

การศึกษาประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟลอคโดยใช้ตาข่าย  
ร่วมกับไบพัตช์ทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น

นายปฏิกรณ์ แสนสิง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2545  
ISBN 974-533-220-8

**STUDY OF FLOCCULATION MIXING EFFICIENCY BY USING GRIDS  
COMBINED WITH A DUAL RUSHTON TURBINE IMPELLER**

**Mr. Patikorn Saensing**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2002  
ISBN 974-533-220-8**

## หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกโดยใช้ตาข่าย  
ร่วมกับใบพัดรัชทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น

STUDY OF FLOCCULATION MIXING EFFICIENCY BY USING GRIDS  
COMBINED WITH A DUAL RUSHTON TURBINE IMPELLER

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงจินต์ ผลประเสริฐ)  
ประธานกรรมการ

.....  
(ดร. สุจิตต์ กระจิต)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ)  
กรรมการ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยรัตน์ ศิริพัชนะ)  
กรรมการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีช จิตรสมบูรณ์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....  
(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร. วรพจน์ ขำพิศ)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปฏิกรณ์ แขนง: การศึกษาประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกโดยใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัดรีซทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น (Study of Flocculation Mixing Efficiency by Using Grids Combined with A Dual Rushton Turbine Impeller)

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ดร.สุจิต กระจิต 110 หน้า. ISBN 974-533-220-8

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำดิบโดยใช้ตาข่ายในถังผสม ได้แก่ ความเร็วแรงแเดียนท์ ( $G$ ) เวลาเก็บกัก ( $t$ ) ค่าความทึบ (Solidity ratio,  $d/M$ ) และจำนวนตาข่าย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น โดยจัดอุปกรณ์การทดลองแบบไหลต่อเนื่องในถังผสมเร็วและถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกปริมาตร 5 และ 100 ลิตร ตามลำดับ ใช้ใบพัดรีซทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น เส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 ซม. ควบคุม pH เท่ากับ 6.9 ในขั้นแรกทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 50 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นที่เวลาเก็บกัก 5-20 นาที แล้วนำเวลาผสมที่ดีที่สุดไปทดลองโดยใช้ตาข่ายที่มีค่าความทึบ 0.091-0.556 จำนวน 2-6 แผ่น ขั้นที่สองใช้ค่าตัวแปรการผสมที่เหมาะสมที่สุดในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะไปทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU และหลังจากนั้นจึงวัดคุณภาพการผสมโดยทดสอบการตอบสนองของสารเทรซเซอร์

ผลการทดลองพบว่า เวลาเก็บกักที่ดีที่สุดเท่ากับ 10 นาที สำหรับถังผสมที่ใช้ตาข่ายได้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดเมื่อใช้ตาข่ายค่าความทึบต่ำสุด 0.091 จำนวน 4 แผ่น ได้ประสิทธิภาพร้อยละ 94.3 ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที ช่วงค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสม ( $G$ ) 34-69 ต่อวินาที เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำดิบพบว่าประสิทธิภาพของถังผสมลักษณะต่างๆ ลดลง โดยเฉพาะกรณีน้ำดิบธรรมชาติซึ่งถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นประสิทธิภาพลดลงเหลือร้อยละ 84.75 ขณะที่ถังผสมที่ใช้ตาข่ายและแผ่นกั้นประสิทธิภาพยังสูงเกือบร้อยละ 90 ส่วนผลการวัดสารเทรซเซอร์พบว่าถังผสมที่ใช้ตาข่ายมีคุณภาพในการผสมมากกว่าถังผสมลักษณะอื่นๆ โดยใช้เวลาผสม ( $t_m$ ) น้อยที่สุด การเพิ่มเวลาเก็บกักให้มากขึ้นทำให้ช่วงค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง ฟล็อกแคบลง นอกจากนี้ยังพบว่าตาข่ายจะมีบทบาทมากขึ้นเมื่อเวลาเก็บกักลดลง การใช้ตาข่ายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้จริงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างฟล็อกที่เวลาเก็บกักน้อยกว่า 10 นาที และสามารถประหยัดการใช้พลังงานได้เกือบร้อยละ 70

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PATIKORN SAENSING: STUDY OF FLOCCULATION MIXING EFFICIENCY BY  
USING GRIDS COMBINED WITH A DUAL RUSHTON TURBINE IMPELLER  
THESIS ADVISOR: SUDJIT KARUCHIT, Ph.D., 110 PP. ISBN 974-533-220-8

The purposes of this study were to identify effect of velocity gradient ( $G$ ), hydraulic retention time ( $t$ ), solidity ratio ( $d/M$ ), and number of grids on the turbidity removal efficiency of a mixing tank with grids; and compare its efficiency with a tank with no baffle and a tank with 4 baffles. The experiment set-up was a continuous flow system with a 5L rapid mixing tank and a 100L flocculation tank. A dual Rushton turbine, diameter 12.5 cm., was used in the flocculation tank. The optimum pH for flocculation was 6.9. Firstly, optimum hydraulic retention time between 5-20 min was investigated using no baffle and 4 baffles tanks, then the optimum value was used with a tank with 2-6 grids. Solidity ratio values of grids were 0.091-0.556. The synthetic raw water of 50 NTU was used. Secondly, the synthetic raw water of 25 NTU, 100 NTU, and natural water (9.85-17.53 NTU) were used in the study at optimum mixing parameters with the 3 tank types. Finally, a tracer responses test was performed to identify the mixing quality for each tank type.

Results showed that the best hydraulic retention time, number of grids, and  $d/M$  value of the tank with grids were 10 min, 4 grids, and 0.091, respectively. Turbidity removal efficiency for 50 NTU raw water was 94.3% at the speed of 54 rpm. The optimum velocity gradient values ( $\bar{G}$ ) were 34-69  $\text{sec}^{-1}$ . Efficiency of all tank types were lower when using with 25 NTU, 100 NTU, and natural water. For natural water, the efficiency of no baffle tank decreased to 84.75% while the others remained near 90%. The results of tracer responses test showed that the tank with grids had the best mixing quality, i.e., the least mixing time ( $t_m$ ). A narrower  $\bar{G}$  was found when the mixing time increased. The advantage of using grids for flocculation mixing become more apparent when hydraulic retention time is reduced. Benefit of using grids in flocculation mixing was approximately 70% reduction of power requirement and reduction of hydraulic retention time to less than 10 min, while maintaining high removal efficiency.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนักศึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
- อาจารย์ ดร.สุจิตต์ ครุจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจสอบวัสดุสารเทอร์เซออร์ ตลอดจนให้คำปรึกษาในด้านวิชาการ
- รองศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ ศิวะเคชาเทพ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ
- อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ พิทักษ์นุรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณาให้คำปรึกษา กำลังใจและช่วยเหลือค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย
- ดร.ปิยะรัตน์ ศรีจรูณรัตน์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือค่าใช้จ่ายในการเรียน ให้คำปรึกษาและกำลังใจด้วยดีตลอดมา
- ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม อาคารเครื่องมือ 5 และ 8 ที่กรุณาอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ในการทำวิจัย
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย
- คุณเทียนชัย เอียดแก้วและคุณนคร ศิริฐานนท์ เพื่อนบัณฑิตศึกษาที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำวิจัยมาโดยตลอด
- ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจริญชัยวัสดุก่อสร้าง จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้โอกาสและให้การสนับสนุนทุนในการศึกษา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาวและพี่เขย ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปฏิกรณ์ แสนสิ่ง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ

## บทที่

<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ขบวนการผลิตน้ำประปา.....	4
2.2 การประเมินประสิทธิภาพขบวนการผลิตน้ำประปา.....	5
2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	5
2.3.1 บทบาทของสารส้มในกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	5
2.3.2 กลไกการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม.....	7
2.4 กระบวนการการสร้างฟล็อก.....	8
2.4.1 การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion).....	9
2.4.2 การขนส่งในกระแสน้ำที่ราบเรียบ (Transport in laminar shear).....	9
2.4.3 การจมตัวด้วยความเร็วที่ต่างกัน (Differential settling).....	10
2.4.4 การขนส่งในกระแสน้ำที่ปั่นป่วน (Turbulence transport).....	10

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การผสม .....	11
2.5.1 การผสมแบบปั่นป่วน .....	11
2.5.2 เวลาในการผสม .....	11
2.5.3 ความเร็วใบพัด .....	13
2.5.4 การผสมเร็ว .....	13
2.5.5 การผสมสำหรับการสร้างฟล็อก.....	14
2.6 การกวน .....	16
2.7 กำลังที่ใช้ในการกวน .....	16
2.8 ลักษณะการไหลในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกรูปทรงกระบอก.....	18
2.9 ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม .....	22
2.10 การสร้างฟล็อกในสถานะการไหลที่ปั่นป่วน .....	23
2.11 การใช้ตาข่ายทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีลักษณะเดียวกันในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อก .....	27
<b>3 การดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>31</b>
3.1 วิธีวิจัย .....	31
3.1.1 รูปแบบและอุปกรณ์การทดลอง.....	31
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการทดลอง.....	36
3.1.3 ทดลองหาค่าความเข้มข้นของสารส้มสำหรับการผสม .....	36
3.1.4 ทดลองหาค่าตัวแปรการผสม.....	37
3.1.5 ทดลองการตอบสนองของสารเทรชเซอร์.....	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	39
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
<b>4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....</b>	<b>41</b>
4.1 การผสมในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น.....	41
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับความเร็วใบพัด.....	41



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความชุ่มชื้นกับเวลาผสม.....	43
4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรตะกอนที่เวลา 30 นาที กับความเร็วใบพัด .....	43
4.2 การผสมในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ใช้ตาข่าย.....	45
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความชุ่มชื้นกับความเร็วใบพัด.....	45
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กับความเร็วใบพัด.....	47
4.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความชุ่มชื้นกับจำนวนตาข่าย .....	49
4.3 ประสิทธิภาพในการลดความชุ่มชื้นในน้ำคิบที่มีลักษณะสมบัติต่างกัน .....	51
4.4 ผลการทดสอบการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสม 3 ลักษณะ .....	53
4.5 ผลของเวลาผสมต่อประสิทธิภาพในการลดความชุ่มชื้นในถังผสมที่ใช้ตาข่าย .....	55
4.6 การประยุกต์ผลการวิจัย.....	57
<b>5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>60</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	60
5.1 การประยุกต์ผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป.....	63
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>64</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	67
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที .....	83
ภาคผนวก ค การทดสอบทางสถิติ .....	95
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ .....	98
ภาคผนวก จ การกำหนดช่วงค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม .....	101
ภาคผนวก ฉ ความต้องการปริมาณสารส้ม .....	103
ภาคผนวก ช รูปถ่ายอุปกรณ์การทดลอง .....	105
<b>ประวัติผู้เขียน .....</b>	<b>110</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมแบบไม่มีและมีแผ่นกั้น.....	39
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมแบบใช้ตาข่าย.....	39
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมน้ำตัวอย่างที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน.....	40
ก1 ผลการทดลองในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 NTU.....	68
ก2 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 NTU.....	70
ก3 ผลการทดลองในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 25 และ 100 NTU.....	74
ก4 ผลการทดลองในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU.....	76
ก5 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 20 นาที ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 NTU.....	77
ก6 สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นการผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น (NB).....	78
ก7 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV <sub>30</sub> การผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น.....	78
ก8 สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นการผสมที่ใช้แผ่นกั้น (B).....	79
ก9 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV <sub>30</sub> การผสมที่ใช้แผ่นกั้น.....	79
ก10 สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเวลาเก็บกัก 10 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น.....	80
ก11 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV <sub>30</sub> การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น.....	81
ก12 สรุปข้อมูลผลการทดลองความขุ่นตกค้างที่เวลาเก็บกัก 10 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำดิบในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะ.....	82

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก13	สรุปข้อมูลผลการทดลอง $SV_{30}$ ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะ น้ำดิบในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะ ..... 82
ข1	ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ความขุ่น น้ำดิบสังเคราะห์ 50 NTU ..... 84
ข2	สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น ..... 88
ข3	สรุปข้อมูลผลการทดลอง $SV_{30}$ เวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น ..... 89
ค1	การทดสอบค่า Paired-Samples T-Test เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่าง ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของถังผสมทั้ง 3 ลักษณะที่ความขุ่นเดียวกัน ..... 96
ค2	การทดสอบค่า Paired-Samples T-Test เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่าง ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของถังผสมทั้ง 3 ลักษณะที่ความขุ่นต่างกัน ..... 97
จ1	ผลการทดลองหาความต้องการปริมาณสารส้มของน้ำดิบสังเคราะห์และ น้ำดิบธรรมชาติ ..... 104

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การผลิตน้ำประปาโดยขบวนการกรองทรายแบบเร็ว (Rapid sand filtration).....4
2.2	สารประกอบของอะลูมิเนียมที่ค่า pH ต่างๆ .....6
2.3	กลไกการโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นจากการใช้สารส้มในระบบผลิตน้ำประปา .....7
2.4	(ก) แบบจำลองการสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ (ข) ระยะที่เกิดการสัมผัส.....8
2.5	การตอบสนองสารเทรซเซอร์ของใบพัด Rushtone turbine ความเร็ว 5.83 รอบต่อวินาที ..... 12
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดกับความเร็วแรงแผ่นกั้น ..... 13
2.7	รูปแบบถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกแบบกวนสมบูรณ์ไหลต่อเนื่อง..... 15
2.8	ค่ากำหนดทั่วไปสำหรับการออกแบบใบพัด Rushton turbine ..... 17
2.9	ลักษณะการไหลที่เกิดจากการกวนโดยใช้ใบพัดเทอร์ไบน์ที่ไม่มีแผ่นกั้นในถังผสม..... 18
2.10	การไหลของน้ำที่เกิดจากการกวนโดยใช้ใบพัดเทอร์ไบน์และมีแผ่นกั้นในถังผสม ..... 19
2.11	ลักษณะการไหลเนื่องจากใบพัดเทอร์ไบน์ใน Jar test ความเร็ว 60 รอบต่อนาที.....20
2.12	แนวระดับความเร็วที่ตำแหน่งปลายใบพัดเทอร์ไบน์ ..... 20
2.13	ความเร็วของกระแสน้ำที่กวนโดยใบพัด Rushton turbine 200 รอบต่อนาที.....21
2.14	การแกว่งของความเร็วของน้ำปลายใบพัด ความเร็ว 60 รอบต่อนาที .....21
2.15	แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังผสมของ Funahashi, H. et al., (1987).....22
2.16	แบบจำลองแบ่งการผสมออกเป็น 5 ส่วนของ Oosterhuis et al., (1984) .....23
2.17	แบบจำลองโครงข่ายของโซนสำหรับถังผสมของ Knysh, M. R. et al., (1987) .....24
2.18	แบบจำลองการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์สองขนาดที่แตกต่างกัน .....25
2.19	ภาพในอุดมคติขนาดของกระแสวน (Eddies) ที่เกิดในสภาวะการไหลที่ปั่นป่วน .....27
2.20	กระแสวนที่เกิดหลังแท่งกลม (ก) $N_{RE}50-1,000$ (ข) $N_{RE}1,000-200,000$ .....29
2.21	ลักษณะตาข่ายที่ใช้ในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อก.....29
2.22	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความขุ่นระหว่างใบพัดและตาข่ายใน Jar Test..... 30
3.1	แผนผังการดำเนินการทดลอง .....32
3.2	รูปแบบการทดลองการผสมแบบไหลต่อเนื่อง..... 33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงรายละเอียดถึงผสมเร็วที่มี 4 แผ่นกั้น .....	34
3.4 แสดงรายละเอียดถึงผสมสำหรับการสร้างฟล็อก .....	34
3.5 ตำแหน่งการติดตั้งตาข่ายภายในถังผสมและใบพัด Rushton turbine .....	34
3.6 ขนาดแผ่นตาข่ายที่ใช้ในการทดลอง .....	35
3.7 ถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่มี 4 แผ่นกั้น .....	36
3.8 รูปแบบอุปกรณ์การทดลองการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ .....	38
4.1 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 5 นาที .....	42
4.2 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 10 นาที .....	42
4.3 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 20 นาที .....	42
4.4 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่ไม่ใช้แผ่นกั้น .....	44
4.5 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่ใช้แผ่นกั้น .....	44
4.6 $SV_{30}$ ที่ไม่ใช้แผ่นกั้น .....	45
4.7 $SV_{30}$ ที่ใช้แผ่นกั้น .....	45
4.8 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.556 .....	46
4.9 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.303 .....	46
4.10 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.152 .....	46
4.11 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091 .....	47
4.12 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.556 .....	47
4.13 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.303 .....	48
4.14 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.152 .....	48
4.15 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.091 .....	48
4.16 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 2 แผ่น .....	49
4.17 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 4 แผ่น .....	49
4.18 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 6 แผ่น .....	50
4.19 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่าย 10min (4G0.091) .....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำดิบ .....	52
4.21 $SV_{30}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำดิบ .....	53
4.22 การตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น .....	54
4.23 การตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น .....	54
4.24 การตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย 4G0.091 .....	54
4.25 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที .....	56
4.26 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที .....	56
4.27 ความเร็วแกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ของถังผสม 3 ลักษณะ .....	58
4.28 ความเร็วแกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ของถังผสม 3 ลักษณะ .....	58
4.29 ความเร็วแกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ของถังผสมที่ใช้ตาข่าย .....	59
4.30 เลขเรย์โนลด์์ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ของถังผสม 3 ลักษณะ .....	59
4.31 เลขเรย์โนลด์์ที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ของถังผสม 3 ลักษณะ .....	59
4.32 เลขเรย์โนลด์์ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ของถังผสมที่ใช้ตาข่าย .....	60
ข1 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.556 .....	90
ข2 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.303 .....	90
ข3 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.152 .....	90
ข4 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091 .....	91
ข5 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 2 แผ่น .....	91
ข6 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 4 แผ่น .....	91
ข7 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 6 แผ่น .....	92
ข8 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.556 .....	92
ข9 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.303 .....	92
ข10 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.152 .....	93
ข11 $SV_{30}$ ของตาข่ายค่าความทึบ 0.091 .....	93
ข12 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นในถังผสม 3 ลักษณะที่เวลาเก็บกัก 5 นาที .....	93

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข13	ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091 เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที..... 94
ง1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดและความเร็วเกรเดียนท์..... 100
จ1	การกำหนดช่วงค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม..... 102
ฉ1	ความต้องการปริมาณสารส้มของน้ำดิบ ..... 104
ช1	แบบจำลองและอุปกรณ์การทดลอง..... 106
ช2	ตาข่ายที่ใช้ในการทดลอง..... 106
ช3	ใบพัดรัศมี 2 ชั้น ..... 107
ช4	รูป 3 มิติ ใบพัดรัศมี 2 ชั้น ..... 107
ช5	การติดตั้งตาข่ายในถังผสม ..... 108
ช6	รูป 3 มิติ ถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ติดตั้งตาข่าย ..... 108
ช7	รูป 3 มิติ ถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ..... 109
ช8	รูป 3 มิติ ถังผสมที่ติดตั้งแผ่นกั้น 4 แผ่น ..... 109

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASCE	=	American Society of Civil Engineering
AWWA	=	American Water Works Association
C	=	impeller high from bottom of tank, L
D	=	impeller diameter, L
$D_c$	=	central disc diameter, L
d	=	rod dimension, L
$d_1$	=	diameter of particle 1, L
$d_2$	=	diameter of particle 2, L
$G$	=	velocity gradient, $T^{-1}$
$\bar{G}$	=	optimum velocity gradient values, $T^{-1}$
g	=	acceleration of gravity, $L/T^2$
$k$	=	reaction rate constant, $\text{mole}^{1-n} \cdot L^{3-3n} \cdot T^{-1}$ (n is reaction order)
$k_B$	=	Boltzmann's constant, $J \cdot K^{-1}$
$k_d$	=	differential settling aggregate rate constant, $L^3/T$
$k_d$	=	dissipation rate constant, dimensionless
$k_0$	=	orthokinetic aggregate rate constant, $L^3/T$
$k_p$	=	perikinetic aggregate rate constant, $L^3/T$
$K_T$	=	impeller constant, dimensionless
$k_t$	=	turbulent aggregate rate constant, $L^3/T$
L	=	impeller blade length, L
M	=	mesh size, L
$N$	=	impeller speed, $T^{-1}$
$N_{ij}$	=	rate of collisions between particles $i$ and $j$ , $T^{-1} \cdot L^{-3}$
$N_p$	=	power number, dimensionless
$N_{RE}$	=	Reynold number, dimensionless
$n_i$	=	number concentration of particles type i, $L^{-3}$



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$n_j$	=	number concentration of particles type j, $L^{-3}$
$n_k$	=	number concentration of particles type k, $L^{-3}$
$P$	=	power, $J-T^{-1}$
$r_i$	=	radius of particle type i, L
$r_j$	=	radius of particle type j, L
$r_k$	=	radius of particle type k, L
S	=	distant between impeller, L
s	=	particle density, $M/L^3$
T	=	vessel diameter, L
$T$	=	absolute temperature, $^{\circ}K$
$t$	=	hydraulic retention time, T
$t_m$	=	mixing time, T
$\bar{u}$	=	average velocity, $L/T$
V	=	volume, $L^3$
$V_{macro}$	=	macromixing region, $L^3$
$V_{micro}$	=	micromixing region, $L^3$
$V_{stagnant}$	=	stagnant region, $L^3$
$V_{TIP}$	=	impeller blade tip speed, $L/T^{-1}$
W	=	impeller blade width, L
Z	=	water deep in vessel, L
$\alpha$	=	collision efficiency function (0-1), dimensionless
$\alpha(r_i, r_j)$	=	collision frequency for class i and j particles, $L^{-3}$
$\nu$	=	kinematic viscosity, $L^2/T$
$\phi_m$	=	power imparted to the water per unit volume, $J-T^{-1}-L^3$
$\epsilon$	=	unit mass energy dissipation rate, $L^2/T^3$
$\eta$	=	Kolmogoroff microscale, L
$\mu$	=	absolute viscosity of water, $M-L^{-1}-T^{-1}$

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\rho$	=	density, $M/L^3$
$\pi$	=	pie
$\omega$	=	angular velocity, $T^{-1}$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การนำน้ำธรรมชาติมาใช้ประโยชน์มักจะประสบกับปัญหาเรื่องของคุณภาพน้ำดิบที่อยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติเพราะมีการปนเปื้อนจากของเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เองและนับวันที่คุณภาพน้ำสำหรับนำมาผลิตน้ำประปาจะลดต่ำลงเรื่อยๆ ดังนั้นการนำน้ำดิบมาใช้ประโยชน์จึงต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน ขบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำนั้นจะยากง่ายก็ขึ้นกับคุณภาพของน้ำดิบและคุณภาพน้ำประปาที่ต้องการ ในขบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำจะอาศัยหลักการทางกายภาพหรือเคมีกายภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำดิบ การผสมในกระบวนการการสร้างฟล็อก (Flocculation mixing) เป็นวิธีทางกายภาพที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ผ่านการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพแล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดและน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้ โดยแรงโน้มถ่วงภายในระยะเวลาอันสั้น การผสมจึงมีความสำคัญในกระบวนการการสร้างฟล็อก การเลือกใช้อุปกรณ์ในการผสมต้องมีความเหมาะสมและส่งเสริมให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์มากที่สุด

ในปัจจุบันการออกแบบระบบการผสมในขบวนการผลิตน้ำประปายังคงเน้นวิธีแบบดั้งเดิม ทั้งรูปแบบการผสมเร็ว (Rapid mixing) และการผสมสำหรับการสร้างฟล็อก รูปแบบในการผสมเร็ว ได้แก่ การผสมในรางผนังกัน การใช้ใบพัด การผสมในเส้นท่อ และ Static Mixer ซึ่งประสิทธิภาพในการผสมจะใกล้เคียงกันโดยให้ความสำคัญกับระดับความปั่นป่วนและเวลาที่เพียงพอ ส่วนการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจะต้องมีความปั่นป่วนและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยระดับความปั่นป่วนจะต้องมากพอที่จะส่งเสริมให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์แต่ก็ไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่รวมตัวกันเป็นฟล็อกแล้วแตกออกจากกัน ลักษณะของใบพัดที่ใช้ก็มีผลต่อการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการศึกษาและออกแบบระบบการผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำประปาจึงไม่ควรจะเน้นการเลือกใช้สารเคมีสำหรับขบวนการการสร้างฟล็อกเพียงอย่างเดียวหากแต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการผสมด้วย

ข้อจำกัดของการกวนโดยใช้ใบพัดก็คือจะเกิดความแตกต่างของระดับความปั่นป่วนในถังผสมเนื่องจากความเร็วของกระแสในแต่ละตำแหน่งของถังผสมมีความแตกต่างกันมากและจะลด

ลงเมื่อระยะห่างจากใบพัดเพิ่มมากขึ้น จากผลการศึกษาของ Liem, L. E., Smith, D. W. and Stanley, S. J. (2000) ที่ประยุกต์ใช้ตาข่ายในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกชี้ให้เห็นว่าตาข่ายมีประสิทธิภาพสูงกว่าใบพัดและมีค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient,  $G$ ) ที่เหมาะสมกว้างกว่าใบพัด แต่การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้ Jar test ปริมาตร 2 ลิตร เป็นแบบจำลองและแกว่งตาข่ายขึ้นลงในแนวตั้งจึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ จากผลการศึกษาดังกล่าวชี้ถึงความเป็นไปได้ในการนำข้อดีของตาข่ายมาประยุกต์ใช้ร่วมกับใบพัดเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในโรงงานผลิตน้ำประปาโดยเฉพาะโรงงานผลิตน้ำประปาขนาดเล็กโดย การใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัดน่าจะเป็นการทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งถังผสมมากขึ้นกว่าการใช้ใบพัดเพียงอย่างเดียวซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกในขบวนการผลิตน้ำประปาให้สูงขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมีและเครื่องจักรกล ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ดี เมื่อน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนมีฟล็อกตกค้างในปริมาณต่ำเป็นผลให้กระบวนการกรองสามารถยืดระยะเวลาสำหรับการกรองให้นานขึ้นและลดความถี่การล้างกลับชั้นทรายกรอง ดังนั้นการใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัดเพื่อการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงานและอนุรักษ์พลังงานในการผลิตน้ำประปาและลดการสูญเสียน้ำประปาเนื่องมาจากการล้างกลับชั้นทรายกรอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกโดยใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัดรชทอนเทอร์ไบน์ (Rushton turbine) 2 ชั้น ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient,  $G$ ) เวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time,  $t$ ) ค่าความทึบ (Solidity ratio,  $d/M$ ) และจำนวนตาข่าย

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ได้จากถังผสมที่ใช้ตาข่ายกับถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

ในกระบวนการการสร้างฟล็อกถ้าทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นภายในกระแสน้ำโดยใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัด ความปั่นป่วนจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งถังผสมและทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำให้หมดเสถียรภาพจากการผสมเร็วมีโอกาสในการชนและรวมตัวกันเป็นฟล็อกได้ดี

กว่ากรณีที่ใช้ใบพัดเพียงอย่างเดียวและหลักการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตน้ำประปาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำได้

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกนี้จะทำการศึกษาเฉพาะในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกเท่านั้น ไม่รวมในส่วนการผสมเร็ว (Rapid mixing) โดยตาข่ายที่ทำการศึกษา มี 4 ขนาด ได้แก่ 0.90, 1.65, 3.30 และ 5.50 ซม. โดยมีค่าความทึบ (อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตาข่าย (d) และขนาดช่องตาข่าย (M),  $d/M$ ) 0.556, 0.303, 0.152 และ 0.091 ตามลำดับ จำนวน 2, 4 และ 6 แผ่น ใช้เฉพาะใบพัดรatchetทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 ซม. ใช้น้ำดิบธรรมชาติจากบ่อเก็บน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีความขุ่น 9.85-17.53 NTU และน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 50 NTU และ 100 NTU เป็นน้ำตัวอย่างในการทดลอง ใช้สารส้มเป็นสารก่อตะกอน

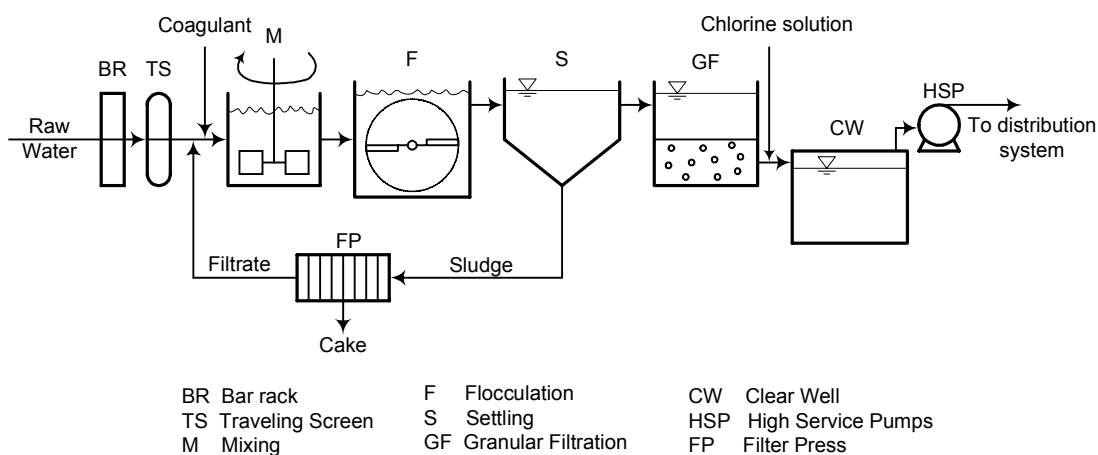
## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ขบวนการผลิตน้ำประปา

โดยทั่วไปขบวนการผลิตน้ำประปาประกอบไปด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกายภาพหลายกระบวนการ ความยุ่งยากในการผลิตน้ำประปาขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และลักษณะของน้ำดิบ น้ำดิบที่มีความสกปรกมากย่อมต้องการการทำความสะอาดมาก (มันสิน ตัณฑุล เวศม์, 2538) ส่วนวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำนั้นสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ เพื่อการอุปโภคบริโภคและเพื่อกิจกรรมทางอุตสาหกรรม

ปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำประปานิยมนำขบวนการกรองทรายแบบเร็ว (Rapid sand filtration) มาใช้ในการผลิตน้ำประปาเนื่องจากสามารถให้กำลังผลิตน้ำได้สูงกว่าและใช้พื้นที่น้อยกว่าขบวนการกรองทรายแบบช้า (Slow sand filtration) รูปที่ 2.1 ขบวนการกรองทรายแบบเร็วประกอบด้วยกระบวนการต่างๆที่สำคัญได้แก่ ตะแกรงดักขยะ การผสมเร็ว การสร้างฟล็อก การตกตะกอน การกรองและการเติมสารฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้วจะเก็บไว้ในถังน้ำใสเพื่อรอการสูบจ่ายเข้าสู่ระบบท่อจ่ายต่อไป



รูปที่ 2.1 การผลิตน้ำประปาโดยขบวนการกรองทรายแบบเร็ว (Rapid sand filtration)

หมายเหตุ จาก Unit operations and processes in environmental engineering, (2nd ed.).

(116), โดย Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996, Boston: PWS.

## 2.2 การประเมินประสิทธิภาพขบวนการผลิตน้ำประปา

ในการประเมินประสิทธิภาพขบวนการผลิตน้ำประปา สามารถประเมินจากการวัดค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าความขุ่น ปริมาณจุลินทรีย์ ของน้ำที่ผ่านขบวนการผลิตและการผลิตน้ำประปาที่ใช้สารเคมีเป็นสารก่อตะกอน (Coagulant) ประกอบด้วยกระบวนการดังนี้ การผสมเร็ว การสร้างฟล็อก การตกตะกอน การกรอง แต่ละกระบวนการถูกแยกออกแบบตามลักษณะของหน้าที่ในระบบการผลิตซึ่งย่อมมีประสิทธิภาพต่างกันไป ตัวแปรบางค่าที่ประเมินประสิทธิภาพรวมอาจจะไม่เหมาะสมที่จะประเมินประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการได้ ประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและการทำงานของกระบวนการถัดไปเนื่องจาก 4 กระบวนการหลักข้างต้นมีบทบาทสำคัญในการแยกของแข็งแขวนลอยในน้ำ (Ramaley, B. L., Lawler, D. F., Wright, W. C. and O'Melia, C. R., 1981) กระบวนการโคแอกกูเลชันและการสร้างฟล็อกเป็นกระบวนการแรกสุดที่จะส่งผลต่อการทำงานของกระบวนการตกตะกอน ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนนี้จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของขบวนการผลิตน้ำประปาโดยรวม

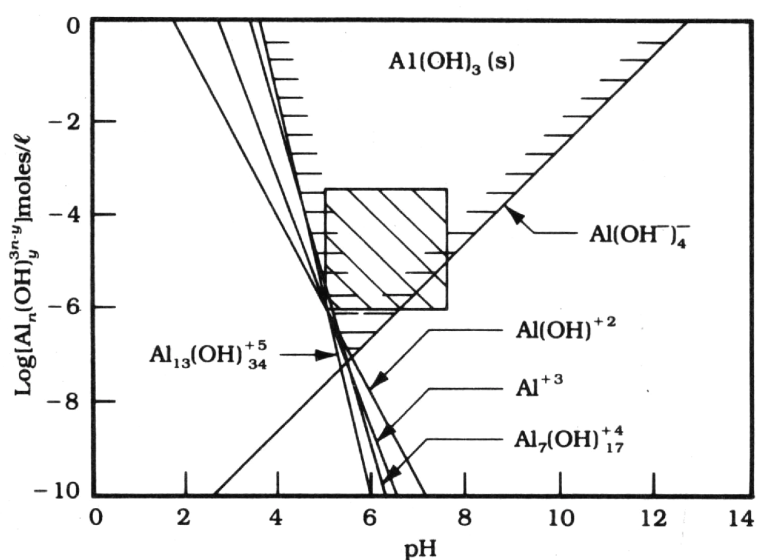
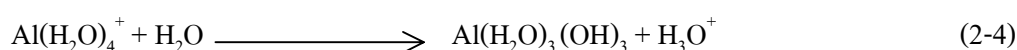
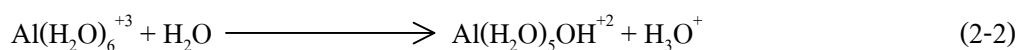
## 2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารแขวนลอยที่กระจายตัวอยู่ในน้ำเป็นสาเหตุของความขุ่น ได้แก่ ดิน ตะกอน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ แพลงตอน และสิ่งมีชีวิตเล็กๆอื่นๆ สารแขวนลอยดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่ 0.0001-100 ไมครอน อนุภาคคอลลอยด์ จะมีขนาดตั้งแต่ 0.001-1 ไมครอน ความขุ่นที่สร้างปัญหาให้กับโรงงานผลิตน้ำประปามักเกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า “อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle)” (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2538) ในการผลิตน้ำประปากระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นการกระจายสารก่อตะกอนในน้ำให้ทั่วถึงทำให้เกิดปฏิกิริยาและทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำและรวมตัวกันเป็นฟล็อกในขั้นต่อไป

### 2.3.1 บทบาทของสารส้มในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน การกระจายสารก่อตะกอนในน้ำให้ทั่วถึงในเวลาอันสั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ pH ชนิดของสารก่อตะกอน ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำ ระดับความปั่นป่วนของน้ำ (ลัดดา ธรรมการันย์, 2536) สารก่อตะกอนที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) รูปที่ 2.2 เป็นสารประกอบของสารส้มที่เกิดขึ้นเมื่อละลายน้ำโดยจะแตกตัวเป็นไอออนต่างๆ เมื่อ pH ของน้ำเพิ่มขึ้น สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนจากประจุบวกไปเป็นสารประกอบประจุลบ สารส้มเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนประจุบวกและลบดังสมการที่ (2-1)

และ  $Al^{+3}$  จะรวมกับน้ำ 6 โมเลกุลทันทีและอยู่ในรูป  $Al(H_2O)_6^{+3}$  เนื่องจาก  $Al(H_2O)_6^{+3}$  มีอำนาจเป็นกรดซึ่งสามารถให้  $H^+$  จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ให้อิออนต่างๆ ของอะลูมิเนียมปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกลายเป็นประจุลบ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2538) ดังสมการที่ (2-2) – (2-5)



รูปที่ 2.2 สารประกอบของอะลูมิเนียมที่ค่า pH ต่างๆ

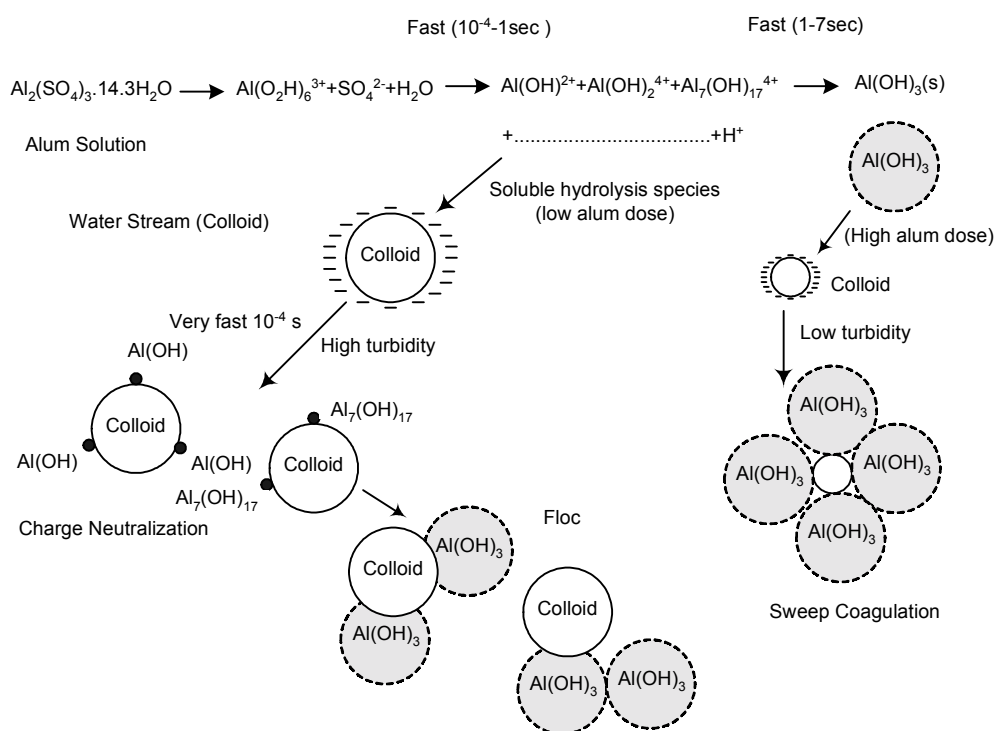
หมายเหตุ จาก Unit operations and processes in environmental engineering, (2nd ed.). (175), โดย Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996, Boston: PWS.

อิออนที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมอะตอมเดียวเรียกว่า Monomeric Hydroxo complex สารประกอบที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อไปอีกจนกลายเป็นสารที่ซับซ้อนและมีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอมเรียกว่า Hydroxo complex เช่น  $Al_3(OH)_{34}^{+5}$   $Al_7(OH)_{17}^{+4}$   $Al_8(OH)_{20}^{+4}$  และ  $Al_6(OH)_{15}^{+3}$  (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996) เมื่อน้ำมี pH ต่ำจะมี  $Al^{+3}$  มากที่สุด เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจะได้อิออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดลงและเมื่อ pH เข้าใกล้ความเป็นกลางสารประกอบ  $Al(OH)_3$  จะเกิดขึ้นมากกว่าสารประกอบอื่นๆ



### 2.3.2 กลไกการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลัก 2 ประการขึ้นอยู่กับปริมาณของสารส้มและ pH ของน้ำ pH ที่เหมาะสมสำหรับสารส้มคือ 4.5-8.0 (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996) กลไกดังกล่าวคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption-Destabilization) และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep coagulation) (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2538) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในขบวนการผลิตน้ำประปา กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคจะเกิดได้ดีกว่า กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเนื่องจากกระบวนการแบบดูดติดผิวและทำลายประจุจะต้องเกิดขึ้นภายในเวลา  $10^{-4}$  – 1 วินาที ซึ่งมักจะทำได้ในทางปฏิบัติ ส่วนกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคจะเกิดขึ้นตั้งแต่เวลา 1-7 วินาที และ pH ในช่วง 6.0 – 8.5 (Dennett, K. E., Amirtharjah, A., Moran, T. F. and Gould, J. P., 1996)



รูปที่ 2.3 กลไกการโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นจากการใช้สารส้มในระบบผลิตน้ำประปา  
หมายเหตุ จาก “Coagulation: its effect on organic matter.”, โดย Dennett et al., 1996,

Journal of American Water Works Association. 88 (4): 130.

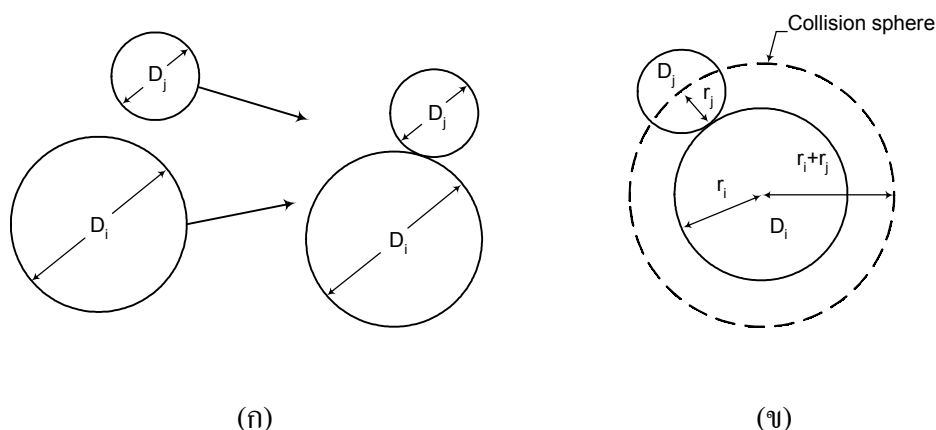
## 2.4 กระบวนการการสร้างฟล็อก

กระบวนการการสร้างฟล็อกเป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกัน (มันสิน ตันฑกุลเวศม์, 2538) โดยถือว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่ทำลายเสถียรภาพอย่างสมบูรณ์จะมีประสิทธิภาพในการสร้างสัมผัส (Collision efficiency function,  $\alpha$ ) 100% และประสิทธิภาพในการสร้างสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 0-1 ซึ่งหมายความว่า การสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์ไม่จำเป็นต้องจับกันเสมอไป รูปที่ 2.4 เป็นการจำลองการสัมผัสหรือกระทบกันของอนุภาคคอลลอยด์ที่เป็นของแข็งระหว่างอนุภาคทรงกลม 2 ขนาดที่แตกต่างกัน สมการทั่วไปที่ใช้อธิบายอัตราการสร้างฟล็อกดังสมการที่ (2-6) (Clark, M. M., 1996)

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i+j=k} \alpha(r_i, r_j) k(r_i, r_j) n_i n_j - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(r_i, r) k(r_i, r) n_i n_k \quad (2-6)$$

โดยที่  $\frac{dn_k}{dt}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค  $k$  (#/T-L<sup>3</sup>)  $\alpha$  คือประสิทธิภาพหรือความสำเร็จในการสัมผัส (0-1)  $k$  คือค่าคงที่ปฏิกิริยา (อันดับที่ 2) (L<sup>3</sup>/T)  $n_i$ ,  $n_j$  และ  $n_k$  คือความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์  $i$ ,  $j$  และ  $k$  (#/L<sup>3</sup>)  $r_i$ ,  $r_j$  และ  $r_k$  คือขนาดรัศมีของอนุภาคคอลลอยด์  $i$ ,  $j$  และ  $k$  (L)

กลไกการสร้างฟล็อกสามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทได้แก่ การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) การขนส่งในกระแสที่ราบเรียบ (Transport in laminar shear) การจมตัวด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน (Differential settling) และการขนส่งโดยกระแสน้ำที่ปั่นป่วน (Turbulence transport) (Letterman et al., 1999) ซึ่งกลไกแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 2.4 (ก) แบบจำลองการสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ (จ) ระยะที่เกิดการสัมผัส

หมายเหตุ จาก Transport modeling for environmental engineering and scientist (94, 96),

โดย Clark, M. M., 1993, New York: John Wiley & Son.

### 2.4.1 การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

กลไกการสร้างฟล็อกในลักษณะนี้เรียกว่า การสร้างฟล็อกแบบเพอริไคเนติก (Perikinetic flocculation) จะเกิดขึ้นกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ( $10^{-6}$  m) ความร้อนภายในกระแสน้ำจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random motion) และเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์แล้วรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกแบบเพอริไคเนติกแสดงในสมการที่ (2-7)

$$k_p = \frac{2}{3} \frac{k_B T}{\mu} \frac{(d_1 + d_2)^2}{d_1 d_2} \quad (2-7)$$

โดยที่  $k_p$  คือค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกแบบเพอริไคเนติก ( $L^3/T$ )  $k_B$  คือค่า Boltzmann's constant  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ ( $^{\circ}K$ )  $\mu$  คือค่าความหนืดของน้ำ  $d_1$  และ  $d_2$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 1 และ 2 จากสมการที่ (2-7) อัตราการสร้างฟล็อกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคอลลอยด์ (Letterman et al., 1999)

### 2.4.2 การขนส่งในกระแสน้ำที่ราบเรียบ (Transport in laminar shear)

การสร้างฟล็อกโดยกลไกนี้เป็นที่นิยมปฏิบัติมากที่สุด การกวนน้ำทำให้น้ำในแต่ละส่วนมีความเร็วที่แตกต่างกันความเร็วจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคคอลลอยด์ที่เคลื่อนที่ไปในกระแสน้ำก็จะมีความเร็วแตกต่างกันด้วย (ลัดดา ชรรณภรณ์, 2536) เมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสกันขึ้น กลไกนี้เรียกว่าการสร้างฟล็อกแบบออร์โธไคเนติก (Orthokinetic flocculation) (Letterman et al., 1999) และค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกโดยกลไกการขนส่งในกระแสน้ำที่ราบเรียบแสดงในสมการที่ (2-8)

$$k_o = \left[ \frac{(d_1 + d_2)^3}{6} \right] \left( \frac{du}{dz} \right) \quad (2-8)$$

แต่  $G = \frac{du}{dz}$  = Mean velocity gradient ดังนั้น สมการที่ (2-8) จะได้

$$k_o = \left[ \frac{(d_1 + d_2)^3}{6} \right] G \quad (2-9)$$

โดยที่  $k_o$  คือค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกแบบออร์โธไคเนติก ( $L^3/T$ )  $d_1$  และ  $d_2$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 1 และ 2  $G$  คือค่าความเร็วเกรเดียนท์ ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างฟล็อกโดยกลไกนี้คือระดับค่า  $G$  และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคคอลลอยด์ กลไกนี้จะเกิดได้ดีถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2538) นอกจากความเร็วเกรเดียนท์แล้วระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention time,  $\theta$ ) ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ ค่า  $G$  และเวลาเก็บกักมีความสำคัญต่อการออกแบบและควบคุมการทำงานของโรงงานผลิต

น้ำประปา กล่าวคือฟล็อกจะมีขนาดจำกัดที่ค่า  $G$  หนึ่งๆ (ลัดดา ชรรณการันย์, 2536) ขณะเดียวกันขนาดของฟล็อกจะแปรตามผลคูณของค่า  $G$  และ  $t$  ด้วย (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996)

#### 2.4.3 การจมตัวด้วยความเร็วที่ต่างกัน (Differential settling)

การสร้างฟล็อกโดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นในน้ำที่ปราศจากความปั่นป่วน (ลัดดา ชรรณการันย์, 2536; Letterman et al., 1999) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดการสัมผัสและรวมตัวกันเป็นฟล็อก ค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกด้วยกลไกนี้แสดงในสมการที่ (2-10)

$$k_d = \frac{\pi g(s-1)}{72\nu} (d_1 + d_2)(d_1 - d_2) \quad (2-10)$$

โดยที่  $k_d$  คือค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกแบบการจมตัวด้วยความเร็วที่ต่างกัน ( $L^3/T$ )  $d_1$  และ  $d_2$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 1 และ 2  $g$  คือค่าแรงโน้มถ่วง  $s$  คือความหนาแน่นจำเพาะของอนุภาคคอลลอยด์และ  $\nu$  คือค่าความหนืดจลน์ของน้ำ สมการนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าอนุภาคคอลลอยด์มีรูปร่างกลมและมีความหนาแน่นเท่ากัน (Letterman et al., 1999)

#### 2.4.4 การขนส่งในกระแสน้ำที่ปั่นป่วน (Turbulence transport)

ในกระแสน้ำที่ปั่นป่วนจะเกิดกระแสนวนของน้ำที่เรียกว่า “Eddies” ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันจำนวนมาก ภายในกระแสนวนเหล่านี้จะมีค่าความเร็วแปรไปตามระยะเวลา อนุภาคคอลลอยด์ที่เคลื่อนที่อยู่ในกระแสนวนนั้นก็มีความเร็วที่แตกต่างกันด้วยและมีโอกาสสัมผัสกัน ค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกในสภาวะที่ปั่นป่วนแสดงในสมการที่ (2-11)

$$k_t = \left[ \frac{(d_1 + d_2)^3}{618} \right] (\mathcal{E}/\nu)^{1/2} \quad (2-11)$$

โดยที่  $k_t$  คือค่าคงที่อัตราการสร้างฟล็อกแบบการขนส่งในกระแสน้ำที่ปั่นป่วน ( $L^3/T$ )  $d_1$  และ  $d_2$  คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค 1 และ 2  $\mathcal{E}$  คืออัตราการกระจายพลังงานต่อหน่วยมวลของน้ำและ  $\nu$  คือค่าความหนืดจลน์ของน้ำ ปี 1956 Soffman, P. G. and Tuner, J. S. (อ้างถึงใน Letterman et al., 1999, p. 6-47) ได้ใช้สมมติฐานในสมการที่ (2-11) ทดลองกับอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าค่า Kolmogoroff microscale ( $\eta$ ) พบว่าอัตราการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคและอัตราการกระจายพลังงาน และปี 1975 Delichartsios and Probstein (อ้างถึงใน Letterman et al., 1999, p. 6-47) ได้ศึกษาการสร้างฟล็อกภายใต้สภาวะที่ปั่นป่วน 2 เงื่อนไข ได้แก่ รัศมีของอนุภาคคอลลอยด์ ( $\frac{d_1 + d_2}{2}$ ) น้อยกว่าและมากกว่าค่า  $\eta$  ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-12) และ (2-13) และพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นอัตราการ

สร้างฟลักซ์จะเป็นสัดส่วนกับค่า  $\mathcal{E}$  ยกกำลัง  $\frac{1}{3}$  ไม่ใช่  $\frac{1}{2}$  เหมือนในสมการที่ (2-11) ในทางตรงกันข้ามค่าคงที่อัตราการสร้างฟลักซ์ในสมการที่ (2-11) จะขึ้นกับค่าความหนืดจลน์ของน้ำ

$$k_d = \left[ \frac{(d + d_b)^3}{19} \right] \left( \frac{\mathcal{E}}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-12)$$

$$k_d = 0.427(d + d_b)^{\frac{7}{3}} \mathcal{E}^{\frac{1}{3}} \quad (2-13)$$

## 2.5 การผสม

การผสมคือกระบวนการลดความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneity) ของระบบ สิ่งที่อยู่ในระบบจะมีการผสมอย่างสมบูรณ์ถ้าองค์ประกอบที่กำหนด ณ ตำแหน่งใดๆ มีความเหมือนกันที่ทุกตำแหน่งๆ ของระบบ การผสมอาจจะระบุได้ 2 ตัวแปรคือ ขนาดของการผสม (Scale of mixing) และความเข้มของการผสม (Intensity of mixing) การผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ การผสมในระดับโมเลกุลเรียกว่าการผสมในระดับจุลภาค (Micromixing) เป็นการผสมที่เกิดจากการแพร่ในระดับโมเลกุลหรือการแตกย่อยของเอดดี้ปั่นป่วนปลาย (Terminal eddies) และการผสมในระดับที่ใหญ่กว่าโมเลกุลเรียกว่าการผสมในระดับมหภาค (Macromixing) ที่เกิดจากการพาธรรมชาติหรือการพาบังคับโดยที่ไม่สามารถแพร่ในระดับโมเลกุล (ชัยรัตน์ ศิริพิชนะ, สุรสิทธิ์ ประสารปราน, จวีรธรณ ไชยสุวรรณ, สุภรณ ภูริระวิชกุลย์และเลียง กุบุตรณ์, 2542)

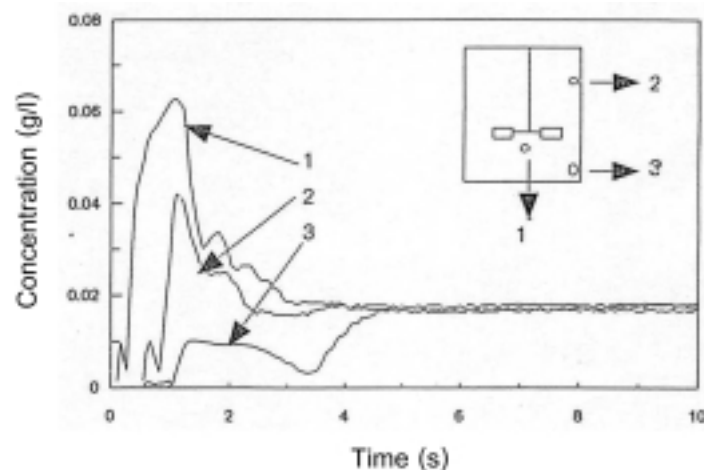
### 2.5.1 การผสมแบบปั่นป่วน

นอกจากนี้เราอาจจะพิจารณาการผสมในลักษณะที่เรียกว่า การผสมแบบปั่นป่วน (Turbulence mixing) เป็นการผสมที่เริ่มต้นด้วยการแพร่กระจาย (Dispersion) เป็นการทำให้ก้อนของไหล (Lump) แยกออกจากกันซึ่งก่อให้เกิดการผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันในระดับมหทรรศน์ (Macroscopically uniform mixture) เมื่อเพิ่มระดับความรุนแรงในการผสมเพิ่มขึ้นอีกขนาดของกลุ่มก้อนของไหลก็จะลดลงไปอีกจนไม่สามารถลดขนาดลงได้อีก ในขณะที่เดียวกันการแพร่ในระดับโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลทุกชนิดที่เกี่ยวข้องมีการกระจายเป็นเนื้อเดียวกันในระดับที่เรียกว่าระดับจุลทรรศน์ (Submicroscopic) (ชัยรัตน์ ศิริพิชนะและคณะ, 2542)

### 2.5.2 เวลาในการผสม

โดยทั่วไปแล้วการศึกษาประสิทธิภาพการผสมในทางปฏิบัติมักนิยมใช้เวลาในการผสม (Mixing time,  $t_m$ ) ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของระบบเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของการผสม เวลาในการผสมเป็นเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดระดับความเป็นเนื้อเดียวกันของของเหลวตลอดทั่วทั้งถังในระดับที่มีการกวนอย่างต่อเนื่อง ปี 2542 ชัยรัตน์ ศิริพิชนะและคณะได้ทำการทดลองหาเวลาในการผสมในถังผสมโดยวิธีการติดตามการตอบสนองความเข้มข้นของเทรเซอร์ (Tracer response) 3

ตำแหน่งในถังผสมและใช้ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ความเร็วใบพัด 5.833 รอบต่อวินาที ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาผสมร้อยละ 95 ( $t_{mix95\%}$ ) อยู่ที่ประมาณ 5 วินาที แสดงในรูปที่ 2.5 และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการผสมร้อยละ 95 สำหรับใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์และ Pitch blade turbine มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเร็วของใบพัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 การตอบสนองสารแทรกแซงของใบพัด Rushtone turbine ความเร็ว 5.83 รอบต่อวินาที หมายเหตุ จาก การพัฒนาระบบการศึกษากลศาสตร์ของไหลและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตแซนแรน (5-39), โดย ชัยรัตน์ ศิริพัชนะและคณะ, 2542, สำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.

ปี 1994 Pedesen, A. G., Neilsen, M. B., Neilsen, J. and Villadsen (อ้างถึงใน ชัยรัตน์ ศิริพัชนะและคณะ, 2542, หน้า 5-36 ) ได้ศึกษาการผสมในถังผสมขนาด 15 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัด Flat blade turbine ในน้ำได้ให้ความสัมพันธ์ของเวลาในการผสมที่ร้อยละ 63.2 ดังแสดงในสมการที่ (2-14)

$$t_{mix,63.2\%} = 0.042 + \left(\frac{22.06}{N}\right) \quad (2-14)$$

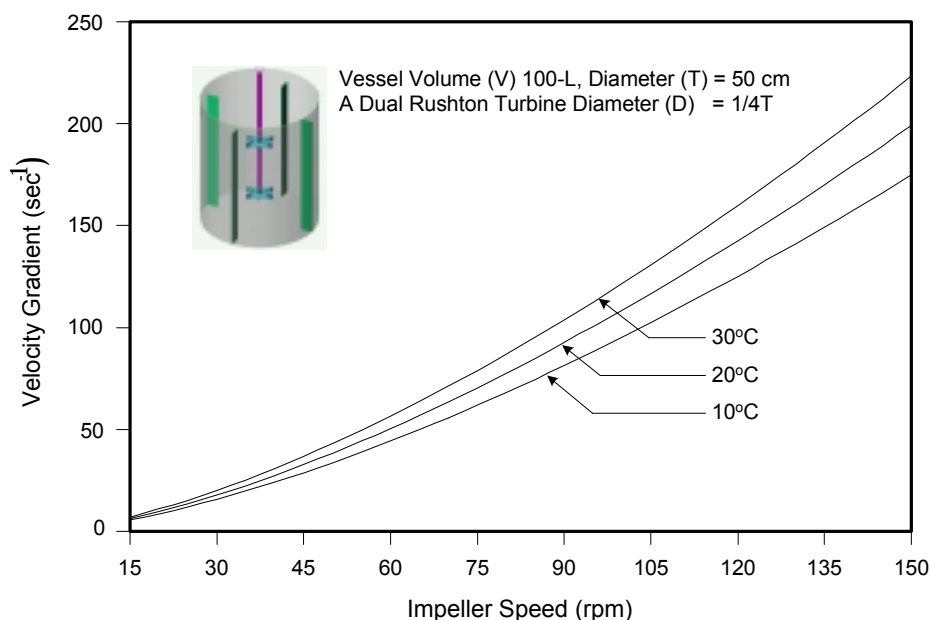
$N$  คือความเร็วใบพัด (รอบต่อวินาที) และปี 1993 Chiti, Y. and Moo-Young (อ้างถึงใน ชัยรัตน์ ศิริพัชนะและคณะ, 2542, หน้า 5-36) ได้ศึกษาการผสมในถังผสมแบบมาตรฐาน (Standard tank) ขนาด 25 ลิตรที่ติดตั้งใบพัดแบบ Flat blade turbine ได้ให้ความสัมพันธ์ของเวลากับความเร็วของใบพัดที่ทำให้เกิดการผสมร้อยละ 95 ดังสมการที่ (2-15)

$$t_{mix,95\%} = 28.23N^{-0.41} \quad (2-15)$$

$N$  คือความเร็วใบพัด (รอบต่อวินาที) และจากสมการดังกล่าวเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของซัยรตัน ศิริพัธนะและคณะ (2542) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน

### 2.5.3 ความเร็วใบพัด

นอกจากความเร็วของใบพัดจะมีความสัมพันธ์กับเวลาผสมแล้วยังมีความสัมพันธ์กับความเร็วแรงแคเรียนท์ในถังผสมด้วย ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและการสร้างฟลอคการเลือกความเร็วใบพัดในการกวนถูกกำหนดด้วยค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ที่เหมาะสม สำหรับระบบการผสมค่าความเร็วแรงแคเรียนท์จะแปรผันตรงกับความเร็วของใบพัด รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดเทอร์ไบน์กับค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ในถังผสมขนาด 100 ลิตร ที่มีแผ่นกั้นนอกจากนี้ อุณหภูมิก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ค่าความเร็วแรงแคเรียนท์เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดกับความเร็วแรงแคเรียนท์

### 2.5.4 การผสมเร็ว

การผสมเร็วเป็นการทำให้สารก่อตะกอนแพร่กระจายในน้ำอย่างทั่วถึงและรวดเร็วโดยเข้าทำปฏิกิริยาและทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ปัจจุบันนิยมใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) และใช้เครื่องจักรกลช่วยในการกวนเนื่องจากมีความเชื่อถือได้ให้ประสิทธิภาพสูงและมีความยืดหยุ่น (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996) แต่ก็มีข้อเสียได้แก่ มีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาเครื่องจักรกลและต้องก่อสร้างถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ (Qasim et al., 2000)

ใบพัดที่ใช้เป็นอุปกรณ์ในการกวนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ใบพัดที่ทำให้กระแส  
 น้ำไหลในแนวรัศมี (Radial flow impeller) และในแนวแกน (Axial flow impeller) ในการผสมเร็ว  
 ชนิดของใบพัดมีผลต่อระยะเวลาในการผสมน้อยมาก (ชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ, 2542) ใน  
 ปัจจุบันกระบวนการโคแอกกูเลชันในโรงงานผลิตน้ำประปามักเกิดขึ้นจากกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาค  
 (Sweep coagulation) แทนที่สิ่งนี้ ทั้งนี้เพราะถึงผสมเร็วไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาค  
 คอลลอยด์ได้ทั้งหมดภายในเวลาน้อยกว่า 1 วินาที (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538) ซึ่งสอดคล้องกับ  
 การทดลองของชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ (2542) ดังนั้นในการผสมเร็วจึงต้องมีเวลามากกว่า 1  
 วินาที เพื่อให้มีเวลามากพอที่จะทำให้สารเคมีรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและทำลายเสถียรภาพ  
 ของอนุภาคคอลลอยด์ได้อย่างสมบูรณ์ (Qasim et al., 2000) ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบการผสม  
 เร็วตั้งแต่ 20 – 60 วินาที (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996) และสามารถขยายได้ในช่วง  
 เวลาตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 5 นาที (Qasim et al., 2000) ตัวแปรที่สำคัญในการผสมเร็วคือ ค่าความเร็ว  
 แกรเดียนท์ (Velocity gradient,  $G$ ) เป็นค่าที่บอกถึงระดับความเข้มของการผสม ในการผสมเร็วควร  
 มีค่า  $G$  อยู่ระหว่าง 700-1,000 ต่อวินาที (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538; Reynolds, T. D. and Richards,  
 P. A., 1996) ถ้าในกรณีที่เวลาในการผสมน้อยลงจะต้องเพิ่มระดับความเร็วแกรเดียนท์ให้สมดุลกัน  
 โดยให้ค่าผลคูณระหว่างค่าความเร็วแกรเดียนท์ ( $G$ ) และเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time,  $t$ )  
 อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ผลคูณระหว่าง  $G$  และ  $t$  ( $Gt$ ) ที่เหมาะสมสำหรับการผสมเร็วอยู่ในช่วง  
 30,000-60,000 (Qasim et al., 2000)

### 2.5.5 การผสมสำหรับการสร้างฟล็อก

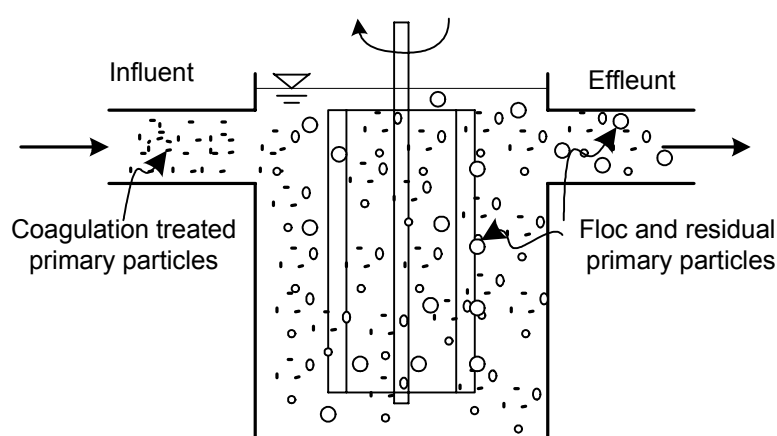
การสร้างฟล็อกเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สัมผัสและรวมกันเป็นฟล็อกที่มี  
 ขนาดใหญ่ขึ้น การผสมในกระบวนการการสร้างฟล็อกนิยมใช้เครื่องจักรกลเนื่องจากให้ความเชื่อ  
 ถือได้และให้ผลเป็นที่น่าพอใจ การผสมสำหรับการสร้างฟล็อกมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ประการคือ ค่า  
 ความเร็วแกรเดียนท์และเวลาเก็บกัก ปี 1943 Camp, T. R. and Stein, P. C. (อ้างถึงใน Imre Horvath,  
 C. Sc., 1994, p. 212) ได้เสนอค่า  $G$  ที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง ฟล็อกอยู่ระหว่าง 20-74 ต่อวินาที  
 และ  $Gt$  อยู่ระหว่าง 23,000-210,000 มันสิน ตันฑุลเวศม์ (2538) แนะนำค่า  $G$  ที่เหมาะสมสำหรับ  
 การสร้างฟล็อกอยู่ระหว่าง 20-50 ต่อวินาที และเวลาเก็บกักควรอยู่ในช่วง 20-30 นาที ถ้ามากกว่านี้  
 จะไม่เป็นการประหยัด ในการผสมสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงเวลาเก็บกักไม่ควรน้อยกว่า 20 นาที  
 และค่า  $G$  ควรอยู่ระหว่าง 10-50 ต่อวินาที และน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำเวลาเก็บกักไม่ควรน้อยกว่า 30  
 นาที และค่า  $G$  ควรอยู่ระหว่าง 10-75 ต่อวินาที (Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996)  
 AWWA. and ASCE. (1998) ได้แนะนำค่า  $Gt$  อยู่ในช่วง 24,000-84,000 และเวลาเก็บกักที่เหมาะสม  
 ประมาณ 20 นาที การผสมสำหรับการสร้างฟล็อกในน้ำดิบที่มีปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคเริ่ม



ต้น (Primary particle) สูงจะใช้เวลาเก็บกักน้อยกว่าน้ำดิบที่มีปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้นต่ำ (Letterman et al., 1999)

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาถึงผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจะเป็นถังผสมแบบกวนสมบูรณ์ไหลต่อเนื่อง (Completely mixed, Continuous flow flocculation reactor) แสดงในรูปที่ 2.7 การผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจะมีความรุนแรงน้อยกว่าการผสมเร็วเนื่องจากจะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออกจากกันได้ การแบ่งการผสมให้เป็นหลายๆ ส่วนโดยการลดระดับค่า  $G$  ของการผสมลงจะทำให้ประสิทธิภาพการสร้างฟล็อกเพิ่มสูงขึ้น (มันสิน ตันทุลเวสม์, 2538; Qasim et al., 2000; Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996; Letterman et al., 1999) ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงสามารถแยกโดยการตกตะกอนได้ดีขึ้นและใช้ระยะเวลาล้างกลับทรายกรองให้นานขึ้น (Carlson, K. H., Member, ASCE and Dean Gregory., 2000)

กระบวนการการสร้างฟล็อกมีกลไกที่สำคัญในการควบคุมการเกิดฟล็อกคือกลไกแบบออร์โธไคเนติก (Orthokinetic) ซึ่งจะมีผลต่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนเท่านั้น ส่วนกลไกแบบเพริไคเนติก (Perikinetic) หรือกลไกแบบบราวเนียนโมชันจะมีบทบาทมากกว่าเมื่ออนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนแม้ว่าจะเพิ่มระดับค่า  $G$  ขึ้นก็ตาม (Letterman et al., 1999; Qasim et al., 2000; Cornelissen, A., Burnett, M. G., McCall, R. D. and Goddard, D. T., 1997) และปี 1997 Bache, D. H., Johnson, C., McGilligan, J. F. and Rasool, E. ได้ศึกษากลไกการห่อหุ้มอนุภาคของสารส้มชี้ให้เห็นว่า pH ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ความหนาแน่นของฟล็อกจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 รูปแบบถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกแบบกวนสมบูรณ์ไหลต่อเนื่อง

หมายเหตุ จาก Water quality and treatment: A handbook of community water supplies,

(5th ed.) (6.49) โดย Letterman et al., 1999, New York: McGraw-Hill.

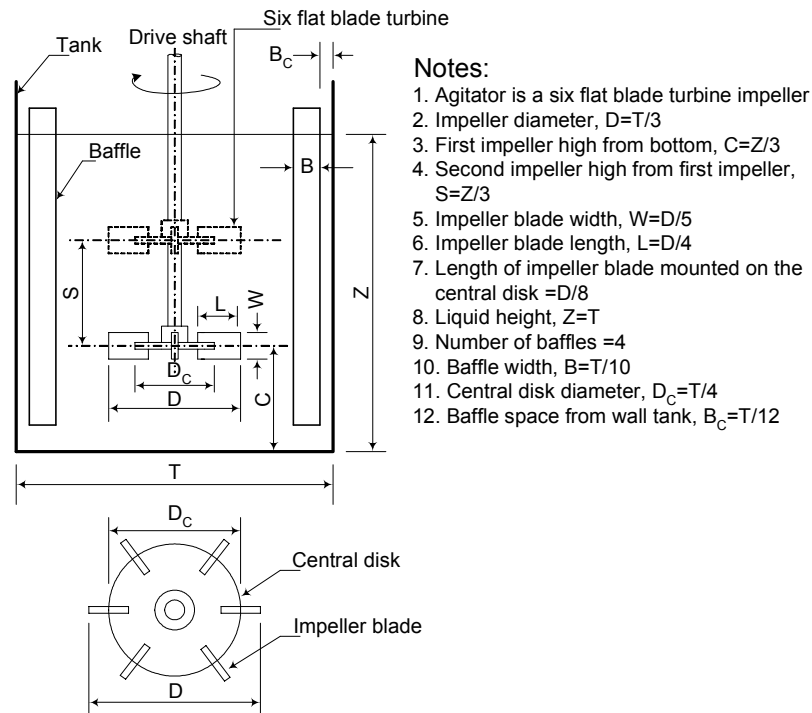
## 2.6 การกวน

เนื่องจากการกวนเป็นกระบวนการพื้นฐานกระบวนการหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การกวนมีความแตกต่างจากการผสมคือ การกวนหมายถึงการทำให้เกิดสภาวะปั่นป่วนโดยอาจจะไม่มีการผสมเกิดขึ้นก็ได้ ส่วนการผสมหมายถึงการปนกันของสารอย่างน้อยสองชนิดที่ไม่เหมือนกันเป็นผลให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพเหมือนกันหมดตามที่ต้องการและใบพัดจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการกวน ปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำประปานิยมใช้ใบพัดเป็นอุปกรณ์ในการกวนสำหรับกระบวนการผสมเร็วและการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกเนื่องจากใบพัดเป็นตัวกลางในการกระจายพลังงานจากมอเตอร์ไปสู่ น้ำในถังผสมทำให้น้ำเกิดความปั่นป่วนขึ้น

ข้อดีของใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์คือให้ผลการกวนที่เชื่อถือได้ สามารถสร้างได้ด้วยการประกอบเป็นชิ้นเล็กๆทำให้น้ำหนักเบา จึงเกิดปัญหาทางด้านการออกแบบเชิงกลเมื่อต้องการสร้างใบพัดขนาดใหญ่ ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์จึงเป็นใบพัดมาตรฐานสำหรับการกวนที่ใช้งานโดยทั่วไป รูปที่ 2.8 เป็นค่ากำหนดการออกแบบใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (D) และเส้นผ่าศูนย์กลางถัง (T) อยู่ระหว่าง 0.15-0.90 แต่ที่พบมากที่สุดคือ 0.33-0.50 (วิวัฒน์ ตันตะพาณิชกุล, 2538) ในกรณีใบพัด 2 ชั้น และความสูงของน้ำเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถังผสม ตำแหน่งใบพัดล่างสุดสูงจากพื้นถึงเท่ากับ  $0.25T$  ระยะห่างระหว่างใบพัดเท่ากับ  $0.5T$  จะทำให้ความเร็วของน้ำมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งถังผสมมากที่สุด (Rutherford, K., Lee, K.C., Mahmoudi, S. M. S. and Yianneskis, M., 1996; Micale, G., Brukato, A., Grisafi, F. and Ciofalo, M., 1999)

## 2.7 กำลังที่ใช้ในการกวน

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง (Power,  $P$ ) ที่ต้องใช้ในการกวนคือ คุณสมบัติของของเหลวที่จะกวน ได้แก่ ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ความหนืดสัมบูรณ์ ( $\mu$ ) ขนาดและชนิดของใบพัด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ความสูงของแผ่นใบพัด (W) ความเร็วใบพัด ( $N$ ) อัตราส่วนระหว่างขนาดถังผสมและใบพัด ได้แก่ T/D, Z/D, C/D และแผ่นกั้น (วิวัฒน์ ตันตะพาณิชกุล, 2538) ปี 1988 Nagata (อ้างถึงใน ชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ, 2542, หน้า 5-12) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลัง (Power number,  $N_p$ ) และเลขเรย์โนลด์ (Reynold number,  $N_{Re}$ ) ของใบพัดและได้ให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-18) สมการทั่วไปสำหรับคำนวณเลขกำลังและเลขเรย์โนลด์ดังสมการที่ (2-19) และ (2-20) ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ค่ากำหนดทั่วไปสำหรับการออกแบบใบพัดรัศขทอนเทอร์ไบน์

หมายเหตุ จาก Wastewater engineering: Treatment, disposal, reuse, (3rd ed.). (217),

โดย Metcalf & Eddy, 1991, New York: McGraw-Hill.

$$N_p = \frac{A}{N_{RE}} + B \left[ \frac{10^3 + 0.8N_{RE}}{10^3 + 1.6N_{RE}} \right] C \quad (2-18)$$

$$N_{RE} = \frac{ND^2\rho}{\mu} \quad (2-19)$$

$$N_p = \frac{Pg_c}{N^3 D^5 \rho} \quad (2-20)$$

โดยที่  $A, B, C$  คือค่าคงที่  $N_p$  คืออัตราส่วนระหว่างแรงภายนอกต่อความหนืดของของเหลว  $g_c$  คือสัมประสิทธิ์ของแรงโน้มถ่วง ( $9.81 \text{ Kg.m/Kg.s}^2$ ) และ  $N_{RE}$  คืออัตราส่วนระหว่างความหนืดของของเหลวต่อแรงของความหนืดของของเหลว (McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P., 1993; วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, 2538) ดังนั้นในช่วงนี้ของเหลวจะเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน กำลังที่ใช้ในการกวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-21)

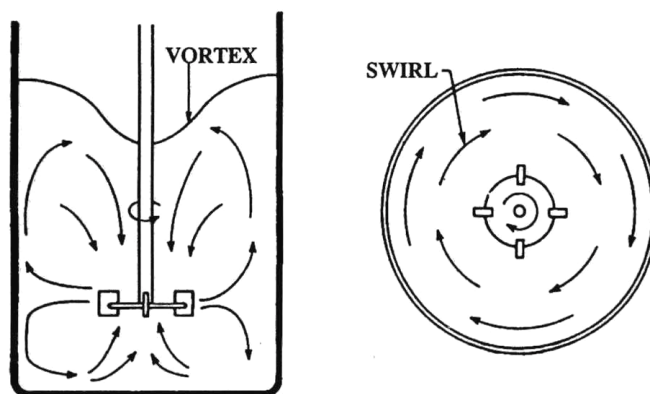
$$P = K_T N^3 D^5 \rho \quad (2-21)$$

โดยที่  $P$  คือกำลังขับ (วัตต์)  $K_T$  คือค่าคงที่ ใบพัดแต่ละชนิดต้องการกำลังในการกวนแตกต่างกัน

และค่า  $K_T$  ของใบพัดขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างขนาดถังผสมและใบพัด ในกรณีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด D/T เท่ากับ 1/4 ค่า  $K_T$  เท่ากับ 4.2 (Yianeskis, M., Popiolek, Z. and Writelaw, J. H., 1987) ในกรณีต้องการติดตั้งใบพัด 2 ชั้น ในแกนหมุนเดียวกันระยะห่างระหว่างใบพัด (S) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังที่ใช้สำหรับการกวน

## 2.8 ลักษณะการไหลในถังผสมสำหรับการสร้างฟลักซ์รูปทรงกระบอก

การออกแบบถังผสมที่มีรูปทรงกระบอกจะช่วยลดปัญหาจากการเกิดบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnant zone) ที่มุมถังซึ่งมักจะเกิดกับถังผสมที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ทั้งนี้ถังผสมรูปทรงกระบอกก็มีข้อเสียคือความยุ่งยากในการก่อสร้างจะมากกว่าการก่อสร้างถังรูปทรงสี่เหลี่ยม การกวนโดยใบพัดเทอร์ไบน์จะทำให้หน้าไหลในแนวรัศมีของถังผสม ดังรูปที่ 2.9 เป็นลักษณะการไหลเมื่อมองจากด้านข้างและด้านล่างของถังผสมที่ไม่มีแผ่นกั้น รูปที่ 2.10 เป็นลักษณะการไหลเมื่อมองจากด้านข้างและด้านล่างของถังผสมที่มีแผ่นกั้น ข้อดีของการมีแผ่นกั้นในถังผสมคือสามารถลดการเกิดกระแสน้ำวนที่เรียกว่า Vortex เมื่อความเร็วรอบของการกวนสูงขึ้น การเกิด Vortex ในถังผสมทำให้น้ำมีความเร็วที่แตกต่างกันน้อยการผสมจะมีประสิทธิภาพลดลง



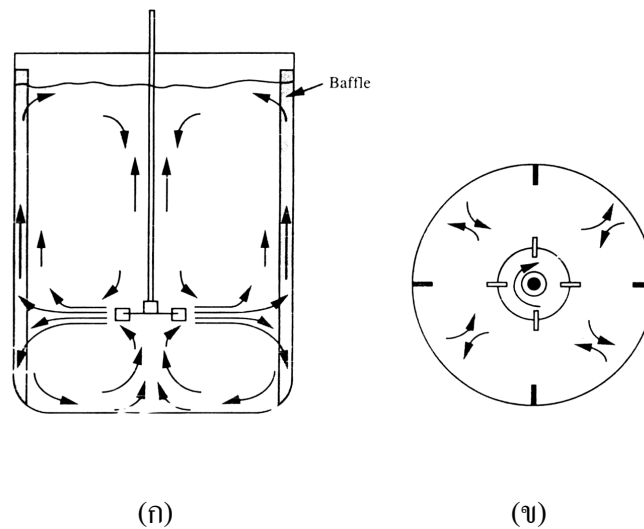
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.9 ลักษณะการไหลที่เกิดจากการกวนโดยใช้ใบพัดเทอร์ไบน์ที่ไม่มีแผ่นกั้นในถังผสม

(ก) รูปด้านข้างของถังผสม (ข) รูปด้านล่างของถังผสม

หมายเหตุ จาก *Handbook of chemical processing equipment* (451), โดย Cheremisinoff, N. P., 2000, Boston: Butterworth Heinemann.



รูปที่ 2.10 การไหลของน้ำที่เกิดจากการกวนโดยใช้ใบพัดเทอร์ไบน์และมีแผ่นกั้นในถังผสม  
(ก) รูปด้านข้างของถังผสม (ข) รูปด้านล่างของถังผสม

หมายเหตุ จาก Bioprocess engineering principles. (145), โดย Doran, P.M., 1995, London: Academic press.

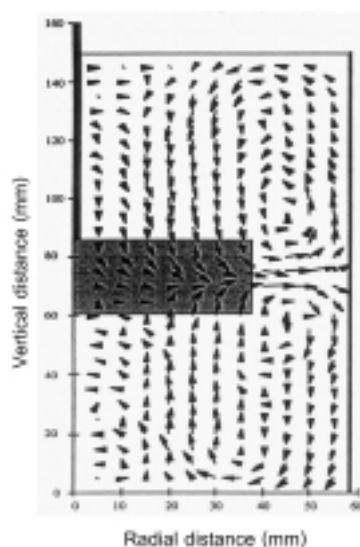
การไหลวนของกระแสน้ำในถังผสม ณ ตำแหน่งต่างๆ ของของเหลวจะมีความเร็วที่ต่างกัน ความเร็วจะเปลี่ยนไปตามระยะทางและเวลา ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุความเร็วของน้ำที่ตำแหน่งและเวลาที่แน่นอนได้ ในความเป็นจริงการไหลของน้ำในถังผสมมีทิศทางของการไหลเกิดขึ้นทั้ง 3 มิติ (แกน x, y, z) และแต่ละมิติก็มีความเร็วที่ต่างกัน รูปที่ 2.11 เป็นทิศทางการไหลของน้ำที่เกิดจากการกวนโดยใบพัด Flat blade turbine ใน Jar test ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ในลักษณะ 2 มิติ ปี 1968 Schwartzberg, H. G. and Treybal, R. E. (อ้างถึงใน Cleasby, J. L., 1984, p. 878) ได้ศึกษาความเร็วของของเหลวในการกวนโดยใช้ใบพัดรัศมีเทอร์ไบน์และได้เสนอสมการสำหรับคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของของเหลวทั้งหมด (Average total fluid velocity) ในสมการที่ (2-22)

$$\bar{u} = \frac{1.586\omega D^2}{(T^2 Z)^{1/3}} \quad (2-22)$$

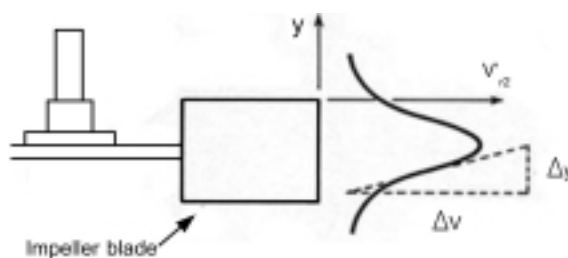
โดยที่  $\bar{u}$  คือความเร็วเฉลี่ยของของเหลวทั้งหมด  $\omega$  คือความเร็วใบพัด  $D$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด  $T$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางถังผสมและ  $Z$  คือความลึกของน้ำในถังผสม

ความเร็วของน้ำที่กวนด้วยใบพัดรัศมีเทอร์ไบน์ พบว่าความเร็วที่ตำแหน่งปลายใบพัดจะมีค่ามากที่สุด รูปที่ 2.12 ความเร็วในแนวรัศมีจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของใบพัดและจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างจากแนวกึ่งกลางใบพัดเพิ่มขึ้น (McCabe et al., 1993) รูปที่ 2.13 แสดงความเร็วของกระแสน้ำที่เกิดจากใบพัดรัศมีเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ในถังผสม

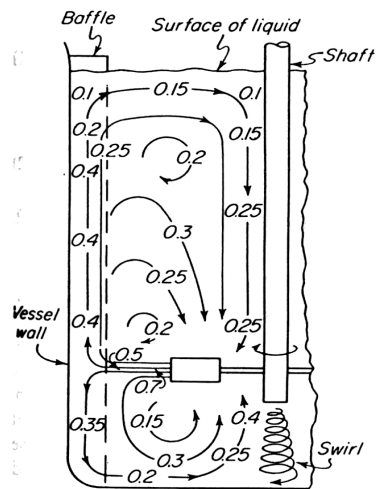
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว ความเร็วใบพัด 200 รอบต่อนาที ที่ตำแหน่งปลายใบพัดจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบความเร็วของกระแสน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ในถังผสม Stanley, S. J. and Smith, D. W. (1995) ได้ศึกษาลักษณะความปั่นป่วนของน้ำใน Jar Test มาตรฐาน 2 ลิตร ใบพัด Flat blade turbine เส้นผ่าศูนย์กลาง 76 มม. พบว่าความเร็วที่ตำแหน่งปลายใบพัด ( $V_{tip} = N\pi D$ ) มีค่าไม่คงที่จะแกว่งขึ้นลงตลอดเวลาดังรูปที่ 2.14



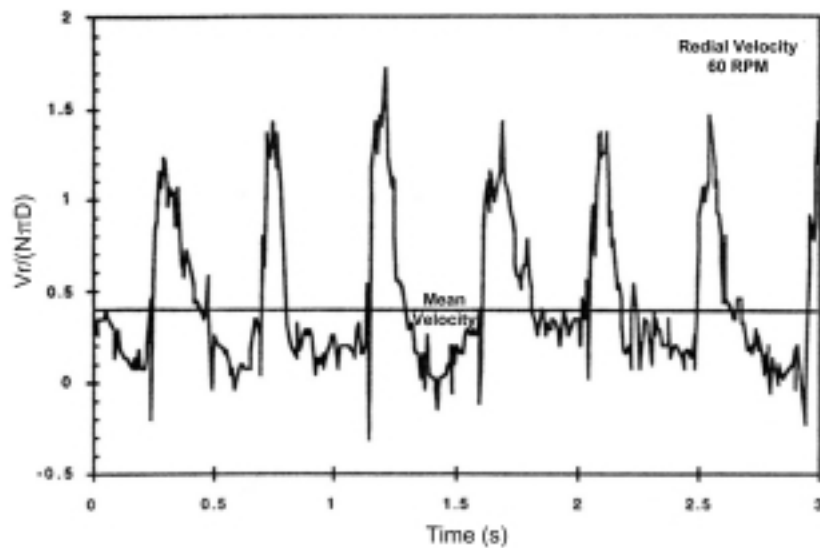
รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลเนื่องจากใบพัดเทอร์ไบน์ใน Jar test ความเร็ว 60 รอบต่อนาที  
 หมายเหตุ จาก “Measurement of turbulent flow in standard jar test apparatus”, โดย Stanley, S. J. and Smith, D.W., 1995, Journal of Environmental Engineering, 121 (12), 905.



รูปที่ 2.12 แนวระดับความเร็วที่ตำแหน่งปลายใบพัดเทอร์ไบน์  
 หมายเหตุ จาก Unit operation of chemical engineering (245), โดย McCabe et al., 1993, New York: McGraw-Hill.



รูปที่ 2.13 ความเร็วของกระแสน้ำที่กวน โดยใบพัดรัศมี 200 รอบต่อนาที  
 หมายเหตุ จาก Unit operation of chemical engineering (247), โดย McCabe et al.,  
 1993, New York: McGraw-Hill.

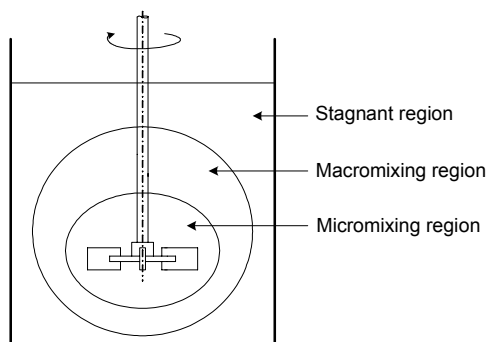


รูปที่ 2.14 การแกว่งของความเร็วของน้ำปลายใบพัด ความเร็ว 60 รอบต่อนาที  
 หมายเหตุ จาก “Measurement of turbulent flow in standard jar test apparatus”,  
 โดย Stanley, S. J. and Smith, D.W., 1995, Journal of Environmental  
 Engineering, 121 (12), 905.

## 2.9 ปริมาตรของบริเวณที่มีการผสม

ปี 1987 Funahashi, H., Harada, H., Taguchi, H. and Yoshida, T. (อ้างถึงใน ชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ, 2542, หน้า 5-57) ได้ศึกษาและสังเกตรูปแบบการไหลในถังผสมสำหรับการผลิตแซนแทน พบว่าปริมาตรทั้งหมดของถังอาจแบ่งได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่มีการผสมในระดับไมโคร (Micromixing region,  $V_{micro}$ ) เป็นบริเวณที่ใกล้กับใบพัดซึ่งเป็นบริเวณที่มีการผสมกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา บริเวณที่มีการผสมระดับมาโคร (Macromixing region,  $V_{macro}$ ) เป็นบริเวณที่มีการไหลวนเข้าแต่การไหลวนทั่วถึงกันตลอดและบริเวณที่ของเหลวอยู่นิ่ง (Stagnant region,  $V_{stagnant}$ ) เป็นบริเวณที่ของเหลวไม่มีการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.15 ความเร็วใบพัดของการกวนมีผลต่อปริมาตรของบริเวณที่มีการผสมทั้งสามบริเวณในถังผสม  $V_{micro}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนปริมาตรใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาตรของของเหลวในถังในขณะที่  $V_{macro}$  และ  $V_{stagnant}$  จะลดลงตามลำดับและเข้าสู่ศูนย์เมื่อ  $V_{micro}$  เท่ากับปริมาตรของของเหลวในถังทั้งหมด (ชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ, 2542)

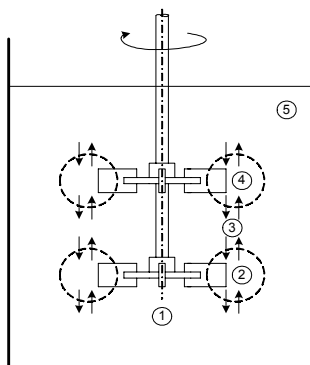
กรณีที่มีความจำเป็นต้องกวนที่ความเร็วใบพัดต่ำๆ เช่น การผสมสำหรับการสร้างฟล็อก บริเวณ  $V_{stagnant}$  จะทำให้โอกาสในการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์ลดลง การเพิ่มใบพัดเป็น 2 ชั้นจะทำให้บริเวณ  $V_{stagnant}$  ลดลง ปี 1984 Oosterhuis, N. M. G. and Kossen, N. W. F. (อ้างถึงใน Reuss, M., 1995, p. 231) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับถังผสมที่ใช้ใบพัด 2 ชั้น และแบ่งบริเวณผสมออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ บริเวณของใบพัด 2 ส่วนและบริเวณของของเหลว 3 ส่วนพร้อมกับลักษณะการไหลของของเหลวที่ทำให้เกิดการผสมในถังผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แสดงบริเวณที่มีการผสมในถังผสมของ Funahashi et al. (1987)

หมายเหตุ จาก การพัฒนาระบบการศึกษากลศาสตร์ของไหลและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตแซนแทน (5-74), โดย ชัยรัตน์ ศิริพัชระและคณะ, 2542, สำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.





รูปที่ 2.16 แบบจำลองแบ่งการผสมออกเป็น 5 ส่วนของ Oosterhuis et al. (1984)

หมายเหตุ จาก Bioreactor system design (232), โดย Reuss, M., 1995, New York: Marcel Dekker.

ปี 1987 Knysh, M. R., Rasekoala, P. E. A. and Didari, M. (อ้างถึงใน ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ และคณะ, 2542, หน้า 1-23) ได้เสนอแบบจำลองการไหลภายในถังผสมแบ่งได้เป็นรูปการไหลวนต่าง ๆ กันหรือโซนการไหลย่อยๆที่มีสนามการไหลเฉลี่ย โซนเหล่านี้ทำให้เกิดการผสมโดยการพา (Convective mixing) ในแต่ละโซนจะมีเซลล์ย่อยๆจำนวนมากที่อาจจะสมมติให้เป็นเซลล์ที่ติดกันหรือโดยการแพร่แบบปั่นป่วน (Turbulent diffusion) ระหว่างเซลล์ที่อยู่ในโซนข้างเคียงดังแสดงในรูปที่ 2.17

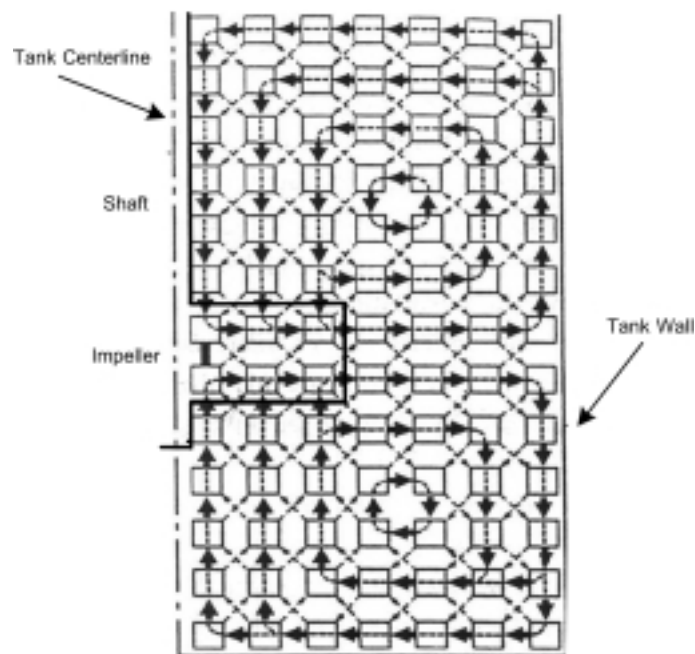
## 2.10 การสร้างฟลักในสภาวะการไหลที่ปั่นป่วน

การกวนโดยอาศัยเครื่องจักรกลสำหรับกระบวนการการสร้างฟลักแทบจะไม่มีสภาวะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เกิดขึ้น นั่นหมายถึงภายในถังผสมสำหรับการสร้างฟลักจะมีสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนความเร็วแปรเดียนท์จะแปรเปลี่ยนไปในทุกๆ ตำแหน่งของถังผสม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุค่าความเร็วแปรเดียนท์ได้อย่างชัดเจน (Montgomery, J. M. and Consulting engineers, Inc., 1985) ในปี 1916 Smolushowski, M. N. (อ้างถึงใน Stanley, S. J. and Smith, D.W., 1995, p. 903; Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X. and Williams, R. A., 1995, p. 166) ได้พัฒนาสมการกลไกการสร้างฟลักและการแตกของฟลักโดยกล่าวถึงอัตราการผลิตอนุภาคคอลลอยด์ภายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบโดยกล่าวไว้ว่า ในกระแสการไหลแบบราบเรียบจะมีทิศทางไหลเพียงแต่ทิศทางเดียว การไหลจะเป็นแนวเส้นตรง อนุภาครัศมี  $r_i$  จะเคลื่อนที่ไปเป็นเส้นตรงอันเนื่องมาจากกระแสของการไหล

และจะชนกับอนุภาครัศมี  $r_j$  ที่เคลื่อนที่ในกระแสน้ำไหลอื่นถ้าตำแหน่งของทั้งสองอนุภาคมีระยะสัมผัสเท่ากับ  $r_i + r_j$  ความถี่ของการชนจะขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความเร็วเกรเดียนต์รูปที่ 2.18 เป็นแบบจำลองการชนของอนุภาคสองขนาดที่ต่างกันภายใต้สภาวะสนามการไหลที่มีความเร็วเกรเดียนต์ อัตราการการชนกันของอนุภาคแสดงในสมการที่ (2-23)

$$N_{ij} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \left( \frac{du}{dz} \right) \quad (2-23)$$

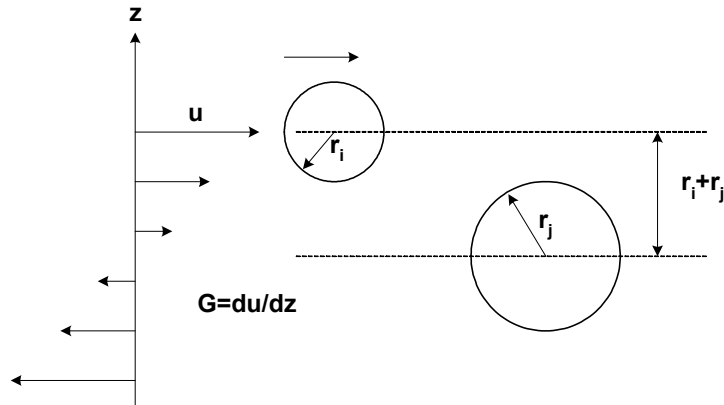
โดยที่  $N_{ij}$  คืออัตราการชนของอนุภาค  $i$  และ  $j$  (#/T-L<sup>3</sup>)  $n_i$  และ  $n_j$  คือความเข้มข้นของอนุภาค  $i$  และ  $j$  (#/L<sup>3</sup>)  $\left( \frac{du}{dz} \right)$  คือความเร็วเกรเดียนต์ (T<sup>-1</sup>)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองโครงข่ายของโซนสำหรับถังผสมของ Knysh et al. (1987)

➔ Circulation zone      ---➔ Turbulence diffusion

หมายเหตุ จาก การพัฒนาระบบการศึกษากลศาสตร์ของไหลและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตแซนแทน (1-24), โดย ชัยรัตน์ สิริพิชณะและคณะ, 2542, สำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์สองขนาดที่แตกต่างกัน  
 หมายเหตุ จาก Particle deposition and aggregation: Measurement, modeling and simulation (165), โดย Elimelech et al., 1995, Oxford: Butterworth-Heinemann.

ปี 1943 Camp, T. R. and Stein, P. C. (อ้างถึงใน Letterman et al., 1999, p. 6-47) ได้พัฒนาสมการของ Smoluchowski, M. N. สำหรับกระบวนการการสร้างฟล็อกในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนโดยแทนค่า  $\left(\frac{du}{dz}\right)$  ด้วยค่ารากที่สองของความเร็วจลื่นกำลังสอง (RMS. Velocity gradient,  $G$ ) ในสมการที่ (2-24) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-25)

$$G = \left(\frac{\phi_m}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{P}{\mu V}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-24)$$

$$N_{ij} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \left(\frac{\phi_m}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-25)$$

โดยที่  $\phi_m$  คือกำลังที่ถ่ายเทลงสู่ของเหลวต่อหน่วยปริมาตร  $\mu$  คือความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลว  $P$  คือกำลังในการกวน  $V$  คือปริมาตรของของเหลว และปี 1956 Saffman, P. G. and Turner, J. S. (อ้างถึงใน Stanley, S. J. and Smith, D. W., 1995, p. 903; Letterman et al., 1999, p. 6-47; Clark, M. M., 1985, p. 749) ได้ศึกษากระบวนการการสร้างฟล็อกของหยดน้ำในก้อนเมฆโดยมีสมมติฐานว่ามีความปั่นป่วนในก้อนเมฆนั้นและได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-26)

$$N_{ij} = 0.16 n_i n_j (d_i + d_j)^3 \left(\frac{\mathcal{E}}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-26)$$

โดยที่  $\mathcal{E}$  คืออัตราการกระจายพลังงานสู่มวลของน้ำและ  $\nu$  คือความหนืดจลน์ของน้ำ เมื่อพิจารณาสมการที่ (2-25) และ (2-26) แล้วจะพบว่ามีความแตกต่างของค่าคงที่ที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปความสัมพันธ์ของ  $\mathcal{E}$  กับความเร็วเฉือนที่ได้ดังสมการที่ (2.27)

$$G = \left(\frac{\mathcal{E}}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

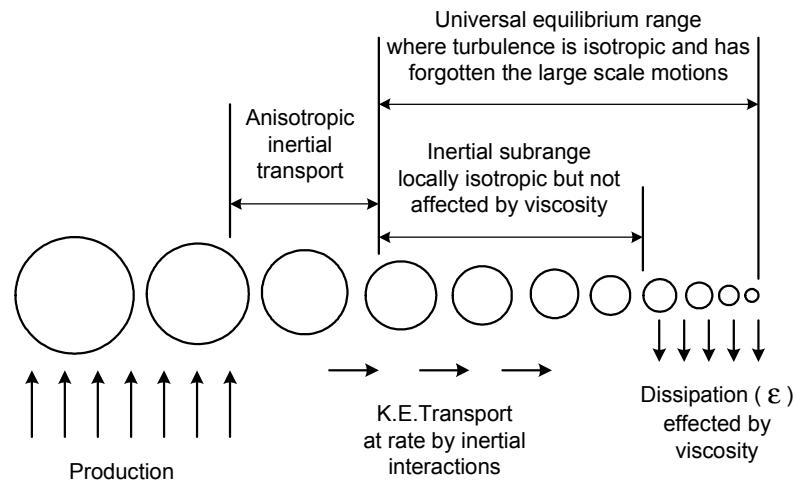
และสามารถคำนวณหาอัตราการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์ในกระบวนการการสร้างฟล็อกภายใต้สภาวะปั่นป่วนได้ด้วยสมการที่ (2-28)

$$N_{ij} = \frac{1}{6} n_i n_j (d_i + d_j)^3 \left(\frac{\mathcal{E}}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

กระบวนการการสร้างฟล็อกมีตัวแปรหลายอย่างควบคุมกลไกการเกิดของฟล็อกที่มีผลมากที่สุดคือผลเนื่องมาจาก  $G$  และ  $\mathcal{E}$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวกับของไหลภายในถังผสม การแตกของฟล็อกและขนาดที่ใหญ่ที่สุดของฟล็อกก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างฟล็อก การเคลื่อนไหวของของเหลวทำให้เกิดแรงกระทำต่ออนุภาค ถ้าแรงที่กระทำนั้นมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคก็จะทำให้อนุภาคที่รวมกันเป็นฟล็อกแล้วแตกออกจากกันได้ ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนจึงต้องพิจารณาถึงโครงสร้าง (Structure) และขนาด (Scale) ของความปั่นป่วนที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและการเคลื่อนที่ของอนุภาค รูปที่ 2.19 แสดงขนาดของกระแสนวนในอุดมคติที่พบในการไหลแบบปั่นป่วน การถ่ายเทพลังงานสู่ของเหลวทำให้เกิดการแตกย่อยของกระแสนวน (Eddies) ขนาดใหญ่ไปจนกระทั่งกระแสนวนมีขนาดเล็กที่สุด ขนาดของกระแสนวนที่เล็กที่สุด (Kolmogoroff microscale,  $\eta$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-29)

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\mathcal{E}}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.29)$$

ฟล็อกที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างฟล็อกมีขนาดตั้งแต่ 100-2000 ไมครอน (Qasim et al., 2000) ถ้า  $\eta$  มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของอนุภาคมีแนวโน้มที่กระแสนวนจะอ้อมหรือพุ่งอนุภาคไว้เป็นผลให้เกิดความเครียดที่ผิวของอนุภาคน้อยซึ่งเกิดขึ้นในการไหลแบบราบเรียบเป็นส่วนใหญ่ ถ้าหากว่ากระแสนวนมีขนาดเล็กกว่าขนาดของอนุภาคกระแสนวนเหล่านั้นจะทำให้อนุภาคเกิดแรงเฉือน แรงลากและความดัน ดังนั้น  $\eta$  จึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างฟล็อก การกวนในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจึงมีความจำเป็นต้องทำให้น้ำภายในถังผสมเกิดกระแสนวนที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาค การกวนโดยใช้ใบพัดจะพบว่ามีกรถ่ายเทพลังงานสู่ของเหลวบริเวณรอบๆ ใบพัดมากกว่าบริเวณอื่นที่ห่างออกไปหรือประมาณ 4-6 เท่าของค่าเฉลี่ยทั้งหมดของถังผสม (Stanley, S. J. and Smith, D. W., 1995) และเป็นการยากที่จะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Isotropic turbulence) ตลอดทั่วทั้งถังผสมโดยใช้ใบพัดเนื่องมาจากความเร็วที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันมากทั้งสามแกนนั่นเอง



รูปที่ 2.19 ภาพในอุดมคติขนาดของกระแสวน (Eddies) ที่เกิดในสภาวะการไหลที่ปั่นป่วน  
หมายเหตุ จาก “ Measurement of turbulent flow in standard jar test apparatus”, โดย Stanley,  
S. J. and Smith, D. W., 1995, *Journal of Environmental Engineering*, 121 (12):  
903.

## 2.11 การใช้ตาข่ายทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในถังผสม สำหรับการสร้างฟล็อก

ใบพัดเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการกวนในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกมากที่สุด แต่ใบพัดก็มีข้อเสียคือไม่สามารถทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งถังผสมได้เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของใบพัดนั่นเอง การเพิ่มจำนวนใบพัดก็เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น สามารถลดบริเวณหยุดนิ่งของน้ำให้น้อยลงและเพิ่มอัตราการกระจายพลังงานสู่น้ำมากขึ้น อัตราการกระจายพลังงานสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณรอบใบพัดซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วปลายใบพัด ( $V_{tip}$ ) ดังนั้นอัตราการกระจายพลังงานสูงสุดสามารถหาได้จากสมการที่ (2-30)

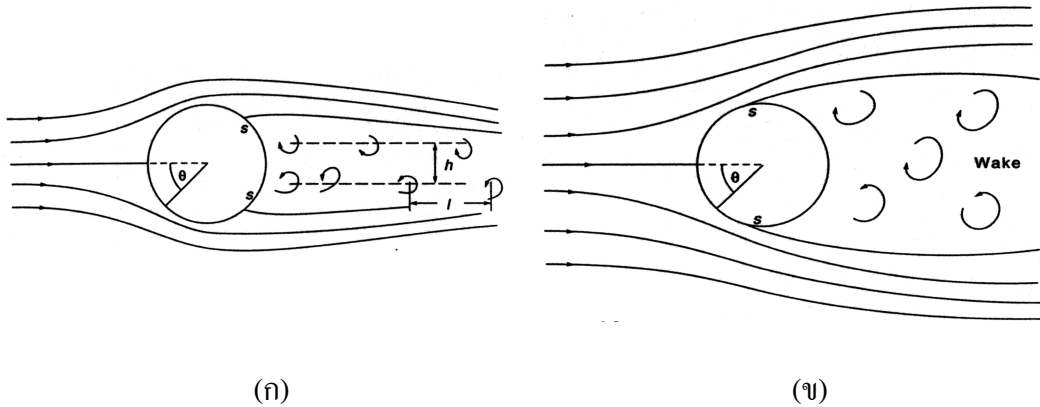
$$\varepsilon = k_d \frac{(N\pi D)^3}{D} \quad (2-30)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คืออัตราการกระจายพลังงานสูงสุด ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )  $k_d$  คือค่าคงที่การกระจายพลังงานของใบพัด  $N$  คือความเร็วใบพัด (Rev/s) และ  $D$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (m) ค่าคงที่การกระจายพลังงานของใบพัด 2 flat blade turbine 0.1-0.14 (Stanley, S. J. and Smith, D. W., 1995) และใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ  $T/4$  0.01-1.0 ที่ตำแหน่งบริเวณขอบถึงปลายใบพัด (Ju, S. J., Mulvahl, T. M. and Pike, R. W., 1990) หรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ

T/3 0.1-0.7 (Kresta, S. M. and Wood, P.E., 1991) การเพิ่มใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์เป็น 2 ใบพัดจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างจากแกนใบพัดมากขึ้นหรือระยะอัตราส่วนของรัศมีต่อเส้นผ่าศูนย์กลางถึงผสมมากกว่า 0.25 (Lee, K. C., Borrett, N. A. and Yianneskis, M., 2000)

นอกจากการเพิ่มจำนวนใบพัดแล้วยังสามารถทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในถึงผสมสำหรับการสร้างฟลักซ์ได้โดยการใช้ตาข่ายเป็นอุปกรณ์ในการกวน เมื่อน้ำไหลผ่านตาข่ายจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น โดยจะเกิดขึ้นที่บริเวณหลังแผ่นตาข่ายที่น้ำไหลผ่านไป น้ำที่ไหลผ่านแผ่นตาข่ายด้วยความเร็วสูงจะให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอระยะใกล้หลังแผ่นตาข่ายมากกว่าน้ำที่ไหลด้วยความเร็วต่ำ ระยะที่เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะเกิดขึ้นหลังแผ่นตาข่ายระยะมากกว่า 3 เท่าของขนาดช่องตาข่าย (Lemoine, F., Wolff, M. and Lebouche, M., 1997; Cheng, N- S. and Law, A. W-K., 2001) รูปที่ 2.20 เป็นลักษณะการเกิดกระแสวนที่เกิดจากน้ำไหลผ่านแท่งกลมเมื่อค่า  $N_{Re}$  เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดบริเวณของกระแสวนเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.21 เป็นลักษณะของตาข่ายที่ใช้กวนในถึงผสมสำหรับการสร้างฟลักซ์ ตาข่ายที่ค่าความทึบ (Solidity ratio, อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตาข่ายและขนาดของช่องตาข่าย,  $d/M$ ) สูงจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่าและทำให้เกิด  $\eta$  (Kolmogoroff microscale) ขนาดเล็กกว่าตาข่ายที่มี  $d/M$  ต่ำ (Liem, L. E., Smith, D. W. and Stanley, S. J., 1999) รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความขุ่นโดยใช้ใบพัดและตาข่ายใน Jar Test ปริมาตร 2 ลิตร พบว่าตาข่ายจะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่าใบพัดและมีค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฟลักซ์กว้างกว่าการกวนโดยใช้ใบพัด (Liem, L. E., Smith, D. W. and Stanley, S. J., 2000)

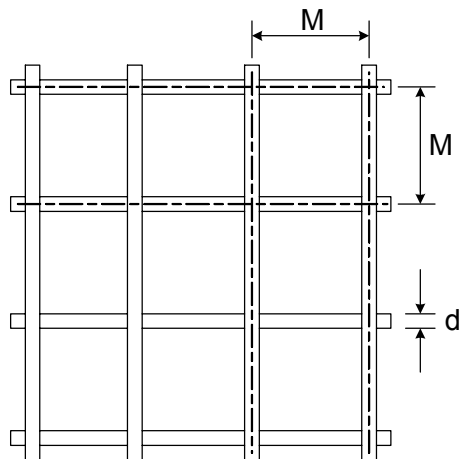
การกวนโดยใช้ใบพัดยังเป็นวิธีที่นิยมและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นการใช้ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้นร่วมกับตาข่ายจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วถึงถึงผสมมากขึ้นกว่าการกวนโดยใช้ใบพัดเพียงอย่างเดียว ซึ่งบริเวณใกล้ใบพัดอาจเกิดการแตกของฟลักซ์บ้างแต่เมื่อฟลักซ์เคลื่อนที่ไปในบริเวณขอบถึงผสมที่มีตาข่ายติดตั้งอยู่จะทำให้ฟลักซ์รวมตัวกันได้อีกครั้งและง่ายขึ้นเนื่องจากสภาวะความปั่นป่วนที่เหมาะสมที่เกิดจากตาข่าย การผสมสำหรับการสร้างฟลักซ์โดยใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้นร่วมกับตาข่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและเป็นไปได้สำหรับโรงงานผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน



รูปที่ 2.20 กระแสวนที่เกิดหลังแท่งกลม (ก)  $N_{RE}$  50-1,000 (ข)  $N_{RE}$  1,000-200,000

หมายเหตุ จาก *Solving problems in fluid mechanics*, Vol. 2 (136, 137), โดย Douglas, J.

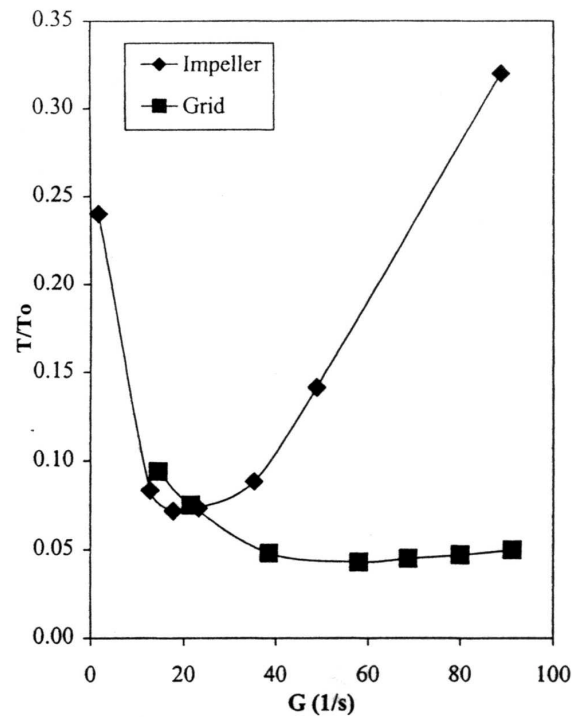
F. and Mathews, R. D., 1996, London: Longman group.



รูปที่ 2.21 ลักษณะตาข่ายที่ใช้ในการผสมสำหรับการสร้างฟลัก

หมายเหตุ จาก *Turbulent flows* (159), โดย Pope, S. B., 2000, Cambridge:

Cambridge University Press.



รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความขุ่นระหว่างใบพัดและตาข่ายใน Jar Test

หมายเหตุ จาก “Optimization study of flocculation mixing by means of grids”, โดย Liem et al., 2000, *Journal of Environmental Engineering*, 126 (2): 143.

การแก้ไขปัญหาการสร้างฟล็อกในโรงงานผลิตน้ำประปาที่มีอยู่ในปัจจุบันคือการก่อสร้างถังผสมให้มีขนาดใหญ่และใช้สารก่อก้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดเซยปัญหาการผสมที่มีประสิทธิภาพต่ำจึงยังไม่ใช่ทางออกที่ถูกต้องมากนักเพราะวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวไม่ได้มุ่งเข้าไปสู่การแก้ปัญหาการสร้างฟล็อกอย่างแท้จริง นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างภาระในการเดินระบบมากขึ้นซึ่งจะต้องใช้ทรัพยากรในการบำรุงรักษาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเลือกและให้ความสำคัญต่อประสิทธิภาพการผสมซึ่งจะเป็นคำตอบหรือทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมและเป็นไปได้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวภายใต้ขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีวิจัย

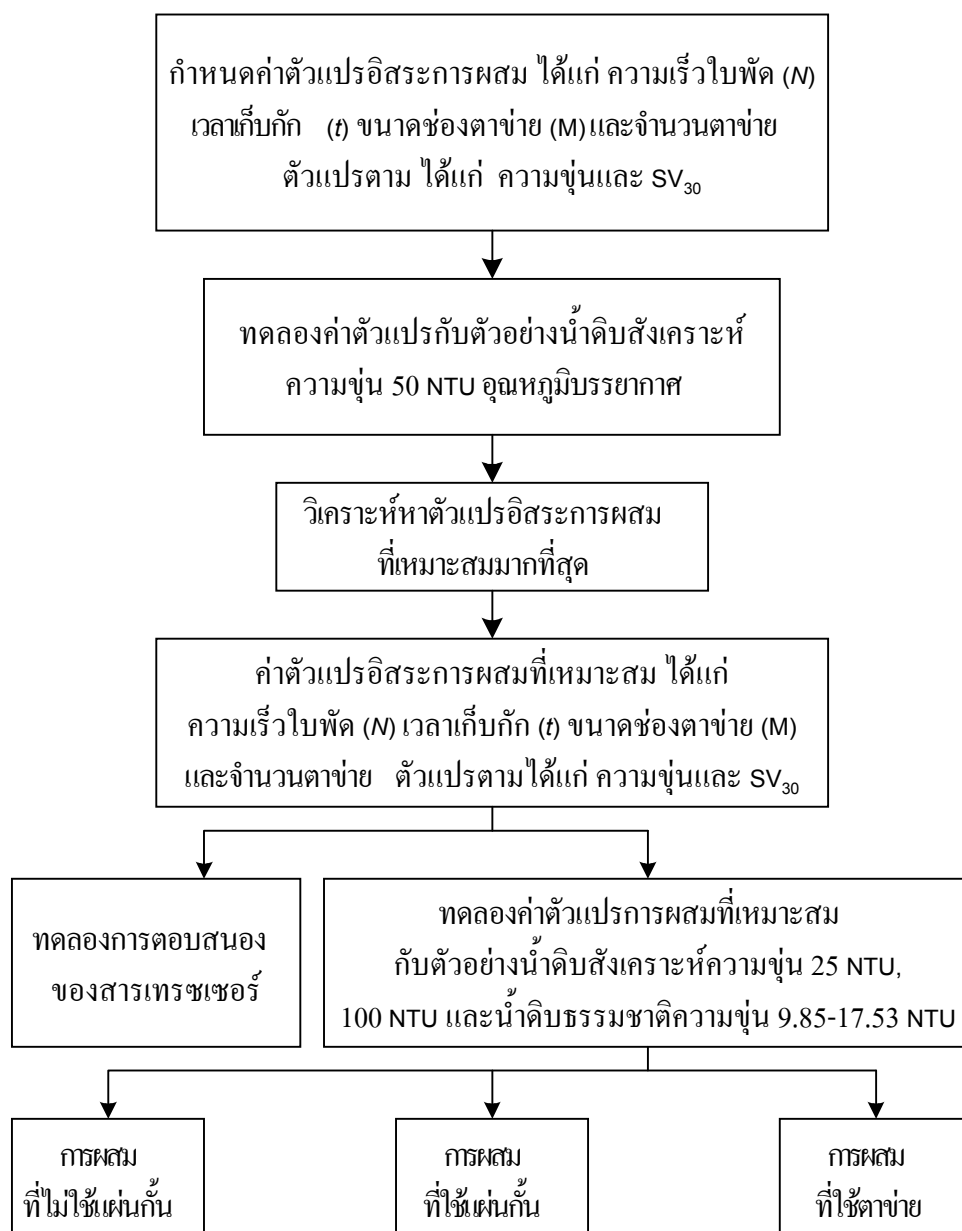
ในการศึกษาประสิทธิภาพการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกโดยใช้ตาข่ายร่วมกับใบพัดรัชทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น (Dual Rushton turbine) แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทดลองค่าตัวแปรการผสมเพื่อวิเคราะห์หาค่าตัวแปรการผสมที่เหมาะสมที่สุดและการทดลองค่าตัวแปรการผสมที่เหมาะสมกับน้ำตัวอย่างที่มีความข้นต่างกัน ขั้นตอนในการศึกษาแสดงในรูปที่ 3.1

##### 3.1.1 รูปแบบและอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองจะเป็นการศึกษาการผสมในลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 3.2) เพื่อให้เหมือนกับขบวนการผลิตน้ำประปาและสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง น้ำดิบที่เตรียมไว้จะถูกเติมสารส้ม ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) ขณะที่เกิดการกวนในถังผสมเร็วที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ติดตั้ง 4 แผ่นกั้น ปริมาตร 5 ลิตร และใช้ใบพัดรัชทอนเทอร์ไบน์ 1 ใบพัด เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. (รูปที่ 3.3) ความเร็วใบพัด 990 รอบต่อนาที ช่วงระยะเวลาเก็บกัก 15-60 วินาที ขึ้นกับอัตราการไหลและควบคุม pH ของถังผสมเร็วให้เท่ากับ 6.9 ตลอดระยะเวลาการผสมด้วยสารละลายปูนขาว ( $Ca(OH)_2$ )

ในส่วนการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกจะใช้ถังผสมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. ปริมาตร 100 ลิตร (รูปที่ 3.4) อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความสูงของน้ำ (T: Z) เท่ากับ 1:1 (รูปที่ 2.18) ระยะใบพัดล่างสุดสูงจากพื้นถึงเท่ากับ 0.25T ระยะห่างระหว่างใบพัดเท่ากับ 0.5T (Rutherford et al., 1996; Micale et al., 1999) เวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time,  $\theta$ ) 5, 10 และ 20 นาที โดยการปรับอัตราการไหล 20, 10 และ 5 ลิตรต่อนาที เพื่อให้ได้ระยะเวลาเก็บกักตามที่กำหนดไว้ ความเร็วใบพัด 15, 45, 75, 105 และ 135 รอบต่อนาที ใบพัดรัชทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น (Dual Rushton turbine) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D=T/4) 12.5 ซม. (Yianeskis et al., 1987) (รูปที่ 3.5) ในช่วงแรกจะทำการทดลองการผสมกับถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น (รูปที่ 3.7) ที่เวลา 5, 10 และ 20 นาที และเลือกเวลาเก็บกักที่ดีที่สุด 1 ค่าเพื่อนำมาทดลองการผสมกับถังผสมที่ใช้ตาข่าย โดยในแต่ละการผสมและความเร็วใบพัดจะเปลี่ยนแปลงจำนวนของตาข่าย 2, 4 และ 6 แผ่น (รูปที่ 3.5) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตาข่าย (d) 0.5 ซม. ขนาดช่องตาข่าย (M) 0.90, 1.65, 3.30 และ 5.50

ชม. (วัดจากแนวกึ่งกลางของแท่งตาข่าย) ค่าความทึบ (อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตาข่าย (d) และขนาดช่องตาข่าย (M),  $d/M$ ) 0.556, 0.303, 0.152 และ 0.091 ตามลำดับ แผ่นตาข่ายมีขนาด 17x54 ตร.ชม. (รูปที่ 3.6)

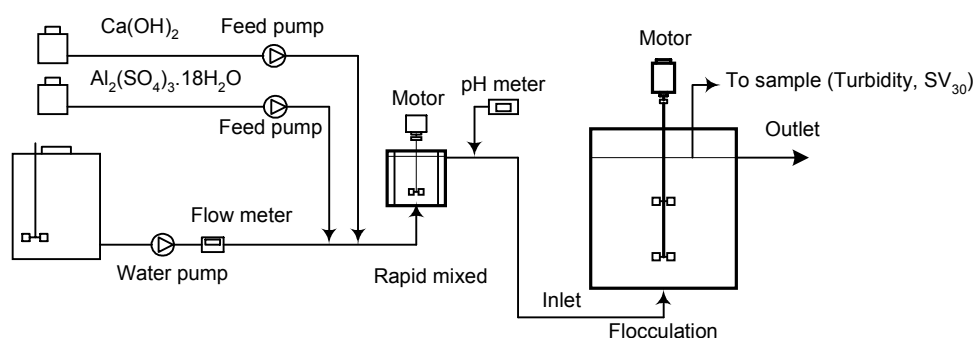


รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการทดลอง

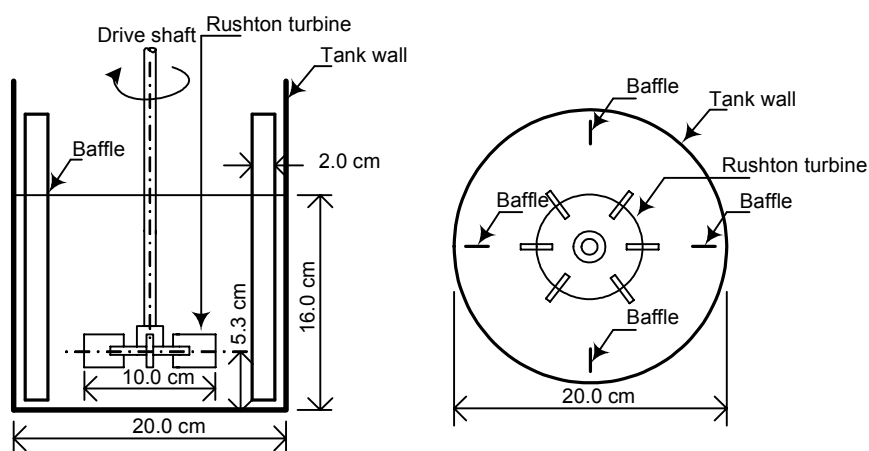
ที่สภาวะการทดลองหนึ่งๆจะเก็บตัวอย่างจากถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกเพื่อวัดค่าความขุ่นตกค้าง (Residual turbidity) และปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) โดยปล่อยทิ้ง

ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 และ 30 นาที ตามลำดับ ในแต่ละการทดลองจะเก็บตัวอย่างความขุ่นและ  $SV_{30}$  อย่างละ 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 เมื่อน้ำไหลผ่านถังผสม สำหรับการสร้างฟล็อกเป็นเวลา 2, 4 และ 6 เท่าของเวลาที่ทำการทดลอง โดยเริ่มนับเวลาหลังจากที่น้ำล้นออกจากถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกแล้ว

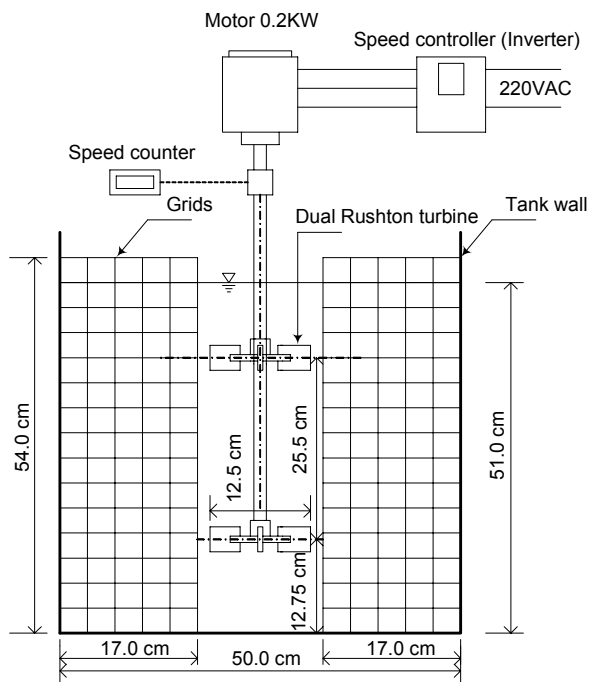
หลังจากการทดลองในช่วงแรกแล้วเสร็จจะเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการผสมในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย นำค่าตัวแปรที่ได้ไปทดลองกับตัวอย่างน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ตัวอย่างละ 5 การทดลอง เก็บตัวอย่างในลักษณะเดียวกันกับการทดลองในช่วงแรก พร้อมกันนี้ทำการทดลองวัดการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ของค่าตัวแปรการผสมในถังผสมที่ใช้ตาข่ายเปรียบเทียบกับ การผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น โดยใช้ความเร็วใบพัดที่เหมาะสมที่ได้จากการผสมที่ใช้ตาข่าย



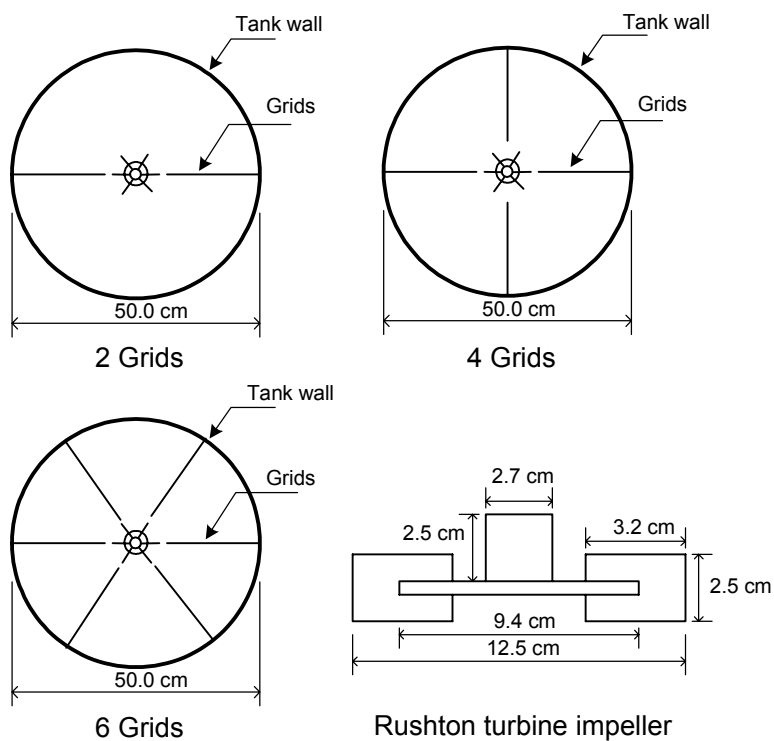
รูปที่ 3.2 รูปแบบการทดลองการผสมแบบไหลต่อเนื่อง



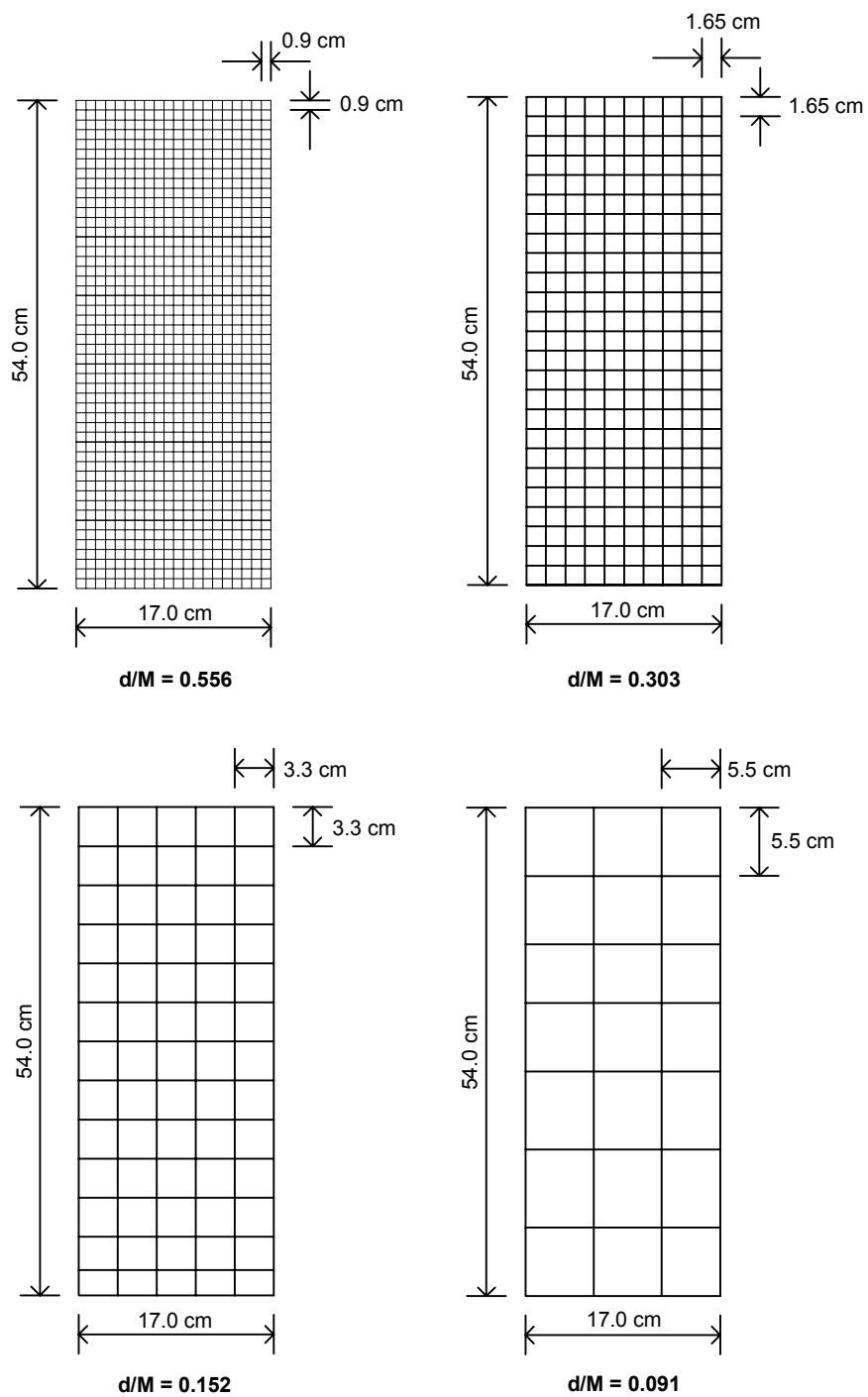
รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดถังผสมเร็วที่มี 4 แผ่นกั้น



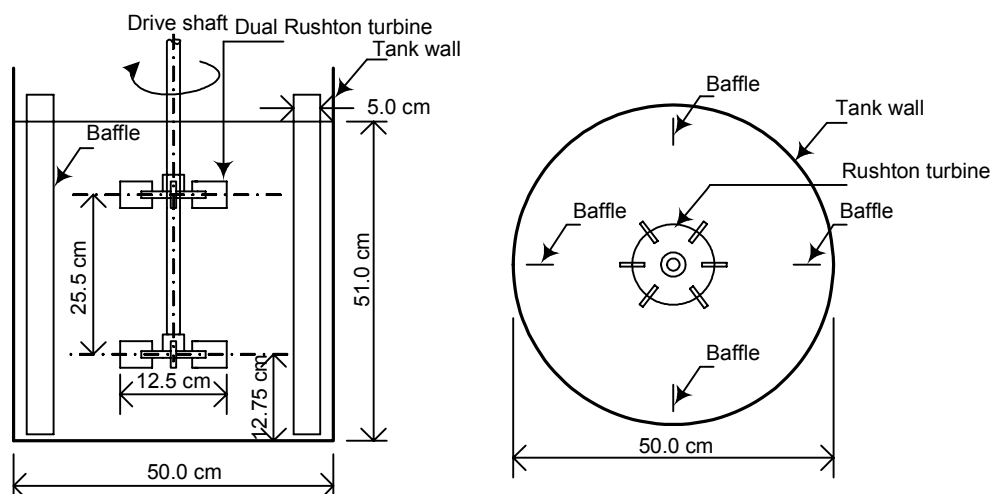
รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดถึงผสมสำหรับการสร้างฟล็อก



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้งตาข่ายภายในถังผสมและใบพัดรัชทอนเทอร์ไบน์



รูปที่ 3.6 ขนาดแผ่นตาข่ายที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.7 ถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่มี 4 แผ่นกั้น

### 3.1.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการทดลอง

น้ำดิบที่ใช้ในการทดลองได้แก่ น้ำดิบธรรมชาติและน้ำดิบสังเคราะห์ น้ำดิบธรรมชาติที่นำมาจากบ่อเก็บน้ำธรรมชาติก่อนทำการทดลองจะพักน้ำดิบในถังบรรจุน้ำเพื่อให้ตะกอนตกตะกอนอย่างน้อย 1 ชม. น้ำดิบสังเคราะห์เตรียมโดยการละลายผงดินเหนียวในน้ำประปาแล้วกวนด้วยความเร็ว 990 รอบต่อนาที ระยะเวลาเก็บกัก 10 นาที และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นดึงน้ำที่อยู่เหนือชั้นตะกอนมาเจือจางด้วยน้ำประปาจนได้ความขุ่นที่กำหนดไว้ในการทดลอง

### 3.1.3 ทดลองหาค่าความเข้มข้นของสารส้มสำหรับการผสม

เพื่อทดสอบหาปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) สำหรับน้ำตัวอย่างความขุ่น 50 NTU จะทำการทดลองหาโดยวิธี Jar test ปริมาณน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร โดยใช้ความเร็วใบพัดสำหรับผสมเร็ว 300 รอบต่อนาที ระยะเวลา 1 นาที และความเร็วใบพัดสำหรับการผสมช้า 15 รอบต่อนาที ระยะเวลา 20 นาที และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นระยะเวลา 30 นาที จึงเก็บตัวอย่างน้ำไปวัดความขุ่น สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารส้มกับค่าความขุ่นตกค้างและเลือกค่าความเข้มข้นของสารส้มที่ทำให้ค่าความขุ่นตกค้างน้อยที่สุดและใช้ค่าความเข้มข้นนี้สำหรับการทดลองการผสม ทำการทดลองหาความเข้มข้นสารส้มในลักษณะเดียวกันกับน้ำตัวอย่างที่มีความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU

### 3.1.4 ทดลองหาค่าตัวแปรการผสม

ในการทดลองในแต่ละเวลาเก็บกักจะกำหนดเวลาเริ่มต้นเมื่อน้ำตัวอย่างสั้นออกจากถังผสม สำหรับการสร้างฟล็อกแล้วและจะปล่อยให้ผสมอย่างต่อเนื่องโดยจะเก็บตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 เท่าของเวลาเก็บกักที่ทำการทดลองไปวัดค่าความขุ่นและค่า  $SV_{30}$  การทดลองจะกำหนดตัวแปรในการผสม ดังนี้

#### 3.1.4.1 ตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่ายทั้ง 3 ลักษณะ ได้แก่ ความเร็วใบพัด (Impeller speed,  $N$ ) 15-135 รอบต่อนาที (ค่าความเร็วแรงแผ่นกั้นที่อยู่ในช่วง 7-191 ต่อกวนน้ำที่คำนวณจากการที่ 2.21 และ 2.24 โดยใช้ค่าคงที่ใบพัด ( $K_p$ ) เท่ากับ 4.2 (Yianeskis et al., 1987) เวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time,  $t$ ) 5-20 นาที (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2538) จำนวนตาข่าย 2-6 แผ่น ค่าความทึบ (Solidity ratio,  $d/M$ ) 0.091-0.556 (Liem et al., 2000)

#### 3.1.4.2 ตัวแปรตาม

ตัวแปรตามเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระซึ่งได้แก่ ค่าความขุ่นและ  $SV_{30}$

### 3.1.5 ทดลองการตอบสนองของสารเทรซเซอร์

การทดลองการตอบสนองของสารเทรซเซอร์จะทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายเปรียบเทียบกับถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ใช้ความเร็วใบพัดที่มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดที่ได้จากการทดลองการผสมในถังผสมที่ใช้ตาข่าย ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำในถังผสมหลังจากที่ฉีดสารเทรซเซอร์ (2.0N NaOH) ลงไปในขณะที่กำลังกวนน้ำอยู่ กำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ในการวัด 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่บริเวณผิวน้ำและบริเวณก้นขอบถังผสมในทิศทางตรงกันข้ามกับตำแหน่งผิวน้ำ กวนน้ำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าความนำไฟฟ้าที่ทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าคงที่ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงที่ของค่าความนำไฟฟ้าของถังผสมแต่ละลักษณะ รูปแบบอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8

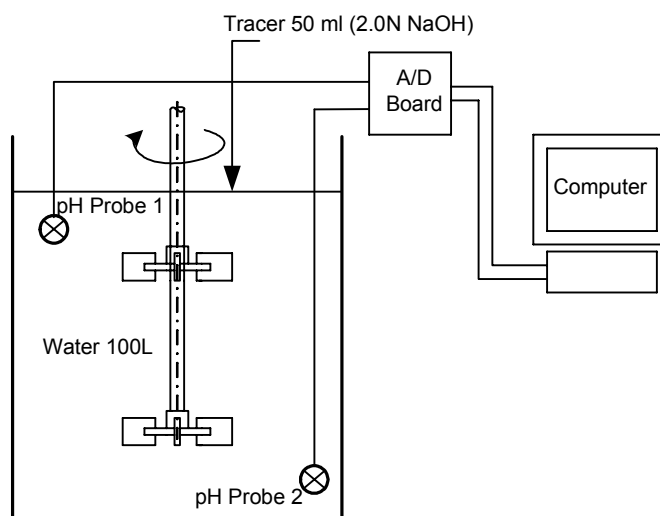
## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

### 3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบ มีดังนี้

3.2.1.1 ถังบรรจุน้ำดิบปริมาตร 2000 ลิตรและเครื่องสูบน้ำ 180 วัตต์

3.2.1.2 ใบพัดและมอเตอร์ 180 วัตต์และถังผสมเร็วปริมาตร 5 ลิตร



รูปที่ 3.8 รูปแบบอุปกรณ์การทดลองการตอบสนองของสารเทรเซอร์

3.2.1.3 ใบพัดและมอเตอร์ 200 วัตต์และถังสร้างฟล็อกปริมาตร 100 ลิตร

3.2.1.4 เครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์

3.2.1.5 เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์

3.2.1.6 เครื่องปรับอัตราการไหล

3.2.1.7 ถังเตรียมน้ำดิบปริมาตร 200 ลิตรและมอเตอร์กวน 180 วัตต์

3.2.1.8 แผ่นตาข่ายขนาด 17x54 ซม. ค่าความถี่ 0.091-0.556

3.2.1.9 เครื่องวัดความขุ่น

3.2.1.10 ชุด Jar test

3.2.1.11 เครื่องวัด pH

3.2.1.12 ชุดเครื่องแก้ว

### 3.2.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

3.2.2.1 สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )

3.2.2.2 สารละลายด่าง ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

3.2.2.3 NaOH

3.2.2.4 ผงดินเหนียว



### 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับประสิทธิภาพในการลดความขุ่นและค่า  $SV_{30}$  แสดงในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น

เวลาเก็บกัก (นาที)	จำนวนแผ่น กั้น (แผ่น)	ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					จำนวนตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	
5-20	0, 4	x	x	x	x	x	ความขุ่น = 45 $SV_{30} = 45$
		x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	

หมายเหตุ x แสดงข้อมูลในแต่ละสภาวะการทดลอง (ความขุ่น 3 ตัวอย่างและ  $SV_{30}$  3 ตัวอย่าง)

ตารางที่ 3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมที่ใช้ตาข่าย

จำนวนตา ข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (d/M)	ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					จำนวนตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	
2, 4, 6	0.091-0.556	x	x	x	x	x	ความขุ่น = 45 $SV_{30} = 45$
		x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	
		x	x	x	x	x	

หมายเหตุ x แสดงข้อมูลในแต่ละสภาวะการทดลอง (ความขุ่น 3 ตัวอย่างและ  $SV_{30}$  3 ตัวอย่าง )

เมื่อได้ข้อมูลข้างต้นแล้วจะเลือกค่าตัวแปรที่ทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นดีที่สุดสำหรับถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นและถังผสมที่ใช้ตาข่ายแล้วนำมากำหนดสภาวะการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกันตัวอย่างละ 5 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลการผสมสำหรับน้ำตัวอย่างที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกัน

ความขุ่นน้ำดิบ (NTU)	ลักษณะการผสม		
	ไม่ใช่แผ่นกั้น	ใช้แผ่นกั้น	ใช้ตาข่าย
25	x	x	x
100	x	x	x
น้ำดิบธรรมชาติ	x	x	x

หมายเหตุ x แสดงข้อมูลในแต่ละสภาวะการทดลอง (ความขุ่น 15 ตัวอย่าง และ  $SV_{30}$  15 ตัวอย่าง)

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.1-3.2 จะนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับความเร็วแกรเดียนท์ (การคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ คูภาคผนวก ง) ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับขนาดของช่องตาข่าย ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับจำนวนของตาข่าย ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับเวลาเก็บกัก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 3.3 จะนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับความขุ่นเริ่มต้นในน้ำดิบและใช้การเปรียบเทียบทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของถังผสมที่ไม่ใช่แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การผสมในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น

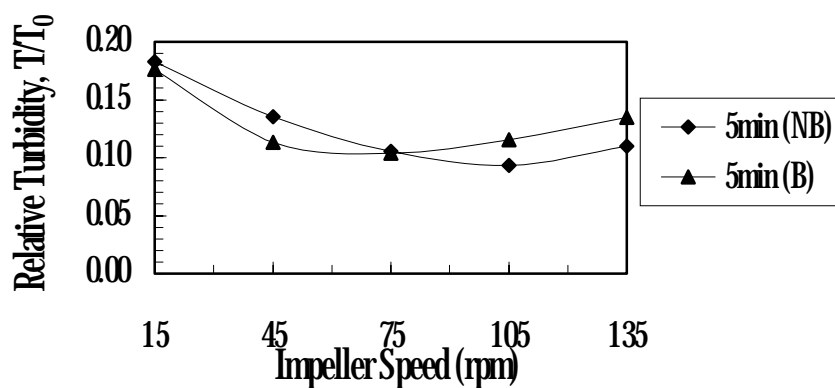
##### 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับความเร็วใบพัด

ผลการทดลองการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น (No Baffle, NB) และใช้แผ่นกั้น (Baffles, B) ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ความเร็วใบพัด 15-135 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 (ความต้องการปริมาณสารส้มสำหรับน้ำดิบตั้งเคราะห์ความขุ่น 50 NTU เท่ากับ 80 มก./ล และ  $T/T_0$  เป็นอัตราส่วนระหว่างความขุ่นตกค้างและความขุ่นเริ่มต้น)

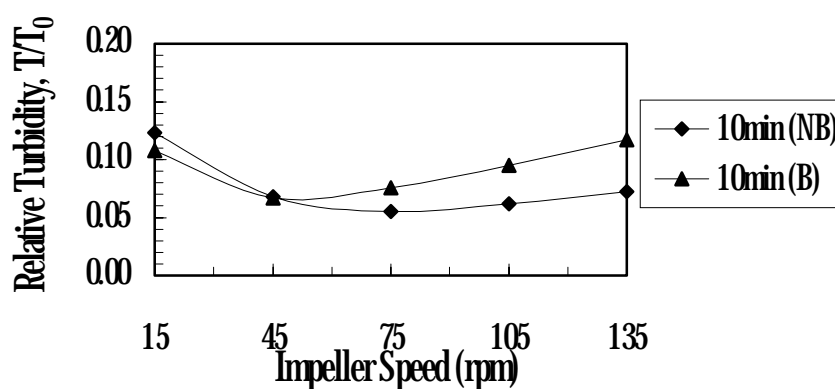
ปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบกระบวนการสร้างฟล็อกในโรงงานผลิตน้ำประปา ได้แก่ เวลาเก็บกักและความเร็วแรงแเดียนท์ การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ที่เวลาเก็บกัก 5-20 นาที พบว่าที่เวลาเก็บกัก 10 นาที มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่าเวลาเก็บกักอื่นๆ (รูปที่ 4.2) ถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดร้อยละ 94.5 และ 93.5 ที่ความเร็วใบพัด 80 และ 52 รอบต่อนาที ตามลำดับ การใช้แผ่นกั้นในถังผสมจะช่วยให้ถังผสมมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นได้เพิ่มมากขึ้นที่ความเร็วใบพัดต่ำๆ เพราะที่ความเร็วใบพัดต่ำๆ บริเวณน้ำนิ่งจะมีปริมาณมากกว่าบริเวณที่มีการผสม การใช้แผ่นกั้นจะเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์ให้มากขึ้น ที่เวลาเก็บกัก 20 นาที จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดระหว่างถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นที่ความเร็วใบพัด 84 รอบต่อนาที และถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น 50 รอบต่อนาที ซึ่งประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงเกือบเท่ากับถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นแต่ใช้ความเร็วใบพัดน้อยกว่า นั่นหมายถึงสามารถลดการใช้พลังงานสำหรับการกวนได้ร้อยละ 78.9 (คำนวณโดยใช้สมการที่ 2-21 คูณภาคผนวก ง)

แม้ว่าการผสมที่ใช้แผ่นกั้นจะเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนของน้ำก็จริงแต่ก็จะเป็นการเพิ่มแรงเฉือนต่อฟล็อกที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกันเมื่อความเร็วใบพัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลของน้ำมีทิศทางไม่แน่นอน แต่ในขณะที่ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นการเพิ่มความเร็วใบพัดทำให้เกิดกระแสหมุนวน (Vortex) ลักษณะการไหลของกระแสน้ำภายในถังผสมจะไหลไปในทิศทางเดียวกันมากกว่า ดังนั้นการเกิดแรงเฉือนที่มีต่อฟล็อกจึงเกิดขึ้นน้อยกว่าและเป็นเหตุผลหนึ่งที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นสูงกว่าการใช้แผ่นกั้นเมื่อความเร็วใบพัดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อ

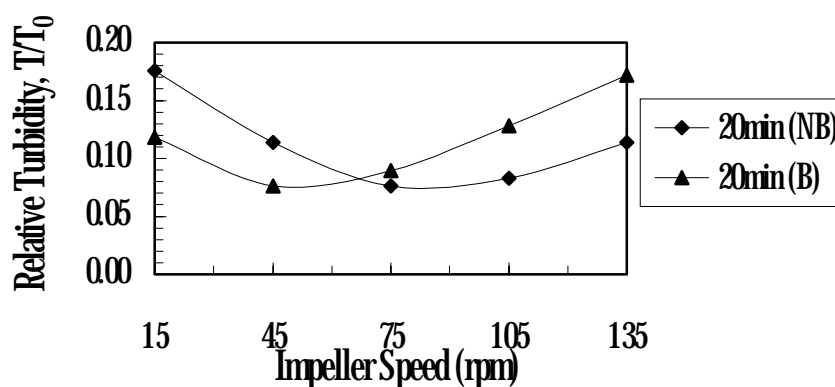
เวลาเก็บกักเพิ่มขึ้นเป็น 20 นาที ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกลับลดลง การผสมนานเกินไปทำให้อัตราการแตกของฟล็อกเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 5 นาที



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 10 นาที



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่เวลาเก็บกัก 20 นาที

#### 4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับเวลาเก็บกัก

เวลาเก็บกักเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างฟล็อก ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักในถังผสมจาก 5 นาที เป็น 10 นาที และลดลงเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักเป็น 20 นาที ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น (รูปที่ 4.4-4.5) เวลาเก็บกักมีอิทธิพลต่อช่วงค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม ในการศึกษานี้กำหนดให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม (Optimum velocity gradient values,  $\bar{G}$ ) คือค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดร้อยละ 0.5 (ดูภาคผนวก ง และ จ) กล่าวคือการเพิ่มเวลาในการผสมให้มากขึ้นเกินกว่าเวลาเก็บกักที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ช่วง  $\bar{G}$  สำหรับการสร้างฟล็อกแคบลงด้วย ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ช่วง  $\bar{G}$  และความกว้างของช่วงเท่ากับ 100-151 ต่อวินาที (51), 48-120 ต่อวินาที (72) และ 71-122 ต่อวินาที (51) ตามลำดับ ส่วนในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ช่วง  $\bar{G}$  และความกว้างของช่วงเท่ากับ 44-104 ต่อวินาที (60), 31-64 ต่อวินาที (33) และ 30-61 ต่อวินาที (31) ตามลำดับ

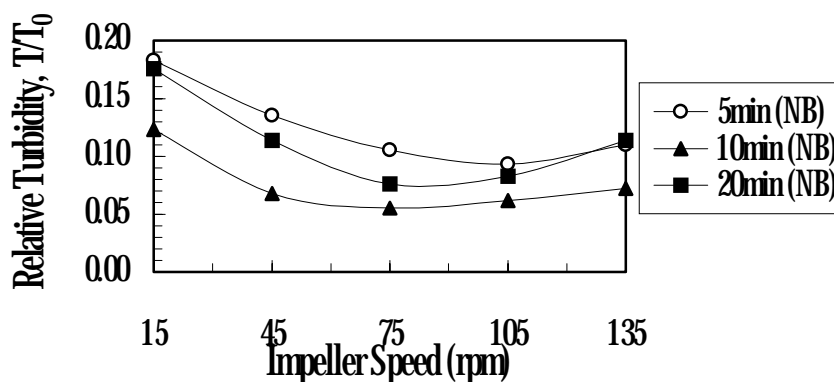
จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาเก็บกักให้มากขึ้นไม่ได้เป็นการช่วยให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเพิ่มขึ้นแต่กลับทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นลดลง แม้ว่าจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นก็ตาม ในทางกลับกันก็เป็นการเพิ่มโอกาสให้เกิดการแตกของฟล็อกเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อเกิดการแตกของฟล็อกแล้วโอกาสที่จะรวมตัวกันอีกครั้งจะมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นการเลือกเวลาเก็บกักจึงไม่ควรให้นานเกินไป นอกจากจะส่งผลเสียทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นลดลงแล้วยังเป็นการลงทุนที่ไม่ประหยัดทั้งการก่อสร้างและดำเนินการระบบอีกด้วย อีกทั้งยังทำให้เกิดความไม่ยืดหยุ่นในการเดินระบบเนื่องจาก  $\bar{G}$  แคบลงนั่นเอง

#### 4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กับความเร็วใบพัด

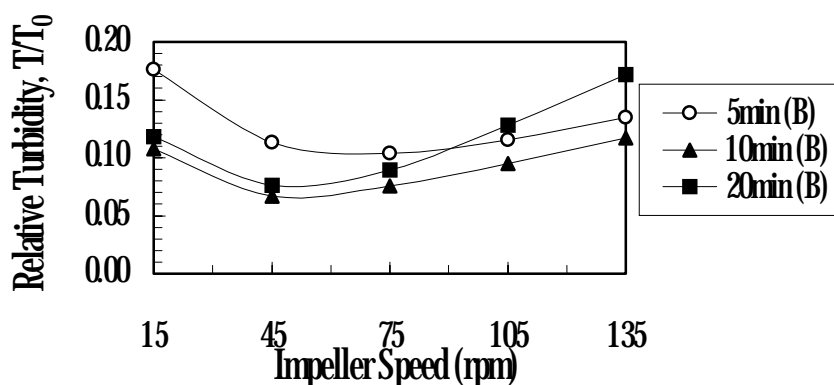
ในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ค่าที่วัดได้มีลักษณะแนวโน้มเหมือนกันกับประสิทธิภาพในการลดความขุ่น (รูปที่ 4.6-4.7) นั่นคือที่เวลาเก็บกัก 10 นาที จะมีปริมาตรตะกอนมากที่สุด 39.27 มล./ล ที่ความเร็วใบพัด 45 รอบต่อนาที แต่ที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ปริมาตรตะกอนที่วัดได้ทุกความเร็วใบพัดจะมากกว่าเวลาเก็บกัก 20 นาที ทั้งในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มเวลาเก็บกักทำให้ความหนาแน่นของตะกอนเพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ปริมาตรของตะกอนลดลง ตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วใบพัด 45 รอบต่อนาที ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น เวลาเก็บกัก 5 นาที และถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น เวลาเก็บกัก 20 นาที มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเท่ากันแต่  $SV_{30}$  ต่างกันคือ 34.5 มล./ล และ 28.56 มล./ล ตามลำดับ และที่ความเร็วใบพัด 75 รอบต่อนาที ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นเวลา

เก็บกัก 10 นาที และถึงผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นเวลาเก็บกัก 20 นาที มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเท่ากันแต่  $SV_{30}$  ต่างกันคือ 35.70 มล./ล และ 28.56 มล./ล ตามลำดับ

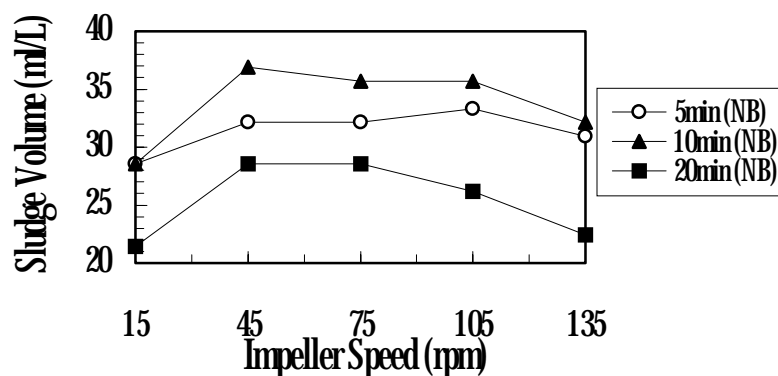
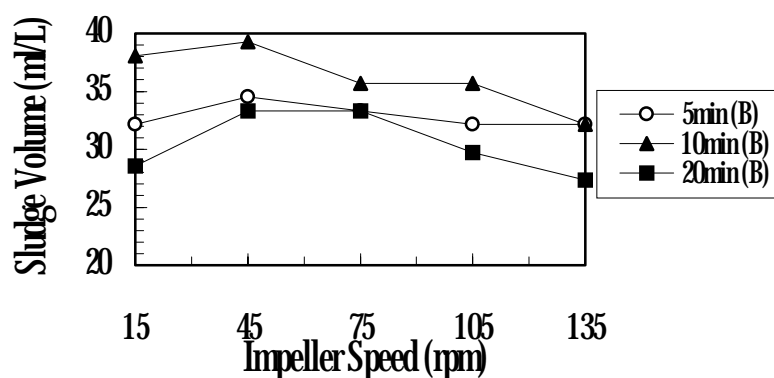
ค่า  $SV_{30}$  เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพการสร้างฟล็อกในขบวนการผลิตน้ำประปา การใช้ค่า  $SV_{30}$  ประเมินประสิทธิภาพของการสร้างฟล็อกมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ เครื่องมือวัดและเวลาเก็บกัก ความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้เดิมต่างกันปริมาตรของตะกอนก็แตกต่างกันด้วยแม้ความขุ่นน้ำดิบจะเท่ากันก็ตาม การสร้างฟล็อกที่ดีควรทำให้ตะกอนมีความหนาแน่นสูงเพื่อความสะดวกในการรีดน้ำออกจากตะกอนซึ่งต้องเพิ่มเวลาเก็บกักมากขึ้นแต่ก็มีข้อเสียคือประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะลดลงและในความเป็นจริงแล้วการเปรียบเทียบ  $SV_{30}$  ควรเปรียบเทียบที่เวลาเก็บกักเดียวกันเนื่องจากเวลาเก็บกักต่างกันความหนาแน่นของตะกอนก็ต่างกันด้วยหรือแม้แต่ความเร็วใบพัดที่ต่างกันก็มีผลเช่นเดียวกัน การใช้ค่า  $SV_{30}$  ในการประเมินประสิทธิภาพในการลดความขุ่นควรต้องระวังเป็นพิเศษเนื่องด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้อาจจะใช้ประเมินประสิทธิภาพกระบวนการได้ในเบื้องต้นเท่านั้น



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่ไม่ใช้แผ่นกั้น



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นที่ใช้แผ่นกั้น

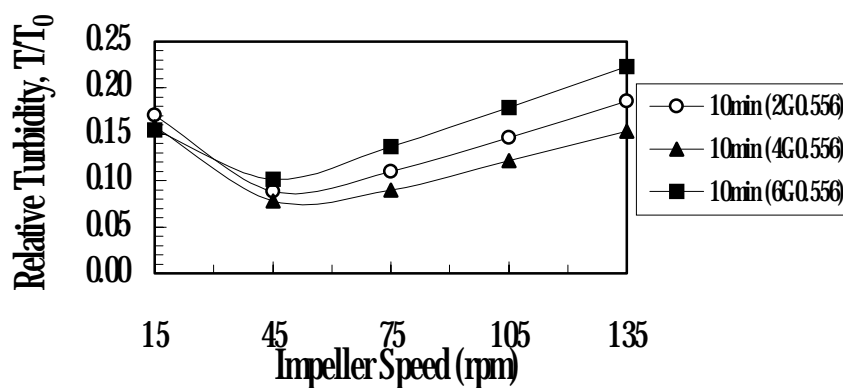
รูปที่ 4.6 SV<sub>30</sub> ที่ไม่ใช่แผ่นกั้นรูปที่ 4.7 SV<sub>30</sub> ที่ใช้แผ่นกั้น

## 4.2 การผสมในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ใช้ตาข่าย

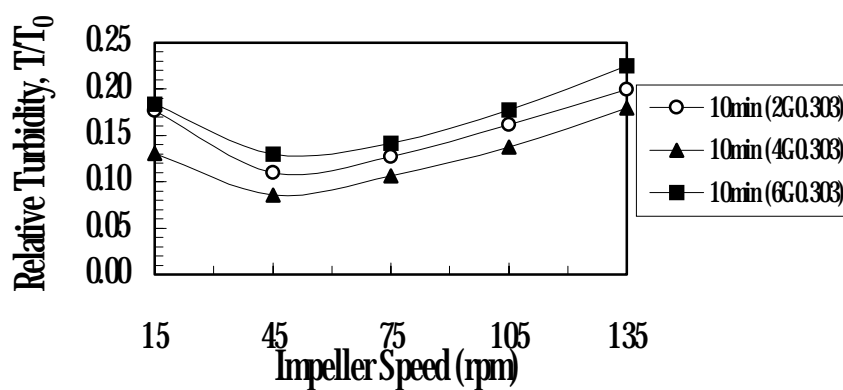
### 4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับความเร็วยกพัด

การทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายโดยกำหนดเวลาเก็บกักที่ 10 นาที เป็นเวลาเก็บกักที่เลือกมาจากการทดลองในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ตาข่ายมี 4 ค่าความทึบ (อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งตาข่าย (d) และขนาดช่องตาข่าย (M), d/M) ได้แก่ 0.091, 0.152, 0.303 และ 0.556 จำนวน 2, 4 และ 6 แผ่น ช่วงความเร็วยกพัดเหมือนกับการทดลองในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น (15-135 รอบต่อนาที) เมื่อพิจารณาจำนวนตาข่ายกับประสิทธิภาพในการลดความขุ่น พบว่า ตาข่ายจำนวน 4 แผ่น จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 2 และ 6 แผ่น ทุกๆ ค่าความทึบ (รูปที่ 4.8-4.11) โดยมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นร้อยละ 94.3, 92.3, 91.5 และ 92.6 สำหรับตาข่ายที่มีค่าความทึบ 0.091, 0.152, 0.303 และ 0.556 ตามลำดับ ส่วนตาข่ายที่มีค่าความทึบ 0.556 และ 0.303 ซึ่งเป็นตาข่ายที่มีขนาดช่องตาข่ายเล็ก จำนวนตาข่าย 6 แผ่นจะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะน้อยกว่า 2 แผ่น เนื่องจากตาข่ายมีค่าความทึบสูงทำให้การไหลวนของกระแสน้ำน้อยลงและเกิดจุดอับในถังผสม

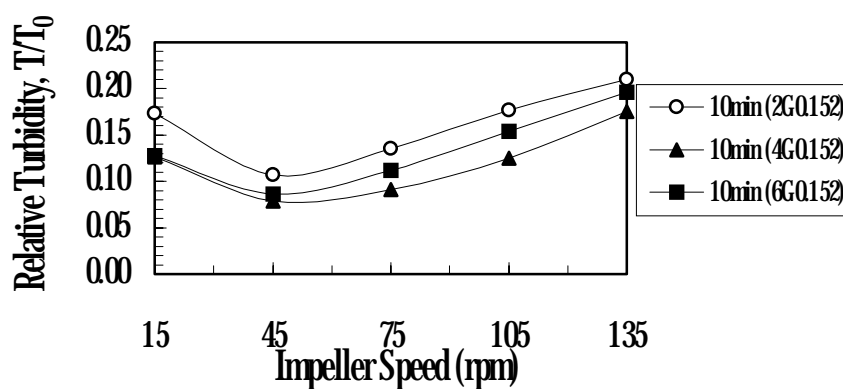
มากขึ้นกว่าตาข่ายจำนวน 2 และ 4 แผ่น แต่เมื่อค่าความถี่บ้น้อยลงจำนวนตาข่าย 6 แผ่น ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะมากกว่า 2 แผ่น



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความถี่ 0.556

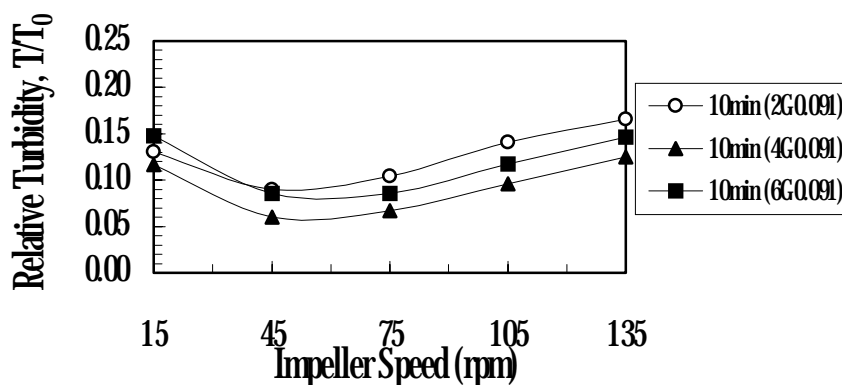


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความถี่ 0.303



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความถี่ 0.152

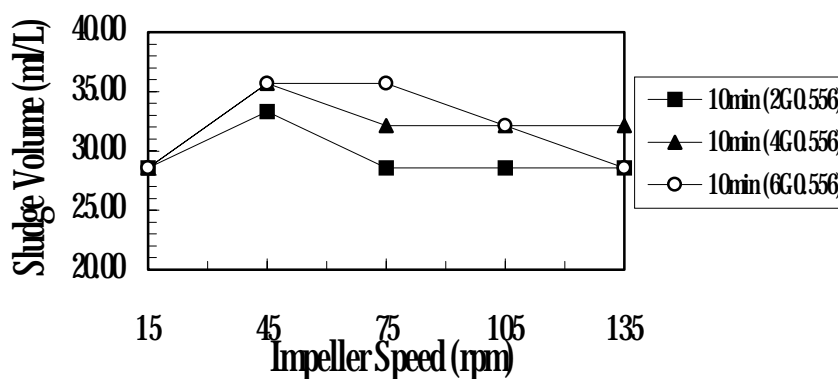




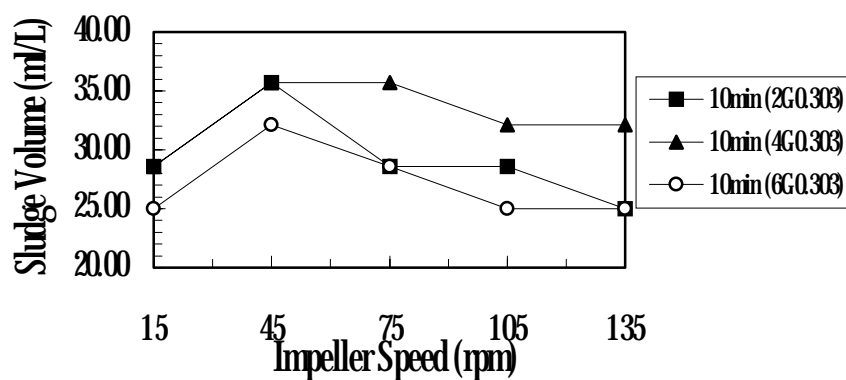
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091

#### 4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กับความเร็วใบพัด

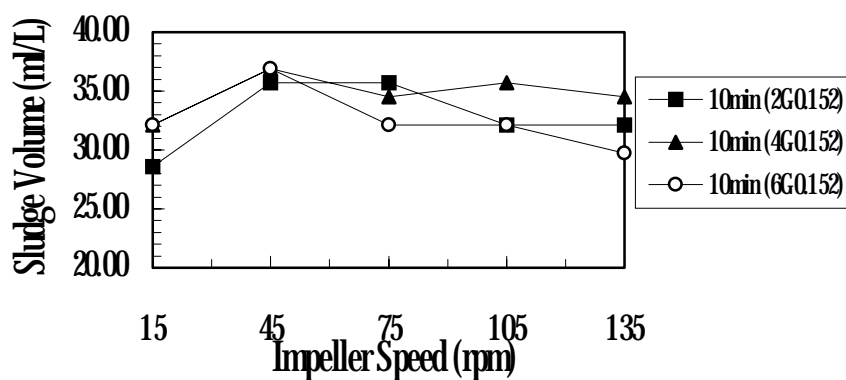
ปริมาตรตะกอนหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) มีลักษณะแนวโน้มเหมือนกันกับการผสมในการผสมถึงผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น (รูปที่ 4.12-4.15) การผสมที่ใช้ตาข่ายจะมี  $SV_{30}$  มากที่สุด 39.27 มล./ล เกิดจากตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (10min (4G0.091)) ที่ความเร็วใบพัด 45 รอบต่อนาที ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการลดความขุ่นที่วัดได้เช่นเดียวกับการผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ฟล็อกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ปริมาตรโดยรวมจะต่ำกว่าการผสมในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ตาข่ายจำนวน 4 แผ่น จะมี  $SV_{30}$  สูงกว่าตาข่ายจำนวน 2 และ 6 แผ่น ทุกๆ ค่าความทึบเช่นเดียวกัน



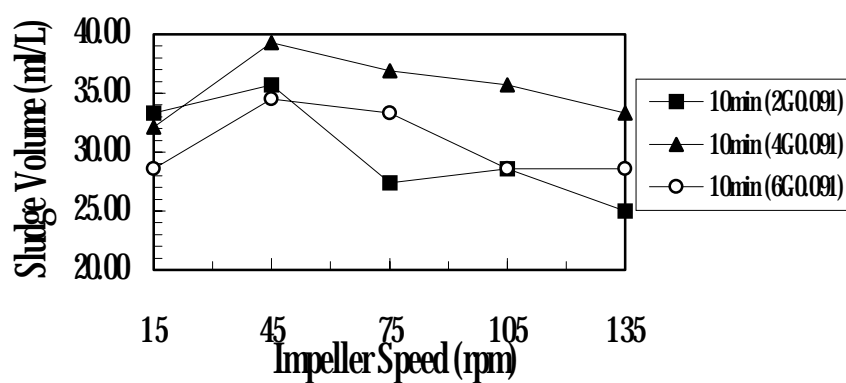
รูปที่ 4.12  $SV_{30}$  ของตาข่ายค่าความทึบ 0.556



รูปที่ 4.13  $SV_{30}$  ของตาข่ายค่าความทึบ 0.303



รูปที่ 4.14  $SV_{30}$  ของตาข่ายค่าความทึบ 0.152



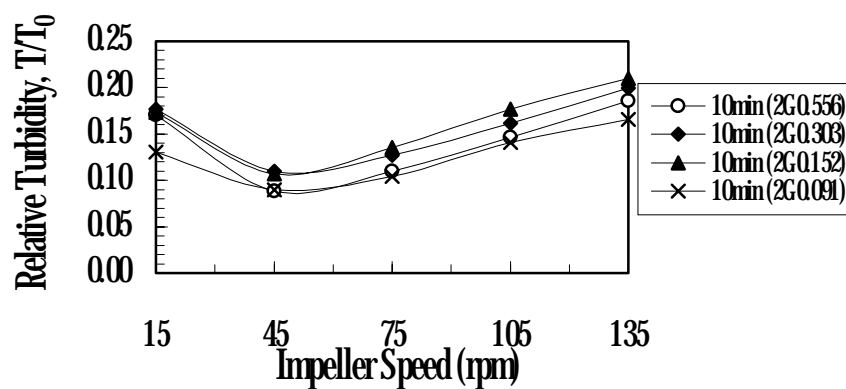
รูปที่ 4.15  $SV_{30}$  ของตาข่ายค่าความทึบ 0.091

#### 4.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับจำนวนตาข่าย

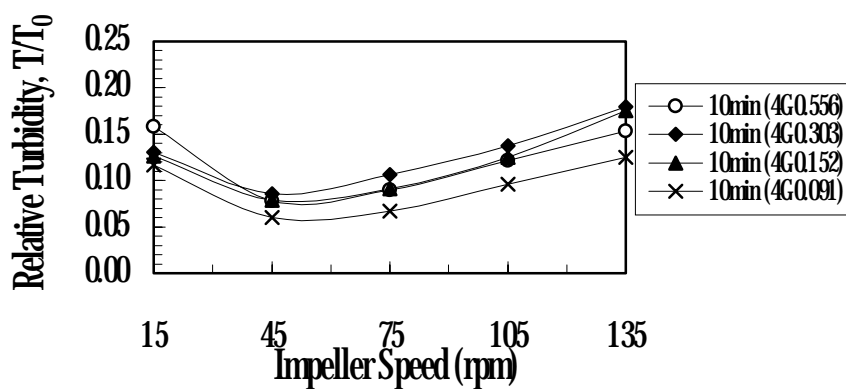
ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกับจำนวนตาข่าย พบว่าในถังผสมที่มีจำนวนตาข่าย 4 แผ่น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความขุ่นมากกว่าร้อยละ 90 ทุกๆ ขนาดค่าความทึบ (รูปที่ 4.16-4.18) ในขณะที่ 2 และ 6 แผ่น มีเพียงตาข่ายอย่างละ 2 ค่าความทึบเท่านั้นที่มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบจำนวนตาข่าย 4 แผ่น พบว่าตาข่ายค่าความทึบ 0.091 (10min (4G0.091)) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดร้อยละ 94.3 ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที (รูปที่ 4.17) ช่วงค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ที่เหมาะสม ( $\bar{G}$ ) 34-69 ต่อวินาที ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดร้อยละ 94.5 แต่ใช้ความเร็วใบพัดสูงถึง 80 รอบต่อนาที (รูปที่ 4.2)

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้ตาข่ายในถังผสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นได้ดีขึ้นจริงโดยมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นได้เกือบเทียบเท่าในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นแต่ใช้พลังงานน้อยกว่าร้อยละ 69.3 เนื่องจากรูปแบบการทดลองในครั้งนี้เป็นแบบไหลต่อเนื่องและใช้ใบพัดเป็นอุปกรณ์ในการกวนน้ำจึงให้ผลการทดลองที่ต่างจากผลการทดลองของ Liem et al. (2000) ที่อ้างถึงในงานวิจัยครั้งนี้ที่กำหนดเวลาเก็บกักไว้ที่ 20 นาที การผสมเป็นแบบกะ (Batch) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความทึบ (d/M) และจำนวนแผ่นตาข่าย ช่วงค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ที่เหมาะสม ( $\bar{G}$ ) สำหรับการสร้างฟล็อกของตาข่ายกว้างกว่าการผสมที่ใช้ใบพัด (รูปที่ 2.22) แต่ผลการทดลองในครั้งนี้กลับพบว่า ตาข่ายที่มีค่าความทึบต่ำจะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่าตาข่ายที่มีค่าความทึบสูง จำนวนตาข่าย 4 แผ่น จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 2 และ 6 แผ่น โดยมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดมากกว่าร้อยละ 90 ทุกค่าความทึบ ในขณะที่ตาข่ายจำนวน 2 และ 6 แผ่น มีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 90 เพียงอย่างละ 2 ค่าความทึบเท่านั้น ช่วง  $\bar{G}$  ก็แคบกว่าการผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น (รูปที่ 4.19)

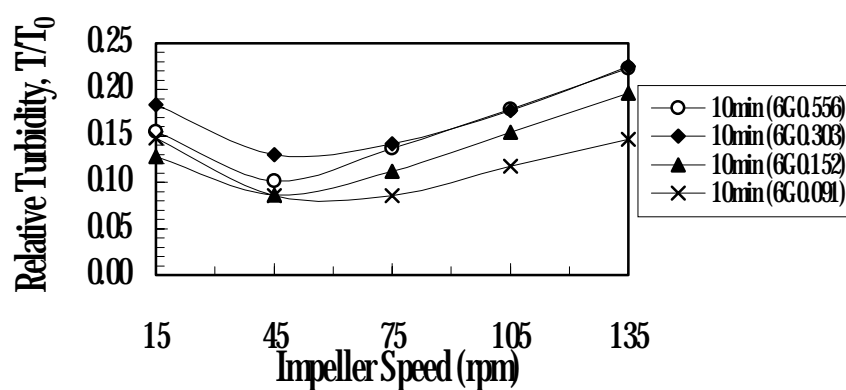
สาเหตุที่ทำให้ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (10min (4G0.091)) มีประสิทธิภาพสูงกว่าขนาดอื่นๆ เนื่องมาจากมีขนาดช่องตาข่ายที่กว้าง (5.50 ซม.) ทำให้การไหลของน้ำภายในถังเกิดการผสมที่ดีขึ้น ขณะเดียวกันก็ไม่ได้สร้างสภาวะที่ทำให้เกิดแรงเฉือนต่อฟล็อกมากเกินไป ในทำนองเดียวกันการมีจำนวนตาข่ายมากขึ้นที่ความเร็วใบพัดต่ำๆ จะทำให้เกิดบริเวณนิ่งมากขึ้น (Stagnant region) แต่เมื่อความเร็วใบพัดสูงขึ้นแม้จะเป็นการเพิ่มการผสมที่ดีหรือเพิ่มการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์แต่ก็เป็นเพิ่มแรงเฉือนต่อฟล็อกมากขึ้นตามลำดับ อัตราการสร้างฟล็อกน้อยกว่าการแตกของฟล็อกซึ่งจะส่งผลเสียมากกว่า เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณีมีจำนวนตาข่ายน้อย เมื่อโอกาสในการชนกันของอนุภาคคอลลอยด์ลดลงเป็นผลให้อัตราการสร้างฟล็อกน้อยกว่าการแตกของฟล็อก



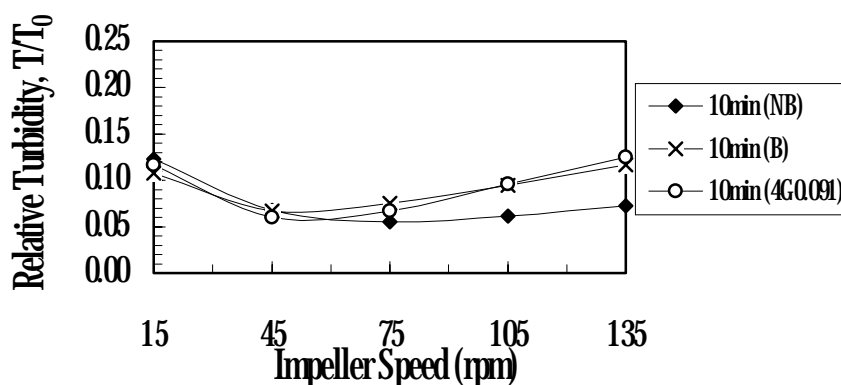
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 4 แผ่น



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 6 แผ่น



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นสูงสุดของถังผสม 3 ลักษณะ

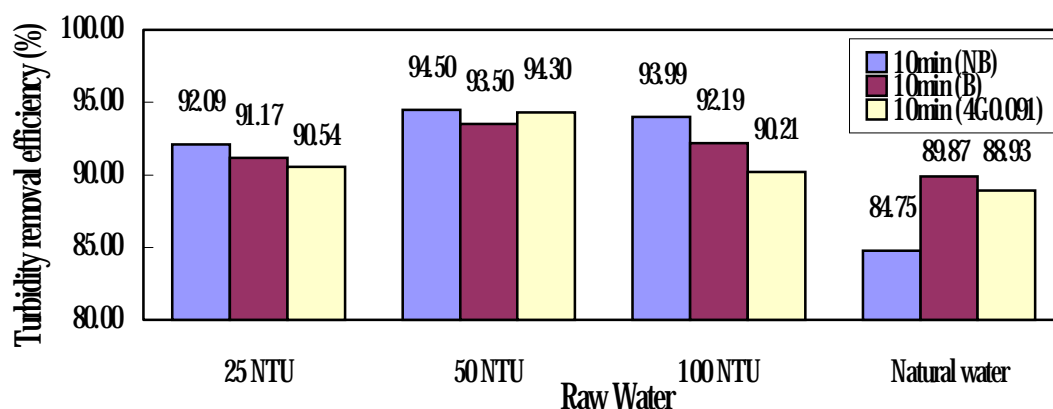
#### 4.3 ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำดิบที่มีลักษณะสมบัติต่างกัน

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย 10min (4G0.091) ได้แก่ เวลาเก็บกัก 10 นาที ความเร็วใบพัด 80, 52 และ 54 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการทดลองในขั้นต่อมาคือการทดลองหาประสิทธิภาพในการลดความขุ่น ณ สภาวะที่เหมาะสมนั้นกับน้ำที่มีลักษณะสมบัติต่างกันคือ น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU (ความต้องการปริมาณสารส้มในน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติ เท่ากับ 80, 60 และ 80 มก./ล ตามลำดับ) การเปลี่ยนแปลงความขุ่นทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของถังผสมทุกลักษณะเปลี่ยนไปด้วย การผสมที่ใช้ตาข่ายประสิทธิภาพจะลดลงต่ำกว่าถังผสมแบบอื่นๆ แต่ที่น่าสนใจเป็นพิเศษก็คือ ถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นในน้ำดิบธรรมชาติประสิทธิภาพลดลงเหลือร้อยละ 84.75 เท่านั้น (รูปที่ 4.20) ขณะที่ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่ายยังคงมีประสิทธิภาพสูงเกือบร้อยละ 90

ผลการทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะในน้ำดิบลักษณะเดียวกัน พบว่าที่ความขุ่น 25 NTU มีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รูปที่ 4.20) ยกเว้นกรณีในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นกับในถังผสมที่ใช้ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (10min (4G0.091)) ที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเท่ากันสำหรับน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติ การผสมในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะประสิทธิภาพในการลดความขุ่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดสอบทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU และ 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติของถังผสมแต่ละแบบ (รูปที่ 4.20) พบว่าส่วนมากการผสมมีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ยกเว้นในถังผสมที่ใช้ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (10min (4G0.091)) ที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นไม่แตกต่างกันระหว่างน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU กับ 100 NTU และระหว่างน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU กับน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU (ดูภาคผนวก ก)

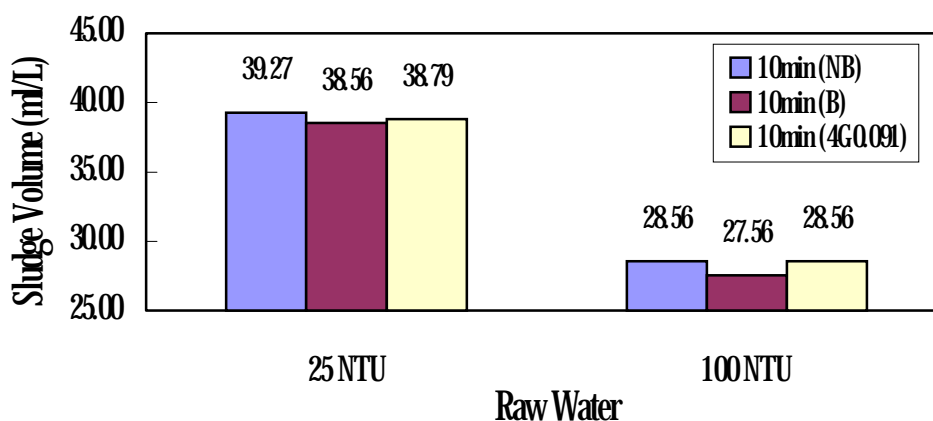


รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ปริมาณอนุภาคเริ่มต้น (Primary particle) ที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อก กล่าวคือถ้าในน้ำดิบมีปริมาณอนุภาคเริ่มต้นสูงหรือมีความขุ่นสูง ประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อกจะสูงตามไปด้วยและใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำ สำหรับตาข่าย 10min (4G0.091) ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นลดลงจากร้อยละ 94.3 เหลือร้อยละ 90.54, 90.21 และ 88.93 เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดน้ำดิบจากน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 50 NTU เป็น น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า ที่สภาวะตัวแปรการผสมหนึ่งจะเหมาะสมกับความขุ่นหนึ่งเท่านั้น ถ้าน้ำดิบมีความขุ่นสูงจะใช้เวลาในการผสมสั้นลงและฟล็อกจะมีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นต่ำ ฟล็อกที่มีขนาดใหญ่จะไวต่อแรงเฉือนของน้ำและใบพัดมากกว่าฟล็อกขนาดเล็ก ดังนั้นอาจจำเป็นต้องลดความเร็วการเฉือนที่ลงเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นสูง

$SV_{30}$  ที่แตกต่างกันมากระหว่างน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU กับ 100 NTU เนื่องจากปริมาณสารส้มที่ใช้ในการทดลอง  $SV_{30}$  น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU จึงต่ำกว่า 25 NTU (รูปที่ 4.21) ส่วน  $SV_{30}$  ในน้ำดิบธรรมชาติที่ไม่สามารถวัดได้นั้นเนื่องจากตะกอนมีความหนาแน่นน้อยมีลักษณะเป็นฟูไม่แยกตกตะกอนชัดเจน บางส่วนเกาะตามผิวกระบอกตวง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำดิบธรรมชาติมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากน้ำดิบสังเคราะห์มาก ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์เคมี สาหร่าย ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลต่อคุณลักษณะของฟล็อกทั้งสิ้น ซึ่งจำเป็นต้องแยก

สำหรับออกก่อนส่งน้ำดิบเข้าสู่กระบวนการการสร้างฟล็อกหรืออาจจำเป็นต้องใช้สารช่วยก่อตะกอน (Coagulant aid) จำพวกสาร โพลีเมอร์ช่วยทำให้การสร้างฟล็อกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



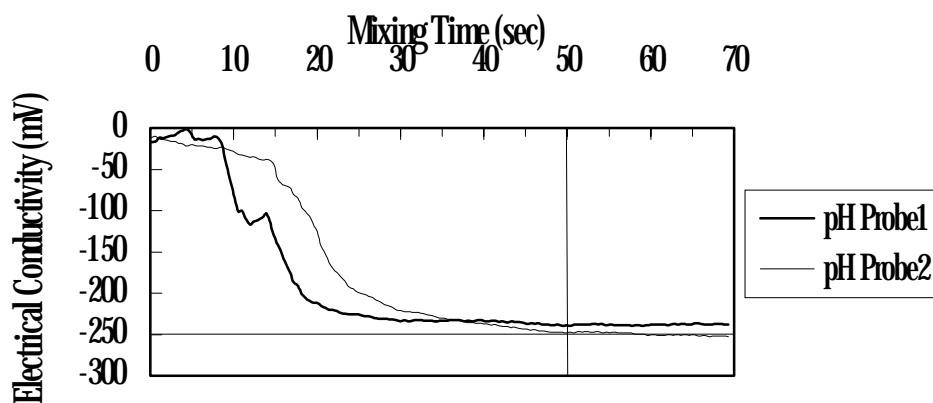
รูปที่ 4.21  $SV_{30}$  เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

#### 4.4 ผลการทดสอบการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสม 3 ลักษณะ

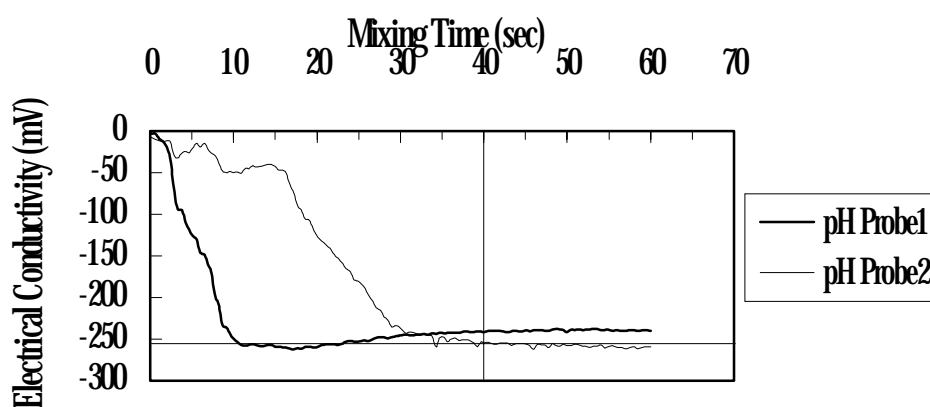
การศึกษาการตอบสนองของสารเทรซเซอร์โดยตรวจวัดในรูปของการนำไฟฟ้าของน้ำภายในถังผสม 2 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณผิวน้ำและบริเวณก้นถังผสม (รูปที่ 3.8) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพและคุณภาพของการผสมในถังผสม 3 ลักษณะ ได้แก่ ถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นและถังผสมที่ใช้ตาข่ายค่าความถี่ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (4G0.091) ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที (ความเร็วใบพัดที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดของตาข่าย 10min (4G0.091)) การใช้ตาข่ายทำให้ประสิทธิภาพในการผสมดีขึ้นกว่าการผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นโดยใช้เวลาผสม ( $t_m$ ) น้อยที่สุดเพียง 30 วินาที (เวลาที่ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่งเข้าสู่สภาวะคงที่) ในขณะที่ถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นใช้เวลาผสม 50 และ 40 วินาทีตามลำดับ (รูปที่ 4.22-4.24)

การใช้ตาข่ายทำให้ประสิทธิภาพการผสมสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะที่ปริมาตรของน้ำบริเวณก้นสารเทรซเซอร์ค่าความนำไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วกว่าปริมาตรก้นถังผสม 1 เท่า ความผันแปรของค่าความนำไฟฟ้าในน้ำที่เวลาต่างๆ บอกรับถึงคุณภาพในการผสมที่เวลาและบริเวณผสมนั้นๆ กล่าวคือ การกระจายตัวของสารเทรซเซอร์เป็นไปอย่างรวดเร็วในเนื้อของน้ำและสารผสมนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำจนเป็นผลทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำบริเวณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันมาก สังเกตได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าในถังผสมที่ใช้ตาข่ายมีความผันแปรน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นนั้นแสดงให้เห็นว่าตาข่ายสามารถทำให้การผสมกันของสาร

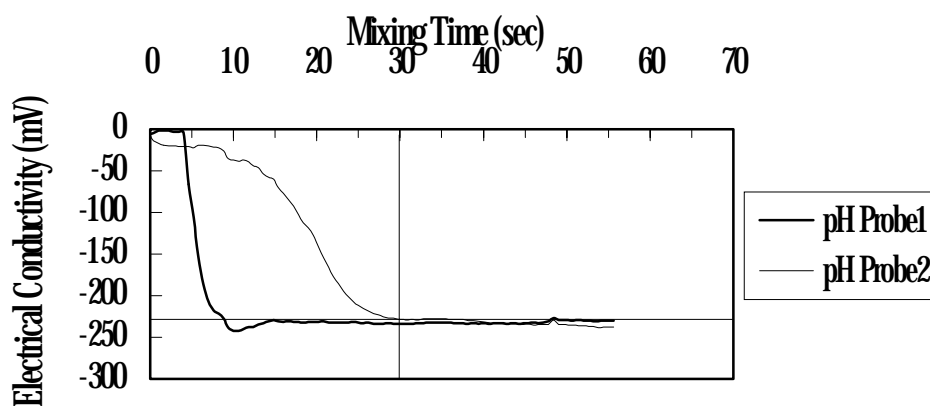
เทอร์ชเซอร์กับน้ำผสมกันได้รวดเร็วและมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่เวลาผสมเท่าๆ กัน สาเหตุที่ค่าความนำไฟฟ้าทั้ง 2 ตำแหน่ง เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าไม่เท่ากันเนื่องมาจากความเที่ยงและเสถียรภาพของเครื่องมือวัด มีการรบกวนจากสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ผ่านอุปกรณ์ทดลองที่เป็นโลหะ



รูปที่ 4.22 การตอบสนองของสารเทอร์ชเซอร์ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น



รูปที่ 4.23 การตอบสนองของสารเทอร์ชเซอร์ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น



รูปที่ 4.24 การตอบสนองของสารเทอร์ชเซอร์ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย 4G0.091

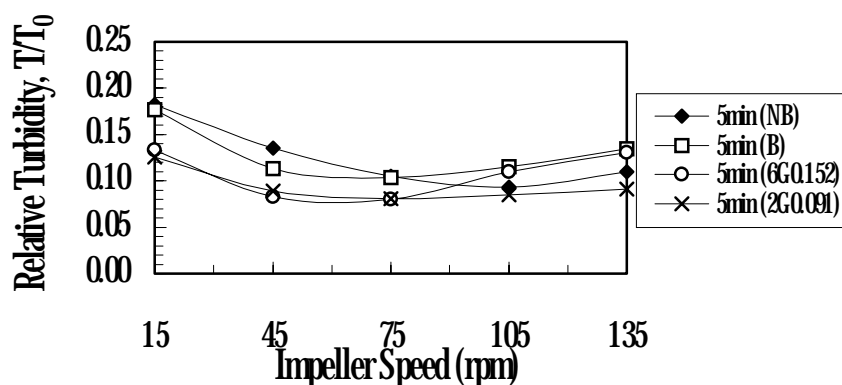


#### 4.5 ผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในถังผสมที่ใช้ตาข่าย

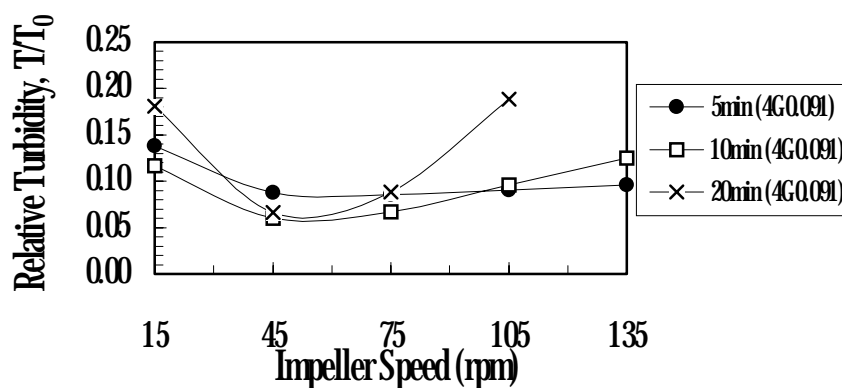
ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที การสร้างฟล็อกในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น ใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่าย ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในน้ำดิบสังเคราะห์และกวนด้วยความเร็วใบพัดต่ำๆ แต่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นกลับไม่ดีเท่ากรณีที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นเมื่อเพิ่มความเร็วใบพัดให้สูงขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงความขุ่นเป็น 25 NTU และ 100 NTU ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของตาข่ายกลับลดลงต่ำกว่าการผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ดังนั้นจึงมีข้อสังเกตจากผลการทดลองข้างต้นของตัวแปรและความยืดหยุ่นของการใช้ตาข่ายในถังผสม กล่าวคือ เวลาเก็บกักอาจเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการสร้างฟล็อกที่ใช้ตาข่ายและตาข่ายอาจจะมึบหนาบในการสร้างฟล็อกในช่วงเวลาสั้นๆ เฉพาะตอนเริ่มต้นเท่านั้น จึงได้ทำการลดเวลาเก็บกักลงเหลือ 5 นาที (ดูภาคผนวก ข) โดยใช้ตัวแปรการผสมเหมือนกันกับการทดลองในช่วงแรกและพบว่าตาข่ายค่าความทึบ (d/M) 0.152 จำนวน 6 แผ่น (5min (6G0.152)) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดร้อยละ 92.3 (รูปที่ 4.25) ที่ความเร็วใบพัด 60 รอบต่อนาที ช่วงค่าความเร็วแรงแผ่นกั้นที่เหมาะสม ( $G$ ) 37-87 ต่อวินาที ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 2 แผ่น (5min (2G0.091)) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นร้อยละ 91.9 ช่วง  $G$  เท่ากับ 42-137 ต่อวินาที ซึ่งกว้างกว่าตาข่ายขนาดค่าความทึบอื่นๆ ถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุทธ้อยู่ที่ 90.7 และ 89.7 ช่วง  $G$  เท่ากับ 102-152 ต่อวินาที และ 45-101 ต่อวินาที ตามลำดับ ตาข่ายที่มีค่าความทึบต่ำจะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นมากกว่าตาข่ายที่มีค่าความทึบสูงเช่นเดียวกับที่เวลาเก็บกัก 10 นาที จึงกล่าวได้ว่าเวลาเก็บกักเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผสมที่ใช้ตาข่าย การเพิ่มเวลาเก็บกักให้มากขึ้นเป็น 20 นาที จะทำให้ช่วง  $G$  สำหรับการสร้างฟล็อกแคบลงกว่าเวลาเก็บกัก 5 และ 10 นาที (รูปที่ 4.26)

การนำตาข่ายมาใช้ในถังผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกต้องใช้เวลาเก็บกักน้อยกว่า 10 นาที หรือใช้ในช่วงการเริ่มต้นเท่านั้นจึงจะเกิดผลดีต่อการสร้างฟล็อก ผลการทดสอบสารเทรซเซอร์เป็นเหตุผลหนึ่งที่จะอธิบายและสนับสนุนสมมติฐานในการวิจัยครั้งนี้ ผลการทดลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตาข่ายสามารถช่วยทำให้การผสมดีขึ้นจริงและสามารถใช้ได้ดีในน้ำดิบธรรมชาติ โรงงานผลิตน้ำประปาทั่วไปมักจะทำให้ความสำคัญต่อการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ โรงงานผลิตน้ำประปาสุขาภิบาล เทศบาลและการประปาส่วนภูมิภาคส่วนใหญ่จะใช้แบบก่อสร้างเดียวกันซึ่งขาดส่วนของการผสมสำหรับการสร้างฟล็อก เป็นผลให้โรงงานผลิตน้ำประปามีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นต่ำ การใช้ตาข่ายในถังผสมจะเป็นแนวทางหนึ่งที่ยั่งยืนและลงทุนต่ำสำหรับก่อสร้างหรือปรับปรุงประสิทธิภาพโรงงานผลิตน้ำประปาแทนการก่อสร้างโรงงานผลิตน้ำประปาใหม่ การใช้ตาข่ายสามารถลดการใช้พลังงานได้มาก

กว่าร้อยละ 69.3 (รูปที่ 4.19 และการคำนวณดูภาคผนวก ง) จึงเป็นข้อได้เปรียบของการใช้ตาข่ายในการผสมสำหรับการสร้างฟล็อกในโรงงานผลิตประปา



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที

นอกจากการใช้ตาข่ายเพื่อการสร้างฟล็อกในขบวนการผลิตน้ำประปาแล้ว การผสมที่ใช้ตาข่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหรือวิศวกรรมด้านอื่นๆ ที่การผสมไม่ไวต่อแรงเฉือนจากของเหลว ได้แก่ การผสมเร็วในขบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Rapid Mixing) การผสมสารเคมีในขบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การผสมสารเคมีทั่วๆ ไป การผสมของเหลวที่มีความหนืด การผสมในกระบวนการผลิตทางเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น กรณีนำไปใช้ในกระบวนการผสมเร็วในขบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ตามหลักการผสมเร็วนั้นเพื่อเป็นการกระจายสารก่อนตะกอนในน้ำดิบโดยใช้เวลาให้สั้นที่สุด จากผลการศึกษาการตอบสนองของสารเทรซเซอร์การใช้ตาข่ายสามารถลดเวลาเก็บกักให้น้อยลงได้จริงและมีคุณภาพมากกว่าถึงผสมที่ใช้แผ่นกั้น นอกจากนี้จะลดขนาดถังผสมลงแล้วยังสามารถลดกำลังที่ใช้ในการกวนได้

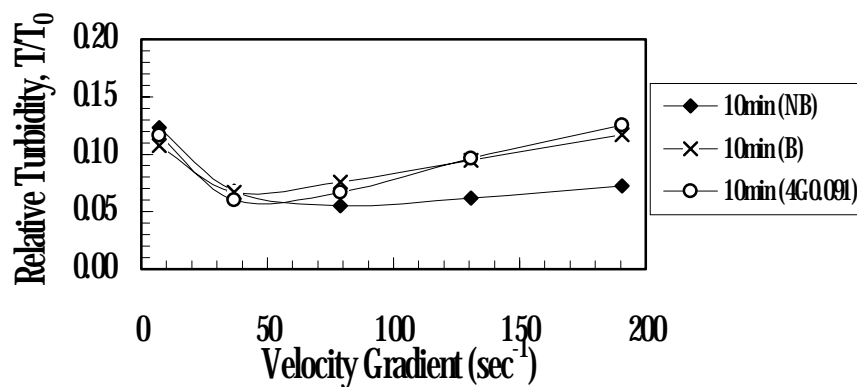
ด้วยเพราะสามารถใช้ความเร็วใบพัดต่ำลงได้ ทำให้ประหยัดทั้งในการก่อสร้างและการดำเนินการใช้ตาข่ายเพื่อใช้ในการผสมที่มีความไวต่อแรงเฉือนจากของเหลวได้แก่ การผสมสำหรับการสร้างฟล็อกและการผสมสำหรับการสร้างผลึกในงานด้านวิศวกรรมเคมีพึงต้องนำไปประยุกต์ใช้อย่างระมัดระวังเพราะตาข่ายทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นนี้อาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้

#### 4.6 การประยุกต์ผลการวิจัย

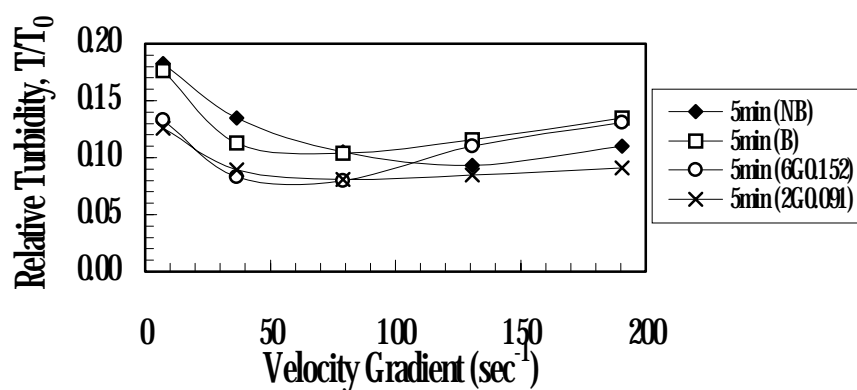
เพื่อให้สามารถนำผลการศึกษาวินิจฉัยไปใช้งานได้จริงในภาคสนาม การขยายขนาด (Scale up) แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเพื่อนำไปใช้งานจริงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษารุ่นนี้ใช้ใบพัดขนาดที่เล็กกว่าขนาดมาตรฐานทั่วไปโดยมีขนาด  $1/4$  ( $D=T/4$ ) ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถังผสม ( $T$ ) และใช้ค่าคงที่ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ ( $K_p$ ) เท่ากับ 4.2 โดยที่ถังผสมมาตรฐานส่วนใหญ่จะใช้ใบพัดขนาด  $1/3$  ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถังผสม ( $D=T/3$ ) ค่าคงที่ ( $K_p$ ) เท่ากับ 6.4 กำหนดตำแหน่งใบพัดล่างสุดเท่ากับ  $T/4$  และระยะห่างระหว่างใบพัดเท่ากับ  $T/2$  ซึ่งระยะดังกล่าวทำให้การกระจายความเร็วของน้ำในถังผสมมีความสม่ำเสมอมากที่สุด (Mical, G. et al., 1999) การขยายขนาดถังผสมจะต้องพิจารณาความสัมพันธ์หลายประการ ได้แก่ เลขเรย์โนลด์ การจัดวางตำแหน่งใบพัดและอัตราส่วนใบพัดกับขนาดถังผสม ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน รูปที่ 4.19, 4.25 และ 4.26 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่น ( $T/T_0$ ) กับค่าความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) ได้ดังรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ หรือแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่น ( $T/T_0$ ) กับเลขเรย์โนลด์ ( $N_{Re}$ ) ได้ดังรูปที่ 4.30, 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ

ตาข่ายสามารถเพิ่มอัตราการชนกันของอนุภาคในตอนเริ่มต้นของกระบวนการก่อสร้างฟล็อกทำให้ค่าประสิทธิภาพการชน (Collision efficiency function,  $\alpha$ ) เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ แต่ทั้งนี้จะต้องไม่ใช้เวลาในส่วนนี้ให้น้อยที่สุดเพื่อลดอัตราการแตกของฟล็อกอันเนื่องมาจากสภาวะความปั่นป่วนที่รุนแรง ฟล็อกจะมีขนาดจำกัดที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์หนึ่งๆ ขนาดของฟล็อกที่ใหญ่ขึ้นจะไวต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากผลการวิจัยทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมของตาข่ายต่อการสร้างฟล็อก ดังนั้นเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างฟล็อกโดยแบ่งถังผสมออกเป็นหลายชั้นตอนเป็นการลดข้อจำกัดของถังผสมชนิดกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) ได้ดีและลดค่าความเร็วเกรเดียนท์ลงเป็นลำดับร้อยละ 40-50 (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538; Reynolds, T. D. and Richards, P. A., 1996) วิธีการดังกล่าวเรียกว่า “Step flocculation” โดยที่เวลาเก็บกักรวมทั้งหมดยังคงเท่ากับการผสมในถังผสมสำหรับการสร้าง

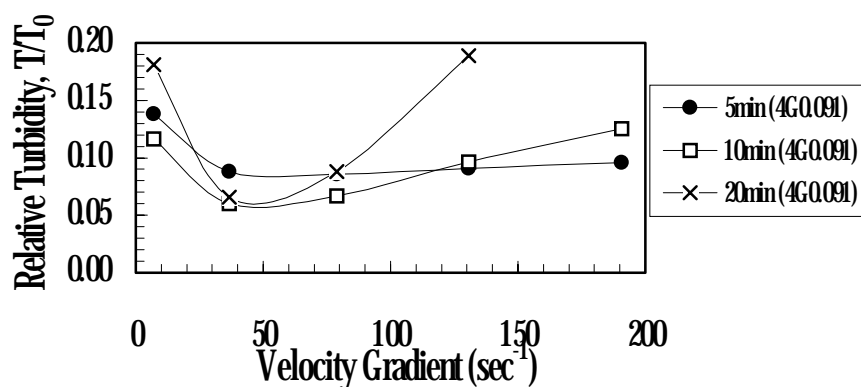
พล็อตขั้นตอนเดียวแต่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่า ทั้งนี้การเลือกเวลาเก็บกักควรอยู่ในช่วง 5-10 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด



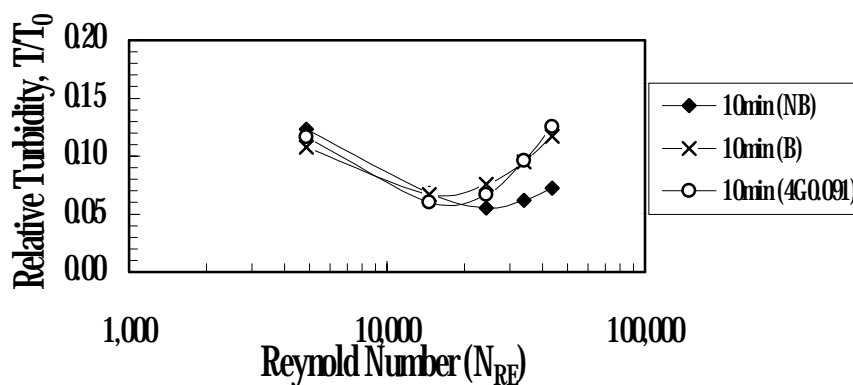
รูปที่ 4.27 ความเร็วเกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ในถังผสม 3 ลักษณะ



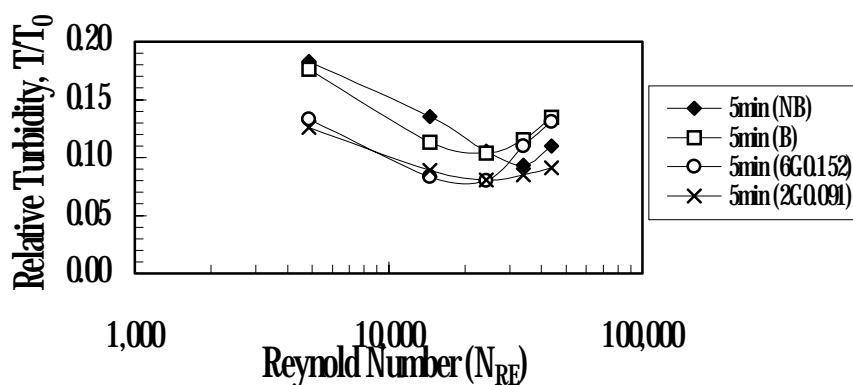
รูปที่ 4.28 ความเร็วเกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ในถังผสม 3 ลักษณะ



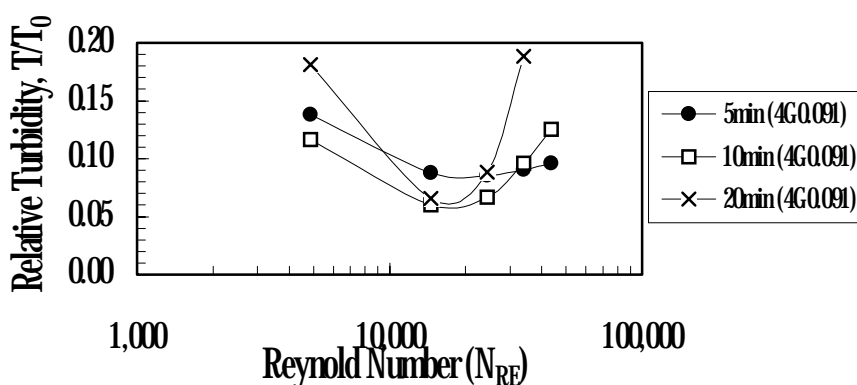
รูปที่ 4.29 ความเร็วเกรเดียนท์ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย



รูปที่ 4.30 เลขเรย์โนลด์ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ในถังผสม 3 ลักษณะ



รูปที่ 4.31 เลขเรย์โนลด์ที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ในถังผสม 3 ลักษณะ



รูปที่ 4.32 เลขเรย์โนลด์ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย

ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient,  $G$ ) ในการวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดในด้านวิธีการประมาณค่าที่ถูกต้องเนื่องจากไม่สามารถหาสมการคณิตศาสตร์สำหรับประมาณค่าความเร็วเกรเดียนท์ในกรณีของถังผสมที่ใช้ตาข่ายโดยเฉพาะ การวิจัยนี้ใช้รูปแบบถังผสมที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยมีเจตนาให้มีพื้นที่ของตาข่ายมากที่สุดโดยการลดขนาดของใบพัดลงให้ต่ำกว่าขนาดมาตรฐานที่

ใช้ออกแบบทั่วไป (ดูรายละเอียดรูปที่ 2.8) เหลือเพียงขนาด 1/4 ของเส้นผ่าศูนย์กลางถึงผสมและไม่  
มีรายงานการวิจัยแบบสมบูรณ์ของขนาดใบพัดดังกล่าว

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่า  $G$  ที่กล่าวถึงพัฒนามาจากการวัดและทดลองในถังผสมมาตรฐานที่มี 4 แผ่นกั้น โดยความหมายของค่า  $G$  แล้ว (สถานะที่มีความเร็วต่างกันในมวลของน้ำที่เวลา  
หนึ่งๆ) อาจกล่าวได้ว่าไม่เป็นตัวแทนได้ดีมากนักเมื่อเปลี่ยนลักษณะถังผสมจากมี 4 แผ่นกั้นเป็น  
มีแผ่นกั้นหรือมีแผ่นตาข่าย ซึ่งสภาวะการไหลของน้ำในถังผสมเปลี่ยนไป เทคโนโลยีที่ใช้วัด  
ความเร็วของกระแสน้ำในถังผสมที่ใช้ในปัจจุบันเรียกว่า Laser Doppler Anemometer (LDA) (Liem  
et al., 1999) ซึ่งมีความสามารถในการวัดความเร็วของกระแสน้ำในถังผสมที่ประสิทธิภาพสูงมาก  
แต่ราคาชุดเครื่องมือก็แพงมากด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวิจัยนี้ทำการศึกษาในเชิง  
เปรียบเทียบรูปแบบการผสมต่างๆ ที่ไม่ใช่การหาค่าสัมบูรณ์ของค่าความเร็วเกรเดียนต์ ดังนั้น  
ความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าความเร็วเกรเดียนต์ซึ่งเกิดขึ้นในทุกกรณีที่พิจารณาจึงไม่มีผล  
ต่อข้อสรุปที่ได้จากการศึกษา

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำดิบโดยใช้ตาข่าย ได้แก่ ความเร็วแรงแเดียนท์ ( $G$ ) เวลาเก็บกัก ( $t$ ) ค่าความทึบ (Solidity ratio,  $d/M$ ) จำนวนตาข่ายและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถังผสมลักษณะอื่นๆ โดยจัดอุปกรณ์การทดลองแบบไหลต่อเนื่องในถังผสมเร็วและถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกปริมาตร 5 และ 100 ลิตร ตามลำดับ ใช้ใบพัดรัศมี 2 ชั้น เส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 ซม. เป็นอุปกรณ์ในการกวนและสารส้มเป็นสารก่อตะกอน ควบคุม pH เท่ากับ 6.9 ด้วยสารละลายปูนขาว ในขั้นแรกทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 50 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นที่เวลาผสม 5, 10 และ 20 นาที แล้วนำเวลาผสมที่ดีที่สุดไปทดลองโดยใช้ตาข่ายที่มีค่าความทึบ 0.091, 0.152, 0.303 และ 0.556 จำนวน 2, 4 และ 6 แผ่น แผ่นกั้นและตาข่ายวางในตำแหน่งที่เหมาะสมในถังผสม ชั้นที่สองใช้ค่าตัวแปรการผสมที่เหมาะสมที่สุดในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะไปทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติ และหลังจากนั้นจึงทดสอบการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ เพื่อหาเวลาที่ทำให้คุณภาพการผสมสูงที่สุดในถังผสม 3 ลักษณะ ผลการวิจัยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ที่เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที พบว่าเวลาเก็บกัก 10 นาที เป็นเวลาเก็บกักที่เหมาะสมที่สุดในถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 50 NTU ร้อยละ 94.5 และ 93.5 ที่ความเร็วใบพัด 80 และ 52 รอบต่อนาที ช่วงค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสม ( $G$ ) 45-120 ต่อวินาที และ 31-64 ต่อวินาที ตามลำดับ การผสมที่ใช้ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น (10min (4G0.091)) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงที่สุดร้อยละ 94.3 ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที ช่วง  $G$  เท่ากับ 34-69 ต่อวินาที

5.1.2 ปริมาตรตะกอนหลังตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) เวลาเก็บกัก 10 นาที จะมีปริมาณมากกว่า 5 และ 20 นาที ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที ความเร็วใบพัด 45 รอบต่อนาที การผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นใช้แผ่นกั้นและใช้ตาข่ายมี  $SV_{30}$  36.89, 39.27 และ 39.27 มล./ล ตามลำดับ การใช้  $SV_{30}$  เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการวัดความขุ่นเนื่องจากมีปัจจัยที่ทำให้

ให้การตกตะกอนได้ไม่ดี ได้แก่ การแตกของฟล็อกขณะเก็บตัวอย่าง ปริมาณสารส้มที่เดิมและ pH ของน้ำขณะเก็บตัวอย่าง เครื่องมือวัด เป็นต้น ต้องเปรียบเทียบในปริมาณสารส้มและเวลาเก็บกักที่เท่ากันเท่านั้นเพราะค่า  $SV_{30}$  ที่ปริมาณสารส้ม 80 มก./ล จะมากกว่า 60 มก./ล ความหนาแน่นของตะกอนที่เวลาเก็บกักต่ำจะน้อยกว่าที่เวลาเก็บกักนาน

5.1.3 น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU, 100 NTU และน้ำดิบธรรมชาติ ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นลดลงเหลือร้อยละ 92.09, 93.99 และ 84.75 ตามลำดับ ถังผสมที่ใช้แผ่นกั้นลดลงเหลือร้อยละ 91.17, 92.19 และ 89.87 ตามลำดับ ถังผสมที่ใช้ตาข่าย 10min (4G0.091) ลดลงเหลือร้อยละ 90.54, 90.21 และ 88.99 ตามลำดับ ปริมาตรตะกอนเฉลี่ยหลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) ของน้ำดิบความขุ่น 25 NTU จะมากกว่า 100 NTU เนื่องจากปริมาณสารส้มที่ใช้เดิม แต่  $SV_{30}$  ของน้ำดิบธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นปุยและแยกตัวไม่ชัดเจนจึงไม่สามารถวัดค่าได้ ปริมาณอนุภาคเริ่มต้นในน้ำดิบมีผลต่อประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อก ถ้าปริมาณอนุภาคเริ่มต้นมากประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อกจะสูงกว่าปริมาณอนุภาคเริ่มต้นน้อยแต่ต้องลดเวลาเก็บกักเพื่อลดการแตกของฟล็อก

5.1.4 การทดสอบทางสถิติที่ความขุ่นเดียวกันในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นแตกต่างกันยกเว้นถังผสมที่ใช้ตาข่ายและใช้แผ่นกั้นที่ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันที่ความขุ่น 25 NTU และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความขุ่นและชนิดของน้ำดิบพบว่าเพียงถังผสมที่ใช้ตาข่ายเท่านั้นประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.1.5 ผลการทดลองการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที (ความเร็วใบพัดที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดของตาข่าย 10min (4G0.091)) ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพและคุณภาพในการผสมจากการใช้ตาข่ายสูงกว่าถังผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้น ค่าความนำไฟฟ้าเข้าสู่สภาวะคงที่เวลา 30, 50 และ 40 วินาที ตามลำดับ

5.1.6 ตาข่ายจะมีบทบาทในการสร้างฟล็อกมากขึ้นเมื่อลดเวลาเก็บกักลงเหลือ 5 นาที ตาข่ายค่าความทึบ 0.152 จำนวน 6 แผ่น (5min (6G0.152)) มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นมากที่สุดร้อยละ 92.3 ที่ความเร็วใบพัด 60 รอบต่อนาที ช่วงค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ที่เหมาะสม ( $G$ ) 37-87 ต่อวินาที ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 2 และ 4 แผ่น (10min (2G0.091) และ 10min (4G0.091)) มีช่วง  $G$  เท่ากับ 42-137 ต่อวินาที และ 36-103 ต่อวินาที ซึ่งกว้างกว่าตาข่ายค่าความทึบอื่นๆ

5.1.7 การเพิ่มเวลาเก็บกักให้มากขึ้นมีผลทำให้ช่วงค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ที่เหมาะสม ( $G$ ) สำหรับการสร้างฟล็อกแคบลง เช่น ตาข่ายค่าความทึบ 0.091 จำนวน 4 แผ่น เมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักจาก 5 นาที เป็น 10 นาที และ 20 นาที (5min (4G0.091), 10min (4G0.091) และ 20min (4G0.091)) ช่วง



G และความกว้างของช่วงเท่ากับ 36-137 ต่อวินาที (101), 34-69 ต่อวินาที (35) และ 37-58 ต่อวินาที (21) ตามลำดับ

5.1.8 การผสมที่ใช้ตาข่ายสามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นร้อยละ 69.3 ในขณะที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดใกล้เคียงกัน

## 5.2 การประยุกต์ผลการวิจัย

การผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นแม้จะมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่าการใช้แผ่นกั้นและตาข่ายในน้ำดิบสังเคราะห์ แต่พบว่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อนำมาใช้กับน้ำดิบธรรมชาติ พลังงานที่ใช้ที่สูงกว่าจึงเป็นการไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในภาคสนามจริง การผสมสำหรับการสร้างฟล็อกที่ใช้ตาข่ายจะช่วยลดข้อจำกัดเรื่องเวลาเก็บกักได้ เนื่องจากสามารถลดเวลาเก็บกักได้ถึง 5 นาที ขณะที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นยังสูงถึงร้อยละ 92.3 ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้งานควรใช้เวลาเก็บกักในช่วง 5-10 นาที

การผสมที่ใช้ตาข่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและวิศวกรรมด้านอื่นๆ ได้แก่ การผสมเร็วในกระบวนการผลิตน้ำประปา การผสมสารเคมี การผสมในกระบวนการผลิตทางเทคโนโลยีชีวภาพ ในกรณีนำไปใช้ในกระบวนการสร้างฟล็อกหรือสร้างผลึกต้องพึงระวังเนื่องจากตาข่ายทำให้เกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้น อาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตได้ อีกทั้งยังทำให้ช่วงความเร็วกระแสน้ำที่เหมาะสมแคบลงกว่าการผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้นและใช้แผ่นกั้นอีกด้วยเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักให้นานขึ้น

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

จากผลการศึกษาค้นคว้าทำให้ทราบว่าตาข่ายจะมีบทบาทสำหรับการสร้างฟล็อกในตอนเริ่มแรกของการผสมเท่านั้นและถ้าเวลาเก็บกักมากขึ้นตาข่ายจะส่งผลเสียมากกว่าและการศึกษาค้นคว้ามีขอบเขตการศึกษาเฉพาะในถังผสมสำหรับการสร้างฟล็อกเท่านั้น ดังนั้นสิ่งที่ควรจะศึกษาเพิ่มเติมต่อจากนี้ควรที่จะตอบคำถามต่อไปนี้คือ ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะมากขึ้นหรือไม่ ถ้าเพิ่มจำนวนถังผสมในลักษณะอนุกรม 2 ถัง เวลาเก็บกักถึงละ 5 นาที นำตาข่ายไปใช้ในถังผสมเร็ว เปลี่ยนลักษณะถังผสมเป็นถังผสมแบบไหลในท่อ (Plug flow) ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะเป็นอย่างไรถ้าให้ตาข่ายเป็นส่วนที่เคลื่อนที่แทนใบพัด จำนวน ชนิดและขนาดใบพัดมีผลต่อประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อกที่ใช้ตาข่ายหรือไม่ อย่างไรก็ตาม ศึกษาค้นคว้าการตอบสนองของสารเทรซเซอร์ในถังผสมที่ใช้ตาข่ายโดยใช้ความเร็วใบพัดให้มากขึ้นจะสามารถลดเวลาเก็บกักและกำลังที่ใช้ในการกวนได้หรือไม่ เมื่อเปรียบเทียบกับการผสมที่ไม่ใช้และใช้แผ่นกั้นในถังผสมมาตรฐาน

## เอกสารอ้างอิง

- ชัยรัตน์ ศิริพิชนะ, สุรสิทธิ์ ประสารปราน, นวีวรรณ ไชยสุวรรณ, สุภรณ์ ภูริระวณิชกุลย์, เลียง คุณบุรรัตน์. (2542). การพัฒนาระบบการศึกษาภาคศาสตร์ของไทยและการประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการผลิตแซนแทน. สำนักเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. (2538). วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล. (2538). คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: กราฟฟิคดีไซน์พริ้นท์.
- ลัดดา ธรรมการันย์. (2535). ผลของใบพัดต่อการกำจัดความขุ่นด้วยถังทำไสแบบหมุนเวียนตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- American Water Works Association. (1990). **Water quality and treatment: A handbook of community water supplies.** (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- American Water Works Association and American Society of Civil Engineers. (1998). **Water treatment plant design.** (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Carlson, K. H., Member, ASCE and Dean Gregory. (2000). Optimizing water treatment with two stage coagulation. **J. Envir. Engrg.** 126 (6): 556-561.
- Cheng, N- S. and Law, A. W-K. (2001). Measurements of turbulence generated by oscillating grid. **J. Hydr. Engrg.** 127 (3): 201-208.
- Cheremisinoff, N. P. (2000). **Handbook of chemical processing equipment.** Boston: Butterworth Heinemann.
- Cleasby, J. L. (1984). Is velocity gradient a valid turbulent flocculation parameter?. **J. Envir. Engrg.** 110 (5): 875-897.

- Cornelissen, A., Burnett, M. G. , McCall, R. D. and Goddard, D. T. (1997). The structure of hydrous flocs prepared by batch and continuous flow water treatment system and obtained by optical, electron and atomic force microscopy. **Water Sci. Technol.** 36 (4): 41-48.
- Dennett, K. E., Amirtharjah, A., Moran, T. F. and Gould, J. P. (1996). Coagulation: its effect on organic matter. **J. AWWA.** 88 (4): 129-142.
- Doran, P.M. (1995). **Bioprocess engineering principles.** London: Academic press.
- Clark, M. M. (1993). **Transport modeling for environmental engineering and scientist.** New York: John Wiley & Son.
- Douglas, J. F. and Mathews, R. D. (1996). **Solving problems in fluid mechanics.** Vol.2. London: Longman group.
- Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X. and Williams, R. A. (1995). **Particle deposition and aggregation: Measurement, modeling and simulation.** Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Imre Horvath, C. Sc. (1994). **Hydraulics in water and wastewater treatment technology.** Chichester: John Wiley & Sons.
- Ju, S. J., Mulvahl, T. M. and Pike R. W. (1990). Three-dimensional turbulent flow in agitated vessels with a nonisotropic viscosity turbulence model. **Can. J. Chem. Eng.** 68: 3-16.
- Kresta, S.M. and Wood, P.E. (1991). Prediction of the three dimensional turbulent flow in stirred tanks. **AIChemJ.** 37: 448-460.
- Lee, K. C., Borrett, N.A. and Yianneskis, M. (2000). **Mixing and crystallization.** Dordrecht: Kluwer.
- Liem, L. E., Smith, D. W. and Stanley, S. J. (1999). Turbulent velocity in flocculation by means of grids. **J. Envir. Engrg.** 125 (3): 224-233.
- Liem, L. E., Smith, D. W. and Stanley, S. J. (2000). Optimization study of flocculation mixing by means of grids. **J. Envir. Engrg.** 126 (2): 138-144.
- Lemoine, F., Wolff, M. and Lebouche, M. (1997). Experimental investigation of mass transfer in a grid-generated turbulent flow using combined optical methods. **Int. J. Heat Mass Transfer.** 40 (14): 3255-3266.

- Letterman, R. D., Amirtharjah, A. and O'Melia, C. R. (1999). **Water quality and treatment : A handbook of community water supplies.** (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P. (1993). **Unit operations of chemical engineering.** New York: McGraw-Hill.
- McConnachie, G. L. (1991). Turbulence intensity of mixing in relation to flocculation. **J. Envir. Engrg.** 117 (6): 731-750.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1991). **Wastewater engineering : Treatment, disposal, reuse.** (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Micale, G., Brucato, A., Grisafi, F. and Ciofalo, M. (1999). Prediction of flow fields in a dual-impeller stirred vessel. **AIChemJ.** 45 (3): 445-464.
- Montgomery, J. M. and Consulting engineers, Inc. (1985). **Water treatment principles and design.** New York: John Wiley & Sons.
- Nienow, A. W. (ed.) (1993). **Bioreactor and bioprocess fluid dynamics.** (3rd ed.). London: BHR Group. 68 : 3-16.
- Pope, S. B. (2000). **Turbulent flows.** Cambridge: Cambridge University Press.
- Qasim, S. R., Motley, E. M. and Zhu, G. (2000). **Water works engineering: Planning, design and operation.** London: Prentice-Hall.
- Ramaley, B. L., Lawler, D. F., Wright, W. C. and O'Melia, C. R. (1981). Integral analysis of water plant performance. **J. of Envi. Eng. Division.** 107 (EE3): 547-562.
- Reuss, M. (1995). **Bioreactor system design.** New York: Marcel Dekker.
- Reynolds, T. D. and Richards, P. A. (1996). **Unit operations and processes in environmental engineering.** (2nd ed.). Boston: PWS.
- Rutherford, K., Lee, K.C., Mahmoudi, S. M. S. and Yianneskis, M. (1996). Hydrodynamic characteristics of dual Rushton impeller stirred vessels. **AIChemJ.** 42 (2): 332-346.
- Stanley, S. J. and Smith, D.W. (1995). Measurement of turbulent flow in standard jar test apparatus. **J. Envir. Engrg.** 121 (12): 902-909.
- Yianeskis, M., Popiolek, Z. and Writelaw, J. H. (1987). An experimental study of the steady and unsteady flow characteristics of stirred reactor. **J. Fluid Mech.** 175: 537-555.

ตารางที่ ก11 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV<sub>30</sub> เวลาเก็บกัก 10 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น

จำนวนตาข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (Solidity ratio)	ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					จำนวนตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	
2	0.556	28.56	33.32	28.56	28.56	28.56	60
	0.303	28.56	35.70	28.56	28.56	24.99	
	0.152	28.56	35.70	35.70	32.13	32.13	
	0.091	33.32	35.70	27.37	28.56	24.99	
4	0.556	28.56	35.70	32.13	32.13	32.13	60
	0.303	28.56	35.70	35.70	32.13	32.13	
	0.152	32.13	36.89	34.51	35.70	34.51	
	0.091	32.13	39.27	36.89	35.70	33.32	
6	0.556	28.56	35.70	35.70	32.13	28.56	60
	0.303	24.99	32.13	28.56	24.99	24.99	
	0.152	32.13	36.89	32.13	32.13	29.75	
	0.091	28.56	34.51	33.32	28.56	28.56	

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่า SV<sub>30</sub> 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ ก12 สรุปผลการทดลองความขุ่นตกค้างที่เวลาเก็บกัก 10 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำดิบในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะ

ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น (NTU)			ความขุ่นตกค้าง (NTU)		
ไม่ใช้แผ่นกั้น	ใช้แผ่นกั้น	ใช้ตาข่าย (4G0.091)	ไม่ใช้แผ่นกั้น	ใช้แผ่นกั้น	ใช้ตาข่าย (4G0.091)
25.09	25.04	25.03	1.98	2.21	2.37
100.17	100.37	100.39	6.02	7.84	9.82
14.91	12.51	11.46	2.28	1.27	1.27

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 5 การทดลอง

ตารางที่ ก13 สรุปผลการทดลอง  $SV_{30}$  ที่เวลาเก็บกัก 10 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำดิบในถังผสมทั้ง 3 ลักษณะ

ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น (NTU)			ความขุ่นตกค้าง (NTU)		
ไม่ใช้แผ่นกั้น	ใช้แผ่นกั้น	ใช้ตาข่าย (4G0.091)	ไม่ใช้แผ่นกั้น	ใช้แผ่นกั้น	ใช้ตาข่าย (4G0.091)
25.09	25.04	25.03	39.27	38.56	38.79
100.17	100.37	100.39	28.56	27.56	28.56
14.91	12.51	11.46	-	-	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูล 5 การทดลอง

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองของตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที

ตารางที่ ข1 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ความขุ่นน้ำดิบตั้งคราะห์ 50 NTU

รายการ	ความเร็ว ใบพัด	ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น, T <sub>0</sub> (NTU)				ความขุ่นตกค้าง, T (NTU)				ปริมาตรตะกอน, SV <sub>30</sub> (มล./ล)			
		ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3	1		2	3	1		2	3		
5min (2G0.556)	(รอบต่อนาที)												
	15	49.90	50.50	50.10	50.17	9.60	9.15	9.00	9.25	32.13	35.70	32.13	33.32
	45	49.90	50.10	50.10	50.03	6.00	5.55	5.75	5.77	35.70	35.70	35.70	35.70
	75	50.00	50.10	50.05	50.05	5.50	4.90	5.50	5.30	35.70	35.70	32.13	34.51
	105	50.00	50.10	49.90	50.00	5.80	6.00	5.52	5.77	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	50.00	50.20	50.00	50.07	6.65	6.10	6.70	6.48	32.13	32.13	32.13	32.13
5min (4G0.556)	15	50.10	50.00	49.90	50.00	7.95	7.90	7.85	7.90	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.10	49.90	50.00	50.00	5.40	5.20	5.20	5.27	35.70	35.70	35.70	35.70
	75	49.90	50.10	50.00	50.00	5.30	5.55	5.05	5.30	32.13	35.70	32.13	33.32
	105	50.10	50.20	50.00	50.10	6.10	6.60	5.90	6.20	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	50.00	50.20	50.00	50.07	7.50	8.00	7.55	7.68	28.56	35.70	32.13	32.13
5min (6G0.556)	15	50.00	49.90	50.10	50.00	8.50	7.80	8.20	8.17	28.56	35.70	35.70	33.32
	45	50.00	49.90	50.10	50.00	5.80	5.95	6.10	5.95	35.70	32.13	35.70	34.51
	75	50.00	49.90	49.90	49.93	5.65	5.60	5.95	5.73	32.13	32.13	32.13	32.13
	105	50.20	50.00	50.00	50.07	6.80	6.83	6.85	6.83	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	49.90	50.10	50.00	50.00	8.20	8.10	8.25	8.18	28.56	28.56	28.56	28.56



ตารางที่ ข2 สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น

จำนวนตาข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (Solidity ratio)	ความขุ่นเริ่มต้น (NTU) ที่ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					ความขุ่นตกค้าง (NTU) ที่ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					จำนวน ตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	15	45	75	105	135	
2	0.556	50.17	50.03	50.05	50.00	50.07	9.25	5.77	5.30	5.77	6.48	90
	0.303	50.03	50.07	50.13	50.20	50.13	8.53	5.70	5.47	5.94	6.60	
	0.152	49.87	50.07	49.93	49.93	50.07	7.23	4.90	4.18	5.05	6.30	
	0.091	50.00	50.07	50.00	50.00	50.03	6.29	4.47	4.04	4.25	4.57	
4	0.556	50.00	50.00	50.00	50.10	50.07	7.90	5.27	5.30	6.20	7.68	90
	0.303	50.13	50.20	50.03	50.03	49.93	7.30	4.95	5.20	6.02	7.36	
	0.152	50.20	50.00	50.10	49.97	49.93	6.72	4.75	4.25	4.52	5.58	
	0.091	50.03	49.93	50.00	50.17	50.10	6.90	4.38	4.28	4.55	4.81	
6	0.556	50.00	50.00	49.93	50.07	50.00	8.17	5.95	5.73	6.83	8.18	90
	0.303	49.97	50.07	50.10	50.07	50.00	8.73	5.18	5.22	5.98	6.88	
	0.152	50.17	50.10	50.07	49.93	49.97	6.68	4.17	4.00	5.50	6.53	
	0.091	50.03	50.00	50.27	50.17	50.00	7.07	4.22	4.21	4.95	5.58	

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่าความขุ่น 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ ข3 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV<sub>30</sub> เวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น

จำนวนตาข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (Solidity ratio)	ความเร็วไหลพัด (รอบต่อนาที)					จำนวน ตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	
2	0.556	33.32	35.70	34.51	32.13	32.13	60
	0.303	34.51	35.70	32.13	28.56	28.56	
	0.152	30.94	38.08	34.51	32.13	32.13	
	0.091	32.13	39.27	34.51	35.70	32.13	
4	0.556	30.94	35.70	33.32	32.13	32.13	60
	0.303	30.94	35.70	32.13	32.13	28.56	
	0.152	33.32	38.08	34.51	35.70	35.70	
	0.091	35.70	39.27	38.08	35.70	35.70	
6	0.556	33.32	34.51	32.13	32.13	28.56	60
	0.303	30.94	34.51	32.13	32.13	32.13	
	0.152	30.94	38.22	32.13	32.13	30.94	
	0.091	30.94	39.27	35.70	34.51	33.32	

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่า SV<sub>30</sub> 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ ข1 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ความขุ่นน้ำดิบตั้งคราะห์ 50 NTU (ต่อ)

รายการ	ความเร็ว ใบพัด	ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น, T <sub>0</sub> (NTU)				ความขุ่นตกค้าง, T (NTU)				ปริมาตรตะกอน, SV <sub>30</sub> (มล./ล)			
		ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3	1		2	3	1		2	3		
5min (2G0.303)	(รอบต่อนาที)												
	15	50.20	50.00	49.90	50.03	8.40	8.60	8.60	8.53	32.13	35.70	35.70	34.51
	45	50.00	50.20	50.00	50.07	5.70	5.65	5.75	5.70	35.70	35.70	35.70	35.70
	75	50.10	50.20	50.10	50.13	5.90	5.15	5.35	5.47	32.13	32.13	32.13	32.13
	105	50.40	50.20	50.00	50.20	5.93	5.90	6.00	5.94	28.56	28.56	28.56	28.56
5min (4G0.303)	135	50.00	50.20	50.20	50.13	6.70	6.60	6.50	6.60	28.56	28.56	28.56	28.56
	15	50.20	50.00	50.20	50.13	7.20	7.20	7.50	7.30	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.30	50.20	50.10	50.20	5.10	4.80	4.95	4.95	35.70	35.70	35.70	35.70
	75	49.90	50.00	50.20	50.03	5.30	5.20	5.10	5.20	32.13	32.13	32.13	32.13
	105	50.20	50.00	49.90	50.03	6.03	6.05	5.98	6.02	32.13	32.13	32.13	32.13
5min (6G0.303)	135	50.00	49.90	49.90	49.93	7.30	7.33	7.45	7.36	28.56	28.56	28.56	28.56
	15	50.20	49.80	49.90	49.97	8.80	8.95	8.45	8.73	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.20	50.00	50.00	50.07	5.15	5.35	5.05	5.18	32.13	35.70	35.70	34.51
	75	50.00	50.20	50.10	50.10	5.35	5.20	5.12	5.22	32.13	32.13	32.13	32.13
	105	50.20	50.00	50.00	50.07	5.90	5.95	6.10	5.98	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	50.20	50.00	49.80	50.00	6.98	6.80	6.85	6.88	32.13	32.13	32.13	32.13

ตารางที่ ข1 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ความขุ่นน้ำดิบตั้งคราะห์ 50 NTU (ต่อ)

รายการ	ความเร็ว ใบพัด	ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น, $T_0$ (NTU)				ความขุ่นตกค้าง, T (NTU)				ปริมาตรตะกอน, $SV_{30}$ (มล./ล)			
		ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	(รอบต่อนาที)	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
5min (2G0.152)	15	50.00	49.80	49.80	49.87	7.10	7.40	7.20	7.23	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.20	50.00	50.00	50.07	4.85	4.95	4.90	4.90	35.70	39.27	39.27	38.08
	75	50.00	49.90	49.90	49.93	4.10	4.25	4.20	4.18	32.13	35.70	35.70	34.51
	105	49.80	49.90	50.10	49.93	5.20	4.95	5.00	5.05	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	50.00	50.20	50.00	50.07	6.20	6.20	6.50	6.30	32.13	32.13	32.13	32.13
5min (4G0.152)	15	50.30	50.10	50.20	50.20	6.95	6.50	6.70	6.72	35.70	32.13	32.13	33.32
	45	50.00	50.20	49.80	50.00	5.00	4.80	4.45	4.75	35.70	39.27	39.27	38.08
	75	50.20	50.10	50.00	50.10	4.25	4.30	4.20	4.25	32.13	35.70	35.70	34.51
	105	49.80	49.90	50.20	49.97	4.80	4.40	4.35	4.52	35.70	35.70	35.70	35.70
	135	50.00	49.90	49.90	49.93	5.45	5.50	5.80	5.58	35.70	35.70	35.70	35.70
5min (6G0.152)	15	50.20	50.20	50.10	50.17	6.65	6.90	6.50	6.68	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.00	50.20	50.10	50.10	4.15	4.25	4.10	4.17	35.70	39.27	39.70	38.22
	75	50.10	50.10	50.00	50.07	4.10	3.95	3.95	4.00	32.13	32.13	32.13	32.13
	105	49.90	49.90	50.00	49.93	5.60	5.40	5.50	5.50	32.13	32.13	32.13	32.13
	135	50.20	49.80	49.90	49.97	6.50	6.40	6.70	6.53	28.56	32.13	32.13	30.94

ตารางที่ ข1 ผลการทดลองในถังผสมที่ใช้ตาข่ายที่เวลาเก็บกัก 5 นาที ความขุ่นน้ำดิบตั้งคราะห์ 50 NTU (ต่อ)

รายการ	ความเร็ว ใบพัด (รอบต่อนาที)	ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น, $T_0$ (NTU)				ความขุ่นตกค้าง, $T$ (NTU)				ปริมาตรตะกอน, $SV_{30}$ (มล./ล)			
		ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
5min (2G0.091)	15	50.20	50.00	49.80	50.00	6.50	6.35	6.02	6.29	32.13	32.13	32.13	32.13
	45	49.80	50.20	50.20	50.07	4.45	4.45	4.50	4.47	39.27	39.27	39.27	39.27
	75	49.90	49.90	50.20	50.00	4.10	3.95	4.08	4.04	32.13	35.70	35.70	34.51
	105	49.90	50.00	50.10	50.00	4.05	4.40	4.30	4.25	35.70	35.70	35.70	35.70
	135	50.20	49.90	50.00	50.03	4.65	4.45	4.60	4.57	32.13	32.13	32.13	32.13
5min (4G0.091)	15	50.30	50.00	49.80	50.03	7.00	6.90	6.80	6.90	35.70	35.70	35.70	35.70
	45	50.10	49.90	49.80	49.93	4.30	4.45	4.40	4.38	39.27	39.27	39.27	39.27
	75	50.00	49.90	50.10	50.00	4.30	4.20	4.35	4.28	35.70	39.27	39.27	38.08
	105	50.20	50.10	50.20	50.17	4.60	4.50	4.55	4.55	35.70	35.70	35.70	35.70
	135	50.10	50.20	50.00	50.10	4.80	4.78	4.85	4.81	35.70	35.70	35.70	35.70
5min (6G0.091)	15	50.20	50.00	49.90	50.03	7.15	7.15	6.90	7.07	28.56	32.13	32.13	30.94
	45	50.20	50.00	49.80	50.00	4.20	4.25	4.20	4.22	39.27	39.27	39.27	39.27
	75	50.40	50.30	50.10	50.27	4.30	4.08	4.25	4.21	35.70	35.70	35.70	35.70
	105	50.30	50.20	50.00	50.17	4.90	4.99	4.95	4.95	32.13	35.70	35.70	34.51
	135	50.10	50.00	49.90	50.00	5.60	5.25	5.90	5.58	28.56	35.70	35.70	33.32

ตารางที่ ข2 สรุปข้อมูลผลการทดลองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นเวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น

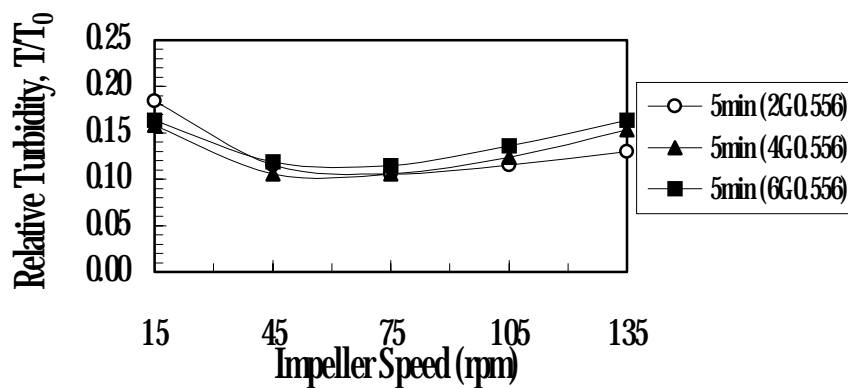
จำนวนตาข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (Solidity ratio)	ความขุ่นเริ่มต้น (NTU) ที่ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					ความขุ่นตกค้าง (NTU) ที่ความเร็วใบพัด (รอบต่อนาที)					จำนวน ตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	15	45	75	105	135	
2	0.556	50.17	50.03	50.05	50.00	50.07	9.25	5.77	5.30	5.77	6.48	90
	0.303	50.03	50.07	50.13	50.20	50.13	8.53	5.70	5.47	5.94	6.60	
	0.152	49.87	50.07	49.93	49.93	50.07	7.23	4.90	4.18	5.05	6.30	
	0.091	50.00	50.07	50.00	50.00	50.03	6.29	4.47	4.04	4.25	4.57	
4	0.556	50.00	50.00	50.00	50.10	50.07	7.90	5.27	5.30	6.20	7.68	90
	0.303	50.13	50.20	50.03	50.03	49.93	7.30	4.95	5.20	6.02	7.36	
	0.152	50.20	50.00	50.10	49.97	49.93	6.72	4.75	4.25	4.52	5.58	
	0.091	50.03	49.93	50.00	50.17	50.10	6.90	4.38	4.28	4.55	4.81	
6	0.556	50.00	50.00	49.93	50.07	50.00	8.17	5.95	5.73	6.83	8.18	90
	0.303	49.97	50.07	50.10	50.07	50.00	8.73	5.18	5.22	5.98	6.88	
	0.152	50.17	50.10	50.07	49.93	49.97	6.68	4.17	4.00	5.50	6.53	
	0.091	50.03	50.00	50.27	50.17	50.00	7.07	4.22	4.21	4.95	5.58	

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่าความขุ่น 3 ตัวอย่าง

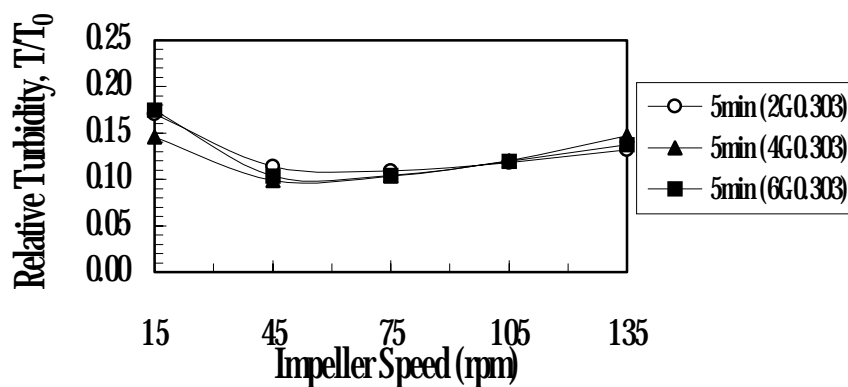
ตารางที่ ข3 สรุปข้อมูลผลการทดลอง SV<sub>30</sub> เวลาเก็บกัก 5 นาที การผสมที่ใช้ตาข่าย 2-6 แผ่น

จำนวนตาข่าย (แผ่น)	ค่าความทึบ (Solidity ratio)	ความเร็วไหลพัด (รอบต่อนาที)					จำนวน ตัวอย่าง
		15	45	75	105	135	
2	0.556	33.32	35.70	34.51	32.13	32.13	60
	0.303	34.51	35.70	32.13	28.56	28.56	
	0.152	30.94	38.08	34.51	32.13	32.13	
	0.091	32.13	39.27	34.51	35.70	32.13	
4	0.556	30.94	35.70	33.32	32.13	32.13	60
	0.303	30.94	35.70	32.13	32.13	28.56	
	0.152	33.32	38.08	34.51	35.70	35.70	
	0.091	35.70	39.27	38.08	35.70	35.70	
6	0.556	33.32	34.51	32.13	32.13	28.56	60
	0.303	30.94	34.51	32.13	32.13	32.13	
	0.152	30.94	38.22	32.13	32.13	30.94	
	0.091	30.94	39.27	35.70	34.51	33.32	

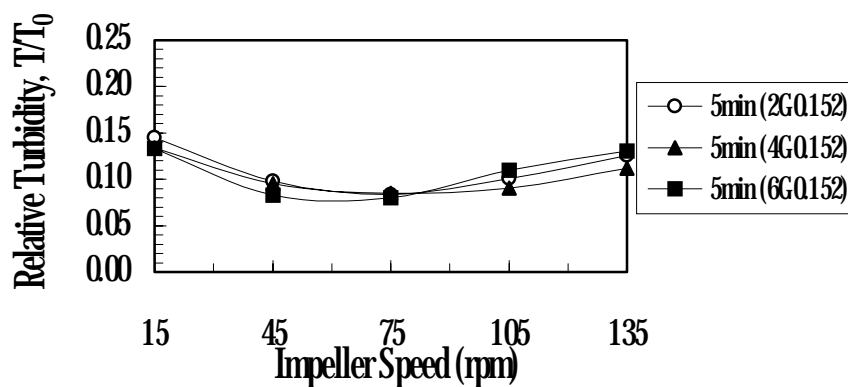
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่า SV<sub>30</sub> 3 ตัวอย่าง



รูปที่ ข1 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.556

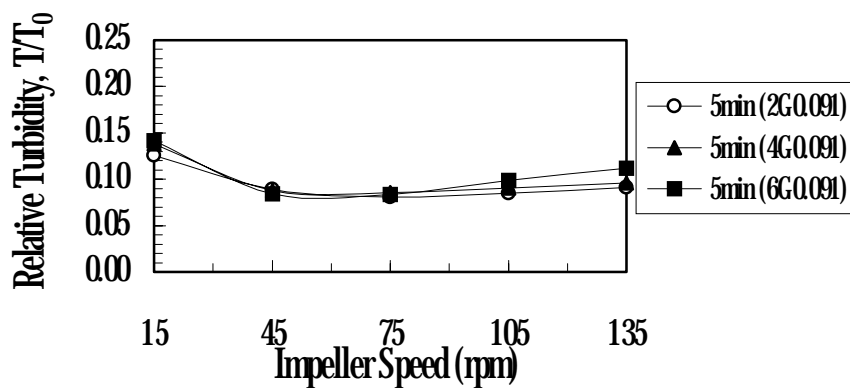


รูปที่ ข2 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.303

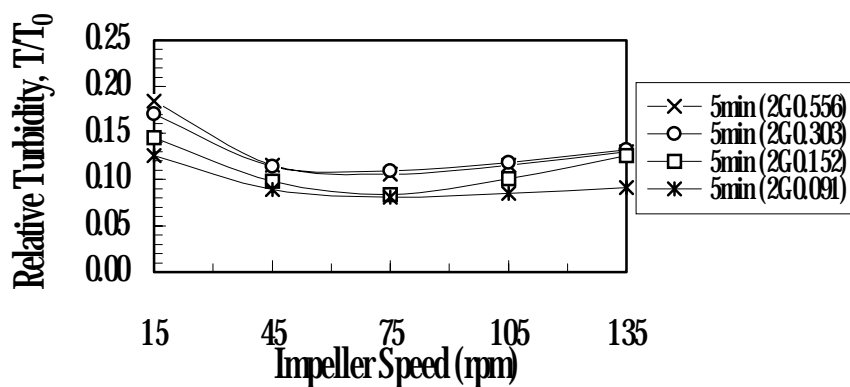


รูปที่ ข3 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.152

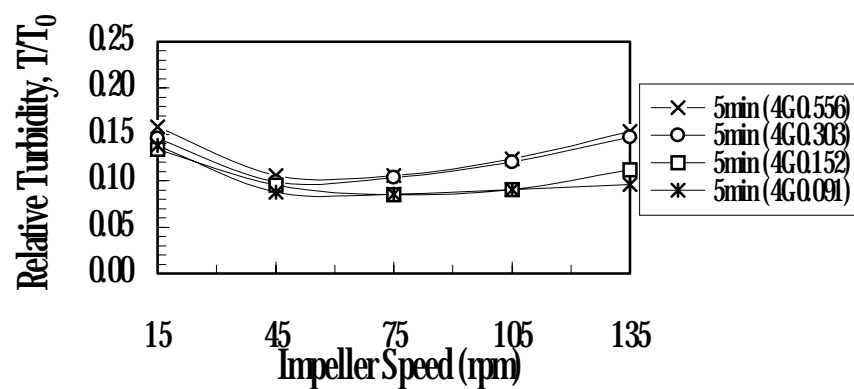




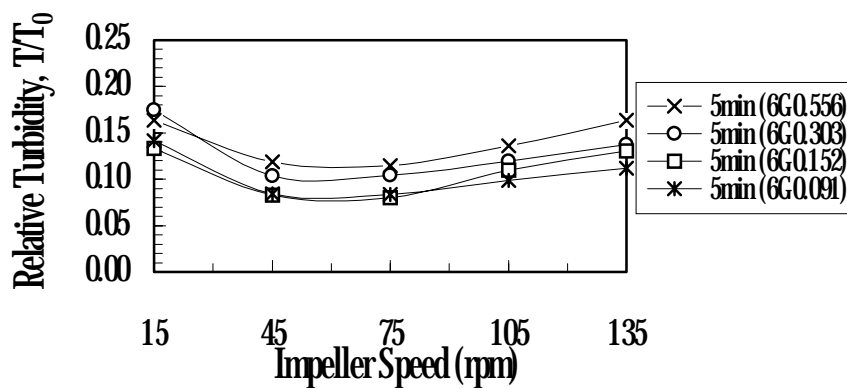
รูปที่ ข4 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091



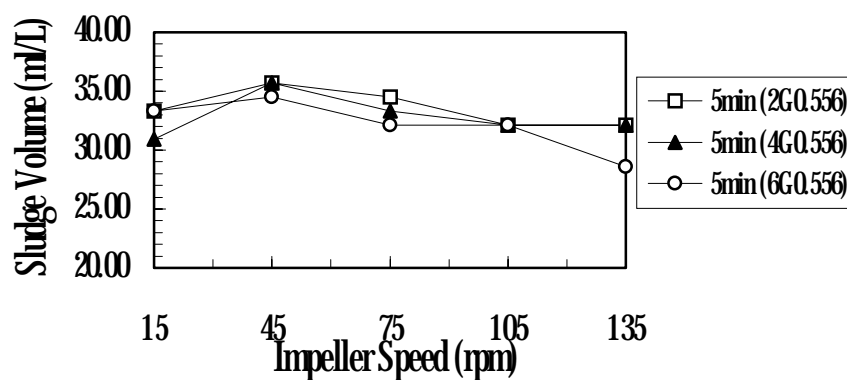
รูปที่ ข5 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 2 แผ่น



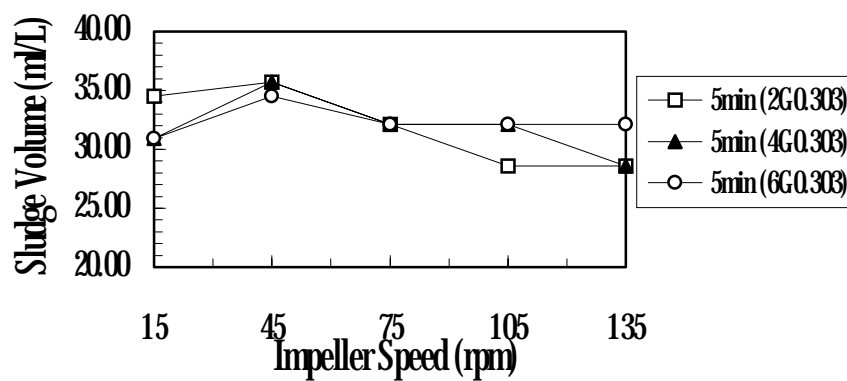
รูปที่ ข6 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 4 แผ่น



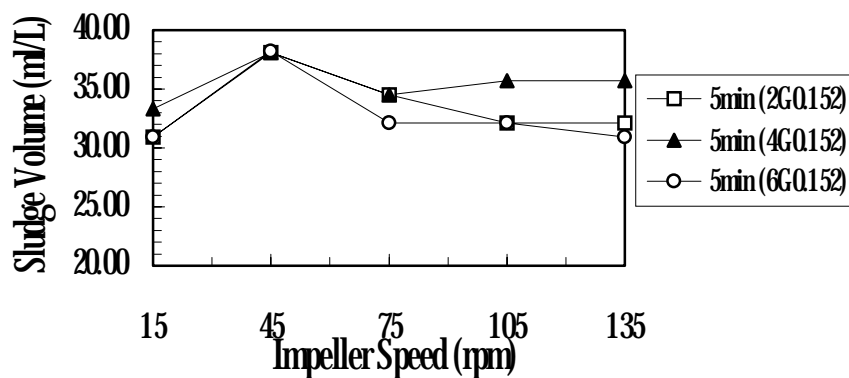
รูปที่ ข7 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายจำนวน 6 แผ่น



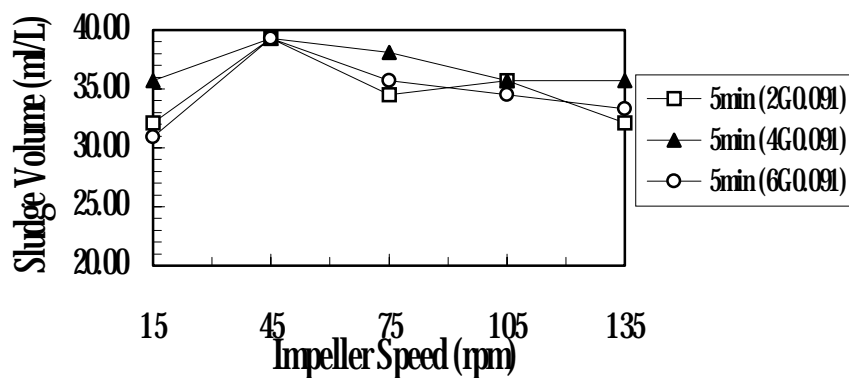
รูปที่ ข8 SV<sub>30</sub> ของตาข่ายค่าความทึบ 0.556



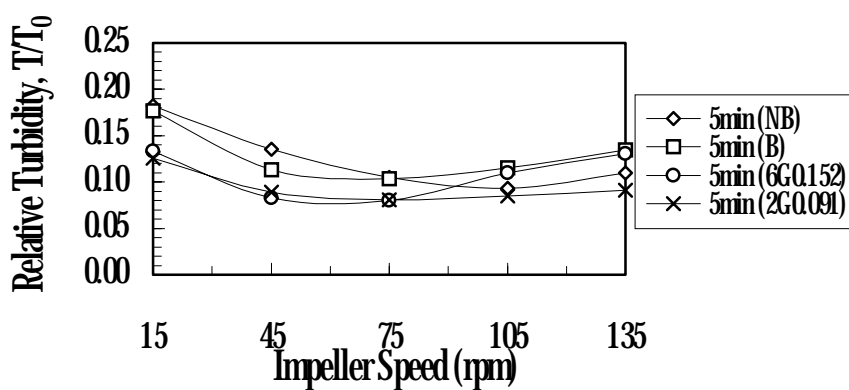
รูปที่ ข9 SV<sub>30</sub> ของตาข่ายค่าความทึบ 0.303



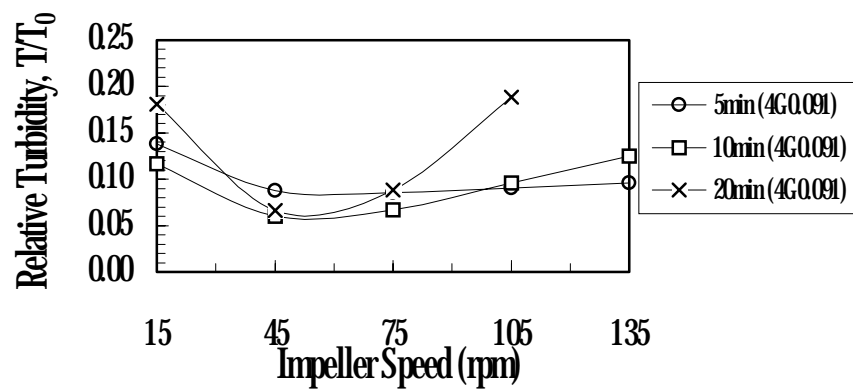
รูปที่ ข10 SV<sub>30</sub> ของตาข่ายค่าความถี่ 0.152



รูปที่ ข11 SV<sub>30</sub> ของตาข่ายค่าความถี่ 0.091



รูปที่ ข12 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นในถังผสม 3 ลักษณะที่เวลาเก็บกัก 5 นาที



รูปที่ ข13 ประสิทธิภาพการลดความขุ่นของตาข่ายค่าความทึบ 0.091  
เวลาเก็บกัก 5, 10 และ 20 นาที

ภาคผนวก ค  
การทดสอบทางสถิติ

ตารางที่ ค1 การทดสอบค่า Paired-Samples T-Test เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของถังผสมทั้ง 3 ลักษณะที่ความขุ่นเดียวกัน

### Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	NB25NTU - B25NTU	.9260	.4753	.2126	.3358	1.5162	4.356	4	.012
Pair 2	NB25NTU - G25NTU	1.5480	.3741	.1673	1.0835	2.0125	9.252	4	.001
Pair 3	B25NTU - G25NTU	.6220	.5444	.2434	-.5E-02	1.2979	2.555	4	.063
Pair 4	NB100NTU - B100NTU	1.8000	.6695	.2994	.9687	2.6313	6.012	4	.004
Pair 5	NB100NTU - G100NTU	3.7700	1.0631	.4754	2.4499	5.0901	7.929	4	.001
Pair 6	B100NTU - G100NTU	1.9700	.7973	.3566	.9800	2.9600	5.525	4	.005
Pair 7	NB_NATUR - B_NATUR	-5.1220	.6834	.3056	-5.9706	-4.2734	-16.758	4	.000
Pair 8	NB_NATUR - G_NATUR	-4.1760	.7076	.3164	-5.0546	-3.2974	-13.197	4	.000
Pair 9	B_NATUR - G_NATUR	.9460	.5295	.2368	.2886	1.6034	3.995	4	.016

- หมายเหตุ 1. NB25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น
2. B25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น
3. G25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย
4. NB100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น
5. B100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น
6. G100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย
7. NB\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น
8. B\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น
9. G\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย

ตารางที่ ค2 การทดสอบค่า Paired-Samples T-Test เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพ  
ในการลดความขุ่นของถังผสมทั้ง 3 ลักษณะที่ความขุ่นต่างกัน

### Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	NB25NTU - NB100NTU	-1.8960	.6459	.2888	-2.6979	-1.0941	-6.564	4	.003
Pair 2	NB25NTU - NB_NATUR	7.3400	.6218	.2781	6.5679	8.1121	26.395	4	.000
Pair 3	NB100NTU - NB_NATUR	9.2360	.7259	.3246	8.3347	10.1373	28.452	4	.000
Pair 4	B25NTU - B100NTU	-1.0220	.8128	.3635	-2.0312	-1.E-02	-2.812	4	.048
Pair 5	B25NTU - B_NATUR	1.2920	.6137	.2744	.5300	2.0540	4.708	4	.009
Pair 6	B100NTU - B_NATUR	2.3140	.5585	.2498	1.6206	3.0074	9.265	4	.001
Pair 7	G25NTU - G100NTU	.3260	.9519	.4257	-.8559	1.5079	.766	4	.486
Pair 8	G25NTU - G_NATUR	1.6160	.3157	.1412	1.2240	2.0080	11.445	4	.000
Pair 9	G100NTU - G_NATUR	1.2900	1.2490	.5586	-.2609	2.8409	2.309	4	.082

- หมายเหตุ 1. NB25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น  
 2. B25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น  
 3. G25NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 25 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย  
 4. NB100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น  
 5. B100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น  
 6. G100NTU = น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่น 100 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย  
 7. NB\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น  
 8. B\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ใช้แผ่นกั้น  
 9. G\_NATUR = น้ำดิบธรรมชาติความขุ่น 9.85-17.53 NTU ในถังผสมที่ใช้ตาข่าย

ภาคผนวก ง  
การคำนวณค่าความเร็วแอมเพียส์



### การคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient)

ความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมการดำเนินงานในกระบวนการการผสมเร็วและการสร้างฟล็อก (Rapid mixing and Flocculation) ซึ่งมีค่าที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 20-74 ต่อวินาที เนื่องจากการทดลองใช้ความเร็วใบพัดเปรียบเทียบกับกำลังที่ถ่ายลงสู่น้ำ ดังนั้นกำลังที่ใช้และค่าความเร็วเกรเดียนท์สามารถคำนวณจากสมการ 2-21 และ 2-24

กำลังที่ใช้ในการกวน

$$P = K_T n^3 D^5 \rho \quad (2-21)$$

โดยที่  $P$  = power imparted to the water, N-m/s

$K_T$  = Impeller constant for Turbulent flow (4.2)

$n$  = impeller speed, rps

$D$  = impeller diameter, (0.125 m)

$\rho$  = density of the liquid, kg/m<sup>3</sup> (at 30°C,  $\rho$  = 995.68 kg/m<sup>3</sup>)

ค่าความเร็วเกรเดียนท์

$$G = (\phi_m / \mu)^{1/2} = (P / \mu V)^{1/2} \quad (2-24)$$

โดยที่  $G$  = velocity gradient, sec<sup>-1</sup>

$W$  = power imparted to the water per unit volume of the basin, N-m/s-m<sup>3</sup>

$P$  = power imparted to the water, N-m/s

$V$  = basin volume, m<sup>3</sup> (0.1 m<sup>3</sup>)

$\mu$  = absolute viscosity of water, (at 30°C,  $\mu$  = 0.8004x10<sup>-3</sup> N-s/m<sup>2</sup>)

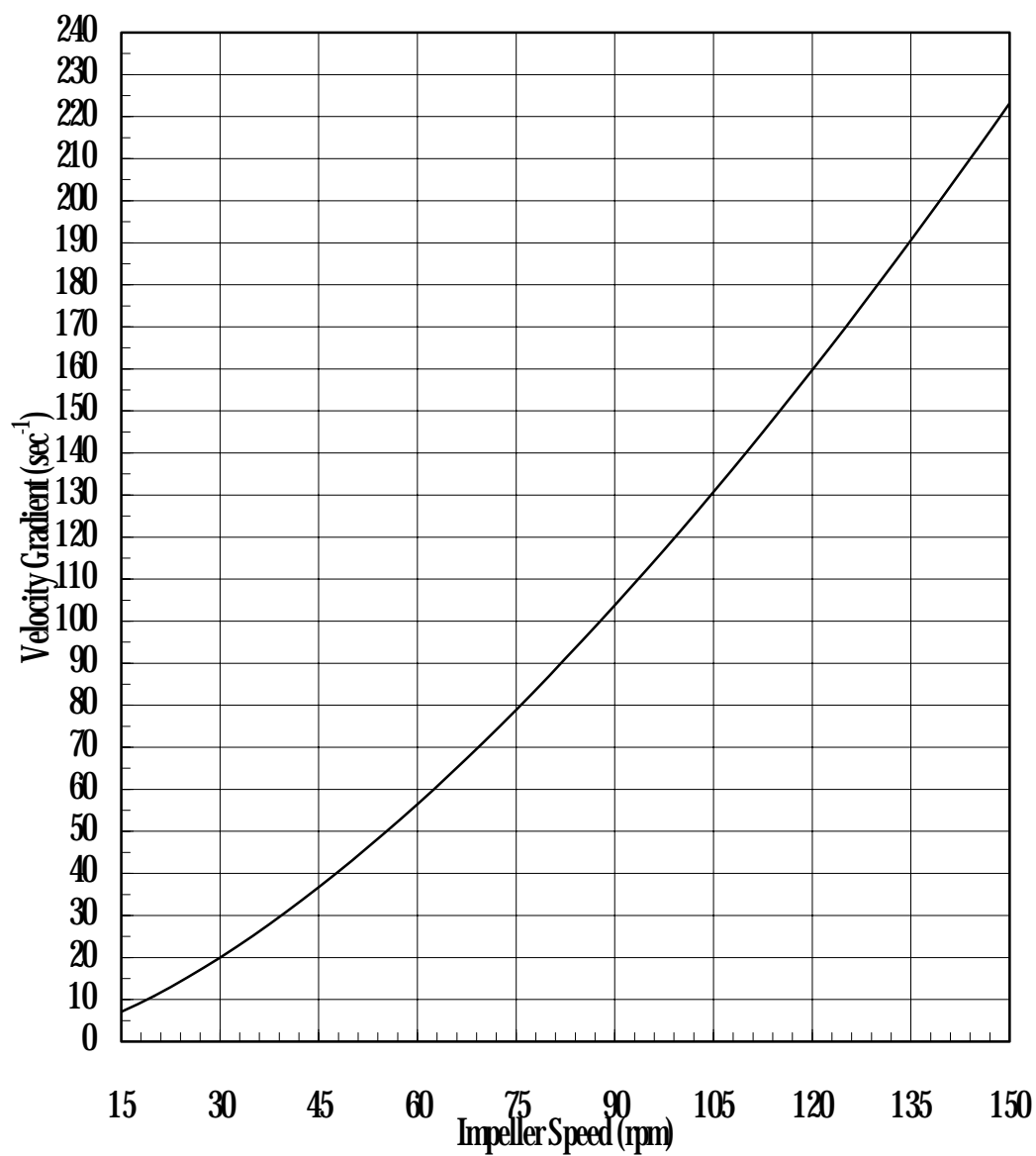
ตัวอย่างการคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ความเร็วใบพัด 54 รอบต่อนาที และใช้ใบพัด 2 ชั้น

$$\begin{aligned} P &= (2)(4.2)(0.9 \text{ rps})^3 (0.125 \text{ m})^5 (995.68 \text{ kg/m}^3) \\ &= 0.1861 \text{ N-m/s} \end{aligned}$$

แทนค่า P ใน (2-24)

$$\begin{aligned} G &= (0.1861 \text{ N-m/s} / (0.8004 \times 10^{-3} \text{ N-s/m}^2)(0.1 \text{ m}^3))^{1/2} \\ &= 48.219 \text{ sec}^{-1} \end{aligned}$$

ในกรณีช่วงความเร็วใบพัด 15-135 รอบต่อนาที เมื่อคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์จะได้เท่ากับ 7.06-190.59 ต่อวินาที แสดงในรูปที่ ง1



รูปที่ ง1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วใบพัดและความเร็วแกรเดียนท์

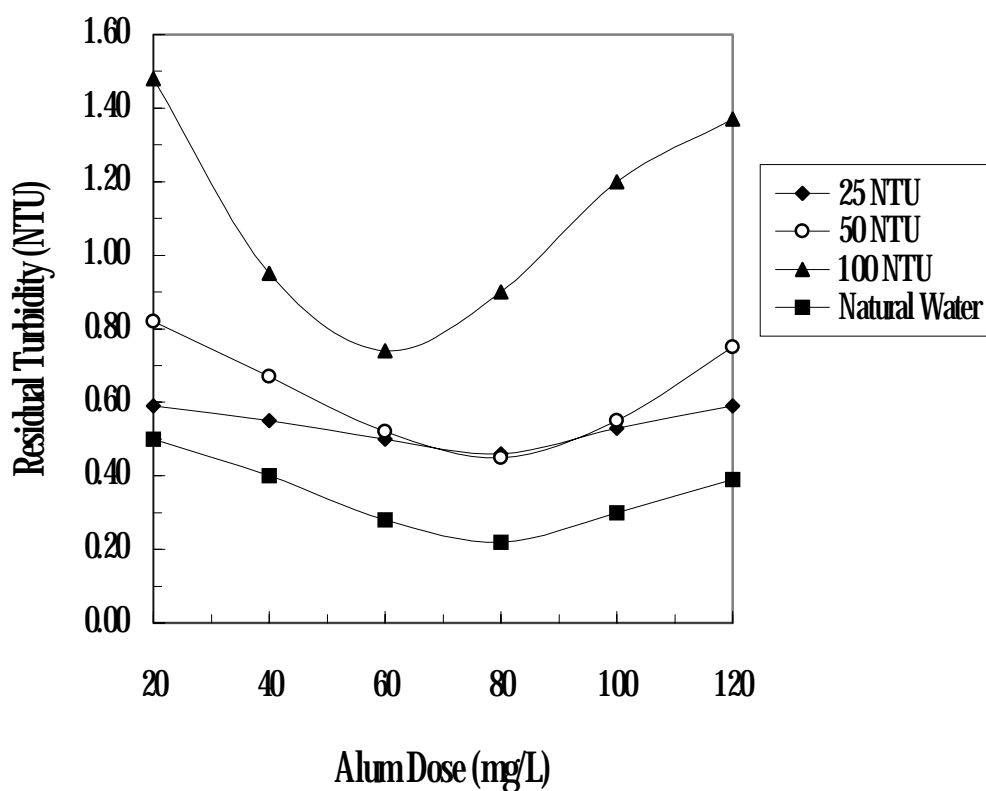
ภาคผนวก จ

การกำหนดช่วงค่าความเร็วแรงแดิยอนท์ที่เหมาะสม

ภาคผนวก จ  
ความต้องการปริมาณสารส้ม

ตารางที่ ๑1 ผลการทดลองหาความต้องการปริมาณสารส้มของน้ำดิบสังเคราะห์และน้ำดิบธรรมชาติ

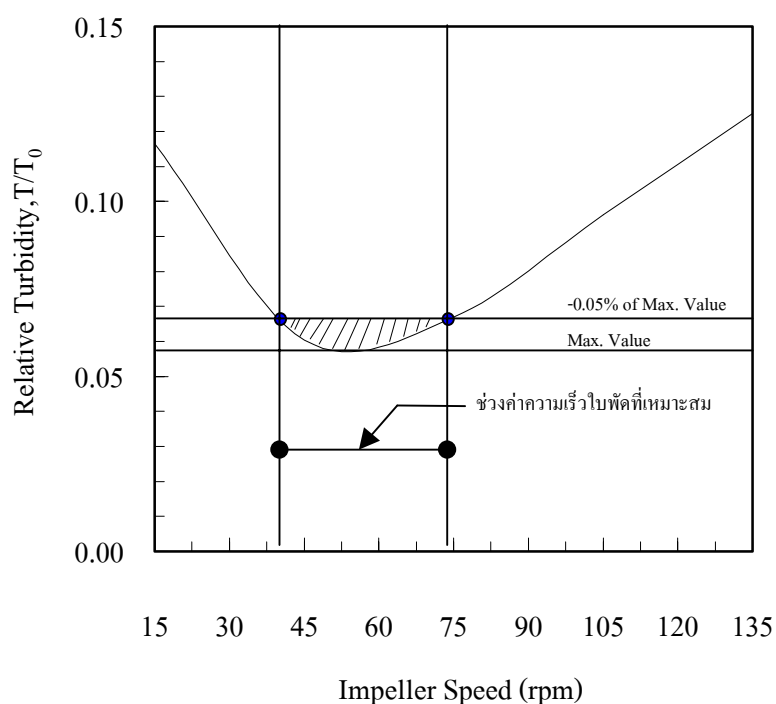
ความเข้มข้นของ สารส้ม (มก./ล)	ความขุ่นตกค้าง (NTU)			
	25 NTU	50 NTU	100 NTU	น้ำดิบธรรมชาติ
20	0.59	0.82	1.48	0.50
40	0.55	0.67	0.95	0.40
60	0.50	0.52	0.74	0.28
80	0.46	0.45	0.90	0.22
100	0.53	0.55	1.20	0.30
120	0.59	0.75	1.37	0.39



รูปที่ ๑1 ความต้องการปริมาณสารส้มของน้ำดิบ

### การกำหนดช่วงค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสม

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสม (Optimum Velocity Gradient Values,  $\bar{G}$ ) คือค่าความเร็วแรงแเดียนท์ที่ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นต่ำกว่าประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงสุดที่ค่าตัวแปรการผสมหนึ่งๆ ร้อยละ 0.5 โดยนำค่าช่วงความเร็วใบพัดที่เหมาะสมมาคำนวณค่าความเร็วแรงแเดียนท์จากสมการที่ 2-21 และ 2-24 (ดูภาคผนวก ง) ตัวอย่างการกำหนดช่วงค่าความเร็วใบพัดที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ ๑1

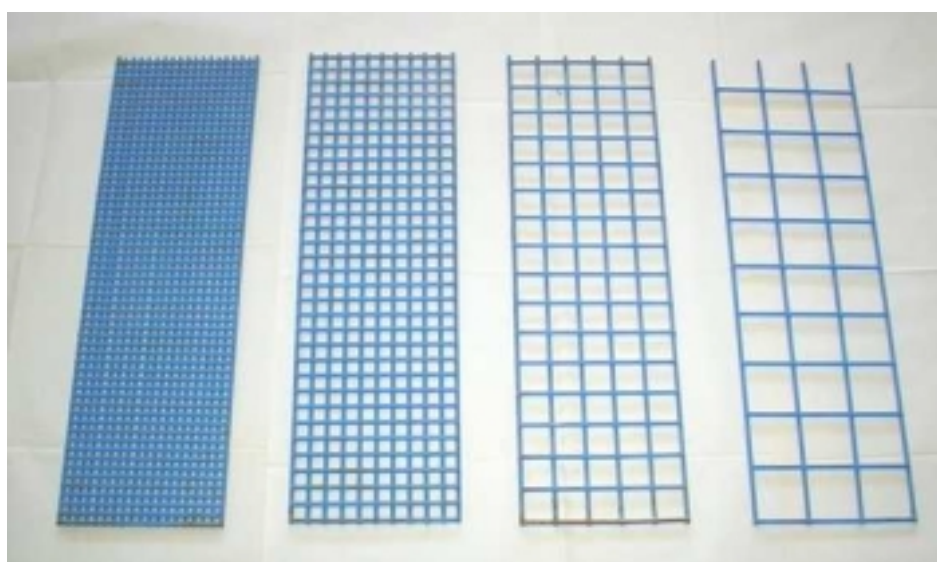


รูปที่ ๑1 การกำหนดค่าความเร็วใบพัดที่เหมาะสม

ภาคผนวก ช  
รูปถ่ายอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ ซ1 แบบจำลองและอุปกรณ์การทดลอง

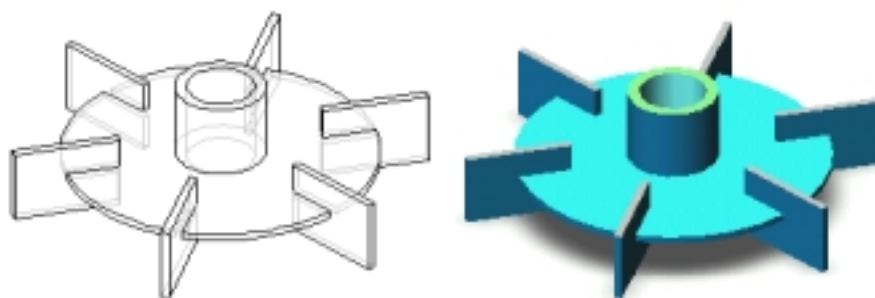


รูปที่ ซ2 ตาข่ายที่ใช้ในการทดลอง

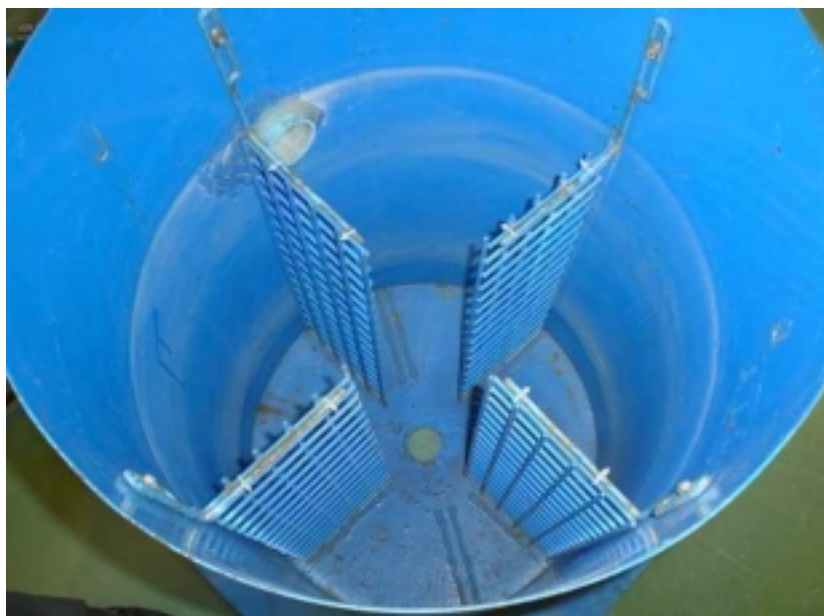




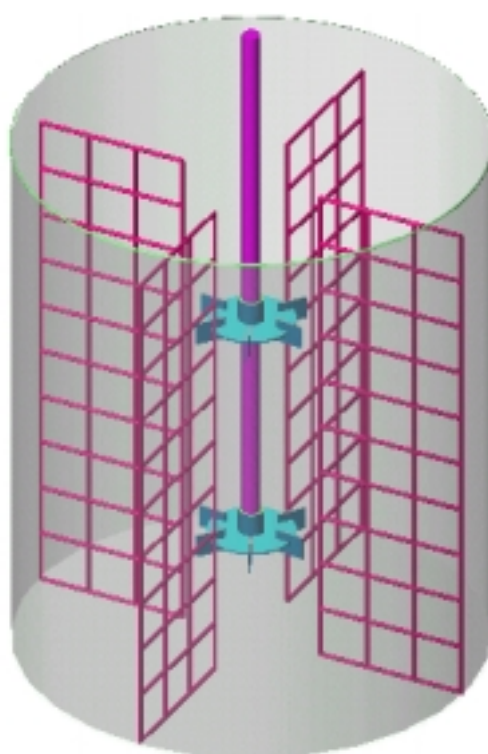
รูปที่ ช3 ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์ 2 ชั้น



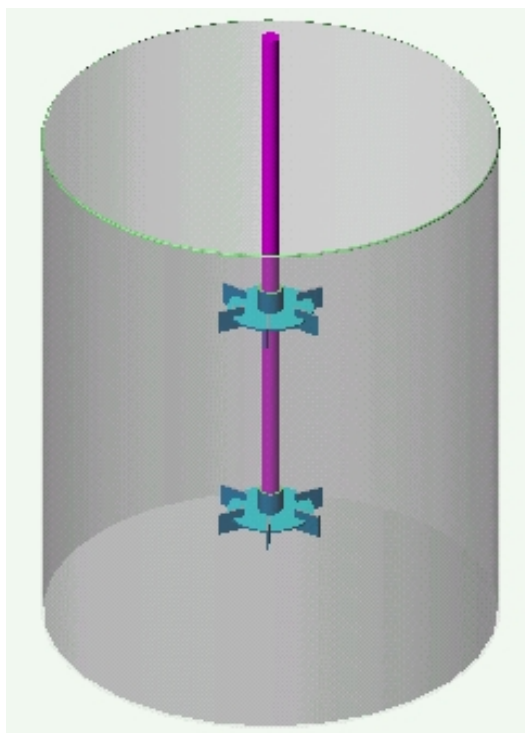
รูปที่ ช4 รูป 3 มิติ ใบพัดรัศมีทอนเทอร์ไบน์



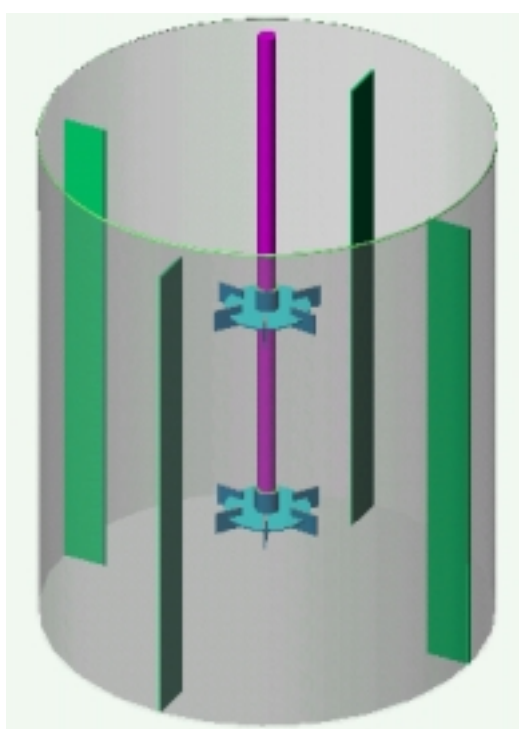
รูปที่ ๑๕ การติดตั้งตาข่ายในถังผสม



รูปที่ ๑๖ รูป 3 มิติ ถังผสมสำหรับการสร้างฟลอคที่ใช้ตาข่าย



รูปที่ ๗ รูป 3 มิติ ถึงผสมที่ไม่ใช้แผ่นกั้น



รูปที่ ๘ รูป 3 มิติ ถึงผสมที่ใช้ 4 แผ่นกั้น

## ประวัติผู้เขียน

นายปฏิกรณ์ แสนสิ่ง เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2513 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2533 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2537 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับ บริษัท เค. เอส. พี. เอ็นวายเทค จำกัด จังหวัดขอนแก่น เป็นระยะเวลา 5 ปี จากการทำงานด้านสิ่งแวดล้อมได้แก่ งานขายสินค้า งานบริการ งานออกแบบ งานก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำประปา จึงเกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนัก วิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2543