

การบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน  
TREATMENT OF SPENT BORON COMPOUND BY  
COAGULATION-FLOCCULATION PROCESS

นางสาวปวีณา	วังช้าง
นางสาวปิยดา	จินศิริ
นางสาวมุนดา	สถามเต๊ะ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

TREATMENT OF SPENT BORON COMPOUND BY  
COAGULATION-FLOCCULATION PROCESS

นางสาวปวีณา	วังซัง
นางสาวปิยดา	จินศิริ
นางสาวมุนาดา	สถามเต๊ะ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**TREATMENT OF SPENT BORON COMPOUND BY  
COAGULATION-FLOCCULATION PROCESS**

<b>MISS PAWEENA</b>	<b>WANGCHANG</b>
<b>MISS PIYADA</b>	<b>JINSIRI</b>
<b>MISS MUNADA</b>	<b>SALAMTEH</b>

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน  
Treatment of Spent Boron Compound by Coagulation-Flocculation  
Process


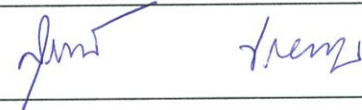
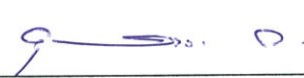
ชื่อนักศึกษา นางสาวปวีณา ว่างัง  
นางสาวปิยดา จินศิริ  
นางสาวมุนาดา สลามาเต๊ะ

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
ผศ.ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน	
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปวีณา	วังซัง
	นางสาวปิยดา	จินศิริ
	นางสาวมุนาดา	สลามเต๊ะ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
ปีการศึกษา	2556	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์	ถาวรชัยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เพื่อนำน้ำยาโบรอนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา โดยใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารส้ม ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอน และความเร็วรอบในการปั่นกวนเร็ว จากการศึกษาพบว่าสถานะที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี และอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้ดีที่สุดคือการใช้สารส้มเกรดวิเคราะห์ที่ความเข้มข้น 3.0 กรัมต่อลิตร หรือการใช้สารส้มเกรดทางการค้าที่ความเข้มข้น 3.5 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 8 กวนเร็วที่ 150 รอบต่อนาที 3 นาที กวนช้าที่ 60 รอบต่อนาที 3 นาที น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มเกรดวิเคราะห์มีค่าความขุ่น 15.47 NTU สี 19 ADMI ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 110.8 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดบอริก 4.68 กรัมต่อลิตรและค่าพีเอช 4.65 น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มเกรดทางการค้ามีค่าความขุ่น 8.77 NTU สี 18 ADMI ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 115.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดบอริก 4.82 กรัมต่อลิตรและค่าพีเอช 5.68 การบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายของสารเคมีเท่ากับ 960 และ 88 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในกรณีของการใช้สารส้มเกรดวิเคราะห์และสารส้มเกรดทางการค้า ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การสร้างและรวมตะกอน, สารส้ม, โบรอน คอมพาวด์, ยาป้องกันรักษาเนื้อไม้

<b>Title</b>	Treatment of Spent Boron Compound by Coagulation-Flocculation Process	
<b>Student</b>	Paweena	Wangchang
	Piyada	Jinsiri
	Munada	Salamteh
<b>Degree</b>	Bachelor of Science	
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry	
<b>Academic Year</b>	2013	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr.Usarat Thawornchaisit	

### **ABSTRACT**

This special project studied the treatment of boron-containing solution using coagulation-flocculation process in order to recycling in the vacuum pressure impregnation method for rubber wood treatment. Aluminium sulfate or alum was used as the coagulants. Factors being investigated were chemical grade and quantity, pH of solution and rapid mixing speed. Results showed that the condition yielding the highest removal efficiency of turbidity, color and total organic carbons were 3.0 g/L of alum with AR grade and 3.5 g/L of alum with commercial grade, at pH 8, rapid mixing velocity of 150 rpm for 3 min and slow mixing velocity of 60 rpm for 3 min. The boron-containing solutions treated with the AR grade alum have the following characteristics: turbidity of 15.47 NTU, color of 19 ADMI, 110.8 mg/L TOC, 4.68 mg/L of boric concentration and pH of 4.65. Characteristics of the boron-containing solutions treated with the commercial grade alum were as follow : turbidity of 8.77 NTU, color of 18 ADMI, 115.5 mg/L TOC, 4.82 mg/L of boric concentration and pH of 5.68. Chemical cost of treatment of the solution was 960 and 88 baht per cubic meter using the AR grade and the commercial grade alum.

**Keywords:** Coagulation and Flocculation, Alum, Boron compound, Wood preservative

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อุตสารัตน์ ฉาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์คณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ และอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชามาตลอดทั้ง 4 ปี ทั้งให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้งานวิจัยเล่มนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทแปรรูปไม้ยางพารา อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยาโบรอนอัดเนื้อไม้ยางพาราที่นำมาใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพ่อ แม่และบุคคลที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ที่เป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวปวีณา	วังซัง
นางสาวปิยดา	จินศิริ
นางสาวมุนดา	สกลามเต๊ะ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา	4
2.2 น้ำยารักษาเนื้อไม้	9
2.3 การสร้างและการรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and Flocculation)	14
2.4 การกวนผสม	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	25
3.2 น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลอง	26
3.3 การดำเนินการวิจัย	26
3.4 การศึกษาหาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอน	27
3.5 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอน	28
3.6 การศึกษาผลของความเร็วยกในการปั่นกวนเร็ว	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอน	29
4.2 ผลการศึกษาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	30
4.3 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม	35
4.4 ผลการศึกษาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม	38
4.5 เปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำยาโบรอนและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้สารส้มเป็น โคแอกกูแลนต์	40
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	45
ภาคผนวก ก คุณภาพน้ำยาโบรอนวิธีการวิเคราะห์	48
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	58
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	84
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ	90
ภาคผนวก จ รูปการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติไม้ยางพารา	4
2.2 ค่าการออกฤทธิ์ของยารักษาเนื้อไม้ที่มีส่วนประกอบของเกลือโครเมต	10
2.3 สารเคมีที่ปล่อยออกมากับน้ำทิ้งจากน้ำยารักษาเนื้อไม้มีผลกระทบต่อสุขภาพ อนามัย	13
3.1 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ทำการศึกษา	26
3.2 ปริมาณสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่ใช้ในการทดลอง	27
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา	30
4.2 คุณภาพของน้ำยาโบรอนก่อน-หลังการบำบัดด้วยสารส้มตามสภาวะที่กำหนด	40
4.3 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำยาโบรอน	42
ก-1 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ	51
ข-1 น้ำยาโบรอนก่อนกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ครั้งที่ 1 เดือนมิ.ย.	59
ข-2 น้ำยาโบรอนก่อนกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ครั้งที่ 2 เดือนก.ย.	59
ข-3 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม	59
ข-4 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม	60
ข-5 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสม	60
ข-6 ค่าทรานส์มิตเตนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ของสารส้มชนิด AR grade	61
ข-7 ค่าทรานส์มิตเตนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ของสารส้มชนิด AR grade	62
ข-8 ค่าทรานส์มิตเตนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ของสารส้มชนิด AR grade	63
ข-9 ค่าทรานส์มิตเตนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ของสารส้มชนิด Commercial grade	64
ข-10 ค่าทรานส์มิตเตนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ของสารส้มชนิด Commercial grade	65

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-11 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade	66
ข-12 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	67
ข-13 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	68
ข-14 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	69
ข-15 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	70
ข-16 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	71
ข-17 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	72
ข-18 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	73
ข-19 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	74
ข-20 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade	75
ข-21 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	76
ข-22 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	77
ข-23 ค่าทรานส์มีตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอนเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade	78
ข-24 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade	79

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-25 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade	79
ข-26 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade	80
ข-27 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade	80
ข-28 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade	81
ข-29 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade	81
ข-30 ความเข้มข้นของกรดบอริก เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม	82
ข-31 ความเข้มข้นของกรดบอริก เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม	82
ข-32 ความเข้มข้นของกรดบอริกเมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสม	82
ข-33 ค่า pH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม	83
ข-34 ค่า pH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม	83
ข-35 ค่าpH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสม	83
ค-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม	85
ค-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดสีในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม	86
ค-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม	87
ค-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ความเข้มข้นของกรดบอริกในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม	88
ค-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พีเอชของน้ำยาหลังบำบัดในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม	89

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนผังกระบวนการการผลิตในอุตสาหกรรมไม้ยางพารา	5
2.2	แสดงกระบวนการรักษาเนื้อไม้โดยวิธีใช้แรงอัด	6
2.3	ขั้นตอนในการอัดน้ำยาไม้แบบเต็มเซลล์	7
2.4	ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก.) ก่อนเติมไอออน (ข.) หลังการเติมไอออน	14
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มและค่าพีเอช	17
2.6	กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มแบบจุดติดผิวและทำลายประจุ	17
2.7	กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มแบบกวาด	18
2.8	โคอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม	19
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	26
4.1	ลักษณะของน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษา	29
4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, สี, อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด(TOC), ความเข้มข้นของกรดบอริกและพีเอชของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด โดยใช้สารส้ม 2 ชนิด คือ สารส้มเกรดวิเคราะห์(AR grade) และสารส้มเกรดทางการค้า(Commercial grade)	31
4.3	ผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถของสารส้ม 2 ชนิดคือ สารส้มเกรดวิเคราะห์ (AR grade)ความเข้มข้น 3.0 g/L และ สารส้มเกรดทางการค้า(Commercial grade) ความเข้มข้น 3.5 g/L ในการฟื้นฟูสภาพน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งาน	36
4.4	ผลของความเร็วย่อยการกวนเร็วที่มีต่อคุณลักษณะของน้ำยาโบรอน โดยใช้สารส้ม 2 ชนิด คือ สารส้มเกรดวิเคราะห์(AR grade)ความเข้มข้น 3.0 g/Lและ สารส้มเกรดทางการค้า(Commercial grade) ความเข้มข้น 3.5 g/L ที่พีเอช 8	39
4.5	(ก) ลักษณะน้ำยาโบรอนก่อนบำบัด (ข) ลักษณะน้ำยาโบรอนหลังบำบัด	41
ก-1	กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน	52
ก-2	กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมพทาเลต ใช้ในการทำกราฟมาตรฐาน สารอินทรีย์ คาร์บอน (TC )	56
ก-3	กราฟมาตรฐานสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตรวมกับโซเดียมคาร์บอเนตใช้ในการทำกราฟมาตรฐานสารอนินทรีย์คาร์บอน (IC )	57
จ-1	ภาพกระบวนการสร้างตะกอนโดยใช้เครื่องทดสอบจาร์เทสต์	93

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

จ-2 ภาพกระบวนการรวมตะกอนน้ำยาโบราณ

93

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ไม้ยางพาราแปรรูปเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ของประเทศไทย ดังจะเห็นได้จากตัวเลขการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปของไทยในปีพ.ศ.2555 มีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 27.79 และร้อยละ 2.43 ตามลำดับเมื่อเทียบกับปีพ.ศ.2554 (กรมการค้าต่างประเทศ, 2556) นอกจากนี้อุตสาหกรรมและเครื่องเรือนไทยในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ใช้ไม้ยางพาราแปรรูปเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต โดยในช่วงเดือนมกราคม-สิงหาคม 2556 ได้มีการจำหน่ายไม้ยางพาราแปรรูปให้กับผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ในปริมาณสูงถึง 1.2 ล้านลูกบาศก์เมตร (กรมการค้าต่างประเทศ, 2556) ทำให้กลุ่มธุรกิจไม้ยางพาราเป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำที่สำคัญของอุตสาหกรรมไม้ยางพารา<sup>1</sup> ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ณ วันที่ 16 สิงหาคม 2556 ได้สรุปว่าทั่วประเทศมีโรงงานอบไม้ยางพาราประมาณ 53 โรงงานและมีโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราประมาณ 593 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556 อ้างถึงในกรมการค้าต่างประเทศ, 2556)

กระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูป เริ่มจากการตัดโค่นต้นยางพาราที่หมดอายุการใช้งานไม้ยางพาราจากส่วนยางแล้วนำมาชอยให้ได้ขนาดตามต้องการก่อนนำไปอัด “น้ำยาอัดขาว” “น้ำยาโบรอน” หรือสารประกอบโบรอน เข้าสู่เนื้อไม้เพื่อฆ่าเชื้อรา มอดและแมลง ตลอดจนป้องกันไม่ให้เนื้อไม้มีสีแดงขึ้น (นุจรินทร์, มปป) โดยทั่วไปน้ำยาอัดขาวซึ่งประกอบด้วยกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) และโบรเร็กซ์ ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) (เจษฎาและคณะ, 2550) นี้จะถูกนำมาใช้ซ้ำในกระบวนการอัดน้ำยาไม้ ซึ่งผลจากการใช้ติดต่อกันหลายครั้ง ทำให้น้ำยามีสีน้ำตาลคล้ำขึ้นตามจำนวนรอบของการอัดน้ำยา โดยเกิดจากการปนเปื้อนของสารพวกโพลิฟีนอล แทนนิน เพคตินและลิกนิน (จรรยาและคณะ, 2554) เมื่อนำน้ำยาที่มีสีคล้ำดังกล่าวมาใช้ซ้ำในการอัดเนื้อไม้ จะส่งผลให้คุณภาพของไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยานั้นมีสีคล้ำไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้า น้ำยาซึ่งไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปจึงเป็นของเสียที่ทางโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราต้องหาวิธีในการจัดการ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การกำจัดสีในน้ำยาอัดขาวเพื่อสามารถนำน้ำยานั้นกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ต้องทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้กระบวนการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปเป็นกระบวนการที่

---

<sup>1</sup> อุตสาหกรรมต้นน้ำ ได้แก่ กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกไม้ยางพารา อุตสาหกรรมกลางน้ำ ได้แก่ กลุ่มธุรกิจไม้ยางพาราแปรรูป และ อุตสาหกรรมปลายน้ำ ได้แก่ กลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมเครื่องเรือนและผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยไม้ยางพารา (กรมการค้าต่างประเทศ, 2556)

เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจากลดสารเคมีในการอัดน้ำยารักษาเนื้อไม้และค่าใช้จ่ายในการกักเก็บน้ำยาอัดขาวที่เสื่อมสภาพ รวมทั้งลดปริมาณของเสียที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับวิธีการกำจัดสีในสารละลายมีหลายวิธี ได้แก่ การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ลือพงศ์, 2547 อ้างถึงในเจษฎาและคณะ, 2550 ; ปฐมพร, 2549) แต่การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจะต้องปรับสภาพของน้ำยาโบรอนให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 ก่อนการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่สูงขึ้น (จรรยาและคณะ, 2554) การใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium Chloride, PACl) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ร่วมกับ coagulation aid และระบบกรองทรายเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำยาโบรอนสูงถึง 96 % และมีต้นทุนการบำบัดต่ำเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเฟนตัน เนื่องจากไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าสารเคมีในการปรับพีเอชของน้ำก่อนและหลังการกำจัดสี (จรรยาและคณะ, 2554) แต่เนื่องจากโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์จัดเป็นสารที่มีราคาสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารส้ม ประกอบกับข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการสร้าง-รวมตะกอนด้วยสารส้มมีอยู่อย่างจำกัด โครงการพิเศษนี้จึงได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยวิธีการสร้าง-รวมตะกอน (coagulation and flocculation) เพื่อนำน้ำยาอัดขาวกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำยาอัดขาวจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน โดยใช้สารส้ม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวอย่างน้ำยาอัดขาวหรือน้ำยาโบรอนได้จากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปแห่งหนึ่งในอำเภอแก่ง จังหวัดระยอง
2. ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของน้ำยาโบรอน ได้แก่ พีเอช สี ความขุ่น ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสารอินทรีย์ (TOC) และความเข้มข้นของกรดบอริก
3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่
  - เกรดของอลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$ ) หรือสารส้มที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน (เกรดวิเคราะห์กับเกรดทางการค้า)
  - ปริมาณสารส้ม (โดยแปรค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 1.5-4.5 g/L)
  - พีเอช (แปรค่า 5-10)
  - ความเร็วรอบในการปั่นกววน (60-150 รอบ/นาที)

กำหนดตัวแปรตามที่ศึกษา ได้แก่ พีเอช สี ความขุ่น TOC และความเข้มข้นของกรดบอริก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำยาโบรอนของสารส้มโดยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัด
2. เป็นแนวทางในการฟื้นฟูสภาพน้ำยาโบรอนให้นำกลับมาใช้ใหม่ได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา

#### 2.1.1 ไม้ยางพารา (รุ่งรัตน์, มปป)

ไม้ยางพาราเป็น ไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกทาสีดำ โครงสร้างภายในเมื่อมองทางด้านตัดจะเห็นท่อน้ำยาง (Latex vessel) ต่อกันเป็นวงตามแนวด้านสัมผัส (Tangential) ลักษณะเนื้อไม้มีสีขาว อมครีมหรืออมเหลือง ขณะที่ยังสดอยู่ หลังจากแห้งแล้วนำไปไสผิวหน้า ออกใหม่จะเป็นสีขาวแกมน้ำตาลอ่อนหรือแกมชมพู หลังจากทิ้งไว้ให้ถูกอากาศเป็นเวลานานๆจะมีสีเข้มขึ้นอีกเล็กน้อย มีความถ่วงจำเพาะ 0.70 ที่ความชื้นในเนื้อไม้ 12% ดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติไม้ยางพารา

	ความชื้น (%)	ความถ่วงจำเพาะ	ความแข็งแรง กก./ชม. <sup>2</sup>			ความชื้น ×100 กก./ชม. <sup>2</sup>	ความเหนียว การเคาะ	ความแข็ง กก.
			การตัด	การบีบ	การเชือด			
ไม้ยางพารา	12	0.70	973	478	162	960	2.86	538

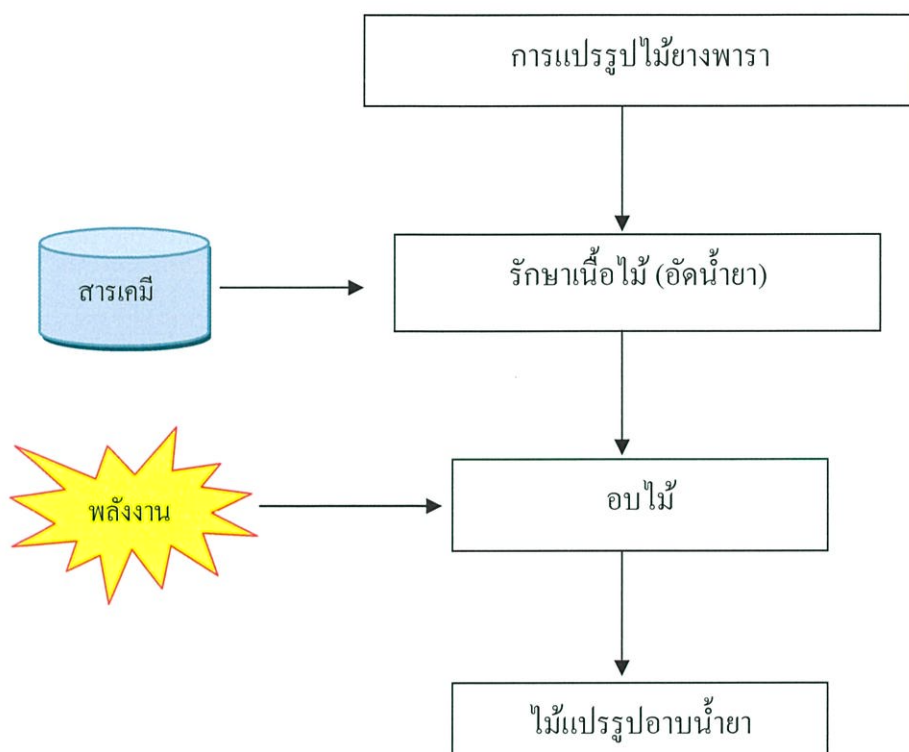
ที่มา : รุ่งรัตน์ (มปป)

#### สมบัติทางเคมีของไม้ยางพารา (108 wood.com, มปป)

คุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพาราสดโดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักอบแห้งประกอบด้วย สารแทรก (Extractives) เซลลูโลส (Cellulose) เพนโตซาน (Pentosan) ลิกนิน (Lignin) และเถ้า (Ash) บางรายงาน พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพาราแตกต่างกัน โดยเฉพาะสัดส่วนของสารแทรก ซึ่งเข้าใจว่าขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพาราและวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี สารแทรกแม้เป็นองค์ประกอบเพียงส่วนน้อยแต่จะมีบทบาทสำคัญคือ การมีปริมาณสารแทรกชนิดต่างๆอยู่มากน้อยไม่เท่ากันจะทำให้ไม้มีสีคล้ำหรือมีสีแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังทำให้มีความทนทานต่อการทำลายของแมลงและเห็ดราแตกต่างกันด้วย การมีปริมาณสารแทรกอยู่มากนั้นมีส่วนสำคัญที่ทำให้ไม่มีการคงรูปดีขึ้น การหดตัวเมื่อแห้งจะน้อยกว่าปกติและหลังจากแห้งแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างน้อย แม้ว่าจะถูกนำไปใช้งานในสภาวะอากาศที่มีความรุนแรง

## 2.1.2 ขั้นตอนการผลิตในอุตสาหกรรมไม้ยางพารา

กระบวนการผลิตแปรรูปไม้ยางพาราประกอบไปด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ ดังแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการการผลิตในอุตสาหกรรมไม้ยางพารา

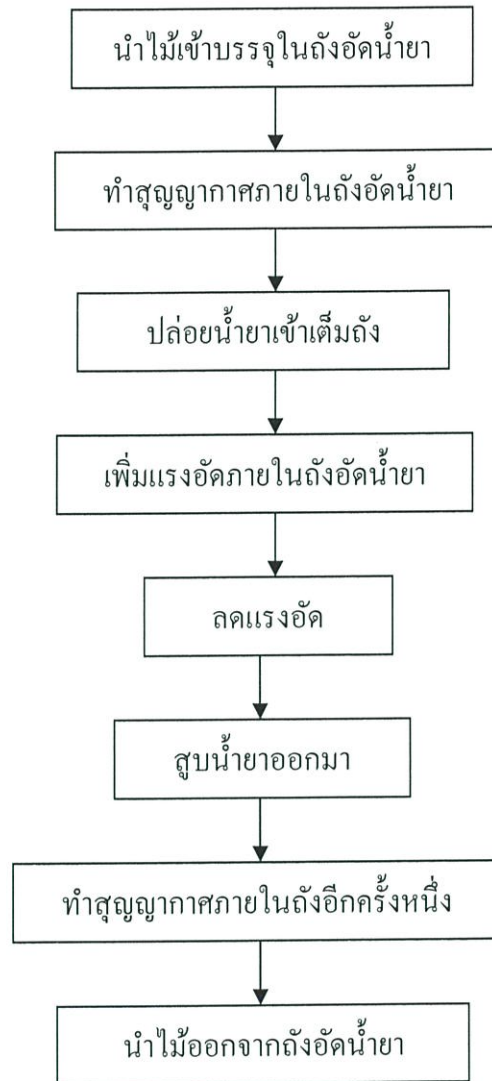
### ขั้นตอนที่ 1 การแปรรูปไม้ยางพารา

เป็นการแปรรูปต้นไม้ยางพาราเป็นไม้แผ่นให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ เริ่มจากการตัดโค่นต้นยางพาราที่หมดอายุการให้น้ำยางแล้ว ตัดทอนให้เป็นท่อนสั้นๆ จากนั้นจึงขนส่งไปโรงเลื่อยเพื่อทำการซอยไม้ยางพาราให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งไม้ยางพาราท่อนเมื่อตัดจากสวนถึงโรงงานแล้วจะต้องได้รับการแปรรูปภายใน 2 วัน ไม้จึงจะยังไม่เกิดเชื้อรา

### ขั้นตอนที่ 2 การรักษาเนื้อไม้

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีส่วนประกอบของแป้งและน้ำตาลเป็นจำนวนมากทำให้ง่ายต่อการถูกทำลายจากแมลง เมื่อตัดต้นแล้วสารต่างๆที่ประกอบกันอยู่ในลำต้นเป็นปัจจัยช่วยให้เกิดเชื้อรา และแมลงประเภทมอดปลวกชอบเข้าทำลายท่อนไม้ ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเฟอร์นิเจอร์จึงต้องทำการรักษาเนื้อไม้ก่อนโดยมีวิธีการรักษาเนื้อไม้ ดังนี้





รูปที่ 2.3 ขั้นตอนในการอัดน้ำยาไม้แบบเต็มเซลล์

1.2) การอัดน้ำยาแบบไม่เต็มเซลล์ (Empty Cell Process) เป็นการอัดน้ำยาโดยให้น้ำยาซึมเข้าไปอยู่ในผนังเซลล์ของไม้โดยไม้เข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ แบ่งออกเป็น 2 วิธีย่อยๆ คือ วิธีรูอิ่ง (Rueping) และวิธีของลอว์รี่ (Lowry) ขั้นตอนการอัดน้ำยา 2 วิธีย่อยนี้ คล้ายคลึงกับการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์ แต่หลังจากที่นำไม้เข้าบรรจุในถังอัดน้ำยาแล้วจะไม่มีการทำสุญญากาศก่อนที่จะปล่อยน้ำยาเข้าถัง การอัดน้ำยาแบบไม่เต็มเซลล์นี้นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นหมอนรถไฟ เสาไฟฟ้า เสาโทรเลข หรือไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้ให้น้ำยาซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี โดยไม้สั่นเปลือ่งน้ำยามาก ไม้ที่นำมาอัดน้ำยาตามกรรมวิธีนี้ได้ดีจะต้องเป็นไม้จำพวกที่อัดน้ำยาได้ไม่ยากนัก

1.3) การอัดน้ำยาแบบสลับระดับความดัน (Oscillation and Alternating Pressure Process) เป็นการอัดน้ำยาโดยการเปลี่ยนระดับความดันภายในถังอัดน้ำยาให้สูงๆต่ำๆสลับกันหลายๆครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์ให้น้ำยาถูกดันเข้าไปในเซลล์ของไม้ให้มากที่สุด เป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดีกับไม้พวกที่อัดน้ำยาได้ยาก สามารถใช้ได้กับทั้งไม้สดและไม้แห้งแล้ว

1.4) การอัดน้ำยาไม้โดยใช้ตัวทำละลาย (Cellon Process) เป็นสารที่หลังจากที่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวนำสารเคมีที่เป็นตัวยาป้องกันรักษาเนื้อไม้เข้าไปในเนื้อไม้แล้ว จะไม่คงอยู่ในเนื้อไม้พร้อมกับตัวยา แต่จะระเหยออกมาจากไม้ทั้งหมด ไม้ที่อัดน้ำยาเสร็จแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับไม้ที่ไม่ได้อัดน้ำยาแต่จะมีความทนทานเพิ่มขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางกว่าเดิม

**2. วิธีไม้ใช้แรงอัด** เป็นการนำน้ำยารักษาเนื้อไม้ ทา พ่น บนผิวไม้หรือไม้จุ่ม แช่ ในน้ำยารักษาเนื้อไม้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์น้อยกว่าวิธีใช้แรงอัดและสามารถประยุกต์ใช้ได้ด้วยตนเอง ไม้ที่ใช้วิธีการรักษาเนื้อไม่วิธีนี้เป็นไม้ที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ชั่วคราว ใช้งานในที่ร่ม พบแมลงและมีโอกาสเกิดเชื้อราขึ้น แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้ (Nair, 2006)

2.1) การทาและการพ่น วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทน้ำมัน และน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำ ข้อจำกัดการใช้วิธีนี้คือน้ำยาแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ไม่มากและเมื่อใช้วิธีนี้พื้นผิวไม้ต้องแห้งเพียงพอเพื่อป้องกันการฟองของน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทน้ำมัน

2.2) การแช่และการจุ่ม ข้อแตกต่างระหว่างการแช่และการจุ่มคือ การแช่ จะทำการแช่ไม้ในตู้เปิดเป็นระยะเวลาหลายวันหรือหลายสัปดาห์ ส่วนการจุ่ม เป็นการจุ่มไม้ในอ่างน้ำยาในช่วงขณะหนึ่ง

2.3) การแพร่ วิธีนี้มี 2 กลไกในการรักษาป้องกันเนื้อไม้ คือสารเคมีจะแพร่จากความเข้มข้นสูง (สารละลาย) ไปสู่ความเข้มข้นต่ำ (น้ำที่อยู่ในเนื้อไม้) โดยไม้จะต้องมีความชื้นเพียงพอเพื่อให้เกิดการแพร่ของสารเคมีได้ง่ายขึ้น

### ขั้นตอนที่ 3 การอบไม้ยางพารา

การอบไม้ (บางรักษ์, 2547) หมายถึง ขบวนการทำให้ความชื้นหรือน้ำระเหยออกจากเนื้อไม้ที่สดหรือมีความชื้นมากเกินไป โดยเหลือปริมาณความชื้นอยู่ในเนื้อไม้ได้ส่วนสมดุลกับบรรยากาศที่อยู่โดยรอบ จะทำภายในเตาอบอาศัยพลังงานความร้อนจากหม้อไอน้ำ (Boiler) มีการใช้พลังงานความร้อนสูงมาก โดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาเศษไม้และฟืน ในการอบไม้ ไม้ยางพาราจะถูกจัดเรียงบนพาเลทโดยวางไม้เว้นเป็นระยะ เพื่อเป็นช่องทางผ่านให้เกิดการกระจายลมร้อนได้ทั่วถึง การให้อุณหภูมิความร้อนเริ่มที่ 60 องศา ไปเรื่อยๆจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แต่จะไม่เกิน 90-95 องศา เมื่อผ่านการอบแล้วระดับความชื้นในเนื้อไม้จะอยู่ที่ 8-16 % หรือโดยเฉลี่ย 12%

## 2.2 น้ำยารักษาเนื้อไม้

น้ำยารักษาเนื้อไม้เป็นสารที่ช่วยป้องกันความเสียหายของไม้ทางชีวภาพ เพราะมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโต และยังเป็นพิษต่อเชื้อรา เพรียง แมลง เมื่อไม้ผ่านการอบหรืออัดน้ำยารักษาเนื้อไม้แล้วจะสามารถยืดอายุการใช้งานของไม้ได้ระยะเวลายาวนานคงทนมากขึ้น

คุณสมบัติที่สำคัญที่น้ำยารักษาเนื้อไม้จะต้องมีคือ (ทรงกลด, มปป.)

1. มีความเป็นพิษสูงต่อศัตรูทำลายไม้
2. มีความคงทนอยู่ในเนื้อไม้นาน
3. มีความสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี
4. ไม่ทำให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายแก่เนื้อไม้
5. ไม่ทำให้โลหะเป็นสนิม
6. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ทำการอัดน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้และผู้ที่น่าไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยาแล้วไปใช้ประโยชน์

### 2.2.1 ประเภทของน้ำยารักษาเนื้อไม้ (ทรงกลด, มปป.)

#### 1. น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทน้ำมัน (Tar - oil preservatives)

ผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมัน การเผาถ่านหิน การผลิตปิโตรเลียม ซึ่งน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติในการรักษาเนื้อไม้ให้ผลดีมากในการกำจัดเชื้อรา เพรียง แมลง ไม่ละลายน้ำ ไม่กัดกร่อนโลหะ ส่วนใหญ่ใช้อัดไม้ที่ใช้ประโยชน์กลางแจ้งและต้องการความคงทนสูง เช่น เสาไฟฟ้า หมอนรองรถไฟ เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยป้องกันการแตกของผิวไม้ได้ดี แต่มีความเป็นพิษสูงจึงไม่นิยมนำมาใช้อัดไม้ที่จะนำมาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ภายในหรือที่อยู่อาศัย น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทน้ำมันได้แก่

1.1) Creosote เป็นน้ำมันผสมที่ได้จากผลผลิตพลอยได้ของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงมีความเป็นพิษต่อแมลง เพรียง เชื้อราสูง

1.2) Solignum เป็นน้ำมันใช้สำหรับทาไม้ บางชนิดมีการผสมสีลงไปด้วย ใช้สำหรับเป็นน้ำยาอัดไม้ทั่วไป

#### ข้อดีของน้ำยาประเภทน้ำมัน

1. ให้ผลดีมาก และเป็นที่ยอมรับกันว่าป้องกันได้ทั้งเชื้อราและแมลง
2. ช่วยลดการแตกของไม้ที่ผิว (surface Checking) จึงเหมาะสมสำหรับใช้อัดน้ำยาไม้หมอนรองรถไฟ
3. สามารถปรุงแต่งให้เป็นสีต่างๆได้
4. ไม่ทำให้โลหะเกิดสนิม
5. สามารถประยุกต์ใช้งานได้ง่ายทั้งวิธีการทา การพ่น และการจุ่ม ในกรณีที่ต้องการปกป้องผิวหน้าไม้

**ข้อเสียของน้ำยาประเภทน้ำมัน**

1. เปลืองเนื้อที่ในการขนส่งระยะไกลๆ เพราะไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปที่เข้มข้นขณะขนส่งได้
2. เป็นสารระเหยได้ และมีกลิ่นเฉพาะตัว ถึงไม่ใช่กลิ่นเหม็นแต่ก็ไม่ควรอยู่ใกล้กับอาหาร ยา เรือรบเพาะชำ เพราะสารที่ระเหยออกมาจะเป็นพิษต่อต้านพืช
3. น้ำมันมักจะปนคั่งขึ้นมาจากเนื้อไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยาโดยเฉพาะเมื่อไม่นานนั้นถูกแสงแดดซึ่งจะทำให้ผิวไม้เหนียว เปรอะเปื้อนเสื้อผ้าเมื่อถูกต้องสัมผัส
4. ไม้ที่ผ่านการอัดด้วยน้ำยาประเภทน้ำมันจะทาสีไม่ติด

**2. น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำ (Water - Borne Preservatives)**

ยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) หมายถึง ยารักษาเนื้อไม้ที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายใช้อาบไม้ด้วยวิธีการที่เหมาะสมเพื่อช่วยรักษาเนื้อไม้ให้ทนทานต่อการถูกทำลายอันเนื่องมาจากแมลง เชื้อรา เพรียง และอื่นๆ

ส่วนประกอบในน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทนี้จัดเป็นเกลือเคมีละลายในน้ำ มีคุณสมบัติป้องกันเนื้อไม้จากเชื้อรา เพรียง แมลงได้ดี ไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยาด้วยน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำจะสามารถนำไม้ไปเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสารเคมีเพื่อป้องกันไฟหรือทาสีทับลงไปได้ น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำจำแนกออกตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

2.1) น้ำยารักษาเนื้อไม้ที่ใช้กับไม้ภายนอกอาคาร มีส่วนประกอบของเกลือโครเมตเพื่อเป็นตัวช่วยในการรักษาตัวขานิคอื่นๆ ให้เกาะอยู่กับเนื้อไม้ได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น

- Acid copper chromate (ACC)
- Ammoniacal copper arsenate (ACA)
- Chromated copper arsenate (CCA)
- Copper chrome boron (CCB)
- Fluor chrome arsenate phenol (FCAP)

**ตารางที่ 2.2** ค่าการออกฤทธิ์ของยารักษาเนื้อไม้ที่มีส่วนประกอบของเกลือโครเมต

รายการที่	รายการ	เอซีซี	ซีซีเอ	ซีซีเอ			ซีซีบี	เอฟพีเอฟพี	วิธีวิเคราะห์ตาม
				สูตร A	สูตร B	สูตร C			
1	ทองแดง (คำนวณเป็น CuO) ร้อยละ	28.0 ถึง 31.8	47.7 ถึง 49.8	16.0 ถึง 20.9	18.0 ถึง 22.0	17.0 ถึง 21.0	19.0 ถึง 24.0	-	ข้อ 8.4
2	โครเมียม (คำนวณเป็น Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ร้อยละ	63.3 ถึง 68.2	-	59.4 ถึง 69.3	33.0 ถึง 38.0	44.5 ถึง 50.5	48.0 ถึง 53.0	33.0 ถึง 41.0	ข้อ 8.5
3	สารหนู (คำนวณเป็น As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ร้อยละ	-	47.6 ถึง 50.2	14.7 ถึง 19.7	42.0 ถึง 48.0	30.0 ถึง 38.0	-	22.0 ถึง 28.0	ข้อ 8.6
4	แอมโมเนียเป็นจำนวนเท่าของ CuO	-	1.5 ถึง 2.0	-	-	-	-	-	ข้อ 8.7
5	ฟลูออไรด์ ร้อยละ	-	-	-	-	-	-	20.0 ถึง 24.0	ข้อ 8.8
6	กรดบอริก (คำนวณเป็น B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ร้อยละ	-	-	-	-	-	26.0 ถึง 31.0	-	ข้อ 8.9
7	ไดโนไตรฟีนอล ร้อยละ	-	-	-	-	-	-	14.0 ถึง 18.0	ข้อ 8.10

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539

2.2) น้ำยารักษาเนื้อไม้ที่ใช้กับไม้ภายในอาคาร เป็นพวกสารประกอบโบรอน ที่มี ส่วนประกอบของกรดบอริกและเกลือบอริกซ์ โดยทั่วไปเรียกว่า น้ำยาโบรอน หรือน้ำยาอักษวนิยมใช้อัดไม้แบบพารา เพราะไม้แบบพาราสามารถดูดซับน้ำยาโบรอนได้ดีและยังใช้ได้กับไม้เนื้ออ่อนสำหรับผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ภายใน ป้องกันเพรียง มอดและเชื้อราในไม้ได้ดี ถือได้ว่ามีการนำไปใช้ในการรักษาไม้มากกว่าน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทอื่นๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ โดยการอัดน้ำยาโบรอนตามมาตรฐานอุตสาหกรรมจะให้มีปริมาณตกค้าง 0.2 % BAE (Boric acid equivalent) ซึ่งวัดในรูปของสมมูลกรดบอริก (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) คือ การหาปริมาณสารประกอบโบรอนที่ปรากฏอยู่ในเนื้อไม้แบบพาราที่ผ่านการอัดน้ำยาโดยวัดปริมาณกรดบอริก

#### ข้อดีของน้ำยาประเภทละลายในน้ำ

1. สามารถขนส่งไปในรูปแบบของแข็งหรือในรูปที่เข้มข้นและทำให้เจือจางลงได้ จึงเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย
2. สามารถป้องกันได้ทั้งเชื้อราและแมลง
3. หลังจากการอัดน้ำยาแล้ว ไม้ไม่เปราะเป็อนหรือสกปรก
4. ไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยาและแห้งสนิทแล้วสามารถใช้สีทาทับได้
5. เป็นสารเคมีที่ไม่มีกลิ่น
6. สามารถนำไปผสมกับสารป้องกันไฟได้

#### ข้อเสียของน้ำยาประเภทละลายในน้ำ

ข้อเสียที่สำคัญคือ ไม้ที่ผ่านการทำให้แห้งมาแล้วจะต้องเปียกอีกครั้งจึงทำให้ไม้บวมพอง ดังนั้นไม้เมื่ออัดน้ำยาประเภทนี้แล้วจะต้องทำให้แห้งอีกครั้งเสียก่อนจึงจะนำมาใช้งานได้

### 3. น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในสารอื่น (Solvent Type Preservatives)

เป็นน้ำยารักษาเนื้อไม้ที่มีการผสมสารเคมีอื่นลงไปอีกหนึ่งสารหรือมากกว่านั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าแมลง และไม่มีส่วนประกอบของน้ำมาทำลายด้วยทำให้สามารถป้องกันการหดและพองตัวของไม้ได้ ได้แก่

- 3.1) Tributyltin oxide ใช้ความเข้มข้น 1 % ผสมกับ Light petroleum คุณสมบัติของน้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทนี้จะมีความเป็นพิษต่อเชื้อราสูง
- 3.2) Copper naphthenate และ Zinc naphthenate ใช้รักษาเนื้อไม้ เชือก และพวกเส้นใยผ้า
- 3.3) Synthetic pyrethroids เป็นสารสกัดจากพืช เป็นพิษต่อแมลงและมอด คงทนติดอยู่ในเนื้อไม้เป็นเวลานาน

#### ข้อดีของน้ำยาประเภทละลายในสารละลายอื่น

1. ไม่ทำให้เกิดการพองตัวหรือหดตัวของเนื้อไม้ เพราะไม่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ

2. ไม้ที่ผ่านการอัดน้ำยาประเภทนี้จะสะอาด ถ้าหากว่าใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม และเมื่อตัวทำละลายระเหยออกไปแล้วสามารถทาสีทับได้

3. ตัวยาไม่ถูกชะล้างได้โดยง่าย

4. สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี

5. มีทั้งชนิดที่มีสีและไม่มีสี จึงเลือกใช้ได้ตามต้องการ

ข้อเสียของน้ำยาประเภทละลายในสารละลายอื่น

1. เป็นตัวยาที่มีราคาแพง ทั้งนี้เนื่องจากราคาของตัวทำละลายที่ใช้และราคาของตัวยา สารเคมี

2. หลังการอัดน้ำยาใหม่ๆ ตัวทำละลายยังระเหยไม่หมด เนื้อไม้จะติดไฟได้ง่าย

### 2.2.2 ผลกระทบจากน้ำยารักษาเนื้อไม้ (ปฐมพร, 2549)

น้ำยาที่ใช้ในการทดลองคือ Boron Compound (น้ำยาอัดขาว) เป็นน้ำยารักษาเนื้อไม้ ประเภทละลายในน้ำ มีส่วนผสมของกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) และสารบอแรกซ์ ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) จากกระบวนการอัดน้ำยารักษาเนื้อไม้ เมื่อใช้ซ้ำหลายๆครั้งอาจทำให้น้ำยามีสีเปลี่ยนไปโดยมีสีน้ำตาล เข้มจนถึงดำ ส่งผลต่อสีของเนื้อไม้ไม่เป็นที่ต้องการของลูกค้า ทางโรงงานจึงต้องเปลี่ยนน้ำยาใหม่ และปล่อยทิ้งไป น้ำทิ้งจากโรงงานนั้นเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของโบรอนสูง หากโรงงานไม่มีการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม จะส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของโบรอนลงสู่ดิน สู่แหล่งน้ำ เป็นพิษต่อพืช สัตว์ และมนุษย์ได้

ผลกระทบจากสารเคมีที่ปล่อยออกมากับน้ำทิ้งจากน้ำยารักษาเนื้อไม้ สารเคมีที่ปล่อยออกมามีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารเคมีที่ปล่อยออกมาจากน้ำทิ้งจากน้ำยารักษาเนื้อไม้มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย

สัมผัส/ความผิดปกติ	ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย		
	จากโบรอน(B)	จากกรดบอริก( $H_3BO_3$ )	จากสารบอร์เรกซ์ ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ )
สัมผัสทางหายใจ	ระคายเคืองต่อเยื่อเมือก และมีอาการเนื่องจากพิษของโบรอน	คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง เชื้องซึม ผิวหนังผื่นแดง ปวดศีรษะ ความดันโลหิตต่ำ ไตได้รับอันตราย ผิวหนังสีเขียว คล้ำเนื่องจากขาดออกซิเจน หมดสติและตาย	ระคายเคืองต่อเยื่อเมือก ไอ คลื่นไส้ อาเจียน
สัมผัสทางผิวหนัง	ระคายเคืองเล็กน้อย ถ้าสัมผัสนานๆจะทำให้ผิวหนังอักเสบ	สัมผัสจะระคายเคืองเป็นแผลไหม้ การดูดซึมผ่านผิวหนังจะมีอาการเช่นเดียวกับการหายใจ	ผิวหนังผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน
กินหรือกลืนเข้าไป	ระคายเคืองกระเพาะ ลำไส้และมีอาการพิษของโบรอน	มีอาการเช่นเดียวกับการหายใจ ผู้ใหญ่กินสารเข้าไปมากกว่า 30 กรัมอาจจะทำให้ถึงตายได้	คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปวดท้อง หัวใจเต้นเร็ว ผิดปกติ ลำตัวเขียวคล้ำ เพื่อกดัก ชัก หมดสติ
สัมผัสถูกตา	ระคายเคืองตา	ระคายเคืองตา เป็นผื่นแดง ปวดตา	ระคายเคือง ตาแดง เจ็บตา
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่นๆ	มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง พิษของโบรอนจะทำให้กีดการทำงานของหัวใจ อาเจียน ท้องร่วง หมดสติและอาการสาหัส	รับสารเป็นเวลานาน น้ำหนักลด อาเจียน ท้องร่วง ชักกระตุกอย่างรุนแรง โรคโลหิตจาง อาจทำลายตับ ไต อันตรายต่อทารกในครรภ์	ทารกได้รับสาร 5 กรัม ผู้ใหญ่ 5-20 กรัม อาจถึงเสียชีวิตได้ อันตรายต่อตา ทางเดินหายใจ ระบบประสาทส่วนกลาง ไต อัมพา

ที่มา : ปฐมพร, 2549

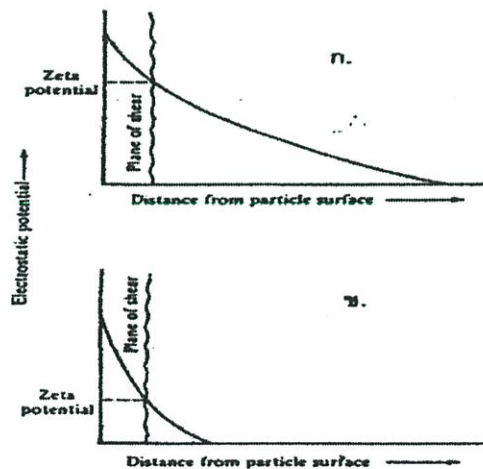
## 2.3 การสร้างและการรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation and Flocculation)

### 2.3.1 โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

โคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นกระบวนการทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากคอลลอยด์มีขนาดเล็กมากอยู่ในช่วง  $10^{-6}$  มม.จนถึง  $10^{-3}$  มม. ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด และพื้นผิวอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กมากจะมีแรง Electrostatic และแรง Interionic ทั้งสองแรงมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของโลก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคมากกว่าแรงดึงดูด คอลลอยด์จึงมีเสถียรภาพมาก จนไม่สามารถตกตะกอนได้ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van der waal force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ดังนั้นจึงต้องใส่สารสร้างตะกอน (Coagulant) เพื่อทำลายเสถียรภาพ ทำให้ขนาดอนุภาคตะกอนสามารถสัมผัสกันและรวมตัวกันใหญ่ขึ้น

การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีกลไกที่สำคัญ 4 แบบ ดังนี้ (มันสิน, 2538)

1. กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (zeta potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์(ก.) ก่อนเติมไอออน (ข.) หลังการเติมไอออน (พรศักดิ์, มปป)

การทำลายความหนาของชั้นกระจายสามารถทำได้โดยการเติมสารละลายของเกลือมีข้อควรพิจารณาดังนี้

1.1) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้าที่เติมเพื่อลดความหนาของชั้นกระจาย จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคของคอลลอยด์

1.2) Charge reversal ประจุของคอลลอยด์จะไม่เปลี่ยนจากประจุไฟฟ้าลบไปเป็นบวกได้ ไม่ว่าจะเติมไอออนประจุบวกลงไปมากถึงเพียงใดก็ตาม

2. กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิว ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์

3. กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงในน้ำในปริมาณที่พอเพียงจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึก เพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะดังกล่าวอาจถือว่าการเพิ่มขนาดให้กับอนุภาคคอลลอยด์เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอน โดยกลไกนี้มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไกทั้ง 2 ข้อข้างต้นคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ โดยอาจกล่าวได้ว่า การใช้ปริมาณโคแอกกูแลนต์น้อยๆกับน้ำที่มีความขุ่นมากจะเกิดการโคแอกกูแลชันที่ดีได้เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำขุ่นนั้นมีปริมาณการกระจายตัวที่มาก อยู่แล้ว การใช้ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่น้อยๆจึงมีความเพียงพอต่อการสัมผัสกับอนุภาคได้ทั่วถึง ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความขุ่นน้อยการกระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำมีน้อยจึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันของอนุภาคและสารโคแอกกูแลนต์ให้เกิดโคแอกกูแลชันได้ดียิ่งขึ้น

4. กลไกการใช้สารพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมกับอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) โดยสารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิดซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิดและโปรตีนบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ใช้กำจัดคอลลอยด์ สารเหล่านี้เมื่อใส่ลงไปให้น้ำจะให้ไอออนเป็นจำนวนมาก เพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆ ทำให้เกิดการรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น

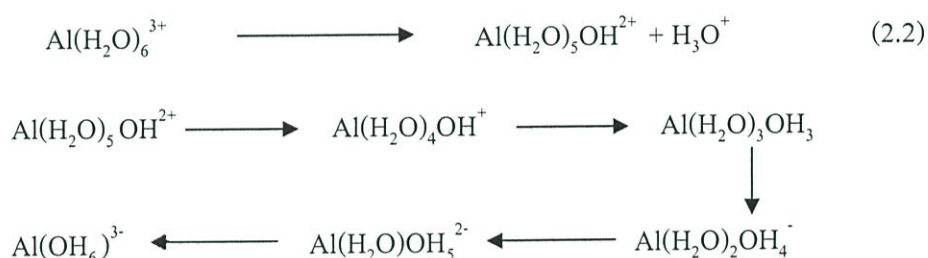
### โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้ม (Alum) หรืออลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium Sulfate) มีสูตรทางเคมี  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O]$  เป็นสารโคแอกกูเลนต์ที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทย เนื่องจากหาซื้อง่าย และราคาไม่แพง

สารส้มเมื่อเติมลงในน้ำจะแตกตัวให้อลูมิเนียมไอออน ดังสมการ 2.1



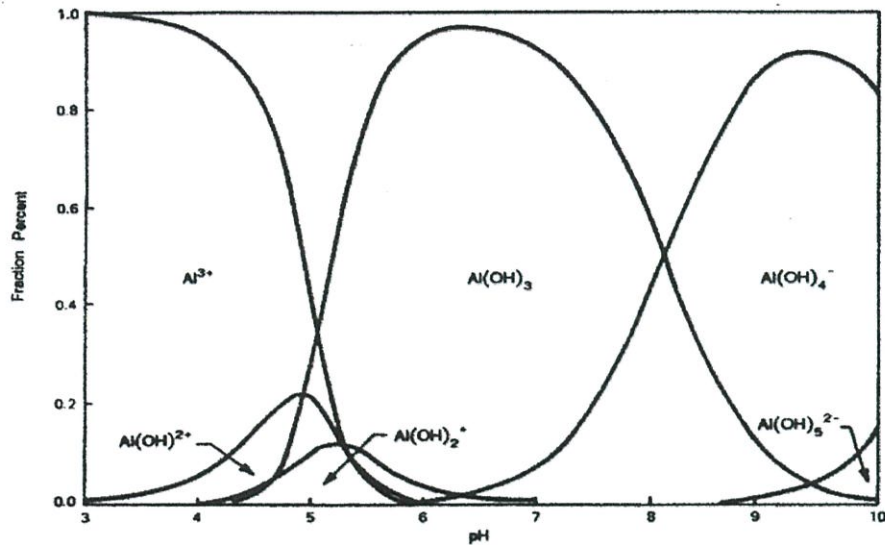
อลูมิเนียมไอออนซึ่งมีประจุบวกจะทำปฏิกิริยาสร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจน 6 โมเลกุล อยู่ในรูป  $Al(H_2O)_6^{3+}$  แต่เนื่องจากว่าพันธะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงที่ต่ำส่งผลให้อะตอมของไฮโดรเจนมีแนวโน้มสูญเสียออกไปสู่น้ำด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยโมเลกุลของน้ำจะถูกแทนที่ด้วยไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ทำให้ประจุบวกที่ล้อมรอบอะตอมของอลูมิเนียมค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนหมดและกลายเป็นประจุลบ



ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$



ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารคอมเพล็กซ์ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิส  $Al^{3+}$  ถึง  $Al(OH)_3$  จากสารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ  $Al(OH)_3$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น  $Al(OH)_4^-$ ,  $Al(OH)_5^{2-}$  ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจะสะเทินทางไฟฟ้าของ  $Al(OH)_3$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวกเช่น  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$  และ  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$  (พรศักดิ์, มปป) แสดงดังรูปที่ 2.5

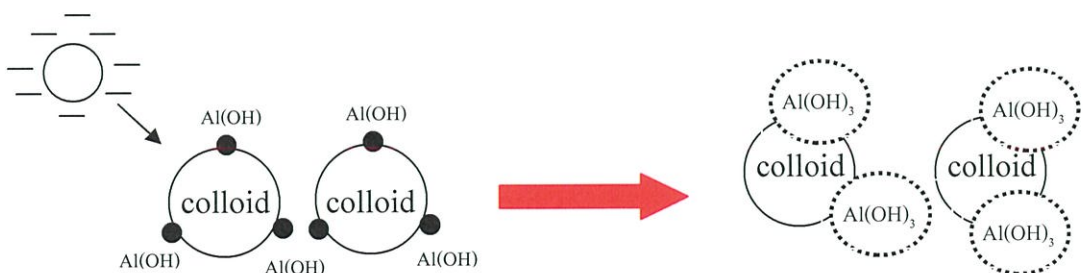


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มและค่าพีเอช (Committee Report, 1971 อ้างถึงในพรศักดิ์, มปป)

### กลไกการรวมตะกอนด้วยสารส้ม

สารส้มเมื่อเติมลงในน้ำจะเกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำและปริมาณ โคแอกกูเลชัน ดังนี้

1. กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) กลไกนี้เกิดจากการที่สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มที่มีประจุบวก เข้าทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่มีประจุลบ ทำให้คอลลอยด์เกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอน ดังรูปที่ 2.6 แต่กลไกนี้ควบคุมการเกิดได้ยาก เนื่องจากมีช่วงความเหมาะสมที่แคบ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องเหมาะสม ถ้ามีปริมาณไม่เพียงพอกระบวนการเกิด โคแอกกูเลชันจะเกิดได้ไม่ดี แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคทำให้อนุภาคเปลี่ยนประจุกลายเป็นประจุบวก เกิดเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้น ข้อดีของกลไกนี้คือ มีการใช้สารส้มในปริมาณน้อย



รูปที่ 2.6 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (ดัดแปลงจาก Amirtharjah และ Mill, 1982 อ้างถึงในพรศักดิ์, มปป)

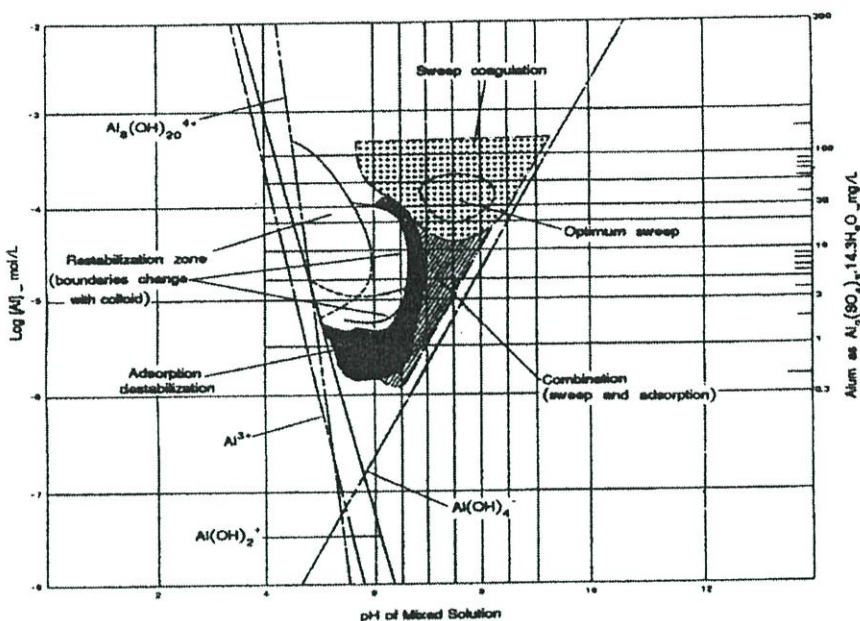
2. กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) กลไกนี้จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เมื่อมีการเติมสารส้มในปริมาณที่มากเกินไป จนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ผลึกของ  $\text{Al(OH)}_3$  ที่มีลักษณะเหนียวจะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์และทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความเหนียว จึงทำให้อนุภาคคอลลอยด์จับกันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้คอลลอยด์มีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอนได้ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มแบบกวาด (ดัดแปลงจาก Amirtharjah และ Mill, 1982 อ้างถึงในพรศักดิ์, มปป)

3. กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation) กลไกนี้เป็นการทำลายอนุภาคของเสถียรภาพคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบแรก คือ กลไกแบบจุดติดผิวและทำลายประจุและกลไกแบบที่สอง คือ กลไกแบบกวาดจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้ปริมาณของสารส้มเพิ่มมากขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบจุดติดผิวและทำลายประจุ และจะใช้ปริมาณของสารสมน้อยกว่ากลไกแบบกวาด

เราสามารถควบคุมกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้โคอะแกรม ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นกระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยสารส้ม โดยกลไกแบบกวาดให้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8-8.2 ใช้สารส้มปริมาณ 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกลไกแบบผสมนั้นจะใช้สารสมน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (Amirtharjah และ Mill, 1982 อ้างถึงในพรศักดิ์, มปป)

สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารสร้างตะกอน มีดังนี้

1. สารส้ม (Alum) หรือ อลูมิเนียมซัลเฟต นิยมใช้มากในการบำบัดน้ำเสียและการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำ เมื่อใส่สารส้มลงไปในพื้นที่ที่มีอัลคาไลน์ตี (Alkalinity) เกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.4



อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide) ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ มีลักษณะคล้ายฟล็อก ตกตะกอนลงมาพร้อมกับของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียลงด้วย แต่การใช้อัลคาไลน์ตีจากน้ำจะทำให้พีเอชของน้ำลดลง ดังนั้นถ้าน้ำเสียมีค่าอัลคาไลน์ตีไม่เพียงพอ ต้องใส่สารเคมี เช่น แคลเซียมไบคาร์บอเนต โซดาแอช โซดาไฟ หรือ ปูนขาวผลึกน้ำ

2. สารส้มและปูนขาว (Aluminium and Lime) เมื่อใช้สารส้มแล้วควรเติมปูนขาวลงไปให้กับน้ำที่มีระดับความเป็นด่างต่ำ ปูนขาวจะช่วยในการรักษาระดับพีเอชของน้ำไม่ให้ต่ำเกินไป เพราะในการใช้สารส้มเพียงอย่างเดียวกับน้ำที่มีความเป็นด่างต่ำจะทำให้พีเอชของน้ำต่ำลง จนกระทั่งอาจทำให้การเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันไม่ดี การใช้สารส้มผสมกับปูนขาว ดังสมการ 2.5 แต่การใช้ปูนขาวจะทำให้เกิดความกระด้างถาวร (CaSO<sub>4</sub>) ในน้ำ



3. สารส้มและโซดาแอช การเติมโซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) จะใช้เติมลงในน้ำที่มีค่าความเป็นด่างต่ำ ซึ่งในน้ำที่มีระดับความด่างต่ำเกินไปเมื่อเติมสารส้มเป็นสารช่วยตกตะกอนอาจทำให้พีเอชของน้ำลดต่ำลงจนกระทั่งอาจทำให้การเกิดกระบวนการ โคแอกกูเลชันไม่ดี การใช้สารส้มผสมกับโซดาแอช ดังสมการ 2.6



การใช้โซดาแอชจะไม่ทำให้เกิดความกระด้างเพิ่มขึ้น แต่ข้อจำกัดของโซดาแอชคือโซดาแอชมีราคาแพงกว่าปูนขาว

4. พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum Chloride, PACl) มีสูตรทางเคมี  $(\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m})_x$  เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้มาก เนื่องจากทำให้เกิดการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนที่รวดเร็วกว่าสารส้ม และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ และยังมีช่วงในการสร้างปฏิกิริยากว้างกว่าสารสร้างตะกอนอื่นๆ

### 2.3.2 ฟลอคคูเลชัน (Flocculation)

ฟลอคคูเลชัน (Flocculation) เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ห่มดเสถียรภาพมากระทบกันแล้วเกิดการเกาะติดระหว่างกันจนเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเรียกว่าฟลอค (floc) กระบวนการเกิดฟลอคคูเลชันมีหลายวิธี ดังนี้ (มันสิน, 2538)

1. ออร์โธไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation) เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัมผัสหรือฟลอคคูเลชันเรียกว่า ถังกวนช้า โดยจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสกัน กวนน้ำโดยใช้อัตราเร็วในการไหลที่ต่างกัน ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แตกต่างกันจึงเกิดการสัมผัสกันและการกวนน้ำไม่ควรเร็วมากเนื่องจากอาจจะทำให้ฟลอคหลุดออกจากกัน

2. เพอริไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Perikinetic Flocculation) เป็นการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Motion) การเคลื่อนที่แบบนี้เป็น การเคลื่อนที่แบบอาศัยความร้อน (Thermal Motion) โดยการเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากกระบวนการเป็นการที่อนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือชนโดยโมเลกุลของน้ำ

3. การสัมผัสระหว่างอนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอน โดยอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของ

ตะกอนไปพร้อมกับการตกตะกอน ในทางปฏิบัติจากขนาดของอนุภาคนี้อาจได้ผ่านการเกิดฟล็อกกุเลชันมาก่อนแล้วเมื่อถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกกุเลชันอีกครั้ง ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้ทันที

4. กรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอนแต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า 50 มก./ล กระบวนการรวมตะกอนอาจเกิดขึ้นโดยวิธีออร์โธไคเนติก ฟล็อกกุเลชัน (Orthokinetic Flocculation) แต่เกิดขึ้นช้าเนื่องจากสัมผัสกันน้อย มีวิธีการแก้ไข ดังนี้

4.1) ใช้เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วหรือเครื่องกรองทรายแบบ 2 ชั้นหรือเรียกว่า การกรองสัมผัส (Contact Filtration) วิธีนี้ใช้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล. เป็นการใช้ถังในการช่วยสร้างฟล็อกกุเลชัน เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการสัมผัสและเกิดการบังคับให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้ชิดกัน ในบางครั้งอาจมีการนำกรวดทรายขนาดเล็กมาใช้แทนทรายเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาตรของช่องว่างได้แต่ข้อเสียของการใช้กรวดทรายจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสลงซึ่งส่งผลต่อฟล็อกกุเลชันออกมาได้ไม่ดีเท่ากับการใช้ชั้นทราย

4.2) ใช้อนุภาคที่รวมตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) บังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ และนำฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์ สร้างสัมผัสแบบออร์โธไคเนติก ฟล็อกกุเลชัน

5. กรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การรวมตะกอนอาจใช้วิธีการกรองแต่สารที่ใช้กรองควรมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าทราย

### **ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและการรวมตะกอน**

ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างตะกอนและรวมตะกอน มีดังนี้ (ทวิศักดิ์, 2554)

1. ค่าพีเอช ในน้ำแต่ละประเภทมีระดับพีเอชที่แตกต่างกันตามแหล่งที่มาของน้ำชนิดนั้น อาจจะมาจกแหล่งน้ำธรรมชาติ รวมไปถึงจนถึงน้ำที่ผ่านสภาพการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น น้ำทิ้งอุตสาหกรรม น้ำเสียชุมชน เป็นต้น การเลือกสารรวมตะกอนที่มีความเหมาะสมกับพีเอชของน้ำชนิดนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ในบางกรณีก่อนเข้าสู่การทำโคแอกกูเลชันอาจต้องปรับพีเอชของน้ำให้เหมาะสมกับสารรวมตะกอนก่อน

2. ชนิดของคอลลอยด์ คอลลอยด์สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ คอลลอยด์ชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะมีประจุลบเป็นพวกอนุภาคของดินเหนียว เป็นต้น และคอลลอยด์ชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุลบ เป็นพวกโปรตีน สบู่ สารอินทรีย์ คอลลอยด์ชนิดที่ไม่ชอบน้ำจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ดีกว่าคอลลอยด์ชนิดที่ชอบน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ชนิดนี้มีน้ำล้อมรอบอยู่จึงยากที่สารอื่นจะเข้าไปจับกับอนุภาคของคอลลอยด์ได้โดยตรง

3. อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดของอากาศของคอลลอยด์จะลดต่ำลง ทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ดีในสถานะที่อุณหภูมิสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิต่ำลงความหนืดของอนุภาคคอลลอยด์จะสูงขึ้น ทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ยาก และมีผลต่อการช่วงพีเอชที่เหมาะสม โดยผลของประสิทธิภาพการรวมตะกอนจะลดต่ำลง

4. เวลาและความเร็วรอบในการปั่นกวน ในการปั่นกวนนั้นจะต้องมีขีดจำกัดของพลังงาน ในการปั่นกวนที่เหมาะสมทั้งการกวนเร็วและการกวนช้า เนื่องจากถ้าเวลาและความเร็วรอบการปั่นกวนมากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ไม่ดีเท่าที่ควรในขั้นตอนการกวนเร็ว หรือฟล็อกอาจแตกได้ในขั้นตอนการกวนช้า

5. ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ การเกิดปฏิกิริยาในการสร้างตะกอน น้ำตัวอย่างควรมีสภาพเป็นด่างเพื่อเพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยา ถ้าน้ำตัวอย่างมีสภาพด่างไม่เพียงพอ อาจจะต้องเติมสารเพื่อปรับสภาพของน้ำให้เป็นด่างก่อนทำการทดลอง

## 2.4 การกวนผสม (สุรวุฒิ, 2551)

การกวนน้ำเป็นการกวนน้ำเพื่อให้เกิดความปั่นกวนแก่น้ำ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้ 1) การกวนเร็วจะต้องมีระดับการปั่นกวนของน้ำสูง เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทั่วถึง 2) การกวนช้า จะมีระดับการปั่นกวนของน้ำต่ำ ทำให้เกิดการผสมระหว่างอนุภาคและจับติดกันเป็นฟล็อก (floc) ขนาดใหญ่ อุปกรณ์ในการกวนจะเป็นการทำให้เกิดการหมุนด้วยตัวเครื่อง เช่น ใบพัด ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกวนประเภทนี้ ได้แก่ ความเร็วแรงแทคเคียนท์ (G) ที่บอกระดับความปั่นกวนของน้ำ ซึ่งความปั่นกวนที่เกิดขึ้นเป็นการถ่ายเทพลังงานให้แก่ น้ำในรูปการกวนน้ำ ความเร็วการกวนผสมสามารถนำมาคำนวณพลังงานในรูปของความเร็วแรงแทคเคียนท์ (G) จากสมการของ Camp และ Stein ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $G$  = ความเร็วแรงแทคเคียนท์ (วินาที<sup>-1</sup>)

$P$  = พลังงานที่ใช้ (วัตต์)

$\mu$  = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

$V$  = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (ลูกบาศก์เมตร)

โดยสามารถหาพลังงาน (P) จาก

$$P = N_p \rho N^3 d_i^5 \quad (2.8)$$

เมื่อ	$P$ = พลังงาน (วัตต์)
	$N_p$ = จำนวนใบพัด
	$P$ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	$N$ = ความเร็วรอบการหมุน (รอบต่อวินาที)
	$d_i$ = เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ปนัดดา (2535)** ศึกษาการกำจัดสีที่เกิดจากกรดฮิวมิกโดยกระบวนการรวมตะกอน โดยใช้ น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีสี 25, 50 และ 75 Pt-Co unit โดยใช้สารส้ม สารส้มร่วมกับปูนขาว สารส้ม ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  และสารส้มร่วมกับ PE จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีสี 25, 50 และ 75 Pt-Co unit พบว่า พีเอชที่เหมาะสมเหมือนกันคือ พีเอช 7.5 สำหรับ สี 25 Pt-Co unit ต้องใช้สารส้ม 45 mg/L ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  20 mg/L ให้ประสิทธิภาพ 96.55% ค่าใช้จ่าย 1.62 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำดิบ สี 50 Pt-Co unit ต้องใช้สารส้ม 60 mg/L ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  20 mg/L ให้ประสิทธิภาพ 96.00% ค่าใช้จ่าย 1.70 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำดิบ สี 75 Pt-Co unit ต้องใช้สารส้ม 65 mg/L ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  25 mg/L ให้ประสิทธิภาพ 98.57% ค่าใช้จ่าย 1.74 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำดิบ เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมมาใช้กับน้ำบึงสำนักงานใหญ่ อ.แกลง จ. ระยอง และน้ำบึงหล่ม อ.ลาดยาว จ.นครสวรรค์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี 85.71-95.59% ค่าใช้จ่ายเพิ่มจากเดิมใช้สารส้มอย่างเดียวไม่เกิน 0.45 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำดิบ

**ทิตยา (2549)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากคลองแสนแสบด้วยวิธีการรวมกลุ่มตะกอน สารเคมีที่ใช้ในการรวมกลุ่มตะกอน คือ สารส้ม โคลโคซาน เฟอริกคลอไรด์ และพอลิอิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาพบว่า การบำบัดด้วยสารส้ม ความเข้มข้นของ 500 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 8 สามารถกำจัด COD สีและความขุ่นได้ 88.89%, 58.60% และ 86.23% ตามลำดับ การบำบัดด้วยเฟอริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 500 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 10 สามารถกำจัด COD สีและความขุ่นได้ 100%, 84.23% และ 60.29% ตามลำดับ การบำบัดด้วยพอลิอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้น 0.7 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 6 สามารถกำจัด COD สีและความขุ่นได้ 52.78%, 50.72% และ 77.90% ตามลำดับ และการบำบัดด้วยโคลโคซาน ความเข้มข้น 80 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 6 สามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ 59.10% และ 69.13% ตามลำดับ แต่การบำบัดด้วยโคลโคซานไม่สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด COD ได้

**สุรวุฒิ (2551)** ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยแมกนีไทต์กับน้ำเสียชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำเสียที่มีความขุ่น 30 และ 100 NTU น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มก./ล. น้ำเสีย

โลหะหนักที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มก./ล. โดยทำการศึกษาหาพีเอช ปริมาณแมกนีไทด์ และความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปใช้เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนผสมของความขุ่น แอมโมเนียและโลหะหนัก จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของน้ำเสีย คือ พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทด์ 2 ก./ล. ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มก./ล. คือ พีเอช 7 ปริมาณแมกนีไทด์ 2 ก./ล.และความเร็วรอบในการกวนเร็ว 150 รอบ/นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มก./ล. คือ พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทด์ 2.5 ก./ล. และความเร็วรอบในการกวนเร็ว 150 รอบ/นาที เมื่อทดลองกับน้ำเสียผสม พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นเท่ากับ 83% ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 17.46% ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมเท่ากับ 29.76% และประสิทธิภาพการบำบัดอาร์เซนิกเท่ากับ 14.42% เมื่อนำมาใช้กับน้ำเสียจริง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นเท่ากับ 77.27% ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 31.03% ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมเท่ากับ 41.67% และประสิทธิภาพการบำบัดอาร์เซนิกเท่ากับ 37.90% และความเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทด์ เท่ากับ 3 ชม./วินาที (10.8 ม./ชม.)

**จรรยาและคณะ (2554)** ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำยาโบราณด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อนำน้ำยาโบราณกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้พอลิออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 2.0 g/L เป็นสารช่วยสร้างตะกอน ร่วมกับการใช้ Anionic polymer 4 mg/L และ Cationic polymer 4 mg/L ทำการทดลองที่พีเอช 8 กวนเร็วที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที และกวนช้าที่ความเร็วรอบ 70 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 นาที และกรองด้วยระบบกรองทราย วางน้ำตัวอย่างให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาวัดสีด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer จากการศึกษาพบว่า ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด 96% การดำเนินการนี้ใช้ต้นทุนค่าสารเคมีประมาณ 56 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

- 1) บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
- 2) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3) เตาให้ความร้อน (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
- 4) พีเอชมิเตอร์ (pH meter) บริษัท Metrohm รุ่น 827 pH Lab ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 5) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (TOC analyzer) รุ่น TOC-VCPH บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 6) เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น T60 บริษัท TG Instrument ประเทศอังกฤษ
- 7) เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100p ประเทศเยอรมนี
- 8) เครื่องจาร์เทสต์ (Jar test) รุ่น JLT6 บริษัท VELP ประเทศอิตาลี

##### 3.1.2 สารเคมี

- 1) โปแทสเซียมไฮโดรเจนพลาเตต ( $C_6H_4(OOHCOOK)$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 2) โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4) กรดไฮโดรคลอริก ( $HCl$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
- 5) ดีแมนิทอล ( $C_6H_{14}O_6$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 6) โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 7) อลูมิเนียมซัลเฟต  $Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$  (สารส้ม)
  - เกรดวิเคราะห์ บริษัท EWG - Nr ประเทศเยอรมนี
  - เกรดทางการค้า ซึ่งจากตลาดหนองจอก
- 8) น้ำกลั่น

### 3.2 น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลอง

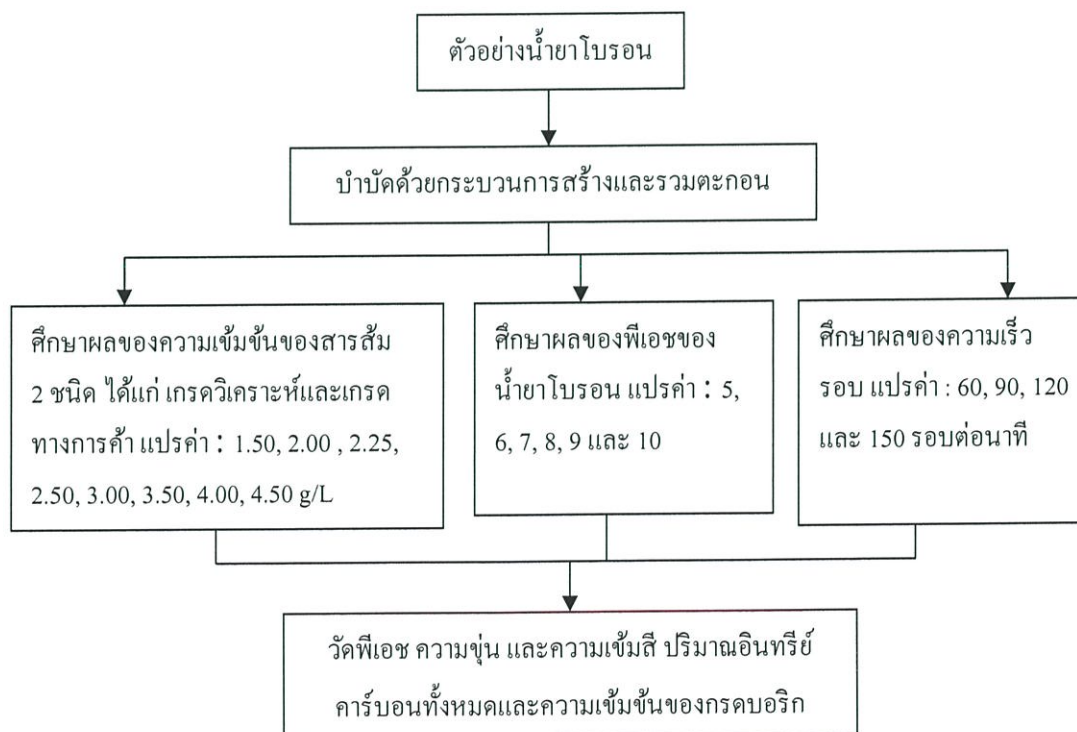
น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลองได้รับจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป อำเภอกาหลง จังหวัดระยอง ซึ่งทางโรงงานเก็บรวบรวมให้ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เดือนมิถุนายน 2556 และครั้งที่ 2 เดือนกันยายน 2556 นำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ทำการศึกษา

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
พีเอช	pH meter
ความขุ่น	Turbidity meter
สี(ADMI)	UV-Visible Spectrophotometry (เจตนิพิฐและคณะ, 2552)
กรดบอริก	Titration (ศุภชัย, 2537)
TOC	TOC analyzer

### 3.3 การดำเนินการวิจัย

ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีของน้ำยาโบรอน มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.4 การศึกษาหาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอน

1. ปิเปตสารละลายสต็อกอลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตรตามที่ระบุในตารางที่ 3.2 ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละหลอด ให้ปริมาตรสุทธิ 20 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลายผสมกันทั่ว

2. ตวงน้ำยาโบรอนในหัวข้อ 3.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำยาที่เก็บรวบรวมได้ครั้งที่ 1 มา 400 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์วางในเครื่องจาร์เทสต์พร้อมปั่นกวนเร็วที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที นาน 2 นาที

3. เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1 (หลอดที่ 1-4) ลงในบีกเกอร์อย่างรวดเร็ว เติมน้ำกลั่นปั่นกวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นลดความเร็วในการปั่นกวนลงเหลือ 60 รอบต่อนาที ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 3 นาที

4. เทสารละลายในแต่ละบีกเกอร์ลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิเปตส่วนใสมาวัดพีเอช ความขุ่น และความเข้มข้นปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดและความเข้มข้นของกรดบอริก

5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 แต่เปลี่ยนหลอดทดลองจาก 1-4 เป็นหลอดอื่นจนครบทุกหลอดที่แสดงในตารางที่ 3.2

6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 แต่เปลี่ยนสารละลายสต็อกอลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เป็นเกรดทางการค้า

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่ใช้ในการทดลอง

หลอดที่	ปริมาตรสารละลายสต็อกอลูมิเนียมซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตในน้ำตัวอย่าง (กรัมต่อลิตร)
1	6	14	1.50
2	8	12	2.00
3	9	11	2.25
4	10	10	2.50
5	11	9	2.75
6	12	8	3.00
7	14	6	3.50
8	16	4	4.00
9	18	2	4.50

\* ความเข้มข้นของสารละลายสต็อกอลูมิเนียมซัลเฟตเท่ากับ 100 กรัมต่อลิตร

### 3.5 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอน

1. ปิเปตสารละลายสต็อกคอลลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตรตามความเข้มข้นเหมาะสมที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4 ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละหลอดให้ปริมาตรสุทธิ 20 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลายผสมกันทั่ว
2. ตวงน้ำยาโบรอนในหัวข้อ 3.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำยาที่เก็บรวบรวมได้ครั้งที่ 1 มาใส่บีกเกอร์ 6 ใบ ใบละ 400 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของน้ำยาโบรอนให้เป็น 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 นำบีกเกอร์วางในเครื่องจาร์เทสต์พร้อมปั่นกวนเร็วที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที นาน 2 นาที
3. เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1 ลงในบีกเกอร์อย่างรวดเร็ว เดินใบพัดปั่นกวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นลดความเร็วในการปั่นกวนลง ให้เหลือ 60 รอบต่อนาที ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 3 นาที
4. เทสารละลายในแต่ละบีกเกอร์ลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิเปตส่วนในสมาวัดพีเอช ความขุ่น และความเข้มข้นปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดและความเข้มข้นของกรดบอริก
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 แต่เปลี่ยนสารละลายสต็อกคอลลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เป็นเกรดทางการค้า

### 3.6 การศึกษาผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนเร็ว

1. ปิเปตสารละลายสต็อกคอลลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตรตามความเข้มข้นเหมาะสมที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4 ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละหลอดให้ปริมาตรสุทธิ 20 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลายผสมกันทั่ว
2. ตวงน้ำยาโบรอนในข้อ 3.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำยาที่เก็บรวบรวมได้ ครั้งที่ 2 มาใส่บีกเกอร์ 4 ใบ ใบละ 400 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของน้ำยาโบรอนตามผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.5 นำบีกเกอร์วางในเครื่องจาร์เทสต์พร้อมปั่นกวนเร็วที่ความเร็ว 60, 90, 120, และ 150 รอบต่อนาที นาน 2 นาที
3. เทสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1 ลงในบีกเกอร์อย่างรวดเร็ว เดินใบพัดปั่นกวนที่ความเร็ว 60, 90, 120 และ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นลดความเร็วในการปั่นกวนลงให้เหลือ 60 รอบต่อนาที ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 3 นาที
4. เทสารละลายในแต่ละบีกเกอร์ลงในกระบอกตวง ขนาด 500 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ปิเปตส่วนในสมาวัดพีเอช ความขุ่น และความเข้มข้น ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดและความเข้มข้นของกรดบอริก
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 แต่เปลี่ยนสารละลายสต็อกคอลลูมิเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์เป็นเกรดทางการค้า

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากอุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูปด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มเป็นสารรวมตะกอน (coagulation) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณของสารส้ม ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนและความเร็วรอบในการกวน สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอน

น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษาได้รับมาจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปแห่งหนึ่ง ในอำเภอแกลง จังหวัดระยอง เป็นน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการอัดเนื้อ ไม้ยางพาราซ้ำหลายๆครั้งทำให้น้ำยาโบรอนมีสีน้ำตาลคล้ำดังรูปที่ 4.1 สีที่คล้ำขึ้นของน้ำยาสันนิษฐานว่าเกิดจากการละลายของลิกนิน โพลีฟีนอล แทนนิน และเพคตินออกมาจากเนื้อไม้ในระหว่างการอัดน้ำยา (จรรยาและคณะ, 2554)



รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษา

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษาได้ผลดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา

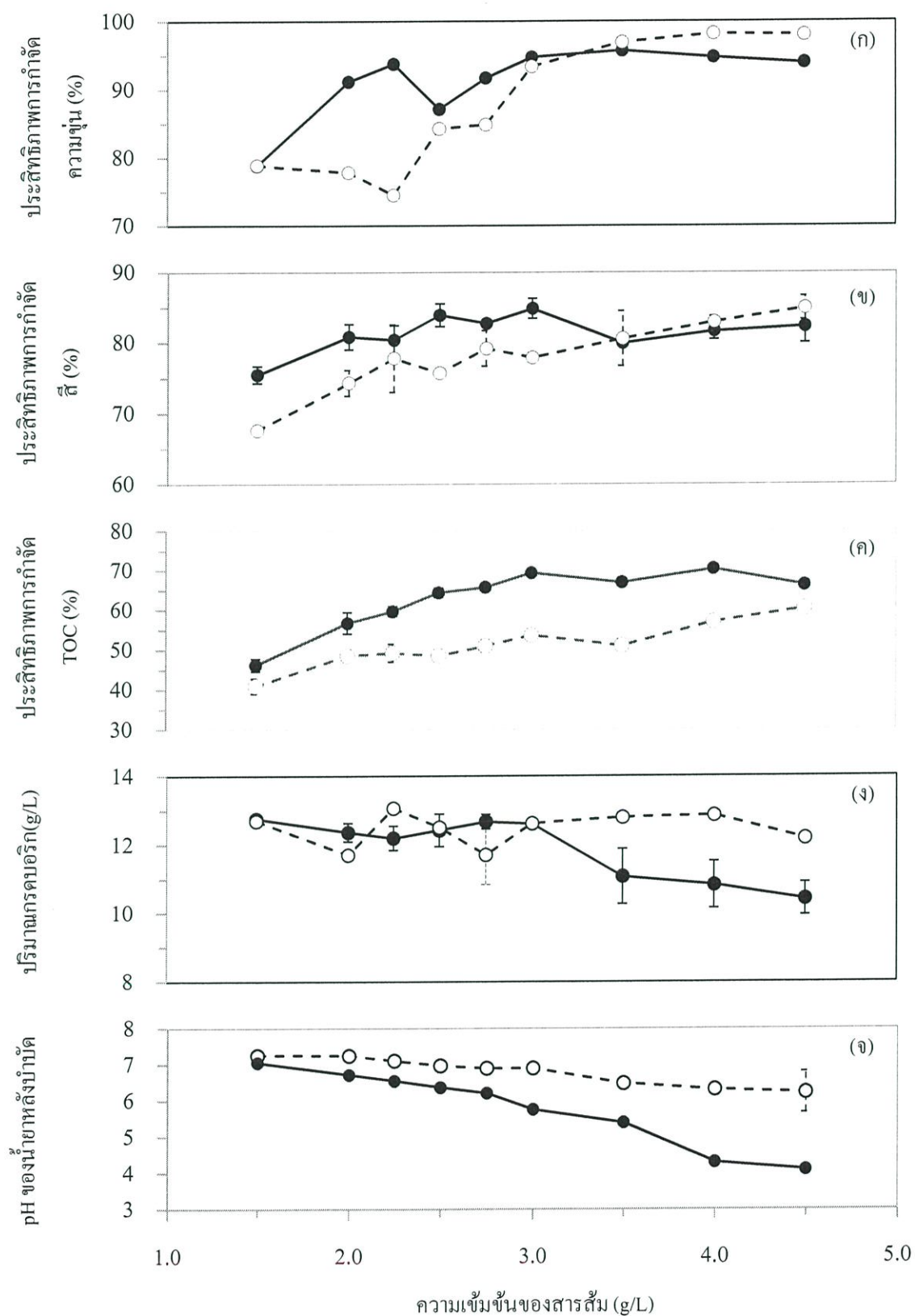
พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้ ( $\bar{X} \pm S.D.$ ) <sup>†</sup>	
	ตัวอย่างน้ำยาที่ได้รับ ครั้งที่ 1 (มิถุนายน 2556)	ตัวอย่างน้ำยาที่ได้รับ ครั้งที่ 2 (กันยายน 2556)
ความขุ่น (NTU)	143.67±20	75.07±0.51
สี (ADMI)	443±123	391±2.00
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) (mg/L)	50.6±0.89	290.8±3.60
ปริมาณกรดบอริก (g/L)	14.38±0.23	5.20±0.14
pH	7.29±0.08	7.97±0.15

<sup>†</sup>จำนวนตัวอย่างที่วิเคราะห์เท่ากับ 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำยาโบรอนที่ได้รับครั้งที่ 1 ซึ่งเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนมิถุนายน 2556 มีค่าความขุ่น 143.67 เอ็นทียูความเข้มสี 443 เอ็ดเอ็มไอ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) 50.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณกรดบอริก 14.38 กรัมต่อลิตรและค่าพีเอชเท่ากับ 7.29 ในขณะที่น้ำยาโบรอนที่ได้รับครั้งที่ 2 มีปริมาณความขุ่น สีและกรดบอริกในปริมาณที่ต่ำกว่า แต่มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดและค่าพีเอชของน้ำยามีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ได้รับครั้งที่ 1

#### 4.2 ผลการศึกษาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

เมื่อนำน้ำยาโบรอนปริมาตร 400 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าพีเอชตามสภาพที่ได้รับมาบำบัดด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้สารรวมตะกอน 2 ชนิด ได้แก่ สารส้มเกรดวิเคราะห์ (AR grade) และสารส้มเกรดทางการค้า (Commercial grade) แปรผันค่าความเข้มข้นของสารส้มในน้ำยาตัวอย่างให้มีค่าระหว่าง 1.5-4.5 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ความเข้มข้นของกรดบอริกและพีเอชของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดโดยใช้สารส้ม 2 ชนิดคือ สารส้มเกรดวิเคราะห์ (AR grade, —●—) และสารส้มเกรดทางการค้า (Commercial grade, -○-) )

จากรูปที่ 4.2ก พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารส้มชนิด AR grade มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารส้มโดยการเติมสารส้มเข้มข้น 1.5 กรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้ถึง 78.8% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มในน้ำยาเป็น 2.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเป็น 91.2% เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยใช้สารส้มชนิด Commercial grade พบว่าการเติมสารส้มในปริมาณ 1.5-2.0 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกันคือ 78.9%-77.8% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มในน้ำยาจาก 2.0 กรัมต่อลิตรเป็น 3.5 กรัมต่อลิตรพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารส้มที่มีในน้ำยาโบรอนซึ่งสามารถอธิบายความสามารถในการกำจัดความขุ่นที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารส้มได้ดังนี้คือ การเติมสารส้มในปริมาณน้อยในช่วงแรกจะได้ประจุบวกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สมการที่ 4.1 (สุรวุฒิ, 2551) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) และไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคของคอลลอยด์ในน้ำยาโบรอน



และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ดังสมการที่ 4.2 (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549 อ้างถึงในวนิดา, 2555) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นี้มีลักษณะเป็นเม็ดเหนียวๆ ไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ ซึ่งระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น (วนิดา, 2555) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้น



อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มคงที่เมื่อเติมสารส้มในปริมาณ 3.0 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป ในกรณีของสารส้มชนิด AR grade และ 3.5 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป ในกรณีของสารส้มชนิด commercial grade (รูปที่ 4.2ก) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ทำให้ไอออนประจุบวกของอลูมิเนียมที่แตกตัวจะไปเกาะหรือล้อมรอบที่ผิวของอนุภาคมีมากขึ้น ทำให้อนุภาคเกิดแรงผลักแยกออกจากกันแทนที่จะจับตัวกัน (วีระนุช, 2553) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ระดับความเข้มข้นเท่าๆกันของสารส้มชนิด AR grade และ Commercial grade ด้วยสถิติ Independent Samples t-test พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารส้มที่ระดับความเข้มข้น 4.5 กรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ส่วนที่ความเข้มข้นของสารส้มอื่นๆมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำยาโบรอนโดยใช้สารส้มทั้ง 2 ชนิด (รูปที่ 4.2ข) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารส้มสอดคล้องกับการทดลองของจรรยาและคณะ (2554) ซึ่งศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำยาโบรอนในกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีขึ้นอยู่กับปริมาณการเติม PACI โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของ PACI ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่สุดคือ 84.9% เมื่อใช้ในปริมาณ 3.0 กรัมต่อลิตร และ 4.5 กรัมต่อลิตร สำหรับสารส้มชนิด AR grade และชนิด commercial grade ตามลำดับ เนื่องจากสีที่เกิดขึ้นในน้ำยาโบรอนเกิดจากการละลายของกรดฮิวมิก ลิกนิน แทนนิน ที่มาจากเนื้อไม้เป็นส่วนใหญ่ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของอลูมิเนียมไอออนกับไฮโดรเจนไอออนของหมู่คาร์บอกซิล ฟีนอลลิก และไฮดรอกซิลของสารประกอบฮิวมิก เกิดเป็นเกลือไฮดรอกไซด์ภายใต้สภาวะเป็นคอลลอยด์ จนเกิดการตกผลึกของสารประกอบของอลูมิเนียมฮิวมิก (ปนัดดา, 2535) อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มสารส้มชนิด AR grade ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน พบว่าความสามารถในการกำจัดสีของสารส้มชนิด Commercial grade โดยส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าการใช้สารส้มชนิด AR grade (รูปที่ 4.2ข) อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารส้มชนิด Commercial grade มีค่าไม่แตกต่างกับชนิด AR grade เมื่อเติมในปริมาณตั้งแต่ 3.5 กรัมต่อลิตรเป็นต้นไป ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารส้มทั้งสองชนิดที่ระดับความเข้มข้น 1.5, 2.5 และ 3.0 กรัมต่อลิตร มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ค-2)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ของสารส้มชนิด AR grade และสารส้มชนิด Commercial grade (รูปที่ 4.2ค) พบว่าสารส้มสามารถบำบัดอินทรีย์คาร์บอนที่มีในน้ำยาโบรอนได้ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพในการกำจัด TOC มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารส้มที่มีอยู่ในน้ำยา ทั้งนี้ปริมาณสารอินทรีย์ที่พบในน้ำยาโบรอนเกิดจากการละลายของกรดฮิวมิก ลิกนิน แทนนิน ที่มาจากเนื้อไม้เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นในช่วงความเข้มข้นของสารส้มในปริมาณต่ำ อะลูมิเนียมไอออนซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไฮโดรเจนไอออนของหมู่คาร์บอกซิล ฟีนอลลิกและไฮดรอกซิลของกรดฮิวมิก เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง organic ligand กับอลูมิเนียมไอออน จนเกิดการตกผลึกของสารประกอบของอลูมิเนียมฮิวมิกลงมาในที่สุด (ปนัดดา, 2535; Edzwald, 1993 อ้างถึงใน Hendrick, 2011) และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) ซึ่งจะตกตะกอนช้าๆ พร้อมกับดึงให้สารอินทรีย์ตามธรรมชาติ (NOM) มาเกาะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนลงมา โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้ยืนยันให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสารส้มในการบำบัดสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ (Natural Organic Matter, NOM) (Qin *et al.*, 2006 อ้างถึงในกฤษดา, 2553) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดปริมาณกรดฮิวมิกที่มีอยู่ในน้ำ (Deyet *et al.*, 2007) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด

TOC ของสารส้มชนิด AR grade เทียบกับการใช้สารส้มชนิด Commercial grade ที่ระดับความเข้มข้นเท่าๆกัน พบว่าสารส้มชนิด AR grade มีประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญในทุกระดับความเข้มข้นที่ทำการทดสอบ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ก-3)

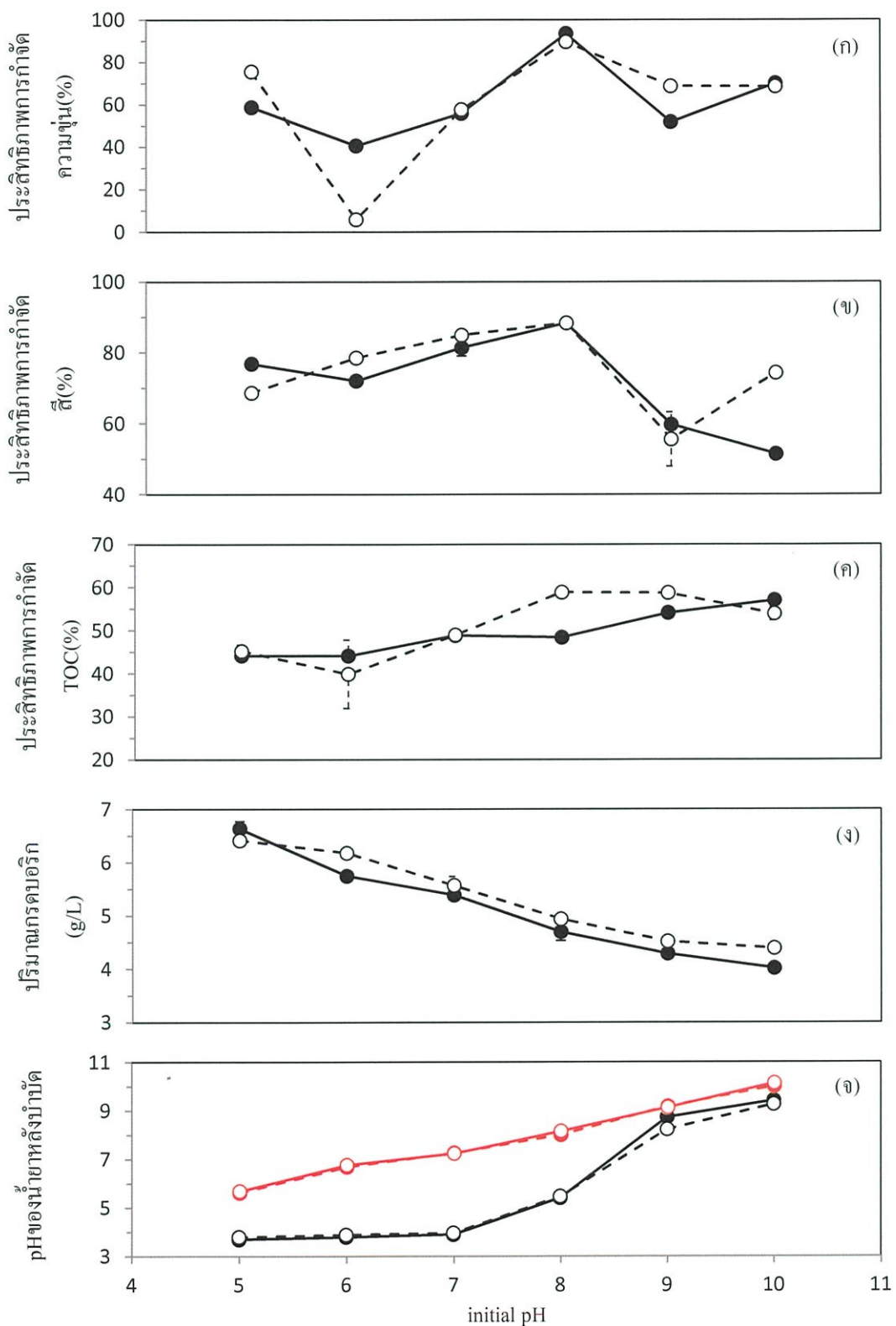
เนื่องจากปริมาณกรดบอริกมีความจำเป็นต่อการรักษาเนื้อไม้ ดังนั้นระดับปริมาณกรดบอริกในสารละลายจึงเป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่ยืนยันความเหมาะสมของการใช้สารส้มเป็นสารสร้าง-รวมตะกอนหรือโคแอกกูแลนต์ ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดบอริกในน้ำยาโบรอนเมื่อเติมสารส้มในปริมาณต่างกันเป็นดังรูปที่ 4.2จ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของกรดบอริกในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดมีค่าใกล้เคียง เมื่อเติมสารส้มชนิด AR grade ในช่วง 1.5-3.0 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มชนิด AR grade มากกว่า 3.0 กรัมต่อลิตร ทำให้ความเข้มข้นของกรดบอริกในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดมีแนวโน้มลดลง โดยที่ความเข้มข้นสารส้ม 3.5, 4.0, 4.5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดบอริกในน้ำยาเท่ากับ 11.07, 10.83, 10.42 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของกรดบอริกในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มชนิด Commercial grade พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มไม่มีผลต่อปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอน โดยปริมาณกรดบอริกเริ่มต้นและสุดท้ายมีปริมาณกรดบอริกไม่แตกต่างกันคือ 12.70 และ 12.19 กรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของสารส้มชนิด Commercial grade ในน้ำยามีค่าเท่ากับ 1.5 และ 4.5 กรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดบอริกในน้ำยาโบรอนที่ระดับความเข้มข้นเท่าๆกันของสารส้มชนิด AR grade และ Commercial grade ด้วยสถิติ Independent Samples t-test พบว่าปริมาณกรดบอริกของสารส้มที่ระดับความเข้มข้น 1.5, 2.5, 2.75 และ 3.0 กรัมต่อลิตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 ส่วนที่ความเข้มข้นของสารส้มอื่นๆมีปริมาณกรดบอริกในน้ำยาโบรอนแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ก-4)

ฟิเชซของสารละลายมีผลต่อรูปฟอร์มของกรดบอริก อีกทั้งการเติมสารส้มจะให้น้ำมีสภาพต่างลดลงและอาจหมดไปได้ ซึ่งจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำลดลงจนเป็นกรดจึงจำเป็นต้องติดตามการเปลี่ยนแปลงฟิเชซของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มในปริมาณต่างกัน โดยผลจากการวัดค่าฟิเชซของน้ำยาโบรอนเมื่อเติมสารส้มในปริมาณต่างๆกันเป็นดังรูปที่ 4.2ข ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าฟิเชซของน้ำยาโบรอนมีค่าลดลงเมื่อเติมสารส้มในปริมาณที่มากขึ้น โดยฟิเชซของน้ำยาโบรอนที่บำบัดด้วยสารส้มชนิด AR grade มีค่าลดลงมากกว่าการใช้สารส้มชนิด Commercial grade เมื่อเปรียบเทียบฟิเชซของน้ำยาหลังบำบัดที่ระดับความเข้มข้นเท่าๆกันของสารส้มชนิด AR grade และ Commercial grade ด้วยสถิติ Independent Samples t-test พบว่าฟิเชซของน้ำยาหลังบำบัดของสารส้มทุกความเข้มข้นความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค ตารางที่ ก-5)

จากผลการศึกษาข้างต้นจึงเลือกปริมาณของสารส้มในน้ำยาโบรอนเท่ากับ 3.0 และ 3.5 กรัมต่อลิตร ในกรณีสารส้มชนิด AR grade และชนิด Commercial grade เพื่อใช้ในการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อไป

#### **4.3 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม**

เมื่อนำน้ำยาโบรอนปริมาตร 400 มิลลิลิตร มาปรับพีเอชให้เป็น 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 พร้อมกับเติมสารส้มชนิด AR grade และชนิด Commercial grade ในปริมาณที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2 ผลการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** ผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถของสารส้อม 2 ชนิดคือ สารส้อมเกรดวิเคราะห์ (AR grade, —●—) ความเข้มข้น 3.0 g/L และสารส้อมเกรดทางการค้า (Commercial grade, --○--) ความเข้มข้น 3.5 g/L ในการฟื้นฟูสภาพน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งาน  
 หมายถึง (—●—) initial pH of AR grade, (--○--) initial pH of Commercial grade

จากรูปที่ 4.3ก พบว่าสารส้มทั้ง 2 ชนิด กำจัดความขุ่นได้สูงสุดเมื่อพีเอชของน้ำยามีค่าเท่ากับ 8 โดยที่พีเอชดังกล่าวประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มชนิด AR grade มีค่าสูงถึง 93.3% ส่วนสารส้มชนิด Commercial grade ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 89.6% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่พีเอช 8 จะพบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นตัวที่มีบทบาทมากในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (มันสิน, 2538; วนิดา, 2555) เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าลดลงจาก 8 เหลือ 7, 6 และ 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าลดลงเนื่องจากสารส้มเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}^{3+}$ ) และไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ โดยที่พีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณโมเลกุลของ  $\text{OH}^-$  ล้อมรอบมากขึ้น เช่น  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{4+}$  หรือ  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}]^{3+}$  ส่งผลให้การรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์และสารประกอบเชิงซ้อนเป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นในช่วงพีเอชต่ำมีค่าลดลง (จารุทัศน์, 2537) เช่นเดียวกับการเพิ่มพีเอชเริ่มต้นจาก 8 เป็น 9 และ 10 ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารส้มทั้งสองชนิดมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงพีเอชที่มากกว่า 9 สารส้มจะพบในรูปของ  $[\text{Al}(\text{OH})]^-$  และ  $[\text{Al}(\text{OH})_2]^{2-}$  ซึ่งเป็นประจุลบ เช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์ จึงไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ (อัญชลี, 2538)

สำหรับผลของพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารส้มทั้งสองชนิดพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารส้มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าเพิ่มจาก 5 เป็น 8 (รูปที่ 4.3ข) โดยสารส้มมีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้สูงสุด 88.4% เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าเท่ากับ 8 เนื่องจากที่พีเอชดังกล่าวเกิดการตกตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ทำให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์แบบกวาด (Stephenson and Duff 1996; Aguilar *et al.* 2005 อ้างถึงใน Wongel *et al.*, 2007) ซึ่งอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งกวาดเอาอนุภาคที่ละลายอยู่ในน้ำให้ตกตะกอน (ภูวดล, 2552) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุดและเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9 และ 10 พบว่าสารส้มมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้น้อยลงซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบของสารส้ม ทำให้ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ได้ (อัญชลี, 2538)

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด TOC ของสารส้มทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพีเอชเริ่มต้นที่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงนี้เห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของน้ำยาโบรอนที่บำบัดด้วยสารส้มชนิด Commercial grade โดยพบว่าสามารถบำบัด TOC ได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 8 ทั้งนี้อาจเป็นผลจากที่พีเอชเป็นกรดจะเกิดการ protonation ของสารอินทรีย์ทำให้เกิดปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกได้น้อย แต่ที่พีเอชสูงสารประกอบอิมิกจะมีประจุลบและอลูมิเนียมจะอยู่ในรูป  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มอนุภาคและเกิดกลไกดูดซับบนฟลอค (กฤษดา, 2553)

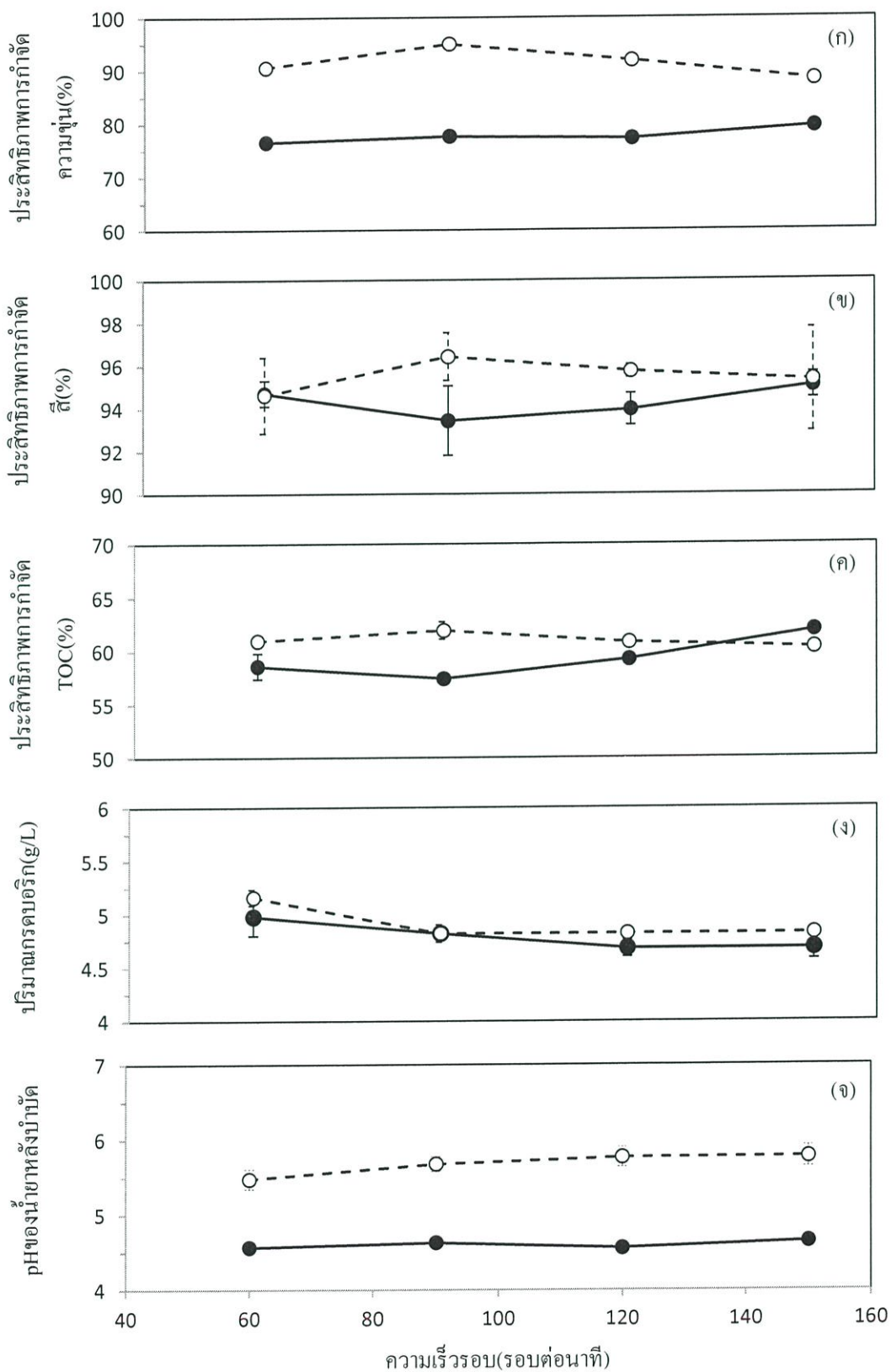
ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณกรดบอริกในสารละลายดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณกรดบอริกในสารละลายลดลงเมื่อพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการที่กรดบอริกอยู่ในสถานะที่เป็นเบสมีการให้โปรตอนทำให้อยู่ในรูปเกลือของกรดซึ่งเป็นประจุลบเหมือนกับอนุภาคคอลลอยด์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไอออนที่เป็นประจุบวกได้

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนก่อน-หลังบำบัดด้วยสารส้มทั้ง 2 ชนิดพบว่าพีเอชของน้ำยาโบรอนหลังบำบัดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีรูปที่ 4.3 ซึ่งความแตกต่างของพีเอชก่อน-หลังบำบัดจะชัดเจนมากในช่วงพีเอชเป็นกรดเนื่องจากที่พีเอชต่ำการเติมสารส้มซึ่งมีความเป็นกรดทำให้เพิ่ม  $H^+$  แก่ระบบซึ่งทำให้น้ำยาโบรอนมีความเป็นกรดมากขึ้น ในขณะที่การลดลงของพีเอชในน้ำยาโบรอนหลังบำบัดเกิดขึ้นไม่มากเมื่อน้ำยามีค่าพีเอชระหว่างพีเอช 9-10 ซึ่งเป็นผลมาจากที่สถานะดังกล่าว น้ำมีสภาพด่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปรับพีเอชด้วย NaOH ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า

จากผลการศึกษาข้างต้นจึงเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 8 เพื่อนำไปใช้ศึกษาผลของความเร็วยรอบการปั่นกวนเร็วต่อไป

#### 4.4 ผลการศึกษาความเร็วยรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม

เมื่อนำน้ำยาโบรอนปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 8 พร้อมกับเติมสารส้มชนิด AR grade และสารส้มชนิด Commercial grade ในปริมาณที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2 มาบำบัดด้วยความเร็วยรอบของการปั่นกวนเร็วที่แตกต่างกันได้แก่ 60, 90, 120, 150 รอบต่อนาทีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของความเร็วยรอบการปั่นกวนเร็วที่มีต่อลักษณะของน้ำยาโบรอน โดยใช้สารส้ม 2 ชนิด คือ สารส้มเกรดวิเคราะห์ (AR grade, ●—) ความเข้มข้น 3.0 g/L และสารส้มเกรดทางการค้า (Commercial grade, -○-) ความเข้มข้น 3.5 g/L ที่พีเอช 8

จากรูปที่ 4.4ก-ง ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี TOC ปริมาณกรดบอริกและฟิเอชของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มทั้งสองชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นกววนเร็วจาก 60 เป็น 150 รอบต่อนาที หรือค่าแรงแยงที่แรงเฉือนจาก 78 วินาที<sup>-1</sup> เป็น 308 วินาที<sup>-1</sup> ในขณะที่งานวิจัยของรุ่งทิพย์และคณะ (2545) ได้ศึกษาผลของค่าแรงแยงที่แรงเฉือนซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วรอบในการปั่นกววนเร็วต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนพบว่า ค่าแรงแยงที่แรงเฉือนที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นสาร โคลแอกกูแลนที่อยู่ในช่วง 300-600 วินาที<sup>-1</sup> แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องความเร็วรอบของเครื่องจักรทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วรอบสูงสุดที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที คิดเป็นค่าแรงแยงที่แรงเฉือนเท่ากับ 308 วินาที<sup>-1</sup> จึงทำให้ไม่สามารถระบุอิทธิพลของความเร็วรอบในการปั่นกววนเร็วต่อประสิทธิภาพการเป็นโคลแอกกูแลนของสารส้มได้

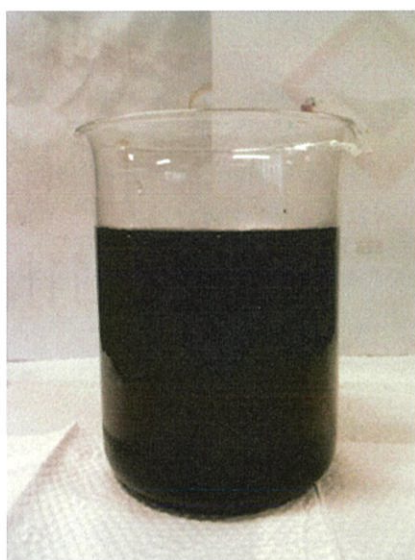
#### 4.5 เปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำยาโบรอนและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของการใช้สารส้มเป็นโคลแอกกูแลน

ผลการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ความเข้มข้น 3.0 กรัมต่อลิตรในกรณีสารส้มชนิด AR grade และ 3.5 กรัมต่อลิตรในกรณีสารส้มชนิด Commercial grade ที่ฟิเอชเริ่มต้น 8 กวนเร็วด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 3 นาที กวนช้าที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที 3 นาที ได้ผลการบำบัดดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณภาพของน้ำยาโบรอนก่อน-หลังการบำบัดด้วยสารส้มตามสภาวะที่กำหนด (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข)

ชนิดของสารส้ม	ความขุ่น (NTU)		สี (ADMI)		ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (mg/L)		ปริมาณกรดบอริก(g/L)		ฟิเอช	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
AR grade		15		19		110.8		4.68		4.65
Commercial grade	75	9	391	18	291	115.5	5.20	4.82	7.97	5.78

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยสารส้มชนิด AR grade สามารถกำจัดความขุ่นและสีลดลงจาก 75 เป็น 15 NTU และ 391 เป็น 19 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 79.4% และ 95.1% ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสามารถบำบัดได้ 61.9% ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลดลงเหลือ 110.8 มิลลิกรัมต่อลิตร การลดลงของปริมาณกรดบอริกและฟิเอชในน้ำยาโบรอนลดลงเหลือ 4.68 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 4.65 ตามลำดับ โดยสารส้มชนิด AR grade สามารถกำจัดความขุ่นและสีได้น้อยกว่า และการลดลงของปริมาณกรดบอริกและค่าฟิเอชในน้ำยาโบรอนมากกว่า แต่การกำจัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดสามารถกำจัดได้มากกว่าชนิด Commercial grade ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อน-หลังบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4.5



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) ลักษณะน้ำยาโบรอนก่อนบำบัด (ข) ลักษณะน้ำยาโบรอนหลังบำบัด

ผลการประเมินต้นทุนการบำบัดยาโบรอนโดยคำนวณจากราคาค่าสารเคมีเมื่อใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสารส้มทั้งสองชนิด พบว่าสารส้มชนิด Commercial grade ซึ่งราคาถูกกว่ามีต้นทุนประมาณ 88 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสารส้มชนิด AR grade มีต้นทุนประมาณ 960 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำยาโบรอน

ชนิดของสารส้ม	ปริมาณสารส้ม (g/L)	ราคาสารส้ม (บาทต่อกิโลกรัม)	ราคาสารส้มต่อน้ำยาโบรอน (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)
AR grade	3.0	320	960
Commercial grade	3.5	25	88

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อนำน้ำยาโบรอนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา โดยใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารส้ม ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอน และความเร็วรอบในการปั่นกวนเร็ว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำยาโบรอนของสารส้มชนิด AR grade และชนิด Commercial grade คือความเข้มข้น 3.0 และ 3.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่พีเอช 8 กวนเร็วที่ 150 รอบต่อนาที คิดเป็นค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ในการกวนเร็วคือ 308 วินาที<sup>-1</sup> นาน 3 นาที กวนช้าที่ 60 รอบต่อนาที นาน 3 นาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ 79.4%, 95.1%, 61.9% และ 88.3%, 95.3%, 60.3% ตามลำดับ น้ำยาที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของกรดบอริกเท่ากับ 4.68 และ 4.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีพีเอชเท่ากับ 4.65 และ 5.78 สำหรับการใส่สารส้มชนิด AR grade และ Commercial grade เป็นโคแอกกูแลนต์ ตามลำดับ

2. การเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มทั้งสองชนิดในน้ำยาโบรอนได้แก่ เกรดวิเคราะห์ (AR grade) และเกรดทางการค้า (Commercial grade) ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดสูงขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดพารามิเตอร์ดังกล่าวมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารส้มชนิด AR grade และ Commercial grade ในน้ำยาโบรอนมีค่าตั้งแต่ 3.0 และ 3.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มชนิด AR grade มีปริมาณกรดบอริกและพีเอชลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดบอริกและพีเอชในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดโดยใช้สารส้มชนิด Commercial grade มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า

3. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำยาโบรอน เกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอช 8 น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของกรดบอริกลดลงตามพีเอชที่สูงขึ้น

4. ความเร็วรอบในการปั่นกวนเร็วระหว่าง 60-150 รอบต่อนาที คิดเป็นค่าความเร็วแรงแคเรียนท์ 78-308 วินาที<sup>-1</sup> ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด ปริมาณกรดบอริกและพีเอชของน้ำยาหลังบำบัดของน้ำยาโบรอน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาประสิทธิภาพในการรักษาเนื้อไม้ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้ม
2. ควรศึกษาการใช้ประโยชน์ของตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำยาโบรอนหรือจัดการกับตะกอนที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม
3. ควรศึกษาปริมาณโบรอนที่อาจตกค้างอยู่ในตะกอนจากการบำบัดน้ำยาโบรอน
4. ควรศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในสารส้มชนิดเกรดทางการค้า

## เอกสารอ้างอิง

- กรมการค้าต่างประเทศ สำนักบริหารการค้าสินค้าทั่วไป กลุ่มสินค้าเกษตร. 2556. [Online]. **มาตรฐานการฉ่ำไม้ยางพาราแปรรูปของไทย**. Available:<http://www.dft.go.th>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ.2556
- กฤษฎา ทองนาค. 2553. **การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไดฮาโลมีเทนในระบบน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กระทรวงอุตสาหกรรม สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2539. [Online]. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม(มอก. 515-2539) ยารักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในน้ำ**. Available: <http://itc.excise.go.th/tisi/fulltext/TIS 515-2539.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ.2556
- จรรยา อินทมณี, จันทิมา ชั่งสิริพร และจรัญ บุญกาญจน์. 2554. **การนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำยาโบรอนในกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา**. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 วันที่ 10-11 พฤศจิกายน พ.ศ.2554 อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา.
- จารุทัศน์ มิสินทเสข. 2537. **การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เกษญา จิตรหลัง, จำเป็น ทองอ่อน, ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และอัจฉรา เฟื่องหนู. 2550. **ปัญหาการใช้ น้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันเป็นแหล่งธาตุอาหาร**. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 10: 62-73.
- เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงศ์ โปรยสุรินทร์ และนาคยา สุขประเสริฐ. 2552. **การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอดทีฟด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น**. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดารุณี โกศัยเสวี, ไพรัตน์ ทรงพานิช และจุมพฏ สุขเกื้อ. 2547. **ศึกษาปริมาณการผลิตไม้ยางพารา**. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
- ตลาดไม้ออนไลน์ 108 Wood. มปป. [Online]. **ไม้ยางพาราในประเทศไทย**. Available:<http://www.108wood.com>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2556.
- ทวิศักดิ์ วังไพศาล. 2554. **วิศวกรรมการประปา**. พิมพ์ครั้งที่ 1:บริษัท วิ.พรีนัท(1991) จำกัด.

- ทิตยา นันหมื่น. 2549. การบำบัดน้ำเสียคลองแสนแสบด้วยวิธีการรวมกลุ่มตะกอนหรือโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
- ทรงกลด จารุสมบัติ. มปป. [Online]. ชนิดของน้ำยารักษาเนื้อไม้. Available: <http://www.baannatura.com>. ชนิดของน้ำยารักษาเนื้อไม้. เข้าถึงเมื่อ 5 มิถุนายน พ.ศ.2556.
- นุชจรินทร์. มปป. [Online]. กระบวนการผลิตไม้แปรรูป. Available: <http://www2.oie.go.th>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ.2556.
- บางรักษ์ เชษฐสิงห์. 2547. การฝั่งและการอบไม้. สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้.
- ปฐมพร นันทากุล. 2549. การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดค่า COD และสีของน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ของฟาร์มของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์และน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปนัดดา ปลั่งกลาง. 2535. การกำจัดสีที่เกิดจากกรดฮิวมิกในน้ำโดยกระบวนการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. มปป. [Online]. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (Flocculation). Available: <http://www.mwa.co.th>. เข้าถึงเมื่อ 5 มิถุนายน พ.ศ.2556.
- มันติน ตันฑุลเวสม์. 2538. วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รุ่งทิพย์ เบอร์พันธ์, พีรพงศ์ ธงสินธุศักดิ์, ภาวณี นัตถรักษาและอนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. 2545. กรณีศึกษาผลของค่าแกรเดียนต์แรงเฉือนต่อกระบวนการรวมตะกอน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 โรงแรมโซล ทวิน ทาวเวอร์. กรุงเทพฯ.
- รุ่งรัตน์ ศรีนวกุล. มปป. [Online]. ข้อมูลวิชาการอุตสาหกรรมไม้ยางพารา. Available: <http://library.dip.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 22 กรกฎาคม พ.ศ.2556.
- วนิดา ชูอักษร. 2555. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17: 181-191.
- วีระนุช บุญรุ่ง. 2553. การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2537. **ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรวุฒิ ศิราธรรม. 2551. **ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้แมกนีไทต์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัญชลี นิ่มอนุสรณ์กุล. 2538. **การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแผนหมุนชีวภาพกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Dey, D., Herzog, A., and Srinivasan, V., 2007. **Coagulation and Flocculation:Color Removal**. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University.
- APHA., AWWA., and WEF. 2005. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>nd</sup> Edition. Washington, DC:American Public Health Association.
- Hendricks, D., 2011. **Fundamentals of Water Treatment Unit Process Physical, Chemical, and Biological**. Boca Raton:Taylor and Francis Group, LC.
- Nair, S., 2006. **Effectiveness of Copper-Boron Diffusion Treatments for Wood**. Degree of Master of Science, Forest Products, Graduate Studies University of Idaho.
- Wong, Pei., Teng, T., and Nurulaini, N., 2007. **Effeiciency of the Coagulation-Flocculation Method for the Treatment of Dye Mixtures Containing Disperse and Reactive Dye**. Water Quality. 42: 54-62.
- Wysecki, G., and Stiles, W., 1982. **Color Science**. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Wiley Inter-science.

ภาคผนวก ก

คุณภาพน้ำยาโบราณวิธีการวิเคราะห์

**ภาคผนวก ก**  
**วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย**

**ก-1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดบอริก**

**1) การทดลอง**

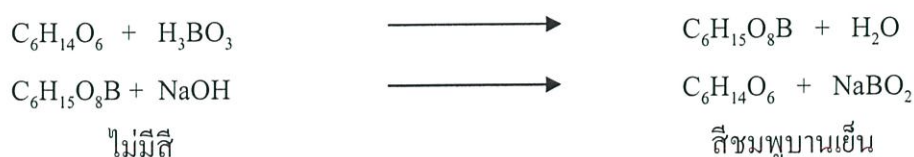
1. ปิเปิดน้ำยาโบรอนมา 10 มิลลิลิตรใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. นำมาไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วโดยใช้เมทิลเรดเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีส้มเมื่อถึงจุดยุติ ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้งแล้วหาปริมาณเฉลี่ยของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต
3. ปิเปิดน้ำยาโบรอนมาใหม่ 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ให้มีปริมาตรเท่ากับค่าเฉลี่ยที่หาได้ใน ข้อ 2. จากนั้นนำไปให้ความร้อน จนเดือดนาน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เติมดีแมนนิทอล 3 กรัม นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสารละลายใสเป็นสีชมพูเมื่อถึงจุดยุติ
5. ทดลองเติมดีแมนนิทอลลงไปอีก 0.5 กรัม ถ้าสีชมพูจางหายไปให้นำไปไทเทรตอีกครั้ง จนสารละลายมีสีชมพู เติมดีแมนนิทอลลงไปอีกครั้งถ้าสีชมพูไม่จางหาย บันทึกปริมาตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 M HCl



- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 M NaOH



## 2) การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นของกรดบอริก (g/L)} = \frac{C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times \text{Mw} \cdot \text{H}_3\text{BO}_3}{V}$$

โดยที่  $C_{\text{NaOH}}$  = ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)  
 $V_{\text{NaOH}}$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)  
 $\text{Mw} \cdot \text{H}_3\text{BO}_3$  = มวลโมเลกุลของกรดบอริก (กรัมต่อโมล)  
 $V$  = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

## ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตเท่ากับ 24.30 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.0967 โมลต่อลิตร

ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้เท่ากับ 10 มิลลิลิตร

มวลโมเลกุลของกรดบอริกเท่ากับ 61.83 กรัมต่อโมล

$$\begin{aligned} \text{จะได้ความเข้มข้นของกรดบอริก} &= \frac{0.0967 \times 24.30 \times 61.83}{10} \\ &= 14.53 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

## ก-2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

### 1) การทดลอง

1. การเตรียมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100, 200, 300, 400 และ 500 ADMI โดยการ เจือจางสารละลายสต็อกโพแทสเซียมคลอโรฟอสเฟต (K<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>) จำนวน 1.246 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร และโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) 1.000 กรัม และเจือจางจนได้ปริมาตร 1.000 มิลลิลิตร (ซึ่งจะมีหน่วยสีเท่ากับ 500 ADMI) โดยปีเปตมา 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 10 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร นำมาวัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%T) แต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-1

2. ทำการกรองตัวอย่างน้ำ ด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

3. นำไปวัดค่า %T ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Coordinate No.	Wavelength(nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

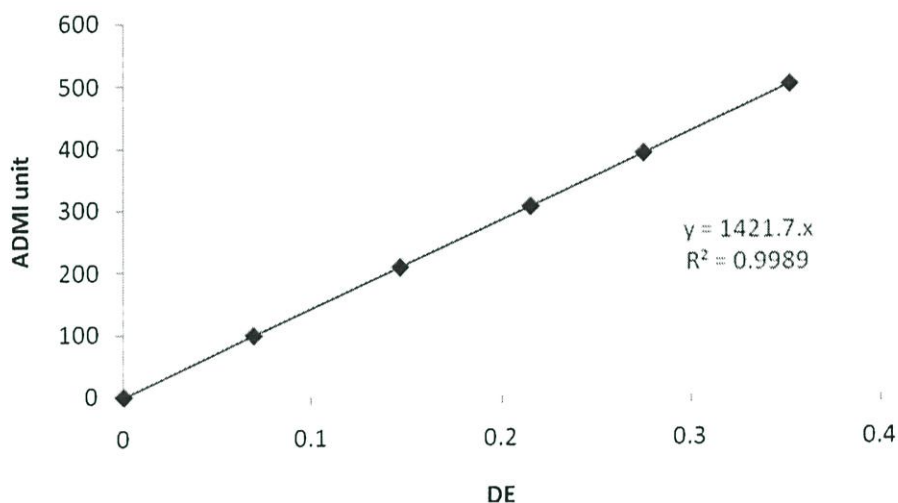
4. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นและค่า Calibration Factor จากความชันของกราฟมาตรฐานให้นำค่าที่ได้ใส่ในโปรแกรมช่วยคำนวณค่า ADMI (เจตนิพิฐ, 2552)

5. โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอ็มไอมาให้อ่านทางเวิร์คชีท ADMI

## 2) การคำนวณและแปลผล

### 1. การคำนวณ Calibration Factor (f)

เป็นการนำค่าเอเคเอ็มไอของสีมาตรฐานที่เตรียมได้มาพล็อตเทียบกับค่า DE ที่คำนวณได้ จะได้ Calibration Factor (f) จากความชันของกราฟดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

### 2. การคำนวณค่าสี (ADMI)

$$\text{ADMI UNIT} = \frac{(F)(DE)}{b}$$

โดยที่ F คือ ค่า Calibration Factor ที่ได้จากความชันของการพล็อตกราฟของค่า ADMI กับ ค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

b คือ ความกว้างของเซลล์วัดแสง (cm.)

DE หาจาก

$$DE = [(0.23 \Delta V_y)^2 + (\Delta(V_x - V_y))^2 + (0.4 \Delta(V_y - V_z))^2]^{1/2}$$

โดยที่

$$\Delta V_y = V_{yc} - V_{ys}$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xc} - V_{yc}) - (V_{xs} - V_{ys})$$

$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{yc} - V_{zc}) - (V_{ys} - V_{zs})$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าดี

1) ทำการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (%T) ในแต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-1 จะได้ค่าดังตัวอย่าง

X	70.4	72	74.6	76.1	77.6	78.8	80	81.4	83.1	86.3
Y	72.3	72.5	73.7	74.4	75.1	75.9	77	78.3	80.2	83.5
Z	66.1	68	68.7	69.2	69.9	70.5	71.4	71.3	72.1	72.7

2) นำค่าที่ได้จากแต่ละแกนมารวมกัน

$$X = 70.4 + 72 + 74.6 + 76.1 + 77.6 + 78.8 + 80 + 81.4 + 83.1 + 86.3$$

$$X = 780.3$$

$$Y = 72.3 + 72.5 + 73.7 + 74.4 + 75.1 + 75.9 + 77 + 78.3 + 80.2 + 83.5$$

$$Y = 762.9$$

$$Z = 66.1 + 68 + 68.7 + 69.2 + 69.9 + 70.5 + 71.4 + 71.3 + 72.1 + 72.7$$

$$Z = 699.9$$

3) นำผลรวมที่ได้แต่ละแกนคูณกับแฟกเตอร์จากตารางที่ ก-1

$$X_s = 780.3 \times 0.09806 \quad X_s = 76.52$$

$$Y_s = 762.9 \times 0.1 \quad Y_s = 76.29$$

$$Z_s = 699.9 \times 0.11814 \quad Z_s = 82.69$$

4) นำค่า  $X_c$   $Y_c$   $Z_c$   $X_s$   $Y_s$  และ  $Z_s$  ( $X_c$   $Y_c$  และ  $Z_c$  ได้มาจากการนำน้ำกลั่นไปวัดและคำนวณเช่นเดียวกับตัวอย่าง) แปลงเป็นค่า Munsell จากตารางของ Adam - Nickerson (Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 1982) จะได้เป็นค่าเป็น  $V_{xc}$ ,  $V_{yc}$ ,  $V_{zc}$ ,  $V_{xs}$ ,  $V_{ys}$  และ  $V_{zs}$  ตามลำดับจะได้  $V_{xc} = 9.9$   $V_{yc} = 9.9$   $V_{zc} = 9.9$   $V_{xs} = 8.97$   $V_{ys} = 8.88$   $V_{zs} = 8.58$

5) นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE

$$DE = \{[(9.9 - 8.88) \times 0.23]^2 + [(9.9 - 9.9) - (8.97 - 8.88)]^2 + [0.4 \times [(9.9 - 9.9) - (8.88 - 8.58)]]^2\}^{1/2}$$

$$DE = 0.2784$$

$$ADMI = (0.2784 \times 1421.7) / 1 = 396$$

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสี

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

โดยที่  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (ADMI)

$C_e$  = ความเข้มข้นสุดท้าย (ADMI)

สมมติความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 396 ADMI

สมมติความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 45 ADMI

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} &= ((396 - 45)/396) \times 100 \\ &= 88.64\% \end{aligned}$$

### 3) การใช้โปรแกรมช่วยคำนวณค่า ADMI (เจตนิพิฐ, 2552)

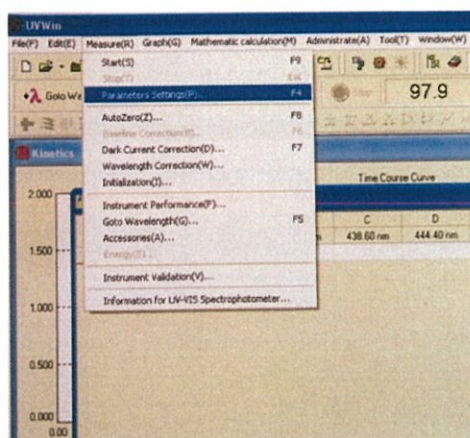
ขั้นตอนการดำเนินงานบนคอมพิวเตอร์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. เข้าโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1 ผ่านทางไอคอนหน้าจอ

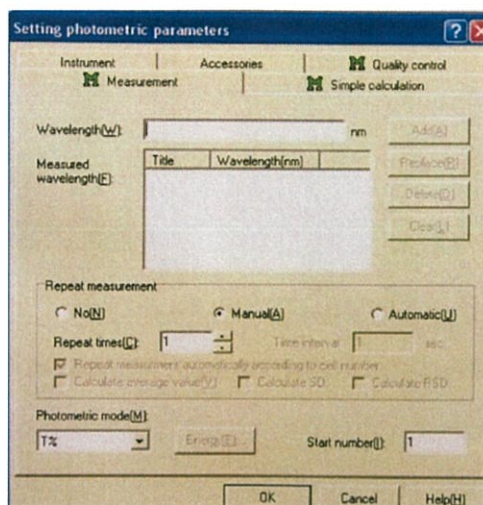


2. ใส่ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแต่ละ โคออดิเนต จนครบทั้ง 3 แกน

- 2.1 เข้า Measure จากนั้นคลิกที่ Parameter Setting



## 2.2 ใส่ความยาวคลื่นในช่วง Wavelength (W) ดังตาราง ก.1



## 3. กรองน้ำตัวอย่างด้วยฟิลเตอร์ใส่เซลล์ จากนั้นวัดค่า %T ของน้ำตัวอย่าง

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	No.	ID	Mode	A 435.50 nm	B 461.20 nm	C 544.30 nm	D 564.10 nm	E 577.40 nm	F 588.70 nm	G 599.60 nm	H 610.90 nm	I 624.20 nm	J 654.90 nm
2	1	1-Feb	T%	91.9	93.9	97.1	97.5	97.7	97.9	98	98.2	98.4	98.7
3	2	1-Mar	T%	81.9	87.3	94.7	95.6	96	96.4	96.6	96.9	97.3	97.8
4	3	1-Apr	T%	90.8	94	98	98.4	98.6	98.8	98.9	99	99.2	99.3
5	4	1-May	T%	87.7	92.2	97.5	98.1	98.3	98.5	98.6	98.8	98.9	99.2
6	5	1-Jun	T%	90.1	93.9	98	98.4	98.6	98.7	98.8	98.9	99	99.1
7	6	1-Jul	T%	90.5	93.8	97.8	98.2	98.4	98.5	98.6	98.7	98.8	99
8	7	1-Aug	T%	91.9	94.9	98.2	98.5	98.6	98.7	98.8	98.9	99	99.1
9	8	1-Sep	T%	93	95.5	98.1	98.4	98.5	98.6	98.7	98.8	98.8	98.9
10	9	1-Oct	T%	94	96.1	98.3	98.6	98.7	98.8	98.8	98.9	99	99.1
11	10	1-Nov	T%	93.8	96.1	98.3	98.6	98.7	98.8	98.8	99	99	99.1
12	11	1-Dec	T%	94.6	96.6	98.4	98.7	98.8	98.8	98.9	99	99	99.1

## 4. โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า DE และค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอ็มไอมาให้ผ่านทางเวิร์คชีท ADMI

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI	
2	40	95.49083	97.62	110.9098	9.8	9.81	9.66	0.064253	92.52479
3	35	90.28384	93.03	92.85804	9.59	9.63	9	0.262603	378.1485
4	30	91.5194	94.18	96.65033	9.64	9.67	9.14	0.22055	317.5924
5	25	92.40194	95.01	102.2029	9.67	9.71	9.35	0.15571	224.2228
6	20	92.75495	95.21	101.9312	9.69	9.71	9.34	0.155607	224.0748
7	15	93.22564	95.66	102.9826	9.71	9.73	9.38	0.146727	211.2869
8	10	93.34331	95.75	107.85	9.71	9.73	9.55	0.084337	121.446
9	5	93.85323	96.21	104.4121	9.73	9.75	9.43	0.134068	193.058
10	4	93.86303	96.42	104.7311	9.73	9.76	9.44	0.135354	194.9105
11	3	94.82402	97.1	107.0467	9.77	9.79	9.53	0.108886	156.7954
12	2	96.38317	98.62	111.7486	9.84	9.85	9.69	0.065789	94.73679

### ก-3 การวิเคราะห์ค่าที่ไอซี (Total Organic Carbon, TOC)

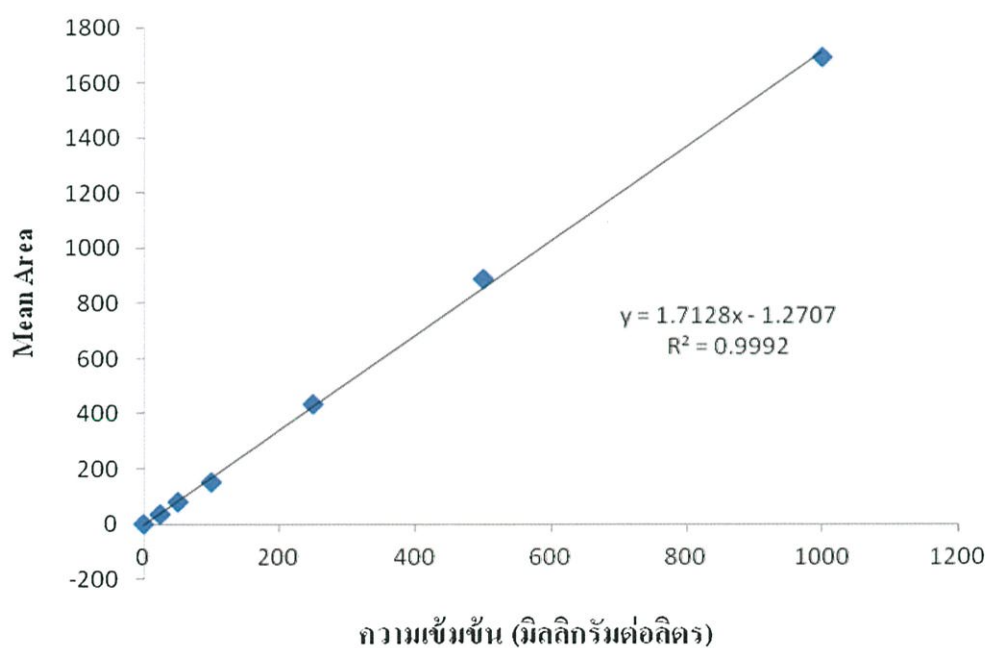
#### 1) การทดลอง

##### 1. การทำ Calibration Curve ของปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)

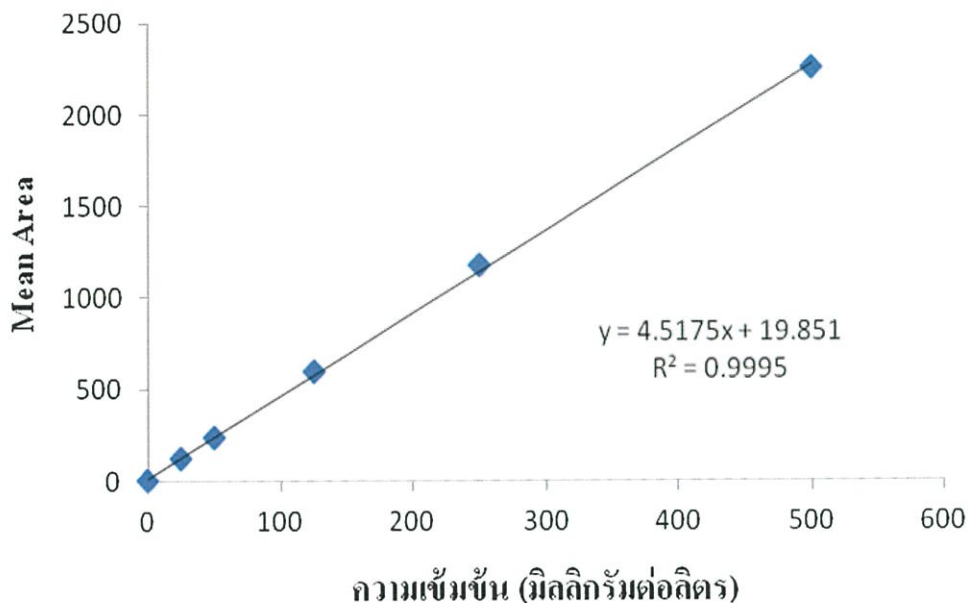
1.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) ของปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TC) โดยเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ( $C_8H_5KO_4$ ) ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (mgC/L) ใส่ vial ขนาด 20 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด

1.2 สำหรับการทำให้ Calibration Curve ของสารอินทรีย์ (IC) ให้ใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) และ โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (mgC/L) ใส่ vial ขนาด 20 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด

1.3 เลือกช่วงเชิงฉากและดำเนินการทดลองโดยป้อนคำสั่งให้เครื่องวัด TOC ตามคู่มือการใช้เครื่องตามความเหมาะสมได้ Calibration Curve ของสารอินทรีย์ (TC) และ Calibration Curve ของสารอินทรีย์ (IC) ดังรูปที่ ก-2 และรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมพทาเลต ใช้ในการทำกราฟมาตรฐานสารอินทรีย์คาร์บอน (TC)



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตรวมกับโซเดียมคาร์บอเนตใช้ในการทำกราฟมาตรฐานสารอินทรีย์คาร์บอน (IC)

## 2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.1 นำน้ำตัวอย่าง หรือน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานแล้วและน้ำยาโบรอนที่ผ่านการทดสอบจาร์เทสต์ มากรองผ่านไซลิงค์ฟิลเตอร์ ใส่ vial ขนาด 20 มิลลิลิตรสำหรับวิเคราะห์

2.2 ทำการวิเคราะห์โดยเลือก Mode (TC, IC) ในการวิเคราะห์ดำเนินการทดลองโดยป้อนคำสั่งให้เครื่องวัด TOC ตามคู่มือการใช้เครื่อง

2.3 ในการทดลองทุกครั้งต้องทำแบลนด์ด้วยน้ำกลั่นเสมอ

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการทดลอง**

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 น้ำยาโบรอนก่อนกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ครั้งที่ 1 เดือนมิ.ย.

ลักษณะน้ำยาโบรอน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ความขุ่น	129.00	135.00	167.00
สี (ADMI)	338.0	412.0	597.0
TOC(mg/L)	50.1	50.9	50.8
ความเข้มข้นของกรดบอริก(g/L)	14.53	14.50	14.11
ค่าพีเอช	7.20	7.40	7.30

ตารางที่ ข-2 น้ำยาโบรอนก่อนกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ครั้งที่ 2 เดือนก.ย.

ลักษณะน้ำยาโบรอน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ความขุ่น	75.50	74.50	75.20
สี (ADMI)	391.0	389.0	393.0
TOC (mg/L)	290.9	294.4	287.2
ความเข้มข้นของกรดบอริก(g/L)	5.05	5.30	5.24
ค่าพีเอช	8.07	8.04	7.80

ตารางที่ ข-3 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

ความเข้มข้นของ สารส้ม (mg/L)	ค่าความขุ่นของสารส้ม AR grade (NTU)			ค่าความขุ่นของสารส้ม Commercial grade (NTU)		
	1	2	3	1	2	3
1.50	30.50	30.40	30.30	29.90	30.30	30.90
2.00	12.70	12.90	12.40	31.80	31.90	31.90
2.25	8.77	8.97	9.04	36.00	36.70	37.30
2.50	17.60	17.60	17.90	22.30	22.70	22.80
2.75	12.90	12.70	12.90	21.90	21.50	21.80
3.00	7.31	7.76	7.69	9.48	9.46	9.51
3.50	6.05	6.18	6.29	4.60	4.30	4.40
4.00	7.60	7.56	7.46	2.62	2.59	2.61
4.50	8.79	8.49	8.83	2.83	2.77	2.90

ตารางที่ ข-4 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม

pH	ค่าความขุ่นของสารส้ม AR grade (NTU)			ค่าความขุ่นของสารส้ม Commercial grade (NTU)		
	1	2	3	1	2	3
5	31.10	30.60	31.10	18.30	18.10	18.70
6	43.70	45.10	45.00	69.90	70.70	71.10
7	33.40	33.00	33.00	32.00	31.90	31.70
8	5.20	4.70	5.10	7.90	7.80	7.80
9	36.10	36.30	36.30	23.30	23.60	23.70
10	22.50	22.60	22.60	23.20	23.70	24.10

ตารางที่ ข-5 ค่าความขุ่นของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกววนเร็วที่เหมาะสม

ความเร็วรอบการ ปั่นกววนเร็ว (rpm)	ค่าความขุ่นของสารส้ม AR grade (NTU)			ค่าความขุ่นของสารส้ม Commercial grade (NTU)		
	1	2	3	1	2	3
60	17.80	17.70	17.30	7.00	7.10	7.10
90	16.40	17.10	16.90	3.90	3.70	3.70
120	16.90	17.30	17.20	5.80	6.20	6.30
150	15.80	15.30	15.30	8.70	8.80	8.80

ตารางที่ ข-6 ค่าทรานสมิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	103.0	102.9	103.0	99.3	99.3	99.3	100.0	99.9	99.9	100.3	100.2	100.2	100.5	100.4	100.4
2.00	104.5	105.0	105.1	100.4	100.7	100.7	100.4	100.5	100.6	100.5	100.7	100.7	100.7	100.9	100.8
2.25	105.7	105.9	105.8	101.1	101.4	101.2	100.6	100.9	100.9	100.8	101.0	101.0	100.9	101.1	101.0
2.50	106.5	106.6	106.7	101.6	101.7	102.0	101.0	100.9	101.1	101.1	101.0	101.2	101.1	101.1	101.3
2.75	107.5	107.5	107.6	102.2	102.4	102.6	101.4	101.4	101.4	101.3	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5
3.00	107.9	107.9	107.7	102.7	102.7	102.5	101.6	101.5	101.5	101.4	101.4	101.5	101.6	101.6	101.5
3.50	107.7	107.8	107.7	102.6	102.6	102.4	101.5	101.5	101.5	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5
4.00	107.1	107.0	107.3	102.1	102.3	102.2	101.3	101.3	101.3	101.2	101.3	101.4	101.3	101.4	101.4
4.50	107.5	107.8	107.5	102.5	102.6	102.3	101.4	101.5	101.4	101.5	101.5	101.4	101.5	101.5	101.5
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	100.6	100.6	100.6	100.8	100.7	100.7	100.9	100.8	100.9	101.0	101.0	101.0	101.2	101.1	101.1
2.00	100.8	100.9	100.9	100.9	101.1	101.0	101.1	101.2	101.2	101.1	101.3	101.2	101.2	101.3	101.3
2.25	101.0	101.2	101.2	101.1	101.3	101.3	101.1	101.4	101.4	101.2	101.5	101.4	101.2	101.5	101.4
2.50	101.2	101.2	101.3	101.3	101.3	101.4	101.3	101.3	101.5	101.4	101.4	101.5	101.4	101.4	101.5
2.75	101.5	101.5	101.6	101.5	101.6	101.6	101.6	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.6	101.6	101.7
3.00	101.6	101.5	101.5	101.6	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.8	101.7	101.7	101.7	101.7
3.50	101.3	101.5	101.5	101.7	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.7	101.7	101.7	101.6	101.6	101.6
4.00	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.5	101.5	101.6
4.50	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.7	101.6	101.6

ตารางที่ ข-7 ค่าทรานส์มิตแตนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	94.8	96.1	96.0	95.6	95.8	94.9	99.4	99.5	99.4	99.7	99.8	99.8	99.9	100.0	100.0
2.00	98.8	96.6	96.8	99.0	96.6	97.4	100.2	100.1	100.0	100.5	100.4	100.3	100.6	100.5	100.4
2.25	97.5	98.4	98.6	97.8	98.6	98.3	100.5	100.6	100.2	100.7	100.8	100.5	100.8	100.8	100.6
2.50	99.3	98.9	99.0	98.6	98.8	99.2	100.7	100.7	100.7	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9
2.75	99.7	99.3	99.2	99.5	99.9	99.4	101.1	101.1	101.1	101.3	101.3	101.2	101.3	101.3	101.2
3.00	100.2	100.1	100.2	99.6	100.2	99.6	101.2	101.2	101.1	101.3	101.4	101.3	101.4	101.4	101.3
3.50	99.0	98.3	98.7	98.1	97.4	98.5	101.2	101.1	101.2	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
4.00	98.0	98.1	98.1	97.5	98.2	98.1	101.0	101.0	101.0	101.1	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2
4.50	100.3	98.6	98.6	100.2	99.1	98.5	101.2	101.1	101.1	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3	101.3
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	100.0	100.1	100.2	100.1	100.2	100.2	100.4	100.4	100.5	100.6	100.6	100.7	100.9	100.9	101.0
2.00	100.7	100.6	100.5	100.7	100.6	100.5	100.9	100.8	100.7	101.1	101.0	100.8	101.2	101.2	101.1
2.25	100.9	100.9	100.7	100.9	100.9	100.6	101.1	101.1	100.8	101.2	101.2	100.9	101.3	101.4	101.1
2.50	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.0	101.1	101.2	101.1	101.2	101.3	101.2	101.3	101.4	101.3
2.75	101.4	101.3	101.3	101.3	101.3	101.2	101.5	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5	101.7	101.6	101.5
3.00	101.5	101.5	101.3	101.4	101.4	101.2	101.5	101.5	101.3	101.6	101.6	101.4	101.6	101.6	101.5
3.50	101.3	101.3	101.4	101.3	101.3	101.3	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5	101.6	101.5	101.6
4.00	101.3	101.2	101.2	101.2	101.2	101.2	101.4	101.3	101.3	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5
4.50	101.3	101.4	101.3	101.3	101.3	101.3	101.5	101.5	101.4	101.5	101.6	101.5	101.6	101.6	101.6

ตารางที่ ข-8 ค่าทรานสมิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	91.3	91.3	90.3	94.2	94.4	93.3	95.1	95.1	95.0	95.8	95.8	95.8	96.6	96.4	96.3
2.00	93.0	93.1	92.7	95.7	95.8	95.5	96.9	96.4	96.8	97.6	97.4	97.1	98.1	98.0	97.9
2.25	93.0	93.7	95.6	96.7	96.5	97.4	97.7	98.1	98.2	98.1	98.2	98.3	98.6	98.8	98.8
2.50	95.4	95.8	96.9	98.1	98.3	98.4	99.0	99.0	98.9	99.1	99.1	99.1	99.4	99.6	99.3
2.75	97.2	96.7	97.6	98.9	98.8	99.1	99.6	99.6	99.9	99.8	99.6	99.5	100.1	100.2	100.2
3.00	98.2	98.5	98.6	99.7	99.6	99.7	100.3	100.2	100.1	99.9	100.0	99.9	100.4	100.3	100.0
3.50	96.5	95.8	95.9	98.4	98.4	98.2	99.4	99.4	99.1	99.6	99.5	99.6	100.1	99.9	100.0
4.00	96.6	96.1	94.9	98.6	98.2	97.7	99.3	99.0	98.9	99.2	99.1	99.0	99.7	99.8	99.4
4.50	96.9	96.52	95.6	98.5	98.1	98.2	99.3	99.3	99.5	99.6	99.4	99.6	100.0	100.0	99.9
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	96.9	96.9	96.9	97.6	97.5	97.4	97.4	97.4	97.5	98.1	98.2	98.1	98.5	98.6	98.8
2.00	98.3	98.4	98.1	99.0	98.8	98.6	98.8	98.6	98.4	99.4	99.3	98.9	99.7	99.6	99.4
2.25	99.0	99.0	99.0	99.5	99.5	99.3	99.1	99.4	99.2	99.8	99.9	99.6	100.2	100.0	99.9
2.50	99.7	99.6	99.6	100.2	100.0	100.1	99.8	99.7	99.8	100.4	100.3	100.3	100.4	100.2	100.3
2.75	100.5	100.2	100.4	100.7	100.7	100.8	100.4	100.6	100.2	100.9	100.7	100.7	100.9	100.7	101.0
3.00	100.6	100.5	100.2	100.8	100.9	100.6	100.5	100.5	100.2	100.9	101.0	100.6	101.3	101.1	100.7
3.50	100.4	100.3	100.3	100.8	100.9	100.7	100.4	100.5	100.4	100.9	100.8	100.8	101.0	100.8	101.0
4.00	100.1	99.9	99.8	100.4	100.3	100.5	100.2	100.0	100.2	100.6	100.6	100.8	100.7	100.8	100.8
4.50	100.3	100.2	100.3	100.7	100.6	100.8	100.4	100.4	100.5	100.8	100.8	100.9	100.9	101.0	100.9

ตารางที่ ข-9 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	97.3	97.1	97.3	94.6	94.5	94.7	96.9	96.9	96.9	97.4	97.5	97.4	97.9	97.9	97.9
2.00	101.3	101.1	101.2	98.1	97.7	97.9	99.2	98.9	98.8	99.5	99.3	99.3	99.8	99.6	99.7
2.25	102.8	102.5	99.3	99.1	98.8	97.6	100.0	99.6	99.6	100.2	99.9	99.8	100.4	100.2	100.2
2.50	103.3	103.1	102.8	99.5	99.3	99.1	100.1	100.0	100.0	100.3	100.2	100.2	100.5	100.5	100.4
2.75	103.8	104.0	104.1	99.8	100.0	99.9	100.3	100.3	100.4	100.5	100.5	100.5	100.7	100.7	100.7
3.00	104.7	104.7	104.7	100.4	100.5	100.5	100.5	100.6	100.7	100.7	100.8	100.8	100.8	100.9	100.9
3.50	105.8	106.0	105.9	101.3	101.3	101.3	100.9	100.9	100.9	101.0	100.9	101.0	101.0	101.1	101.0
4.00	106.6	106.7	106.5	101.8	101.8	101.7	101.1	101.1	101.1	101.1	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2
4.50	107.1	107.1	107.0	102.2	102.1	102.2	101.2	101.2	101.3	101.2	101.2	101.2	101.3	101.3	101.3
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	98.3	98.2	98.2	98.6	98.5	98.6	98.9	98.8	98.9	99.2	99.2	99.2	99.7	99.7	99.7
2.00	100.0	99.8	99.9	100.1	100.0	100.1	100.4	100.2	100.2	100.5	100.4	100.4	100.7	100.6	100.7
2.25	100.6	100.3	100.3	100.7	100.5	100.4	100.9	100.7	100.7	101.0	100.8	100.8	101.0	101.0	101.0
2.50	100.7	100.6	100.6	100.8	100.7	100.7	100.9	100.9	100.9	101.1	101.0	101.0	101.2	101.1	101.0
2.75	100.9	100.8	100.8	101.0	101.0	100.9	101.1	101.1	101.1	101.2	101.2	101.2	101.3	101.2	101.2
3.00	100.9	101.0	101.0	101.0	101.1	101.2	101.1	101.3	101.3	101.2	101.3	101.4	101.2	101.3	101.4
3.50	101.2	101.1	101.2	101.3	101.2	101.3	101.3	101.2	101.3	101.4	101.3	101.4	101.4	101.3	101.4
4.00	101.3	101.3	101.3	101.3	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5	101.4	101.5	101.4
4.50	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.6	101.5	101.5	101.5

ตารางที่ ข-10 ค่าทรานส์มิตแตนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	94.3	92.2	93.9	95.0	92.6	95.1	96.2	96.1	96.2	96.7	96.7	96.7	97.0	97.0	97.0
2.00	95.0	95.1	96.9	95.2	95.2	97.5	98.4	98.3	98.6	98.8	98.8	99.0	99.1	98.9	99.2
2.25	97.8	95.5	96.2	98.3	95.1	95.7	99.1	99.1	99.1	99.4	99.4	99.4	99.6	99.6	99.6
2.50	96.7	95.5	95.6	96.6	95.52	94.9	99.4	99.5	99.5	99.8	99.8	99.8	99.9	100.0	100.0
2.75	96.2	98.2	98.2	95.4	98.3	98.2	99.8	99.8	99.8	100.1	400.1	100.2	100.3	100.3	100.3
3.00	98.9	96.7	96.2	98.6	95.9	95.6	100.1	100.1	100.0	100.4	100.4	100.3	100.5	100.5	100.4
3.50	97.4	98.9	98.1	96.5	98.6	97.0	100.5	100.5	100.5	100.8	100.7	100.7	100.8	100.8	100.8
4.00	98.7	98.7	98.6	99.0	98.8	98.9	100.7	100.7	100.7	100.8	100.9	100.9	100.9	101.0	101.0
4.50	100.3	99.7	99.4	100.4	99.5	99.1	100.9	100.9	100.9	101.1	101.1	101.0	101.1	101.1	101.1
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	97.4	97.3	97.4	97.7	97.6	97.7	98.1	98.0	98.1	98.6	98.5	98.5	99.2	99.2	99.2
2.00	99.3	99.2	99.5	99.4	99.4	99.6	99.7	99.6	99.9	100.0	100.0	100.1	100.3	100.4	100.6
2.25	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	100.2	100.2	100.2	100.4	100.4	100.4	100.8	100.7	100.7
2.50	100.1	100.2	100.2	100.2	100.2	100.3	100.4	100.5	100.5	100.6	100.7	100.7	100.9	101.0	101.0
2.75	100.4	100.4	100.5	100.5	100.5	100.5	100.7	100.7	100.7	100.9	100.9	100.9	101.1	101.1	101.1
3.00	100.6	100.6	100.6	100.7	100.7	100.6	100.9	100.8	100.8	101.0	101.0	101.0	101.2	101.2	101.1
3.50	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	100.9	101.1	101.0	101.0	101.2	101.1	101.2	101.3	101.3	101.3
4.00	101.0	101.0	101.0	100.9	101.1	101.0	101.1	101.2	101.1	101.2	101.3	101.3	101.3	101.4	101.4
4.50	101.1	101.1	101.1	101.1	101.1	101.1	101.2	101.3	101.2	101.3	101.4	101.3	101.4	101.4	101.4

ตารางที่ ข-11 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	86.1	85.8	85.5	88.9	88.9	88.6	90.3	90.3	90.3	91.1	90.9	90.8	91.8	91.7	91.6
2.00	89.7	89.4	90.0	92.2	92.2	92.7	93.8	93.5	94.2	94.4	94.1	94.4	94.9	94.7	95.1
2.25	93.8	90.2	91.3	95.1	93.2	93.6	95.6	94.8	94.7	95.7	95.4	95.3	96.3	95.9	96.0
2.50	90.4	90.7	91.2	93.4	94.1	94.0	95.1	95.4	95.5	95.8	95.7	95.8	96.4	96.5	96.6
2.75	92.0	91.6	94.3	94.8	94.7	96.0	95.7	95.5	96.6	96.5	96.3	96.8	97.1	97.0	97.3
3.00	93.1	93.2	93.2	95.7	95.5	95.8	96.9	96.7	96.6	97.1	97.0	97.0	97.8	97.8	97.7
3.50	93.5	96.7	96.0	95.6	97.7	97.3	97.2	98.3	98.1	97.8	98.4	98.2	98.7	98.8	98.6
4.00	98.3	95.9	98.4	99.2	97.9	99.0	99.4	98.9	99.3	99.3	99.1	99.2	99.6	99.5	99.7
4.50	98.8	99.0	98.2	99.6	99.5	99.2	99.7	99.8	99.5	99.5	99.7	99.5	99.9	100.0	99.7
ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.50	92.3	92.2	92.4	93.0	93.0	93.1	93.2	93.1	93.0	94.1	93.9	94.1	94.5	94.7	94.4
2.00	95.4	95.4	95.5	96.1	95.9	96.2	96.1	95.9	96.3	96.7	96.6	96.9	97.4	97.4	97.4
2.25	96.5	96.2	96.2	97.0	97.1	97.0	97.2	97.0	97.1	97.7	97.6	97.6	98.4	97.7	97.9
2.50	97.0	97.0	97.2	97.4	97.6	97.7	97.4	97.3	97.4	97.9	98.2	98.1	98.6	98.7	98.8
2.75	97.4	97.4	97.7	98.2	98.1	98.2	97.9	98.0	98.1	98.8	98.6	98.8	99.1	98.9	99.2
3.00	98.1	98.1	98.2	98.7	98.7	98.7	98.4	98.5	98.5	99.2	99.3	99.0	99.4	99.4	99.3
3.50	98.6	99.2	99.1	99.2	99.6	99.6	99.2	99.5	99.4	99.7	99.9	99.8	100.2	99.9	100.0
4.00	99.6	99.6	99.9	100.0	100.1	100.3	99.7	99.7	99.9	100.0	100.1	100.4	100.3	100.5	100.3
4.50	100.1	100.1	100.0	100.5	100.7	100.3	100.3	100.3	100.0	100.6	100.6	100.4	100.6	100.5	100.7

ตารางที่ ข-12 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพิเอชที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade

pH	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	95.3	95.5	95.4	95.6	95.6	95.6	97.2	97.2	97.2	97.6	97.7	97.6	97.9	98.0	97.9
6	90.3	89.9	89.8	92.2	92.0	91.9	95.6	95.5	95.2	96.1	96.0	95.9	96.4	96.2	96.2
7	100.9	100.9	100.9	97.7	97.6	97.6	98.9	98.9	98.9	99.2	99.2	99.1	99.2	99.2	99.1
8	104.2	104.1	104.1	100.0	100.0	99.9	99.8	99.5	99.7	99.8	99.6	99.8	99.8	99.5	99.7
9	91.4	91.4	91.3	89.4	89.4	89.6	92.4	92.5	92.4	93.2	93.3	93.2	93.7	93.9	93.7
10	83.3	83.2	83.1	86.1	86.0	86.0	91.4	91.4	91.3	92.3	92.3	92.2	92.7	92.8	92.7
pH	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	5	98.0	98.0	98.0	98.1	98.2	98.2	98.3	98.3	98.3	98.4	98.5	98.4	98.8	98.8
6	96.5	96.4	96.3	96.6	96.5	96.5	96.8	96.7	96.6	97.0	96.7	96.8	97.5	97.4	97.2
7	99.4	99.3	99.3	99.4	99.4	99.3	99.5	99.5	99.4	99.5	99.5	99.5	99.6	99.5	99.5
8	99.8	99.6	99.8	99.8	99.6	99.7	99.8	99.6	99.7	99.8	99.6	99.7	99.8	99.6	99.8
9	94.1	94.2	94.1	94.5	94.6	94.5	94.9	95.0	95.0	95.3	95.4	95.4	96.0	96.1	96.1
10	93.1	93.2	93.1	93.4	93.5	93.3	93.7	93.9	93.7	94.0	94.2	94.0	94.6	94.9	94.6

ตารางที่ ข-13 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade

pH	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	95.3	94.6	95.1	94.8	95.2	95.1	96.7	96.8	96.7	97.0	97.0	97.1	97.3	97.3	97.3
6	93.6	93.3	93.2	94.6	94.6	94.4	95.2	95.0	94.8	95.5	95.4	95.2	95.9	95.7	95.5
7	97.4	97.2	96.9	97.6	97.1	96.6	98.6	98.5	98.6	98.7	98.6	98.7	98.8	98.7	98.9
8	99.3	98.8	99.1	99.0	97.4	98.8	99.6	99.6	95.5	99.6	99.6	95.5	99.6	99.6	95.5
9	89.6	89.9	89.2	89.5	90.4	89.5	91.7	91.8	91.8	92.2	92.3	92.3	92.6	92.6	92.6
10	88.5	88.2	88.0	90.1	89.9	89.9	90.9	90.6	90.7	91.5	91.2	91.3	92.0	91.7	91.8
pH	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	5	97.5	97.5	97.5	97.7	97.7	97.7	97.9	98.0	97.9	98.1	98.1	98.1	98.4	98.5
6	96.1	96.0	95.8	96.4	96.2	96.0	96.5	96.4	96.2	96.8	96.6	96.4	97.1	97.0	96.8
7	98.9	98.8	98.9	99.0	98.9	99.0	99.1	99.0	99.2	99.2	99.2	99.3	99.4	99.3	99.5
8	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.5	99.6	99.7	99.6	99.6	99.6	99.6	99.7	99.7	99.7
9	92.9	93.0	93.0	93.4	93.4	93.5	93.9	94.0	93.9	94.5	94.5	94.5	95.4	95.4	95.4
10	92.4	92.2	92.2	92.8	92.6	92.6	93.2	93.0	93.0	93.7	93.4	93.4	94.4	94.2	94.1

ตารางที่ ข-14 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารสี AR grade

pH	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	89.7	98.9	91.3	92.5	92.3	92.9	92.9	92.9	93.3	92.9	93.4	93.2	93.6	93.7	93.9
6	88.9	88.5	88.3	90.0	89.7	89.3	90.8	90.4	90.4	91.4	91.1	91.0	91.9	91.6	91.6
7	94.0	93.1	93.8	95.6	95.0	95.4	95.8	95.5	95.8	95.7	95.6	95.7	96.1	95.7	95.8
8	98.2	97.1	97.9	98.9	98.6	98.9	98.7	98.6	98.7	98.7	98.4	98.6	98.6	98.8	98.7
9	84.7	83.5	84.1	86.6	86.0	86.3	87.1	86.8	86.7	87.3	86.9	87.2	87.6	87.5	87.5
10	83.1	81.1	81.2	83.1	82.9	82.8	83.9	83.9	83.9	84.6	84.6	84.6	85.2	85.2	85.2
pH	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	5	94.2	94.3	94.4	94.7	94.8	94.9	94.3	94.2	94.3	94.9	95.2	95.1	95.8	95.9
6	92.2	92.0	91.8	92.5	92.0	91.9	93.2	92.9	92.8	93.4	92.9	92.8	94.0	93.5	93.2
7	96.7	96.5	96.7	97.1	97.1	97.3	96.3	96.0	96.1	97.1	97.0	97.1	97.9	97.7	97.8
8	99.3	99.1	99.2	99.3	99.4	99.4	98.5	98.3	98.4	99.0	91.1	99.1	99.3	99.6	99.3
9	88.7	88.4	88.6	89.1	89.0	89.0	88.6	88.4	88.7	89.6	89.4	89.5	90.5	90.4	90.3
10	85.7	85.7	85.7	86.3	86.0	86.0	86.9	87.1	87.1	87.6	87.6	87.6	88.5	88.5	88.6

ตารางที่ ข-15 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade

pH	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	96.4	96.1	93.3	94.4	94.1	91.2	97.5	97.4	94.5	98.1	97.9	95.0	98.3	98.2	95.2
6	100.0	99.8	99.7	97.0	96.9	96.7	98.7	98.5	98.5	99.1	98.9	98.9	99.1	99.0	98.9
7	102.0	102.0	101.8	98.5	98.3	98.1	99.2	99.2	99.0	99.3	99.3	99.2	99.4	99.4	99.2
8	104.3	104.2	104.3	99.8	99.8	99.7	99.7	99.6	99.7	99.8	99.7	99.8	99.8	99.6	99.8
9	93.1	90.1	86.3	90.6	87.8	84.5	93.0	90.7	87.9	93.7	91.5	88.8	94.1	92.0	89.4
10	97.7	97.8	97.8	95.1	95.2	95.0	97.3	97.3	97.3	97.7	97.8	97.7	98.0	98.0	98.0
pH	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	98.5	98.3	95.3	98.6	98.5	95.4	98.8	98.6	95.5	98.8	98.7	95.6	99.1	98.9	95.7
6	99.3	99.0	99.1	99.3	99.1	99.1	99.4	99.2	99.2	99.4	99.2	99.3	99.6	99.3	99.4
7	99.4	99.4	99.3	99.5	99.4	99.3	99.5	99.6	99.4	99.6	99.6	99.4	99.6	99.5	99.5
8	99.8	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8	99.9	99.7	99.8	99.9	99.7	99.8	99.8	99.7	99.8
9	94.4	92.3	89.9	94.7	92.7	90.3	95.1	93.0	90.8	95.4	93.5	91.3	96.0	94.3	92.4
10	98.1	98.2	98.1	98.3	98.4	98.3	98.5	98.6	98.5	98.7	98.8	98.7	98.9	99.0	98.9

ตารางที่ ข-16 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade

pH	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	94.3	94.2	94.3	94.4	94.7	94.8	96.9	96.7	96.4	97.3	97.1	96.8	97.7	97.4	97.1
6	96.4	96.3	96.5	96.0	96.3	96.6	98.3	98.1	98.0	98.5	98.4	98.4	98.7	98.6	98.5
7	98.2	97.6	97.5	98.4	97.4	97.5	98.9	98.8	98.7	99.0	99.0	98.8	99.1	99.1	98.9
8	98.5	99.0	97.8	97.7	98.6	99.2	99.6	99.4	99.1	99.6	99.5	98.2	99.6	99.5	98.5
9	90.3	87.6	85.4	90.5	88.3	85.9	92.4	90.0	87.1	92.8	90.4	87.6	93.1	90.8	88.1
10	95.0	95.1	95.0	94.9	95.4	94.6	96.7	96.8	96.8	97.0	97.2	97.1	97.2	97.4	97.3
pH	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	97.9	97.6	97.4	98.1	97.9	97.6	98.4	98.1	97.8	98.6	98.3	98.0	98.9	98.6	98.3
6	98.9	98.7	98.7	99.0	98.8	98.8	99.1	98.9	98.9	99.2	99.1	99.1	99.4	99.2	99.2
7	99.2	99.1	98.9	99.3	99.2	99.0	99.4	99.3	99.1	99.5	99.4	99.3	99.6	99.5	99.3
8	99.6	99.5	99.2	99.6	99.5	99.7	99.7	99.5	97.6	99.7	99.6	99.0	99.7	99.6	99.5
9	93.4	91.2	88.6	93.7	91.6	89.1	94.1	92.1	89.7	94.5	92.7	90.4	95.2	93.6	91.5
10	97.4	97.6	97.5	97.6	97.8	97.7	97.9	98.1	97.9	98.2	98.3	98.2	98.6	98.7	98.6

ตารางที่ ข-17 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade

pH	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	88.0	87.9	88.9	90.9	90.0	90.8	91.6	91.3	91.2	91.9	91.5	91.4	92.3	92.1	91.9
6	92.3	92.3	92.0	94.6	94.3	94.4	95.0	94.7	94.8	94.9	94.8	94.6	95.3	95.0	95.0
7	94.4	94.5	95.2	96.7	96.7	96.8	97.0	97.0	96.7	96.6	96.5	96.3	96.9	96.7	96.5
8	97.5	96.7	97.8	99.2	98.8	99.2	98.9	98.9	99.1	98.5	98.2	98.2	98.5	98.3	98.5
9	86.1	82.7	79.6	88.1	85.0	81.7	88.5	85.5	82.7	88.4	85.7	82.5	88.8	86.0	82.9
10	90.4	90.4	89.8	92.8	92.4	92.5	93.0	93.2	92.9	92.8	92.8	92.7	93.2	93.3	93.1
pH	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	5	93.3	93.0	92.9	94.1	93.5	93.4	93.1	92.7	92.6	94.2	94.0	93.7	95.3	94.9
6	96.2	95.8	95.7	96.5	96.4	96.3	95.4	95.3	95.1	96.6	96.3	96.3	97.3	97.2	97.1
7	97.6	97.6	97.3	98.1	98.1	97.6	96.9	96.6	96.3	97.9	97.7	97.5	98.5	98.4	98.2
8	99.3	99.1	99.2	99.8	99.5	99.7	97.9	97.7	97.6	99.1	99.0	99.0	99.5	97.3	99.5
9	89.8	87.1	83.7	90.5	87.8	84.5	89.0	86.5	83.4	90.4	88.0	84.9	91.3	89.1	85.9
10	94.0	94.2	94.1	94.9	95.1	94.7	93.4	93.7	93.4	94.8	95.0	94.9	95.5	95.8	95.8

ตารางที่ ข-18 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade

ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	100.9	100.9	100.7	100.0	100.0	99.9	100.4	100.6	100.3	100.6	100.5	100.4	100.5	100.7	100.4
90	101.0	100.8	100.9	99.9	99.8	99.9	100.3	100.3	100.4	100.5	100.3	100.4	100.5	100.3	100.4
120	100.8	100.6	100.7	99.8	99.7	99.7	100.4	100.3	100.3	100.6	100.5	100.5	100.6	100.5	100.5
150	100.9	100.9	100.9	100.0	100.1	100.0	100.2	100.4	100.4	99.8	100.6	100.7	100.6	100.6	100.7
ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	100.5	100.5	100.5	100.5	100.6	100.7	100.5	100.6	100.5	100.5	100.6	100.3	100.5	100.5
90	100.5	100.3	100.4	100.5	100.4	100.4	100.5	100.5	100.5	100.4	100.4	100.4	100.4	100.3	100.4
120	100.6	100.6	100.5	100.6	100.5	100.5	100.6	100.6	100.6	100.5	100.5	100.4	100.5	100.5	100.4
150	100.6	100.6	100.7	100.6	100.6	100.6	100.6	100.6	100.6	100.5	100.5	100.5	100.5	100.6	100.6

ตารางที่ ข-19 ค่าทรานส์มิตเต้นซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นความเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade

ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	99.9	99.7	99.6	99.9	99.7	99.9	100.2	100.1	100.3	100.3	100.3	100.2	100.4	100.4	100.4
90	99.7	99.6	99.5	99.8	99.7	99.6	100.1	100.1	100.0	100.3	100.3	100.1	100.3	100.3	100.1
120	99.6	99.6	99.7	99.9	99.9	100.1	100.1	100.2	100.1	100.2	100.3	100.2	100.3	100.4	100.3
150	99.7	99.8	99.7	100.1	99.8	100.2	100.2	100.3	100.2	100.4	100.4	100.4	100.4	100.5	100.5
ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	100.4	100.3	100.3	100.4	100.4	100.3	100.5	100.5	100.4	100.4	100.4	100.4	100.5	100.5
90	100.3	100.3	100.1	100.4	100.3	100.2	100.4	100.4	100.3	100.4	100.4	100.3	100.4	100.4	100.3
120	100.3	100.4	100.3	100.4	100.5	100.3	100.5	100.5	100.4	100.4	100.4	100.4	100.5	100.5	100.4
150	100.4	100.5	100.5	100.5	100.6	100.5	100.5	100.6	100.6	100.5	100.5	100.5	100.5	100.6	100.6

ตารางที่ ข-20 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นความเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม AR grade

ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	98.4	98.3	98.5	99.2	99.3	99.3	99.5	99.4	99.5	98.9	99.0	99.1	99.4	99.2	99.3
90	98.4	98.5	98.2	99.2	99.3	99.1	99.4	99.7	99.3	99.0	99.0	98.8	99.2	99.3	99.1
120	98.3	98.5	98.3	99.1	99.3	99.1	99.4	99.5	99.4	98.8	99.1	98.9	99.1	99.4	99.1
150	98.5	98.7	98.6	99.2	99.4	99.5	99.6	99.6	99.7	99.0	99.2	99.1	99.3	99.5	99.5
ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	99.7	99.5	99.8	100.1	100.0	100.1	99.4	99.2	99.3	99.9	99.7	100.0	100.3	100.4
90	99.6	99.7	99.3	100.1	100.1	99.9	99.4	99.2	99.1	99.8	99.8	99.5	100.4	100.3	100.3
120	99.5	99.6	99.4	99.9	100.1	99.8	99.2	99.5	99.1	99.7	99.8	99.5	100.1	100.3	100.1
150	99.6	99.7	99.8	100.1	100.2	100.2	99.3	99.4	99.3	99.8	99.9	99.9	100.4	100.7	100.6

ตารางที่ ข-21 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน X ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade

ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	Wavelength X (nm)														
	435.5			461.2			544.3			564.1			577.4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	102.2	102.1	102.1	101.1	101.0	100.9	100.7	100.9	100.8	100.7	100.9	100.8	100.7	100.8	100.8
90	101.9	102.0	101.6	100.8	100.9	100.8	100.7	100.6	100.4	100.7	100.6	100.5	100.7	100.6	100.4
120	102.4	101.8	101.9	101.0	100.8	100.9	100.8	100.6	100.6	100.8	100.5	100.6	100.8	100.5	100.6
150	101.7	101.8	101.3	100.6	100.6	100.1	100.7	100.7	100.4	100.8	100.6	100.5	100.8	100.6	100.5
ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	588.7			599.6			610.9			624.2			654.9		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	100.6	100.8	100.8	100.6	100.8	100.7	100.7	100.8	100.8	100.6	100.7	100.7	100.5	100.7
90	100.6	100.5	100.4	100.6	100.5	100.4	100.6	100.5	100.4	100.5	100.4	100.3	100.5	100.5	100.4
120	100.8	100.5	100.6	100.7	100.5	100.6	100.8	100.6	100.6	100.7	100.4	100.5	100.6	100.4	100.5
150	100.7	100.6	100.5	100.7	100.6	100.5	100.7	100.5	100.4	100.7	100.5	100.4	100.7	100.5	100.4

ตารางที่ ข-22 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Y ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารสี Commercial grade

ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	Wavelength Y (nm)														
	489.5			515.2			529.8			541.4			551.8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	100.3	100.3	100.5	100.7	100.8	100.8	100.4	100.6	100.6	100.5	100.6	100.7	100.4	100.6	100.6
90	100.2	100.4	100.2	100.6	100.4	100.2	100.5	100.4	100.3	100.5	100.4	100.4	100.6	100.4	100.5
120	100.5	100.2	100.3	100.7	100.5	100.4	100.7	100.4	100.5	100.7	100.4	100.5	100.7	100.5	100.5
150	100.4	100.1	100.9	100.6	100.0	100.4	100.6	100.3	100.2	100.7	100.6	100.3	100.6	100.5	100.3
ความเร็วรอบ การปั่นกวนเร็ว (rpm)	561.9			572.5			584.8			600.8			627.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	100.3	100.5	100.6	100.4	100.6	100.6	100.4	100.6	100.7	100.3	100.5	100.7	100.4	100.6
90	100.6	100.4	100.5	100.6	100.4	100.4	100.7	100.5	100.5	100.6	100.5	100.5	100.6	100.5	100.5
120	100.8	100.5	100.6	100.7	100.5	100.6	100.8	100.6	100.6	100.7	100.4	100.5	100.6	100.4	100.5
150	100.7	100.6	100.5	100.7	100.6	100.5	100.7	100.5	100.4	100.7	100.5	100.4	100.7	100.5	100.4

ตารางที่ ข-23 ค่าทรานส์มิตแดนซ์แกน Z ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นความเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม Commercial grade

ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	Wavelength Z (nm)														
	422.2			432.0			438.6			444.4			450.1		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
60	99.6	99.9	100.0	100.0	100.4	100.6	100.3	100.3	100.8	100.0	100.2	100.2	100.1	100.4	100.5
90	99.8	99.7	99.7	100.3	100.2	100.2	100.5	100.3	100.4	100.1	100.0	100.0	100.5	100.2	100.1
120	99.8	99.7	99.8	100.7	100.5	100.5	100.5	100.5	100.6	100.2	100.1	100.1	100.3	100.2	100.3
150	99.7	99.4	99.3	100.6	100.1	100.2	100.7	100.1	100.1	100.0	99.6	99.6	100.2	99.8	100.0
ความเร็วรอบ การปั่นความเร็ว (rpm)	455.9			462.0			468.7			477.7			495.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	60	100.3	100.4	100.8	100.6	100.9	100.1	100.2	100.3	100.4	100.4	100.6	100.8	100.6	100.9
90	100.6	100.3	100.1	100.9	100.7	100.7	100.3	100.2	100.1	100.5	100.3	100.3	100.8	100.9	100.7
120	100.6	100.6	100.5	101.0	100.9	100.9	100.3	100.2	100.3	100.6	100.5	100.6	101.1	100.9	101.0
150	100.7	100.1	100.1	101.2	100.4	100.6	100.2	99.7	99.8	100.5	100.1	100.2	101.2	100.6	100.9

ตารางที่ ข-24 ค่าพื้นที่ได้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade

ความเข้มข้นสารส้ม(g/L)	พื้นที่ได้กราฟ TC			พื้นที่ได้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
1.50	246.3	237.6	221.2	306.5	292.5	270.6
2.00	162.0	159.1	148.5	214.6	212.3	190.5
2.25	120.3	119.3	107.1	148.0	150.8	163.5
2.50	89.92	92.50	97.89	86.0	91.6	79.0
2.75	62.48	65.78	61.93	61.2	41.0	46.7
3.00	53.21	42.52	47.21	26.63	30.2	30.1
3.50	30.82	32.38	31.66	6.82	7.71	7.52
4.00	27.44	28.15	28.26	5.06	5.99	5.97
4.50	31.22	30.19	31.51	3.44	3.09	6.13

ตารางที่ ข-25 ค่าพื้นที่ได้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade

ความเข้มข้นสารส้ม(g/L)	พื้นที่ได้กราฟ TC			พื้นที่ได้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
1.50	142.5	159.2	149.4	240.7	289.1	254.5
2.00	128.2	116	124.7	217.2	189.9	212.7
2.25	104.5	111.2	123.9	155.2	175.5	216.3
2.50	101.7	99.6	96.2	146.4	147.0	137.3
2.75	91.5	91.0	91.4	128.3	127.0	130.1
3.00	69.4	68.3	64.3	75.4	71.8	66.8
3.50	71.9	72.3	71.8	80.6	75.3	77.2
4.00	56.3	55.5	56.8	50.2	47.3	51.1
4.50	39.8	41.4	39.0	16.2	17.2	10.6

ตารางที่ ข-26 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารสัมชนิด AR grade

ช่วง pH	พื้นที่ใต้กราฟ TC			พื้นที่ใต้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
5	278.9	281.5	282.9	5.8	5.1	19.0
6	281.5	293.9	289.4	25.8	30.8	26.9
7	263.8	253.8	253.3	8.5	6.6	6.6
8	262.6	279.5	265.8	22.9	49.0	31.2
9	389.5	387.3	383.3	416.5	420.6	418.9
10	389.6	388.9	391.0	462.3	467.9	466.9

ตารางที่ ข-27 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารสัมชนิด Commercial grade

ช่วง pH	พื้นที่ใต้กราฟ TC			พื้นที่ใต้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
5	276.0	265.6	281.3	6.7	3.0	6.3
6	270.8	300.9	367.2	9.5	39.1	64.0
7	266.4	265.5	256.7	25.8	23.5	23.5
8	207.1	217.0	214.3	21.9	24.3	20.4
9	333.2	346.5	341.1	341.7	366.3	362.4
10	404.5	403.2	392.9	455.7	444.1	456.1

ตารางที่ ข-28 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มชนิด AR grade

ความเร็วรอบ (rpm)	พื้นที่ใต้กราฟ TC			พื้นที่ใต้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
60	201.1	230.1	232.6	5.3	59.7	57.6
90	234.3	236.2	218.2	60.7	60.9	20.1
120	229.0	226.7	224.2	65.8	61.0	62.6
150	195.2	207.0	207.9	16.6	49.4	44.4

ตารางที่ ข-29 ค่าพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นจากการวัดค่า TOC ของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มชนิด Commercial grade

ความเร็วรอบ (rpm)	พื้นที่ใต้กราฟ TC			พื้นที่ใต้กราฟ IC		
	1	2	3	1	2	3
60	209.0	212.5	207.3	32.2	53.7	37.0
90	121.1	220.2	188.5	56.8	72.9	9.8
120	207.7	210.0	206.2	31.1	40.1	33.3
150	223.8	221.1	217.7	65.5	60.8	57.6

หมายเหตุ ฟังก์ชันสมการเส้นตรงกราฟมาตรฐาน TC คือ  $Y = 1.7128X - 1.2707$

ฟังก์ชันสมการเส้นตรงกราฟมาตรฐาน IC คือ  $Y = 4.5175X - 19.851$

ตารางที่ ข-30 ความเข้มข้นของกรดบอริก เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

ความเข้มข้น ของสารส้ม (g/L)	ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้สารส้ม AR grade(mg/L)			ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้ สารส้ม Commercial(mg/L)		
	1	2	3	1	2	3
1.50	12.74	12.74	12.80	12.68	12.74	12.68
2.00	12.50	12.49	12.06	11.62	11.75	11.75
2.25	12.49	12.30	11.81	13.05	13.11	13.05
2.50	11.93	12.49	12.86	12.55	12.61	12.37
2.75	12.55	12.55	12.92	12.24	10.70	12.18
3.00	12.55	12.61	12.68	7.67	7.48	7.73
3.50	10.29	11.03	11.90	12.70	12.87	12.88
4.00	11.47	10.91	10.11	13.01	12.82	12.75
4.50	10.11	10.97	10.17	12.27	12.27	12.02

ตารางที่ ข-31 ความเข้มข้นของกรดบอริก เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม

ช่วง pH	ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้สารส้ม AR grade(mg/L)			ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้สารส้ม Commercial(mg/L)		
	1	2	3	1	2	3
5	6.69	6.55	6.69	9.80	9.80	9.80
6	5.70	5.77	5.77	6.16	6.29	6.10
7	5.24	5.37	5.57	5.64	5.77	5.31
8	4.65	4.72	4.72	4.85	4.98	4.98
9	4.20	4.33	4.33	4.52	4.46	4.59
10	4.00	4.00	4.06	4.33	4.39	4.46

ตารางที่ ข-32 ความเข้มข้นของกรดบอริก เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสม

ความเร็วรอบการ ปั่นกวนเร็ว(rpm)	ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้สารส้ม AR grade(mg/L)			ค่าความเข้มข้นกรดบอริก เมื่อใช้สารส้ม Commercial(mg/L)		
	1	2	3	1	2	3
60	5.18	4.91	4.84	5.25	5.11	5.11
90	4.77	4.84	4.84	4.77	4.91	4.77
120	4.63	4.63	4.77	4.77	4.84	4.84
150	4.77	4.70	4.56	4.84	4.84	4.77

ตารางที่ ข-33 ค่า pH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

ความเข้มข้นของ สารส้ม(g/L)	ค่า pH ของสารส้ม AR grade			ค่า pH ของสารส้ม Commercial grade		
	1	2	3	1	2	3
1.50	7.11	7.00	7.06	7.31	7.21	7.25
2.00	6.74	6.71	6.72	7.26	7.27	7.22
2.25	6.58	6.57	6.52	7.13	7.12	7.07
2.50	6.44	6.36	6.33	6.96	6.95	7.01
2.75	6.24	6.23	6.17	6.87	6.93	6.90
3.00	5.81	5.74	5.73	6.93	6.90	6.87
3.50	5.41	5.38	5.88	6.46	6.50	6.90
4.00	5.31	5.29	5.41	6.34	6.30	6.31
4.50	5.10	5.10	5.10	5.91	6.89	5.90

ตารางที่ ข-34 ค่า pH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม

pH	ค่า pH ของสารส้ม AR grade			ค่า pH ของสารส้ม Commercial grade		
	1	2	3	1	2	3
5	3.71	3.70	3.70	3.81	3.77	3.78
6	3.81	3.79	3.78	3.89	3.86	3.88
7	3.94	3.89	3.87	3.95	3.95	3.98
8	5.42	5.42	5.40	5.48	5.46	5.47
9	8.75	8.75	8.72	8.24	8.24	5.23
10	9.44	9.42	9.43	9.28	9.27	9.26

ตารางที่ ข-35 ค่า pH หลังเติมสารส้มของน้ำยาโบรอน เมื่อหาความเร็วรอบการปั่นกวนเร็วที่เหมาะสม

ความเร็วรอบการ ปั่นกวนเร็ว(rpm)	ค่า pH ของสารส้ม AR grade			ค่า pH ของสารส้ม Commercial grade		
	1	2	3	1	2	3
60	4.75	4.55	4.60	5.63	5.40	5.40
90	4.62	4.65	4.61	5.79	5.62	5.62
120	4.57	4.56	4.56	5.92	5.68	5.71
150	4.66	4.64	4.56	5.87	5.91	5.63

ภาคผนวก ค  
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
t1.5	Equal variances assumed	11.796	.026	-.313	4	.770	-.07000	.22381	-.69138	.55138
	Equal variances not assumed			-.313	2.044	.783	-.07000	.22381	-1.01338	.87338
t2.0	Equal variances assumed	3.273	.145	128.031	4	.000	13.36000	.10435	13.07028	13.64972
	Equal variances not assumed			128.031	2.210	.000	13.36000	.10435	12.94952	13.77048
t2.25	Equal variances assumed	2.705	.175	72.527	4	.000	19.31333	.26629	18.57399	20.05268
	Equal variances not assumed			72.527	2.191	.000	19.31333	.26629	18.25803	20.36864
t2.5	Equal variances assumed	7.000	.057	26.254	4	.000	2.87333	.10944	2.56947	3.17720
	Equal variances not assumed			26.254	2.190	.001	2.87333	.10944	2.43951	3.30716
t2.75	Equal variances assumed	1.379	.305	41.080	4	.000	6.84667	.16667	6.38393	7.30941
	Equal variances not assumed			41.080	3.126	.000	6.84667	.16667	6.32814	7.36519
t3.0	Equal variances assumed	4.532	.100	7.599	4	.002	1.36667	.17985	.86734	1.86600
	Equal variances not assumed			7.599	2.017	.016	1.36667	.17985	.59891	2.13442
t3.5	Equal variances assumed	.262	.636	-15.382	4	.000	-1.21333	.07888	-1.43234	-.99432
	Equal variances not assumed			-15.382	3.807	.000	-1.21333	.07888	-1.43678	-.98988
t4.0	Equal variances assumed	4.934	.090	-113.057	4	.000	-3.43333	.03037	-3.51765	-3.34902
	Equal variances not assumed			-113.057	2.202	.000	-3.43333	.03037	-3.55316	-3.31351
t4.5	Equal variances assumed	5.309	.083	-51.172	4	.000	-4.08667	.07986	-4.30840	-3.86494
	Equal variances not assumed			-51.172	2.469	.000	-4.08667	.07986	-4.37472	-3.79861

ตารางที่ ค-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดสีในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
c1.5	Equal variances assumed	3.955	.118	11.241	4	.000	7.82667	.69624	5.89358	9.75975
	Equal variances not assumed			11.241	2.356	.004	7.82667	.69624	5.22529	10.42804
c2.0	Equal variances assumed	.021	.892	4.408	4	.012	6.47333	1.46868	2.39563	10.55103
	Equal variances not assumed			4.408	3.999	.012	6.47333	1.46868	2.39539	10.55127
c2.25	Equal variances assumed	3.462	.136	.843	4	.447	2.55333	3.03039	-5.86037	10.96704
	Equal variances not assumed			.843	2.714	.467	2.55333	3.03039	-7.69180	12.79846
c2.5	Equal variances assumed	7.709	.050	8.068	4	.001	8.20333	1.01675	5.38039	11.02628
	Equal variances not assumed			8.068	2.304	.010	8.20333	1.01675	4.33755	12.06912
c2.75	Equal variances assumed	4.076	.114	2.289	4	.084	3.45667	1.50985	-.73535	7.64868
	Equal variances not assumed			2.289	2.040	.147	3.45667	1.50985	-2.91952	9.83285
c3.0	Equal variances assumed	3.926	.119	7.867	4	.001	7.14667	.90844	4.62444	9.66889
	Equal variances not assumed			7.867	2.796	.005	7.14667	.90844	4.13264	10.16070
c3.5	Equal variances assumed	10.598	.031	-2.69	4	.801	-.60333	2.24431	-6.83455	5.62788
	Equal variances not assumed			-2.69	2.000	.813	-.60333	2.24431	-10.25984	9.05317
c4.0	Equal variances assumed	.199	.679	-1.589	4	.187	-1.35333	.85177	-3.71822	1.01156
	Equal variances not assumed			-1.589	3.790	.191	-1.35333	.85177	-3.77080	1.06413
c4.5	Equal variances assumed	.179	.694	-1.585	4	.188	-2.63333	1.66171	-7.24698	1.98031
	Equal variances not assumed			-1.585	3.548	.197	-2.63333	1.66171	-7.48851	2.22184

ตารางที่ ค-3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
to1.5	Equal variances assumed	.011	.923	3.721	4	.020	5.27333	1.41703	1.33902	9.20764
	Equal variances not assumed			3.721	3.857	.022	5.27333	1.41703	1.28092	9.26574
to2.0	Equal variances assumed	3.872	.120	4.819	4	.009	8.16333	1.69388	3.46036	12.86631
	Equal variances not assumed			4.819	2.800	.020	8.16333	1.69388	2.54828	13.77839
to2.25	Equal variances assumed	1.432	.298	7.107	4	.002	10.43000	1.46747	6.35566	14.50434
	Equal variances not assumed			7.107	3.146	.005	10.43000	1.46747	5.88025	14.97975
to2.5	Equal variances assumed	.330	.596	14.419	4	.000	15.97333	1.10780	12.89760	19.04907
	Equal variances not assumed			14.419	3.859	.000	15.97333	1.10780	12.85263	19.09404
to2.75	Equal variances assumed	1.759	.255	43.425	4	.000	14.75667	.33982	13.81317	15.70016
	Equal variances not assumed			43.425	3.309	.000	14.75667	.33982	13.73009	15.78324
to3.0	Equal variances assumed	9.399	.037	20.512	4	.000	15.69000	.76493	13.56621	17.81379
	Equal variances not assumed			20.512	2.141	.002	15.69000	.76493	12.59766	18.78234
to3.5	Equal variances assumed	1.026	.368	17.399	4	.000	15.85667	.91136	13.32632	18.38701
	Equal variances not assumed			17.399	2.910	.000	15.85667	.91136	12.90498	18.80836
to4.0	Equal variances assumed	1.120	.350	68.289	4	.000	13.38000	.19593	12.83601	13.92399
	Equal variances not assumed			68.289	3.363	.000	13.38000	.19593	12.79290	13.96710
to4.5	Equal variances assumed	1.340	.311	10.202	4	.001	5.88667	.57701	4.28462	7.48871
	Equal variances not assumed			10.202	3.433	.001	5.88667	.57701	4.17461	7.59872

ตารางที่ ค-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ความเข้มข้นของกรดบอริกในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
b1.5	Equal variances assumed	.000	1.000	2.121	4	.101	.06000	.02828	-.01853	.13853
	Equal variances not assumed			2.121	4.000	.101	.06000	.02828	-.01853	.13853
b2.0	Equal variances assumed	6.892	.058	4.118	4	.015	.66000	.16028	.21500	1.10500
	Equal variances not assumed			4.118	2.313	.042	.66000	.16028	.05263	1.26737
b2.25	Equal variances assumed	7.481	.052	-4.274	4	.013	-.87000	.20355	-1.43515	-.30485
	Equal variances not assumed			-4.274	2.039	.049	-.87000	.20355	-1.72996	-.01004
b2.5	Equal variances assumed	2.959	.160	-.298	4	.781	-.08333	.27978	-.86013	.69347
	Equal variances not assumed			-.298	2.283	.791	-.08333	.27978	-1.15479	.98812
b2.75	Equal variances assumed	8.517	.043	1.864	4	.136	.96667	.51851	-.47296	2.40629
	Equal variances not assumed			1.864	2.239	.190	.96667	.51851	-1.05093	2.98426
b3.0	Equal variances assumed	2.153	.216	-.158	4	.882	-.01333	.08420	-.24710	.22043
	Equal variances not assumed			-.158	2.936	.884	-.01333	.08420	-.28460	.25793
b3.5	Equal variances assumed	3.600	.131	-3.687	4	.021	-1.72667	.46827	-3.02680	-.42654
	Equal variances not assumed			-3.687	2.052	.064	-1.72667	.46827	-3.69357	.24024
b4.0	Equal variances assumed	3.120	.152	-5.229	4	.006	-2.01000	.38440	-3.07728	-.94272
	Equal variances not assumed			-5.229	2.170	.029	-2.01000	.38440	-3.54581	-.47419
b4.5	Equal variances assumed	6.939	.058	-6.115	4	.004	-1.77000	.28946	-2.57368	-.96632
	Equal variances not assumed			-6.115	2.359	.017	-1.77000	.28946	-2.85051	-.68949

ตารางที่ ค-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พิเศษของน้ำยาหลังบำบัดในแต่ละความเข้มข้นของสารส้ม

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
								95% Confidence Interval of the Difference		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
p1.5	Equal variances assumed	.010	.926	-4.643	4	.010	-.20000	.04308	-.31960	-.08040
	Equal variances not assumed			-4.643	3.968	.010	-.20000	.04308	-.31998	-.08002
p2.0	Equal variances assumed	1.600	.275	-29.859	4	.000	-.52667	.01764	-.57564	-.47769
	Equal variances not assumed			-29.859	3.200	.000	-.52667	.01764	-.58087	-.47247
p2.25	Equal variances assumed	.000	1.000	-20.955	4	.000	-.55000	.02625	-.62287	-.47713
	Equal variances not assumed			-20.955	4.000	.000	-.55000	.02625	-.62287	-.47713
p2.5	Equal variances assumed	1.362	.308	-15.822	4	.000	-.59667	.03771	-.70137	-.49196
	Equal variances not assumed			-15.822	3.160	.000	-.59667	.03771	-.71332	-.48001
p2.75	Equal variances assumed	.492	.522	-24.622	4	.000	-.68667	.02789	-.76410	-.60924
	Equal variances not assumed			-24.622	3.801	.000	-.68667	.02789	-.76572	-.60761
p3.0	Equal variances assumed	1.000	.374	-37.315	4	.000	-1.14000	.03055	-1.22482	-1.05518
	Equal variances not assumed			-37.315	3.548	.000	-1.14000	.03055	-1.22926	-1.05074
p3.5	Equal variances assumed	.640	.469	-65.200	4	.000	-1.08667	.01667	-1.13294	-1.04039
	Equal variances not assumed			-65.200	3.709	.000	-1.08667	.01667	-1.13441	-1.03893
p4.0	Equal variances assumed	1.565	.279	-146.492	4	.000	-2.01333	.01374	-2.05149	-1.97517
	Equal variances not assumed			-146.492	3.124	.000	-2.01333	.01374	-2.05610	-1.97056
p4.5	Equal variances assumed	15.989	.016	-6.497	4	.003	-2.13333	.32835	-3.04497	-1.22170
	Equal variances not assumed			-6.497	2.000	.023	-2.13333	.32835	-3.54609	-.72057

ภาคผนวก ง  
ตัวอย่างการคำนวณ

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### ง-1 ความเร็วแกรเดียนท์ (G)

##### 1) แสดงการคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้

จากสมการ 
$$P = N_p \rho N^3 d_i^5$$

- เมื่อ
- $P$  = พลังงาน (วัตต์)
  - $N_p$  = จำนวนใบพัด
  - $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
  - $N$  = ความเร็วรอบการหมุน (รอบต่อวินาที)
  - $d_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

- สารส้มชนิด AR grade ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 150 รอบต่อนาที (2.5 รอบต่อวินาที) โดยใช้ใบพัด 1 ใบพัด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 เมตร ความหนาแน่นของน้ำ 998.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} P &= 1 \times 99.8 \times 2.5^3 \times 0.075^5 \\ &= 0.037 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

##### 2) แสดงการคำนวณหาความเร็วแกรเดียนท์

จากสมการ 
$$G = (P/\mu V)^{1/2}$$

- เมื่อ
- $G$  = ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที<sup>-1</sup>)
  - $P$  = พลังงานที่ใช้ (วัตต์)
  - $\mu$  = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)
  - $V$  = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (ลูกบาศก์เมตร)

- สารส้มชนิด AR grade และชนิด Commercial grade ความเร็วรอบที่เหมาะสม คือ 150 รอบต่อนาที (2.5รอบต่อวินาที) มีพลังงานที่ใช้ 0.037 วัตต์ ความหนืดของน้ำ 0.00093 นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร ปริมาตรของน้ำ 0.00042 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} G &= [0.037 / (0.00093 \times 0.00042)]^{1/2} \\ &= 307.78 \text{ วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

ภาคผนวก จ

รูปการบำบัดน้ำยาโบราณด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

## ภาคผนวก จ

## รูปการบำบัดน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน



รูปที่ จ-1 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้เครื่องทดสอบจาร์เทสต์



รูปที่ จ-2 กระบวนการตกตะกอนน้ำยาโบรอน