตอร์ที่น่าจะดีที่สุดสำหรับรูปแบบของเรา คือ มีเทอมที่เป็น exponential 1, 2 หรือ 3 เทอม ซึ่งแล้วแต่กรณีว่ามันสามารถเทียบกับข้อมูลจากการทดลองได้ดีหรือไม่ คุณอยู่กับเทอมที่เป็น  $\cos$  หรือ  $\sin$  ของ  $(\omega t + \phi)$

เมื่อนำข้อมูลจากการซิมูเลตในหลาย ๆ กรณี มาพิตเส้นกราฟที่ลากเชื่อมจุดพีคของข้อมูลด้วย

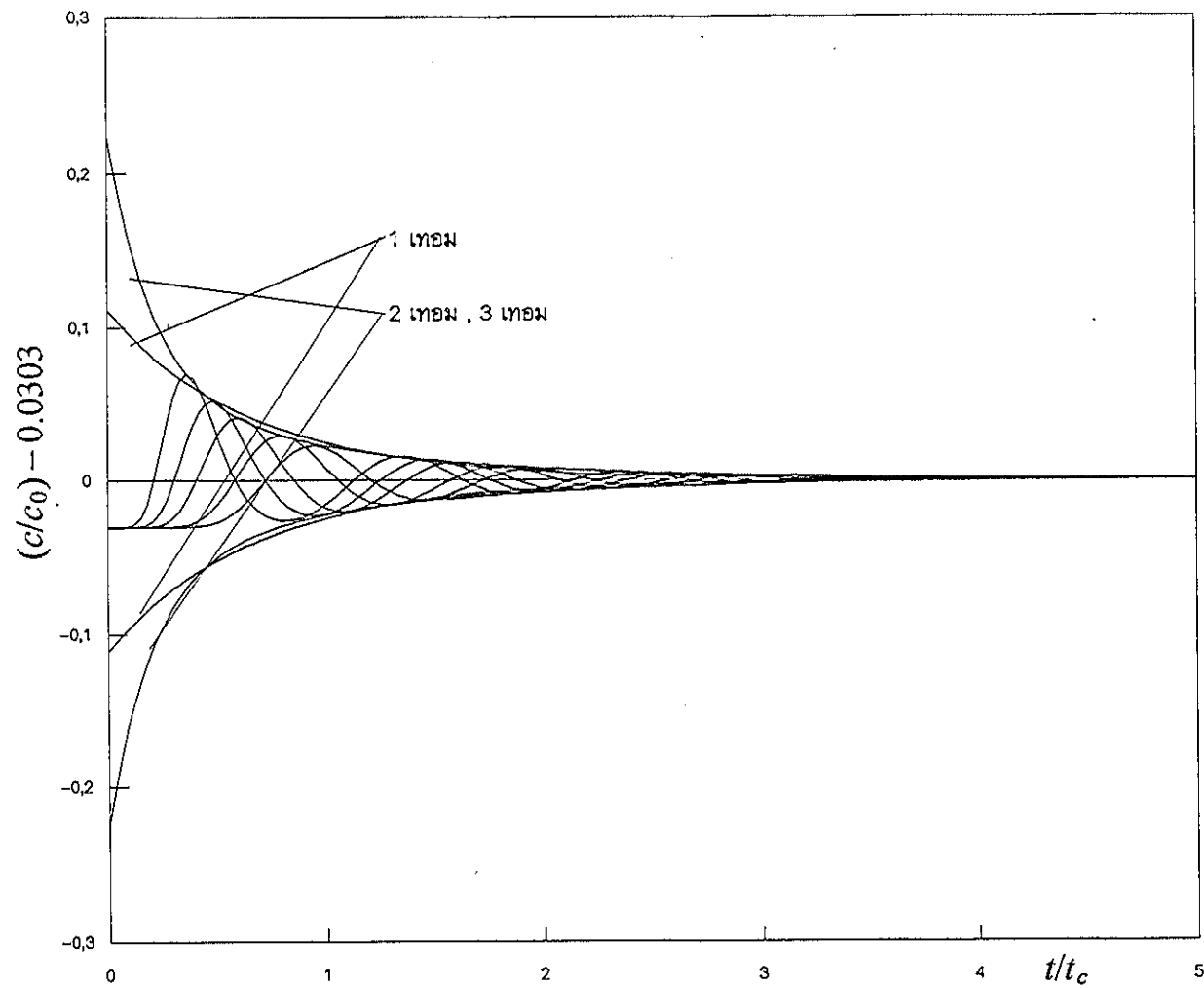
$$\begin{aligned} 1 \text{ เทอม : } & A_1 e^{-\alpha_1 \frac{t}{t_c}} \\ 2 \text{ เทอม : } & A_1 e^{-\alpha_1 \frac{t}{t_c}} + A_2 e^{-\alpha_2 \frac{t}{t_c}} \\ 3 \text{ เทอม : } & A_1 e^{-\alpha_1 \frac{t}{t_c}} + A_2 e^{-\alpha_2 \frac{t}{t_c}} + A_3 e^{-\alpha_3 \frac{t}{t_c}} \end{aligned}$$

ได้ผลตามภาพประกอบ 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 และ 2.18 ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm$  ร้อยละ 5 เมื่อพิตด้วยเทอมที่เป็น exponential 2 เทอม

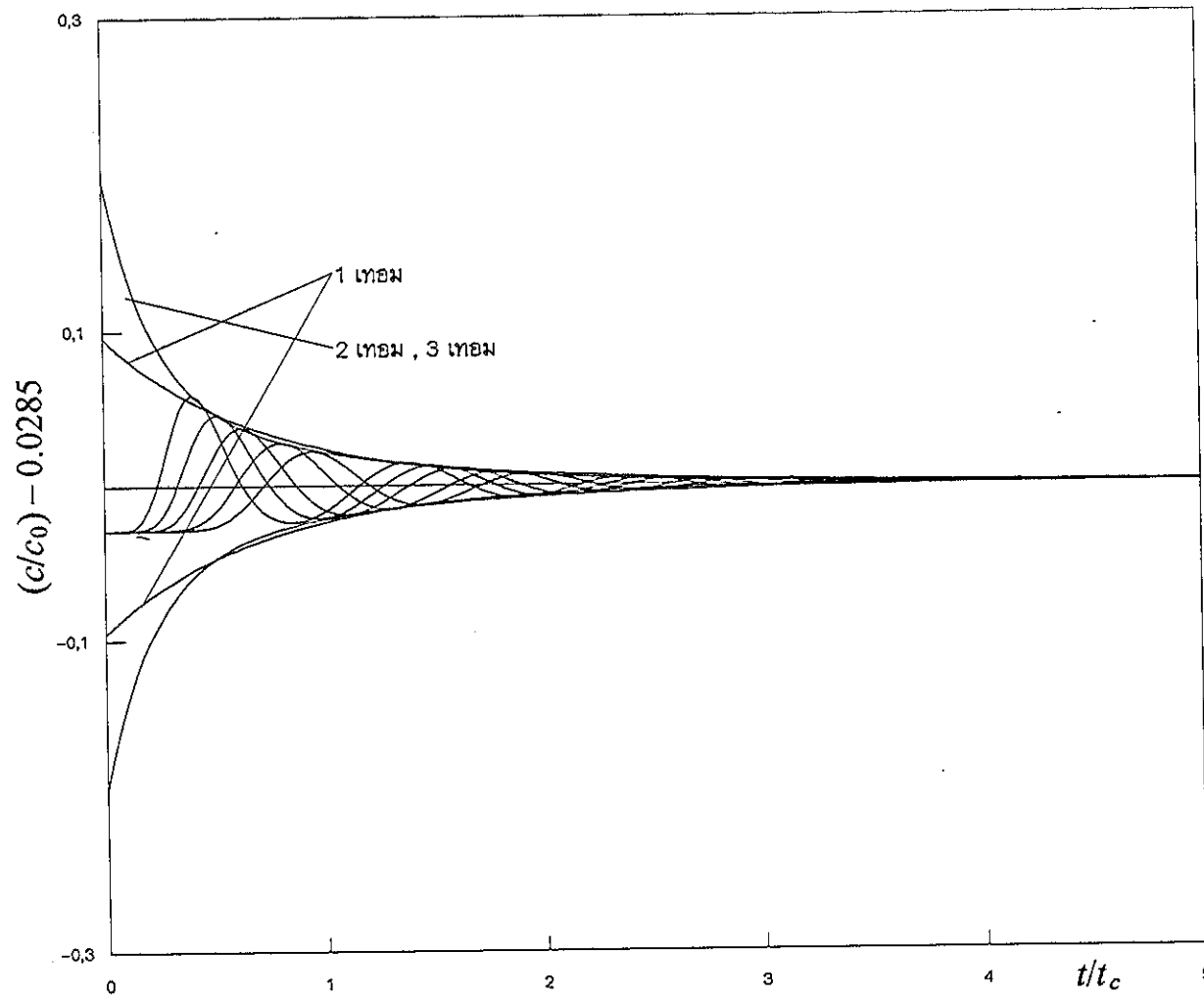
เมื่อทำการเปรียบเทียบ  $(t/t_c)$  lag ที่คำนวณตามทฤษฎีคือคิด  $\frac{V}{Q}$  หรือเวลาเรซีเดนซ์ของแต่ละเซลล์ กับที่ได้จากข้อมูลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone นั้นสอดคล้องใกล้เคียงกัน ดังภาพประกอบ 2.19



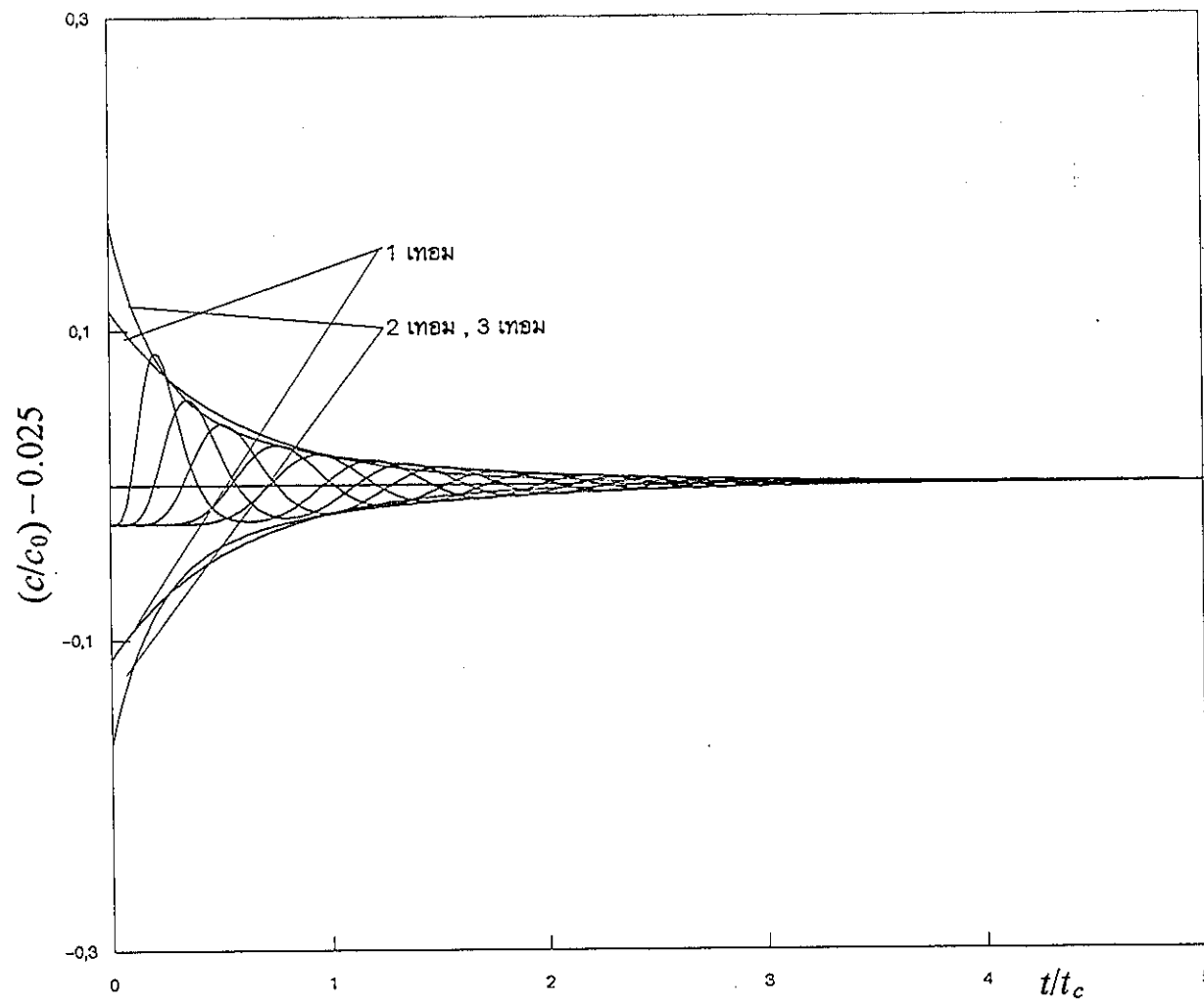
ภาพประกอบ 2.14 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และ สังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1 , 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิว เลตโดย  $N_1:N_2:N_3:N_4=1:1:1:1$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3 , โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์;  $S=6$  และ  $N_{\text{รวม}}=20$ )



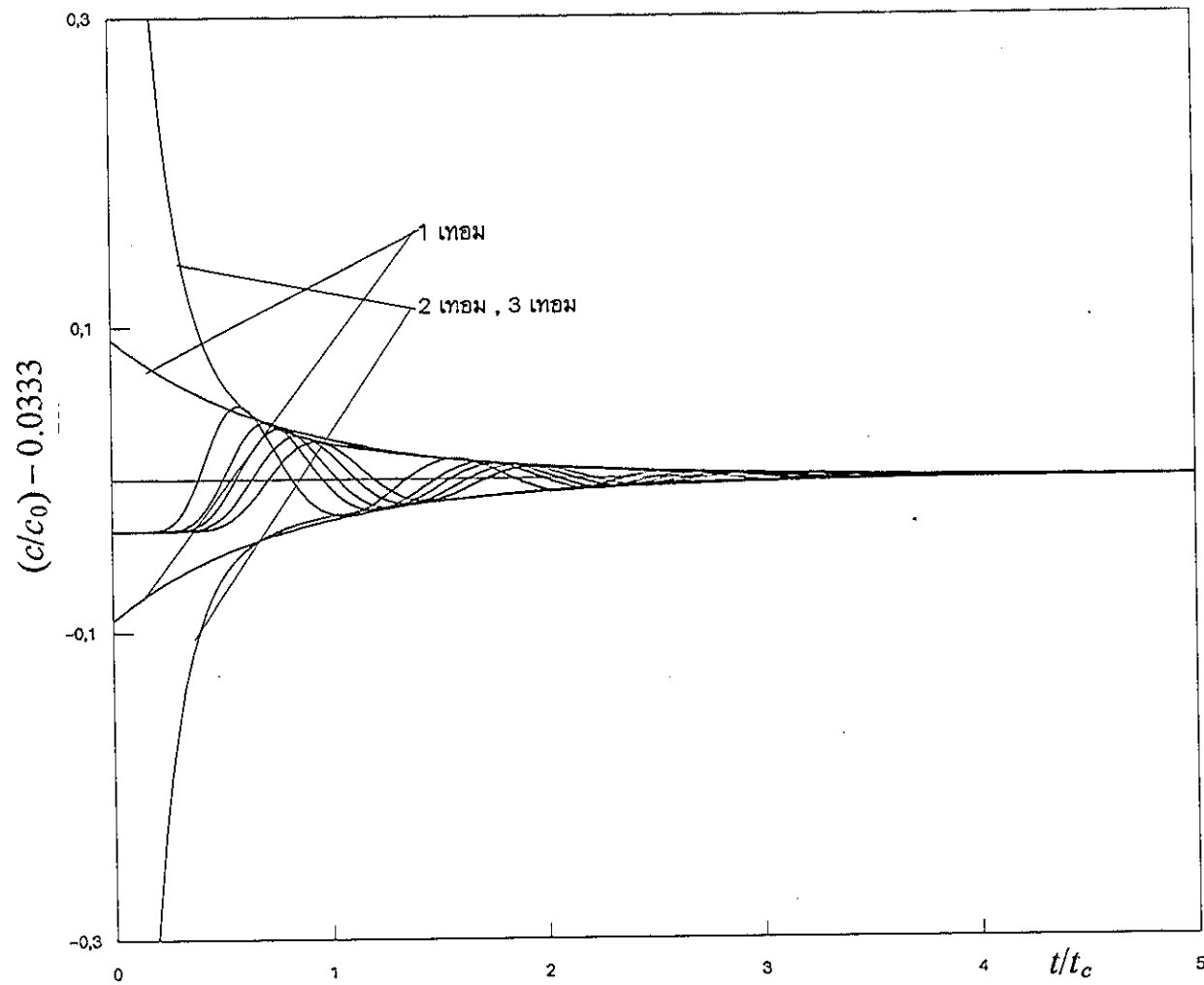
ภาพประกอบ 2.15 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และ  
 สังเกตผลที่ (โซน, เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิว  
 เลตโดย  $N_1:N_2:N_3:N_4=7:3:7:3$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4  
 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์;  $S=3.71$  และ  $N_{\text{รวม}}=20$ )



ภาพประกอบ 2.16 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลตและสังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิวเลตโดย  $N_1:N_2:N_3:N_4=3:7:7:3$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์;  $S=10.67$  และ  $N_{\text{tot}}=20$ )

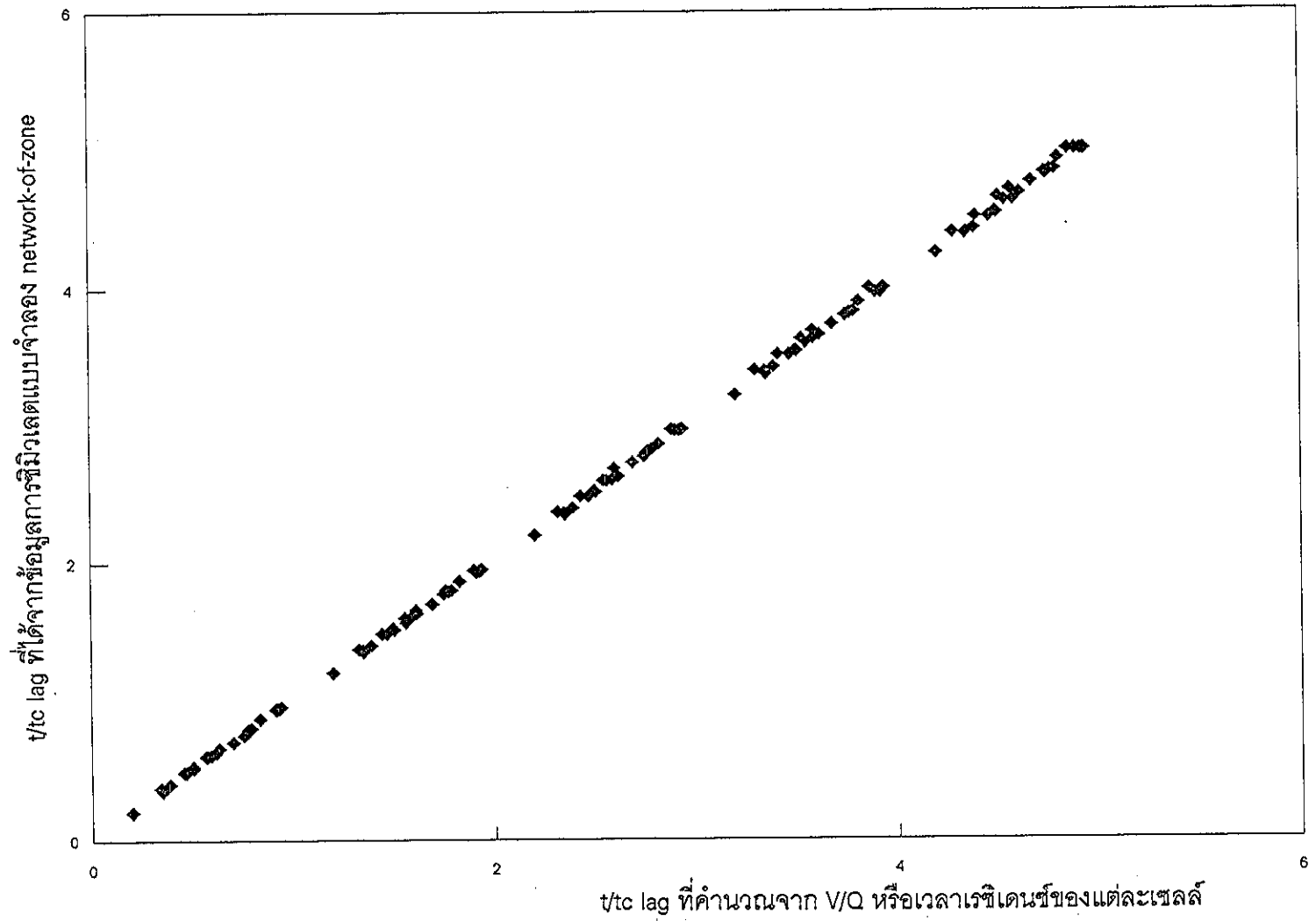


ภาพประกอบ 2.17 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และ  
 สังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิว  
 เลตโดย  $N_1:N_2:N_3:N_4=2:4:6:8$  ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4  
 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์ ;  $S=19$  และ  $N_{รวม}=20$ )



ภาพประกอบ 2.18 ตัวอย่างการประมาณพารามิเตอร์ โดยการ fit peak to peak curve ที่ได้จากการซิมิวเลต และ สังเกตผลที่ (โซน,เซลล์) ต่าง ๆ เข้ากับ เทอม exponential 1, 2 และ 3 เทอม ตามลำดับ (ซิมิว เลตโดย  $N_1:N_2:N_3:N_4=8:8:4:2$ ; ขนาดเซลล์ในโซนที่ 1 เป็น 2, โซนที่ 2 เป็น 3, โซนที่ 3 เป็น 4 และ โซนที่ 4 เป็น 5 หน่วยปริมาตรเซลล์;  $S=2.75$  และ  $N_{รวม}=20$ )





ภาพประกอบ 2.19 การเปรียบเทียบ  $t/\tau$  lag จากที่คำนวณตามทฤษฎี คือคิด  $V/Q$  หรือเวลาเรซีเดนซ์ของแต่ละเซลล์ กับที่ได้จากข้อมูลการซิมูเลตแบบจำลอง network-of-zone

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

### วัสดุ

#### สารเคมี

แซนแทนกัมผง KTL 73223A ผลิตจากรัฐคาลิฟอร์เนียสหรัฐอเมริกา มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 12.3 โดยน้ำหนัก

โซเดียมเบนโซเอต ( $C_6H_5COONa$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ

โซเดียมโพรพิโอเนต ( $CH_3CH_2COONa$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ

โซเดียมไนเตรต ( $NaNO_3$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ

โซเดียมเอไซด์ ( $NaN_3$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ

น้ำเชื่อมฟรุคโตสความเข้มข้นสูง (High Fructose syrup) ความเข้มข้นร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก

สารด้านการเกิดฟองพวกซิลิกอน เกรดห้องปฏิบัติการ

เกลือป่น

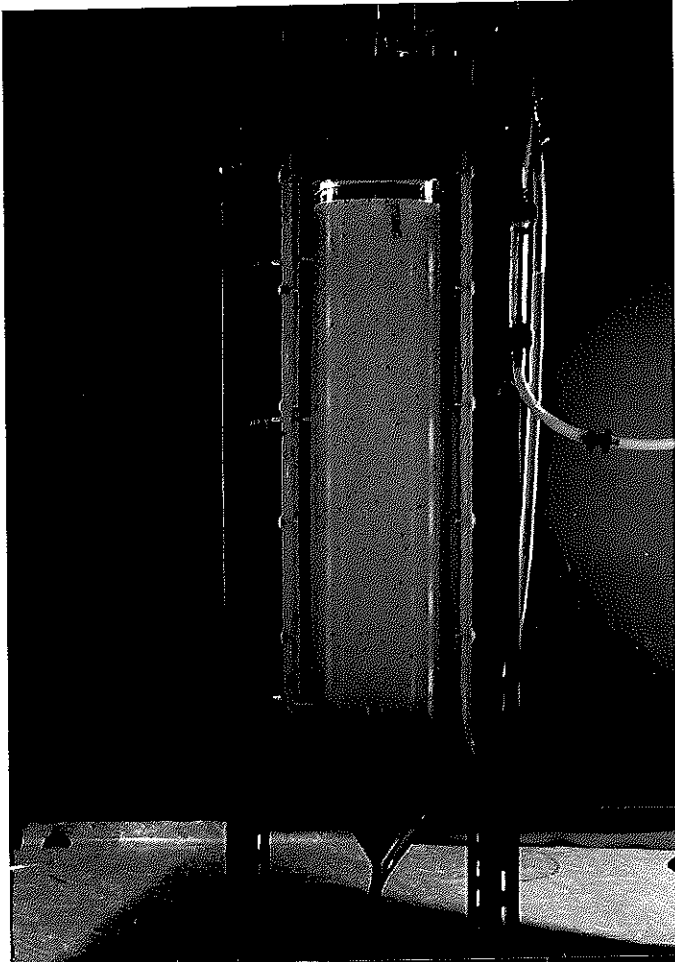
### อุปกรณ์

1. ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ดังแสดงในภาพประกอบ (3.1)

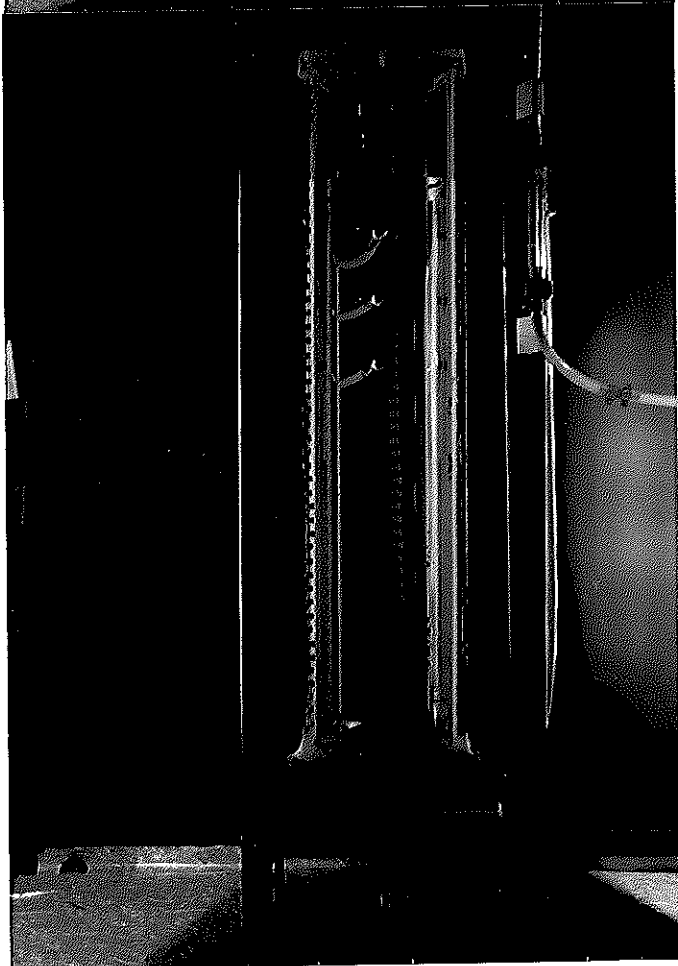
รายละเอียดของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก \*

- (1) ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ 20-30 ลิตร
- (2) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของถังทรงกระบอกนอก 190 มม., ภายนอก 200 มม.
- (3) เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อดริฟท์ 132 มม., ภายนอก 140 มม.
- (4) อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อดริฟท์ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวถัง 0.695
- (5) ความสูงของท่อดริฟท์ 0.71 ม.
- (6) อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวถังต่อความสูงของท่อดริฟท์ 0.268

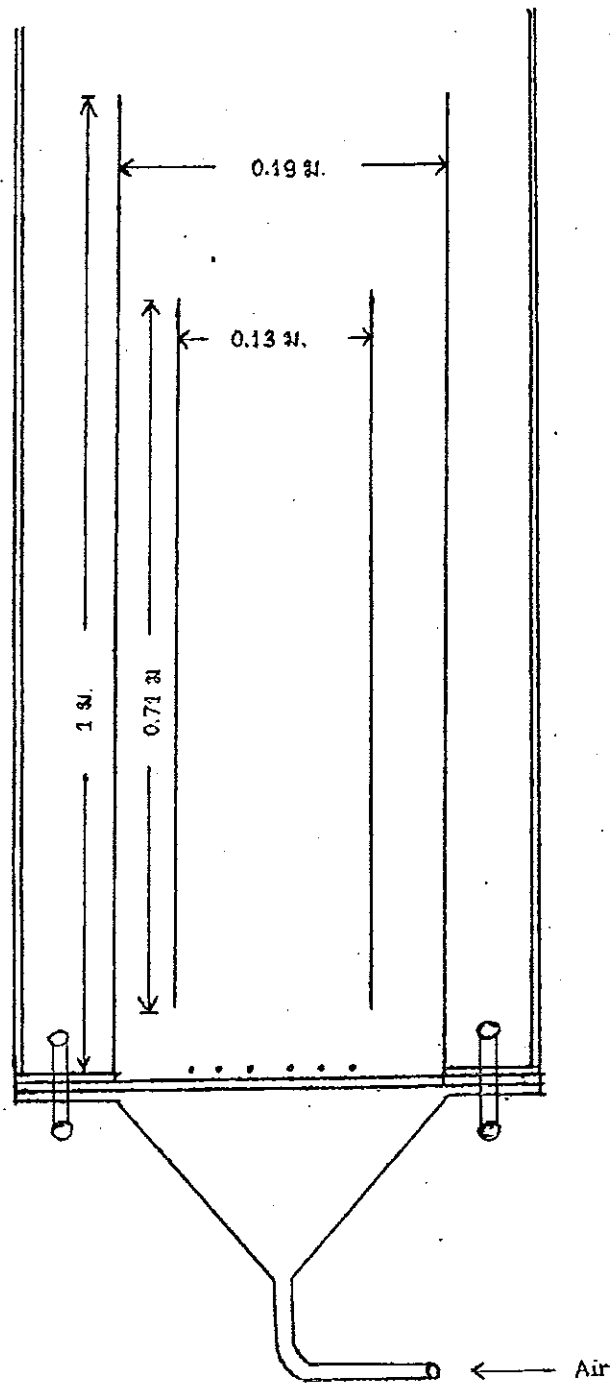
2. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง Model WB-6001-g 89061 ของ บริษัท Sartorius Basic Series



(a)



(b)



(c)

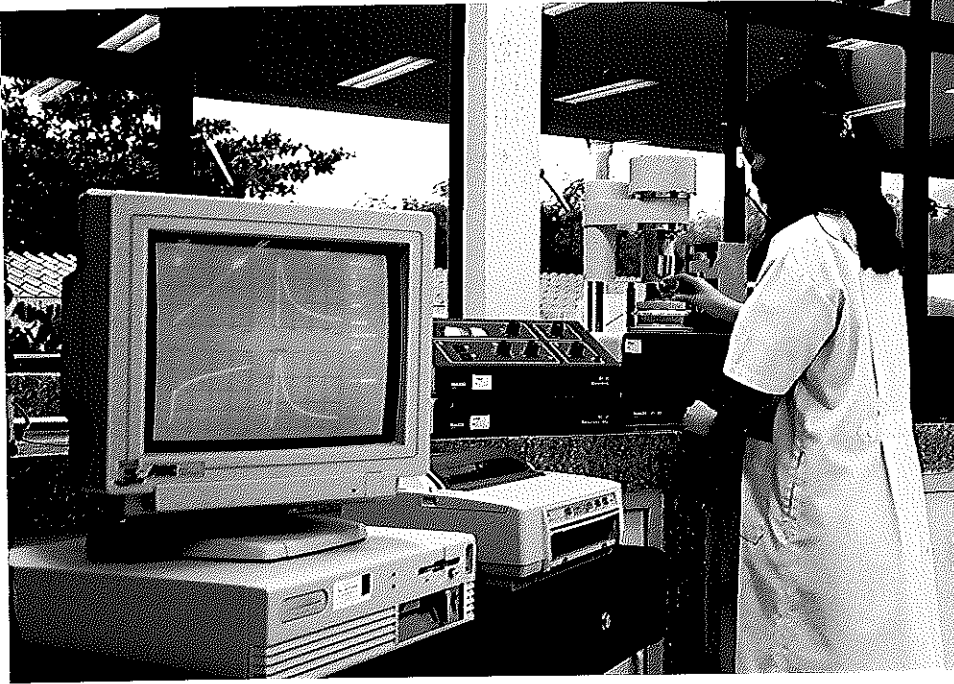
ภาพประกอบ 3.1 ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่สร้างและพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในการทดลอง  
 (a) ชนิดดั้งเดิมใช้สำหรับศึกษาการผสม โดยใช้เทคนิคติดตามการตอบสนอง  
 ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (b) ชนิดผ่าซีกใช้สำหรับศึกษาไฮโดรไดนามิกส์  
 และศึกษาเวลาในการวนครบรอบโดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค  
 (c) มิติของดังปฏิกรณ์

3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น 4210 P ของ บริษัท Sartorius GmbH Gottingen
  4. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร
  5. ถัง ขนาด 70 ลิตร พร้อมฝาปิด
  6. มอเตอร์ขนาด 1 / 40 แรงม้า พร้อมใบกวน ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแซนแรนแกม
  7. HAKKE Viscometers Rotovisco RV20 / CV20 พร้อมซอฟต์แวร์ควบคุมและอ่างน้ำ
- หมุนเวียนแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Heto โมเดล CB 13-25 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2
8. บีบอากาศ (Air Compressors) ยี่ห้อ TIGER โมเดล MK 100
  9. เทอร์โมมิเตอร์ ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่ง โมเดล 51 K/J ของ บริษัท FLUKE
  10. Conductivity meter ยี่ห้อ ORION โมเดล 120
  11. pH meter ยี่ห้อ มงคลสุข โมเดล DPH 3
  12. Flow meter ขนาด 0.1-1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
  13. ไมโครคอมพิวเตอร์ 80486 หน่วยความจำ 8 เมกกะไบท์
  14. Video blaster card สำหรับจับภาพอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบติดตามอนุภาค
  15. กล้องวิดีโอ Panasonic CCTV Camera Model WV-BL600/G
  16. จอภาพ ขาว-ดำ ความละเอียดสูง (High resolution black-white monitor)  
ยี่ห้อ National โมเดล WV-5370 AN/C

\*ในการสร้างถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ข้อมูลที่ทำการศึกษาอ้างอิงจาก ศุภชัย บุญนำมา, (2535), Chisti, Habard and Moo-Young (1988) และ Chisti (1989)

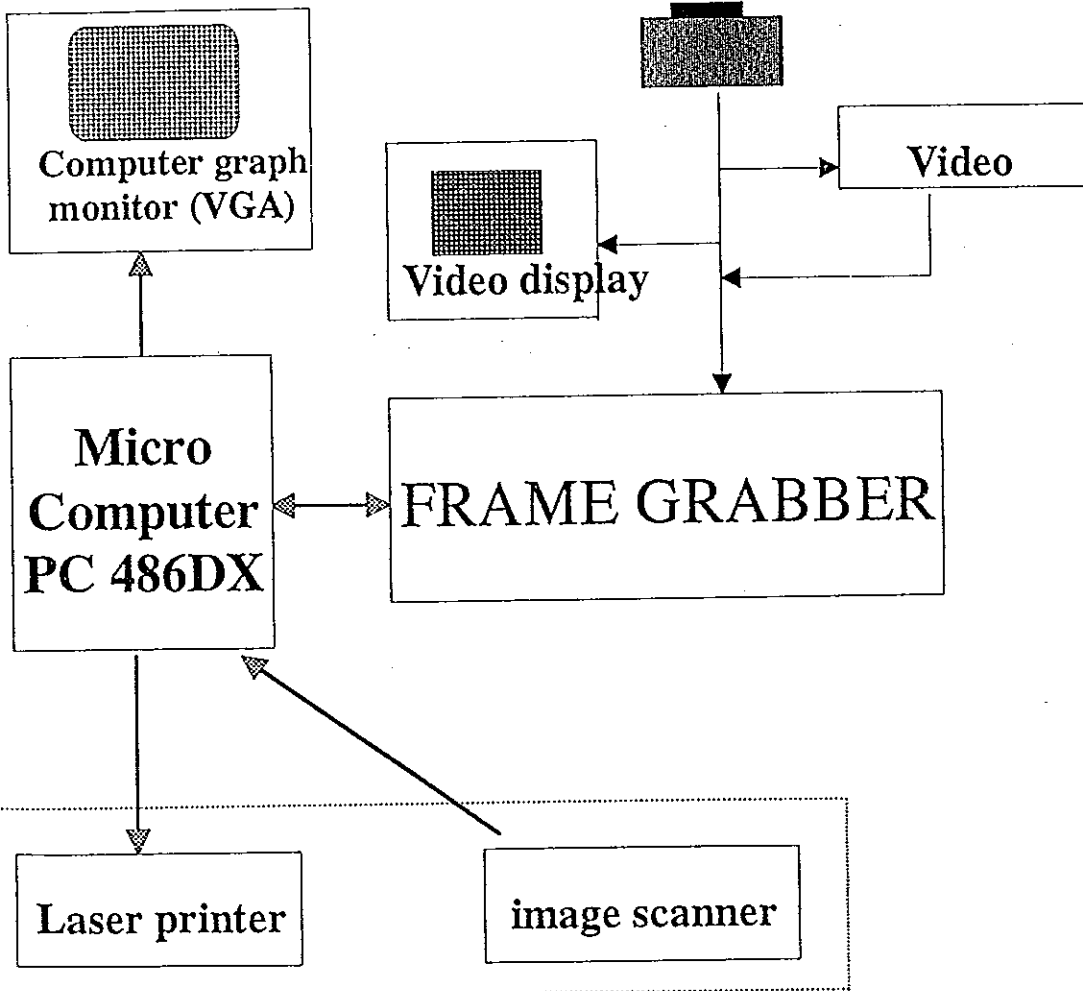
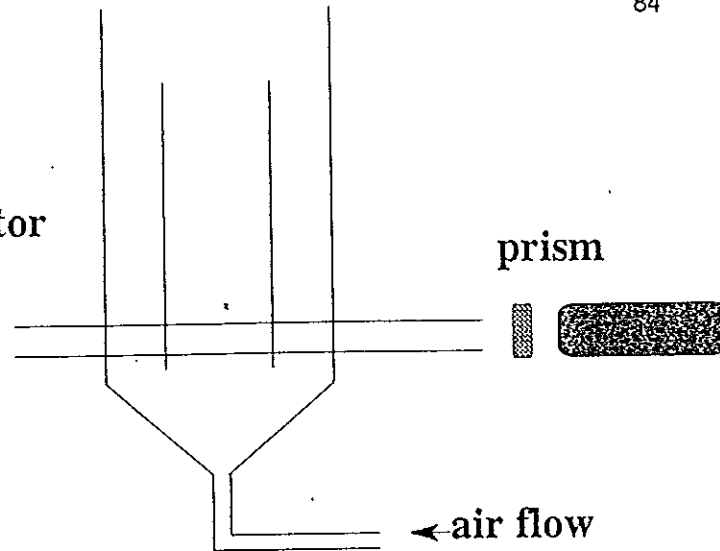
#### วิธีการ

- ก. การสร้างและพัฒนาถังปฏิกรณ์ชีวภาพจำลองแบบอากาศยก ขนาด 20-30 ลิตร  
(ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น)



ภาพประกอบ 3.2 เครื่องมือวัดสมบัติทางรีโอโลยี (Haake CV 20) ที่สามารถวัดได้ทั้ง steady shear และ dynamic shear properties และสามารถควบคุมอุณหภูมิในการวัดได้ละเอียดถึง  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

Transport Air-lift reactor



ภาพประกอบ 3.3 ไดอะแกรมแสดงการจัดระบบฮาร์ดแวร์สำหรับระบบศึกษาพลศาสตร์ของไหล ในถังปฏิกรณ์จำลองแบบอากาศยก โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique)

ข. การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมและการเทียบเคียงทางรีโอโลยี (Rheological matching)

1. การเตรียม, คัดเลือกสารละลาย และพารามิเตอร์ในการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี

1.1 การเตรียมสารละลายแซนแทนกัม

1. ชั่งผงแซนแทนกัม ตามปริมาณที่คำนวณได้

2. ค่อย ๆ ละลายผงแซนแทนกัมปริมาณน้อย ๆ ลงในน้ำปริมาตรตามที่คำนวณได้

พร้อมเปิดใบพัดกวนช่วยในการละลาย จนกระทั่งผงแซนแทนกัมละลายเป็นเนื้อเดียวกันในสารละลาย

1.2 การทดสอบหาสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม สำหรับเก็บรักษาสารละลายแซนแทนกัม

1. เตรียมสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 200 มิลลิลิตร 16 ขวด

2. เติมสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โซเดียมเบนโซเอต โซเดียมโพรพิโอเนต โซเดียมไนเตรต โซเดียมเฮไซด ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ลงในสารละลายข้อ 1 ตามลำดับ

3. บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของสีและฟองอากาศที่เกิดขึ้นในสารละลายข้างต้นทุกวัน ประมาณ 20 วัน

4. เลือกชนิดของสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้น ที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการเตรียมสารละลายแซนแทนกัมในครั้งต่อไป

1.3 การหาความชื้นในผงแซนแทนกัมสำเร็จรูป

1. ชั่งผงแซนแทนกัม ประมาณ 2 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ใสในภาชนะหาความชื้น

2. อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

3. ชั่งหาน้ำหนักแห้ง คำนวณหาปริมาณความชื้น

1.4 เตรียมสารละลายแซนแทนกัม ปริมาตร 250 มิลลิลิตร 8 ความเข้มข้น คือ ความเข้มข้นร้อยละ 0 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก



### 1.5 การทดลองเพื่อหา ค่าความเครียด (strain) ที่เหมาะสมที่สุด และย่านลิเนียร์ วิสโคอีลาสติก (หรือย่านที่สมบัติวิสโคอีลาสติกของของไหลมีค่าสูงและคงตัว)

1. นำสารละลายแซนแทนกัม มาวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี เช่น ความหนืดเชิงซ้อน , Storage Modulus , Loss Modulus เป็นต้น ในช่วงพิสัยความถี่ 0.05-10 Hz ความเครียด 0.3-10 องศา (deg)

2. หาย่านลิเนียร์วิสโคอีลาสติก และเลือกค่าความเครียดสูงสุดในย่านลิเนียร์วิสโคอีลาสติก

### 1.6 วัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี

นำสารละลายแซนแทนกัมที่เตรียมไว้ทั้ง 8 ความเข้มข้น วัดค่า ความหนืดเชิงซ้อน, Storage Modulus , Loss Modulus

### 1.7 คัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมที่เหมาะสม

เลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมที่ให้ค่า Loss Modulus ที่เหมาะสม

## 2. การศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี ของสารละลายแซนแทนกัม ปริมาตร 50 ลิตรที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จรูป

2.1 เตรียมสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 50 ลิตร

2.2 วัดค่าสมบัติทางรีโอโลยี ตลอดช่วงระยะเวลา ที่ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่ง ค่าสมบัติทางรีโอโลยีมีความคงตัว

2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ, เกลือ ที่มีต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม

## 3. การเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จกับบรอร์ดที่เกิดจากการหมักจริง เพื่อสามารถโยงกลับไปยังสมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์ดในสภาวะการหมักจริง

ขั้นนี้เราเรียกว่า "Rheological Matching" ซึ่งจะเปรียบเทียบคุณสมบัติทางรีโอโลยีใน 2 ลักษณะ คือ

3.1 Oscillation ( $G'$ ,  $G''$  กับ  $\omega$ )

3.2 Rotation ( $K$ ,  $n$ )

### ค. การศึกษาการผสม (Mixing) ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น

#### 1. การพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษากลไกการผสม

ศึกษาทฤษฎีและแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้มีการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติมาก่อน เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษากลไกการผสมขึ้นใหม่ (รายละเอียดมีอยู่ในบทที่ 2)

#### 2. การศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

1. ตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามที่กำหนด
2. บันทึกรายละเอียดและถ่ายภาพลักษณะการไหลภายในถัง

#### 3. การศึกษาเวลาในการวนครบรอบ ( $t_c$ ) ของของไหลในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

1. ตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามที่กำหนด
2. จับภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เติมลงไป (ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชิ้นแผ่นพลาสติกสีเหลืองเล็ก ๆ ขนาด 2x2 มม.) ในถังปฏิกรณ์โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking) เพื่อนำมาคำนวณหาเวลาในการวนครบรอบ เปรียบเทียบกับชุดข้อมูลของเวลาในการวนครบรอบที่หาได้จากการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยวิธีติดตามการตอบสนองของ เทรซเซอร์

#### 4. การศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยวิธีติดตามการตอบสนองความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (tracer response)

1. ตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามที่กำหนด
2. ฉีดสารละลายกรด HCl ที่ตำแหน่งในถังปฏิกรณ์ ที่กำหนดในงานวิจัยนี้คือด้านบนสุดของถังปฏิกรณ์ แล้ววาง pH probe ที่บริเวณสารละลายตอนบนของถังปฏิกรณ์ (gas separation zone)
3. วัด และบันทึกค่าพีเอช ที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลา
 

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการผสม ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

  - (1) ความเข้มข้นของสารละลายแซนเทนกันร้อยละ 0.1, 0.25 และ ใช้น้ำเป็นของเหลวเปรียบเทียบ
  - (2) อัตราการให้อากาศ 0.3 , 0.7 , 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร / ชั่วโมง
  - (3) ระดับความสูงของของไหลในถังก่อนให้อากาศ 0.85 เมตร
  - (4) ความสูงของท่อใน 0.71 เมตร

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์

#### ก. ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีและการเทียบเคียงทางรีโอโลยี

##### 1. ผลการเตรียม, คัดเลือกสารละลาย และพารามิเตอร์ในการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี

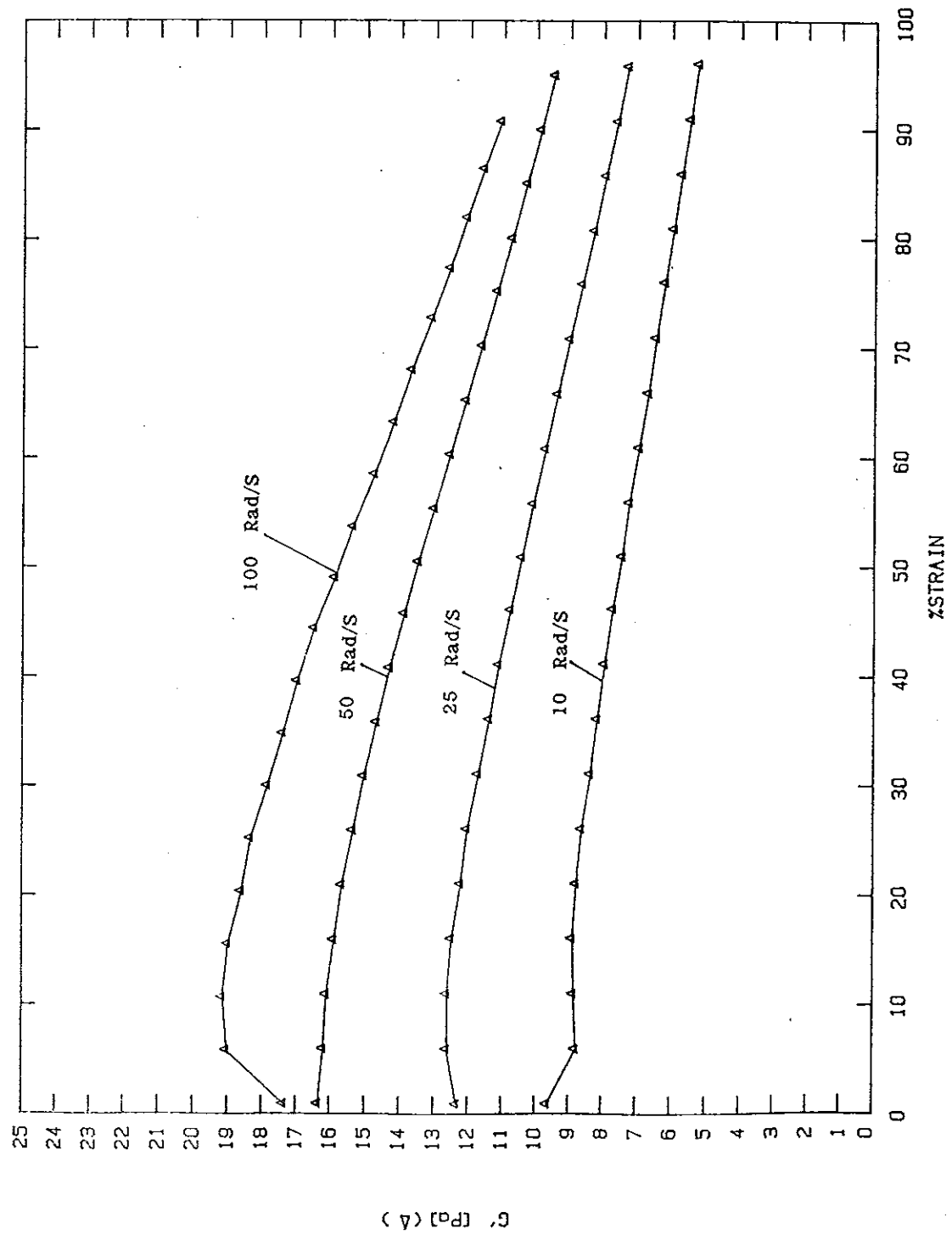
##### 1.1 ผลการทดสอบหาสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ที่เหมาะสมสำหรับสารละลายแซนแธนกัน

จากการทดสอบพบว่า ในชนิดของสารยับยั้งการเจริญ ของเชื้อจุลินทรีย์เดียวกันนั้น ส่วนใหญ่ เมื่อใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า (ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะทำให้ลักษณะทางกายภาพของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เริ่มมีสีแดง, เหลือง เกิดขึ้นในบางส่วนของสารละลาย มีแผ่นฝ้าขาว, รา ลอยอยู่ที่บริเวณผิวน้ำของสารละลาย และมีกลิ่นเหม็นบูด เร็วกว่า เมื่อใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น (ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

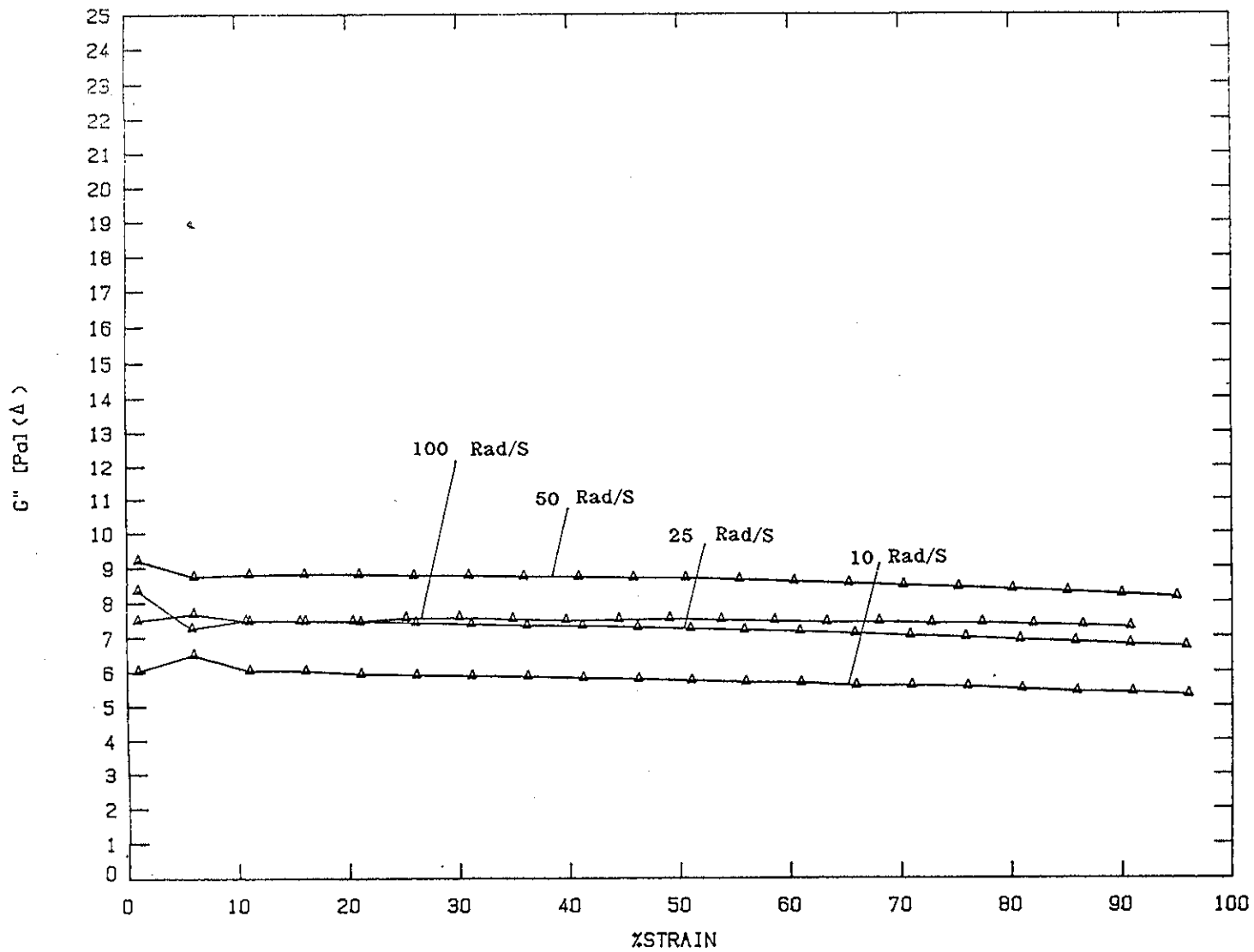
ส่วนในด้านชนิดของสารยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์นั้นพบว่า ในขวดที่มี โขเดียมไนเตรดและโซเดียมเบนโซเอต ลักษณะทางกายภาพของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะดังกล่าวข้างต้นเร็วที่สุด คือหลังจากเตรียมและตั้งทิ้งไว้ ประมาณ 2-3 วัน ถัดมาคือโซเดียมโพรฟิไอเนต สารละลายมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพหลังจากตั้งทิ้งไว้ประมาณ 5-6 วัน ส่วนสารละลายที่มีโซเดียมเฮไลด์นั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพใด ๆ แม้ตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งปัจจุบันเป็นเวลานานประมาณ 7 เดือน ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้โซเดียมเฮไลด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

##### 1.2 ผลการทดลองหาพารามิเตอร์ ที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไดนามิก(dynamic property)

เพื่อหาอันลิเนียร์วิสโคอีลาสติก (linear-viscoelastic) ซึ่งช่วงดังกล่าวได้มีการพัฒนาทางทฤษฎีเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป จึงทำให้ผลของการวัดสมบัติทางไดนามิก (dynamic property) ในช่วงนี้ง่ายต่อการตีความและเปรียบเทียบผลการทดลอง ผลโดยทั่วไปของการทดลองโดยวิธีเปลี่ยนระดับความเครียด (strain sweep) ในบรอร์จริงแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.1 และ 4.2



ภาพประกอบ 4.1 G' กับ % strain ที่ความเร็วต่าง ๆ กัน (1.5 % xanthan) ที่มา : Siripatana (1992)



ภาพประกอบ 4.2  $G''$  กับ % strain ที่ความถี่ต่างๆ กัน (1.5 % xanthan) ที่มา : Siripatana (1992)

เลือกใช้  $G'$  ในการเปรียบเทียบแทน  $G''$  เพราะ  $G'$  มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (sensitive) ของโครงสร้างของของไหล ดีกว่า  $G''$

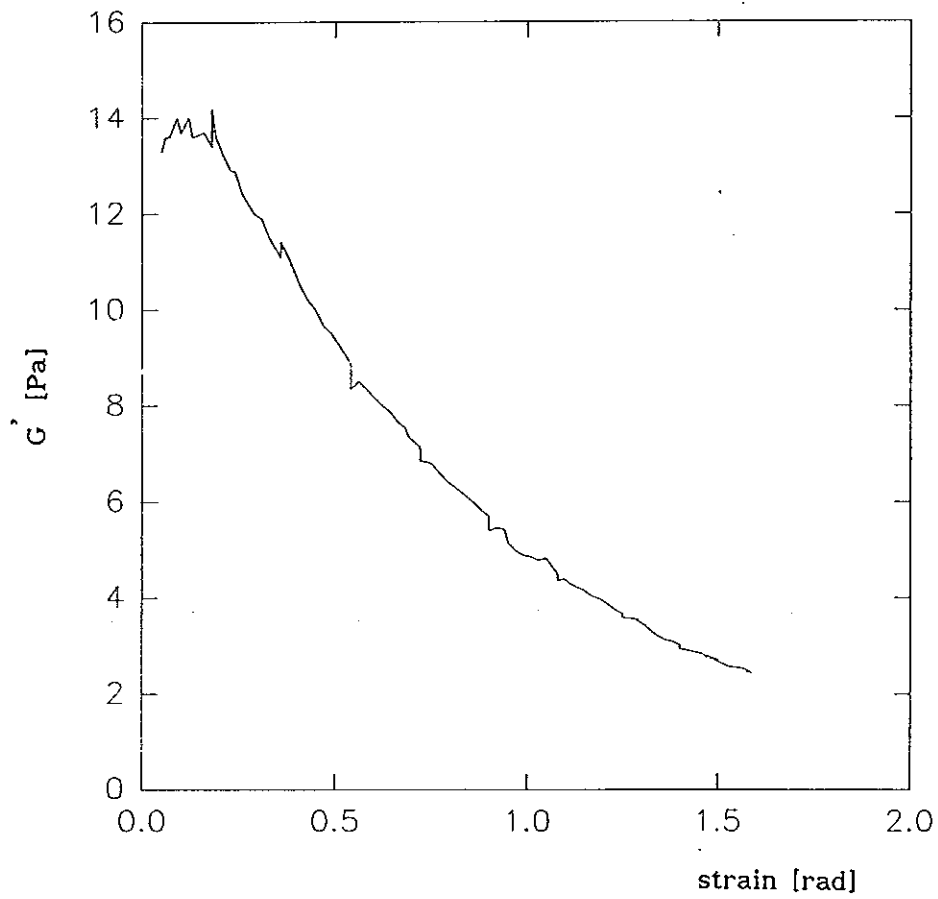
โดยทั่วไปขณะที่ความเครียด (strain) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ไปยังร้อยละ 100 นั้น  $G'$  จะลดลง (ดูภาพประกอบ 4.1) จะเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ส่วน  $G''$  นั้น มีการเปลี่ยนแปลงลดลงน้อยกว่า (ดูภาพประกอบ 4.2) ที่พิสัยความถี่ (frequency) สูงขึ้นการลดลงยิ่งเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า อัตราการแตกหักของโครงสร้าง (structure breakage) ซึ่งแปรตามการเปลี่ยนแปลงของความเครียดนั้น มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ความเครียดต่ำ ( $\approx$  ร้อยละ 0 - 25) กราฟของ  $G'$ - ความเครียด ค่อนข้างเรียบและคงที่ (flat) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในโครงสร้างของไหล ในช่วงนี้ของไหลเกิดการเสียรูป (deformation) ซึ่งไม่ได้เป็นการทำลายโครงสร้าง จะเห็นว่าไม่มีจุดใด แสดงถึงจุดที่โครงสร้างเริ่มแตกออก (breakdown) อย่างเห็นได้ชัด แต่การเปลี่ยนแปลงจะเรียบ (smooth) แม้เมื่อการแตกหักเพิ่มขึ้น ที่ร้อยละความเครียดสูงขึ้น พบว่าช่วงลิเนียร์วิสโคอีลาสติก อยู่ระหว่างร้อยละของความเครียด 0-25 และให้ค่า  $G'$  คลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm$  ร้อยละ 5

จากการทดลองของเรา เมื่อทดลองเปลี่ยนระดับความเครียดจาก 0.3-10 องศา (deg) พบว่าช่วงความเครียด 0.3-1 องศา จะให้ค่า  $G'$  ที่สูงและค่อนข้างเสถียร (ดูภาพประกอบ 4.3) และเมื่อเปลี่ยนระดับความเครียด จาก 0.3-1 องศา พบว่าเมื่อความเครียดเท่ากับ 0.75 องศาจะให้ค่า  $G'$  ที่สูงและค่อนข้างเสถียร (ดูภาพประกอบ 4.4) ดังนั้นจึงเลือกความเครียด เท่ากับ 0.75 องศา ในการทดลอง ส่วนพิสัยความถี่ กำหนดตามความสามารถของเครื่อง คือ 0.05-10 Hz

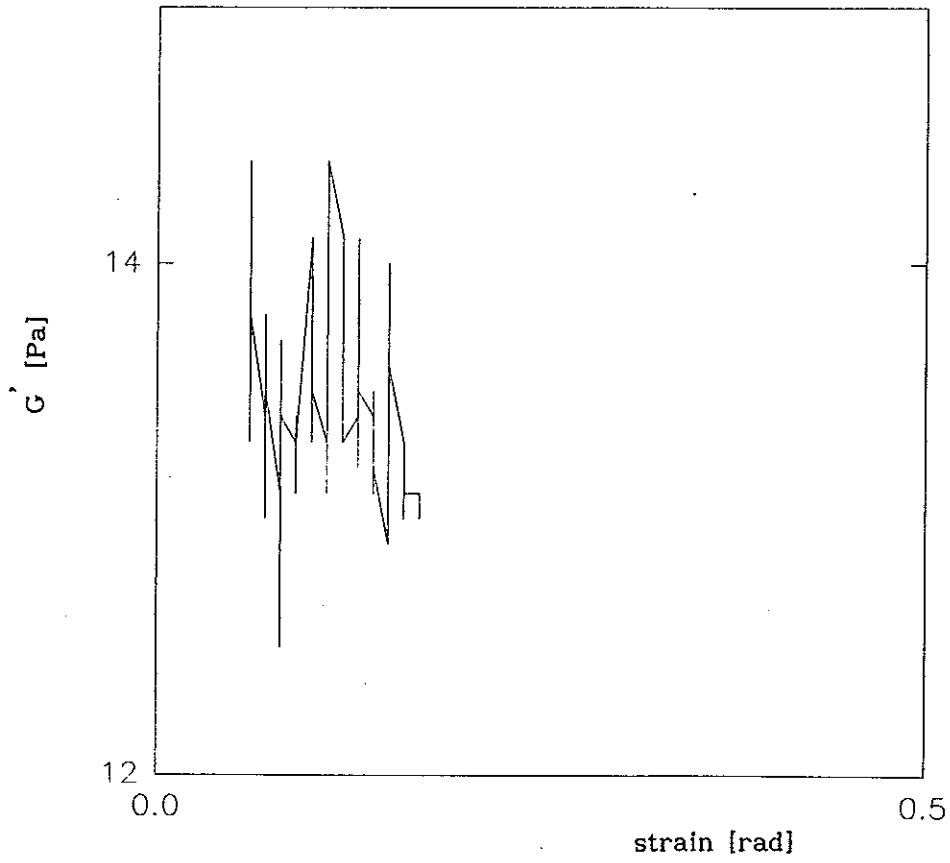
### 1.3 ผลการวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยีเพื่อคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลาย แซนแทนกัมสำเร็จที่เหมาะสม

จากการทดลองวัดค่าสมบัติทางรีโอโลยีของ สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้น 250 มิลลิลิตร 8 ความเข้มข้น (ร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนัก) ได้ผล ดังภาพประกอบ 4.5

จากการทดลองเราพบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จต่ำกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก จะแสดงสมบัติทางรีโอโลยีใกล้เคียงกับน้ำ ดังนั้นเราจึงไม่จำเป็นต้องศึกษา เพราะเป็นช่วงต้นของการหมัก ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ที่ความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นจึงคัดเลือกความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เหมาะสม 4 ค่า คือร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

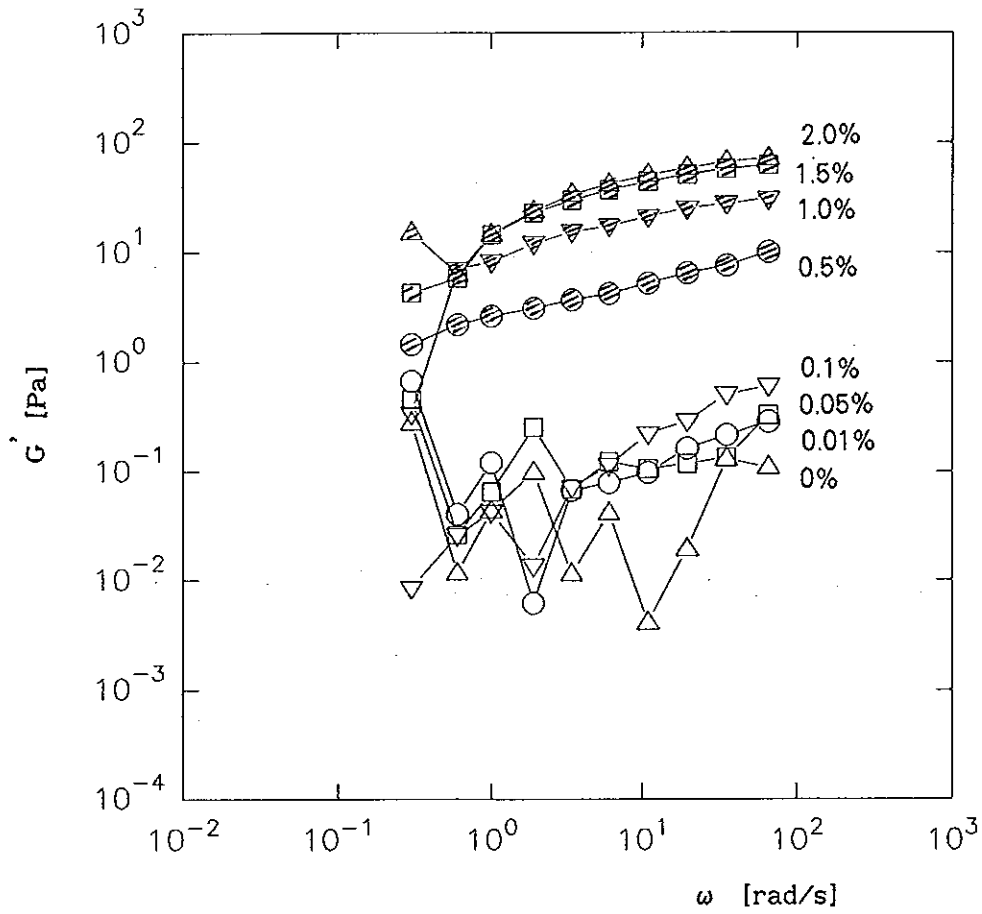


ภาพประกอบ 4.3  $G'$  กับ strain (rad) ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายเซนแซนแกมสำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) : strain sweep 0.3-10 deg



ภาพประกอบ 4.4  $G'$  กับ strain (rad) ที่ความถี่ 5 Hz (สารละลายเซนแซนแกมสำเร็จ  
ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) : strain sweep 0.3-1 deg





ภาพประกอบ 4.5  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายเซนแอนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

## 2. ผลการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม ปริมาตร 50 ลิตร ที่เตรียมขึ้นจากกัมสำเร็จ

### 2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่สมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม มีความคงตัวและสม่ำเสมอ

จากการทดลองวัดสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้น 50 ลิตร 4 ความเข้มข้น (ร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก) ทั้งสิ้น 2 ครั้งหลังจากตั้งทิ้งไว้ นาน 30 วัน และ 6 เดือน พบว่าสมบัติทางรีโอโลยีของทุกสารละลาย เข้าสู่สภาวะคงตัว และ คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm$  ร้อยละ 10 (ดังภาพประกอบ 4.6) และเมื่อทดลองสุ่มตักตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง ในถังของแต่ละความเข้มข้น มาวัดสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลาย พบว่า ทั้ง 3 ตำแหน่ง ให้ค่าสมบัติทางรีโอโลยี ใกล้เคียงกับค่าที่สภาวะคงตัวของแต่ละความเข้มข้นนั้น ๆ คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm$  ร้อยละ 10 (ดังภาพประกอบ 4.7)

ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่า หลังจากเตรียมสารละลายแซนแทน กัมสำเร็จปริมาตร 50 ลิตร และตั้งทิ้งไว้ นาน 30 วัน ค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายที่เตรียมขึ้น จะมีความคงตัวและ สม่ำเสมอ

### 2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ, เกลือ ต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัม สำเร็จพบว่าเมื่อวัดค่า  $G'$  เทียบกับ  $\omega$  และ ความหนืด ( $\eta$ ) เทียบกับอัตราการเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิ 21 °C , 25 °C และ 29 °C ได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 4.8 และ 4.9, 4.10 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ

ในด้านอิทธิพลของเกลือต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จนั้น เมื่อวัดค่า  $G'$  เทียบกับ  $\omega$  และ ความหนืด ( $\eta$ ) เทียบกับอัตราการเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้นในน้ำกลั่นที่เติมเกลือ (ซึ่งเทียบได้เท่ากับน้ำกรอง) และน้ำกลั่น ได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 4.11 และ 4.12, 4.13 ตามลำดับ จะเห็นว่าอิทธิพลของตัวทำละลาย น้ำกรอง และน้ำกลั่นต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ ให้ผลออกมาในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นไม่ว่าจะใช้น้ำกรอง หรือน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ ก็จะไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จแต่อย่างใด

เมื่อวัดค่า  $G'$  เทียบกับ  $\omega$  และ ความหนืด ( $\eta$ ) เทียบกับอัตราการเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เตรียมขึ้นในน้ำกรองและมีปริมาณน้ำเกลือเติมลงไป ร้อยละ 0, 0.05,

0.1 และ 0.15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ ให้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 4.14 และ 4.15, 4.16 ระดับของเกลือทั้ง 4 ค่า ทำให้สารละลายมีค่าความนำไฟฟ้าเป็น 1747, 3110, 4640 และ 5550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ตามลำดับ ซึ่งระดับความเข้มข้นของเกลือดังกล่าว นั้น มีผลต่อค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ว่าไม่มีความแตกต่าง ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาการผสม (Mixing) ซึ่งอาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือ (อันเนื่องมาจากการเติมกรดลงไปเป็นเทรเซอร์ แล้วสะเทินกลับด้วยเบส) ในสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จก็ไม่น่าจะมีผลให้ค่าสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

### 3. ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายแซนแทนกัมที่เตรียมขึ้นจาก กัมสำเร็จ กับบรอร์ที่เกิดจากการหมักจริง

#### 3.1 การศึกษาโดยการทดสอบโดยการสั่น (Oscillation ( $G'$ , $G''$ กับ $\omega$ ))

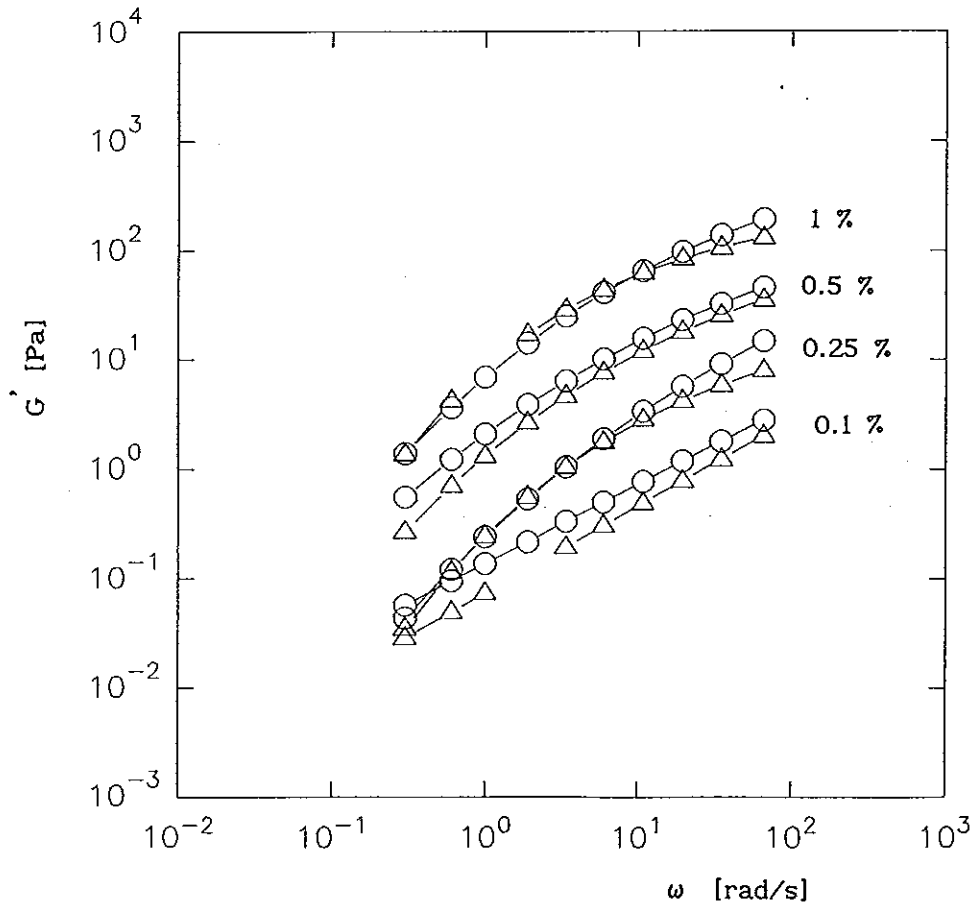
##### 3.1.1 Dynamic property ของ Xanthan broth : คุณสมบัติโดยทั่วไป

###### 3.1.1.1 Storage moduli ( $G'$ ) และ Loss moduli ( $G''$ ) กับ frequency ( $\omega$ ) :

โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของ แซนแทนสูงขึ้น ทั้ง  $G'$  และ  $G''$  จะเพิ่มขึ้นแม้ความเข้มข้นของแซนแทน เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นต่ำ ก็ส่งผลให้  $G'$  และ  $G''$  เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่พิสัยความถี่ต่ำ การเพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้จะชัดเจนน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของแซนแทนเพิ่มสูงขึ้น หรือ  $\omega$  มีค่ามากขึ้น (ภาพประกอบ 4.17)

ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในสารละลายเจือจาง การสะสมพลังงานโดย elastic deformation ของ molecular chains มีค่ามากที่พิสัยความถี่ต่ำ การเลื่อน (translational motion) ของโมเลกุลเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมการไหล และ  $G''$  จะเด่นเพราะโมเลกุลยังไม่ถูกบิดไปเมื่อจำนวนโมเลกุลพอลิเมอร์มีมากขึ้นพันธะโครงตาข่ายระหว่างโมเลกุลทำให้การเลื่อนยากขึ้นและ  $G'$  เด่นกว่า  $G''$  ที่พิสัยความถี่สูง เมื่อความเข้มข้นของแซนแทนสูงขึ้น (มากกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก) การพันกันระหว่างโมเลกุลนั้น ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะแยกจากกันภายใน 1 คาบของการสั่น (oscillation) และพบว่า  $G'$  สูงขึ้น เมื่อพิสัยความถี่สูงมาก ๆ ซึ่งการเลื่อนเกิดขึ้นไม่ได้ (no longer possible) สารละลายจะแสดงพฤติกรรมคล้ายเจล  $G'$  มีค่าสูงกว่า  $G''$  และ  $G'$  เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยต่อพิสัยความถี่ (Kokini and Pluthok, 1987)

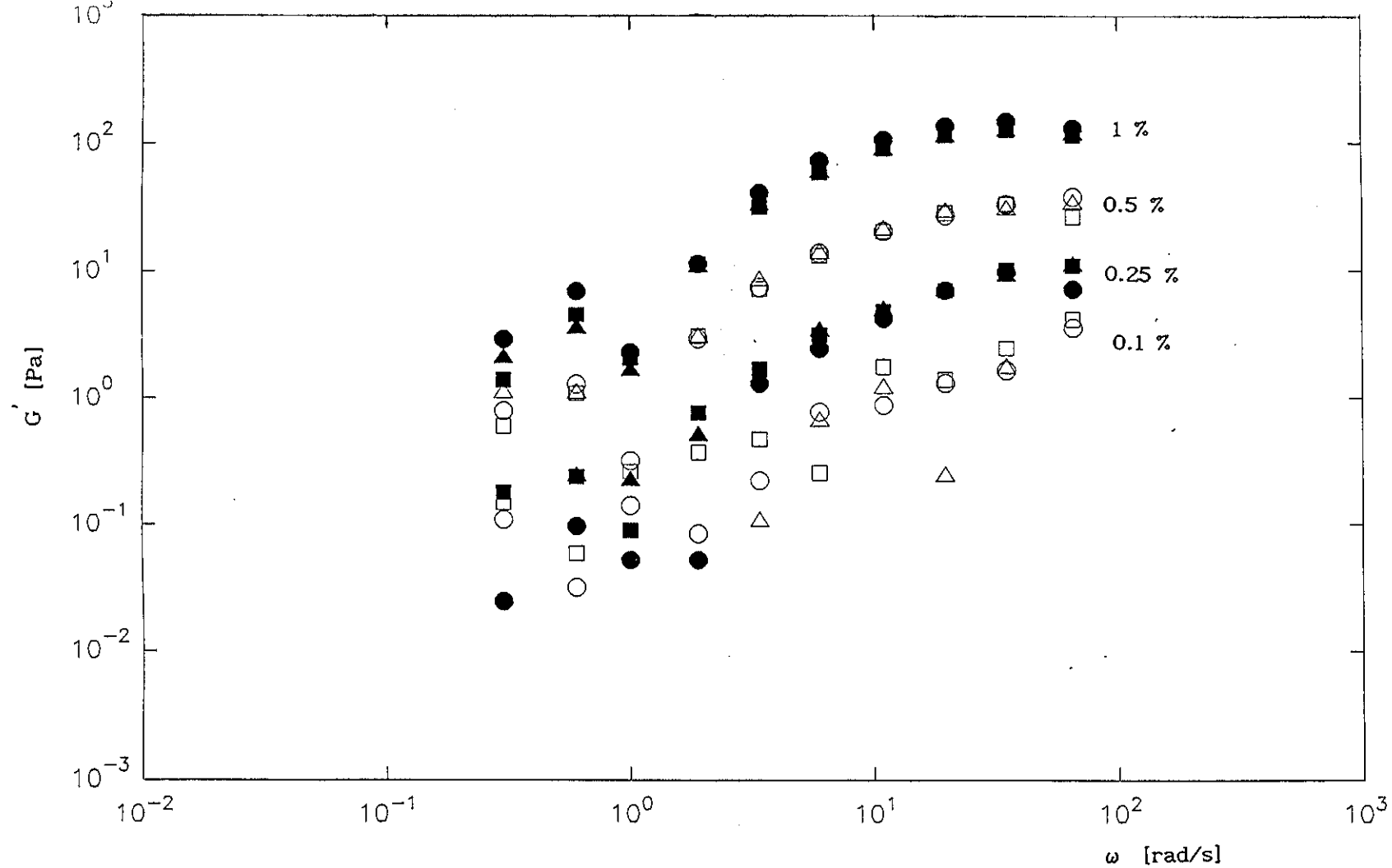
สำหรับแซนแทนซึ่งเป็น uncrosslinked polymer จะสังเกตพบ บริเวณเนิน (plateau zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่ขนาดของ  $G''$  น้อยกว่า  $G'$  (ดูภาพประกอบ 4.18) การปรากฏของบริเวณเนิน บ่งชี้ถึงการเกิด entanglement coupling (Ferry, 1980) ที่พิสัยความถี่ต่ำกว่าจุดที่  $G'$  มีค่าเท่ากับ  $G''$



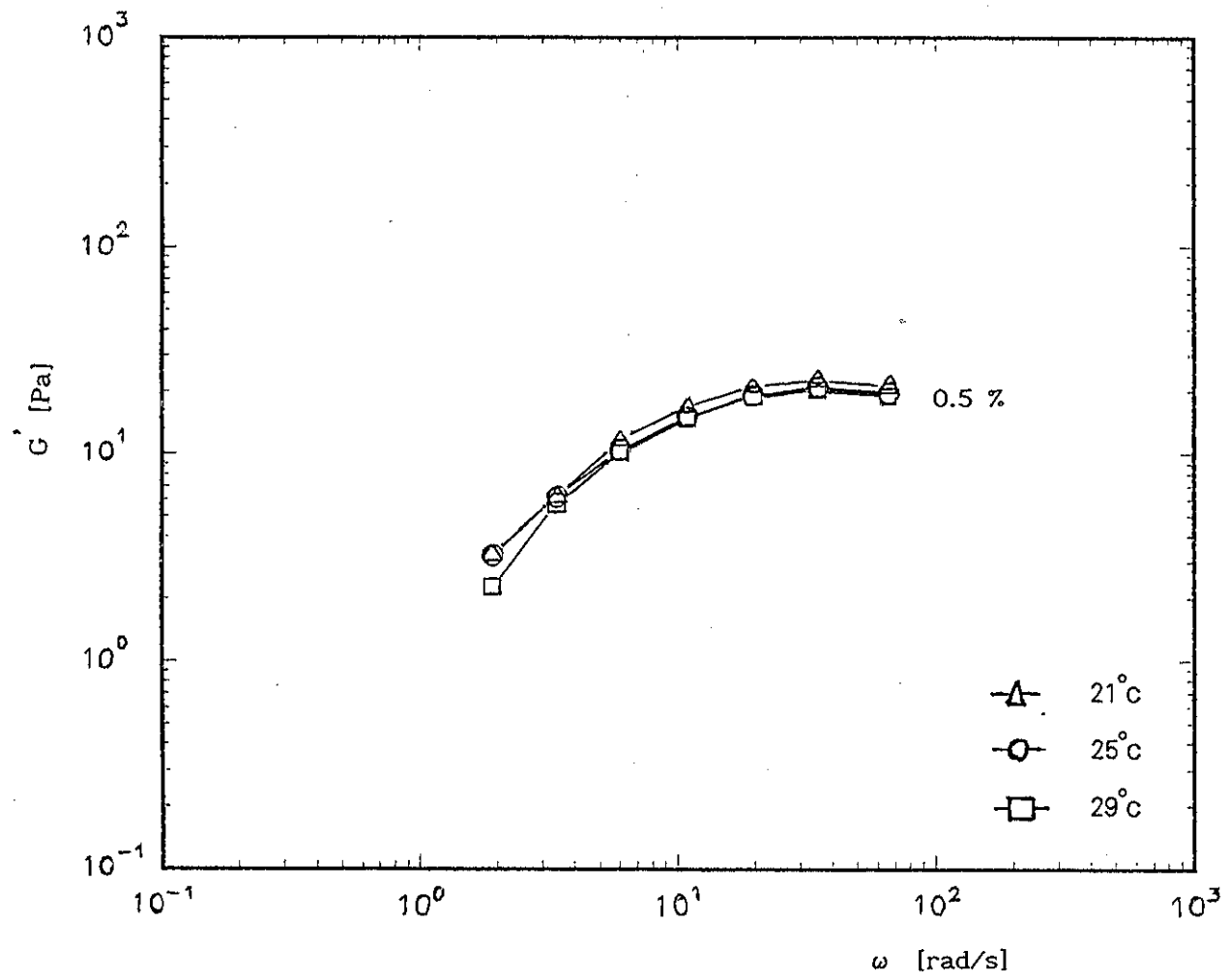
ภาพประกอบ 4.6  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายเซนเทนกันสำเร็จที่เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตร ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

(-○-) วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน เป็นค่าเฉลี่ยแล้วจากการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

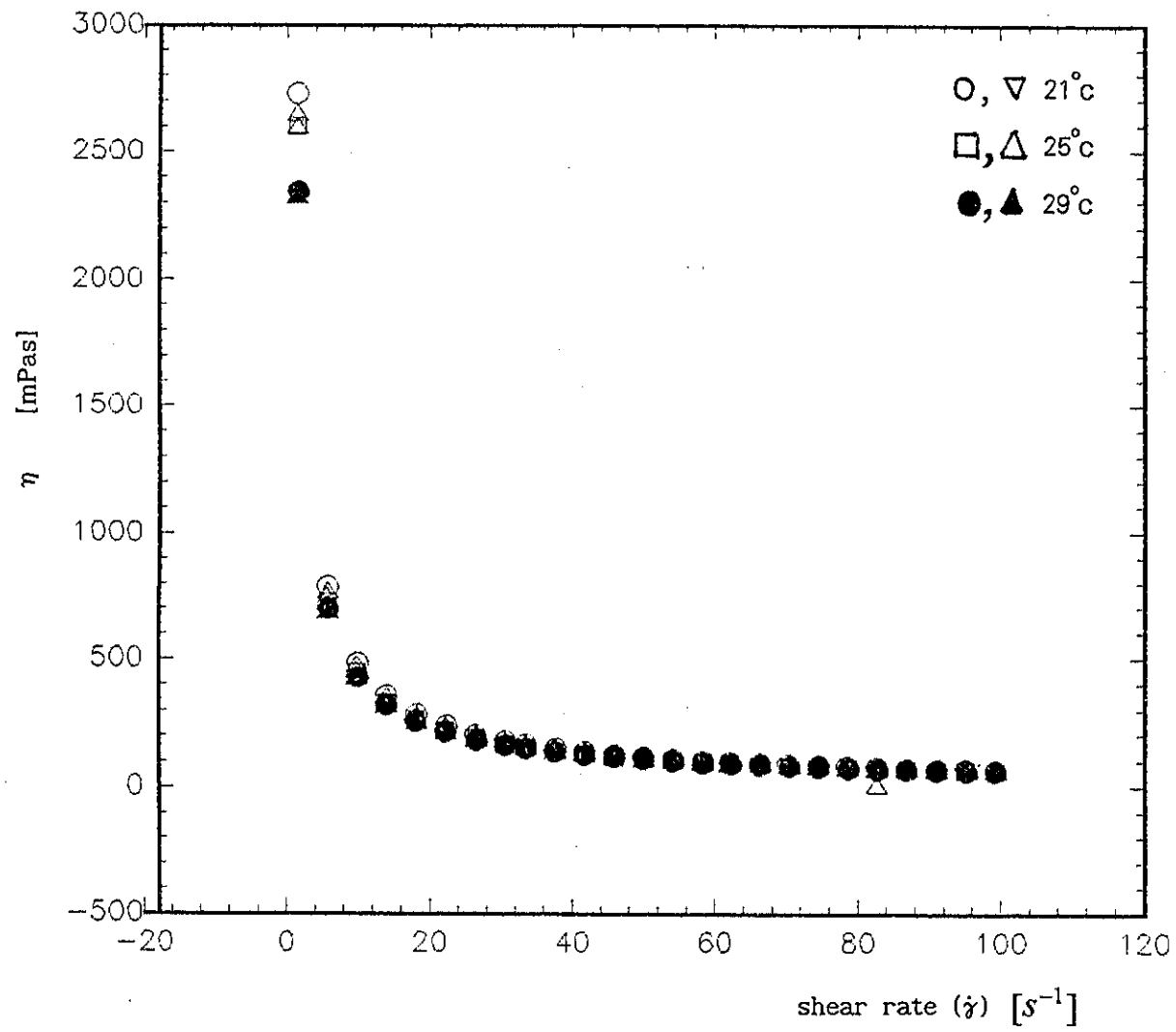
(-△-) วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 6 เดือน เป็นค่าเฉลี่ยแล้วจากการวัดซ้ำ 3 ครั้ง



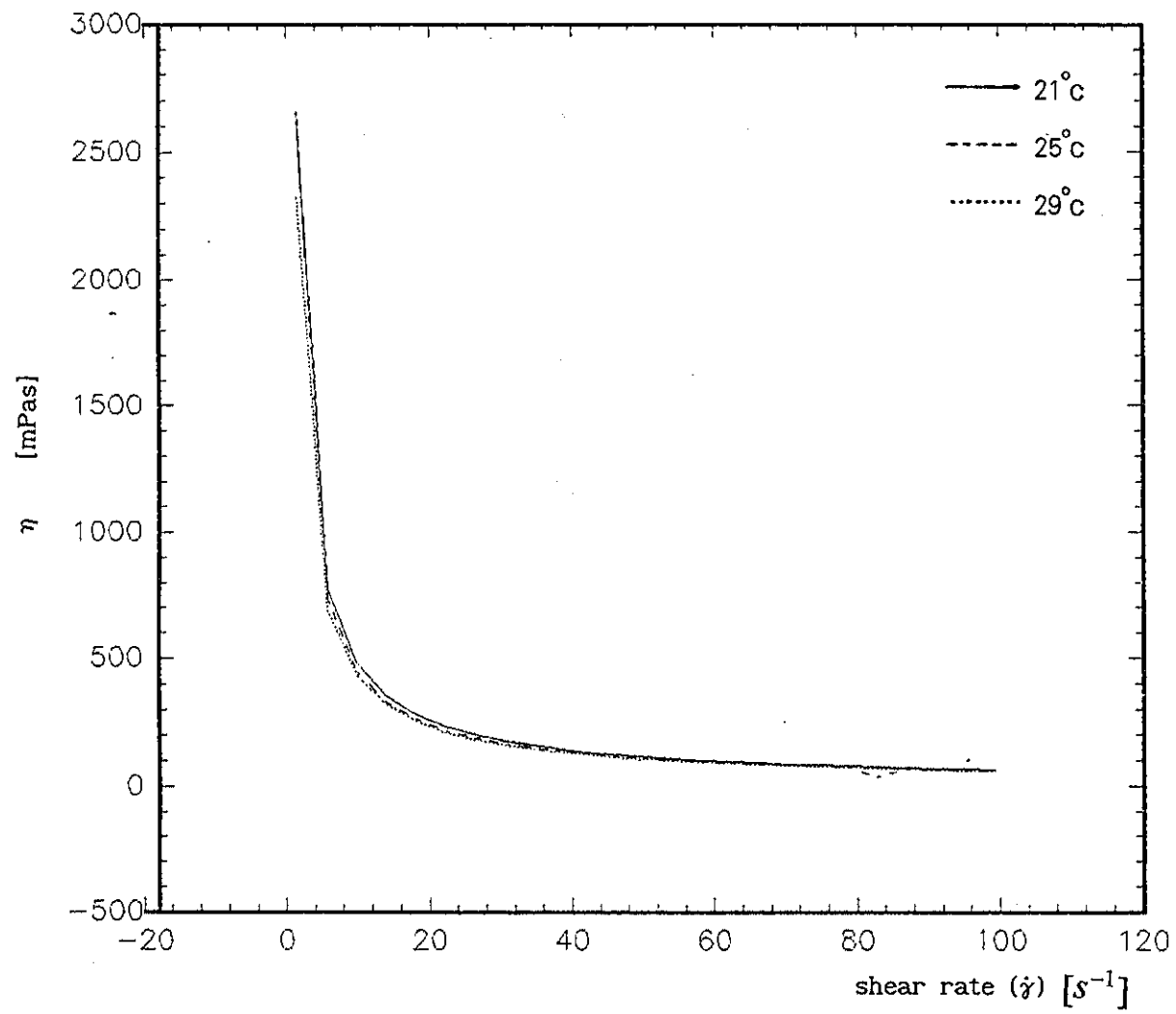
ภาพประกอบ 4.7  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนแทนแกมส์สำเร็จที่เตรียมเป็นปริมาตร 50 ลิตรความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก  
 (●, ▲, ■) หรือ (○, △, □) คือการสุ่มตักตัวอย่างในถัง 3 บริเวณ



ภาพประกอบ 4.8 G' กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนแทนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

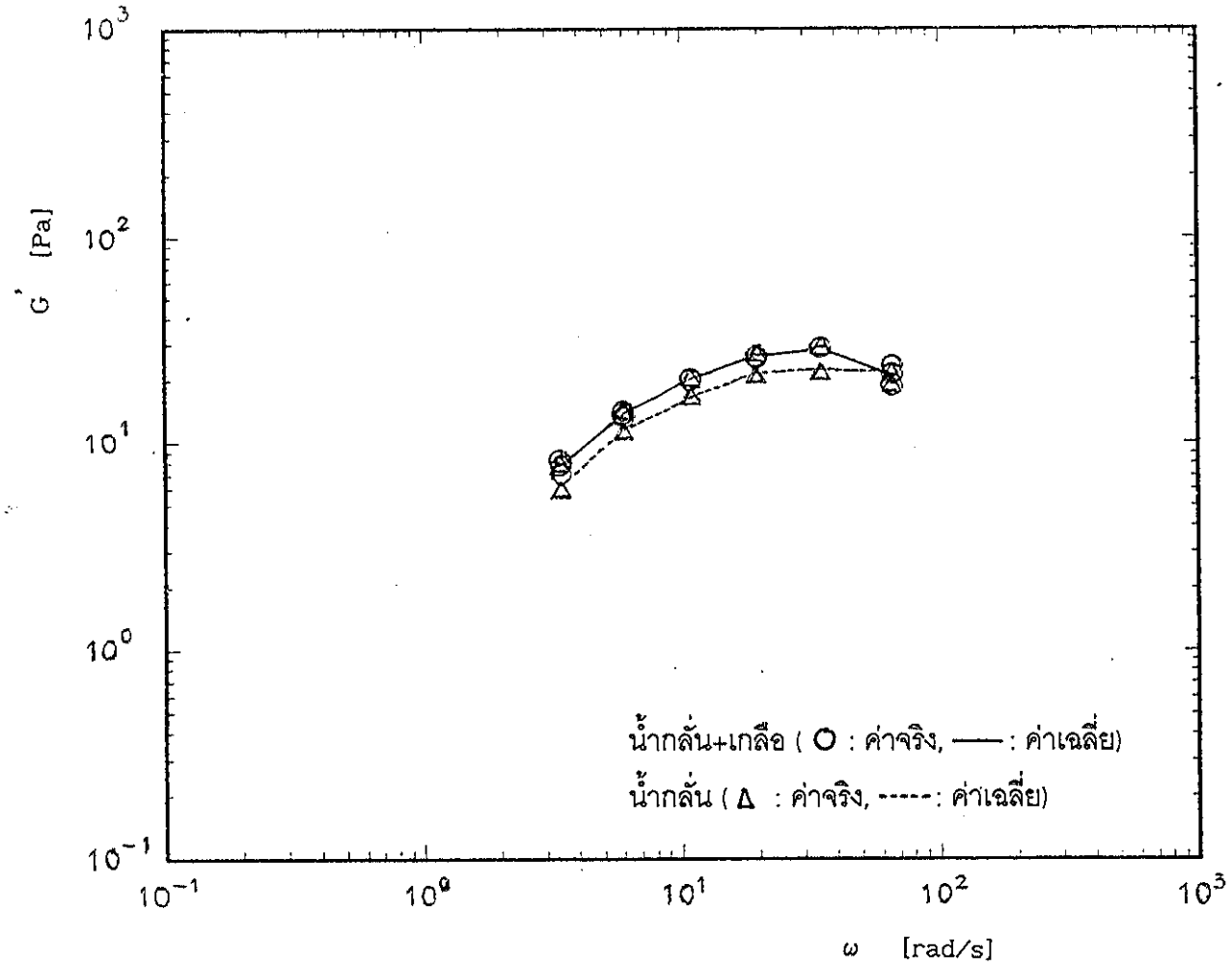


ภาพประกอบ 4.9 ข้อมูลการกระจาย  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายเซนแทนกัมสำเร็จที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

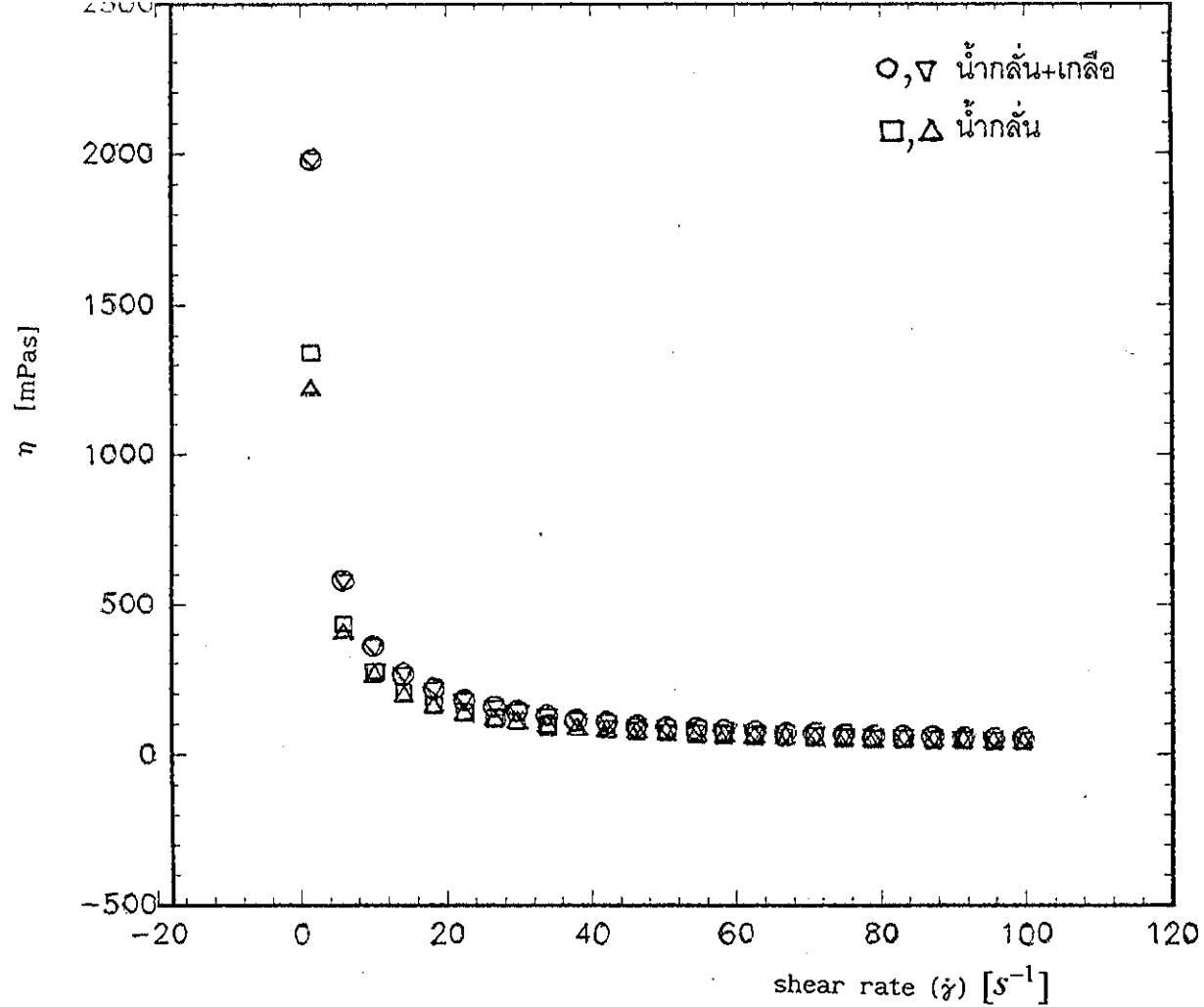


ภาพประกอบ 4.10 ค่าเฉลี่ย  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายเซนแทรนกับสำเริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

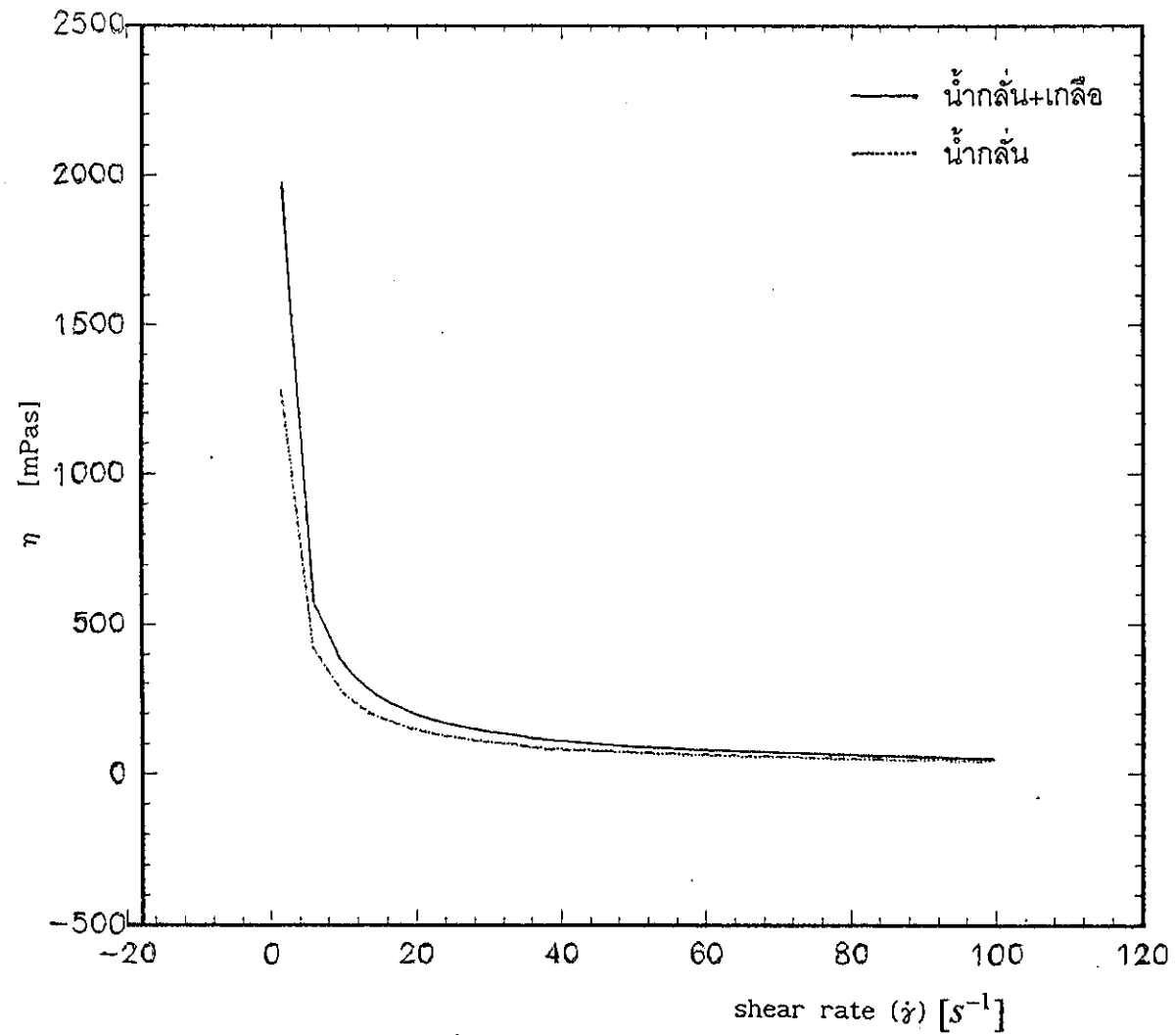




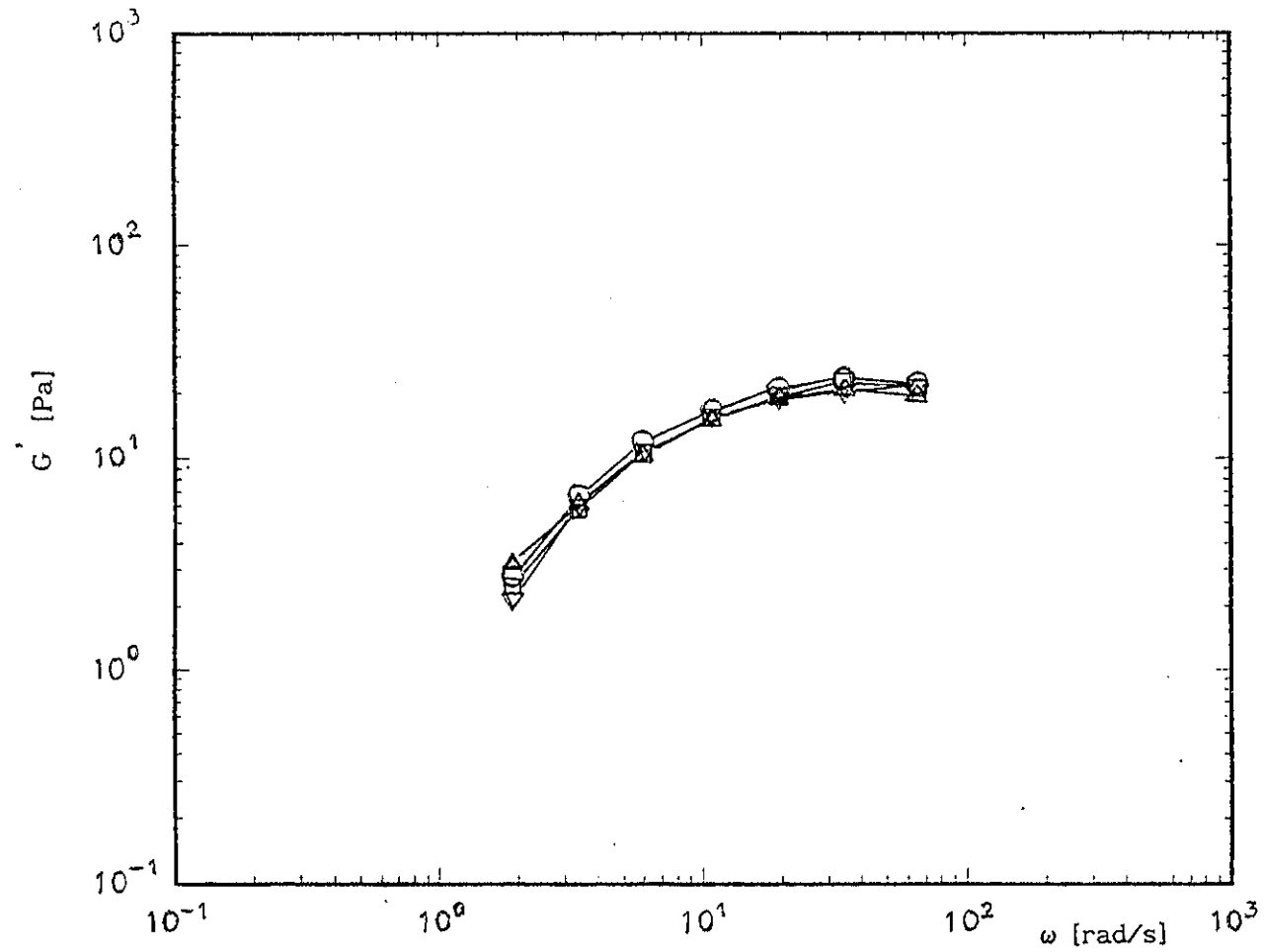
ภาพประกอบ 4.11  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายเซนแทรนกับสำเร็จที่ใช้น้ำกลั่น+เกลือ (น้ำกรอง)  
 และน้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย



ภาพประกอบ 4.12 ข้อมูลการกระจาย  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายเซนแทนกัมสำเร็จ  
 ที่ใช้น้ำกลั่น+เกลือ (น้ำกรอง) และน้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย

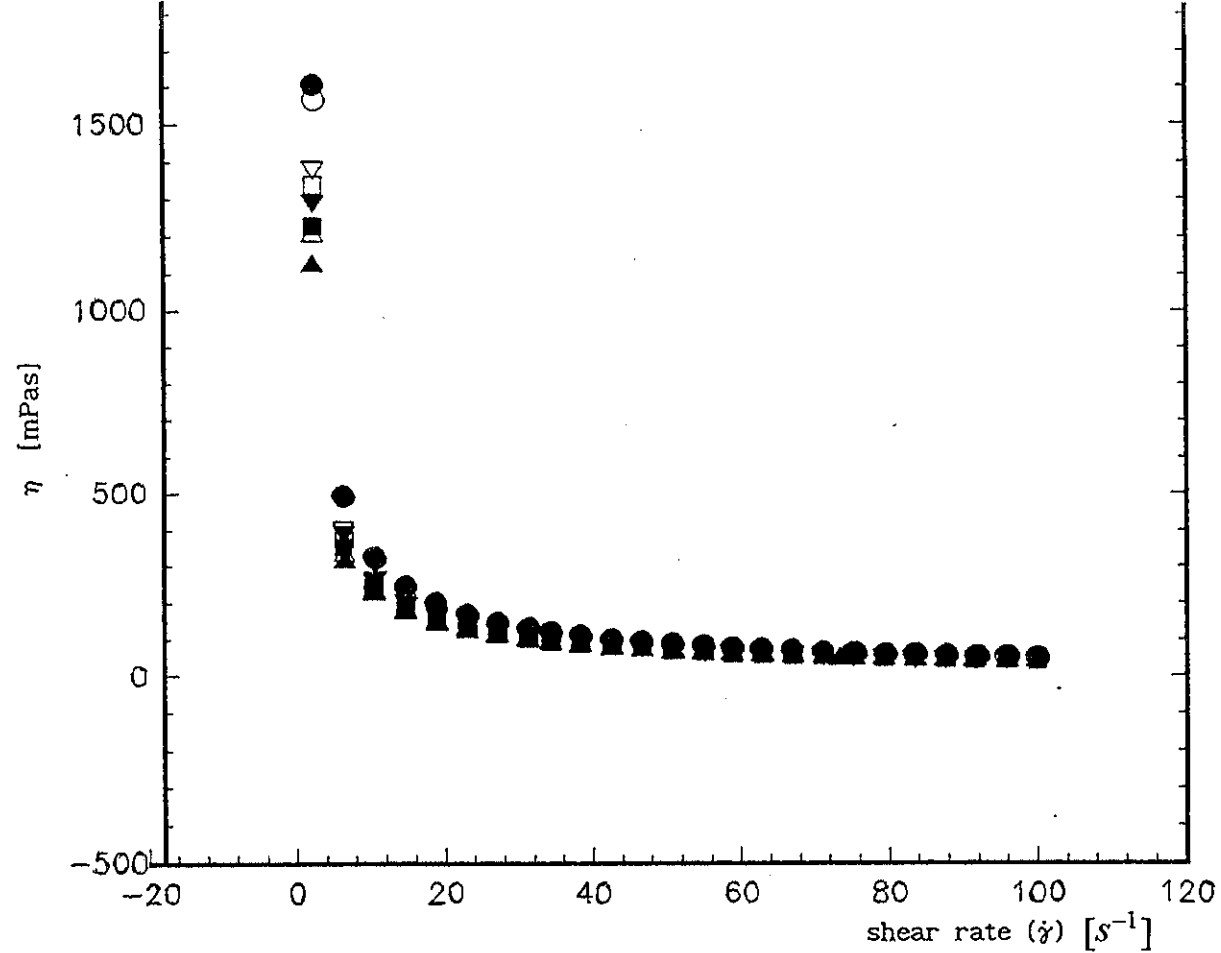


ภาพประกอบ 4.13 ค่าเฉลี่ย  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกับสำเร็จที่ใช้  
น้ำกลั่น+เกลือ และน้ำกลั่น เป็นตัวทำละลาย



ภาพประกอบ 4.14  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนแรนกับสำเร็จที่เติมระดับเกลือ ร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน

- 0 (○) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย  $1747 \mu S/cm$
- 0.05 (▽) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย  $3110 \mu S/cm$
- 0.1 (□) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย  $4640 \mu S/cm$
- 0.15 (▲) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย  $5550 \mu S/cm$



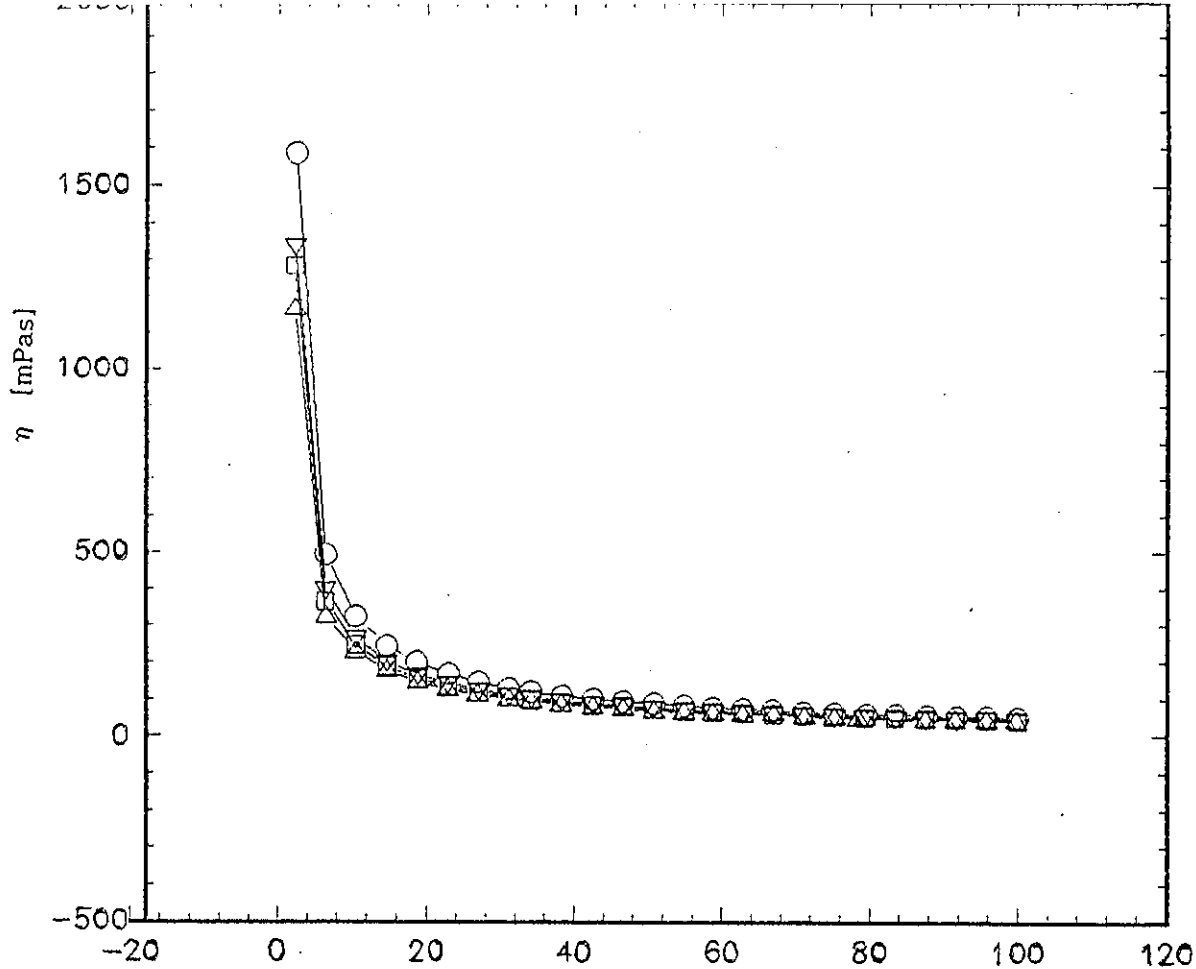
ภาพประกอบ 4.15 การกระจายของข้อมูล  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่เดิมระดับเกล็ด ร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน

0 (○, ●) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย 1747  $\mu S/cm$

0.05 (▽, ▼) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย 3110  $\mu S/cm$

0.1 (□, ■) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย 4640  $\mu S/cm$

0.15 (Δ, ▲) ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย 5550  $\mu S/cm$



ภาพประกอบ 4.16 ค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $\eta$  กับ shear rate ของสารละลายแซนแทนที่เตรียมระดับเกลือ

ร้อยละโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน

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

ยิ่งมีการพันกันรุนแรงมากกว่า ดังนั้นสารละลายจะแสดงลักษณะคล้ายของแข็ง (solid - like) มากกว่าของเหลว ในตัวอย่างที่ให้ไว้ในที่นี้ บริเวณเนินสิ้นสุดเมื่อ  $G'$  และ  $G''$  มีค่าประมาณ 3-5 Pa

มีจุดน่าสนใจที่ว่า ในช่วงการทดลองของ Siripatana (1992) นั้น  $G'$  (ไม่ใช่  $G''$ ) มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเสียรูป (deformation) ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1 และ 4.2 ในขณะที่  $G'$  เปลี่ยนอย่างเห็นได้ชัด เมื่อความเครียด และ  $\omega$  เปลี่ยน แต่  $G''$  ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความเครียด หรือ  $\omega$  ซึ่งก็ไม่น่าแปลกใจ เพราะ  $G''$  เกี่ยวข้องกับ อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ และสารละลายมากกว่า ขณะที่  $G'$  เกี่ยวข้องอย่างมากกับ ความแข็ง (stiffness) ของโมเลกุลพอลิเมอร์ พอ ๆ กับความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์

ด้วยเหตุผลดังกล่าว เราจึงมุ่งเน้นในการอภิปรายการเปลี่ยนแปลงของ  $G'$  เทียบกับ ปัจจัยอื่น ๆ โดยไม่พิจารณาถึง  $G''$  ในช่วงลิเนียร์วิสโคอีลาสติกนั้น  $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^*$  และคุณสมบัติทางรีโอโลยีอื่น ๆ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันโดย relaxation spectra ความจริงนี้เป็นที่ยอมรับกันสำหรับรีโอโลยีของพอลิเมอร์ ในระบบของไหลแซนแทรน ความจริงดังกล่าวถูกอธิบายเหตุผลไว้โดย Thurston (1981a, 1981b) กล่าวอีกนัยหนึ่ง ข้อมูล  $G'$  ที่แสดงในที่นี้แฝงข้อมูลซึ่งเพียงพอที่จะบอกลักษณะวิสโคอีลาสติกของบรธ

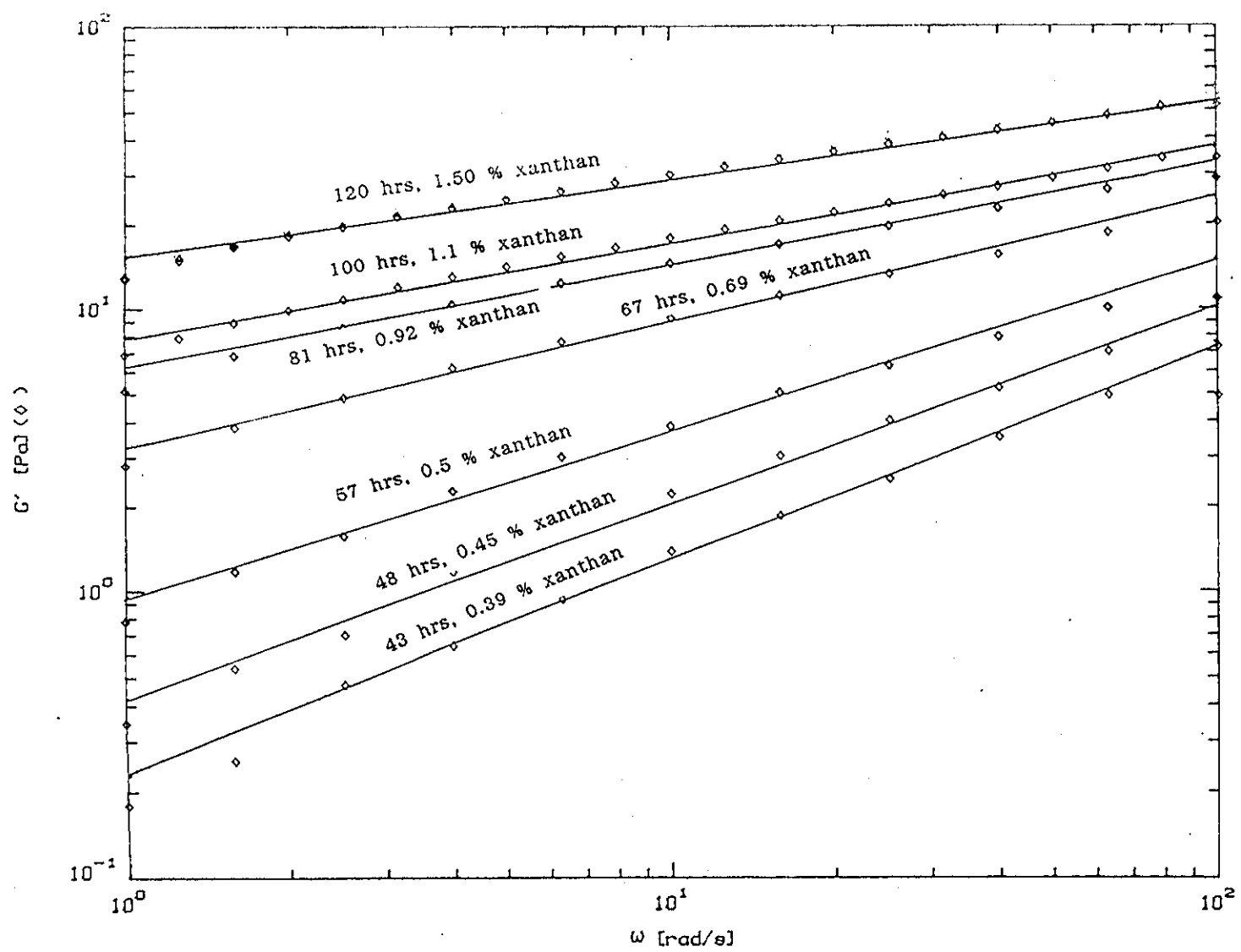
### 3.1.1.2 กราฟ $G' - \omega$ โดยทั่วไป สำหรับบรธที่เกิดจากการหมักของแซนแทรน

จากการเปรียบเทียบ มากกว่า 10 ชุด ของกราฟ  $G' - \omega$  ซึ่งได้รับจาก กะ (batch) การหมักต่าง ๆ กัน จะมีรูปร่างเหมือนกันในช่วง  $10^1 - 10^2$  Pa ( $1 < \omega < 100$  rad/s) (Siripatana, 1992)

กราฟ  $G' - \omega$  ทั่วไปส่วนใหญ่มีแบบแผนที่ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเป็นของบรธจริงหรือที่ได้จากการละลายแซนแทรนกัมสำเร็จ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.19 ภาพประกอบ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลอง และกราฟ  $G' - \omega$  ทั่วไปที่ฟิตดีที่สุด ซึ่งแปลงมาจากข้อมูลการทดลอง

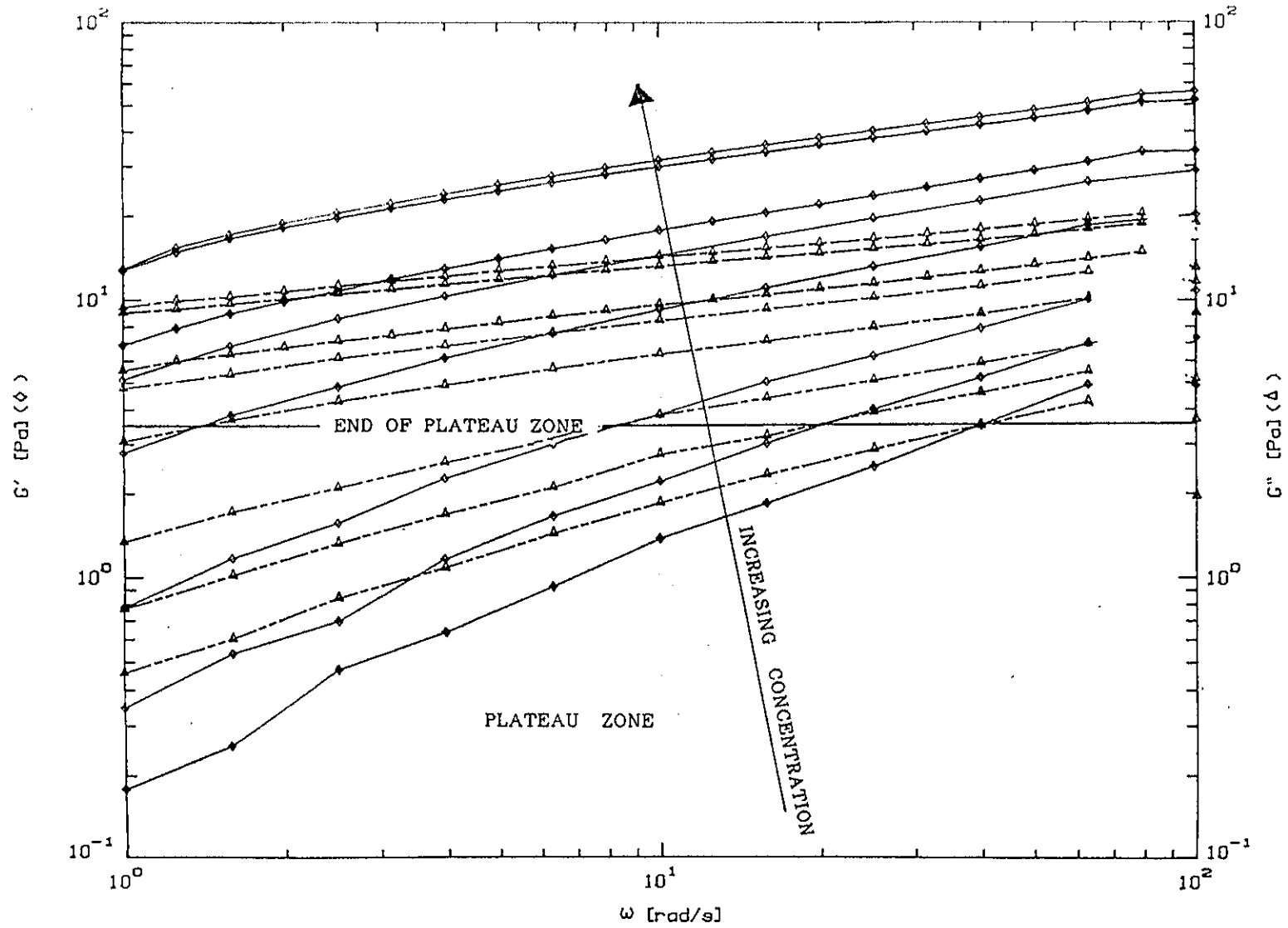
กระสวนของกราฟ  $G' - \omega$  ทั้งหมดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการยกกำลัง ดังนี้

$$G' = C \omega^P \quad (4.1)$$

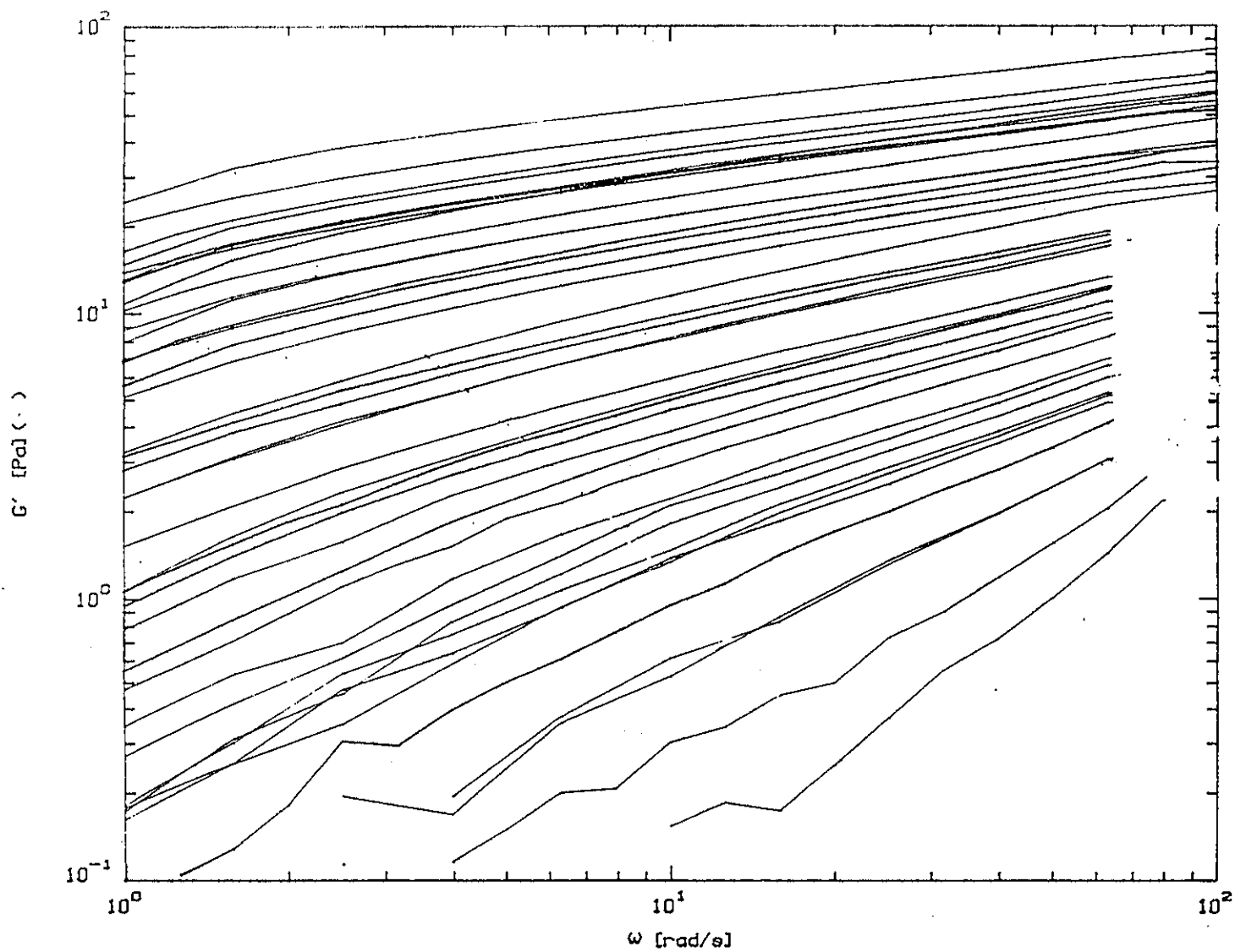


ภาพประกอบ 4.17 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ  $G'-\omega$  ของบรอร์แซนแรน (◇) เส้นตรงที่บ  
 แสดงได้โดยการใช้การคำนวณจากสมการ (4.2) ที่มา: Siripatana (1992)





ภาพประกอบ 4.18 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ  $G'-\omega$  และ  $G''-\omega$  ที่แสดงจุดสิ้นสุดบริเวณเนิน (plateau zone) ที่  $G'$  เท่ากับ  $G''$  (batch 6, UQM 1883) ที่มา: Siripatana (1992)



ภาพประกอบ 4.19 แบบทั่วไป (general pattern) ของกราฟ  $G'-\omega$  ที่ได้รับจากการพล็อตหลายชุด  
ของข้อมูล จากกะ (batche) ต่าง ๆ ที่มา: Siripatana (1992)

ซึ่งเป็นลักษณะทำนองเดียวกับ power law model ในการไหลแบบ steady shear flow C และ P เรียกว่า Elastic Intensity Index และ Elasticity Index ตามลำดับ ซึ่งจะบอกว่าโครงสร้างของไหลเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อการเพิ่มขึ้นของการบิดรูปเนื่องจากการสั่นที่รุนแรง 2 ตัวแปรดังกล่าว อธิบายเชิงเอมไพริคัลถึงลักษณะลิเนียร์วิสโคอีลาสติกของของไหล

ข้อมูลสำหรับบรอร์ ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น เมื่อพล็อตระหว่าง  $\ln C$  และ  $P$  ดังนั้น ข้อมูลเหล่านี้สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์เดียวกัน คือ

$$G' = C \omega^{(a \ln(C) + b)} \quad (4.2)$$

โดยที่  $a$  และ  $b$  เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่า  $P$  ขึ้นอยู่กับ  $C$  อย่างไร ในชุดข้อมูลนี้  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ ( $a = -0.1186$ ,  $b = 0.5865$ ) สมการ (4.2) สามารถนำไปใช้สำหรับชีวโมเลกุล สำหรับบรอร์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์สายพันธุ์ *X. Campetris* เพราะ  $G'$  เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ต่อโครงสร้างทางเคมีของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นมันจึงมีประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของบรอร์ที่เกิดจากการหมัก ขณะที่การหมักกำลังดำเนินอยู่

### 3.1.2 การเปรียบเทียบ สมบัติทางรีโอโลยีของบรอร์แซนแนนจริงกับสารละลายแซนแนนกัมสำเร็จ (food grade)

สารละลายแซนแนนกัมสำเร็จต่างจากบรอร์แซนแนนจริงในหลายๆ ด้าน ประการแรก เมื่อ  $\omega$  มากกว่า  $1 \text{ rad/s}$  และ ความเข้มข้นแซนแนนร้อยละโดยน้ำหนักสูงกว่า  $0.2$   $G'$  มักจะสูง กว่า  $G''$  (เหนือบริเวณเนิน) ประการที่สอง ความชันของ  $G'$  จะมีความชันน้อยกว่า ตัวอย่างจาก บรอร์จริงอย่างเห็นได้ชัด ประการที่สาม ที่ความเข้มข้นเดียวกัน สารละลายแซนแนนกัมสำเร็จมีค่า  $\eta$  และ  $\eta^*$  มากกว่าของบรอร์แซนแนนจริงในช่วง shear rate  $1-100 \text{ s}^{-1}$  ประการสุดท้าย สารละลายแซนแนนกัมสำเร็จจะเป็น shear thinning มากกว่าบรอร์แซนแนนจริง ทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นว่า สารละลายแซนแนนกัมสำเร็จที่ใช้ทดสอบ ได้รับการบำบัดทางกายภาพและทางเคมีใน หลาย ๆ ด้าน ทำให้การพันกันหรือพันธะระหว่างโมเลกุล มีความแข็งแรงกว่าแซนแนนธรรมชาติ มันจึงมีความคล้ายของแข็งและเสถียรกว่าแซนแนนธรรมชาติ ขั้นตอนวิธีการดัดแปลงโครงสร้างนั้นผู้ผลิตไม่ได้เปิดเผยไว้ อย่างไรก็ตามผลเหล่านี้มีความคล้ายกับของ Santore and Prud'homme (1990) ผู้ซึ่งตรวจสอบ สมบัติทางรีโอโลยีของแซนแนนที่ถูกทำให้สูญเสียสภาพธรรมชาติ (denature) แล้ว คือถูกให้ความร้อนที่  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที ตามด้วยการเติมสารละลายยูเรียความเข้มข้น  $4 \text{ โมลาร์}$  แล้วค่อย ๆ หล่อเย็น เขาพบว่าทั้ง

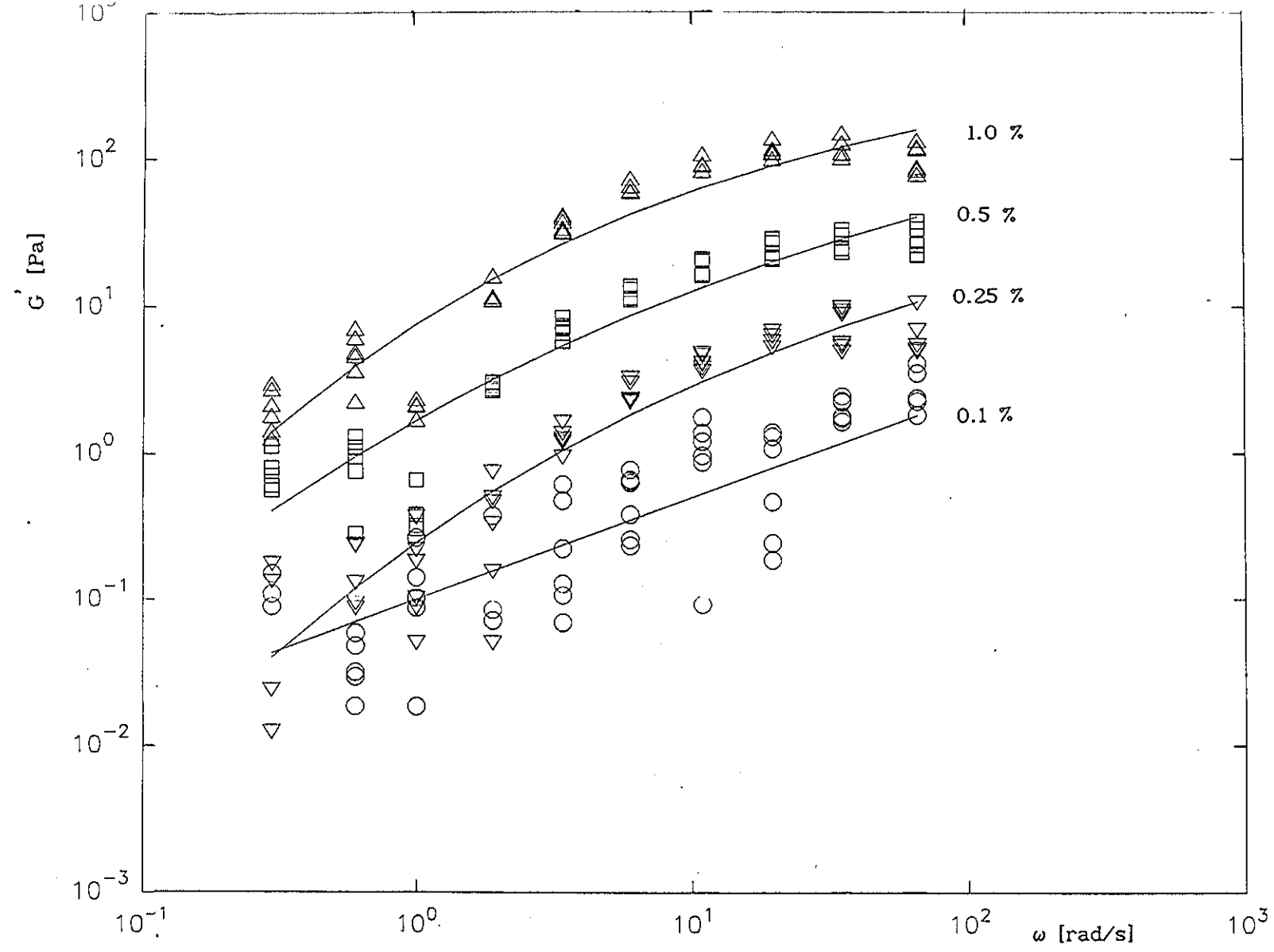
shear viscosity ( $\eta$ ) และ complex viscosity ( $\eta^*$ ) จะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าในแซนแซนธรรมชาติ ซึ่งไม่ได้บำบัดด้วยยูเรีย Smith and Pace (1982), Pace and Righelato (1981) และ Margaritis and Pace (1984) ได้อธิบายแนวทางการปฏิบัติเชิงอุตสาหกรรมในการเก็บเกี่ยว (recovery) และการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี ของแซนแซน อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถอภิปรายถึงผลกระทบของการบำบัดที่มากไปกว่านี้ได้ เพราะเราไม่ทราบขั้นตอนการดัดแปร (modification) และการทดสอบแซนแซนก็ตามสำเร็จ

จากการทดลองวัดค่า  $G'$  กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้น แสดงได้ดังภาพประกอบ 4.20 เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 4.20 เทียบกับภาพประกอบ 4.17 ซึ่งแสดงไว้ในภาพประกอบ 4.21 พบว่าในช่วงพิสัยความถี่ต่ำ ๆ (0-6 rad/s) กราฟ  $G' - \omega$  ของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้นแสดงลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่ของบรอร์แซนแซนจริงเป็นเส้นตรง และเมื่อพิสัยความถี่สูงขึ้น กราฟ  $G' - \omega$  ของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้นเริ่มเป็นเส้นตรงและขนานไปกับกราฟ  $G' - \omega$  ของบรอร์แซนแซนจริง

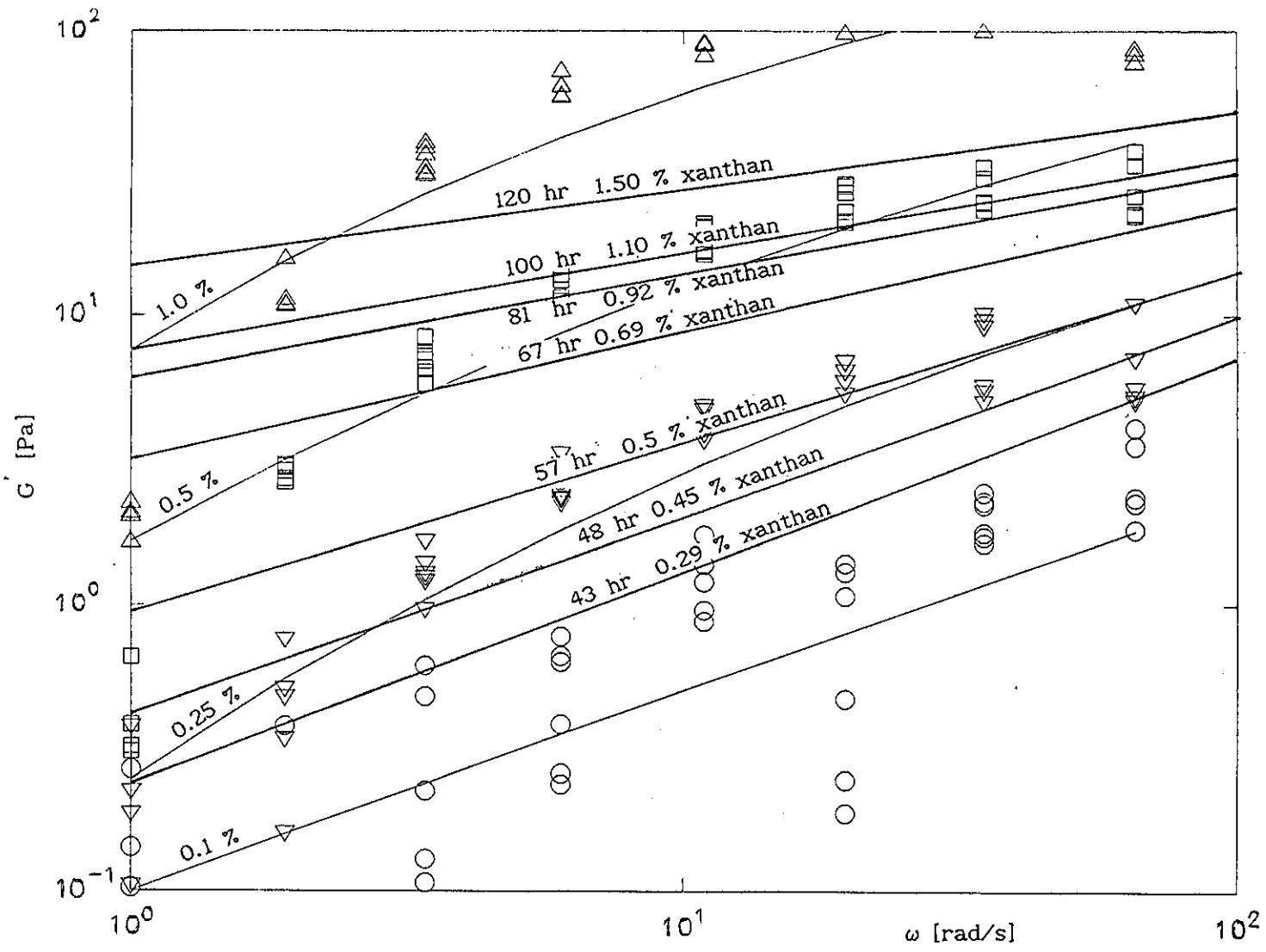
เมื่อพิจารณาช่วงพิสัยความถี่ 6 - 65.4 rad/s ซึ่งเป็นช่วงที่กว้างเพียงพอ สำหรับที่เราจะใช้แทนอัตราการเฉือน (shear rate) หรือเทียบเท่าพิสัยความถี่ (frequency) ในช่วงเดียวกันกับการหมัก กล่าวคือส่วนใหญ่แล้วบรอร์แซนแซนที่หมักจะได้รับการผสมในช่วงนี้ ในช่วงพิสัยความถี่ต่ำกว่านี้ไม่ใช่ช่วงที่เกิดขึ้นในบรอร์แซนแซนส่วนใหญ่ของถังหมักในระหว่างการหมัก

จากการทดลองเราได้พยายามที่จะเลือกช่วงพิสัยความถี่ให้ครอบคลุม แต่ไม่สามารถเลือกได้ เนื่องจากไม่สามารถเทียบเคียงกราฟ  $G' - \omega$  ของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้น และบรอร์แซนแซนจริง ตลอดช่วงพิสัยความถี่ดังกล่าว (0-65.4 rad/s) ได้ และจากเหตุผลที่ว่าช่วงพิสัยความถี่ต่ำ ไม่น่าจะมีอิทธิพลต่อการนำไปประยุกต์ใช้มากนัก เพราะเป็นช่วงอัตราการเฉือนที่มีส่วนน้อยของบรอร์แซนแซนที่หมักที่ได้รับอัตราการเฉือนระดับนี้ เพราะปกติในการออกแบบถังหมักมักออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณที่ของไหลอยู่นิ่ง (stagnant zone) อัตราการเฉือนในช่วงต่ำ ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณที่ของไหลอยู่นิ่งจะมีน้อยมาก ดังนั้นในการปฏิบัติเพื่อนำไปใช้งานนั้น จึงไม่จำเป็นต้องเทียบเคียงรีโอโลยีของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้น กับบรอร์แซนแซนจริงในช่วงพิสัยความถี่ที่ต่ำมากก็ได้ (0-6 rad/s)

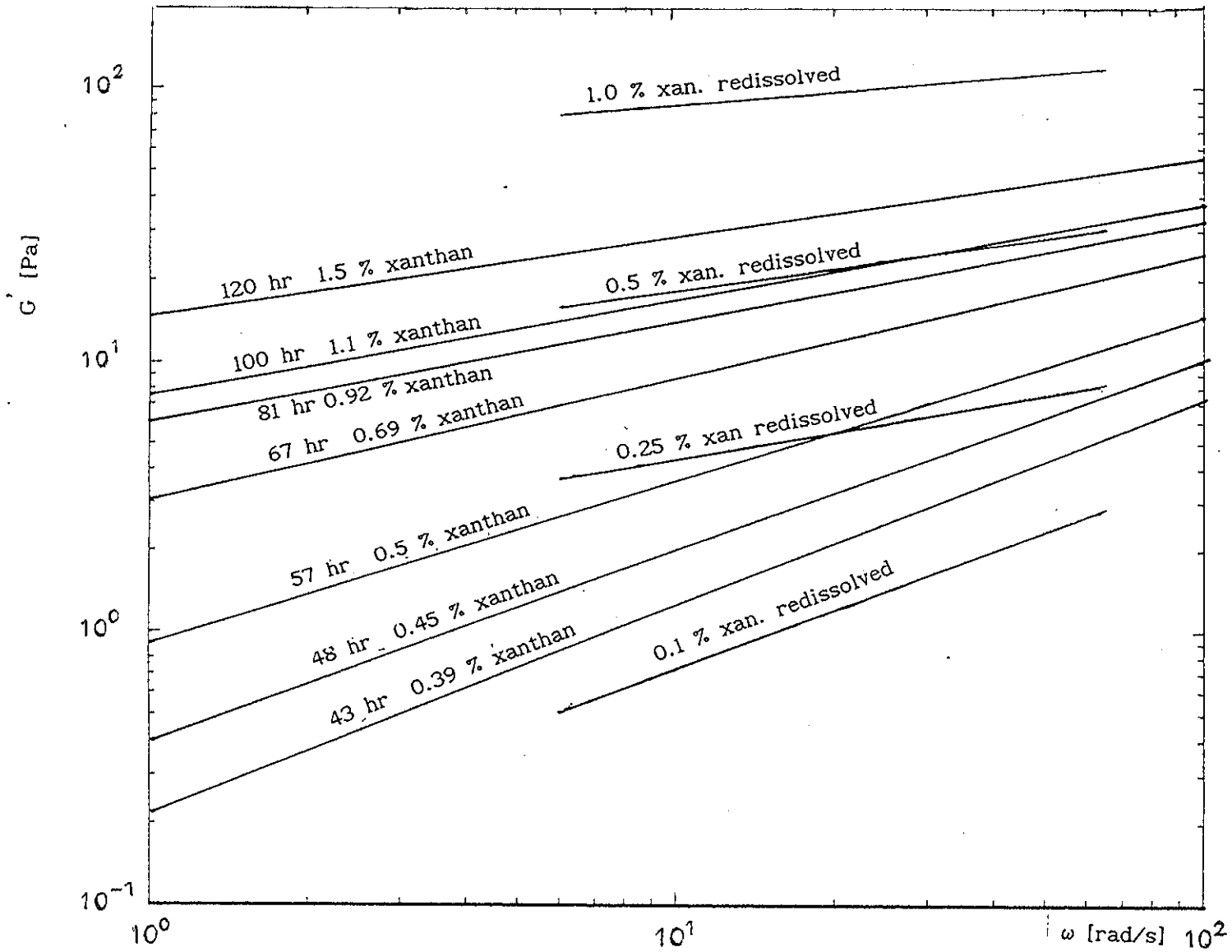
ผลการเทียบเคียงรีโอโลยีของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้น กับบรอร์แซนแซนจริง ในช่วงพิสัยความถี่ที่พิจารณา (6-65.4 rad/s) แสดงได้ดังภาพประกอบ 4.22 จะเห็นว่าลักษณะกระสวน (pattern) ของเส้นกราฟในช่วงที่เราเทียบเคียงนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นค่าเดียวกันนั้น กราฟของสารละลายแซนแซนที่เตรียมขึ้น จะอยู่สูงกว่ากราฟ ของบรอร์แซนแซนจริงเสมอ นั่นคือ มันมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดมากกว่า และ



ภาพประกอบ 4.20 กราฟ  $G'-\omega$  ของสารละลายเซนแทนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ 4.21 การเทียบเคียงสมบัติทางรีโอโลยีในส่วนของกราฟ  $G'-\omega$



ภาพประกอบ 4.22 กราฟ  $G'-\omega$  ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ที่ช่วง  $\omega=6-65.4$  rad/s

ต้องใช้ความเค้น (stress) มากกว่าบรอนแซนแรนจริงในการทำให้สารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ เคลื่อนที่ด้วยอัตราการเฉือนที่เท่ากัน

ในการเทียบเคียง ถ้าเราต้องการนำผลที่ได้ จากการศึกษาสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ ไปใช้กับบรอนแซนแรนจริงนั้น เราต้องเทียบเคียงบรอนโดยอาศัยรีโอโลยี เป็นตัวบอก มากกว่าที่จะใช้ความเข้มข้นโดยตรง ในการนำไปประยุกต์ใช้

การเทียบเคียงสามารถทำได้โดยใช้สมการ (4.1) ที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ เนื่องจากลักษณะกราฟจากการทดลอง ที่ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการนี้เทียบเคียงในช่วงความถี่นี้ได้

จากภาพประกอบที่เส้นกราฟ  $G' - \omega$  จากผลการทดลองของเราไม่ขนานไปกับของบรอนจริงทั้งเส้นนั้น อาจมีสาเหตุมาจาก ความผิดพลาดในการทดลอง หรือปัจจัยอะไรบางอย่างที่ทำให้มันเบี่ยงเบนไปโดยที่เราไม่สามารถบอกได้ชัดเจน แต่โดยภาพรวมแล้ว เส้นกราฟจากการทดลอง (สารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ) ไม่ได้แตกต่างไปจากบรอนแซนแรนจริงมากนัก

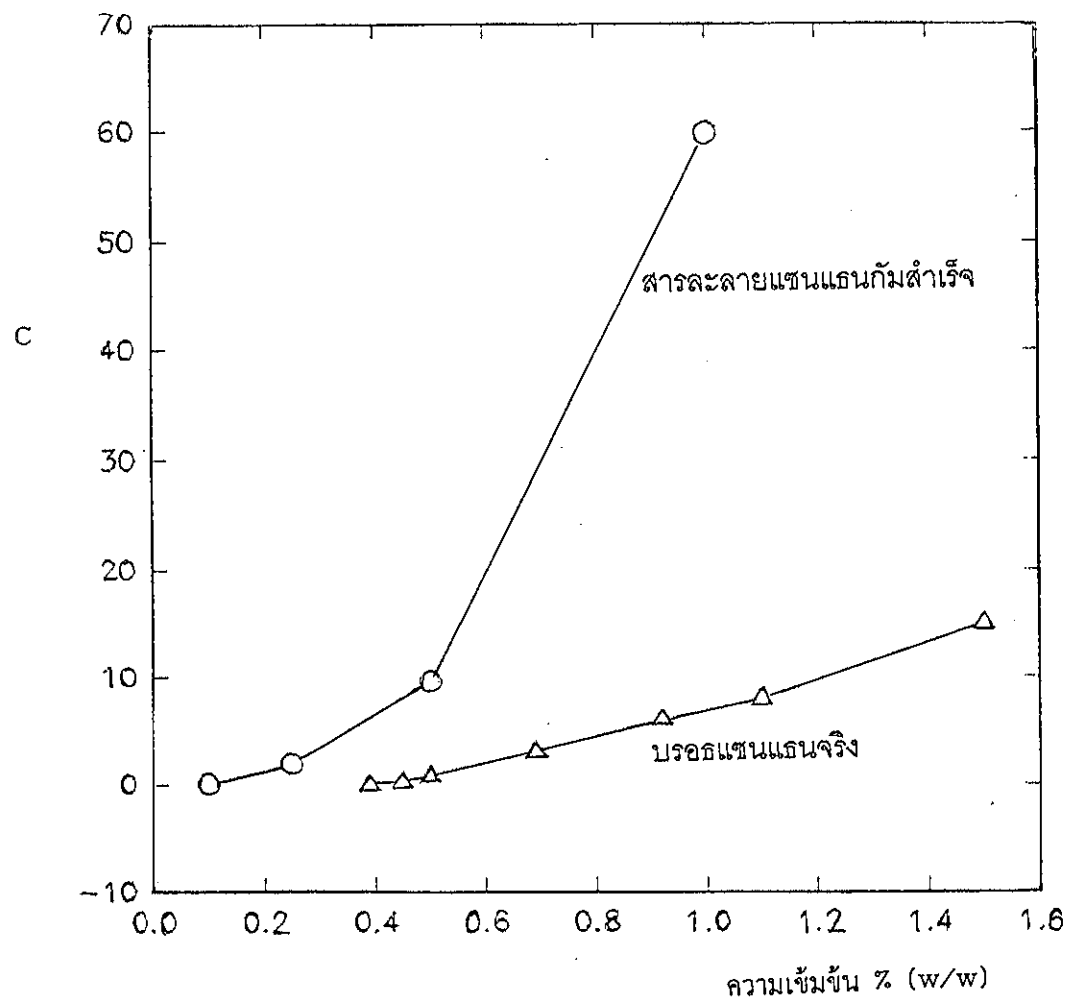
ในการเทียบเคียง สมการ (4.1) เข้ากับข้อมูลจากการทดลอง  $G' - \omega$  ของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ ในช่วง  $\omega$  ที่พิจารณา เพื่อให้ได้ค่า C (Elastic intensity Index) และ P (Elasticity Index) ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ และจากสมการ (4.2) พบว่า P เป็นฟังก์ชันของ C ดังนั้นเราจึงเลือกพิจารณา C กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับของบรอนแซนแรนจริง ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ

4.23 เมื่อพิจารณาเทียบเคียงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จ กับความเข้มข้นของบรอนแซนแรนจริงโดยพิจารณาจากค่า C ที่เท่ากัน ให้ผลแสดงดังภาพประกอบที่

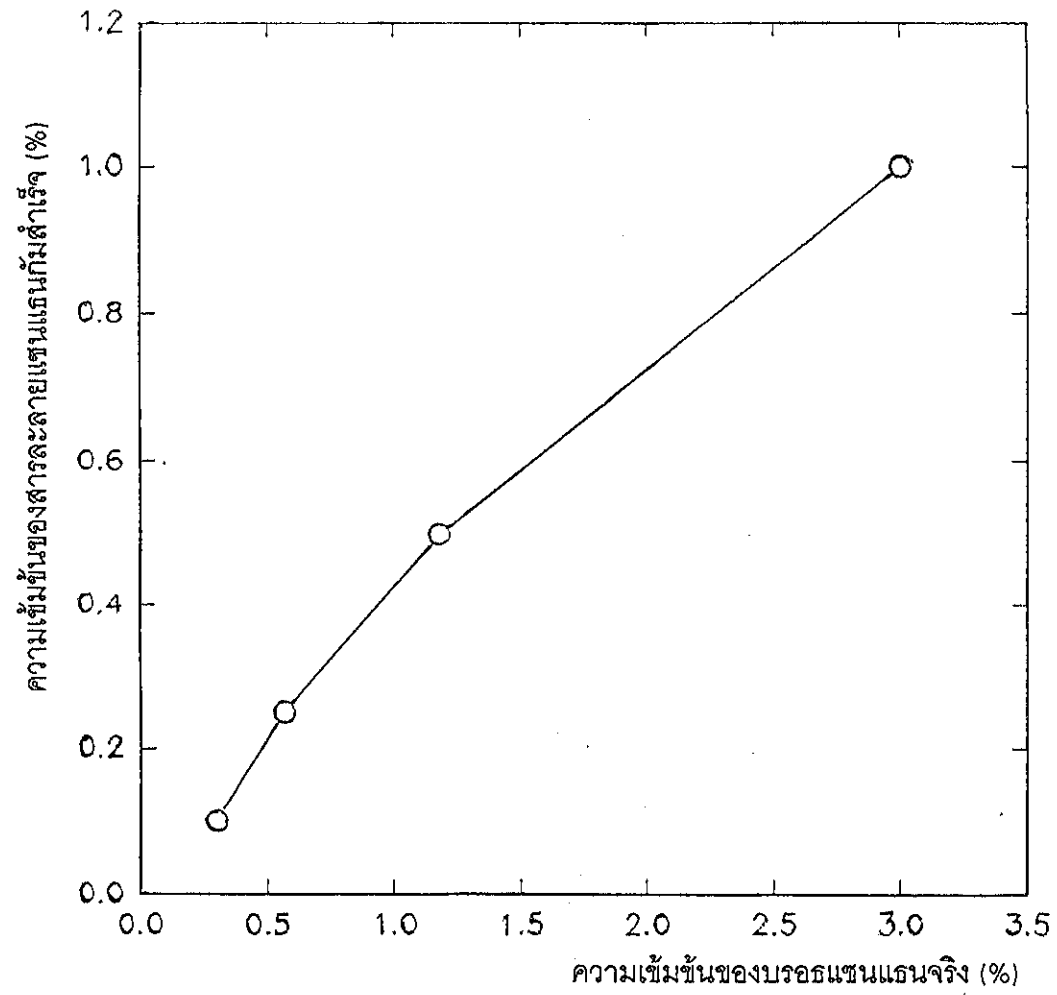
4.24 ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มข้นของบรอนแซนแรนจริงจะเทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จที่มีค่าลดลง ตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของบรอนแซนแรนจริงร้อยละ 0.57 โดย น้ำหนัก เทียบเคียงเป็นความเข้มข้นของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

ในการเทียบเคียง  $G''$  จากผลการทดลองของเราพบว่า  $G''$  ค่อนข้างคงที่ในช่วง  $\omega$  ที่พิจารณา ดังแสดงในภาพประกอบ 4.25 เมื่อเทียบเคียงกราฟ  $G'' - \omega$  ของสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จกับของบรอนแซนแรนจริงได้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 4.27 ซึ่งจะเห็นว่าเราไม่สามารถเทียบเคียงกราฟ  $G'' - \omega$  ระหว่างสารละลายแซนแรนแกมสำเร็จกับบรอนแซนแรนจริงได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า หลังการถูกดัดแปลงทางกายภาพและเคมีแล้ว แซนแรนแกมมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ดังนั้นการใช้แซนแรนแกมสำเร็จในการศึกษาเพื่อการออกแบบถังหมักจริงต้องทำอย่างระมัดระวังและต้องรู้ข้อจำกัดอย่างชัดเจน

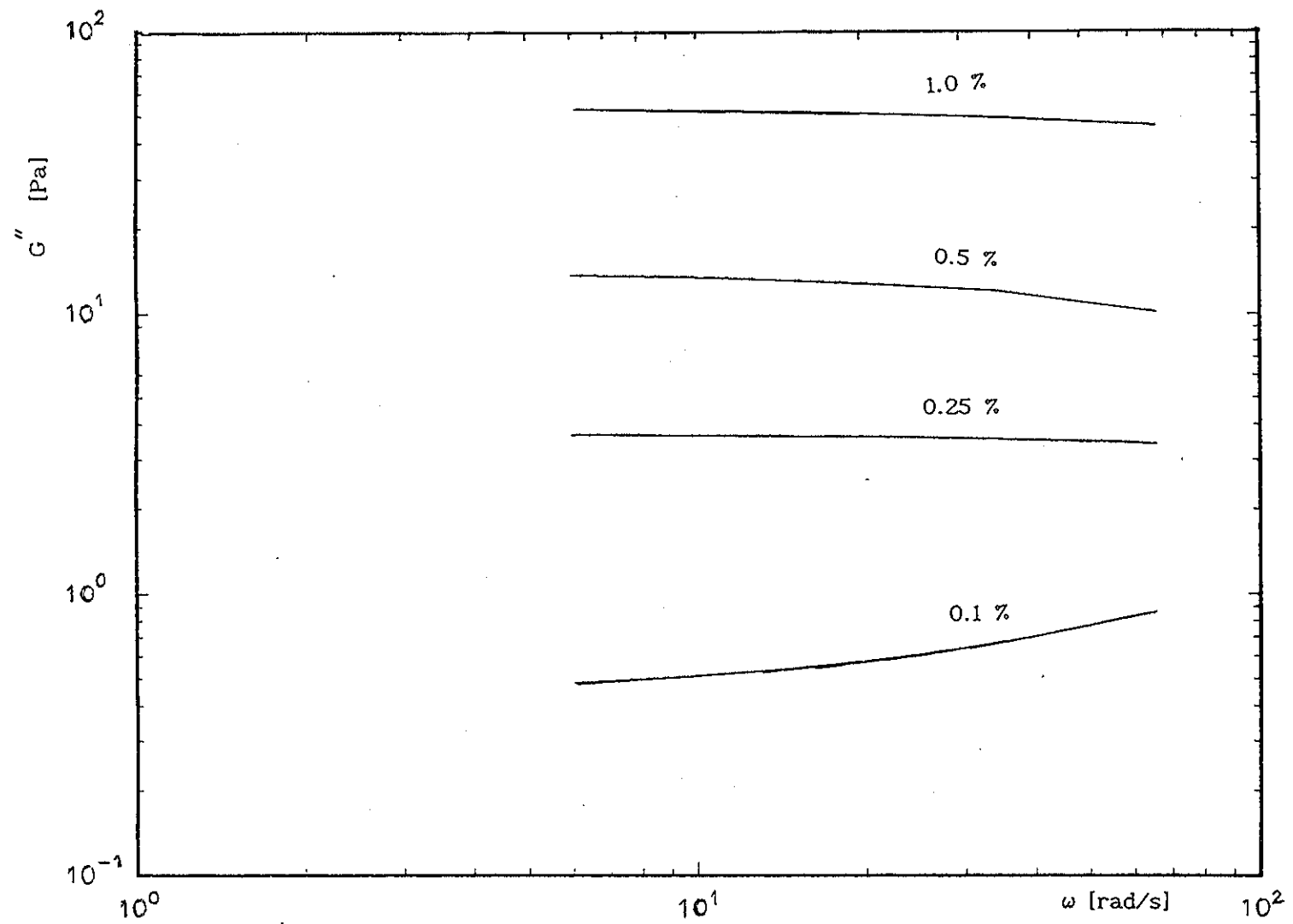




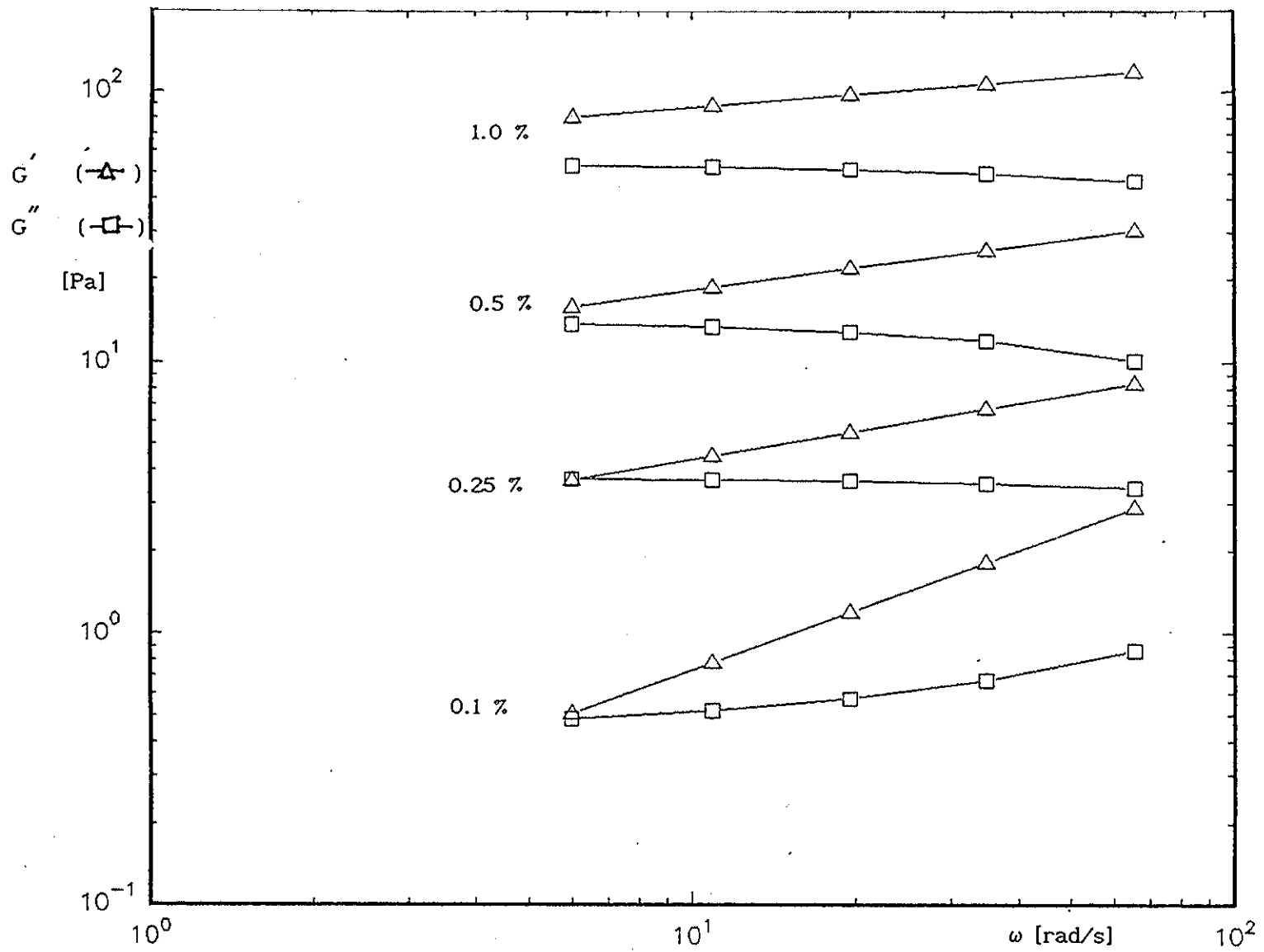
ภาพประกอบ 4.23 C (elastic intensity index) กับความเข้มข้นของสารละลายเซนแทนแกมล้มสำเร็จเปรียบเทียบกับ  
บรอกเซนแทนแกมจริง



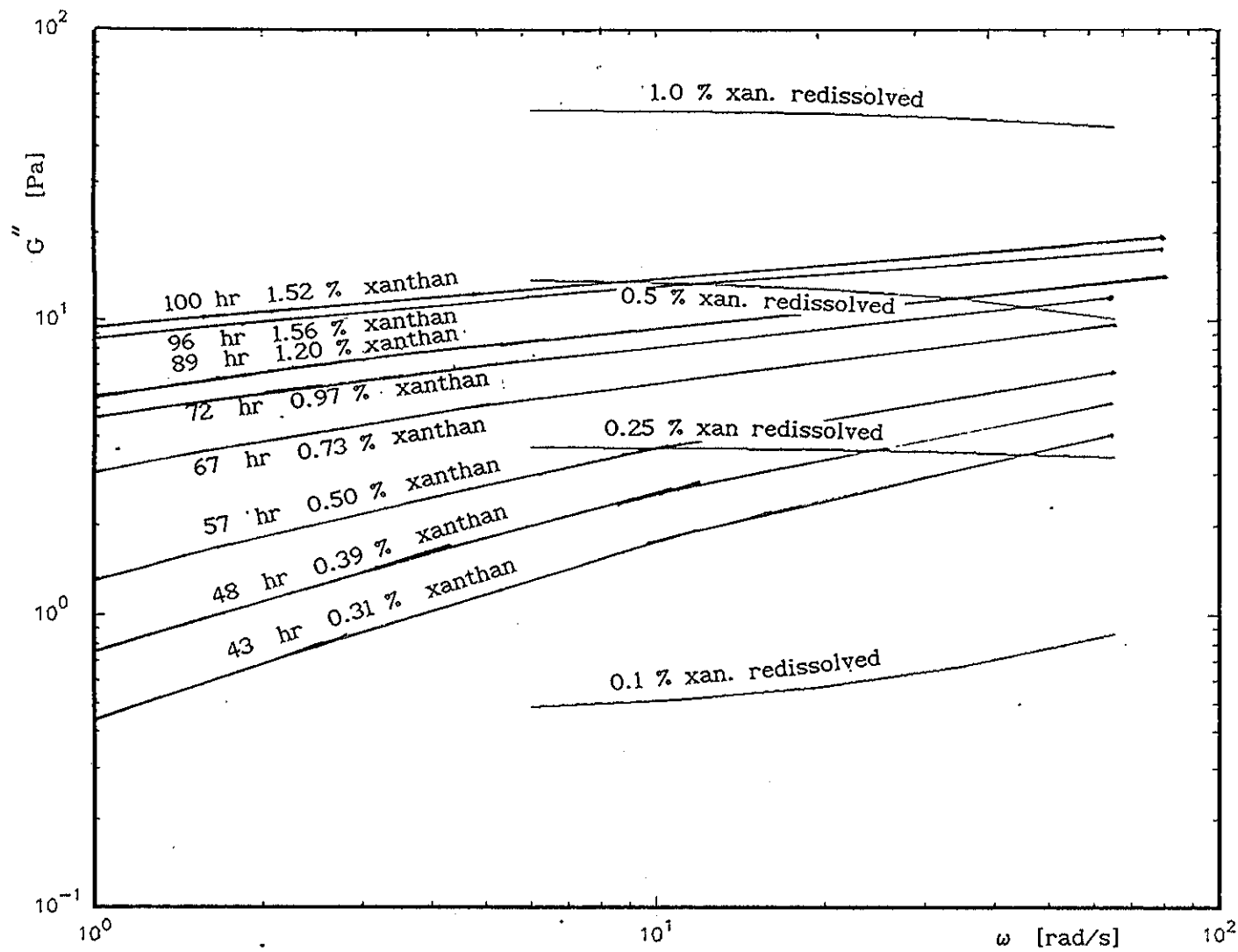
ภาพประกอบ 4.24 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแซนแธนที่ล้มต่ำเร็วกับความเข้มข้นของบรอรธแซนแธนจริง โดยพิจารณาจากค่า C



ภาพประกอบ 4.25  $G''$  กับ  $\omega$  ของสารละลายเซนแทรนแกมดำเร็กซ์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ 4.26  $G'$  และ  $G''$  กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนเทนแกมสำเร็จ ความเข้มข้น ร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ 4.27  $G''$  กับ  $\omega$  ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เทียบกับบรรดแซนแทนจริง

### 3.2 การศึกษาโดยการทดสอบแบบเฉือนเป็นวง (Rotation (K, n))

Pinches and Pallent (1986) ได้แสดงความสัมพันธ์ตามกฎยกกำลังสำหรับค่าพารามิเตอร์ K และ n (power-law relationship) ดังนี้

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

$$K = a (p)^b \quad (4.3)$$

$$n = \frac{\ln(\tau_0 / K)}{\gamma_0}$$

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

$b = 2.47$

$\gamma_0 = 11.7611 \text{ s}^{-1}$

$\tau_0 = 49.61 \text{ Pa}$

p คือ ความเข้มข้นของแซนแทน หน่วย g ของแซนแทน / kg สารละลาย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  และ  $\dot{\gamma}$  จากข้อมูลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 4.28 และเมื่อเฉลี่ยค่าจากการทดลองทุกชุดข้อมูล และนำไปเทียบกับของบรอนแซนแทนจริงแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.29 จากกราฟทั้งสองพบว่าช่วงแรก ๆ  $\dot{\gamma}$  ต่ำ ๆ ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งนูนขึ้นต่างจากของบรอนแซนแทนจริง ทั้งนี้เป็นเพราะว่ายังเป็นช่วงแรกของการทดลองโมเลกุลยังมีการพันกัน (entanglement) มากอยู่ ต่อไปเมื่อ  $\dot{\gamma}$  เพิ่มขึ้นสักระยะหนึ่ง โมเลกุลเริ่มจัดเรียงตัวกันมากขึ้น จึงให้กราฟออกมาค่อนข้างราบเรียบ (smooth) และใกล้เคียงบรอนแซนแทนจริง

เมื่อฟิตข้อมูลการทดลอง ค่า  $\tau$  และ  $\dot{\gamma}$  ด้วยสมการ (4.3) ได้ค่า K และ n ของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จเทียบกับบรอนแซนแทนจริง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.30 และเมื่อเฉลี่ยค่า K และ n จากทุกชุดข้อมูลการทดลอง ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 4.31 เมื่อพิจารณา n กับความเข้มข้น ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงน้ำ ดังนั้นบรอนแซนแทนจริงและสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จ จึงมีค่า n ใกล้เคียงกัน ที่ความเข้มข้นกลาง ๆ สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จมีค่า n ต่ำกว่าของบรอนแซนแทนจริงแสดงว่าสาร

ละลายแซนเธนแถมสำเร็จจะมีความเป็น shear thinning มากกว่า นั่นคือเมื่อเปลี่ยนอัตราการเฉือน สารละลายแซนเธนแถมสำเร็จจะอ่อนตัวลงเร็วกว่าบรอร์แซนเธนแถมจริง แต่ยังคงค่าที่สูงกว่าบรอร์แซนเธนแถมจริง ที่ความเข้มข้นสูง ๆ สารละลายแซนเธนแถมสำเร็จจะมีค่า  $n$  ใกล้เคียงกับบรอร์แซนเธนแถมจริง ซึ่งอาจเป็นผลในระดับโมเลกุลที่เรายังไม่สามารถอธิบายได้ในที่นี้

จากที่อธิบายข้างต้นสอดคล้องกับกราฟการเทียบเคียง  $G' - \omega$  เช่นกัน คือ ที่อัตราการเฉือนต่ำ ๆ และ สูง ๆ ค่า  $G'$  ของสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จและบรอร์แซนเธนแถมจริงที่มีความเข้มข้นเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกัน อธิบายโดยพิจารณาในระดับโมเลกุล ที่อัตราการเฉือนต่ำ ๆ ผลการตัดแปรทางเคมีไม่แสดงอิทธิพล จะแสดงในช่วงกลาง ๆ ของ อัตราการเฉือน เมื่ออัตราการเฉือนสูง เส้นกราฟของสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จ ลดลงมาเท่ากับของบรอร์แซนเธนแถมจริง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่เกิดจากการตัดแปรไว้นั้นหายไปที่อัตราการเฉือนสูง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การตัดแปรทำให้เกิดการพันกัน (entanglement) ในระดับโมเลกุล เมื่ออัตราการเฉือนสูง ๆ ทำให้การพันกันนั้นหมดไป

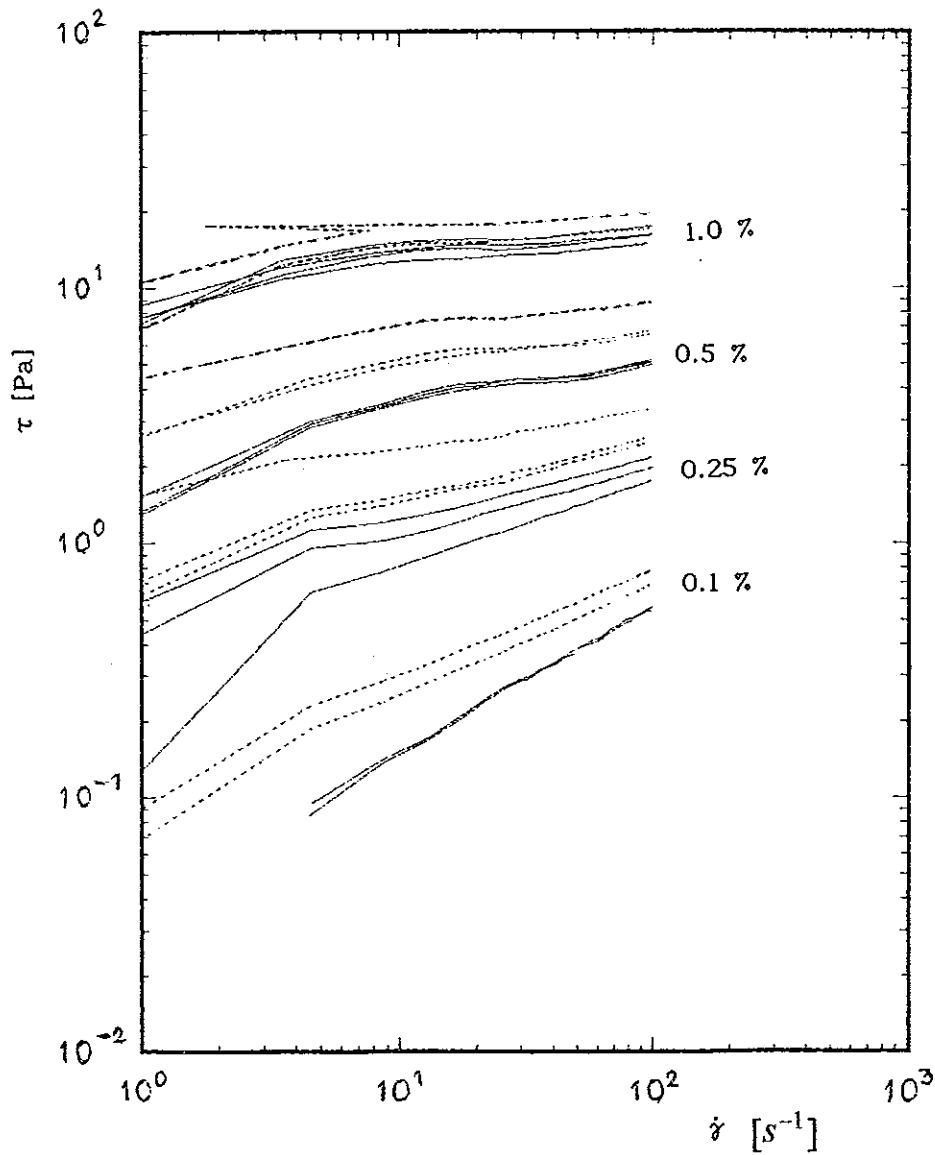
จากภาพประกอบ 4.31 เมื่อพิจารณาเทียบเคียงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จกับความเข้มข้นของบรอร์แซนเธนแถมจริง โดยพิจารณาจากค่า  $K$  และ  $n$  ที่เท่ากันตามลำดับ ให้ผลดังแสดงในภาพประกอบ 4.32 ซึ่งสอดคล้องกับที่เราพิจารณาเทียบเคียงความเข้มข้น จากค่า  $C$  ที่เท่ากัน ดังจะเห็นได้จากกราฟภาพประกอบ 4.33 นั่นคือ ความเข้มข้นของบรอร์แซนเธนแถมจริงส่วนใหญ่จะถูกเทียบเคียงเป็น ความเข้มข้นของสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จที่มีค่าลดลง

ในการทดลองของเราที่เราเลือกที่จะเทียบเคียง ความเข้มข้นของสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จกับบรอร์แซนเธนแถมจริง โดยพิจารณาเฉลี่ยจากทั้ง  $C$ ,  $K$  และ  $n$  ซึ่งจะให้ผลการเทียบเคียงแสดงดังกราฟในภาพประกอบ 4.34 นั่นคือเราสามารถเทียบเคียงสารละลายแซนเธนแถมสำเร็จกับบรอร์แซนเธนแถมจริงได้ ซึ่งค่าเฉลี่ยจากการทดลองในการเทียบเคียงทางรีโอโลยี ที่เราเสนอขึ้นนี้ ไม่จำเป็นว่ามันจะเป็นค่าที่ถูกต้องในทุกกรณี ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้นำไปใช้ว่าสิ่งที่เกิดขึ้นในบรอร์แซนเธนแถมจริงนั้น สมบัติยืดหยุ่น หรือ นืด ตัวใดจะมีลักษณะเด่น (dominate) กว่ากัน

- $G'$  คือ storage modulus บอกถึง สมบัติยืดหยุ่น
- $G''$  คือ loss modulus บอกถึง ความเป็น “ ของเหลว ”
- $K$  คือ consistency index บอกถึง สมบัติความหนืด
- $n$  คือ pseudoplastic index บอกถึง พฤติกรรมการไหลของของไหล

ในการทดลองต่อไปของเราทั้งหมดการเทียบเคียงสารละลายแซนแทนกับสำเร็จกับบรธแซนแทนจริงจะใช้กราฟภาพประกอบ 4.34 นี้ เพราะเราพิจารณาว่าความยืดหยุ่น และ ความหนืด ถึงแม้จะมีความสำคัญต่างกัน แต่เราไม่สามารถอธิบายได้ในขณะนี้ จึงเลือกใช้ค่าเฉลี่ย



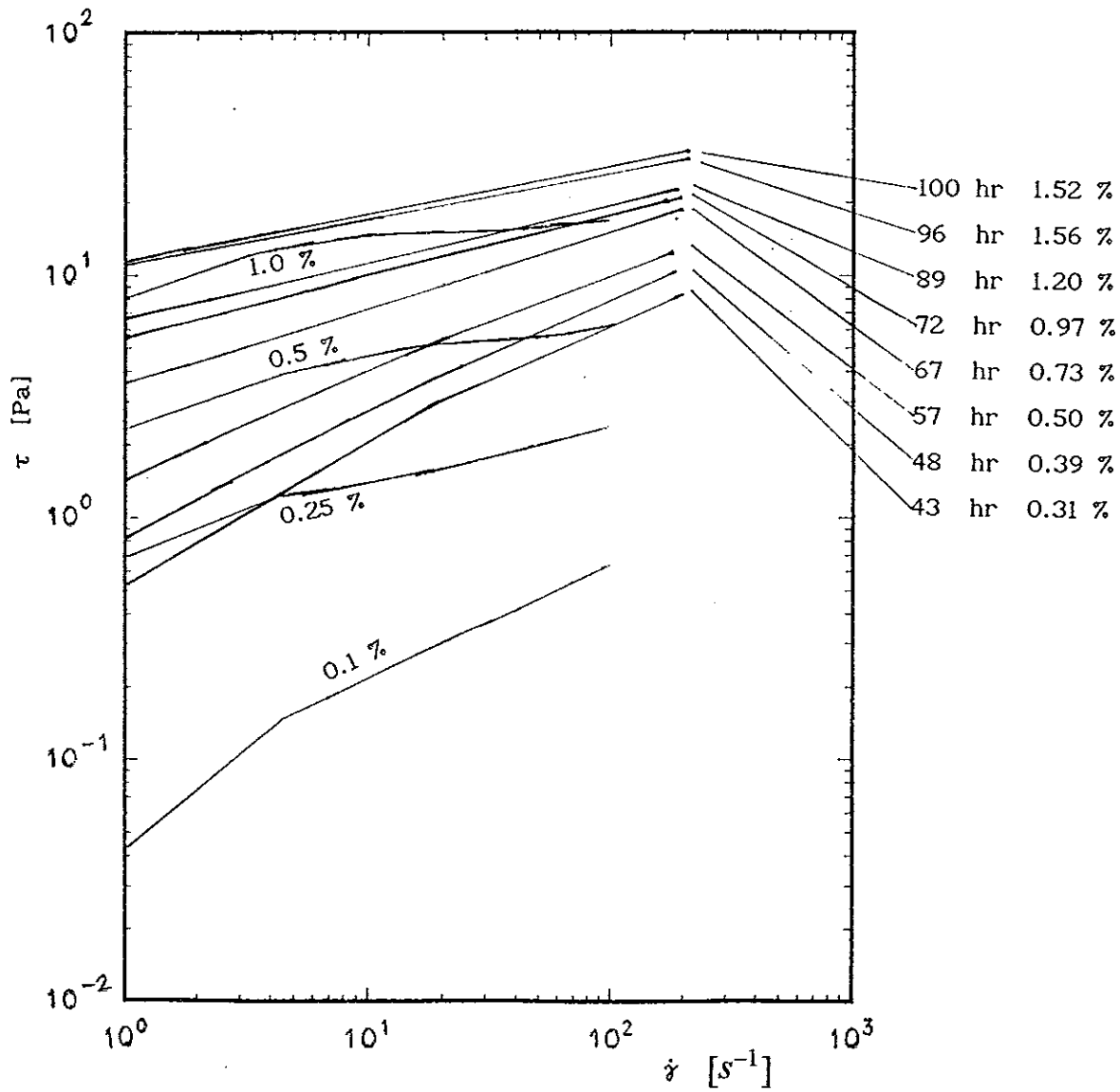


ภาพประกอบ 4.28 ข้อมูล  $\tau$  กับ  $\dot{\gamma}$  ของสารละลายเซนแทนแกมส์สำเร็จ ความเข้มข้นร้อยละ

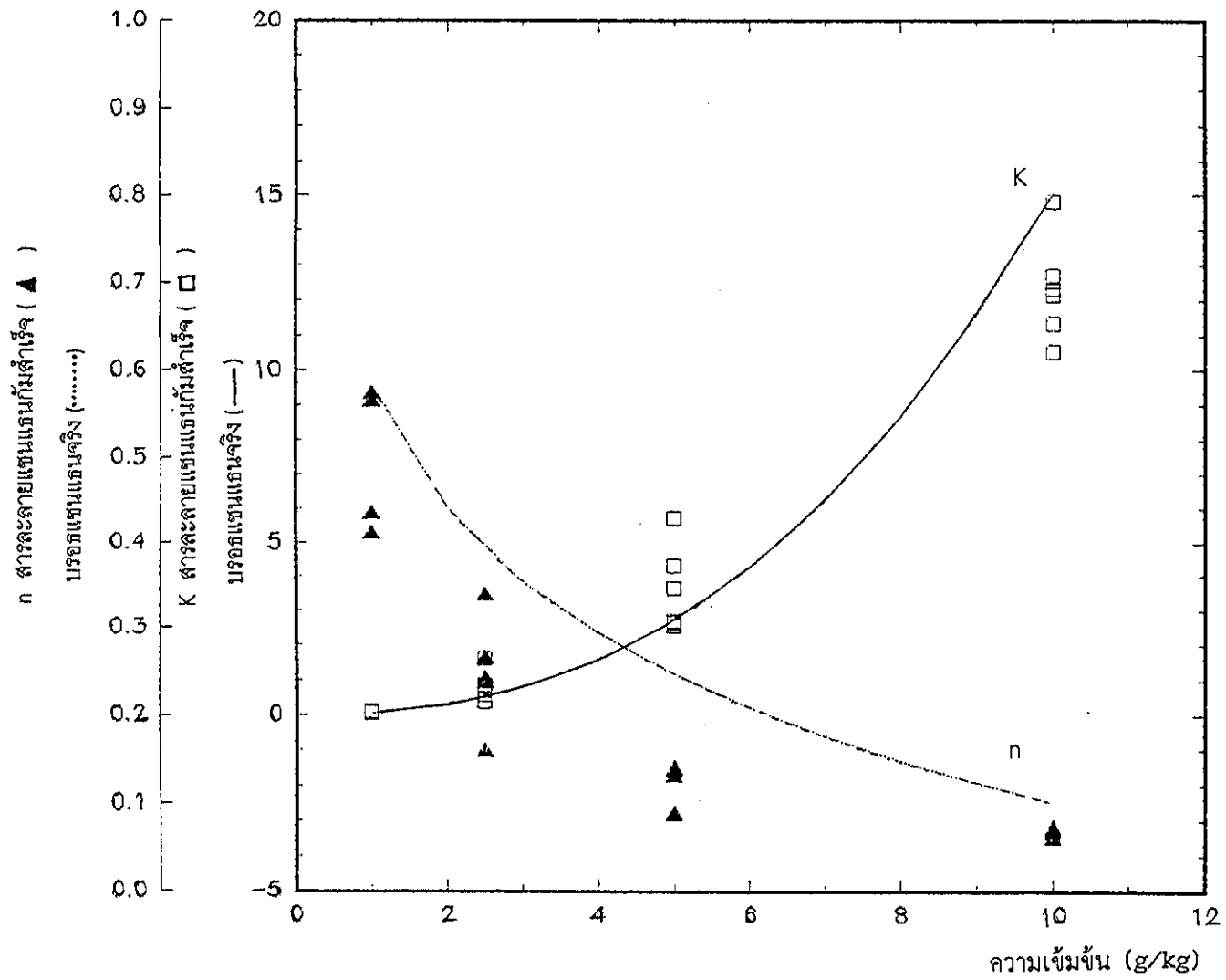
0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก

— วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 วัน

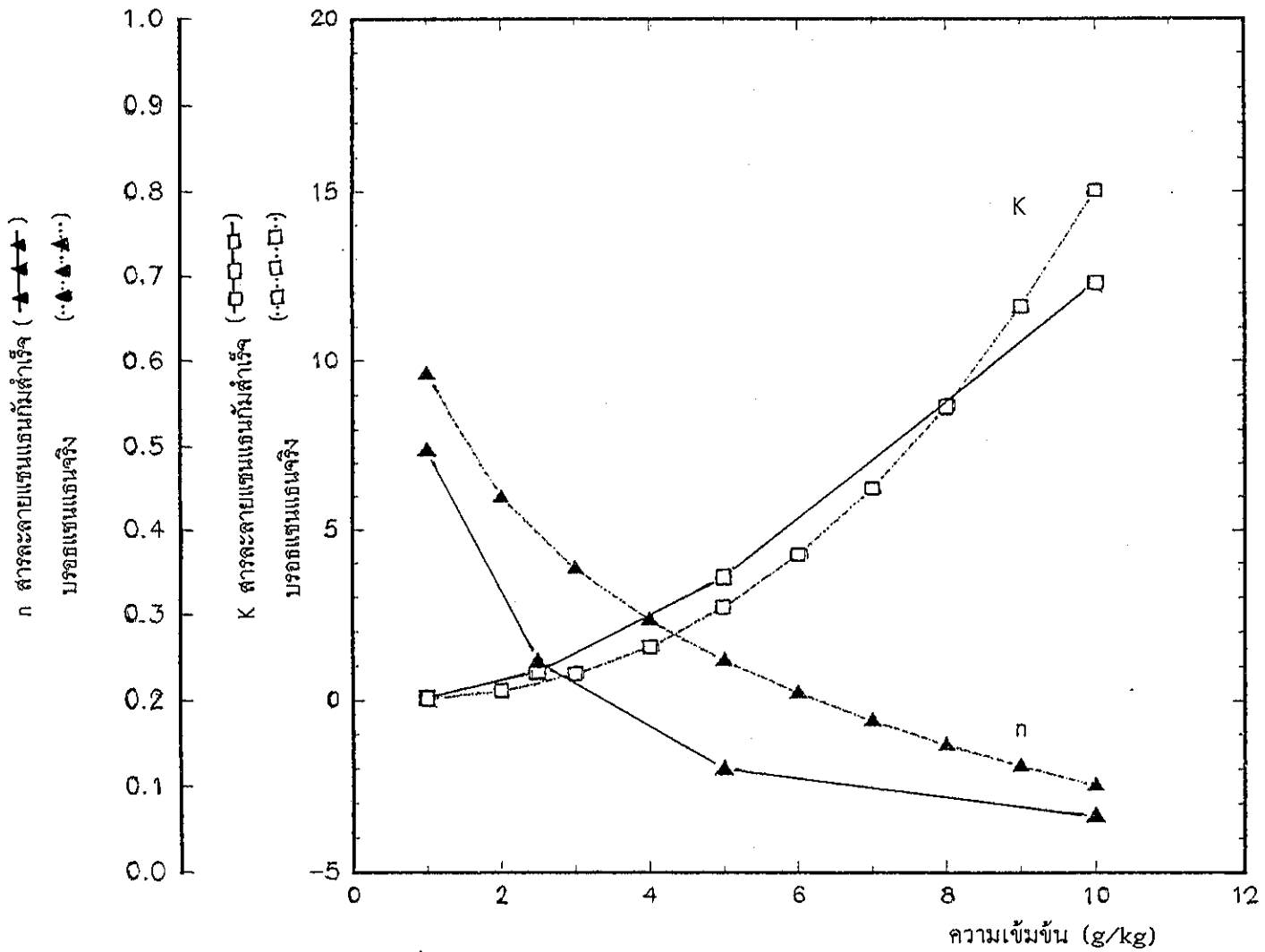
..... วัดหลังจากตั้งทิ้งไว้ 37 วัน



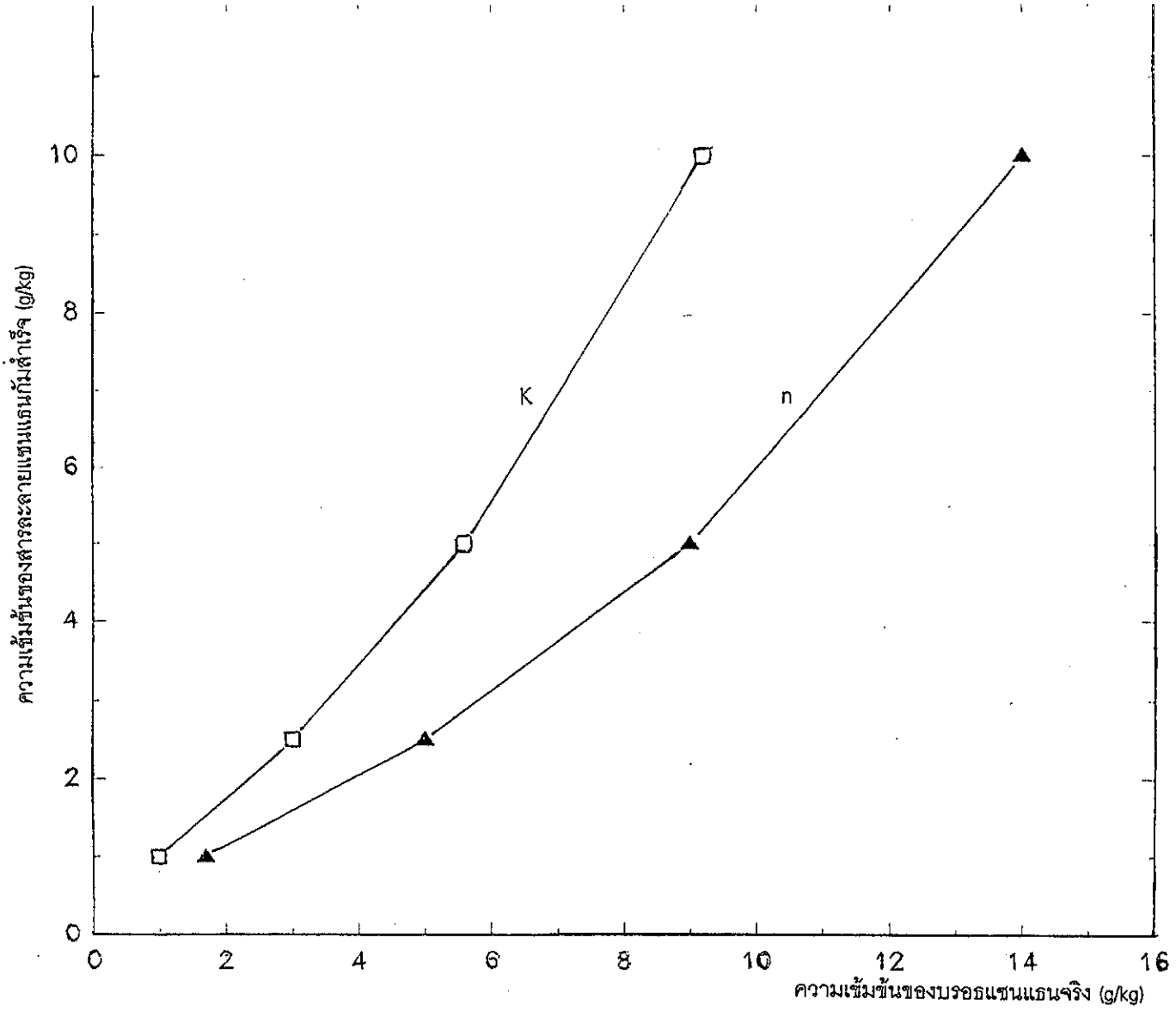
ภาพประกอบ 4.29 ค่าเฉลี่ย  $\tau$  กับ  $\dot{\gamma}$  ของสารละลายเซนแทนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เทียบกับบรอนเซนแทนจริงในช่วงเวลาการหมักต่าง ๆ



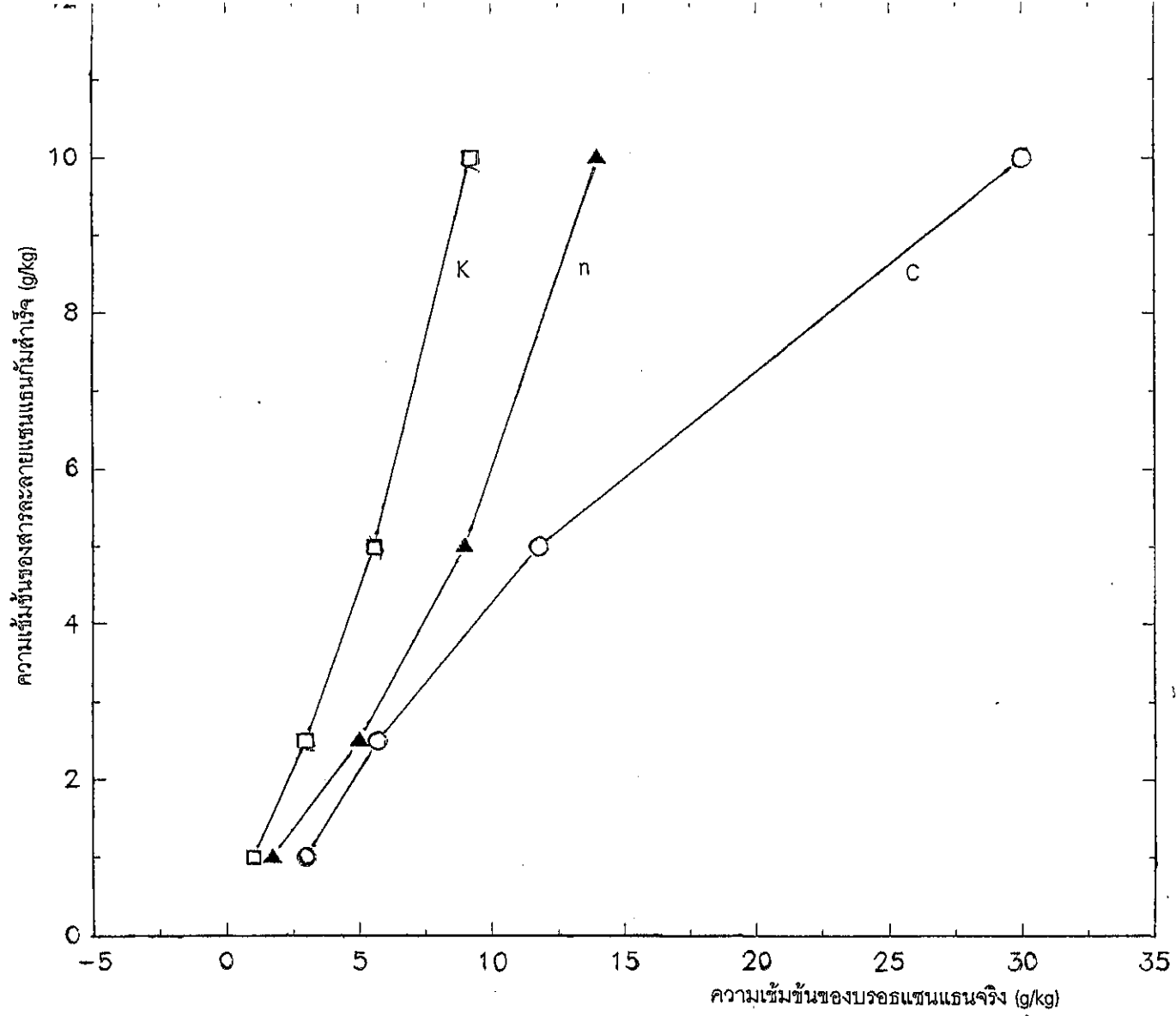
ภาพประกอบ 4.30 ข้อมูล K, n กับความชื้นของสารละลายแทนแทนแกมสำเร็จเทียบกับบรอกแทนแทนจริง



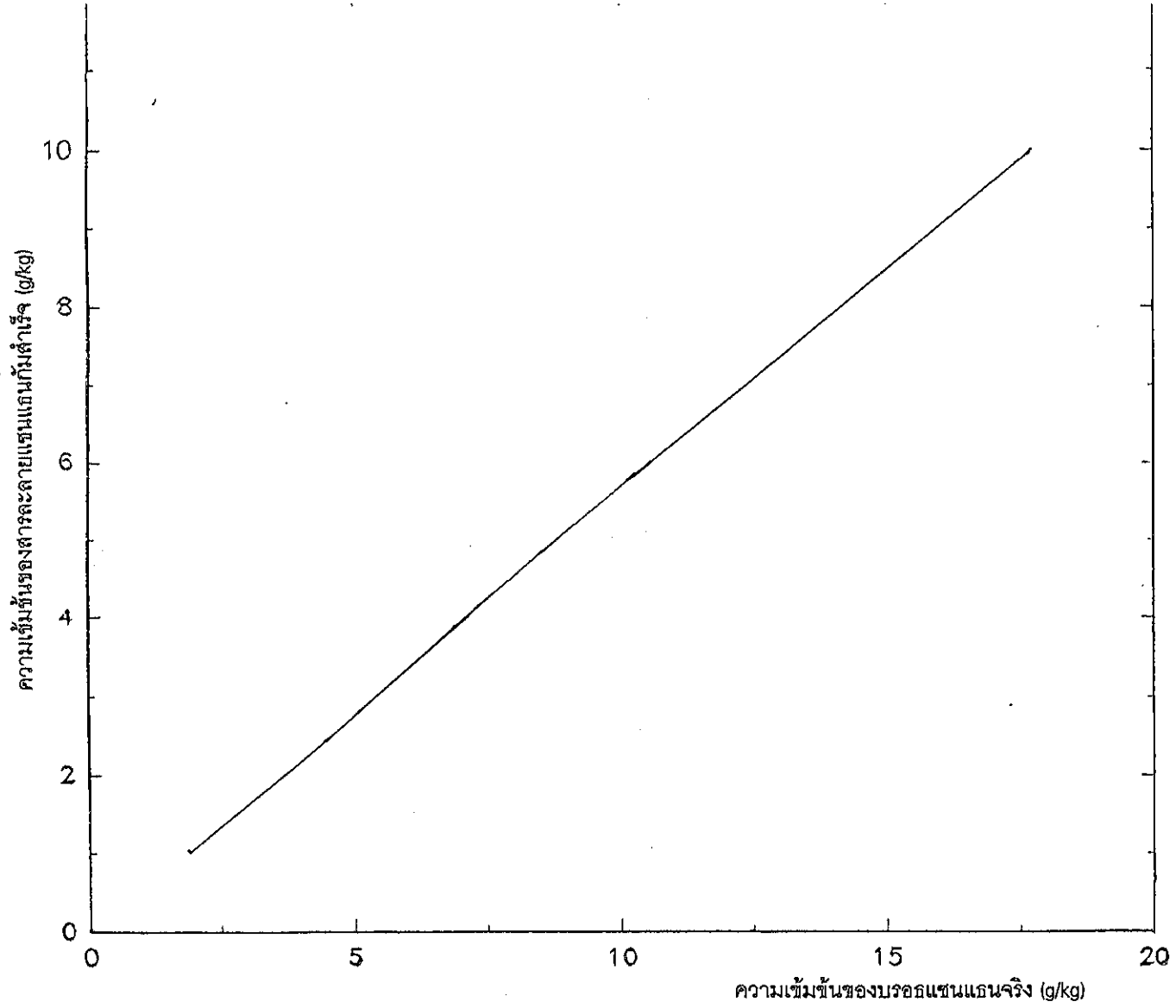
ภาพประกอบ 4.31 ค่าเฉลี่ย K, n กับความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จเทียบกับบรอกแซนแทนจริง



ภาพประกอบ 4.32 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยสำเร็จกับความเข้มข้นของปุ๋ยจริง โดยพิจารณาจากค่า K และ n



ภาพประกอบ 4.33 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายแชนแธนกับสำเร็จกับความเข้มข้นของบรอร์แซนแธนจริง โดยพิจารณาจากค่า K,n และ C



ภาพประกอบ 4.34 การเทียบเคียงความเข้มข้นของสารละลายบรอมแซนกับสำเร็จกับความเข้มข้นของบรอมแซนแอนจริง โดยพิจารณาผลโดยเฉลี่ยจากค่า K, n และ C

## ข. ผลการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

### 1. ผลการศึกษาไฮโดรไดนามิกส์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ รูปลักษณะการไหล (flow configuration) ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น ในกรณีของไหลคือ น้ำ พบว่าที่อัตราการให้อากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (83.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที  $u_{\text{g}} = 1.22$  เซนติเมตร/วินาที) พบฟองอากาศลักษณะเป็นวงรีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านยาวประมาณ 0.1 - 0.7 เซนติเมตร เคลื่อนที่ขึ้นเป็นสายคดเคี้ยวผ่านตลอด riser

ฟองอากาศส่วนใหญ่ขึ้นไปใน gas separation zone แล้วออกสู่อากาศด้านบน มีบางส่วนซึ่งเป็นส่วนน้อยเคลื่อนที่วนกลับ ณ บริเวณปากท่อระบายลงสู่ downcomer zone ใน downcomer zone พบการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเป็นลักษณะการหมุนวนเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.7 ของบทที่ 1 คือมีการสั่นซ้าย-ขวาและเคลื่อนที่ขึ้น-ลงไปพร้อม ๆ กัน แต่โดยสุทธิแล้วยังมีการเคลื่อนที่ลงอยู่บ้าง

เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (194.4, 277.8 และ 416.7 ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที  $u_{\text{g}} = 1.22, 2.84, 4.06$  และ 6.09 เซนติเมตร/วินาที) พบว่าความหนาแน่นของฟองอากาศใน riser zone downcomer zone และ gas separation zone เพิ่มขึ้นตามอัตราการให้อากาศ การเคลื่อนที่ของฟองใน downcomer zone ยังคงลักษณะเดิม (swirling) ซึ่งช่วงอัตราการให้อากาศที่ใช้ในการทดลอง ยังไม่สามารถสังเกตเห็นภาวะการเคลื่อนที่แบบไหลตรง (straight) ตามที่ Siegel, et al., (1986) กล่าวไว้

เมื่อเปลี่ยนของไหล เป็นสารละลายแซนแรนกับสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักพบว่าเมื่ออัตราการให้อากาศเป็น 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ใน riser zone พบว่าฟองอากาศขึ้นเป็นสายคดเคี้ยวเหมือนในกรณีน้ำ ลักษณะของฟองอากาศเป็นวงรี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านยาวประมาณ 0.2-1 เซนติเมตร ฟองส่วนใหญ่ขึ้นไปใน gas separation zone แล้วออกสู่อากาศด้านบน ใน downcomer zone พบฟองอากาศจำนวนน้อยกว่าใน riser zone มาก และขนาดของฟองมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.2-0.4 เซนติเมตร การเคลื่อนที่ของฟองขนาดดังกล่าวใน downcomer zone เห็นการเคลื่อนที่ลงค่อนข้างชัดเจนกว่าในกรณีน้ำ (ฟองไม่สั่นซ้าย-ขวา อย่างเห็นได้ชัดในกรณีน้ำ) อาจมีการสั่นของฟองบ้างในช่วงบน ๆ ได้ gas separation zone ลงมาประมาณ 1 นิ้ว หลังจากนั้นเห็นฟองอากาศเคลื่อนที่ลงและวนเข้าไปใน riser zone อย่างชัดเจน นอกจากนี้ที่บริเวณผนังของ downcomer zone พบฟองอากาศขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1.5 มม. เกาะนิ่งติดอยู่ที่ผนัง เมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.7, 1.0 และ

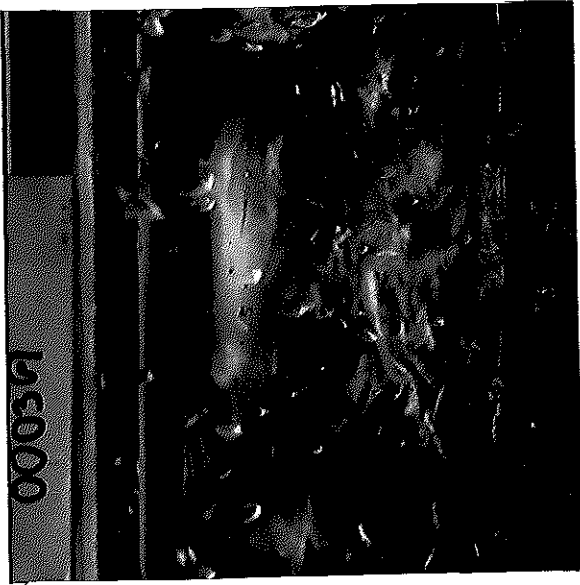


1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง พบว่าเริ่มมีฟองอากาศขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 มม.) ลงมาใน downcomer zone มากขึ้น เริ่มมีการสั้น ช้าย-ขวา ขึ้น-ลง ของฟอง เห็นได้ชัดเจนขึ้น มีฟองอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มม. เกาะนิ่งติดอยู่ที่ผนัง downcomer zone ฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ลงมาใน downcomer zone มีแรงลอยตัวมาก จึงพยายามลอยขึ้นสู่ด้านบน ด้านกับแรงของการรวนลง อาจเป็นไปได้ว่าการลอยตัวขึ้นของฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีผลต่อการไหลลงของฟองอากาศขนาดเล็ก

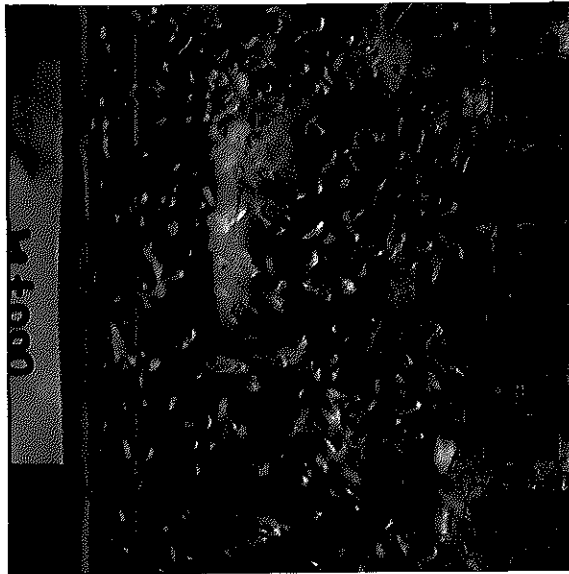
เมื่อของเหลวเป็นสารละลายแซนเทนความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราการให้อากาศเป็น 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ใน riser zone พบฟองอากาศเล็กๆ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-1 เซนติเมตรเป็นสายจากด้านล่างเริ่มรวมเป็นฟองอากาศใหญ่ที่ด้านบนเมื่อถึงผิวหน้าสารละลาย ฟองอากาศใหญ่แตกตัวออก มีบางบริเวณเกิดการกระแทกตัวชนผนังกลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ลอยอยู่ด้านข้างถึงที่เป็น downcomer zone เมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น ใน downcomer zone จะพบกลุ่มของฟองอากาศขนาดเล็ก ช่วงด้านล่างดังมากขึ้น ส่วนด้านบนจะมีการรวมกลุ่มของฟองเป็นกลุ่มใหญ่ หนา และเป็นแผง

ตัวอย่างลักษณะการไหล การกระจายของฟองอากาศ ในน้ำ และสารละลายแซนเทน กัมใน downcomer zone แสดงดังภาพประกอบ 4.35 (รายละเอียดเพิ่มเติมมีในภาคผนวก ค)

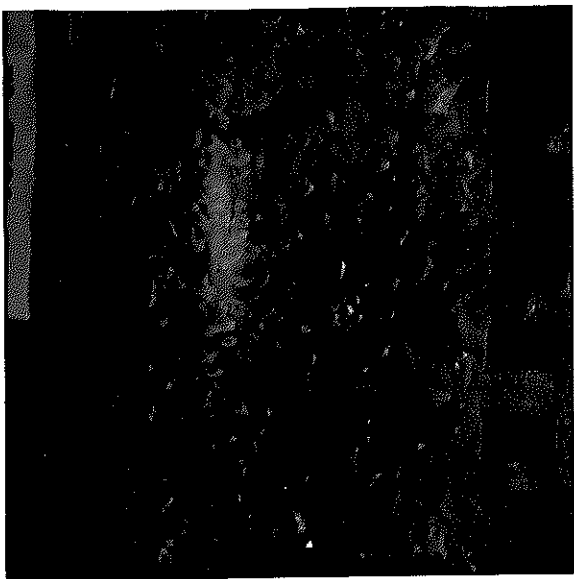
พบว่าเมื่ออัตราการให้อากาศสูงขึ้น มีการกระจายของฟองอากาศอยู่หนาแน่นมากขึ้น และที่ความเข้มข้นของสารละลายแซนเทนกัมสูงขึ้นจะมีปริมาณฟองอากาศเล็ก ๆ ซึ่งอาจเป็นฟองอากาศเดี่ยว ๆ หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เกาะติดผนังหรือเคลื่อนที่ช้า ๆ มากขึ้น



(a)



(b)



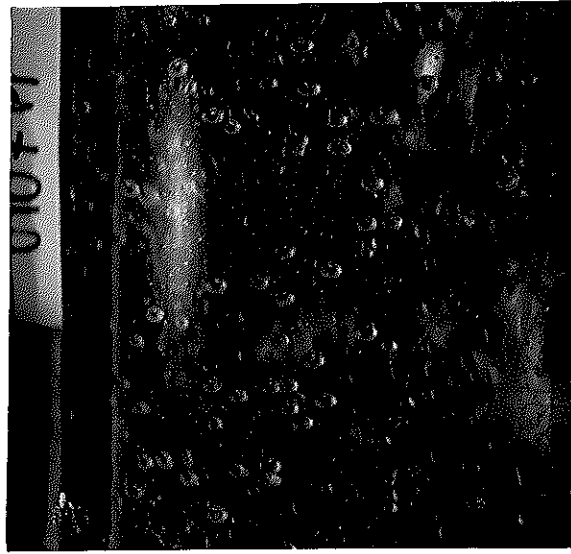
(c)



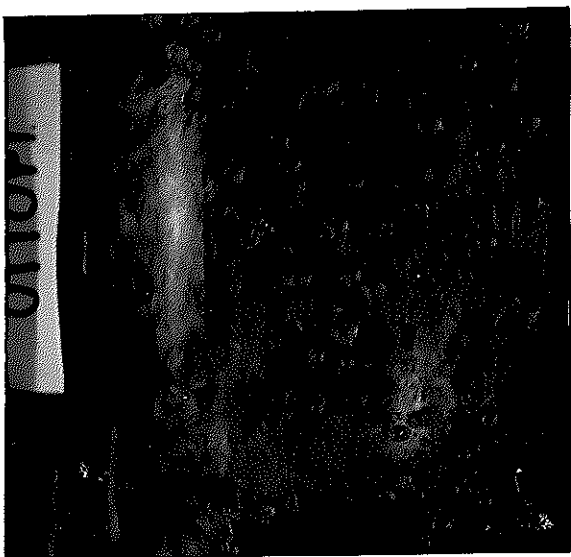
(d)



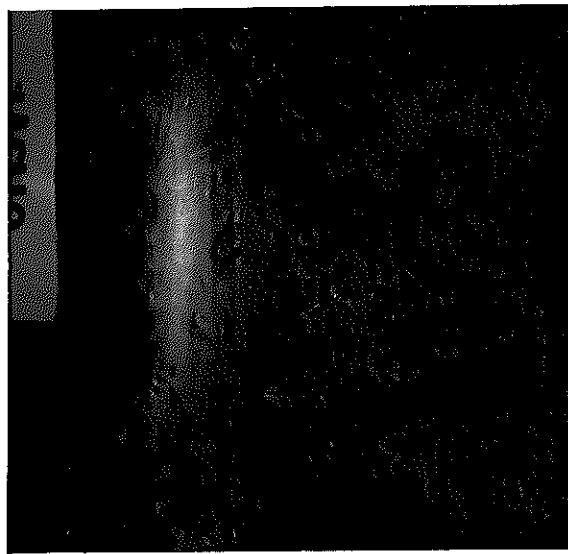
(a)



(b)

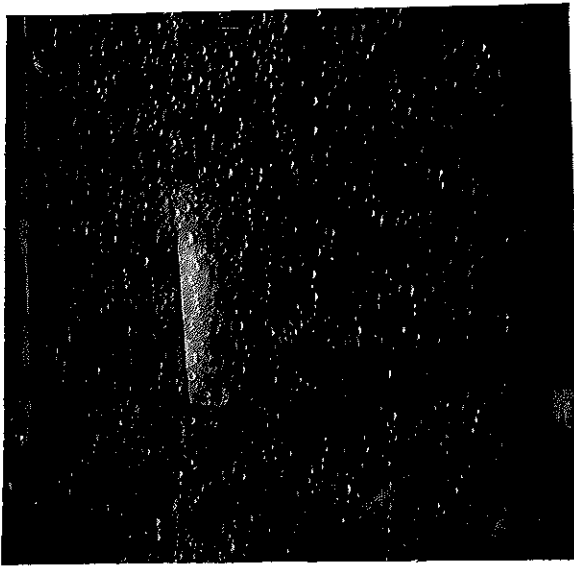


(c)

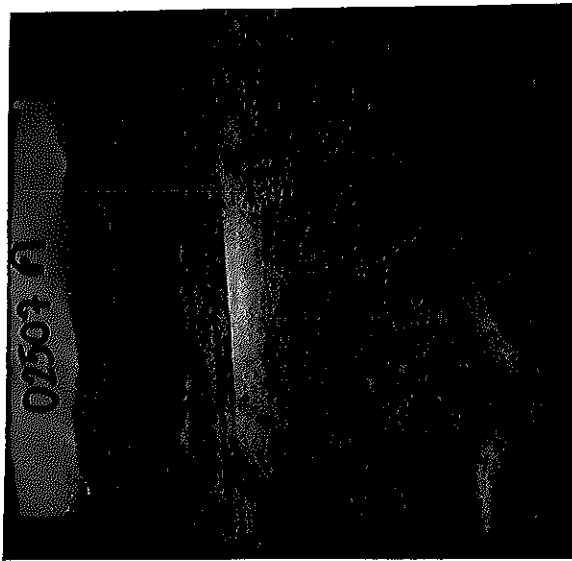


(d)

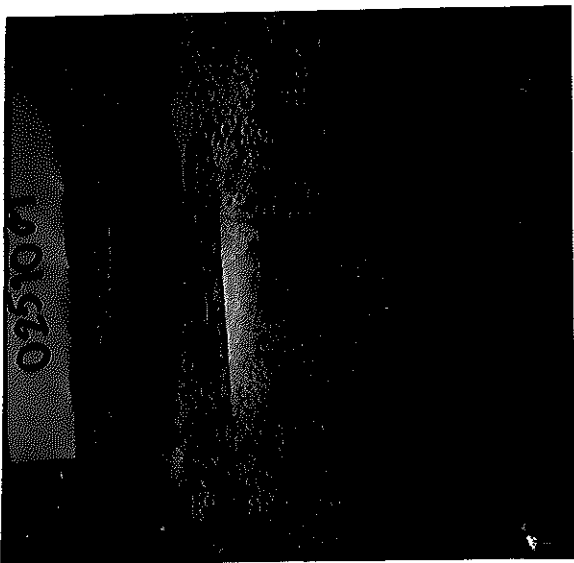
(สารละลายเซนแรนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก)



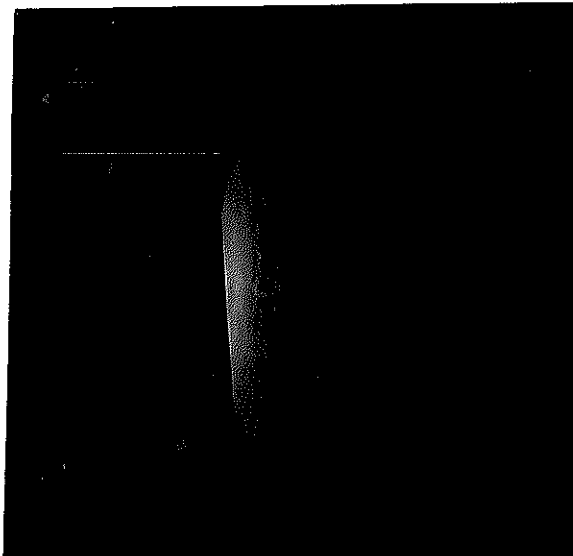
(a)



(b)



(c)



(d)

(สารละลายแซนเทนแทนท์มีความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก)

ภาพประกอบ 4.35 ตัวอย่างลักษณะการไหล การกระจายของฟองอากาศใน น้ำ และ สารละลายแซนเทนแทนท์ใน downcomer zone ที่อัตราการให้อากาศ (a) 0.3, (b) 0.7, (c) 1.0 และ (d) 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

## 2. ผลการศึกษาเวลาในการวนครบรอบของของไหล ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

เวลาในการวนครบรอบ ( $t_c$ ) ของของไหล ที่  $u_{cr}$  ต่าง ๆ กัน ที่ได้จากการทดลอง เป็นดังนี้

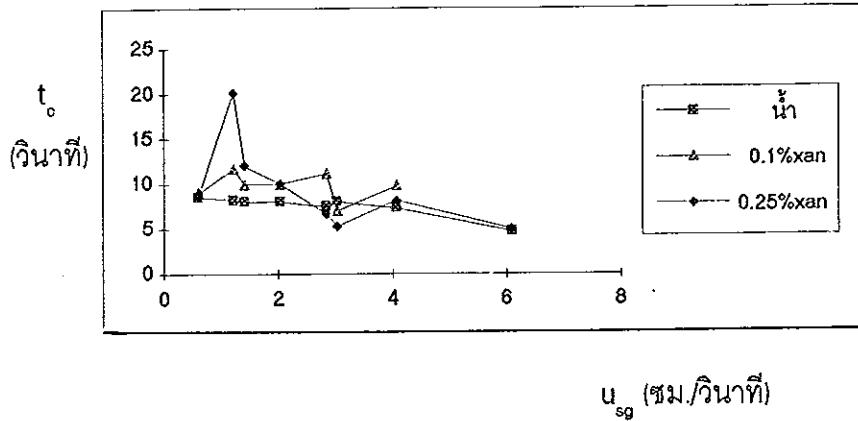
ตาราง 2 ผลการศึกษาเวลาในการวนครบรอบของของไหล น้ำ, สารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก

ชุดที่	$u_{cr}$ (ชม./วินาที)	$t_c$ (วินาที)	$t_c$ (วินาที)	$t_c$ (วินาที)
		น้ำ	สารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1	สารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.25
1	0.61	8.5	9	8.7
2	1.42	8	10	12
3	2.03	8	10	10
4	3.04	8	7	5.3
5	1.22	8.3	11.6	20.2
6	2.84	7.5	11.1	6.7
7	4.06	7.3	9.7	8.1
8	6.09	4.7	-	5.0

หมายเหตุ ข้อมูลชุดที่ 1-4 หาโดยวิธี วัดจากระยะห่างของพีคในกราฟตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์

ข้อมูลชุดที่ 5-8 หาโดยคำนวณจากภาพของอนุภาคที่จับได้จากเทคนิคการติดตามอนุภาค (รายละเอียดเพิ่มเติมมีในภาคผนวก ง)

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟ ได้ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 4.36 ผลของ  $u_{sg}$  ต่อ  $t_c$  ที่ได้จากการทดลอง

จากตารางและภาพประกอบพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนก็มสูงขึ้น ข้อมูลที่ได้จะยังมีความผันแปรสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม  $t_c$  ของน้ำ, สารละลายแซนแทนก็มความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก ให้ค่าโดยรวมมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่ชัดเจนนักในช่วง  $u_{sg}$  ที่ใช้ทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kawase and Moo-Young (1989a) ที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.23 เมตรที่มีท่อดริฟเฟอร์จอยภายใน (ให้การไหลในวงแหวนเป็น riser และ ให้การไหลในท่อดริฟเฟอร์เป็น downcomer) โดยเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดริฟเฟอร์ 3 ค่า คือ 0.089, 0.113, และ 0.146 เมตร เขาพบว่า เมื่อใช้ท่อดริฟเฟอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.146 เมตร  $t_c$  ของสารละลาย CMC ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มลดลงจาก 5 วินาที เป็น 3 วินาที ในช่วง  $u_{sg}$  ที่เพิ่มขึ้นจาก 1 ชม./วินาที เป็น 6 ชม./วินาที

ส่วนในการทดลองของเรานั้น ลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของถังปฏิกรณ์ใกล้เคียงกับ Kawase and Moo-Young (1989a) (เส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกรณ์และท่อดริฟเฟอร์ที่ใช้ในการทดลองของเรา คือ 0.19 และ 0.13 เมตรตามลำดับ) แตกต่างกันอยู่ตรงที่ว่า ในการทดลองของเราให้การไหลในท่อดริฟเฟอร์ เป็น riser และให้การไหลในวงแหวนเป็น downcomer

เมื่อเปรียบเทียบ  $t_c$  ของน้ำและสารละลายแซนแทนก็มสำเร็จ พบว่า  $t_c$  ของน้ำมีค่าน้อยกว่า  $t_c$  ของสารละลายแซนแทนก็มสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก เมื่อความหนืดของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของไหลช้าลง

### 3. ผลการศึกษาการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกโดยวิธีติดตามการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (tracer response)

ในสัปดาห์นี้เดิมที่เราศึกษาโดยใช้ conductivity meter ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (สารละลายเกลืออิมิตัว) ในถังปฏิกรณ์ที่เวลาผ่านไป พบปัญหาของฟองอากาศซึ่งรบกวนเซนเซอร์ (sensor) ทำให้ไม่สามารถบันทึกค่าความนำไฟฟ้าได้ จึงได้เปลี่ยนวิธีการศึกษาโดยใช้ pH meter ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่เดิมลงไปแบบพัลส์ (pulse) ซึ่งน่าจะแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากฟองอากาศได้ เพราะเซนเซอร์ของ pH meter นั้นไม่ถูกรบกวนด้วยฟองอากาศ จากการทดลองพบว่า ลักษณะของกราฟตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์ (tracer response curve) ที่ได้ มีความสอดคล้องกับผลการจำลองโดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ดังภาพประกอบ 4.37, 4.38 และ 4.39

เมื่อพิตเส้นที่ลากเชื่อมจุดยอดของกราฟ (peak to peak curve) ด้วยสมการ exponential ที่ใช้ประมาณผลเฉลยของแบบจำลอง network-of-zone ซึ่งมีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

$$\text{ก. } y = A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)} \quad ; \quad A_1 = 1 \quad (\text{constraint})$$

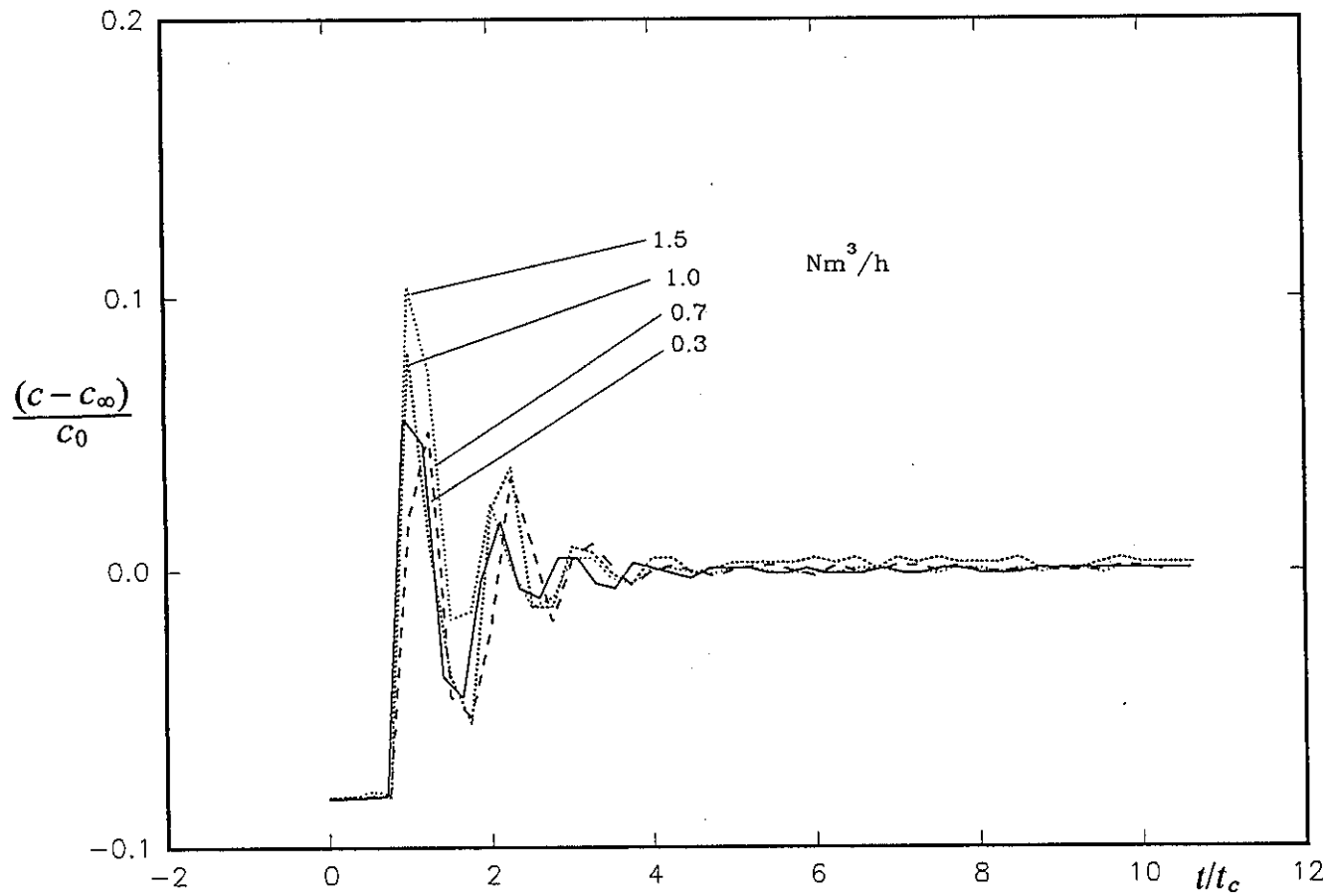
$$y = A_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{t}{t_c}\right)} + A_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_c}\right)} \quad ; \quad A_1 + A_2 = 1 \quad (\text{constraint})$$

$$\text{ข. } y = A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)} \quad ; \quad \text{no constraint}$$

$$y = A_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{t}{t_c}\right)} + A_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_c}\right)} \quad ; \quad \text{no constraint}$$

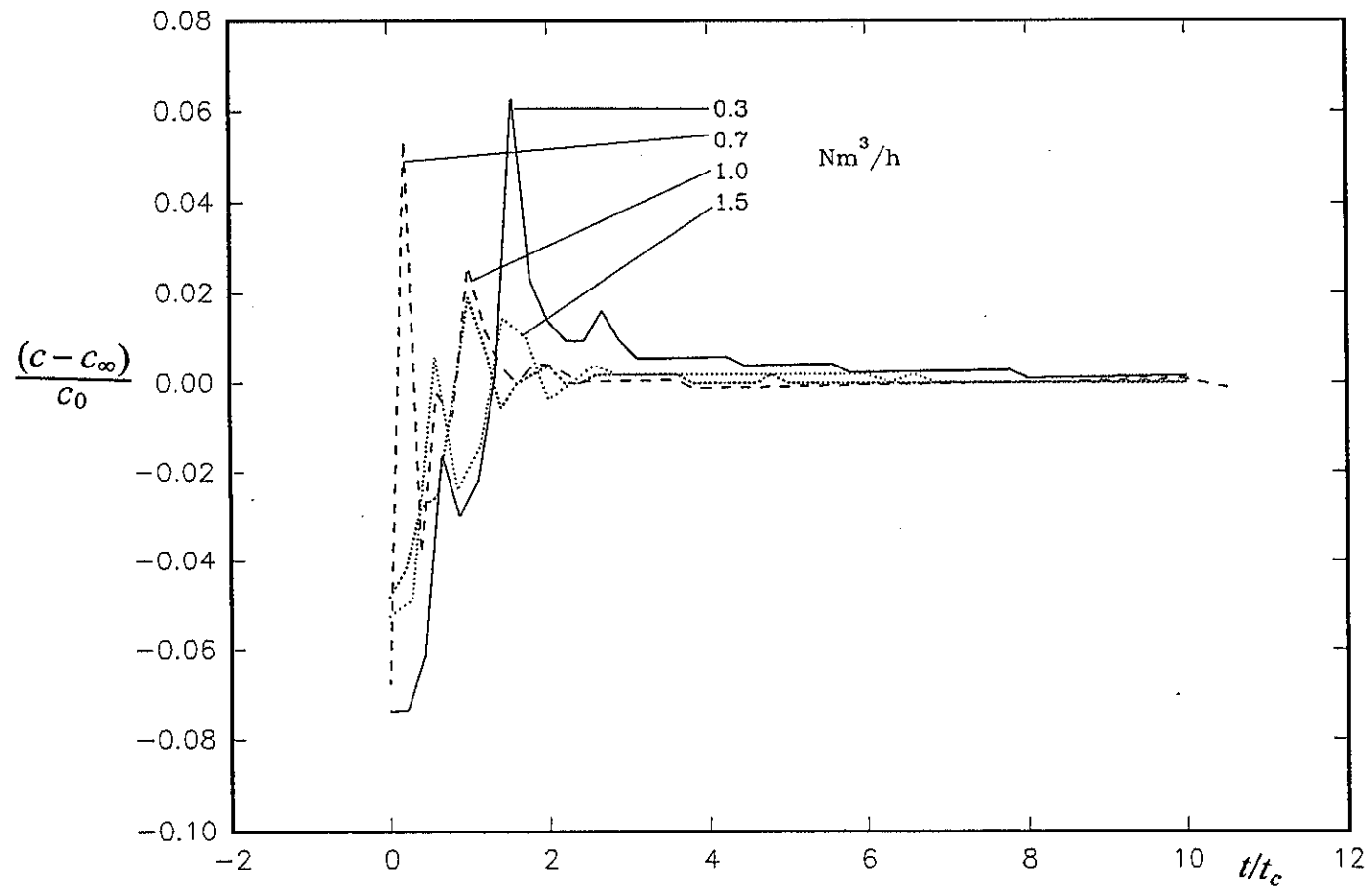
พบว่า

1.  $A^*, \alpha^*, A_1, \alpha_1, A_2$  และ  $\alpha_2$  ของข้อ ก. และข้อ ข. มีค่าดังแสดงในตารางต่อไปนี้

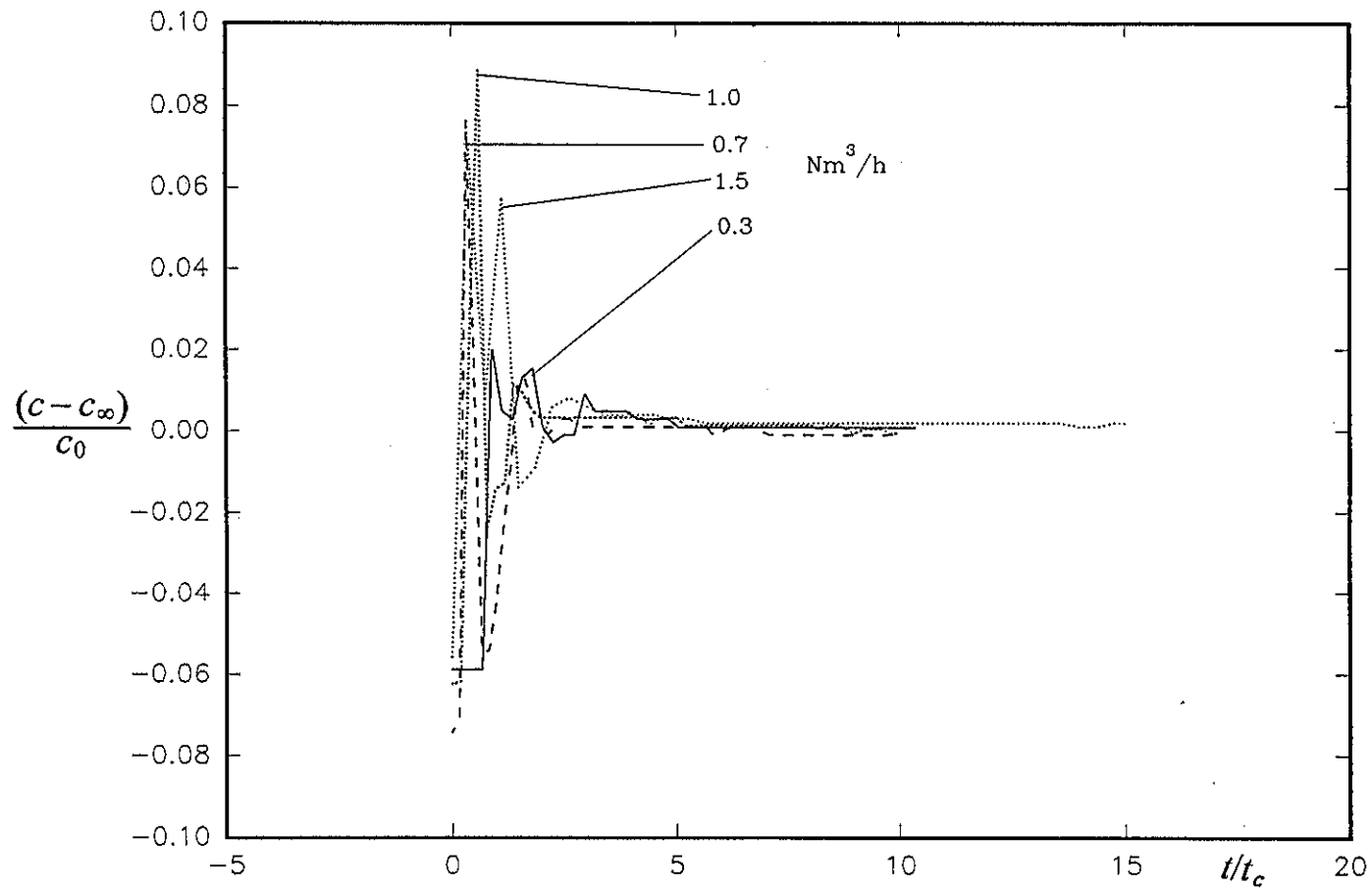


ภาพประกอบ 4.37 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอช ของน้ำ ที่ระดับความสูงน้ำ 85 เซนติเมตร, อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง





ภาพประกอบ 4.38 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอช ของสารละลาย แชนแชนกัมสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความสูงสารละลาย 85 เซนติเมตร, อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4.39 tracer response curve จากการทดลองโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอช ของสารละลาย  
 แชนแนลแก๊มลําเร็วความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่ระดับความสูงสารละลาย 85 เซนติเมตร,  
 อัตราการให้อากาศ 0.3, 0.7, 1.0 และ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ตาราง 3 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของน้ำ  
กรณีข้อ ก. มี constraint

## น้ำ

ก. มี constraint						
อัตราการ ให้อากาศ (ม. <sup>3</sup> /ชม.)	$u_{s9}$ (ชม./วินาที)			$t_m$ (วินาที)	$\frac{t_m}{t_c}$ (-)	$r^2$
0.3	0.61	$A^* = 1$	$\alpha^* = 3.04576$	15.33	1.80	0.83784
		$A_1 = 0.85241$	$\alpha_1 = 46.84938$	29.55	3.48	0.99812
		$A_2 = 0.14759$	$\alpha_2 = 1.02963$			
0.7	1.42	$A^* = 1$	$\alpha^* = 2.29925$	19.13	2.39	0.52047
		$A_1 = 0.87233$	$\alpha_1 = 212.96939$	39.39	4.92	0.95127
		$A_2 = 0.12767$	$\alpha_2 = 0.69851$			
1.0	2.03	$A^* = 1$	$\alpha^* = 2.47887$	17.74	2.22	0.69209
		$A_1 = 0.81778$	$\alpha_1 = 79.28391$	37.70	4.71	0.96922
		$A_2 = 0.18222$	$\alpha_2 = 0.80520$			
1.5	3.04	$A^* = 1$	$\alpha^* = 2.23364$	19.69	2.46	0.96220
		$A_1 = 0.5$	$\alpha_1 = 2.23710$	19.69	2.46	0.96220
		$A_2 = 0.5$	$\alpha_2 = 2.23018$			

ตาราง 4

ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของน้ำ  
กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint

น้ำ

ข. ไม่มี constraint						
อัตราการ ให้อากาศ (ม. <sup>3</sup> /ชม.)	$u_{sg}$ (ชม./วินาที)			$t_m$ (วินาที)	$\frac{t_m}{t_c}$ (-)	$r^2$
0.3	0.61	$A^* = 0.14795$	$\alpha^* = 1.02963$	29.55	3.48	0.99811
		$A_1 = 0.07380$	$\alpha_1 = 1.02963$	29.55	3.48	0.99811
		$A_2 = 0.07380$	$\alpha_2 = 1.02963$			
0.7	1.42	$A^* = 0.12769$	$\alpha^* = 0.69859$	39.38	4.92	0.95127
		$A_1 = 0.06385$	$\alpha_1 = 0.69849$	39.39	4.92	0.95127
		$A_2 = 0.06385$	$\alpha_2 = 0.69875$			
1.0	2.03	$A^* = 0.18221$	$\alpha^* = 0.80514$	37.70	4.71	0.96922
		$A_1 = 0.09114$	$\alpha_1 = 0.80545$	37.69	4.71	0.96922
		$A_2 = 0.09114$	$\alpha_2 = 0.80545$			
1.5	3.04	$A^* = 0.43025$	$\alpha^* = 1.41877$	26.24	3.28	0.99992
		$A_1 = 0.21512$	$\alpha_1 = 1.41873$	26.25	3.28	0.99992
		$A_2 = 0.21512$	$\alpha_2 = 1.41881$			

ตาราง 5 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ก. มี constraint

สารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

ก. มี constraint						
อัตราการ ให้อากาศ (ม. <sup>3</sup> /ชม.)	$u_{sg}$ (ชม./วินาที)			$t_m$ (วินาที)	$\frac{t_m}{t_c}$ (-)	$r^2$
0.3	0.61	$A^* = 1$	$\alpha^* = 1.7865$	28.23	3.14	0.98515
		$A_1 = 0.5$	$\alpha_1 = 1.78649$	28.23	3.14	0.98515
		$A_2 = 0.5$	$\alpha_2 = 1.7865$			
0.7	1.42	$A^* = 1$	$\alpha^* = 14.61021$	3.89	0.39	0.59644
		$A_1 = 0.49982$	$\alpha_1 = 14.3434$	3.90	0.39	0.59644
		$A_2 = 0.50018$	$\alpha_2 = 14.89118$			
1.0	2.03	$A^* = 1$	$\alpha^* = 3.95864$	15.24	1.52	0.90920
		$A_1 = 0.08840$	$\alpha_1 = 1.54098$	25.74	2.57	0.99929
		$A_2 = 0.91160$	$\alpha_2 = 410.7115$			
1.5	3.04	$A^* = 1$	$\alpha^* = 2.95369$	14.09	2.01	0.82106
		$A_1 = 0.06145$	$\alpha_1 = 1.01615$	21.74	3.11	0.98018
		$A_2 = 0.93855$	$\alpha_2 = 34.10075$			

ตาราง 6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint

สารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก

ข. ไม่มี constraint					
อัตราการ ให้อากาศ (ม. <sup>3</sup> /ชม.)	$u_{sg}$ (ชม./วินาที)		$t_m$ (วินาที)	$\frac{t_m}{t_c}$ (-)	$r^2$
0.3	0.61	$A^* = 1.14412$ $\alpha^* = 1.87$	27.62	3.07	0.98549
		$A_1 = 0.34507$ $\alpha_1 = 1.65982$	28.37	3.15	0.94136
		$A_2 = 0.34507$ $\alpha_2 = 1.65982$			
0.7	1.42	$A^* = 0.06889$ $\alpha^* = 1.14491$	26.33	2.63	0.97815
		$A_1 = 0.03444$ $\alpha_1 = 1.14413$	26.37	2.64	0.97815
		$A_2 = 0.03444$ $\alpha_2 = 1.14546$			
1.0	2.03	$A^* = 0.08839$ $\alpha^* = 1.54094$	23.40	2.34	0.99929
		$A_1 = 0.0442$ $\alpha_1 = 1.54082$	23.40	2.34	0.99929
		$A_2 = 0.0442$ $\alpha_2 = 1.54105$			
1.5	3.04	$A^* = 0.06142$ $\alpha^* = 1.0158$	21.75	3.11	0.98018
		$A_1 = 0.00591$ $\alpha_1 = 0.25448$	23.97	3.42	1.0
		$A_2 = 0.22102$ $\alpha_2 = 2.14086$			

ตาราง 7 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ก. มี constraint

สารละลายแซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

ก. มี constraint						
อัตราการ ให้อากาศ (ม. <sup>3</sup> /ชม.)	$u_{sg}$ (ชม./วินาที)			$t_m$ (วินาที)	$\frac{t_m}{t_c}$ (-)	$r^2$
0.3	0.61	$A^* = 1$	$\alpha^* = 4.2191$	12.02	1.38	0.62867
		$A_1 = 0.46709$	$\alpha_1 = 3.29502$	13.38	1.54	0.62868
		$A_2 = 0.53291$	$\alpha_2 = 483.94080$			
0.7	1.42	$A^* = 1$	$\alpha^* = 7.71151$	8.71	0.73	0.94111
		$A_1 = 0.5$	$\alpha_1 = 7.69346$	8.71	0.73	0.94111
		$A_2 = 0.5$	$\alpha_2 = 7.72957$			
1.0	2.03	$A^* = 1$	$\alpha^* = 4.02116$	14.35	1.44	0.98075
		$A_1 = 0.38569$	$\alpha_1 = 2.45077$	19.66	1.97	0.99255
		$A_2 = 0.61431$	$\alpha_2 = 256.59677$			
1.5	3.04	$A^* = 1$	$\alpha^* = 6.9727$	4.47	0.84	0.86301
		$A_1 = 0.90315$	$\alpha_1 = 430.2689$	28.94	5.46	0.99038
		$A_2 = 0.09685$	$\alpha_2 = 0.65028$			

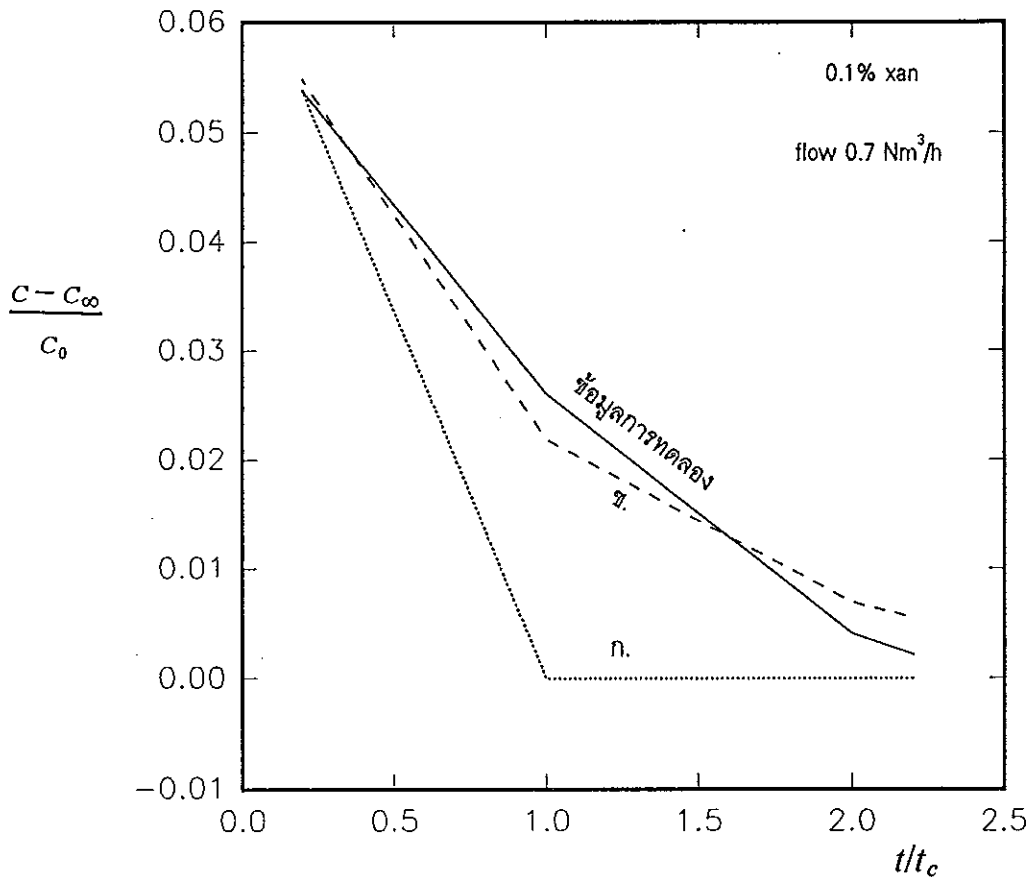
ตาราง 8 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ของสารละลายเซนแทนกัม ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint

สารละลายเซนแทนกัมความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

ข. ไม่มี constraint						
อัตราการใช้	$u_{sg}$			$t_m$	$\frac{t_m}{t_c}$	$r^2$
ให้อากาศ	(ชม./วินาที)			(วินาที)	(-)	
(ม. <sup>3</sup> /ชม.)						
0.3	0.61	$A^* = 0.03116$	$\alpha^* = 0.43741$	46.96	5.40	0.97765
		$A_1 = 0.1558$	$\alpha_1 = 0.43741$	46.97	5.40	0.94136
		$A_2 = 0.1558$	$\alpha_2 = 0.43741$			
0.7	1.42	$A^* = 0.11897$	$\alpha^* = 1.32423$	31.42	2.62	0.99988
		$A_1 = 0.05949$	$\alpha_1 = 1.32423$	31.42	2.62	0.99988
		$A_2 = 0.05949$	$\alpha_2 = 1.32423$			
1.0	2.03	$A^* = 0.38567$	$\alpha^* = 2.45068$	19.67	1.97	0.99926
		$A_1 = 0.19284$	$\alpha_1 = 2.44913$	19.66	1.97	0.99926
		$A_2 = 0.19284$	$\alpha_2 = 2.45222$			
1.5	3.04	$A^* = 0.09683$	$\alpha^* = 0.64988$	28.95	5.46	0.99038
		$A_1 = 0.04840$	$\alpha_1 = 0.64962$	28.96	5.46	0.99038
		$A_2 = 0.04840$	$\alpha_2 = 0.64962$			



2. ตัวอย่างกราฟที่แสดงการฟิตเส้นที่ลากเชื่อมจุดยอดของกราฟ เป็นไปดังภาพ ประกอบ 4.40



ภาพประกอบ 4.40 ตัวอย่างการฟิตเส้นที่ลากเชื่อมจุดยอดของกราฟ ด้วยสมการ exponential ที่ใช้ประมาณผลเฉลยของแบบจำลอง network-of-zone ตามกรณี ข้อ ก. มี constraint และ ข้อ ข. ไม่มี constraint

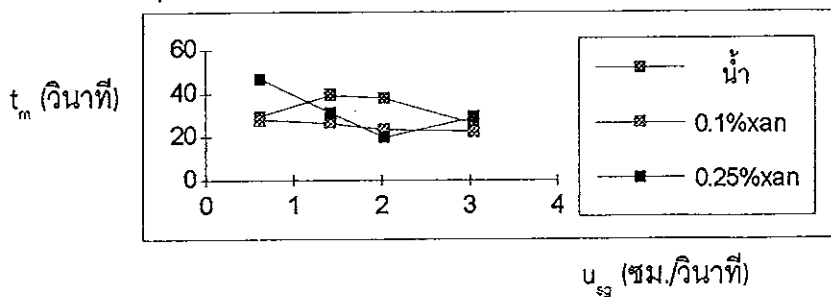
จากผลการฟิตแสดงให้เห็นว่า เราสามารถฟิตเส้นที่ลากเชื่อมจุดยอดของกราฟได้ด้วย เทอม exponential ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ การพัฒนาวิธีการประมาณพารามิเตอร์ ซึ่งจะเชื่อ ประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์การผสมในถังปฏิกรณ์ เนื่องจาก การพิจารณาเทอม  $A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)}$  หากสภาวะดังกล่าวให้การผสมที่ดีกว่า ใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า จะให้ค่า  $\alpha^*$  ที่สูงกว่า (กรณี  $\alpha^* = 1$ ) พิจารณาเช่นเดียวกันในเทอมของ

$A_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{t}{t_c}\right)} + A_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_c}\right)}$  ดังนั้น จะเห็นว่าการประมาณพารามิเตอร์เช่นนี้ก่อให้เกิดความ  
ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้นต่อการวิเคราะห์และตีความ

เมื่อพิจารณาการประมาณค่าพารามิเตอร์ตามกรณีข้อ ก. ที่มี constraint พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้ มีความผันแปรสูงไม่สามารถให้ข้อสรุปที่แน่นอนถึงผลของอัตราการให้อากาศ และผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อกลไกการผสมได้ เมื่อนำไปคำนวณค่า  $t_m$  พบว่าไม่สอดคล้องกับค่า  $t_c$  ทั้งนี้เป็นเพราะการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยการกำหนด constraint ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการตีความ (เพราะ  $A^* = 1, A_1 + A_2 = 1$ ) แต่จะทำให้การฟิต ค่า ในช่วงท้าย ๆ ไม่ดี เมื่อคำนวณหา  $t_m$  ตามที่นิยามไว้ในภาคผนวก จ จึงทำให้ค่า  $t_m$  มีความผิดพลาดสูง

เมื่อพิจารณาการประมาณค่าพารามิเตอร์ตามกรณีข้อ ข. ที่ไม่มี constraint พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ เมื่อนำไปคำนวณ  $t_m$  ให้ผลที่สอดคล้อง และน่าเชื่อถือกว่ากรณีข้อ ก. เมื่อเทียบกับ  $t_c$  การประมาณค่าพารามิเตอร์ เมื่อไม่กำหนด constraint นั้น จะตีความยากกว่ากรณีข้อ ก. แต่จะฟิตค่าในช่วงท้าย ๆ ได้ดีกว่า จึงคำนวณค่า  $t_m$  ออกมาได้ น่าเชื่อถือกว่า เราจึงเลือกการฟิตตามกรณีข้อ ข. ไม่มี constraint แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปคำนวณหา  $t_m$  ของน้ำ, สารละลายแซนแทนกับสำเร็จความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนักพบว่า ขนาด (magnitude) ของ  $t_m$  สอดคล้องกับที่ Margaaritis and Sheppard (1981) ได้ศึกษาไว้ในถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยกขนาด 14 ลิตร ช่วงอัตราการให้อากาศ 0-6 VVM ผลการทดลองของเขาพบว่า ในกรณีที่ไม่มีท่อกราฟ  $t_m = 14-34$  วินาที ในกรณีที่มีท่อกราฟท่อเดียว  $t_m = 13-32$  และ 14-40 วินาที ในกรณีที่มีท่อกราฟสองท่อ  $t_m = 20-48$  และ 26-50 วินาที

เมื่อนำ  $t_m$  จากข้อมูลการทดลองมาพล็อตกราฟเทียบกับ  $u_{sg}$  ได้ผลดังภาพประกอบ 4.41 จะเห็นว่าค่า  $t_m$  มีแนวโน้มลดลง เมื่อ  $u_{sg}$  เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับ  $t_c$



ภาพประกอบ 4.41  $t_m$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $u_{sg}$  กรณีข้อ ข. ไม่มี constraint

ดังนั้นวิธีที่น่าจะดีที่สุด ที่จะสามารถตีความได้ง่าย และให้ผลการพิตในช่วงปลาย ๆ ดี คือการพิตด้วยเทอมที่มี constraint และมีการถ่วงน้ำหนัก (weight) ข้อมูล แต่ไม่ได้เสนอไว้ในที่นี้ เนื่องจากข้อมูลที่ได้นั้นพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอันเนื่องมาจาก เทคนิคที่ใช้ในการวัดยังมีความเร็วไม่เพียงพอ ที่จะบันทึกรายละเอียดทั้งหมดได้ จึงยังไม่สามารถแยกภาวะการผสมที่ดีออกจากภาวะการผสมที่ด้อยกว่าได้ในงานวิจัยนี้ แต่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่คาดว่าน่าจะใช้ในการแก้ปัญหาได้ ไว้ในข้อเสนอแนะ

## บทที่ 5

### สรุป

การนำแนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้นเข้ามาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ส่งผ่านและการผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ที่ใช้พอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งเป็นของไหลนอน-นิวโตเนียนนั้น ในเบื้องต้นเป็นการแบ่งแยกการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือเชื้อจุลินทรีย์โดยตรงออกจากการศึกษาในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือเชื้อจุลินทรีย์นั้น โดยจะต้องสามารถเชื่อมต่อสองส่วนนี้เข้ากันได้อย่างสมเหตุสมผล ในขั้นนี้เราจึงพัฒนาเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยีขึ้นมาใช้ในการเชื่อมต่อสองส่วนดังกล่าว

จากการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของระบบของไหลจำลองกับบรอกจริง ซึ่งเลือกกรณีศึกษาเป็นสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จกับบรอกแซนแทนจริง พบว่า สามารถเทียบเคียงความเข้มข้นของ บรอกแซนแทนจริงไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จที่มีค่าลดลง โดยสมบัติทางรีโอโลยีที่ใช้ในการศึกษาคือ สมบัติต่าง ๆ ทั้งทางด้านการเฉือนคงที่ (steady shear) ซึ่งเป็นสมบัติทางด้านความหนืด และ สมบัติไดนามิก (dynamic properties) ซึ่งเป็นสมบัติของของไหลวิสโคอิลาสติก

หลังจากที่สามารถเทียบเคียงของไหลจำลอง ซึ่งก็คือ สารละลายแซนแทนกัมสำเร็จเข้ากับบรอกแซนแทนจริงได้แล้ว ในส่วนถัดมาเราจึงนำของไหลจำลองมาใช้ในการศึกษาผลของรีโอโลยีเชิงซ้อน, อัตราการให้อากาศ และลักษณะโครงสร้างของถังปฏิกรณ์ที่มีต่อกลศาสตร์การไหล ในส่วนนี้สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเพียงในส่วนของผลของตัวแปรดังกล่าวต่อการผสม (mixing) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการศึกษาการผสมภายในถังปฏิกรณ์ โดยวิธีพัฒนาและชิมิวเลตแบบจำลองและวิธีติดตามการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรชเซอร์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงเวลาที่ใช้ในการวนครบรอบ ( $t_v$ ) โดยใช้เทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique) และการติดตามการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรชเซอร์ พบว่าผลที่ได้เรียงตามลำดับดังนี้

## 1. สามารถพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใหม่ สองแบบ คือ

- แบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตร (volumetric backmixing-circulation model)

ในส่วนนี้เป็นการเสนอแนวคิดและพัฒนาจาก Mecklenburgh and Hartland (1975) ที่ กำหนดให้ความเร็วของของไหลคงที่ตลอดคอลัมน์ ซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อการใช้งานในถึงปฏิกรณ์แบบรูป ดังนั้นเราจึงเสนอแนวคิดแบบจำลองใหม่ที่กำหนดให้ อัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ แทนการกำหนดให้ความเร็วคงที่เป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนา สำหรับแบบจำลองนี้ การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ทำได้ยากมาก ที่น่าจะทำได้คือการหาผลเฉลยโดยวิธีเชิงตัวเลข โดยนำเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลข อันได้แก่ finite-difference technique และ Runge-Kutta method มาใช้ แต่ในที่นี้ ในส่วนของแบบจำลองการผสมย้อนกลับเชิงปริมาตรนั้น เรานำเสนอเพียงแนวคิดดังกล่าวข้างต้น มิได้นำเสนอการหาผลเฉลย เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเวลาในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

-แบบจำลองโครงข่ายของโซน (network-of-zone model) แบบจำลองนี้เรานำเสนอทั้งแนวคิดและการหาผลเฉลยของแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ แต่พบว่ถึงปฏิกรณ์ที่มีจำนวนโซนมากกว่า 2 โซน การหาผลเฉลยเชิงตัวเลขน่าจะสะดวกกว่า เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่นำมาใช้ ได้แก่ finite-difference technique และ Runge-Kutta method ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ มีความยืดหยุ่นดีกว่าหลาย ๆ แบบจำลองที่มีการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ และมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในระดับหนึ่ง

## 2. การพยายามหาวิธีการประมาณและประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้ด้วยเทอมอย่างง่าย คือ

$$A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)}$$

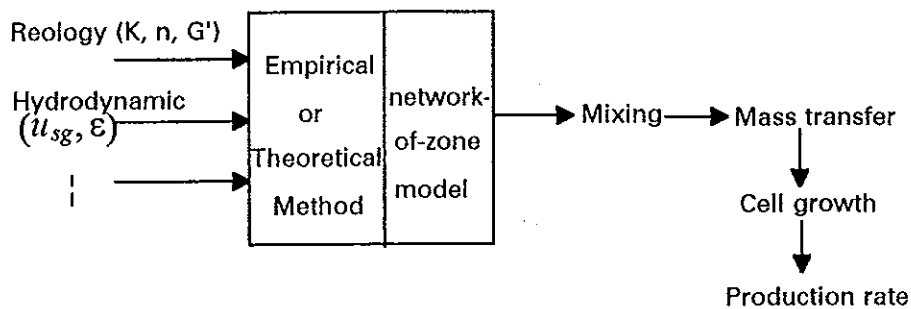
และ / หรือ

$$A_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{t}{t_c}\right)} + A_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_c}\right)}$$

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปคำนวณเวลาที่ใช้ในการผสม ( $t_m$ ) พบว่าขนาด (magnitude) ของ  $t_m$  มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้มีผู้เคยทำการศึกษาไว้ และ  $t_m$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อ gas superficial velocity ( $u_{sg}$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการวนครบรอบ ( $t_r$ ) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $t_r$  มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสารละลายแซนแทนกัมสำเร็จมีความเข้มข้นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม

ตามแนวโน้มดังกล่าวยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลยังต้องมีการพัฒนาต่อไปอีก ดังนั้นสำหรับการศึกษากการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่พัฒนาขึ้น ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผลเชิงวิเคราะห์ที่แสดงถึงอิทธิพลของปัจจัยตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการผสมนั้น เป็นส่วนน้อย แต่สิ่งที่เน้นและให้คุณค่าอย่างยิ่งคือ การพัฒนาวิธีการที่จะจัดการกับปัญหาและแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งจะเป็นแนวทางให้ผู้สนใจที่จะศึกษาต่อไปใช้เพื่อการเก็บข้อมูลและนำมาวิเคราะห์ได้ง่าย สะดวกและรวดเร็วขึ้น

จากสิ่งที่ได้ศึกษาไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ พอจะแบ่งออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาและเทียบเคียงทางรีโอโลยี ส่วนที่สองเป็นการพัฒนาและซิมูเลตแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษากการผสม แต่ยังไม่ได้เชื่อมทั้งสองส่วนดังกล่าวเข้าด้วยกัน กล่าวคือในแบบจำลอง network-of-zone ที่เราพัฒนาขึ้น ยังมีได้กล่าวถึงอิทธิพลของสมบัติทางรีโอโลยีต่อกลไกการผสมในถังปฏิกรณ์ พิจารณาภาพประกอบ 5.1



ภาพประกอบ 5.1 ความสัมพันธ์ของข้อมูลการทดลองในส่วนต่าง ๆ ที่เชื่อมโยงต่อกันไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบถังหมัก

จะเห็นว่าเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแบบจำลอง network-of-zone กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สมบัติทางรีโอโลยี, ไฮโดรไดนามิกส์ได้โดย

1 เชิงทฤษฎี โดยการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) เข้ามาประยุกต์ใช้ แต่จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากเกินไป

2 เชิงเอมไพริคัล โดยการทำการทดลองศึกษาเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งง่ายและมีความเป็นไปได้มากกว่าวิธีในเชิงทฤษฎี แต่ในงานวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่สามารถศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแบบจำลอง network-of-zone กับปัจจัยต่าง ๆ นั้นได้ เนื่องจาก

จากเทคนิคที่ใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลนั้นยังต้องมีการพัฒนาต่อไปอีก

จึงเป็นแนวทางให้ผู้สนใจจะศึกษาต่อ สามารถมองเห็นแนวทางของการวิจัยในขั้นต่อไป ซึ่งเมื่อสามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แล้ว แบบจำลอง network-of-zone นั้นก็จะแสดงกลไกการผสมโดยสามารถระบุผลของแต่ละปัจจัยได้มากขึ้น จากลักษณะการผสมที่ได้ก็จะสามารถเชื่อมโยงต่อเนื่องไปยัง การถ่ายโอนมวลสาร การเจริญเติบโตของเซลล์ และอัตราการผลิต ในที่สุด ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพจากจุลินทรีย์ได้ในที่สุด

การศึกษาที่ต่อเนื่องไปจากส่วนนี้ ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 5.2 โดยที่ขอบเขตเส้นประแสดงถึงงานที่ได้ศึกษาไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากการศึกษาครั้งนี้ ทำให้เราสามารถที่จะเห็นแนวโน้มของการนำเอาเทคนิคการเทียบเคียงทางรีโอโลยี ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดของการศึกษาแบบเพิ่มความซับซ้อนเป็นขั้น เข้ามาประยุกต์ใช้ ทั้งนี้และทั้งนั้นเทคนิคและแนวคิดดังกล่าวยังต้องการการนำไปพิสูจน์ในการประยุกต์ใช้สำหรับงานจริง นั่นคือ ควรจะต้องมีการศึกษาในส่วนถัดไปต่าง ๆ ให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน แล้วนำทั้งหมดไปใช้ในการออกแบบและขยายขนาด จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองเดิมที่มีผู้ศึกษากันไว้มากโดยใช้ dimensionless analysis นั้นว่าแนวคิดของการออกแบบและขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบใดมีคุณค่าแตกต่างกันอย่างไร

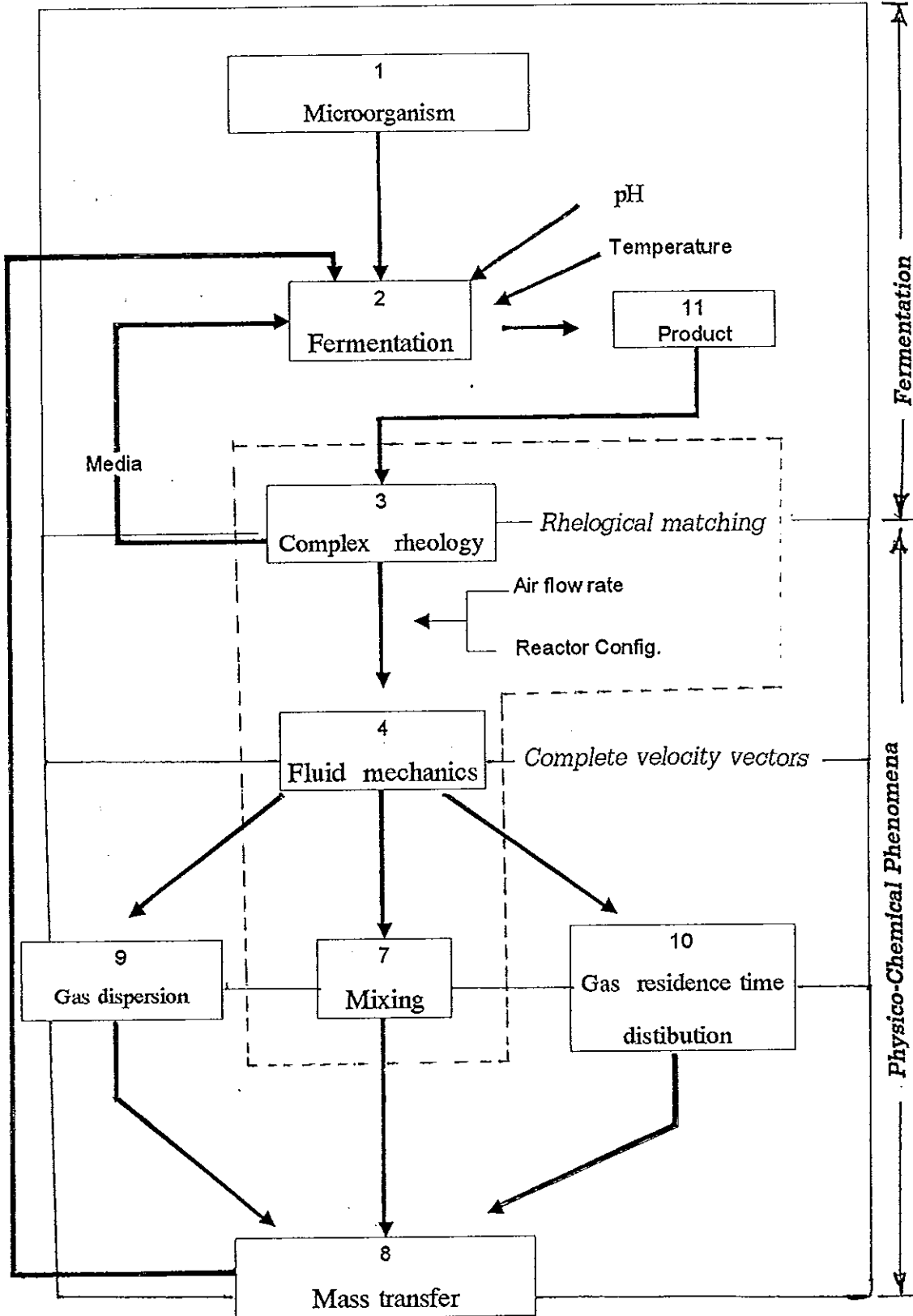
## ข้อเสนอแนะ

ในส่วน of ข้อมูลการทดลองโดยใช้ เทคนิคการติดตามการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์นั้น มีอยู่มากพอสมควร แต่ข้อมูลที่มีอยู่ในขณะนี้ยังไม่ได้นำมาใช้ อย่างเต็มที่ เพราะการพัฒนาแบบจำลองยังไม่สมบูรณ์พอที่จะนำมาใช้งาน อีกทั้งเทคนิคการเก็บข้อมูลยังไม่ดีพอ ทำให้เมื่อนำข้อมูลที่มีการผันแปรเกินพิกัดมาใช้ จะไม่สามารถแยกภาวะการผสมที่ดี ออกจากภาวะการผสมที่ด้อยกว่าได้ จึงควรมีการพัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลให้ดีขึ้น

### ปัญหา

#### 1. ปัญหาของวิธีการเก็บข้อมูล

ในการศึกษาการผสมโดยใช้วิธีติดตามการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเทรซเซอร์ เดิมที่เราศึกษาโดยใช้ conductivity meter ติดตามการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเกลือ (NaCl solution) แต่พบปัญหาความผันแปรของข้อมูลขณะ

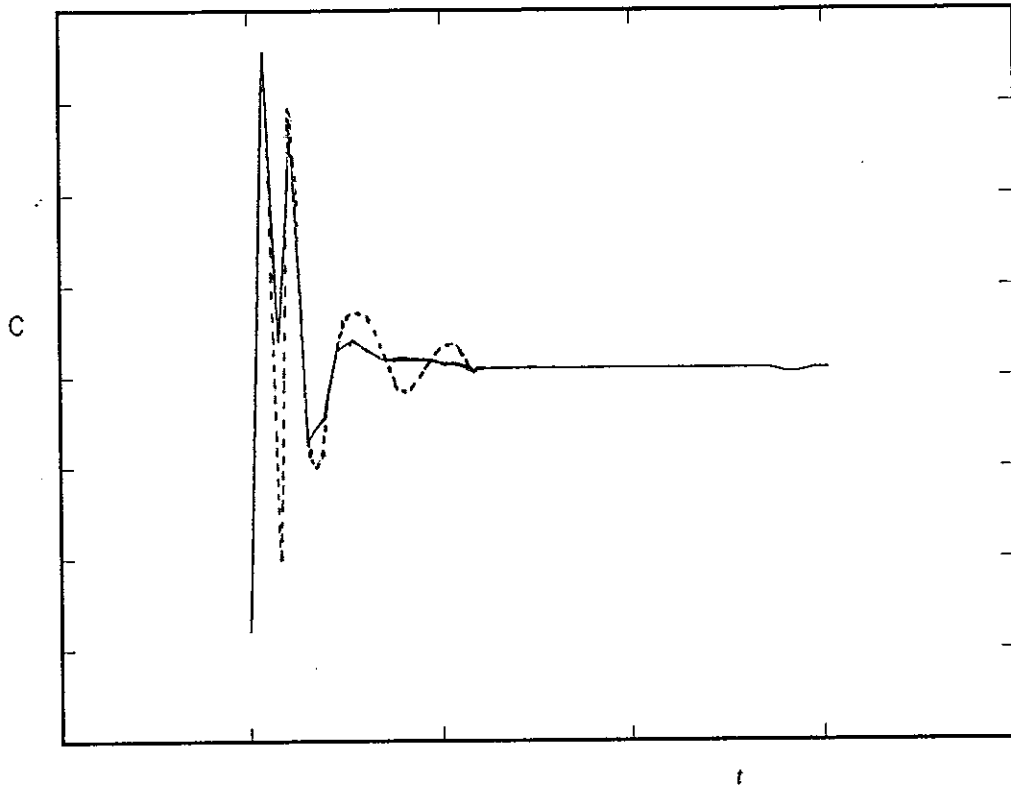


ภาพประกอบ 6.2 ขอบเขตงานวิจัยในขั้นนี้ (เส้นประ) และแนวทางการศึกษาต่อ



บันทึกผลที่เกิดจากการรบกวนของฟองอากาศต่อ เซนเซอร์ ของหัววัด ดังนั้นต่อมาเราจึงนำตาข่ายมาหุ้มหัววัด (probe) ดังกล่าวเพื่อป้องกันมิให้ฟองอากาศเข้าไปรบกวน ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจในของไหลที่เป็นน้ำ แต่เมื่อเปลี่ยนของไหลเป็นสารละลายแซนแทนก็ล้มสำเร็จ พบว่ากลไกการผสมที่บันทึกได้มีลักษณะเหมือนการแพร่ผ่านตาข่ายเข้าไปยัง เซนเซอร์ ซึ่งไม่ใช่กลไกการผสมที่เกิดขึ้นจริง ถัดจากนั้น เราจึงเจาะด้านข้างของถังปฏิกรณ์เพื่อติดตั้งตัวอย่างออกมาวัด แต่ก็ยังพบปัญหาของค่าความนำไฟฟ้าที่อ่านได้ไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถบันทึกค่าที่แน่นอนได้ และยังพบกับปัญหาของเวลาที่ใช้ในการติดตั้งตัวอย่างอีกด้วย

จนกระทั่งวิธีสุดท้ายที่พัฒนาขึ้นใช้ในงานวิจัยนี้ คือการใช้ pH meter ติดตามการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกรด HCl ซึ่งพบว่าสามารถลดความผันแปรของข้อมูลขณะบันทึกได้ เพราะ เซนเซอร์ ของ pH meter นั้นเป็น membran ไม่ถูกรบกวนจากฟองอากาศ แต่ยังพบปัญหาในส่วนของข้อมูลที่เก็บได้ กล่าวคือ ในการศึกษาการผสมที่ให้ผลเป็นกราฟการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของเหลว เซนเซอร์ ซึ่งมีการสั่นขึ้น-ลง เกิดเป็นพีคนั้น อาจเป็นไปได้ว่า กราฟที่น่าจะแสดงกลไกการผสมที่เกิดขึ้นจริง (-----) นั้นไม่ตรงกับกราฟที่บันทึกได้จากการทดลอง (——) ดังภาพประกอบ 5.3 ทั้งนี้เป็นเพราะในการวัดและบันทึกของเรานั้นถูกจำกัดด้วยเหตุผลต่อไปนี้



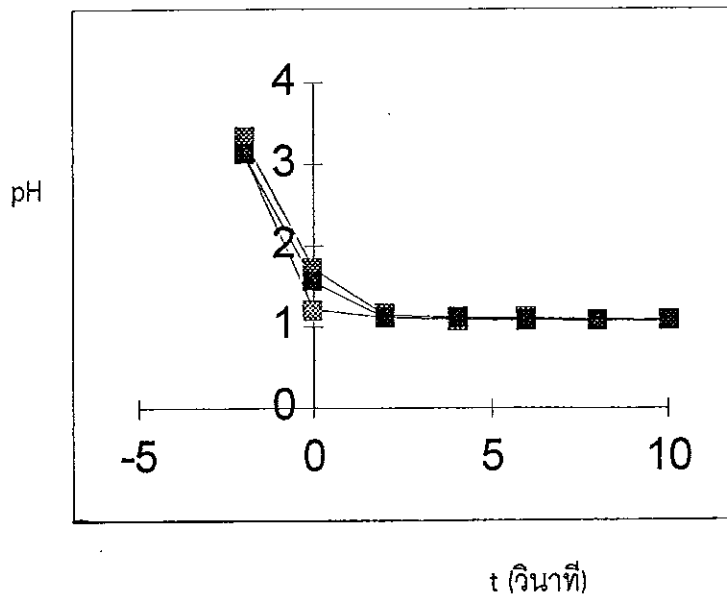
ภาพประกอบ 5.3 tracer response curve ที่บันทึกได้จากการทดลองและที่นำจะแสดงกลไกการผสมที่เกิดขึ้นจริง

- ความเร็วในการติดตามการเปลี่ยนแปลงพีเอช นั่นคือ เรานับที่ค่าพีเอช ได้เร็วที่สุดที่ทุก ๆ 2 วินาที ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวนี้อ เราก็ยังสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงของค่าพีเอช จากเครื่อง แต่ไม่สามารถบันทึกออกมาได้ ในช่วงเวลานั้นอาจเกิด ค่าสูงสุด, ค่าต่ำสุด ขึ้น แต่เราไม่สามารถบันทึกรายละเอียดนั้นได้ จุดพีคที่เรานับที่ได้อาจคลาดเคลื่อนไปจากจุดพีคของกลไกการผสมจริง

- ความล่าช้า (lag) ของเครื่อง ทำให้ค่าที่เราอ่านและจดบันทึกได้ ไม่ใช่ค่าที่แท้จริง ณ เวลานั้น จึงต้องมีการปรับแก้ (correct) เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

## 2. ปัญหาของ pH meter ที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองศึกษา time constant ของ pH meter ที่ใช้ในการทดลองพบว่า ตัวอย่างกราฟระหว่างค่าพีเอช กับ เวลาเป็นดังภาพประกอบ 5.4



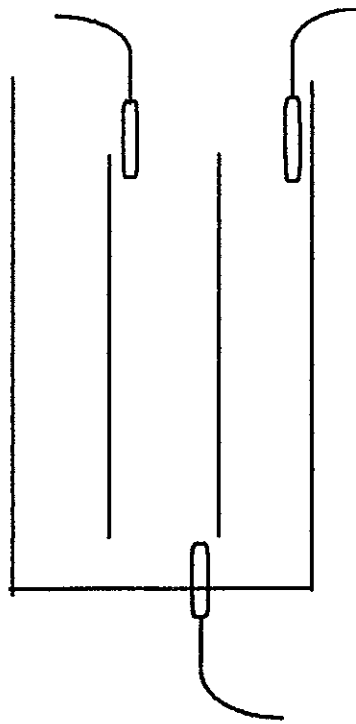
ภาพประกอบ 5.4 ค่าพีเอชที่อ่านได้เมื่อเวลาผ่านไปของเครื่อง pH meter หลังจากหยดกรดลงในน้ำ

แสดงว่า pH meter ของเรานั้น มีค่า time constant ประมาณ 1.5 วินาที จึงต้องมีการปรับแก้ค่าที่อ่านได้ เพื่อให้เป็นค่าจริง นอกจากนี้ยังพบว่า pH meter ที่ใช้มีความเสถียร (stability) ไม่ดีพอ ค่าที่อ่านได้ไม่คงที่ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

แนวทางการแก้ไข

ในการศึกษาการผสม

1. ควรใช้ pH meter หลาย ๆ ตัว ดังภาพประกอบ 5.5 เพื่อจะได้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงได้ในหลายๆ บริเวณ ของถังปฏิกรณ์ พร้อมกันในที่เดียว โดยที่ pH meter ที่ใช้ควรมีความเสถียรที่ดี

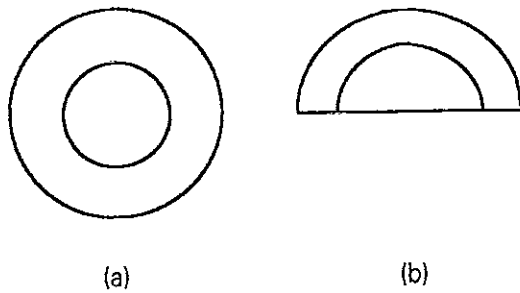


ภาพประกอบ 5.5 การใช้ pH electrode หลาย ๆ ตัวต่อเข้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์

2. ต่อ pH meter ทุกตัว เข้าคอมพิวเตอร์ เพื่อสามารถบันทึกการตอบสนองได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทุกจุดของการเปลี่ยนแปลง
3. ควรเขียนโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์มีการปรับแก้ อันเนื่องมาจาก time constant ของค่า pH ที่อ่านได้ไปในตัว (on line)

ในส่วนของการศึกษาโดยใช้เทคนิคการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้น ในงานวิจัยนี้เราได้พัฒนาถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดผ่าซีกขึ้น เพราะต้องการให้เกิดระนาบของการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการศึกษา ซึ่งตามข้อเท็จจริงแล้ว ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดผ่าซีกมีความแตกต่างไปจากถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดถังเต็ม แต่เราใช้การสังเกตและเหตุผลที่ว่า

1. ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดผ่าซีก เมื่อพิจารณา ใน downcomer zone นั้น มีพื้นที่ผนังส่วนเพิ่มเติมเป็นจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดตามภาพประกอบ 5.6 เราจึงพิจารณาว่าอิทธิพลจากผนัง (wall effect) ใน downcomer zone นั้น ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



ภาพประกอบ 5.6      ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่ใช้ในการวิจัย      เมื่อมองจากทางด้านบน  
(a) ชนิดดั้งเดิม      (b) ชนิดผ่าซีก

ส่วนใน riser zone นั้นจะมีอิทธิพลจากผนัง (wall effect) มาก แต่ยั้งดีที่บริเวณนี้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (turbulent) และมีฟองอากาศมาก ทำให้ velocity profile มีลักษณะแบนราบ (flat) ส่วน gas separation zone นั้นเป็นบริเวณที่มีการผสมดีในระดับหนึ่งซึ่งจะได้รับอิทธิพลจากผนังน้อยมาก

2. สารละลายเซนแทนท์สำเร็จที่ใช้ในการศึกษา มีสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติก ช่วยส่งผลให้ velocity profile มีลักษณะแบนราบ (flat) นั่นคือบริเวณตรงกลางที่มีอัตราความเร็วสูง ความหนืดจะลดลงมากกว่าบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังซึ่งมีอัตราความเร็วต่ำ

จากเหตุผลทั้งสองข้อดังกล่าว เราคาดว่า velocity profile ที่ได้จากดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดดั้งเดิมและชนิดผ่าซีกนั้น ไม่น่าจะแตกต่างกันมากนัก จึงเลือกใช้ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดผ่าซีก ในการศึกษาแทนดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดดั้งเดิม ซึ่งการคาดการณ์ดังกล่าวข้างต้นอาจไม่ถูกต้องทั้งหมด ดังนั้นผู้ที่สนใจจะศึกษาต่อจึงควรศึกษาถึงความน่าเชื่อถือของผลการทดลองที่ได้จากการใช้ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดผ่าซีกแทนการใช้ดังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดดั้งเดิมว่า มีความสมเหตุสมผลมาก-น้อยเพียงใด

ในส่วนของแบบจำลอง network-of-zone ที่พัฒนาและซิวิเวเลตขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ ยังจัดอยู่ในระดับที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อนมากนัก เพราะเราซิวิเวเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยกำหนดให้ การแลกเปลี่ยนมวลระหว่างสแตจถูกจำกัดอยู่เพียงหนึ่งมิติ เพื่อที่จะให้มีความเข้าใจกลไกการผสมมากขึ้น ผู้ที่สนใจจะศึกษาต่อควรซิวิเวเลตแบบจำลอง network-of-zone โดยกำหนดให้มีการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างสแตจใน 2 มิติ คือตามแนวแกน x และ y โดยข้อมูลการเคลื่อนที่ดังกล่าว เราสามารถหาได้จาก velocity profile ของเทคนิคการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle tracking technique) (แตกเวกเตอร์ความเร็วให้อยู่ในแนวแกน x

และ  $y$ ) ซึ่งการชิมิวดิตในลักษณะเช่นนี้จะช่วยลดข้อมูลเชิงเอมไพริคัลลง ทำให้ได้การชิมิวดิตที่มีความเข้าใจกลไกการผสมมากยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

นพดล อนุจาร์อาภา และคณะ. 2535. โรงงานต้นแบบผลิตโปรตีนเซลเดี่ยวจากมันสำปะหลัง : ตอนที่ 4 การขยายขนาดโดยใช้  $K_L a$  เป็นพารามิเตอร์สำหรับถังหมักแบบอากาศยก. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เบญจมา ชันทอง และ วัฒนาพร ฉิมเรศ. 2536. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกวนสารละลายแซนแทนกัมในถังหมัก. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศศิธร ไซตติศิริธร. 2536. การผลิตแซนแทนกัม ด้วยเครื่องชีวปฏิกรณ์แบบฟองอากาศจากสายพันธุ์คัดเลือก *Xanthomonas campestris*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภชัย บุญนำมา. 2535. การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก: สมการความสัมพันธ์และการประยุกต์เพื่อการขยายขนาด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. หลักสูตรวิศวกรรมเคมี, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

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.

- Balmer, G.J., Moore, I.P.T. and Nienow, A.W. 1987. Aerated and unaerated power and mass transfer characteristics of Prochem agitators, In : *Biotechnology progress : Scale-up and mixing*, Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.), AIChE, 116-127.
- Bello, R.A. 1981. A characterization study of airlift contactors for applications to fermentation. Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ontario.
- Bhavaraju, S.M., Russell, T.W.F. and Blanch, H.W. 1978. The design of gas sparged devices for viscous liquid systems, *AIChE J.* 24, 454-460.
- Blenke, H., Bohner, K. and Hirner, W. 1969. The pressure loss in the 180 - degree flow deflection in the loop reactor. *Verfahrenstechnik.* 3 : 444-452.
- Carreau, P.J., MacDonald, I.F., and Bird, R.B. 1968. A non-linear viscoelastic model for polymer solutions and melts, *Chem. Eng. Sci.* 23, 901-911.
- Charles, M. 1985a. Fermentation scale-up: problems and possibilities, *Trends in Biotechnology* 3, No.6, 134-139.
- Charles, M. 1985b. Fermenter design and scale-up, In : *Comprehensive Biotechnology*, Moo-Young, M. (ed.), Pergamon, Vol. 2, 57-75.
- Chen, I. and Bogue, D.C. 1972. Time dependent in polymer melts and review of viscoelastic theory, *Trans. Soc. Rheol.* 16, 59-78.
- Chisti, M.Y. 1989. *Airlift Bioreactors*, Elsevier Science Publishers Ltd.
- Chisti, M.Y., B.Halard and M.Moo-Young. 1988. Liquid Circulation in Airlift Reactors, *Chemical Engineering Science*, 43, 451-457.



- Christie J. Geankoplis. 1983. Transport Process and Unit Operations, Allyn and Bacon, Inc, second edition.
- Cottrell, I.W. 1980. Industrial potential of fungal and bacterial polysaccharides, 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 vol. 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: comparison of various bioprocesses, Proc. APBioChEC '90, Kyungju, Korea, 461-466.
- De Kee, D., Carreau, P.J. and Mordarski, 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 Mech. 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. 1985. Fermenteur agit'es sans organe d'agitation mecanique - Application a la production de polysaccharides exocellulaires, Bulletin de la Socie'te' Chimique de France 6, 1075-1082.
- Eliezer, E.D. 1987. Power absorption by the new and hybrid mixing systems under gassed and ungassed conditions, In : Biotechnology progress: Scale-up and mixing. Ho, C.S. and Oldshue, J.Y. (eds.), 20-30.
- Fields,P.R., Mitchell,F.R.G and Slater,N.K.H. 1984. Study 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.
- Fields,P.R. and Slater,N.H.K. 1983. Tracer dispersion in a laboratory air-lift reactor. Chem. Engng. Sci. 38 : 647-653.
- Funahashi, H., Machara, M., Taguchi, H. and Yoshida, T. 1987b. Effects of agitation by flat-bladed turbine impeller on microbial production of xanthan gum , J. Chem. Eng. Japan. 20 : 16-22.
- Funahashi, H., Harada, H., Taguchi, H. and Yoshida, T. 1987a. Circulation time distribution and volume of mixing region in highly viscous xanthan gum solution in a stirred vessel, J. Chem. Eng. Japan 20, 277-282.
- Funahashi, H., Hirai, K-I., Yoshida, T. and Taguchi, H. 1988a. Mixing state of xanthan gum solution in an aerated and agitated fermentor - Effects 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 a stirred tank, *J. Ferment. Technol.* 66, 355-364.
- Galindo, E. and Nienow, A.W. 1988, Mixing of simulated xanthan gum broths, 2nd Int. Conf. on Bioreactor Fluid Dynamics. King, R. (ed.), Elsevier, London, 65-78.
- 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.
- Godbole, S.P., Hannath, M.F. and Shah, Y.T. 1982. Holdup structure in highly viscous Newtonian and non-Newtonian liquids in bubble column, *Chem. Eng. Commun.* 16, 119-134.
- Godet, P. 1973. Fermentation of Polysaccharide gums, *Process Biochem.* 8, 1:33-34.
- Guy, C., Carreav, P.J. and Paris, J. 1986. Mixing characteristics and gas hold-up of a bubble column. *Can. J. Chem. Engng.* 64 : 23-35.
- Henzler, H.J. 1981. Gas liquid contacting in highly viscous liquid, In : *Advances in biotechnology*, Moo-Young, M. and Robinson, C.W. (eds.), Pergamon, Toronto, 1, 497-502.
- Hubbard, D.W. and Williams, C.N. 1977. 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 mixing in bubble columns with Newtonian and non-Newtonian fluids, Chem. Eng. Sci. 41, 1969-1977.
- Kawase, Y. and Moo-Young, M. 1986b. Influence of non-Newtonian flow behaviour on 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., Hallard, B. and Moo-Young, M. 1987b. Theoretical predictions of volumetric mass transfer coefficients in bubble columns for Newtonian and non-Newtonian fluids, Chem. Eng. Sci. 42, 1609-1617.
- Kawase, Y. and Moo-Young, M. 1988. Volumetric mass transfer coefficients in aerated stirred tank reactors with Newtonian and non-Newtonian media, 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 Kolmogoroff's theory of isotropic turbulence, Chem. Eng. J. 43, B19-B41.

- Kennedy, J.F. and Bradshaw, I.J. 1984. Production, properties and application of xanthan, *Progress in Industrial Microbiology* 19, 319-371.
- Kessler, W.R., Popovic, M.K. and Robinson C.W. 1993. Xanthan production in an external-circulation-loop airlift fermenter. *Can. J. Chem. Engng.* 71, 101-106.
- Kokini, J.L. and Plutchok, G.J. 1987. Viscoelastic properties of semisolid foods and their biopolymeric components, *Food Technol*, March, 89-95.
- Kolmogoroff, A.N. 1941, 1942, 1943. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids for very large Reynolds number, *C. R. Acad. Sci. U.S.S.R. (Dokl.)* 30 : 301-305, 31 : 538-540, 32 : 16-18.
- Levan, M.D. and Newman, J. 1976. The effect of surfactant on the terminal and interfacial velocities of a bubble or drop, *AIChE. J.* 22, 695-701.
- Levenspiel, O. 1972. *Chemical Reaction Engineering* 2nd. edition. John Wiley & Sons, Inc. New-York.
- Mackey, M.E. 1988. *Rheology for the non-rheologist*. University of Queensland.
- Margaritis, A. and Pace, G.W. 1985. Microbial polysaccharides, In : *Comprehensive biotechnology*, Moo-Yong, M. (ed.), Pergamon, 1005-1044.
- Margaritis, A. and D.te Bokkel. 1984. Rheology and air bubble terminal velocity measurements in non-newtonian polysaccacharide solutions, paper presented at the 187th Annual meeting, American Chemical Society. Philadelphia, August 26-31.

- Margaritis, A and Zajic, J.E. 1978. Mixing, mass transfer and scale-up of polysaccharide fermentation, *Biotechnol. Bioeng.* 20, 939-1001.
- Mcneely, W.H. 1933, 1968, 1969a, 1969b. Process for producing a polysaccharide. U.S. patent, 3, 232, 929; 3, 391, 061-062; 3, 427, 225; 3, 433, 708.
- Mecklenburgh, J.C. and Hartland, S. 1975. *The Theory of Backmixing*. A Wiley-Interscience Publication.
- Mendenhall, W. and Sincich, T. 1989. *Statistic for the engineering and computer sciences* 2nd edition. Dellen publishing company, San Francisco, California.
- Merchuk, J.C. 1986. Hydrodynamics and scale-up in airlift reactors. In : *Encyclopedia of fluid Mechanics*, Vol. 3 (Cheremisinoff, N.P., ed.) Gulf Publishing. Houston. 1485-1511.
- Merchuk, J.C. and Stein, Y. 1981. A distributed parameter model of an airlift fermentor: effects of pressure. *Biotechnol Bioengng.* 23 : 1309.
- Merchuk, J.C. and Siegel, M.H. 1988. Air-lift reactor in chemical and biological technology. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 41 : 105-120.
- Merchuk, J.C., Stein, Y. and Mateles, R. 1980. A distributed parameter model of an airlift fermentor. *Biotechnol Bioengng.* 22 : 1189.
- Merchuk, J.C. and Yungler, R. 1990. The role of the gas-liquid separator of airlift reactor in mixing process. *Chem. Engng. Sci.* 45 : 2973-2975.
- Michael, B.J. and Miller, S.A. 1962. Power requirement of gas-liquid agitated system, *AIChE J.* 8, 262-266.

- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1971. Xanthan biopolymer production at increased concentration by pH control, *Biotechnol. Bioeng.* 13, 381-391.
- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1973. Kinetics of xanthan fermentation, *Biotechnol. Bioeng.* 15, 225-237.
- Moraine, R.A. and Rogovin, P. 1966. Kinetics of polysaccharide B-1459 fermentation, *Biotechnol. Bioeng.*, 8, 511-524.
- 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.
- Onken, U. and Weiland, P. 1980. Hydrodynamics and mass transfer in an airlift loop fermentor. *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 10 : 31-40.
- 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 polysaccharides, *Adv. Biochem. Eng.* 151, 41-70.
- Patel, S.A., Glasgow, L.A., Erickson, L.E/ and Lee, C.H. 1986. Characterization of the downflow section of an airlift column using bubble size distribution measurements. *Chem. Engng. Commun.* 44 : 1-20.

- 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 fermentations: 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 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.
- Santore, M.M. and Prud'home, R.K. 1990. Rheology of a xanthan broth at low stresses and strains, *Carbohydr. Polym.* 12, 329-335.
- Schramm, G. 1981. *Haake Viscometers : Introduction to practical viscometry.*
- Siegel, M.H., Merchuk, J.C. and Schugerl, K. 1986. Air-lift reactor analysis : Interrelationships between riser, downcomer and gas-liquid separator behavior, including gas recirculation effects. *AIChE.Journal.* 32 : 1585-1596.
- Schugerl, K. 1981. Oxygen transfer into high viscous media, *Adv. Biochem. Eng.* 19, 71-174.
- 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, Ph.D. Thesis , Department of Chemical Engineering , University of Queensland , Australia.
- Sittig, W. 1982. The present state of fermentation reactors, J. Chem. Technol. Biotechnol. 32, 47-58.
- Smith, I.H. and Pace, G.W. 1982. Recovery of microbial polysaccharides, J. Chem. Technol. Biotechnol. 32, 119-129.
- 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. Ind. Symp. Ser. 64, A1-A13.
- Souw, P. and Demain, A.L. 1979, Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B 1459, Appl. Environ. Microbiol 37, 1186-1192.
- Steiskal, 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.
- Thomas, N.H. and Janes, D.A. 1986. Fluid dynamic considerations in airlift bioreactors. A.I.Ch.E. Meeting, Miami, November 1986.
- Thurston, G.B. 1981a. Shear rate dependence of the viscoelasticity of polymer solutions :  
1) Theoretical model, J. Non-Newtonian Mech. 9, 57-68.

Thurston, 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. Viscoelastic effects of polymers on single bubble dynamics, *AIChE J.*

21, 810-813.

Vonken, R.M., Holmes, D.B. and Den Hartog, H.W. 1964. Fluid flow in turbine-stirred, baffled

tanks, II, dispersion during circulation. *Chem. Engng. Sci.* 19 : 209.

Warnecke, H.J., Pruss, J. and Langemann. 1985. On a mathematical model for loop reactor-I

residence time distribution, moment and Eigenvalues. *Chem. Engng. Sci.* 40 :

2321-2326.

Warnecke, H.J., Pruss, J. and Langemann. 1985. On a mathematical model for loop reactor-II

estimation of parameters. *Chem. Engng. Sci.* 40 : 2327-2331.

Weiland, P. 1984. Influence of draft tube diameter on operation behavior of airlift loop

reactors. *Ger. Chem. Engng.* 7 : 374-385.

Weiland, P. and Onken, U. 1981. Fluid dynamics and mass transfer in an airlift fermentor

with external loop. *Ger. Chem. Engng.* 4 : 42-50.

Weiss, 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 Progress : 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 a viscoelastic fluid, *Int. J. Mult. Flow.* 4, 237-262.

## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก เทคนิค finite difference สำหรับแบบจำลองการหมุนเวียนที่มีการผสมย้อนกลับ (Backmixing-circulation model)

สมการ (2.9) ถึงสมการ (2.12) สามารถประมาณด้วยสมการ finite-difference ต่อไปนี้

$$\frac{-[c_{j,i+1} - c_{j,i-1}]}{2h_j} + \frac{1}{P_j} \frac{[c_{j,i+1} - 2c_{j,i} + c_{j,i-1}]}{h_j^2} = \frac{dc_i}{d\theta} \quad (n1)$$

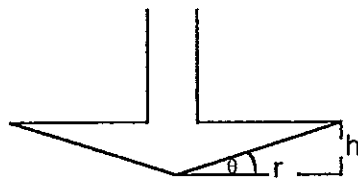
$j = 1, 2, \dots, 4$  โซนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

$i = 1, 2, \dots, N_j$  โดยที่  $N_j$  เป็นจำนวนปริมาตรย่อยในโซน  $j$

เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีการไหลวนเป็นรูปโดยที่ไม่มีกระแสของไหลเข้า หรือ ออกจากระบบ เมื่อกำหนด  $h_j, P_j$  และ  $N_j$  จะได้สมการอนุพันธ์สามัญอันดับแรก จำนวน  $N_1 + N_2 + N_3 + N_4$  สมการ ซึ่งสามารถอินทิเกรตเทียบกับ  $\theta$  ได้โดยวิธี Runge-kutta หรือวิธีอื่น ๆ โดยใช้ initial condition ที่เหมาะสม ส่วน boundary condition ของแต่ละโซนนั้นจะถูกกำหนดอย่างชัดเจนจากการเชื่อมต่อกับโซนที่อยู่ก่อนหน้าและตามหลัง

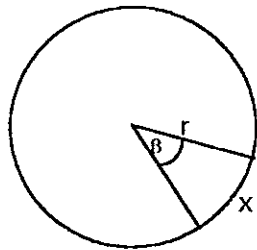
ภาคผนวก ข การแปลงความเครียด (strain) ในหน่วย rad หรือ องศา (deg) ไปเป็น %strain

จากลักษณะของ sensor PK 45 ที่ใช้ในการวัดสมบัติทางรีโอโลยีในโหมดไดนามิก เมื่อมองจากด้านข้าง



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

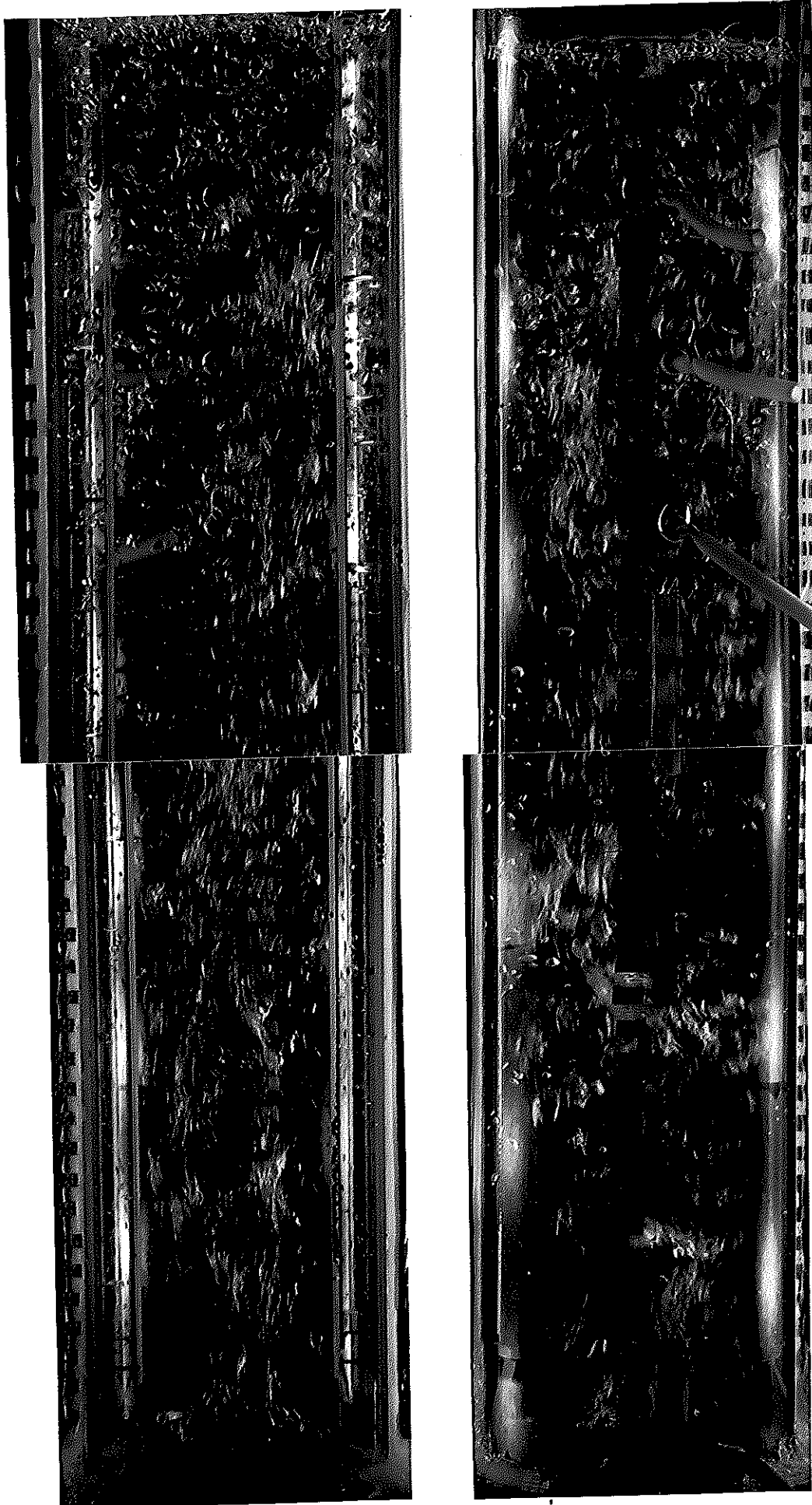
เมื่อมองจากด้านบน



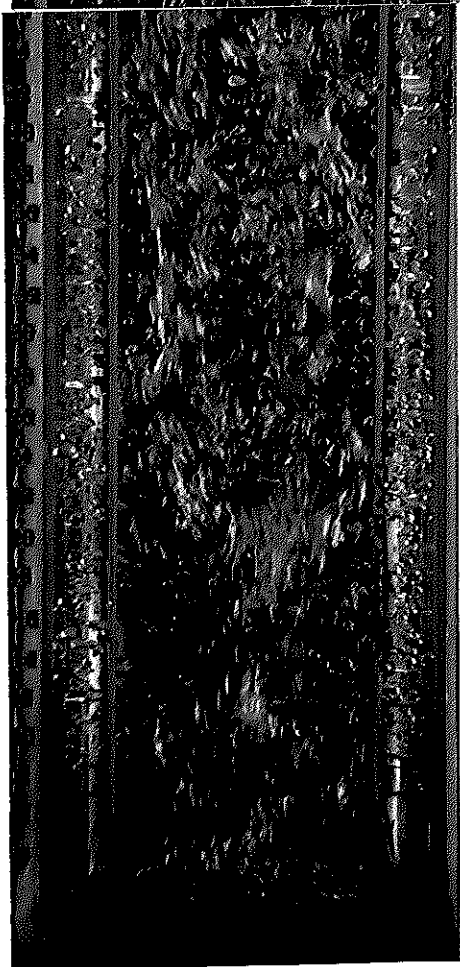
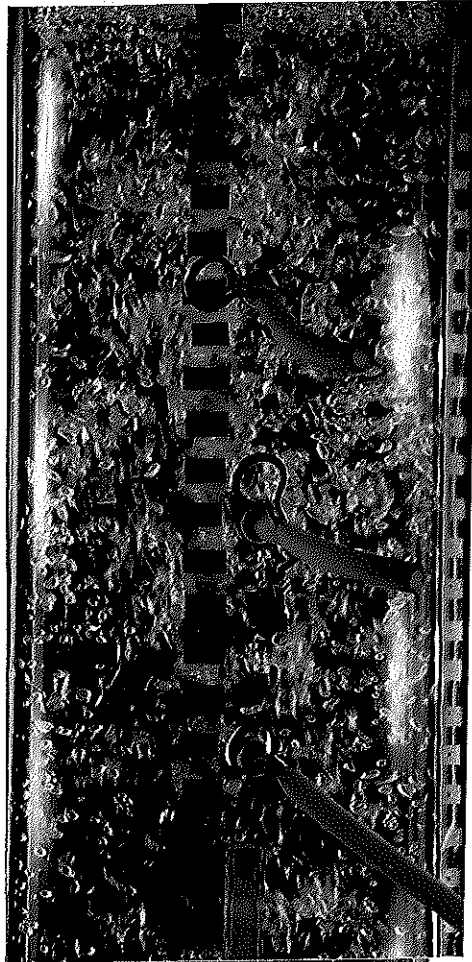
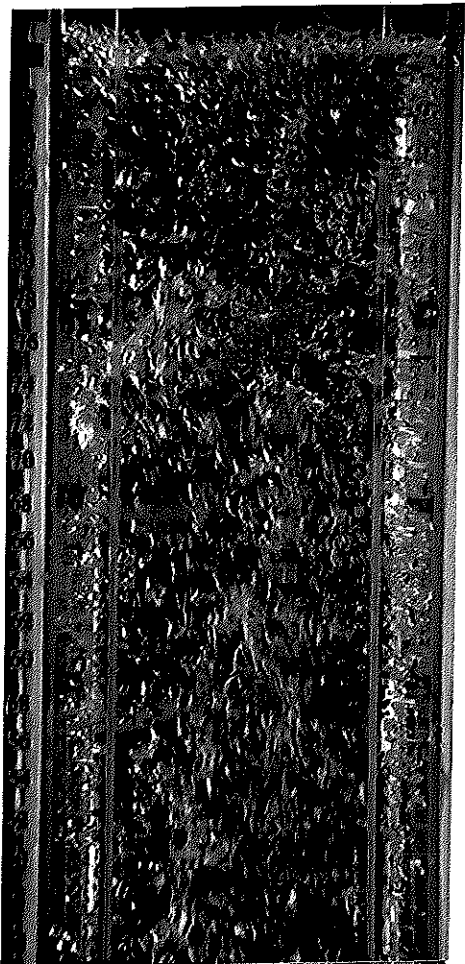
$$\%strain = \left( \frac{x}{h} \right) \times 100 \quad (x \text{ rad})$$

$$= \left( \frac{\beta r}{r \tan \theta} \right) \times 100 \quad (\beta \text{ deg})$$

ภาคผนวก ค รายละเอียดลักษณะการไหล การกระจายของฟองอากาศในน้ำ, สาร  
ละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.25 โดยน้ำหนัก

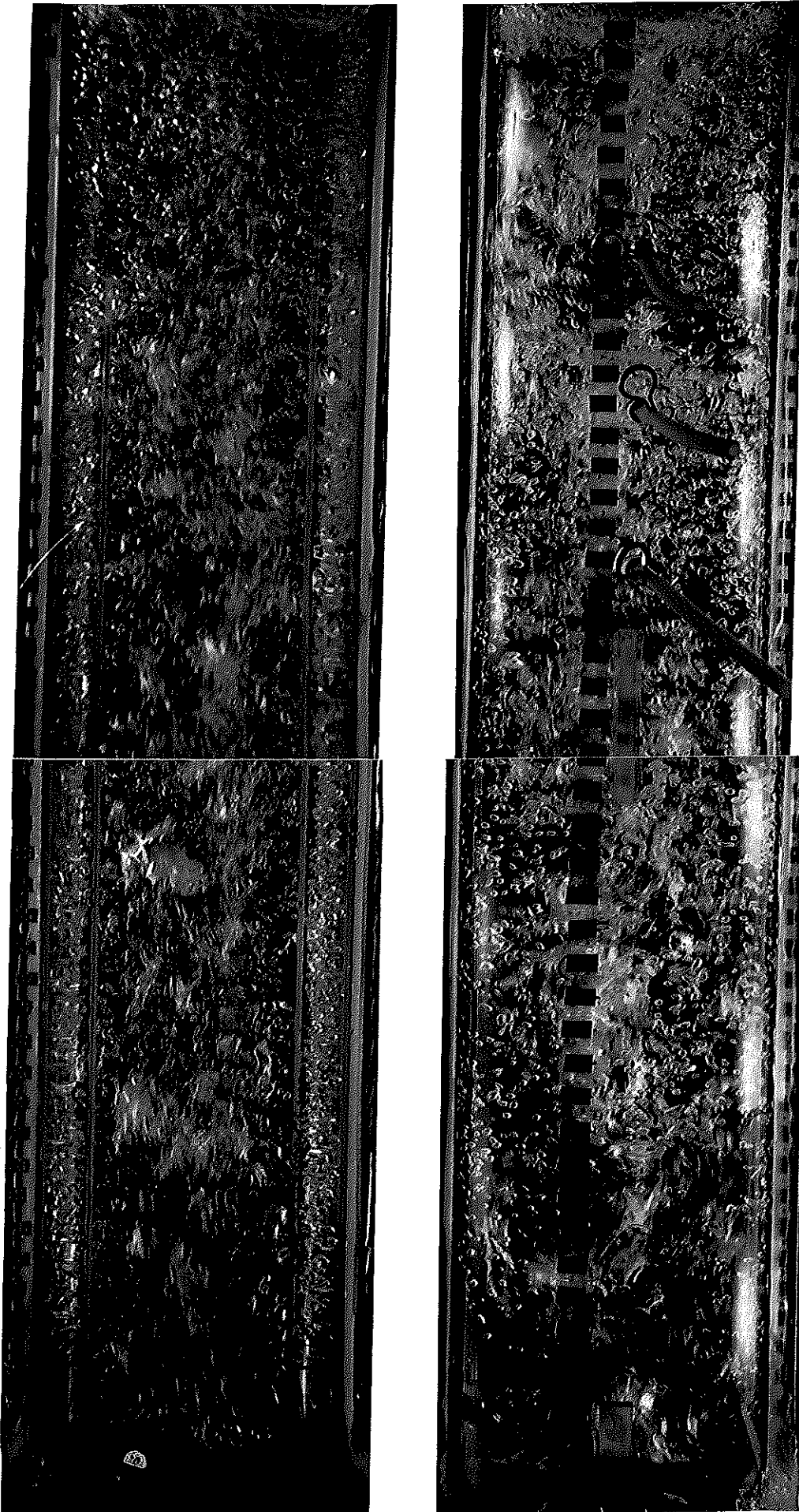


น้ำ อัตรการให้อากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

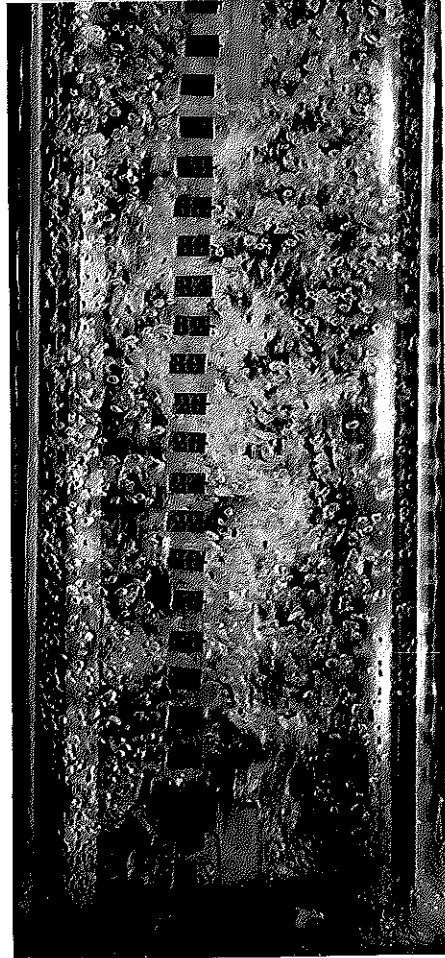
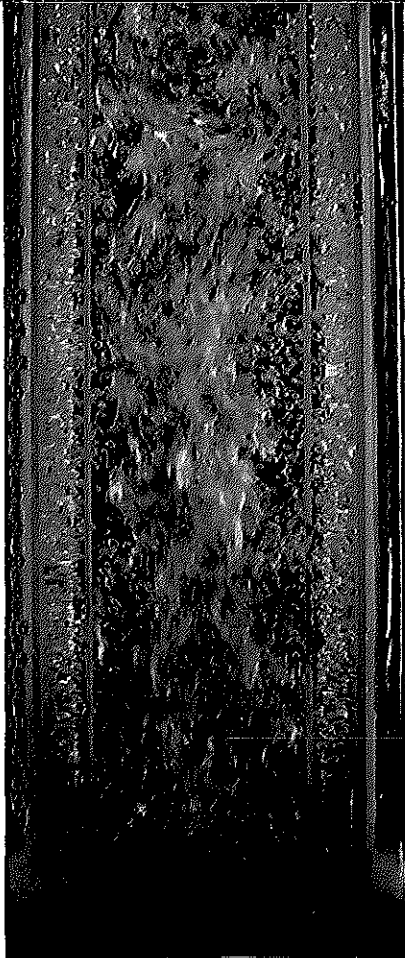
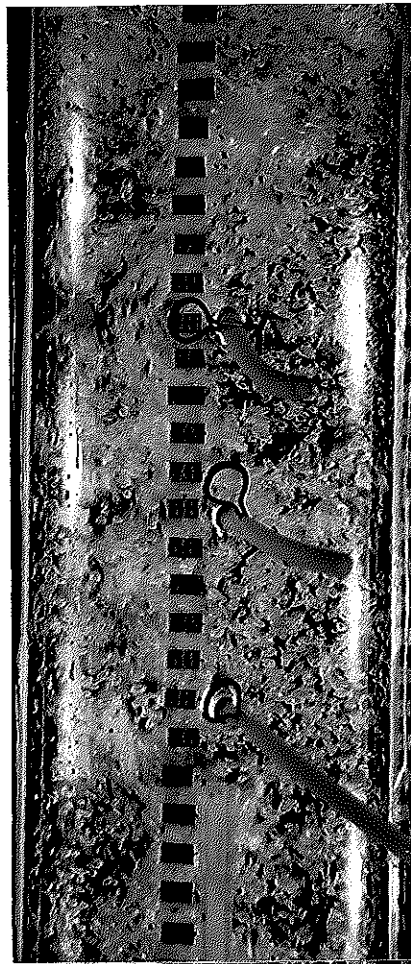
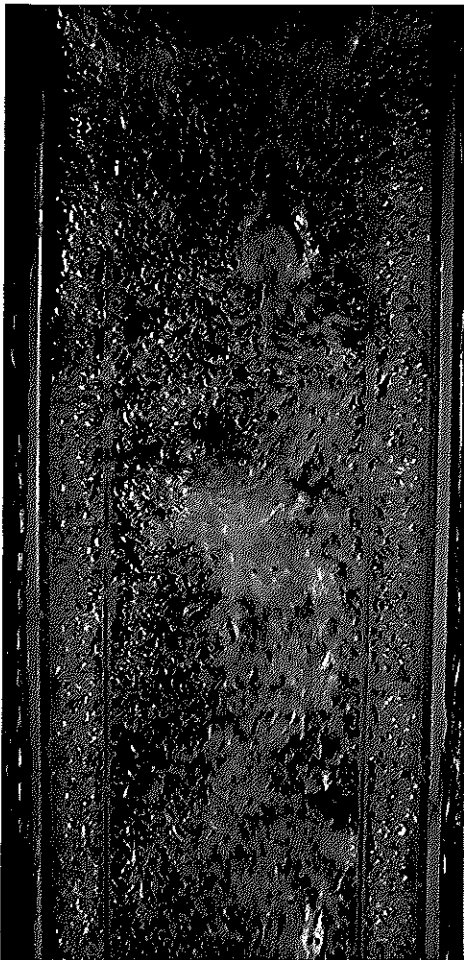


น้ำ อัตราการให้อากาศ 0.7 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง





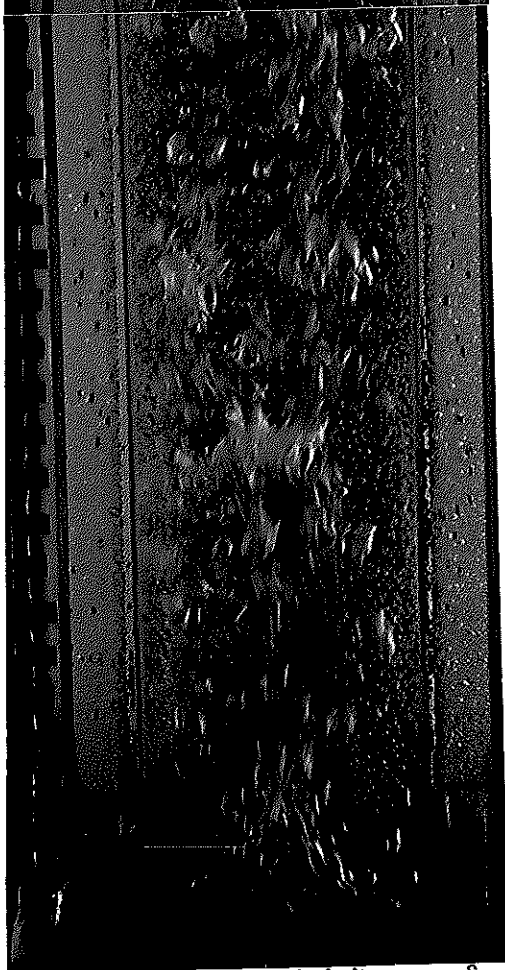
น้ำ อัตรการให้อากาศ 1.0 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



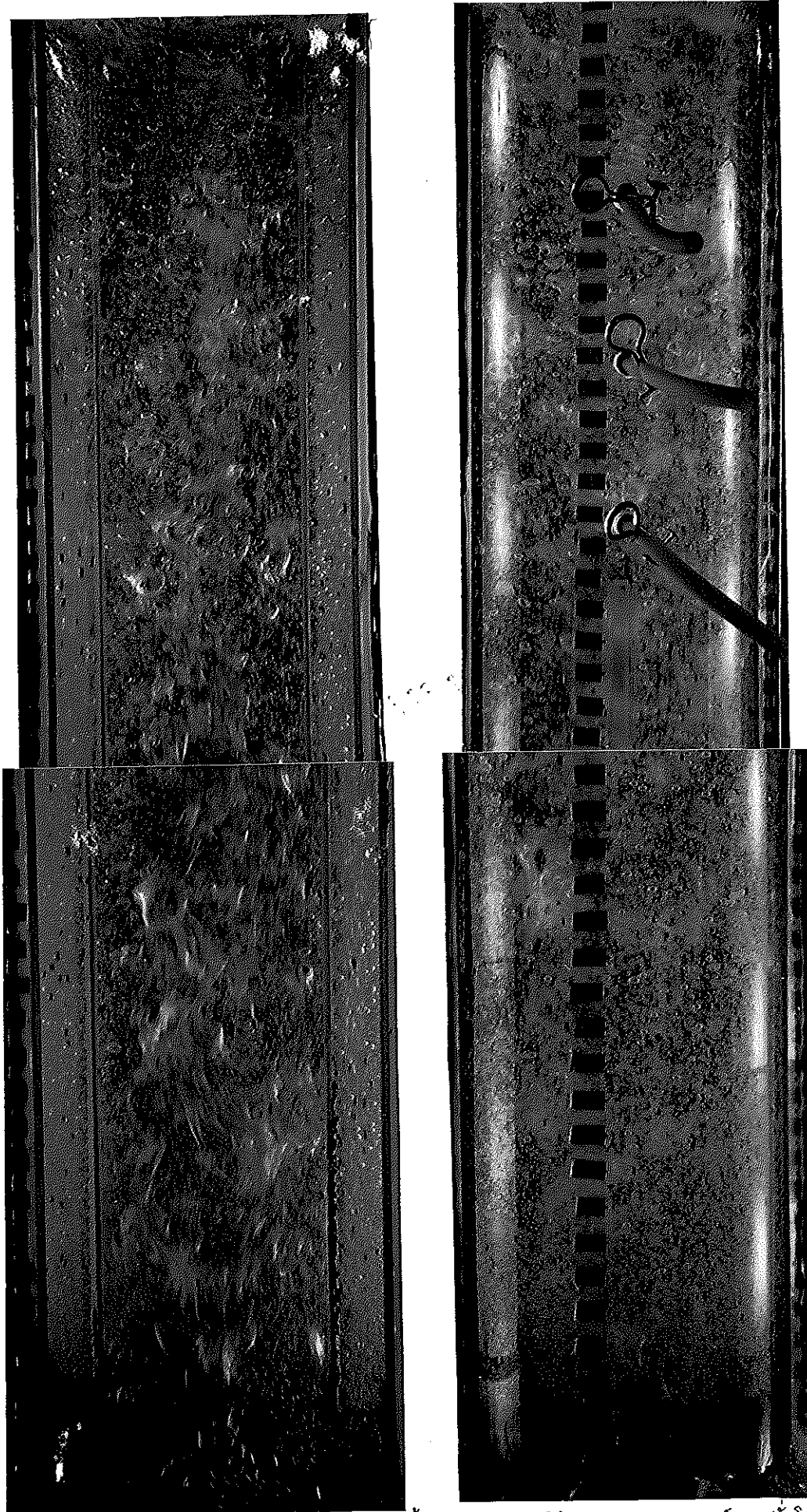
น้ำ อัตราการให้อากาศ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



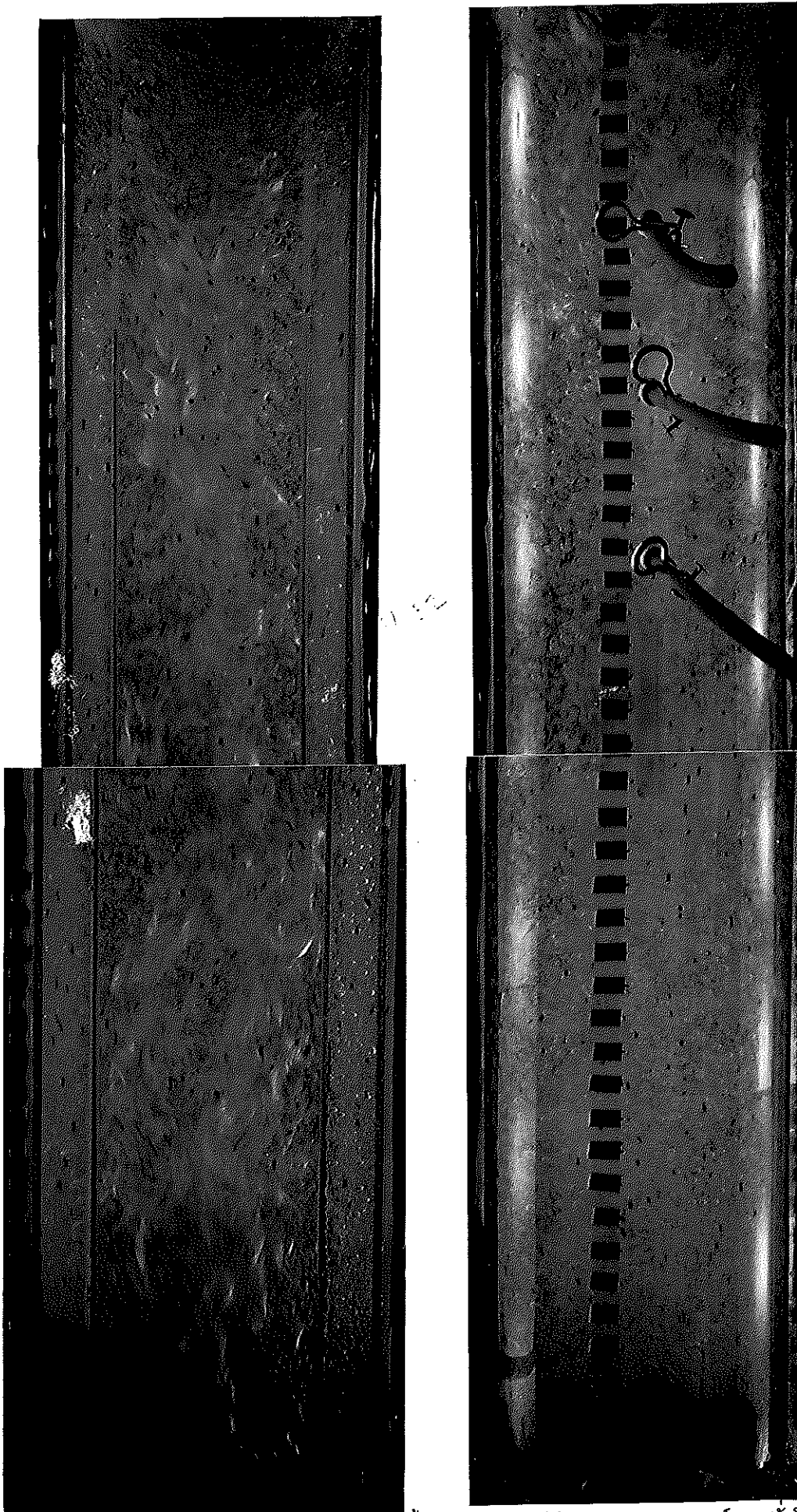
สารละลายแซนเธนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



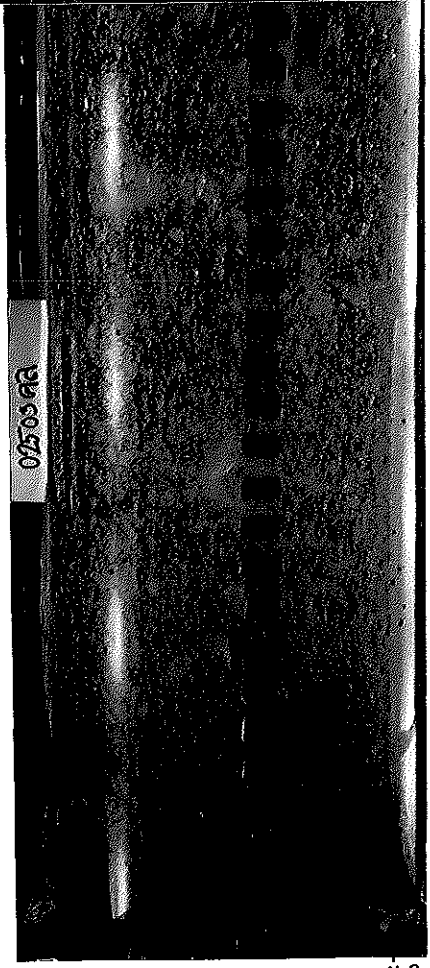
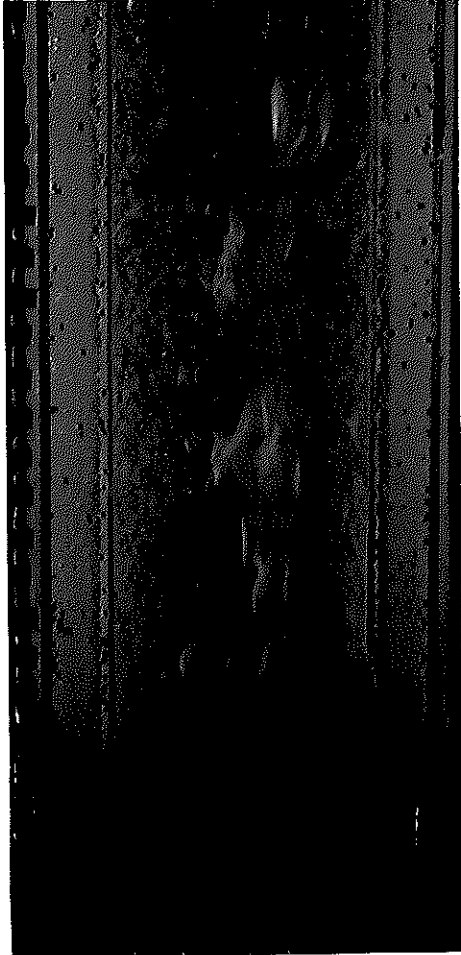
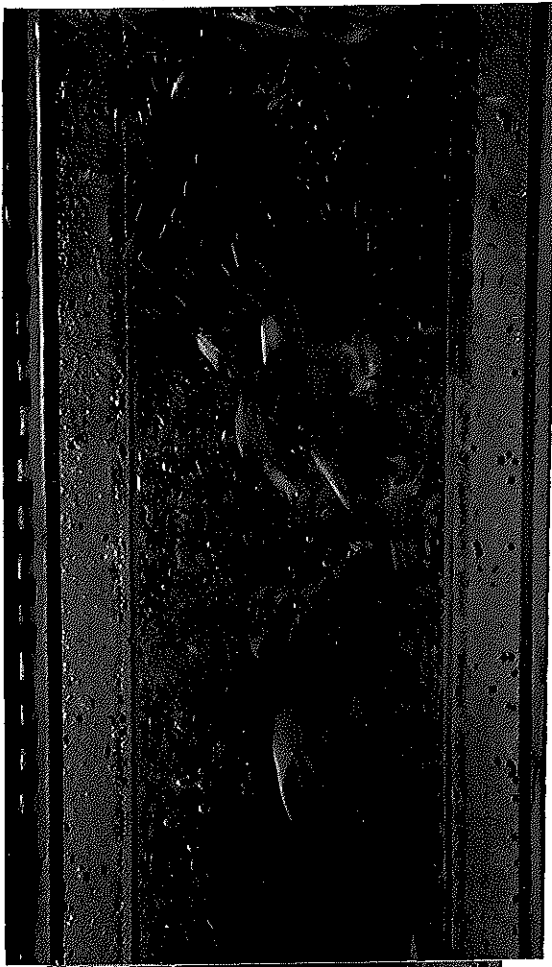
สารละลายแซนแทนกับมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.7 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



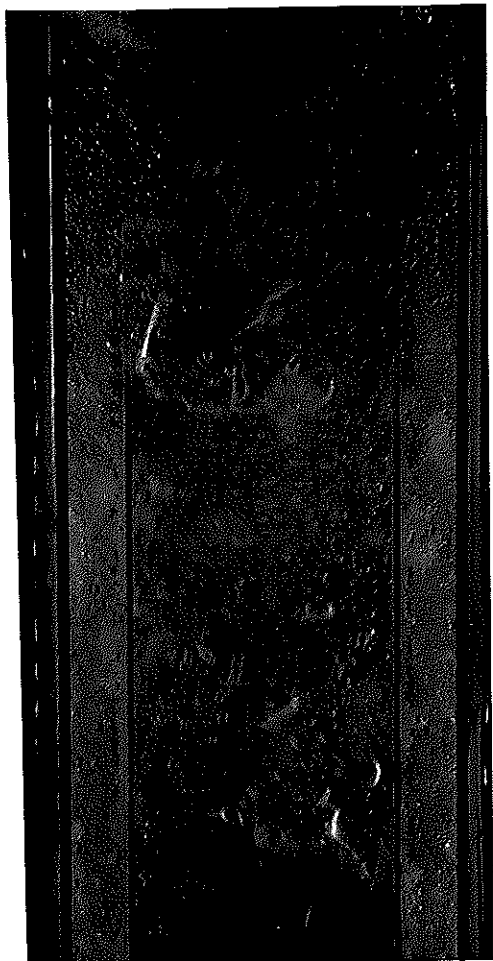
สารละลายแซนแทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.0 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



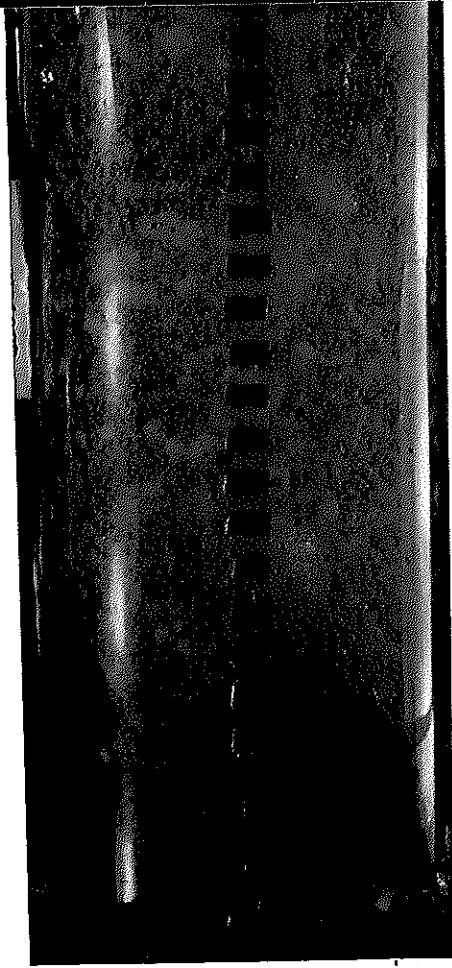
สารละลายแทนแทนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



สารละลายแซนแทนกับมีความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

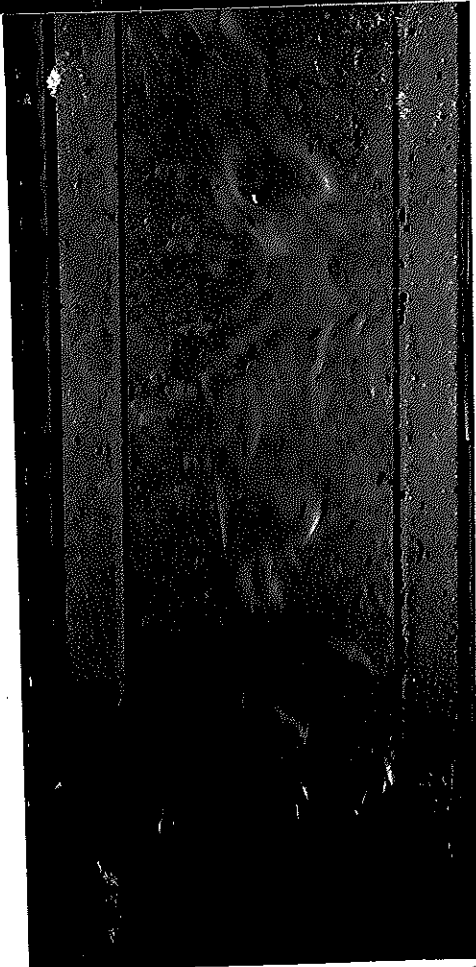
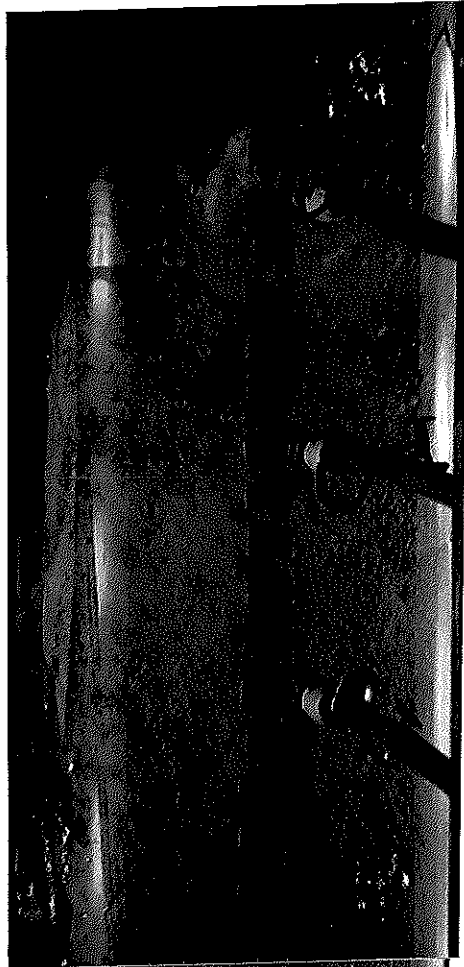
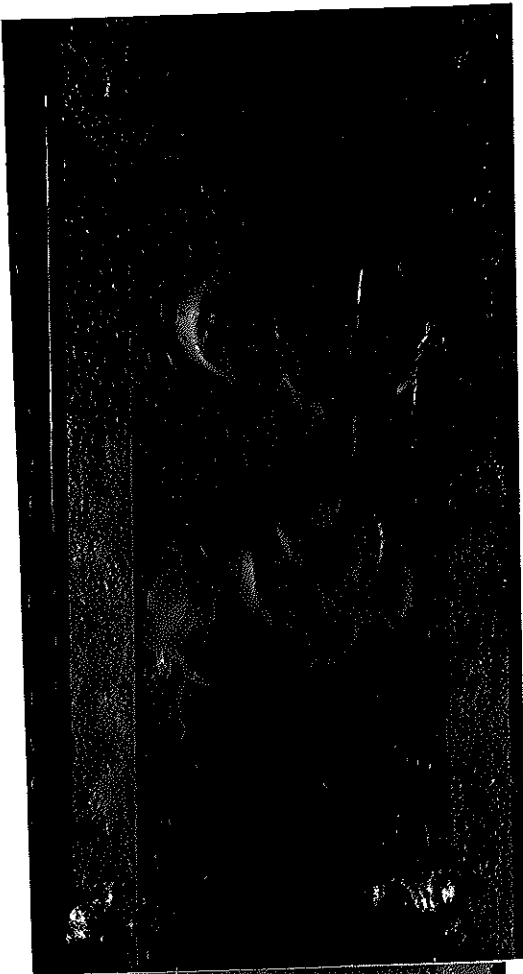


๑

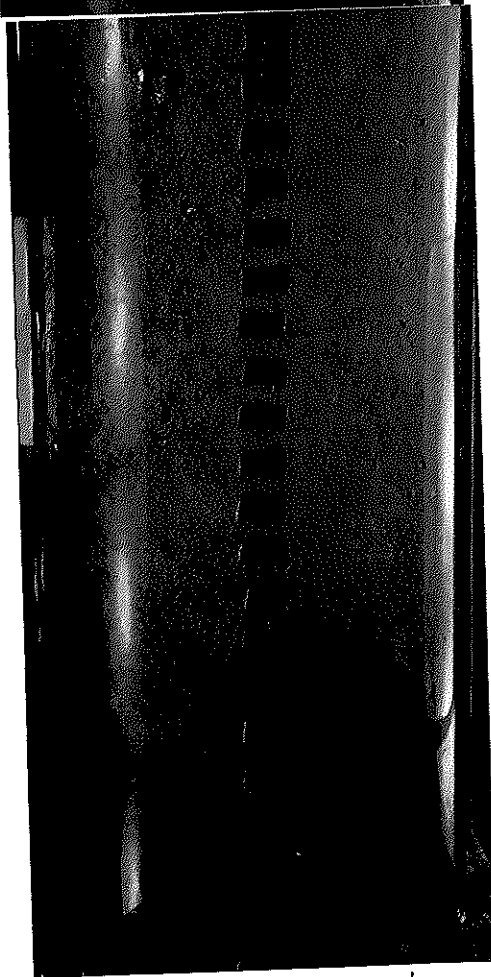
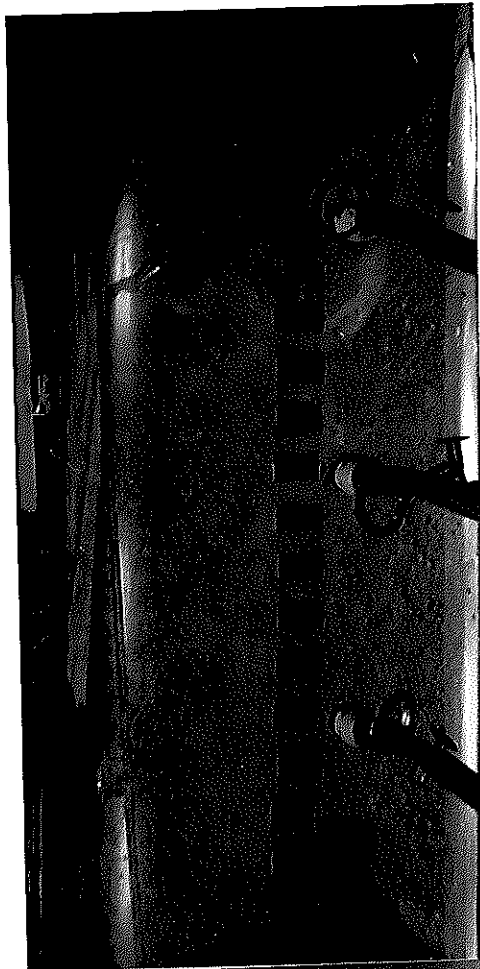


สารละลายแซนเทนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 0.7 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง





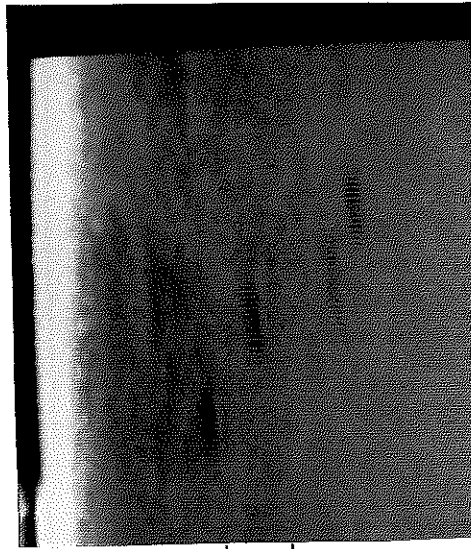
ดาวกระจายแสนแฉกมีความเข้มชั้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้จากาศ 1.0 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง



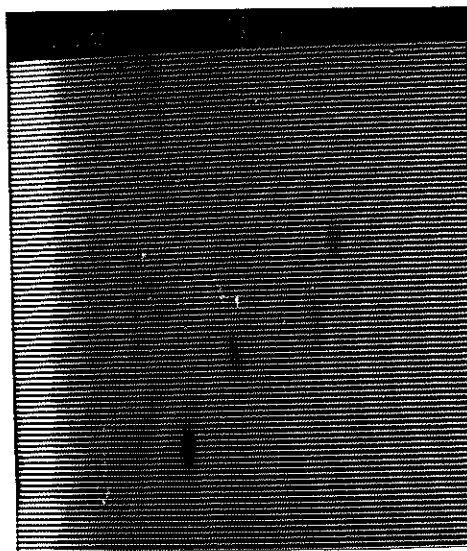
สตาร์ละลายเซนเธนกับความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราการให้อากาศ 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ภาคผนวก ง ตัวอย่างภาพของอนุภาคที่จับได้จากเทคนิคการติดตามอนุภาค (particle tracking technique)

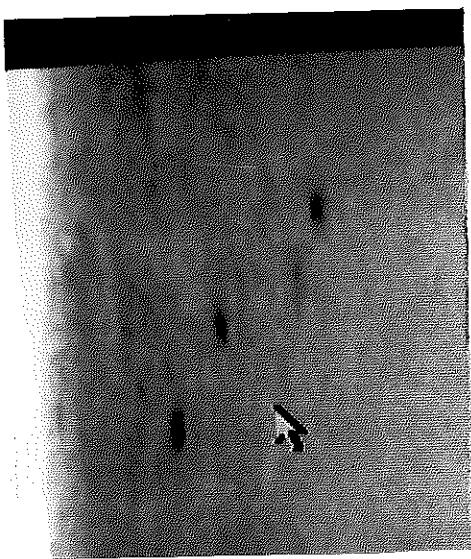
จากการใช้ระบบติดตามอนุภาคซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Siripatana (1992) และพัฒนาเพิ่มเติม โดย ดร. ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ กรรมการที่ปรึกษา ร่วม จับภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ใส่ลงไป ในถังปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุสารละลายที่ต้องการศึกษาไว้ (อนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้แผ่น พลาสติกสีดำตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ขนาด 2x2 มม.) ปรากฏภาพบนจอคอมพิวเตอร์ ตามขั้นตอนดังนี้



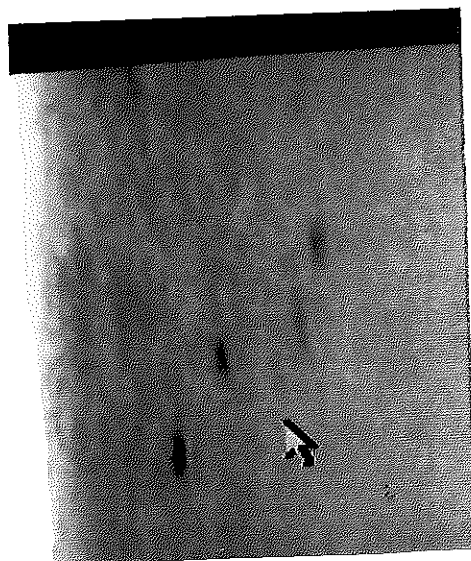
(a) ภาพเริ่มต้นที่จับได้



(b) กำลังแยก even phase ออกจากภาพเริ่มต้น



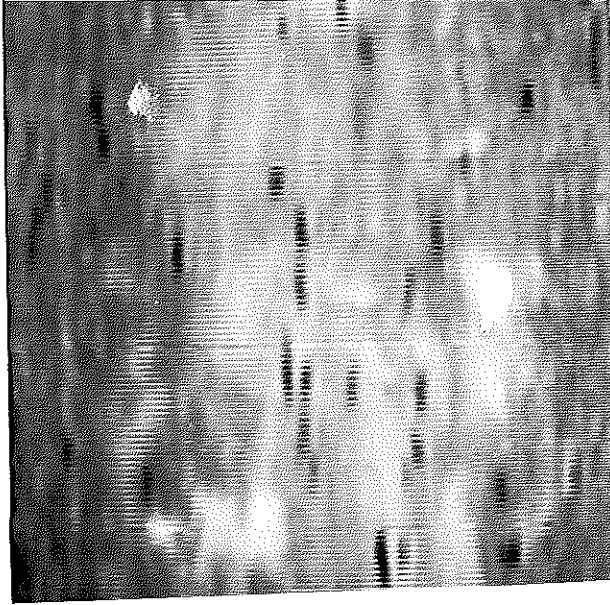
(c) ภาพ odd phase ที่ได้  
หลังจากสร้างภาพใหม่



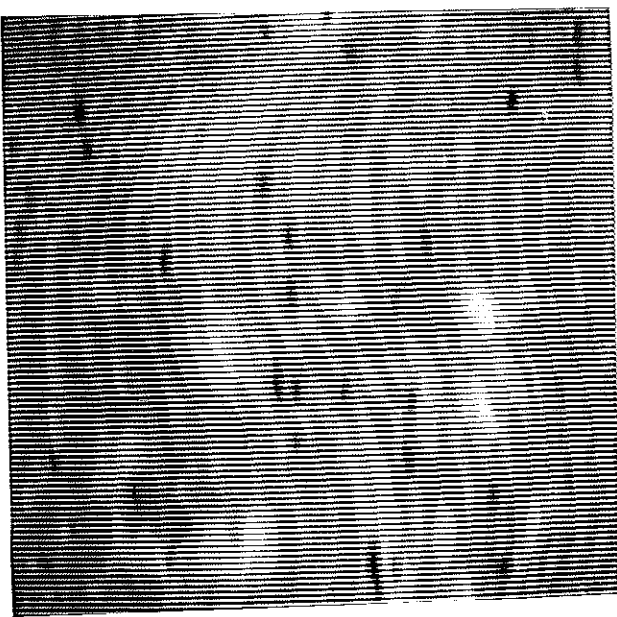
(d) ภาพ even phase ที่ได้  
หลังจากสร้างภาพใหม่

ภาพประกอบภาคผนวก ง1 การจับภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค ปราบกฏบนจอคอมพิวเตอร

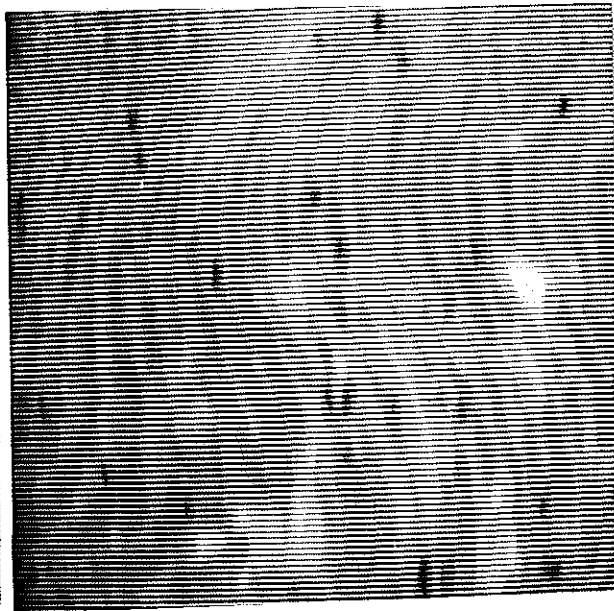
ซึ่งมีขั้นตอน odd-even phase separation technique ดังนี้



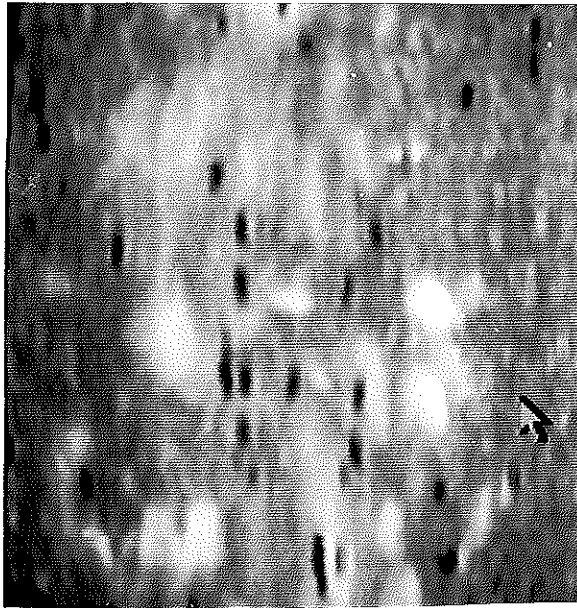
(a) ภาพเริ่มต้นที่ยังไม่ได้แยกเฟส



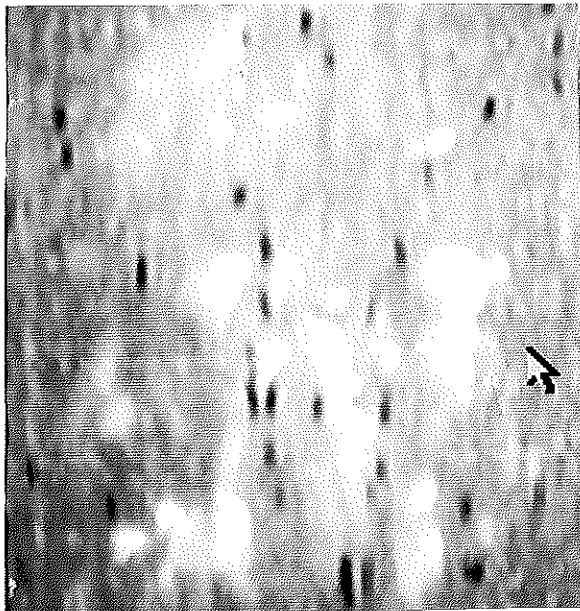
(b) หลังจากแยกเฟสเหลือแต่ even phase



(c) หลังจากแยกเฟสเหลือแต่ odd phase

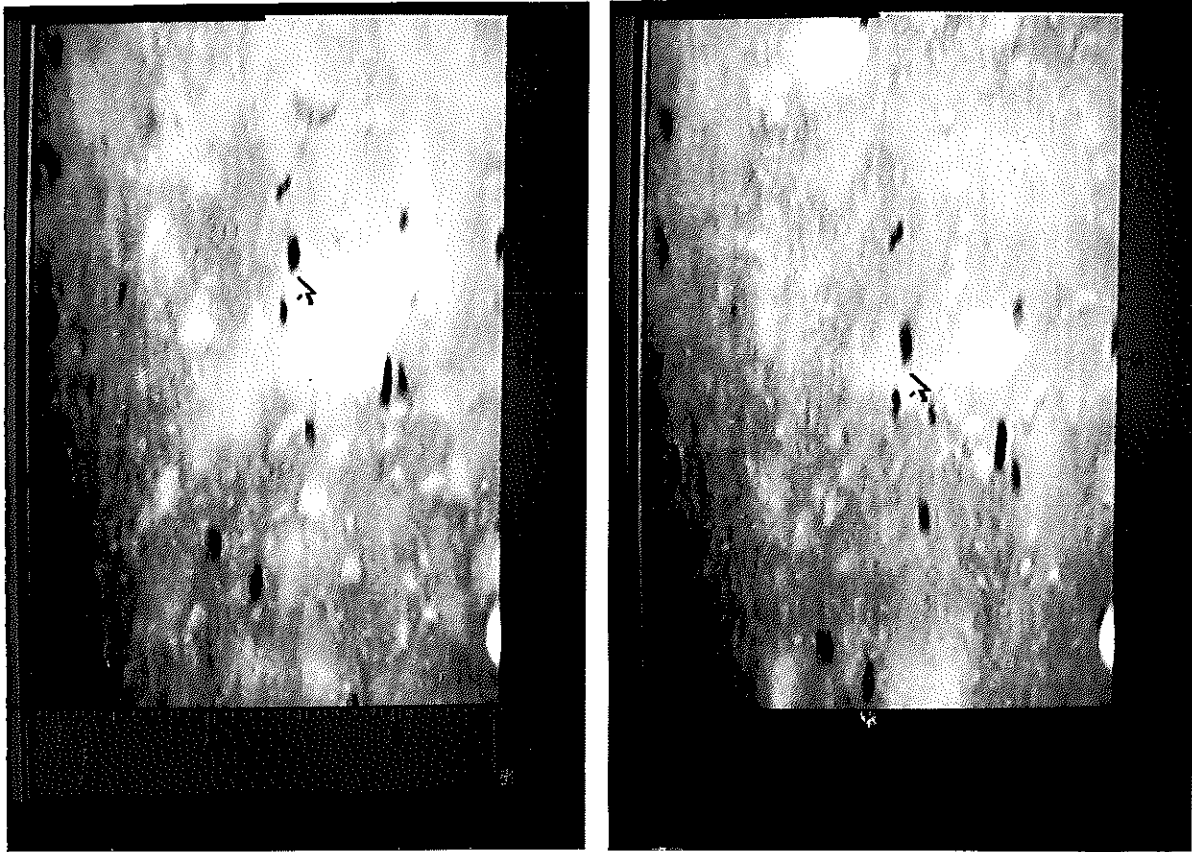


(d) even phase หลังจากกระบวนการสร้างภาพใหม่



(e) odd phase หลังจากกระบวนการสร้างภาพใหม่

ภาพประกอบภาคผนวก ง2 ขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอนของ odd-even phase separation technique ภาพ (d) และ (e) มีระยะเวลาในการจับภาพห่างกัน 1/50 วินาที



ภาพประกอบภาคผนวก ง3      ขั้นตอนการติดตามอนุภาคโดยการนำเอาภาพตำแหน่งของอนุภาคที่เวลาต่างกัน  $1/12.5$  วินาที มาเทียบเคียงกัน สังเกตอนุภาค 2 อนุภาค ที่ชี้ด้วยลูกศร เมื่อเวลาผ่านไป  $1/12.5$  วินาที อนุภาคดังกล่าวเปลี่ยนตำแหน่ง (เคลื่อนที่ลง) ซึ่งอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งเทียบกับเวลานี้ สามารถนำไปคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็วได้

จากภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่จับได้ เรานำภาพที่เป็น odd phase และ even phase ซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน  $1/50$  วินาที มาคำนวณหาระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกน  $y$  ( $\Delta s_y$ ) ใน downcomer zone อนุภาคส่วนใหญ่มีทิศทางการเคลื่อนที่ลง

นำมาคำนวณหา  $t_c$  ตามลำดับดังนี้

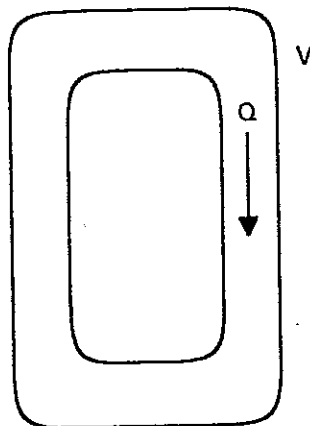
1 คำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ลงตามแนวแกน  $y$  ;

$$v_y = \frac{\Delta s_y}{t} = \frac{\Delta s_y}{1/50} = 50(\Delta s_y)$$

2 ปรับแก้  $v_y$  ไปเป็นความเร็วของของไหล (corrected  $v_y = v_y$  - rising velocity ของอนุภาค)

3 คำนวณหาอัตราการไหล;  $Q = (\text{corrected } v_y \cdot A)$  ;  $A =$  พื้นที่หน้าตัดบริเวณ downcomer zone

4 คำนวณหา  $t_c = \frac{V}{Q}$  ;  $V =$  ปริมาตรทั้งหมดของของไหล ดังรูป

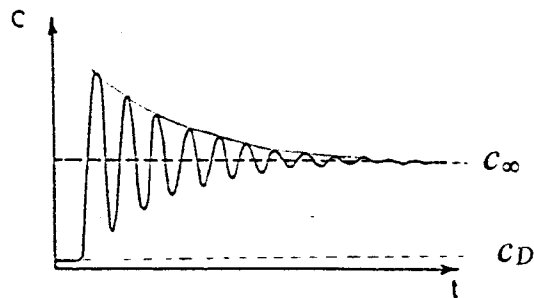


ภาพประกอบภาคผนวก ง4 ภาพประกอบการคำนวณหา  $t_c$



ภาคผนวก จ นิยาม "เวลาที่ใช้ในการผสม (mixing time:  $t_m$ )" ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

แสดงได้ดังภาพประกอบภาคผนวก จ1



ภาพประกอบภาคผนวก จ1 การตอบสนองของเทอร์เซอร์ที่เติมลงไปแบบพัลส์ ของถังปฏิกรณ์แบบลูกปัด

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chisti (1989)

โดยที่  $C_D$  คือค่าความเข้มข้นของเทอร์เซอร์เดิมที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันอยู่แล้วในถังก่อนที่จะมีการเติมเทอร์เซอร์ลงไปใหม่

$C_\infty$  คือค่าความเข้มข้นของเทอร์เซอร์ที่เวลา  $t = t_\infty$  หลังการเติมเทอร์เซอร์ลงไปใหม่

นิยาม  $t_m$  คือเวลา ณ จุดที่หลังจากเวลานี้ไปแล้ว ความเข้มข้นของเทรซเซอร์ ( $C$ )  
เบี่ยงเบนอยู่ในช่วง  $c_\infty \pm 0.05(c_\infty - c_D)$

เมื่อพิตเส้นกราฟที่ลากเชื่อมจุดพิต ด้านบน จะได้ว่า

$$\frac{c - c_\infty}{c_0} = f\left(\frac{t}{t_c}\right)$$

$c_0$  คือค่าความเข้มข้นของเทรซเซอร์ที่เวลา  $t = 0$  (เริ่มเติมเทรซเซอร์) โดยคิดเทียบ

จากปริมาตรทั้งหมดใน gas separation zone

ดังนั้น

$$c = c_\infty + c_0 \left( f\left(\frac{t}{t_c}\right) \right)$$

และ เนื่องจาก

$$f\left(\frac{t}{t_c}\right) = A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)}$$

หรือ

$$f\left(\frac{t}{t_c}\right) = A_1 e^{-\alpha_1 \left(\frac{t}{t_c}\right)} + A_2 e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_c}\right)}$$

ยกตัวอย่างกรณีเทอม exponential 1 เทอม จะได้ว่า

$$c = c_\infty + c_0 \left( A^* e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)} \right)$$

หรือ

$$c = c_\infty + c_D \left( A' e^{-\alpha^* \left(\frac{t}{t_c}\right)} \right)$$

เนื่องจาก  $c_0 A^* = c_D A' =$  ค่าคงที่

เมื่อพล็อตเส้นกราฟที่ลากเชื่อมจุดพิกัด ด้านบน จะได้ว่า  $t_m$  คือเวลา ณ จุดที่

$$c = c_\infty + 0.05(c_\infty - c_D)$$

นั่นคือ

$$c_\infty + c_0 \left( A^* e^{-\alpha^* \left( \frac{t_m}{t_c} \right)} \right) = c_\infty + 0.05(c_\infty - c_D)$$

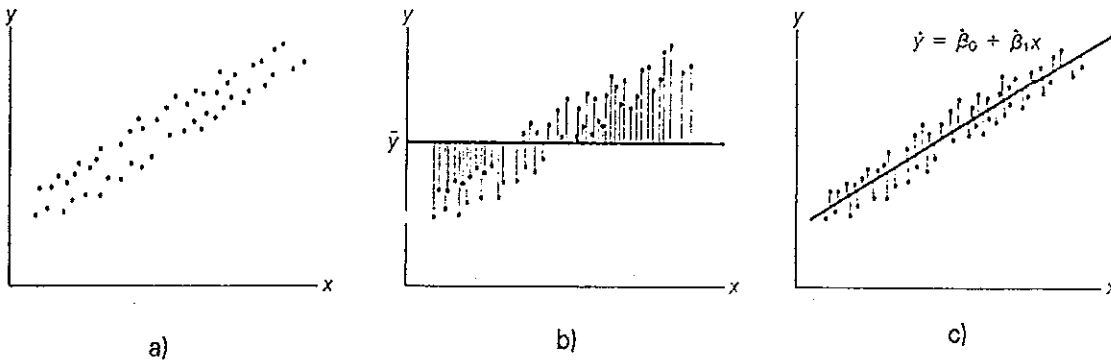
$$e^{-\alpha^* \left( \frac{t_m}{t_c} \right)} = \frac{0.05(c_\infty - c_D)}{c_0 A^*}$$

$$-\alpha^* \left( \frac{t_m}{t_c} \right) = \ln \left( \frac{0.05(c_\infty - c_D)}{c_0 A^*} \right)$$

$$t_m = -\frac{t_c}{\alpha^*} \ln \left( \frac{0.05(c_\infty - c_D)}{c_0 A^*} \right)$$

ภาคผนวก ฉ The coefficient of determination ( $r^2$ )

$$r^2 = \frac{SSyy - SSE}{SSyy} = 1 - \frac{SSE}{SSyy}$$



ภาพประกอบภาคผนวก ฉ1 เปรียบเทียบ a)  $y_i$  คือข้อมูลการกระจาย b)  $\bar{y}$  คือค่าเฉลี่ยข้อมูล c)  $\hat{y}_i$  คือค่าที่ได้จากการทำนาย ในกรณีที่เป็น การวิเคราะห์ถดถอยแบบเส้นตรง (linear regression analysis)

ที่มา : Mendenhall and Sincich (1989)

โดยที่  $SSyy = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$

และ  $SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวยุพดี สันติวุฒน์

วัน เดือน ปี เกิด 22 พฤศจิกายน 2515

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2536

เกียรติคุณมออันดับสอง

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนเรียนดีของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์