

การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา
ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น

DECOLORIZATION OF REUSED BORON-BASED SOLUTION
FROM RUBBER WOOD PROCESSING INDUSTRY
BY OZONATION PROCESS



พันธกานต์ ยันต์ฉิมพลี
PANTAKAN YANCHIMPLEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-016-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DECOLORIZATION OF REUSED BORON-BASED SOLUTION
FROM RUBBER WOOD PROCESSING INDUSTRY
BY OZONATION PROCESS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015
KMUTL-2015-SC-M-016-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา
ด้วยกระบวนการโอโซนขั้นสูง
DECOLORIZATION OF REUSED BORON-BASED SOLUTION
FROM RUBBER WOOD PROCESSING INDUSTRY BY OZONATION
PROCESS

ชื่อนักศึกษา

รหัสประจำตัว

ปริญญา

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



นางสาวพนิตกาญจนา ต. ยนต์ฉิมพลี
56605037
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม)
เคมี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อสารรัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	คณะวิทยาศาสตร์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบันฯ ผศ.ดร.อสารรัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.30 - 12.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 305 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่



(รองศาสตราจารย์ ดร. อสารรัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์)

วันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูป ไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนชั้น
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพันธกานต์ ยันต์ฉิมพลี
รหัสประจำตัว	56605037
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยกระบวนการโอโซนชั้น โดยใช้การทดลองที่ละเอียดเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอน ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสีในช่วง 10-120 นาที ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนในช่วง 3-9 และปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ใช้ทดลองวัดในรูป COD ในช่วง 2,287- 2,898 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการบำบัดและลดปริมาณสารอินทรีย์ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเมื่อค่า pH ของน้ำยาโบรอนเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำยาโบรอน ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำยาโบรอนที่มีประสิทธิภาพการบำบัด 97% คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสีของน้ำยาโบรอน 65 นาที ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอน 3.6 และปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ใช้ทดลองวัดในรูป COD ในช่วง 2,205 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องจึงทำการทดลองที่สภาวะดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดสีในน้ำยาโบรอนมีค่า 96.53% มีความแตกต่างจากการทำนายน้อยกว่า 0.49% และผลการแช่ไม้ยางพาราในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดเป็นเวลา 3 วัน พบว่า สีของเนื้อไม้ยางพาราหลังการแช่ในน้ำยาโบรอนและการแทรกซึมของน้ำยาโบรอนลงสู่ส่วนหน้าตัดไม้ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นมาใหม่

คำสำคัญ : กระบวนการโอโซนชั้น การทดลองที่ละเอียด การบำบัดสี เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง
น้ำยาโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	DECOLORIZATION OF REUSED BORON-BASED SOLUTION FROM RUBBER WOOD PROCESSING INDUSTRY BY OZONATION PROCESS
Student Name	Pantakan Yanchimplee
Student ID	56605037
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

Abstract

The aim of this research was to study the optimum condition for decolorization of boron-based wood preservation solution from rubber wood processing industry using ozonation process. One Variable At A Time (OVAT) strategy has been employed to study the effect of three independent variables including reaction time (10-120 min), pH (3-9) and organic loading in term of COD (2,287- 2,898 mg/L) on decolorization of boron-based solution. Results showed that decolorization efficiency increased with increasing the reaction time and decreasing organic loading while the efficiency of color removal was decreased with increasing pH. Then the study employed the Box-Behnken experimental design and Response Surface Methodology (RSM) to find the optimum condition for decolorization of boron-based wood preservation solution. Results showed that the optimum condition for decolorization efficiency of 97% was reaction time of 65 min, pH of 3.6 and organic loading of 2,205 mg/L. Verification results at this condition also gave an error less than 0.49%. Similar results in term of color of the processed wood and boron penetration in corss-section of the wood were obtained when rubber wood was preserved/steep either by the ozonated boron-based wood preservation or fresh boron solution

Keywords : ozonation, OVAT, decolorization, RSM, boron compound

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำ ตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ของการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด และขัดเกลาวินิจฉัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ออกมาสมบูรณ์มากที่สุด รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ช่วยตรวจสอบ ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนเสนอแนะแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาและช่วยตรวจสอบให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากร เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและจัดเตรียมอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยาโบรอน และไม้ยางพาราที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณครอบครัวรวมถึงเพื่อนสนิทของข้าพเจ้า ที่คอยเป็นที่ปรึกษา ให้กำลังใจ แรงผลักดัน และอำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้าน เพื่อให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

นางสาวพันธกานต์ ยันต์ฉิมพลี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไม้ยางพารา.....	4
2.2 อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา.....	5
2.3 น้ำยารักษาเนื้อไม้.....	8
2.4 น้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้จากสารประกอบโบรอน.....	9
2.5 การบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation).....	12
2.5.1 โอโซนและคุณสมบัติของโอโซน.....	12
2.5.2 การเกิดโอโซน.....	13
2.5.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	14
2.5.4 ปฏิกิริยาของกระบวนการเติมโอโซน.....	15
2.5.5 การใช้ประโยชน์ของโอโซน.....	19
2.5.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเติมโอโซน.....	22
2.6 รูปแบบการทดลอง.....	24
2.6.1 การดำเนินการทดลองแบบที่ละปัจจัย.....	24
2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง.....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	37
3.1.1 อุปกรณ์.....	37
3.1.2 สารเคมี	37
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	38
3.2.1 น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2.2 การเดินระบบโอโซนชั้น	39
3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยโอโซน แบบที่ละปัจจัย	40
3.2.4 การศึกษาการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยโอโซนโดยใช้การออกแบบ การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ร่วมกับการ วิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง	41
3.2.5 การทดสอบการนำน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดมาใช้ในการรักษาเนื้อไม้โดย วิธีการอาบน้ำยาอย่างง่าย	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	44
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอน	44
4.2 อัตราการผลิตโอโซน.....	45
4.3 อัตราการละลายน้ำของโอโซน.....	46
4.4 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโอโซนชั้น โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบที่ละปัจจัย (One variable at a time).....	47
4.4.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนต่อการบำบัด.....	47
4.4.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัด	50
4.4.3 ผลของ COD ต่อการบำบัด	53
4.5 ผลของการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้วิธี การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับ RSM.....	55
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง	56
4.5.2 การประมวลผลด้วยวิธี RSM ของ Full Quadratic model	56
4.5.3 การสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) ระหว่าง ตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	58
4.5.4 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ผลการทดสอบน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ผ่านการบำบัดในการรักษาเนื้อไม้ โดยวิธีการอาบน้ำยาไม้อย่างง่าย	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์.....	77
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	84
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	92
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	103
ภาคผนวก จ วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการวิเคราะห์	106
ประวัติผู้เขียน.....	110



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของน้ำยาสารประกอบโบรอนในถังเก็บน้ำยา	11
2.2 ค่า Oxidation potential ของสารออกซิไดซ์แต่ละชนิด	13
2.3 ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำ.....	15
2.4 ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	15
2.5 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (Dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง.....	24
2.6 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย.....	31
2.7 การออกแบบ Box-Behnken Design ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย	32
2.8 จำนวนการทดลองของ Central Composite Designs และ Box-Behnken Designs ที่จำนวนตัวแปรต่างๆ.....	32
3.1 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ศึกษา	39
3.2 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design	42
3.3 สภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design โดยใช้โปรแกรม MINITAB	42
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพารา.....	45
4.2 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลอง.....	56
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจากแบบจำลอง Full Quadratic.....	57
4.4 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic.....	57
4.5 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลองกับค่าประสิทธิภาพ การบำบัดที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Full Quadratic.....	63
ก-2 ความยาวคลื่นที่ใช้วัดค่า % T	78
ก-4 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย	82
ข-1. สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้น.....	84
ข-2.1 อัตราการไหลของโอโซน.....	84
ข-2.2 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน.....	84
ข-3.1 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำ.....	85
ข-3.2 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำยาโบรอน.....	85
ข-4.1 ผลของระยะเวลาเติมโอโซน	86
ข-4.2 ผลของพีเอชที่มีผลต่อการบำบัด.....	87
ข-4.3 ผลของปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD ที่มีผลต่อการบำบัด	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ^๒ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-5.1 ผลการวิเคราะห์ค่า pH.....	89
ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดบอริก	90
ข-5.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น.....	91
ค-1 ผลของการละลายน้ำของไอโซนต่อชั่วโมงต่อลิตรในน้ำประปาเปรียบเทียบกับ ในน้ำยาโบรอนโดยวิธี One-way ANOVA.....	92
ค-2.1.1 ผลของระยะเวลาเติมไอโซนที่เวลาต่างๆกับค่าความเข้มข้นของน้ำยาโบรอน หลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA.....	93
ค-2.1.2 ผลของระยะเวลาเติมไอโซนที่เวลาต่างๆกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนหลัง การบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA.....	94
ค-2.2.1 ผลของของพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดกับ ค่าความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA	95
ค-2.2.2 ผลของของพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดกับ ปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA.....	96
ค-2.3.1 ผลของปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นกับค่าความเข้มข้น ของน้ำยา.....	97
ค-2.3.2 ผลของปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นกับปริมาณ กรดบอริกของ.....	98
ค-2.3.3 ผลของปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนก่อนและหลังการบำบัดที่มีปริมาณ สารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นคงที่โดยวิธี One-way ANOVA ...	98
ค-3 ผลของปริมาณกรดบอริกหลังการบำบัดที่ลำดับการทดลองต่างๆโดยวิธี One-way ANOVA	101

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของไม้ยางพารา.....	4
2.2 กรรมวิธีการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา	5
2.3 ระบบการอัดน้ำยาถนนเนื้อไม้ยางพารา.....	6
2.4 กระบวนการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์	6
2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้	10
2.6 กระบวนการเกิดโอโซน	13
2.7 การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเลต.....	14
2.8 วิธีโคโรนาดีสชาร์จ	14
2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน	16
2.10 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ	17
2.11 โครงสร้างของลิกนิน	21
2.12 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ฟีนอลด้วยโอโซน	22
2.13 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในเกิดโด (dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนด อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	24
2.14 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในเกิดโด (dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที	24
2.15 พื้นผิวการตอบสนองแสดงสถานะที่เหมาะสมของค่า specific volume สูงและค่า specific volume ที่ได้จากการทดลอง One-Variable-At-A-Time	26
2.16 ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว.....	30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	38
3.2 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง	39
4.1 ลักษณะน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษา.....	44
4.2 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ.....	45
4.3 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำที่เวลาต่างๆ.....	46
4.4 ปริมาณโอโซนที่ละลายในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่เวลาต่างๆ	46
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเติมโอโซนกับความเข้มข้นของน้ำยาโบรอน หลังการบำบัด	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่เวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....	48
4.7 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่มีค่าพีเอชและ COD ตามสภาพที่ได้รับหลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่เวลาต่างๆ	49
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH เริ่มต้นกับความเข้มสีของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด	50
4.9 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 3.02 , 5.07, 7.06, 7.95 และ 9.03 ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ	51
4.10 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่มีปริมาณ COD ตามสภาพที่ได้รับ หลังจากผ่านการเติมโอโซนที่ 90 นาทีและค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน	52
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างCOD เริ่มต้นกับความเข้มสีของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด	53
4.12 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2,284 2,504, 2,669, 2,752และ 2,862 mg/L ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....	54
4.13 สมบัติของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดด้วยการเติมโอโซน 90 นาที ที่พีเอชคงที่และปริมาณ COD เริ่มต้นต่างกัน	54
4.14 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดตามลำดับการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box–Behnken Design	56
4.15 อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	59
4.16 อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนเริ่มต้นที่วัดในรูป COD ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	60
4.17 อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณสารอินทรีย์วัดในรูป COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	61
4.18 สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีของน้ำยาโบรอน	62
4.19 ลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ ที่ผ่านการใช้งาน หลังการบำบัดและที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับจากโรงงาน ตามลำดับ.....	64
4.20 ลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ น้ำยาโบรอนหลังจากการบำบัด และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับจากโรงงาน.....	65
4.21 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้ซ้ำไม่ย่างพาราของน้ำยาโบรอนที่เตรียมใหม่ น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดและน้ำยาโบรอนผ่านการใช้งานจากโรงงาน.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ ที่ผ่านการใช้งานหลังจากการ บำบัดและที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับจากโรงงาน ตามลำดับ	66
ก-5 ลักษณะของชิ้นไม้ทดสอบ.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
ถ.พ.	ความถ่วงจำเพาะ
มก.	มิลลิกรัม
มล.	มิลลิลิตร
ลบ.ชม.	ลูกบาศก์เซนติเมตร
°C	องศาเซลเซียส
Coef	ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (Coefficients)
g/L	กรัมต่อลิตร
g/m ³	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/mol	กรัมต่อโมล
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L/hr	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง
mol/L	โมลต่อลิตร
R ²	ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared)
S	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)
SE CoeF	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย (Standard Error for the Estimated Coefficient)
DF	องศาความเป็นอิสระ (Degrees of Freedom)
Seq SS	ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)
Adj SS	ผลบวกกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Sum of Square)
Adj MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Mean Square)
F	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรปรวน
T	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในอดีตไม้ยางพาราถือเป็นผลพลอยได้จากการผลิตยางของเกษตรกร ซึ่งชาวสวนยางมักโค่นต้นยางและเผาทิ้งเมื่อต้นยางมีอายุมากและให้ผลผลิตน้อยไม่คุ้มค่ากับต้นทุนการผลิต แต่ปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีแปรรูปไม้ รวมทั้งกระแสการอนุรักษ์ป่าไม้ของโลกเพื่อลดภาวะโลกร้อน ทำให้เกิดความร่วมมือทางการค้าในการกีดกันหรือลดการส่งออกไม้ป่า ส่งผลให้ไม้ยางพาราเข้ามามีบทบาทต่อการค้าระหว่างประเทศมากขึ้นและได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรม แปรรูปไม้ในการนำไม้ยางพารามาทำไม้ใช้สอย ทำเครื่องตกแต่งอาคารบ้านเรือน ไม้อัด ฟิล์มไม้ปาร์เกต์ เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และสร้างรายได้ให้กับประเทศได้เป็นจำนวนมาก โดยกระบวนการแปรรูปไม้ยางพาราจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1) การเลื่อยไม้เพื่อแปรรูป 2) การรักษาเนื้อไม้ 3) การอบแห้งไม้ยางพารา ซึ่งในขั้นตอนที่ 2 นี้จะมีการนำสารเคมีที่เรียกว่าน้ำยาโบรอนหรือน้ำยาอัดขาว ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างกรดบอริก (H_3BO_3) และสารบอแร็กซ์ ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) มาใช้ในกระบวนการอัดน้ำยาเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ เพื่อไม่ให้มอดหรือแมลงขบไช ทำความเสียหายแก่เนื้อไม้ ซึ่งจะทำให้ไม้มีอายุการใช้งานนานขึ้น (เจษฎาและคณะ, 2550; ช่าวในแหวดววยาง, 2553) น้ำยาดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ซ้ำๆ ในขั้นตอนการรักษาเนื้อไม้และเมื่อเสื่อมสภาพจะมีการเติมของผสมระหว่างกรดบอริกและสารบอแร็กซ์เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของสารประกอบให้คงที่ ซึ่งผลจากการใช้ติดต่อกันหลายครั้งจะทำให้สีของน้ำยาโบรอนมีลักษณะเข้มขึ้นจนถึงสีดำคล้ำตามจำนวนรอบการนำกลับไปใช้ ความเข้มของสีเกิดจากการปนเปื้อนของสารพวกโพลีฟีนอลแทนนิน เพคติน และลิกนินที่มาจากเนื้อไม้ (จรรยาและคณะ, 2554) การนำน้ำยาโบรอนที่มีสีคล้ำดังกล่าวมาใช้ซ้ำจะส่งผลต่อคุณภาพของสีไม้ที่จะอัดน้ำยาในครั้งต่อไป ด้วยเหตุนี้การกำจัดสีในน้ำยาโบรอนเพื่อให้สามารถนำน้ำยาโบรอนกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถป้องกันมลพิษที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ดี รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการกักเก็บน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาแนวทางในการบำบัดสีและฟื้นฟูสภาพน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การบำบัดด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-flocculation process) (จรรยาและคณะ, 2554; ปรีญาและคณะ, 2556; พิชญญาและคณะ, 2556) การบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน (fenton process) (ลือพงษ์และจำเริญ, 2551; พงษ์ทวี และคณะ, 2557) วิธีการดังกล่าวแม้จะบำบัดสีในน้ำยาโบรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก่อให้เกิดปริมาณตะกอนมาก ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเพื่อกำจัดตะกอนเหล่านี้ การกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัด เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นเอกสารินเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลเล็กและสลายไปส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำ อีกทั้งไม่มีตะกอนเกิดขึ้นหลังการบำบัด งานวิจัยนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A time) และเปรียบเทียบความแตกต่างความเข้มข้นหลังการบำบัดที่มีนัยสำคัญทางสถิติ พร้อมทั้งทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการโอโซนชั้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวอย่างน้ำยาโบรอนได้จากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง
2. ศึกษาลักษณะของน้ำยาโบรอน ได้แก่ พีเอช (pH) สี (color) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และความเข้มข้นของกรดบอริก (H_3BO_3)
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้การทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A time)
 - ปัจจัยที่ศึกษา/ตัวแปรต้น ได้แก่
 - ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมโอโซนแปรค่าที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที
 - ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนแปรค่าที่ 3, 5, 7, 9 และตามสภาพที่ได้รับ
 - ปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ใช้ทดลองวัดในรูป COD แปรค่าที่ 80, 85, 90, 95 และ 100 % ของปริมาณ COD ในตัวอย่างน้ำยาเริ่มต้น
 - ตัวแปรตาม ได้แก่ pH, color, COD และ H_3BO_3
4. ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology
 - ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - ระยะเวลาที่ใช้โอโซนชั้นแปรค่าที่ 10, 60 และ 120 นาที
 - ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนแปรค่าที่ 3, 5 และ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นแปรค่าที่ 2284 ± 47.7 , 2669 ± 47.7 และ 2752 ± 47.7 mg/L
ตัวแปรตาม ได้แก่ pH, color และ H_3BO_3

5. ศึกษาการทดสอบการนำน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ในการรักษาเนื้อไม้โดยวิธีการอาบน้ำยาไม้อย่างง่าย

- การอาบน้ำยาไม้อย่างง่าย
ดำเนินการโดยการแช่ (Steeping) ไม้ลงในน้ำยาที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นเวลา 3 วัน
- ตรวจสอบการซึมซับของน้ำยาในเนื้อไม้
ดำเนินการโดยใช้น้ำยาทดสอบ Curcumin Reagent

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการเพิ่มแนวทางในการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งาน
2. สามารถนำน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ได้ในโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา



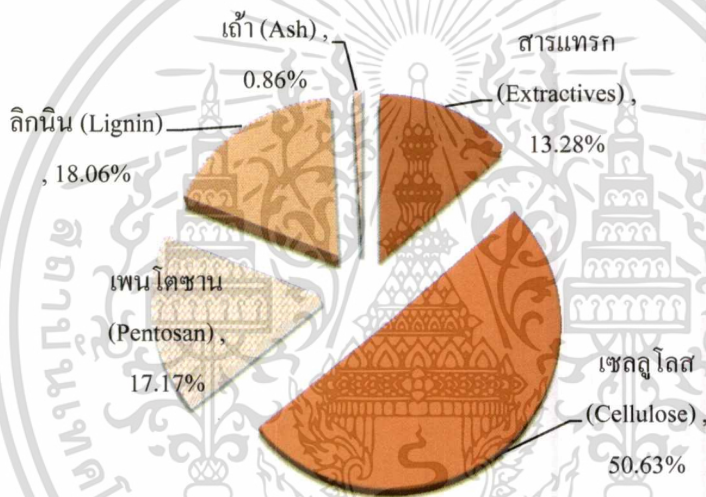
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลมสูงปานกลาง เปลือกสีเทาดำ เมื่อสดเนื้อไม้มีสีขาวอมเหลือง และเมื่อแห้งจะมีสีขาวจาง มีความหนาแน่นพื้นฐาน 0.56-0.65 กรัม/ลบ.ซม. แต่ที่ความชื้น 15% จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.67-0.74 กรัม/ลบ.ซม. โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับไม้ Soft Maple ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพารานั้นๆ องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยางพาราสดโดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2.1

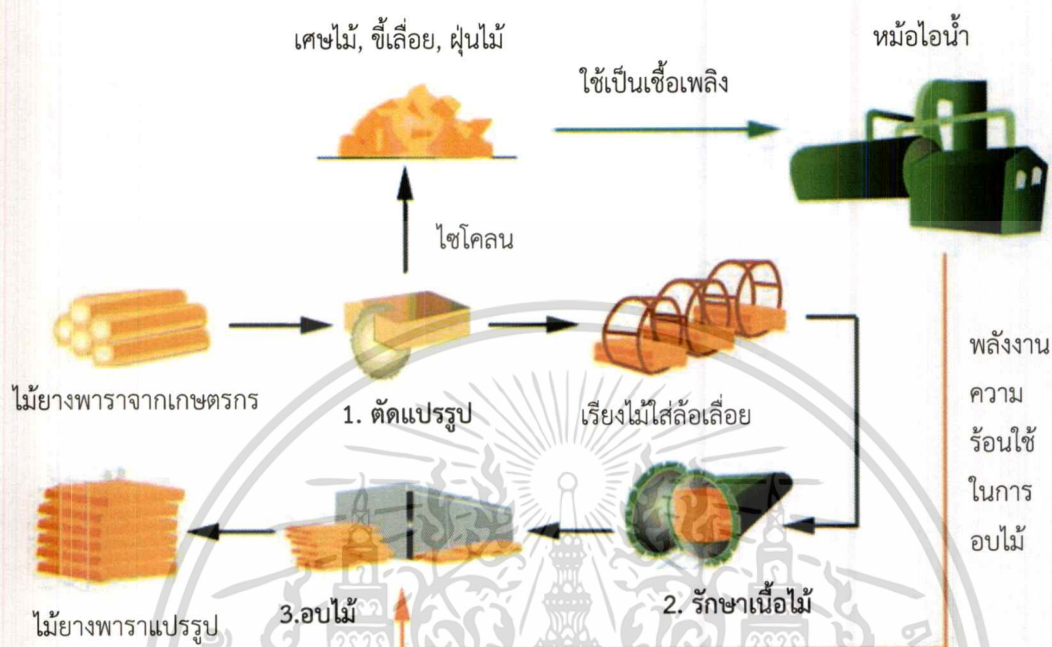


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของไม้ยางพารา (บริษัทบูรณาพากรูปลูกัด, 2556)

จากรูปจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบของไม้ยางพาราประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) 50.63% ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อไม้ มีปริมาณลิกนิน (Lignin) 18.06% เพนโตซาน (Pentosan) 17.17% สารแทรก (Extractives) 13.28% และเถ้า (Ash) 0.86% โดยปริมาณของสารแทรกอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพาราและวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งปริมาณสารแทรก เป็นตัวบ่งบอกถึงความคงทนและสีเฉพาะตัวของไม้ มีสารที่ละลายแบคทีเรีย เห็ด และราต่างๆ ถ้าปริมาณสารแทรกสูงทำให้ไม้มีความคงทนสูง (ฐิตาภรณ์และคณะ, 2555)

2.2 อุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา

กรรมวิธีการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กรรมวิธีการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ขั้นตอนที่ 1 การแปรรูปไม้ยางพารา

หลังจากตัดโค่นต้นยางพาราที่หมดอายุการให้น้ำยางที่สวนยางแล้วจะนำมาเลื่อยตัดให้เป็นท่อน จากนั้นขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปเพื่อเปิดปิกไม้และจัดไม้ให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งระยะเวลาที่ดำเนินการตั้งแต่การตัดโค่นต้นยางพาราจนถึงโรงงานแปรรูปควรใช้เวลา 1 ถึง 3 วัน เพื่อลดการถูกทำลายเนื้อไม้จากเชื้อราและแมลง

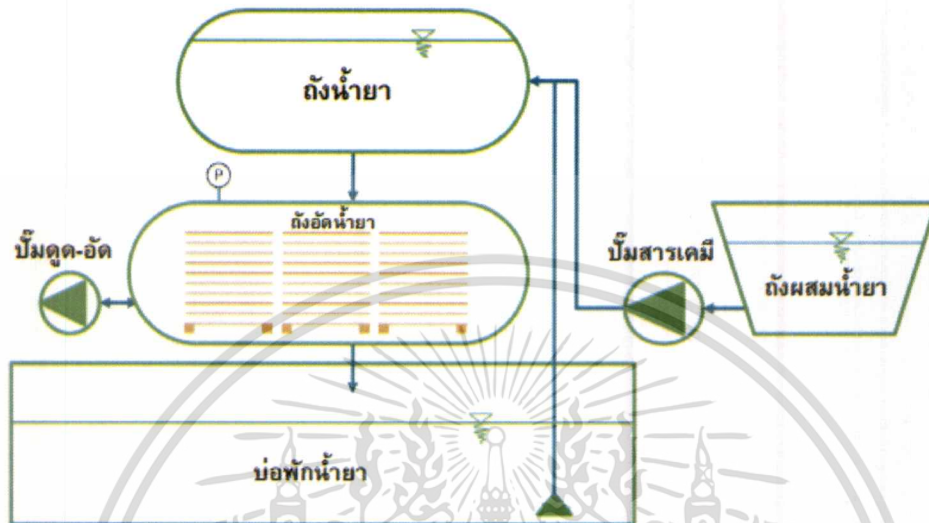
ขั้นตอนที่ 2 การรักษาเนื้อไม้

ไม้ยางพาราที่ตัดจากสวนยางพาราจะต้องรีบนำไปจุ่มหรืออัดน้ำยารักษาเนื้อไม้เพื่อป้องกันแสงแดด มอด แมลง และเชื้อราทำลายเนื้อไม้ เนื่องจากไม้ยางพารามีเปอร์เซ็นต์ของน้ำตาล แป้ง และความชื้นสูง จึงทำให้เป็นที่ชื่นชอบของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ การรักษาเนื้อไม้มี 2 วิธีคือ 1) วิธีใช้แรงอัด และ 2) วิธีไม่ใช้แรงอัด ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการดังนี้

1. วิธีใช้แรงอัด

การอบน้ำยาไม้ด้วยแรงอัด หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าการอัดน้ำยาไม้ เป็นการอบน้ำยาโดยใช้เครื่องจักรภายในถังรูปกระบอก (Cylinder) ที่มีฝาปิดเปิดได้ สามารถต้านทานต่อกำลังอัดได้สูง ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

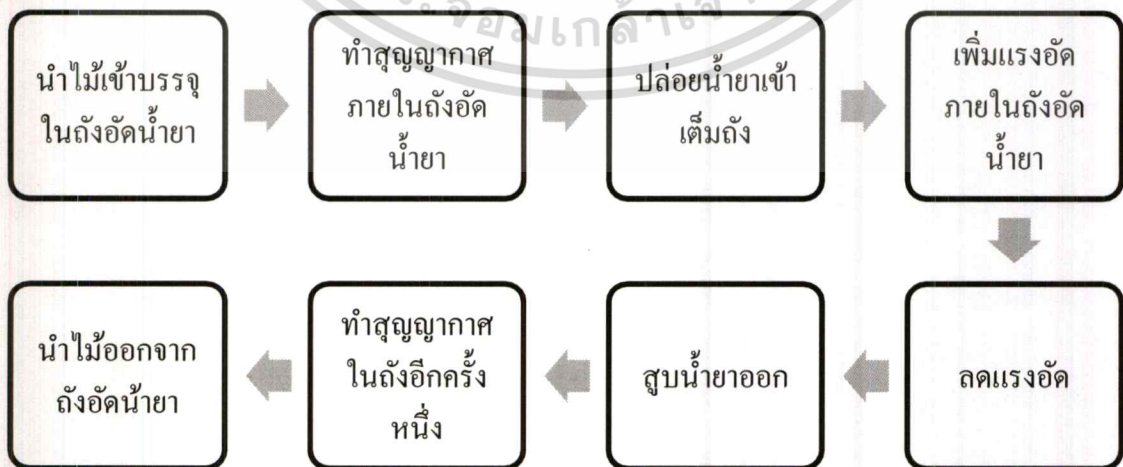
เรียกกันว่า ถังอัดน้ำยา โดยในการอัดน้ำยาจะมีการเติมสารเคมีที่ออกฤทธิ์ในถังผสมน้ำยา ทั้งนี้อาจมีการผสมสารเคมีอื่นๆ ซึ่งเป็นสูตรลับเฉพาะของแต่ละโรงงานเพื่อพอกสีไม้ ระบบการรักษาเนื้อไม้แบบใช้แรงอัดแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบการอัดน้ำยาถนอมเนื้อไม้ยางพารา (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2554)

การอัดน้ำยาแบบใช้แรงอัดแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1.1 การอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์ (Full Cell process) เป็นการอัดน้ำยาไม้โดยมีวัตถุประสงค์ให้น้ำยารักษาเนื้อไม้เข้าไปอยู่เต็มในเซลล์และในช่องว่างระหว่างเซลล์ของไม้ น้ำยาที่ใช้ในการอัดน้ำยาไม่วิธีนี้มีทั้งน้ำยาจำพวกสารเคมีที่ละลายในน้ำและสารเคมีที่ละลายในน้ำมัน ขั้นตอนในการอัดน้ำยาไม้แบบเต็มเซลล์แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การอัดน้ำยาแบบไม่เต็มเซลล์ (Empty Cell process) เป็นการอัดน้ำยาโดยให้น้ำยาซึมเข้าไปอยู่ในผนังเซลล์ของไม้ แบ่งออกเป็น 2 วิธีย่อยๆ คือ วิธีของรือปิง (Rueping) และวิธีของลอว์รี (Lowry) ขั้นตอนการอัดน้ำยา 2 วิธีย่อยนี้ คล้ายคลึงกับการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์ แต่หลังจากที่นำไม้เข้าบรรจุในถังอัดน้ำยาแล้วจะไม่มีการทำสุญญากาศก่อนที่จะปล่อยน้ำยาเข้าถึง การอัดน้ำยาไม้แบบไม่เต็มเซลล์นี้นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นไม้หมอนรถไฟ เสาไฟฟ้า เสาโทรเลข หรือไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำให้น้ำยาซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี โดยไม่สิ้นเปลืองน้ำยามาก ไม้ที่จะนำมาอัดน้ำยาตามกรรมวิธีนี้ได้จะต้องเป็นไม้จำพวกที่อัดน้ำยาได้ไม่ยากนัก

1.3 การอัดน้ำยาแบบสลับระดับความดัน (Oscillation and Alternating Pressure process) เป็นการอัดน้ำยาโดยการเปลี่ยนระดับความดันภายในถังอัดน้ำยาให้สูงๆ ต่ำๆ สลับกันหลายๆ ครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์ให้น้ำยาถูกดันเข้าไปในเซลล์ของไม้ให้มากที่สุด เป็นวิธีที่ใช้ได้ผลดีกับไม้พวกที่อัดน้ำยาได้ยาก สามารถใช้ได้กับทั้งไม้สดและไม้แห้งแล้ว

1.4 การอัดน้ำยาไม้โดยใช้ตัวทำละลาย (Cellon process) เป็นสารซึ่งหลังจากที่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวนำสารเคมีที่เป็นตัวยาป้องกันรักษาเนื้อไม้เข้าไปในเนื้อไม้แล้วจะไม่คงอยู่ในเนื้อไม้พร้อมกับตัวน้ำยา แต่จะระเหยออกมาจากไม้จนหมด ไม้ที่อัดน้ำยาเสร็จแล้วจะมีลักษณะเหมือนกับไม้ที่ไม่ได้อัดน้ำยาแต่จะมีความทนทานเพิ่มขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางกว่าเดิม

2. วิธีไม้ใช้แรงอัด

เป็นวิธีการอบน้ำยาไม้อย่างง่าย มีค่าใช้จ่ายต่ำและเป็นที่ยอมรับใช้ทั่วไป ซึ่งมีวิธีดำเนินการอยู่หลายวิธี (บางรักษ์, 2547; ทรงกลด, ม.ป.ป) ได้แก่

2.1 การทาหรือพ่น (Brushing or Spraying) เป็นการใช้น้ำยารักษาเนื้อไม้ทาหรือพ่นลงบนผิวไม้ที่จะอบน้ำยา โดยปริมาณของน้ำยาจะซึมเข้าไปในเนื้อไม้เล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ที่นำมาใช้ออบน้ำยา

2.2 การจุ่มไม้ในน้ำยา (Dipping) เป็นการนำไม้มาจุ่มหรือชุบในน้ำยารักษาเนื้อไม้เป็นเวลาประมาณ 2-3 นาที การอบน้ำยาไม้แบบนี้ใช้สำหรับไม้ที่จะใช้งานชั่วคราว หรือไม้ที่ใช้งานในร่มที่ต้องการทาสี หรือน้ำมันชักเงาทับอีกครั้งหนึ่ง ไม้ที่จะอบน้ำยาต้องเป็นไม้ที่แห้งดีแล้วเช่นเดียวกับวิธีการทาหรือพ่น แต่วิธีนี้น้ำยาจะซึมเข้าไปในเนื้อไม้ดีกว่า ถ้าใช้น้ำยาร้อนก็จะได้ผลดียิ่งขึ้น

2.3 การแช่ (Steeping) ใช้ได้ทั้งไม้และไม้สดแต่ไม้สดจะต้องใช้เวลาในการแช่นานกว่าไม้ที่แห้งดีแล้ว การแช่ไม้ในน้ำยาอาจใช้เวลานานหลายชั่วโมงหรือวันหรืออาจเป็นสัปดาห์ การแช่ไม้สดจะใช้เฉพาะในน้ำยาพวกเกลือเคมีละลายในน้ำเท่านั้น ส่วนไม้แห้งจะใช้น้ำยาประเภทไหนก็ได้ แล้วแต่ความต้องการและความเหมาะสม วิธีนี้น้ำยาจะซึมเข้าไปในไม้ได้ดีและเร็วมากในระยะแรกๆ ซึ่งอาจจะเป็นช่วง 3-6 ชั่วโมงแรกหรือ 2-3 วันแรก ต่อจากนั้นจะลดลงเรื่อยๆ

ขั้นตอนที่ 3 การอบไม้

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ความชื้นหรือน้ำระเหยออกจากเนื้อไม้ เนื่องจากน้ำยาถนอมเนื้อไม้ที่ใช้ในขั้นตอนการรักษาเนื้อไม้เป็นสารละลายน้ำส่งผลให้มีน้ำในเนื้อไม้มากจึงจำเป็นต้องปรับความชื้นในเนื้อไม้ให้อยู่ในระดับสมดุลกับสภาวะอากาศ เพื่อให้ไม้คงรูปไม่ให้เกิดปัญหาการยิดหรือหดตัวของไม้ จนก่อให้เกิดปัญหาการแตกที่ผิวและภายในเนื้อไม้ การแตกตามหัวไม้ การบิดงอ การอบอาจใช้เวลา 8 วันถึง 10 วัน ขึ้นกับขนาดของไม้ ไม้ที่ออกจากเตาอบควรมีความชื้นร้อยละ 8 ถึง 16 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2554) ซึ่งการอบไม้ยังพาราให้แห้งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก นับเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการในการรักษาเนื้อไม้ก่อนที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

2.3 น้ำยารักษาเนื้อไม้

ไม้ยังพาราเมื่อผ่านการแปรรูปเป็นท่อนเล็กๆจะยังคงมีความชื้นสูงอยู่และเนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างอ่อนและมีแป้งมากซึ่งเป็นชั้นขอบต่อสิ่งมีชีวิตจำพวกเชื้อรา (Stain Fungi) พวกมอด แมลง ส่งผลให้ไม้ยังพาราถูกทำลายเนื้อไม้ได้โดยง่าย เนื่องจากแป้งเป็นแหล่งอาหารชั้นดีของสิ่งมีชีวิตเหล่านั้น ดังนั้นการป้องกันรักษาเนื้อไม้ด้วยน้ำยารักษาเนื้อไม้ซึ่งมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโตและมีความเป็นพิษต่อเชื้อรา เพรียง แมลง จึงเป็นขั้นตอนที่จำเป็นเพื่อช่วยป้องกันความเสียหายของไม้ ทำให้ไม้ที่ผ่านการอบหรืออัดน้ำยารักษาเนื้อไม้แล้วมีอายุการใช้งานที่นานและคงทนมากขึ้น ซึ่งน้ำยารักษาเนื้อไม้คือ สารเคมีที่สามารถใช้ป้องกันเนื้อไม้โดยจะมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

1. มีความเป็นพิษสูงต่อศัตรูทำลายไม้มีความคงทนอยู่ในเนื้อไม้ยาวนาน
2. มีความสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี
3. ไม่ทำให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายแก่เนื้อไม้
4. ไม่ทำให้โลหะเป็นสนิม
5. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ทำการอบน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้และผู้ที่มาไม้ที่ผ่านการอบน้ำยาแล้วไปใช้ประโยชน์

แล้วไปใช้ประโยชน์

ประเภทของน้ำยารักษาเนื้อไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ (ทรงกลด, ม.ป.ป.)

ดังนี้คือ

1. น้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ประเภทน้ำมัน (Tar-Oil preservatives)

น้ำยาประเภทนี้ส่วนมากมีความเป็นพิษต่อศัตรูทำลายไม้สูงและคงทนอยู่ในเนื้อไม้ได้ดี แต่ทำให้ไม่มีสีสกรก มีกลิ่นฉุน ไม่สามารถทาสี เซลแล็ก แล็กเกอร์หรือน้ำมันที่ใช้เคลือบสำหรับผิวตกแต่งไม้ได้ ไม้ที่ผ่านการอบน้ำยาประเภทนี้ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัย สำนักงาน โรงเก็บสินค้า และภาชนะบรรจุอาหาร แต่เหมาะกับไม้ที่ใช้ประโยชน์ในกลางแจ้ง ตากแดดตากฝน เช่น เสาไฟฟ้า เสาโทรเลข เสาโทรศัพท์ ไม้คอนสายไฟ ไม้หมอนรองรถไฟ สะพาน เขื่อน เป็นต้น ตัวอย่างยาประเภทน้ำมันได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ครีโอสต (Creosote) เป็นน้ำมันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการกลั่นถ่านหิน ไม้ และน้ำมันปิโตรเลียม

- โซลิกนัม (Solignum) เป็นน้ำมันที่มีทั้งชนิดธรรมดาสำหรับใช้อาบไม้ทั่วไป และชนิดผสมพิเศษที่ผสมสีแล้ว มีหลายสีด้วยกันใช้สำหรับทาไม้แบบเดียวกับการทาสีไม้ทั่วไป

2. น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทเกลือเคมีละลายในน้ำ (Water-Borne Preservatives)

น้ำยารักษาเนื้อไม้ประเภทนี้จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งสารที่เป็นส่วนประกอบในน้ำยาจัดเป็นเกลือเคมีละลายน้ำ มีคุณสมบัติป้องกันไม้จากเชื้อรา เปรียงและแมลงได้ดี ไม้ที่ผ่านการอบน้ำยาประเภทนี้สามารถทาสีทับลงไปได้

3. น้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ประเภทละลายในสารละลายอื่น (Solvent Type Preservatives)

น้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ประเภทนี้ประกอบด้วยสารเคมี 1 ชนิด หรือมากกว่า 1 ชนิด ละลายอยู่ในสารละลายอื่นๆ ที่ไม่ใช้น้ำ สารเคมีที่ใช้กันมากที่สุดในกลุ่มนี้ คือ Tributyltin oxide (TBTO), Metallic Naphthenates ในทางปฏิบัตินั้นนิยมนำสารเคมีที่มีคุณสมบัติในการฆ่าแมลงได้ เช่น Synthetic Pyrethroids มารวมด้วยเพื่อให้ตัวยามีความสามารถฆ่าแมลงได้

2.4 น้ำยารักษาเนื้อไม้จากสารประกอบโบรอน

น้ำยารักษาเนื้อไม้จากสารประกอบโบรอนมีชื่อเรียกอีกอย่างว่าน้ำยาอัดขาว จัดอยู่ในน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ประเภทเกลือเคมีละลายในน้ำประกอบด้วยสารเคมี 2 ส่วน คือ กรดบอริก (H_3BO_3) และสารบอแรกซ์ ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) โดย กรดบอริก จะทำหน้าที่ในการป้องกันมอดและปลวก ด้วยการทำให้โปรโตซัวที่อาศัยอยู่ในกระเพาะของมอดและปลวกซึ่งทำหน้าที่ย่อยเซลลูโลสให้เป็นอาหารนั้นไม่สามารถย่อยไม้ได้ และทำให้ปลวกหรือมอดนั้นไม่กินเนื้อไม้ต่อ ข้อควรระวังเกี่ยวกับกรดบอริก คือ กรดบอริกจะแตกตัวเป็นบอเรตไอออน เมื่อค่า pH ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกับค่า pKa ของกรดบอริก ($pK_{a1} = 9.27$) (แสง, 2558) ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณกรดบอริกในสารละลายลดลง ส่วนสารบอแรกซ์ที่ผสมในน้ำยารักษาเนื้อไม้นั้น มีหน้าที่ช่วยให้กรดบอริกสามารถละลายได้ดีขึ้น และช่วยปรับสภาพให้สารเคมีมีค่าเป็นกลาง เพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับเนื้อไม้ซึ่งอาจทำให้สูญเสียความแข็งแรง (โครงการหอศิลป์ไม้ไผ่, 2555) และเพื่อป้องกันไม่ให้กรดบอริกเกิดการแตกตัว

อัตราส่วนผสมระหว่างกรดบอริกและสารบอแรกซ์ที่ใช้ในกระบวนการอัดเนื้อไม้มีอยู่หลากหลายแตกต่างกันไปซึ่งโครงการหอศิลป์ไม้ไผ่ สถาบันอาศรมศิลป์ (2555) ได้รวบรวมไว้ดังนี้

- สารประกอบ tim-bor เข้มข้น 10% : สัดส่วนระหว่าง กรดบอริก:บอแรกซ์ คือ 1:1.5 (ผสมกรดบอริก 50 กิโลกรัมกับบอแรกซ์ 75 กิโลกรัม ต่อน้ำ 700 ลิตร (Garland, L., 2005)

- สารประกอบผสมกรดบอริก:บอแรกซ์เข้มข้น 4-5% ใช้สัดส่วนระหว่าง อยู่ที่ 1:1 (Pinzon, T.M, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

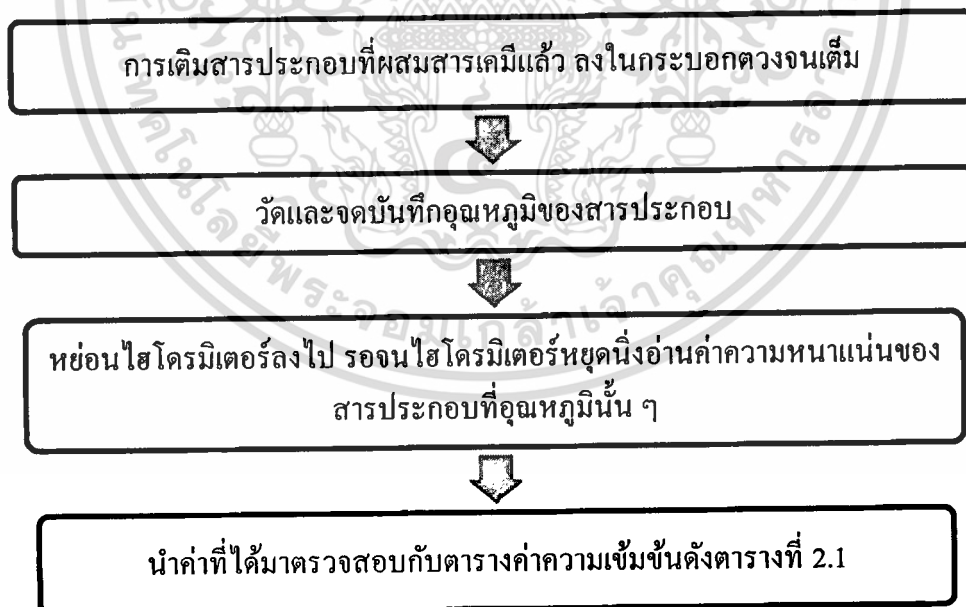
- สารประกอบระหว่างกรดบอริก:บอแรกซ์ความเข้มข้นของสารประกอบ 9% อัตราส่วนอยู่ ผสมเท่ากับ 4:5 (โดยใช้ กรดบอริก 40 กิโลกรัม ต่อ บอแรกซ์ 50 กิโลกรัม ผสมน้ำ 1,000 ลิตร) (เดชา เตียงเกตุ (สัมภาษณ์) 6 พฤษภาคม 2555)

- ในงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้อัตราส่วนระหว่างกรดบอริก:บอแรกซ์อยู่ที่ 1:1.5 โดยมีความเข้มข้นของสารประกอบ 5-7% (ธีระ วิณิน (สัมภาษณ์) 26 มิถุนายน 2555.)

อย่างไรก็ตามโครงการการวิจัยและพัฒนาวิธีการวัดความเข้มข้นของน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ (ทรงกลดและคณะ, 2556) ระบุว่า น้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้จากสารประกอบโบรอนที่ใช้การอัดน้ำยาไม้ควรใช้น้ำยาที่มีความเข้มข้นอย่างน้อย 1% เพื่อให้สามารถป้องกันมอดและแมลงต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการตรวจสอบความเข้มข้นน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้จากสารประกอบโบรอนก่อนนำมาใช้รักษาเนื้อไม้จึงมีความสำคัญ ซึ่งวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารประกอบโบรอนทำได้โดย การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของน้ำยาด้วยไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่

- ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) ที่มีสเกลวัดความถ่วงจำเพาะ 1.000-1.100
- เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ที่มีสเกลวัดอุณหภูมิ 0-100°C
- กระบอกตวง (cylinder) ขนาด 500 mL

ซึ่งขั้นตอนการตรวจสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้

(ทรงกลดและคณะ, 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของน้ำยาสารประกอบโบรอนในถังเก็บน้ำยา

ความถี่ (ก.พ.)	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น (%)
1.000	28	0.4
1.000	29	0.5
1.000	30	0.6
1.000	31	0.7
1.000	32	0.8
1.000	33	0.9
1.001	28	0.6
1.001	29	0.7
1.001	30	0.8
1.001	31	0.9
1.001	32	1.0
1.001	33	1.1
1.002	28	0.7
1.002	29	0.8
1.002	30	0.9
1.002	31	1.0
1.002	32	1.1
1.002	33	1.2
1.003	28	0.9
1.003	29	1.0
1.003	30	1.1
1.003	31	1.2
1.003	32	1.3
1.003	33	1.4
1.004	28	1.1
1.004	29	1.2
1.004	30	1.3
1.004	31	1.4
1.004	32	1.5
1.004	33	1.6
1.005	28	1.3
1.005	29	1.4
1.005	30	1.5
1.005	31	1.6
1.005	32	1.7
1.005	33	1.8

ที่มา : ทรงกลดและคณะ, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้ยางพาราแปรรูปที่ผ่านกรรมวิธีรักษาเนื้อไม้ ก่อนนำไปผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์หรือสินค้าแปรรูปต่างๆ ควรมีการตรวจสอบว่าน้ำยาเคมีที่อัดเข้าไปในเนื้อไม้ยางพาราที่อบแห้งแล้วมีน้ำยาซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อไม้มากหรือน้อย เพียงพอที่จะป้องกันเชื้อราและแมลงทำลายเนื้อไม้ได้ตามความต้องการหรือไม่ ซึ่งในการตรวจสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำยาของเนื้อไม้ที่ผ่านกระบวนการอัดน้ำยานั้น จะเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณกรดบอริกคงค้างในเนื้อไม้ (บริษัทแมนเดออร์เพ้นท์จำกัด, ม.ป.ป.) สามารถทดสอบได้ 2 วิธี ดังนี้

1. การตรวจสอบการซึมซับของน้ำยาขั้นต้นโดยการใช้ยาทดสอบ Curcumin Reagent

การตรวจสอบโดยใช้น้ำยาทดสอบ Curcumin Reagent เป็นการตรวจสอบการแทรกซึมของสารประกอบโบรอนที่มีอยู่ในเนื้อไม้ วิธีนี้สามารถกระทำได้อย่างง่ายดายและรวดเร็ว แต่ก็มีข้อเสียคือ เมื่อตรวจสอบแล้วก็ยังไม่สามารถระบุปริมาณกรดบอริกได้ ทำให้เราไม่สามารถทราบได้ว่า ในเนื้อไม้นั้นมีปริมาณกรดบอริกมากน้อยแค่ไหน

2. การตรวจสอบการซึมซับของน้ำยาโดยอาศัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์โดยการใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) สำหรับตรวจสอบการแทรกซึมของน้ำยาโบรอน วิธีการนี้จะสามารถระบุปริมาณโบรอนคงค้างในเนื้อไม้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสูง ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของไม้ รวมทั้งยังสามารถควบคุมต้นทุนการผลิตได้โดยการควบคุมการใช้น้ำยาให้เหมาะสม

2.5 การบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation)

2.5.1 โอโซนและคุณสมบัติของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุลคือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 กรัมต่อโมล มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นคาวปลา โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่มีสีแต่ถ้ามีความเข้มข้นที่สูงจะมีสีน้ำเงิน ที่อุณหภูมิลดลงถึง $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ โอโซนจะกลั่นเป็นของเหลวสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งจะมีสมบัติเป็นสารที่ระเหยง่ายเมื่อความเข้มข้นของโอโซนมากกว่า 20% ในการผสมกันระหว่างโอโซนกับออกซิเจน โดยการระเหยอาจเกิดจากประกายไฟ หรือการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันอย่างฉับพลัน (Zeynep *et al.*, 2004)

โอโซน เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงตัวหนึ่ง มีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า (Soares *et al.*, 2006) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยโอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลาย และในอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งโอโซนทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent)

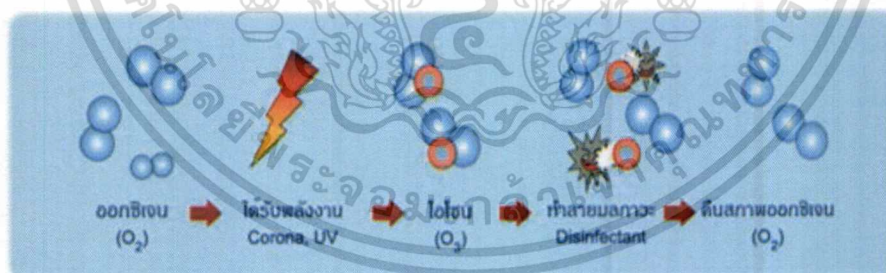
ตารางที่ 2.2 ค่า Oxidation potential ของสารออกซิไดซ์แต่ละชนิด

Oxidizing agent	Oxidation potential (mV)
Fluorine	3.03
Ozone	2.07
Permanganate	1.67
Chlorine dioxide	1.50
Hypochlorous acid	1.49
Chlorine gas	1.36
Hydroxyl radical	2.80
Hydrogen peroxide	1.77
Bromide	1.09

ที่มา : Atav (2013)

2.5.2 การเกิดโอโซน

Zeynep. *et al.* (2004) ได้อธิบายว่าการเกิดโอโซนโดยทั่วไป เกิดจากการแยกโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) ออกจากกัน ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระของออกซิเจน (free radical oxygen, O^\bullet) ซึ่งออกซิเจนที่เป็นอนุมูลอิสระนี้สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสองอะตอมทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของโอโซน (O_3) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารเจือปนในสิ่งแวดล้อมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6

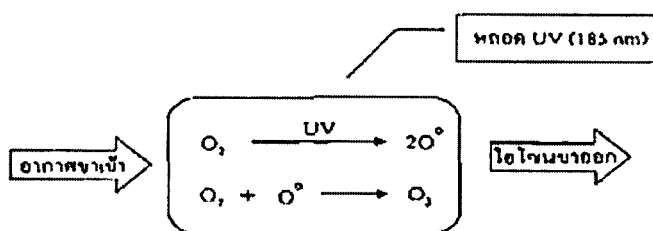


รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิดโอโซน (บริษัทโปรเฟสชันแนลโอโซนอินเตอร์เนชันแนลจำกัด, 2555)

ซึ่งวิธีการผลิตโอโซนนั้นสามารถทำได้ดังนี้ (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

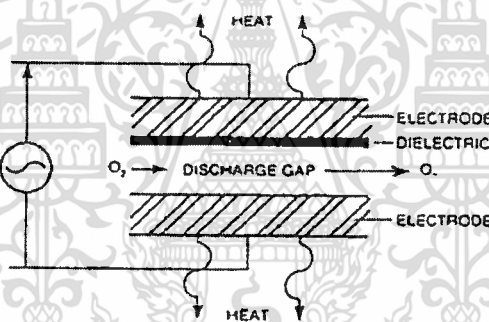
1. วิธีอัลตราไวโอเล็ต (UV method) เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนก๊าซออกซิเจน โดยใช้หลอดยูวี ขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตก๊าซโอโซนได้ถึง 2.5% โดยน้ำหนัก การผลิตโอโซนด้วยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเล็ต (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

2. วิธีโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เป็นการผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปในช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000 – 20,000 โวลต์ ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนบางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจนจากการวิ่งชนของอิเล็กตรอนจากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน ซึ่งการผลิตโอโซนด้วยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

2.5.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรและสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว โดยปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซน ประกอบด้วย ความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอชของน้ำ (pH), อุณหภูมิ และคุณภาพของน้ำ (Ozone Solutions Inc, 2012) ซึ่งค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของโอโซนดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำที่ pH ต่างๆ (Weber และ Walter, 1972)

pH	Ozone half-life [min]
7.6	41
8.5	11
8.9	7
9.2	4
9.7	2
10.4	0.5

ตารางที่ 2.4 ค่าครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Okafu, 2011)

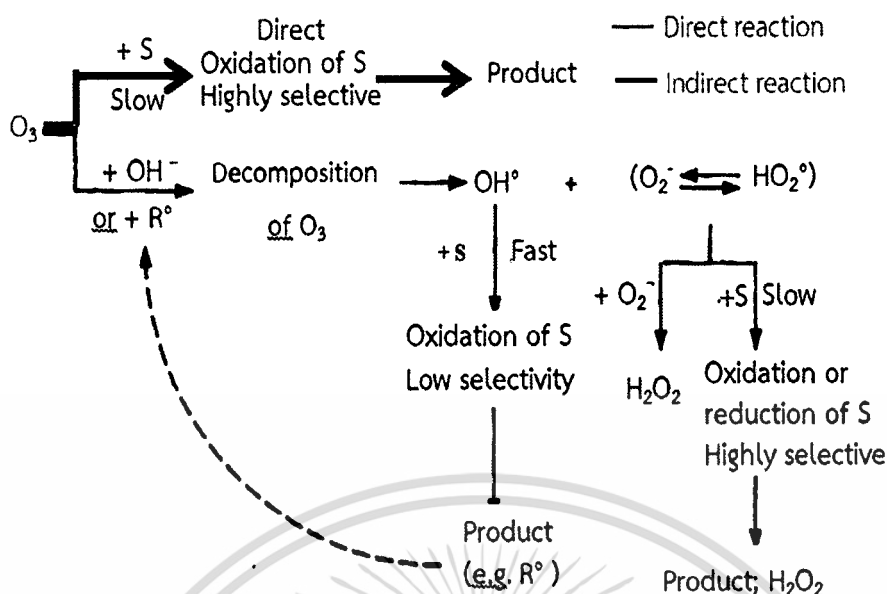
อุณหภูมิ (°C) ของน้ำ	Ozone half-life [min]
15	30
20	20
25	15
30	12
35	8
40	5

2.5.4 ปฏิกริยาของกระบวนการเติมโอโซน

กระบวนการเติมโอโซน (Ozonation, O_3) เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process) โดยโอโซนสามารถทำปฏิกริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic Organic) ได้ดี ผลผลิตของปฏิกริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลงและถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ค่าพลังงานอิสระ (Free Energy) ของโอโซนมีค่าเท่ากับ -400 kJ/mol ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกริยาออกซิเดชันโดยโอโซนจะดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ ข้อเสียคือโอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจน (O_2) ได้เร็วมากในบรรยากาศจึงต้องผลิตที่แหล่งบำบัด (On-site) โดยตรง (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

กลไกการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน สามารถเกิดได้ทั้งปฏิกริยาโดยตรง (Direct Reaction) และเกิดปฏิกริยาโดยอ้อม (Indirect Reaction) (พรวิษา และคณะ, 2551) ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



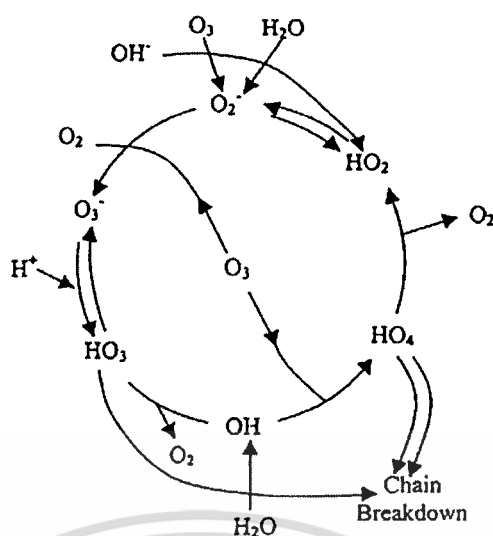
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน (สุรชัย, 2553)

1. การเกิดปฏิกิริยาโดยตรง (Direct Reaction)

โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยตรง ตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาคือบริเวณพันธะคู่ของสารอินทรีย์ (C=C, C=C-O-R, C=C-X) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ Nucleophilic C) สารอินทรีย์พวก Aromatic ที่มีหมู่ฟังก์ชัน OH, CH₃ หรือ OCH₃ อยู่ตรงตำแหน่ง Ortho จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้าสารเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ Halogenated aliphatic compounds โอโซนจะไม่สามารถออกซิไดส์สารเหล่านี้ได้ (พรริวิชา และคณะ, 2551) ปฏิกิริยาแบบ Direct Reaction จะเกิดปฏิกิริยาช้าและส่วนใหญ่จะเกิดในสภาวะที่เป็นกรด (Gottschalk. et al., 2000)

2 การเกิดปฏิกิริยาโดยอ้อม (Indirect reaction)

การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับโอโซนแตกตัวให้แรดิคอลต่าง เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคอล (HO[•]), ไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคอล (HO₂[•]), ไฮโดรไตรออกซิลแรดิคอล (HO₃[•]), ไฮโดรเตตระออกซิลแรดิคอล (HO₄[•]) และโอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคอล (O₃^{•-}) (รัชดากร และคณะ, 2553) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ (วีระพงศ์, 2548)

โดยแรติคอลเหล่านี้จะทำปฏิริยากับสารอินทรีย์ทันที กลไกการเกิดปฏิริยาแบ่งเป็น 3 ส่วน (ปิยะวิทย์, 2552) คือ

2.1 ขั้นเริ่มต้น (Initiation Step)

ขั้นเริ่มต้นเป็นปฏิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับก๊าซโอโซน ทำให้เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรติคอล (Superoxideanion Radical ; $O_2^{\circ-}$) และไฮโดรเปอร์ออกซิลแรติคอล (hydroperoxyl radical, HO_2°) ดังสมการ 2.1

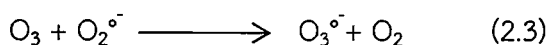


เมื่อไฮโดรเปอร์ออกซิลแรติคอลอยู่ในสมดุลกรด-เบส (Acid - Base Equilibrium) สามารถเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรติคอล ดังสมการ 2.2

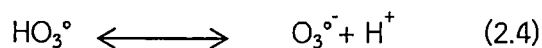


2.2 ขั้นตอนสายโซ่ของแรติคอล (Radical Chain)

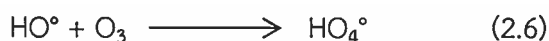
ขั้นตอนนี้เป็นปฏิริยาระหว่างโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรติคอลทำให้เกิดเป็น โอโซนไนด์แอนไอออนแรติคอล ($O_3^{\circ-}$) ซึ่งสามารถสลายตัวทันทีที่เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรติคอล ดังสมการ 2.3 ถึง 2.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปิยะวิทย์ (2552) รายงานว่า ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนเกิดเป็นไฮโดรเทตระออกซิลเรดิคัล (HO_4°) และสลายตัวได้ออกซิเจน และไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล ซึ่งจะให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยตามวิถีการเกิดของปฏิกิริยา ดังสมการ 2.6 ถึง 2.7



การสลายตัวของไฮโดรเทตระออกซิลเรดิคัลเป็นออกซิเจนและไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้งซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัล หรือไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล สารนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain carrier) เรียกว่า ตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และสารอินทรีย์บางชนิดจะมีกลุ่มฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลส่งผลให้เกิดเรดิคัลของสารอินทรีย์ (R°) ดังสมการ 2.8



ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิกเปอร์ออกซิลเรดิคัล (Organic Peroxy radicals ROO°) ได้ดังสมการ 2.9 ถึง 2.11

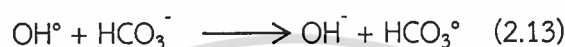
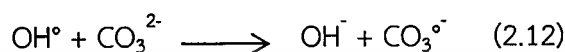


การสลายตัวของโอโซนถูกเริ่มต้นด้วยไฮดรอกซิลไอออน แล้วนำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ขั้นสุดท้าย (Termination Step)

ในขั้นตอนสุดท้ายนี้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์บางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้เกิดแรดิคัลลำดับที่สอง (Secondary Radicals) ซึ่งจะไม่เกิดการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล หรือซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล จะเรียกสารเหล่านี้ว่าตัวยับยั้ง (Inhibitors หรือ Scavengers) โดยสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ดังสมการ 2.12 ถึง 2.13



ความเป็นไปได้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือ การทำปฏิกิริยากันของแรดิคัลสองตัว ดังสมการที่ 2.14



เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่าโอโซนจำนวน 3 โมเลกุลจะให้ไฮดรอกซิลแรดิคัล 2 โมเลกุล ดังสมการที่ 2.15 ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ต่อไป



2.5.5 การใช้ประโยชน์ของโอโซน

โอโซนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในด้านต่างๆ ได้แก่

1. การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค

การฆ่าเชื้อโรค (กำจัดแบคทีเรีย ไวรัส และเชื้อรา) เป็นจุดประสงค์หลักของการบำบัดน้ำในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม ซึ่งแต่เดิมจะใช้คลอรีนเท่านั้นในการฆ่าเชื้อโรค โดยมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียคือ จะมีกลิ่นคลอรีนและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ กล่าวคือ ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์จะทำให้เกิดสาร Organochloride ชนิด Trihalomethanes (THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ความนิยมในการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคลดลง และได้มีการนำโอโซนมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมากขึ้น แม้ว่าโอโซนจะมีราคาแพงกว่าคลอรีนแต่เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้คลอรีนกับโอโซนพบว่าโอโซนสามารถฆ่าเชื้อได้ดีกว่าการใช้คลอรีนร้อยละ 52 และไม่ทำให้เกิดกลิ่นในน้ำ นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียจากชุมชนและจากภาคเกษตรกรรมเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการบำบัดทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพ เนื่องจากโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดรส กลิ่น และสารตกค้างในน้ำเหมือนการใช้คลอรีน ซึ่งย่อยสลายได้ยากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการโอโซนเนชั่นจึงมีผลดีกว่าในด้านการดูแลสิ่งแวดล้อม

2. การใช้โอโซนในการกำจัดสี

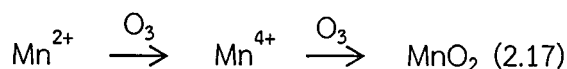
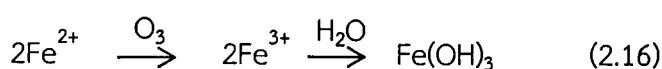
สีของน้ำเสียโดยทั่วไปจะเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Absorb visible light) ซึ่งสีของน้ำเสียแต่ละแหล่งจะแตกต่างกันตามชนิดของสารที่ปนเปื้อน สีที่เกิดจากการมีสารแขวนลอยอยู่มาก เช่น น้ำที่ละลายดินที่เป็นตะกอนสีแดง ทำให้ขุ่นมากกว่าปกติ เรียกว่าสีปรากฏ (Apparent color) และสีที่เกิดจากการสลายตัวของพืช เช่น สารที่สลายตัวจากลิกนินของพืช หรือเกิดจากสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิก เรียกว่าสีจริง (True color) (CleanWaterTeam, 2014) ในการบำบัดสีของน้ำเสียด้วยโอโซนจะเกิดการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีซึ่งส่วนหนึ่งของโมเลกุลที่สามารถดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ให้ทำให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดสี

3. การใช้โอโซนในการกำจัดกลิ่นและรส

สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ประกอบด้วยซัลเฟอร์และไนโตรเจนซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นในน้ำเสีย โอโซนความเข้มข้นน้อยๆที่เติมในน้ำประมาณ 1-2 mg/L ก็เพียงพอในการออกซิไดซ์สารประกอบเหล่านี้ นอกจากนี้โอโซนยังสามารถป้องกันกลิ่นไม่ให้กลิ่นกลับมาเกิดขึ้นอีก

4. การใช้โอโซนในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส

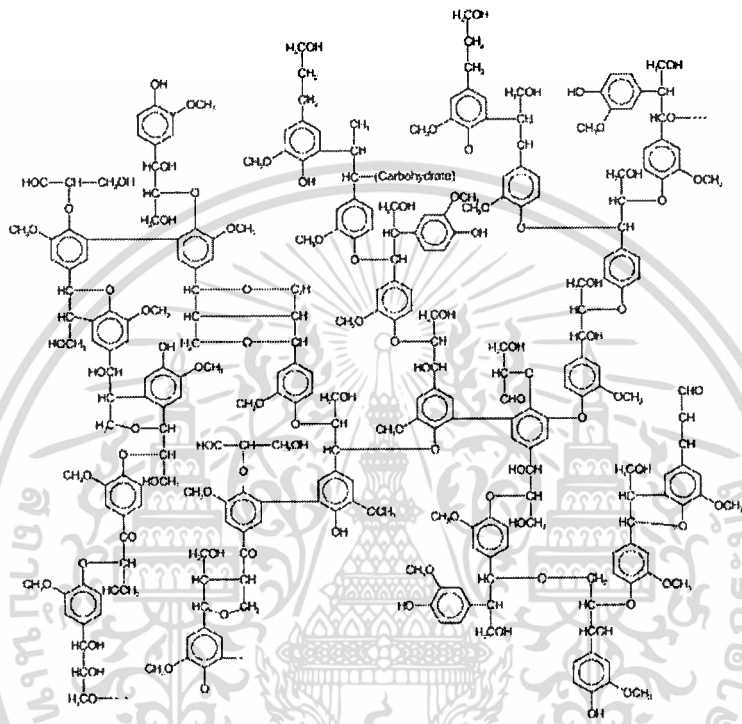
ถึงแม้ว่าเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่ก็ยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสีในน้ำ ดังนั้นจึงมีการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทั้งในอุตสาหกรรมน้ำดื่มและน้ำเสีย เหล็กและแมงกานีสที่พบในน้ำส่วนมากอยู่ในรูป $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ และ $\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$ ตามลำดับ ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทำได้โดยการเปลี่ยนรูปของสารละลายให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแล้วนำไปกรองแยกจากน้ำ การเปลี่ยนรูปของสารที่ละลายน้ำ (Fe^{2+} และ Mn^{2+}) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Fe^{3+} และ Mn^{4+}) ทำได้โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนตามสมการดังที่ 2.16 และ 2.17



5. การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้สันนิษฐานว่าความเข้มของสีในน้ำยาโบรอนเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์พวกลิกนินที่มาจากเนื้อไม้ ซึ่งลิกนินประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลาย
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

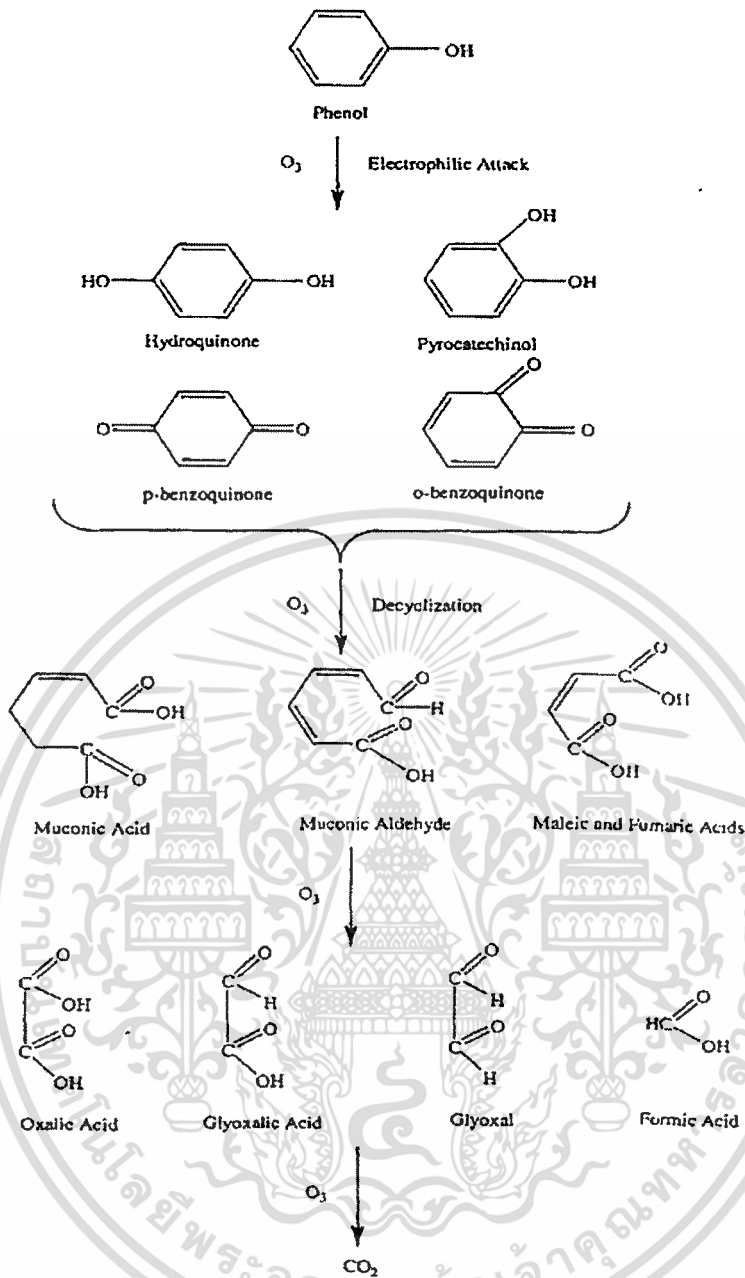
อนุพันธ์มารวมกันเป็นลักษณะโครงสร้างพอลิเมอร์แบบไม่มีผลึก ในการศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของลิกนินพบว่า ลิกนินจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดเท่านั้นและลิกนินจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และโครงสร้างเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อย (รวิต, 2548) ลิกนินที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกลุ่ม Phenolic hydroxyl จับตัวกับกลุ่ม Phenylpropane ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างลิกนิน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของลิกนิน (Wikipedia, 2015)

ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม Aromatic ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนินนั้น ฟีนอลสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโอโซนได้ดีกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อื่นๆ โดยฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กรดฟอร์มิก (Formic Acid) ไกลออกซอล (Glyoxal) และกรดออกซาลิก (Oxalic Acid) ซึ่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ฟีนอลด้วยโอโซนแสดงดังรูป 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ฟีนอลด้วยโอโซน (วีรยา, 2549)

2.5.6 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเติมโอโซนในน้ำ

1. ค่าพีเอช

โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งในสภาวะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นกรดและเบส ซึ่งที่พีเอชเป็นกรดโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ แต่ในพีเอชที่เป็นเบส โอโซนจะแตกตัวเป็นแรดิคอลล เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (Gottschalk, 2000; Atav, 2013) โดยงานวิจัยของนวพรรษ (2545) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำชะขยะที่มีภาระบรรทุก 100% และ 50% ดีที่สุดคือ pH เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 4 งานวิจัยของ นนทพงษ์ (2548) ทำการบำบัดน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่ง พบว่าที่สภาวะ pH 10.0 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุดซึ่งสามารถลดปริมาณสีในหน่วย PtCO จาก 510.00 เหลือ 141.58 (ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 72.24 %) ค่าสีในหน่วย ADMI จาก 576 เหลือ 178.00 (ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 69.08 %) งานวิจัยของนุชนกกาญจน์ (2550) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเติมโอโซน พบว่า น้ำเสียที่มีการปรับ pH เท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอยมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอย 92.2 และ 98.0 % ตามลำดับ

2. อุณหภูมิ

โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้โมเลกุลของโอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้รวดเร็วหรือการแตกตัวเป็นเพิ่มมากขึ้น (Atav, 2013 ; Okafo, 2011) งานวิจัยของ Dehouli *et al.* (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของสมบัติของค่า pH, อุณหภูมิและ activated carbon เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ของโอโซน /activated carbon เพื่อใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ จาก 10°C เป็น 30°C ส่งผลให้ โอโซนเกิดการสลายตัว โดยมีค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของโอโซน (k_D) เพิ่มจาก 0.030 min^{-1} เป็น 0.097 min^{-1}

3. ปริมาณโอโซน/ระยะเวลาการเติมโอโซน

การเกิดปฏิกิริยาออกซิชั่นของกระบวนการเติมโอโซนจะเกิดจากโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคอลต่างๆที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนเข้าไปในระบบหรือเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจะส่งผลให้มีโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคอลเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิชั่นในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งงานวิจัยของ Pena, M. *et al.* (2003) ได้ทำการทดลองกำจัดสีของน้ำเสียจากกากน้ำตาลก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพด้วยก๊าซโอโซน พบว่า การเติมโอโซน (Ozone dosages) มากกว่า 4.2 g/hr สามารถกำจัดสีได้มากกว่า 80% ในเวลา 20 นาที และสามารถกำจัดสีได้มากกว่า 90% ในเวลา 30 นาที ในขณะที่การเติมโอโซนน้อยกว่า 3.7 g/hr ต้องใช้เวลา 30 นาที สำหรับการกำจัดสีให้มีย่านมากกว่า 80% งานวิจัยของสุรัชย์ (2553) ทำการศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยโอโซน พบว่า สีของน้ำตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรกที่เติมโอโซนซึ่งมีค่าเริ่มต้น 550 Pt-Co Unit โดยลดลงเหลือ 28 Pt-Co Unit คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.91% และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบำบัดถึง 60 นาทีพบว่า สามารถกำจัดสีได้ 100%

4. สารอินทรีย์ในน้ำ

สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะส่งผลต่อกระบวนการเติมโอโซนโดยถ้าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์มากจะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณโอโซนที่เพิ่มมากขึ้นหรืออาจใช้เวลาในการบำบัดที่นานขึ้น ซึ่งงานวิจัยของ Wu. *et al.* (2012) ได้ศึกษาการใช้กระบวนการเติมโอโซนในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมไม้ไผ่ด้วยกระบวนการโอโซนชัน พบว่าการบำบัดน้ำเสียโดยที่มีปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นของตัวอย่างที่วัดในรูป COD มีค่ากว่า 835 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัด COD และ สี คง

ตัวที่ประมาณ 60% และ 95% ตามลำดับแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น COD เริ่มต้นถึง 1020 mg/L ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดทั้งสองมีค่าลดลง (57% และ 91 % ตามลำดับ) เมื่อใช้ปริมาณโอโซนและเวลาการบำบัดเท่ากัน

2.6 รูปแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์หลักของการทำงานวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์โดยส่วนใหญ่ คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทคือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variables ในบางครั้งเรียกว่าปัจจัยที่ทำการศึกษา (Treatment) นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ X กับตัวแปรตาม (Dependent Variables) หรือผลการตอบสนอง (Responses) นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ Y โดยมีเป้าหมายคือ เพื่อหาค่าหรือสถานะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของตัวแปรอิสระที่จะทำให้ตัวแปรตามมีค่าตรงตามที่ต้องการคือสูงสุด (Maximum) หรือต่ำสุด (Minimum) (เกศระวี และคณะ, 2554) โดยวิธีการดำเนินการทดลองที่ใช้เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งจะนำมาใช้ตอบโจทยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

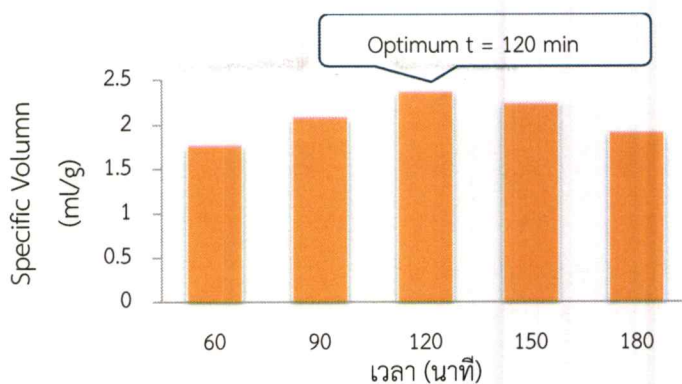
2.6.1 การดำเนินการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time, OVAT)

การทดลองแบบทีละปัจจัยหรือที่เรียกว่า One-Variable-At-A-Time จัดเป็นรูปแบบการทดลองแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการศึกษาผลของปัจจัยเพียงสถานะหนึ่งเท่านั้นทำให้สามารถประมวลผลการวิเคราะห์ได้รวดเร็ว ในการทดลองจะทำการแปรผันระดับต่างๆ ของแต่ละปัจจัย/ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาจากนั้นวัดผลการตอบสนองหรือตัวแปรตามที่ได้รับอิทธิพลจากการแปรผันดังกล่าวพร้อมทั้งควบคุมให้ปัจจัย/ตัวแปรอิสระอื่นมีค่าคงที่รูปแบบการทดลองนี้สามารถยกตัวอย่างได้ดังเอกสารประกอบการสอนของนางเยาว์ (2554) ซึ่งแสดงวิธีการดำเนินการและผลที่ได้จากทดลองในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.13, 2.14

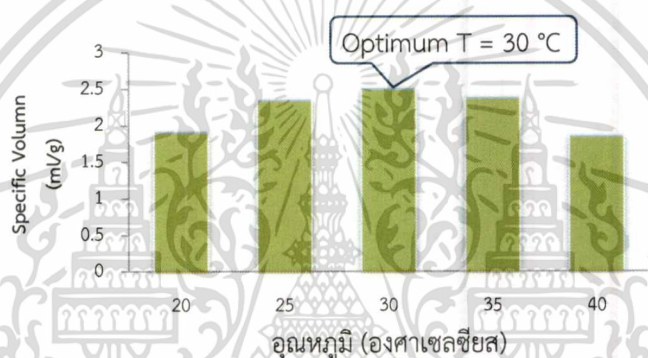
ตารางที่ 2.5 รูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตโด (Dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง

ลำดับ	เวลา (time; t)	อุณหภูมิ (temperature; T)
1	60	25
2	90	25
3	120	25
4	150	25
5	180	25
6	120	20
7	120	25
8	120	30
9	120	35
10	120	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 1-5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนดอุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส (นงเยาว์, 2554)



รูปที่ 2.14 ผลการทดลองที่สมมุติจาก One-Variable-At-A-Time ของการทดลองชุดที่ 6-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในเกิดโด (Dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่กำหนดเวลาให้คงที่ที่ 120 นาที (นงเยาว์, 2554)

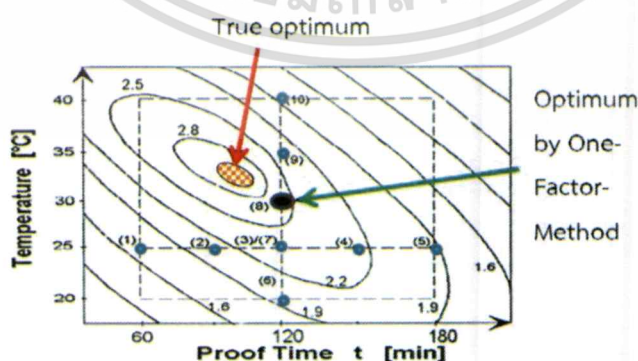
จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 พบว่า ในการทดลองที่ละปัจจัยสถานะที่เหมาะสมในการเกิดโดในผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทำให้ค่า specific volume (ปริมาตรจำเพาะ) สูงที่สุด คือ อุณหภูมิ ที่ 30 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที แต่ถ้าเวลาในการเกิดโด หรือ อุณหภูมิ มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ทำการทดลองพร้อมกัน จะไม่สามารถทราบได้ว่าตัวแปรตามที่ศึกษาจะมีผลเป็นอย่างไร เนื่องจากการทดลองที่ละปัจจัยเป็นการทดลองที่ไม่ศึกษาผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตามหรือการตอบสนอง และเมื่อต้องการศึกษาปัจจัยที่มากกว่าหนึ่งปัจจัยจะต้องใช้ทรัพยากรในการวิเคราะห์ที่เป็นจำนวนมากและใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่า/สภาวะที่ดีที่สุดของกระบวนการครบทุกปัจจัยที่ศึกษาซึ่งอาจจะนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนจากการลองผิดลองถูกหรือเรียกว่า Trial & Error Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การออกแบบการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

การออกแบบการทดลอง (Designs of Experiments, DOEs) เป็นการออกแบบสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือการปรับค่าของตัวแปรอิสระ (ปัจจัยที่ศึกษา, X) ที่มีผลต่อตัวแปรตาม (Y) โดยการหาค่า/สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งจะอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาเหล่านั้นอย่างน้อย 2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง และนำไปสู่ผลตอบสนองตามที่ต้องการ โดยการออกแบบการทดลองนี้สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันส่งผลให้จำนวนครั้งในการทำการทดลองและการใช้ทรัพยากรลดน้อยลง อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ) มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้เป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการทดลองที่ละปัจจัย รูปแบบของการออกแบบการทดลองที่ใช้อยู่มีหลากหลายรูปแบบแต่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งก็คือ วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

RSM เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์ร่วมกับสถิติมาประยุกต์ใช้สำหรับวางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่าตอบสนองที่สนใจสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) จากความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้น เช่น การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Input Variable) หรือปัจจัยเชิงปริมาณกับค่าการตอบสนอง (Response Variable) เป็นคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบวิธี RSM กับการทดลองที่ละปัจจัยจะพบว่า การทดลองที่ละปัจจัยไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองได้ ดังนั้นเมื่อใช้ RSM ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวอย่างสมมุติที่ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโด (dough) ของขนมปังชนิดหนึ่ง (นงเยาว์, 2554) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 2.15 โดยแสดงให้เห็นว่าการใช้ RSM ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสามารถวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่แท้จริงได้มากกว่าการทดลองที่ละปัจจัย



รูปที่ 2.15 พื้นผิวการตอบสนองแสดงสภาวะที่เหมาะสมของค่า specific volume สูงที่สุดและค่า specific volume ที่ได้จากการทดลอง One-Variable-At-A-Time ในแต่ละชุด (นงเยาว์, 2554) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญของการทำพื้นที่ผิวผลตอบที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือ

1) ต้องมีรูปแบบการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งรูปแบบการทดลองสำหรับการออกแบบที่นิยมใช้ และสามารถสร้างพื้นที่ผิวผลตอบได้ (จุฑามาศ, 2553) คือ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken Design (BBD)

2) ต้องมีตัวแปร (Input Variable) เป็นตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไปเช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของสาร เป็นต้น ซึ่งระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรจำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา และข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X) ต้องมีความสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model)

3) Response Variable เป็นค่าผลตอบสนองเป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ผลผลิต (Yield) ความหนืด ความแข็ง คະแนนความชอบ เป็นต้น

ซึ่งในการออกแบบ RSM นั้นมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ 4 แบบ (ทัศนีย์, 2550) คือ

1. Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (2.18)$$

2. Linear + interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.19)$$

3. Linear + square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (2.20)$$

4. Full quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} \quad (2.21)$$

เมื่อ X_i, X_{ij} คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการในการเลือกตัวแบบจำลองที่มีความเหมาะสม จะพิจารณาจาก

1. ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error of the Estimate: S)

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามาก แสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมาก และถ้าในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าเท่าศูนย์แสดงว่าตัวแบบจำลองมีความเหมาะสมดีมาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.22

$$S = \sqrt{MS_{Residual\ Error}} \quad (2.22)$$

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

R^2 คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่า R^2 เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี โดยทั่วไปค่า R^2 จะสูงขึ้น เมื่อมีตัวแปรอิสระเพิ่มเข้ามาในสมการถดถอย ค่าผลรวมของส่วนเบี่ยงเบนกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square of Total; SST) ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าผลบวกกำลังสองของการถดถอย (Sum of Squares Regression ; SSR) จะสูงและผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Squares of Error ; SSE) จะต่ำลง ดังนั้น R^2 จึงมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มตัวแปรอิสระในสมการถดถอย มักมีผลทำให้มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการถดถอย และอาจทำให้สมการถดถอยมีรูปแบบที่แยกลงแทนที่จะดีขึ้น ดังนั้นจึงนิยมเลือก R^2 (adj) มาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า ซึ่งค่า R^2 (adj) จะมีค่าที่ต่ำกว่า R^2 เล็กน้อยโดยค่า R^2 (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว ใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.23 หรือ สมการที่ 2.24

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \times (1 - R^2) \quad (2.23)$$

เมื่อ n = จำนวนการทดลอง k = จำนวนตัวแปรในแบบจำลอง

หรือ
$$R_{adj}^2 = \frac{MS(Total) - MS(Residual)}{MS(Total)} \quad (2.24)$$

โดยที่
$$MS(Total) = \frac{SS(Total)}{df(Total)}$$

เมื่อได้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมแล้วจึงนำไปทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลระบบได้ดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบ 2 ลักษณะ (ทศนิยม, 2550) ดังนี้

1. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0: \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_i \neq 0$ หรือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F- test หรือ สามารถดูจากค่า p value ได้ โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) มาก่อน ถ้า p value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จึงตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า p value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัว สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

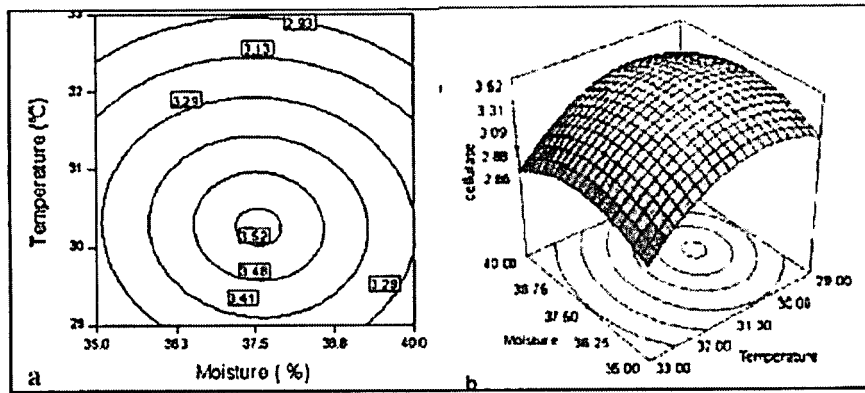
2. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวโดย กำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0: \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ t - test หรือสามารถพิจารณาค่า p value ก็ได้ โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ถ้า p value ของตัวแปรที่ i มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า p value ของตัวแปรที่ i มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้นตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 นั่นแสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเป็นภาพสามมิติที่เรียกว่าพื้นผิวผลตอบ (Response Surface plot) หรือกราฟสองมิติที่เรียกว่ากราฟโครงร่าง (Contour plot) (พีรวัดน์, 2556) ดังแสดงในรูป 2.16



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองโครงร่างพื้นผิว (จุฬามาต, 2553)

(a) กราฟโครงร่าง (Contour plot) และ (b) กราฟพื้นผิวดตอบสนอง (Surface plot)

2.6.3 รูปแบบการทดลองที่ใช้ร่วมกับ RSM

รูปแบบการทดลองที่สามารถออกแบบเพื่อให้สามารถสร้างพื้นที่ผิวผลตอบสำหรับการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ได้แก่

1. การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เมื่อตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพิ่มหรือลดทำให้ค่าตัวแปรอื่นอาจเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง จึงต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic Relationship) (พรรณทิพย์ และ ราตรี, 2558) โดยทั่วไป CCD จะเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของ design เท่ากัน และ ทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1 , 0 , 1 , α) (นงเยาว์, 2554) ยกตัวอย่างเช่น ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยได้แก่ X_1 , X_2 และ X_3 (ในแต่ละปัจจัยมี 5 ระดับคือ -1.682 , -1 , 0 , 1 , 1.682) สามารถออกแบบการทดลองได้ดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย

RUN	X ₁	X ₂	X ₃
1	1	1	-1
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	1	1	1
6	0	0	0
7	1	-1	1
8	0	-1.682	0
9	-1	-1	-1
10	-1	-1	1
11	0	1.682	0
12	0	0	0
13	-1.682	0	0
14	0	0	1.682
15	1	-1	-1
16	1.682	0	0
17	-1	1	1
18	0	0	0
19	-1	1	-1
20	0	0	-1.682

2. การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design; BBD) เป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบการทดลองที่สามารถนำไปสร้างผลตอบได้ ซึ่งเป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ โดย Box-Behnken Design เป็นการออกแบบที่คล้ายกับ Central Composite Design แต่ต่างกันที่จุดบนแกนจะอยู่ในระนาบเดียวกับจุดที่เป็น Factorial และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางในแต่ละปัจจัยของ Box-Behnken Design จะมี 3 ระดับ คือ -1, 0, 1 (นงเยาว์, 2554) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการทดลองที่ต้องการมีจำนวนน้อยๆ ตัวอย่างการออกแบบ Box-Behnken Design ที่มี 3 ตัวแปรแสดงดังตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 การออกแบบ Box-Behnken Design ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย

RUN	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนการทดลองของ Central Composite Designs และ Box-Behnken Designs ที่มีตัวแปรเพิ่มมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 จำนวนการทดลองของ Central Composite Designs และ Box-Behnken Designs ที่จำนวนตัวแปรต่างๆ (พลวริน, 2551)

Number of Factors	Central Composite Designs	Box-Behnken Designs
2	13	-
3	20	15
4	30	27
5	52 (full factorial)	46
6	91 (full factorial)	54

จากตารางที่ 2.4 ถึง 2.6 จะพบว่าคุณสมบัติของรูปแบบการทดลองในแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน โดย Box-Behnken Designs จะใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าและต้องการปัจจัยเพียง 3 ระดับ ต่างกับ Central Composite Designs ที่ต้องการ 5 ระดับในแต่ละปัจจัย (พลวริน, 2551) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Designs ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติ RSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวีศ (2548) ทำการศึกษาการกำจัดสีของสารละลายลิกนินในท่อแวนระนาบ พบว่าสารละลายลิกนินจะมีความเข้มข้นสูงในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาด้วยโอโซน แล้วจึงค่อยๆ จางลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Darkin หรือ Darkin-like reaction) กับโครงสร้าง Aromatic ในหมู่ฟีนิล (Phenyl group) เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะแบบควิโนน (Quinone) ซึ่งมีสีน้ำตาล และทำให้ค่า Chromophore Index สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสีที่วัดได้จากสารละลายมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ซีโอติมีค่าลดต่ำลง และเมื่อโครงสร้างควิโนนถูกออกซิไดซ์ ความเข้มข้นของสารละลายจึงเริ่มลดลงและซีโอติมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลลิกนิน และในการพิจารณาถึงโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันพบว่าหมู่โครงสร้างที่ก่อให้เกิดสีของลิกนินจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงส่งผลให้ปริมาณการลดลงของสีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน

วีรยา (2549) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานเบียร์ที่ผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพแล้วด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชั่นในการบำบัดสีที่ค่า pH อัตราการผลิตโอโซน และระยะเวลาเติมโอโซนที่แตกต่างกัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งของโรงงานเบียร์ คือ pH เท่ากับ 10 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 200 mg/L/hr และระยะเวลาเติมโอโซนเท่ากับ 25 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี 74.26% น้ำที่ผ่านการบำบัดมี BOD/COD เพิ่มขึ้น 77.88% และค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 92.15% เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวไปทำการทดลองกระบวนการโอโซนเนชั่นในถังปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง พบว่าให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ โดยมีประสิทธิภาพในการลดสี 74.12% น้ำที่ผ่านการบำบัดมี BOD/COD เพิ่มขึ้น 44.44% และค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 77.01% ค่า BOD/COD ของน้ำทิ้งที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสีในน้ำตัวอย่างบางส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนและย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก แต่เมื่อถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนจะทำให้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นและไม่ก่อให้เกิดสี ส่วนการที่ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสีในน้ำตัวอย่างบางส่วนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของของแข็งแขวนลอย ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำตัวอย่างได้ด้วยการกรอง ในการลดสีด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ต้องเสียค่าไฟฟ้าเพื่อผลิตโอโซนประมาณ 70 บาทต่อน้ำเสีย 1 m³

อรชุดา (2549) ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ร่วมกับ RSM ซึ่งตัวแปรที่คาดว่าส่งผลต่อการลดลงของสีของน้ำเสียมี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรจะศึกษา 5 ระดับ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ (organic Loading) อยู่ระหว่าง 650 - 1950 mg/L ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 3 - 11 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชั่นอยู่ระหว่าง 10 - 60 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของโอโซนคงที่เท่ากับ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของโอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีการผลิตแบบโคโรนาดีสชาร์จ เท่ากับ 27.6 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่า pH และเวลาที่ใช้ในการโอโซนชัน ส่วนการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยในเทอมของ Linear และปริมาณสารอินทรีย์ในเทอมของ Square มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี เนื่องจาก p -values มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญส่วนปัจจัยอื่นในเทอมของ Square และ ทุกปัจจัยในเทอม Interaction ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี นอกจากนั้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดด้วยโอโซน คือ ปริมาณสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 8.7 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนชัน 20 นาที ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 1.5 %

นุชนกกาญจน์ (2550) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษสา ด้วยกระบวนการเติมโอโซน โดยทำการทดลองกับน้ำเสียที่ไม่ปรับค่า pH และปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4 7 และ 11 ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียที่มีการปรับ pH เท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอยมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 92.2 และ 98.0 % ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียที่มีค่า pH เท่ากับ 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ BOD มากที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 39.2 และ 74.8 % ตามลำดับ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการกำจัด COD BOD และสี มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซน ซึ่งผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลศาสตร์พบว่า ปฏิกริยาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษสา โดยกระบวนการเติมโอโซนนี้ไม่เป็นไปตามปฏิกริยาอันดับหนึ่งแต่พบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นและระยะเวลาบำบัดมีแนวโน้มเป็นไปตามสมการกำลังสาม ผลจากการทดลองของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเติมโอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีในน้ำเสีย แต่จำเป็นต้องใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งในแง่ของ COD BOD ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ และเจตาเลนไนโตรเจน ให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม

สุรัชย์ (2553) ทำการศึกษาการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยโอโซน ซึ่งตัวแปรตามที่น่าสนใจได้แก่ ความเข้มข้น BOD₅ COD TOC และ FT-IR พบว่า สีของน้ำตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาทีแรกที่เติมโอโซน คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.91% และลดลง 100% หลังการบำบัด 60 นาที ในขณะที่ COD และ BOD ถูกกำจัดได้เพียง 18.62 และ 5.06% ตามลำดับ และ TOC มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลดลงเพียง 3.46% แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยโอโซนเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ที่พบว่ากลุ่มคาบอนิล (C=O) มีปริมาณลดลง Hydroxyl group ถูกกำจัดไปในขณะที่พันธะ C-H มีการเลื่อนตำแหน่งยอดไปจากจุดเดิมหลังเติมโอโซน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระบวนการโอโซนเนชัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จรรยา และคณะ, (2554) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อนำน้ำยาโบรอนกลับมาใช้ใหม่ พบว่ากระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกำจัดได้ 96% และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการกำจัดสีด้วยวิธีดังกล่าวไม่ได้ทำให้ปริมาณสารโบรอนหายไป แต่จะทำให้มีตะกอนเกิดขึ้นหลังการบำบัด

ปวีณา และคณะ (2556) ศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ พบว่าวิธีการนี้สามารถกำจัดความขุ่น สี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำยาโบรอนได้ดีที่สุดที่ pH 8 แต่น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณกรดบอริกลดลงเมื่อค่า pH เริ่มต้นในสารละลายสูงขึ้น

พิชญญาและคณะ, (2556) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยใช้โคแอกกูแลนต์ 3 ชนิด คือ สารส้ม โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และ เพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์และค่า pH ของน้ำยาโบรอน ผลการทดลองพบว่า โคแอกกูแลนต์ ทั้ง 3 ชนิด สามารถกำจัดความขุ่น สี และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำยาโบรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Lin and Lai (2000) ทำการศึกษา จลพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียจากสิ่งทอ พบว่า เมื่อใช้อัตราการไหลของโอโซนที่ 4 L/min บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณ COD เริ่มต้น เท่ากับ 220 mg/L นาน 60 นาที สามารถกำจัด COD ได้สูงถึง 85.1% แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกำจัด COD ในน้ำเสียที่มี COD เริ่มต้นเท่ากับ 1740 mg/L จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลงคือ มีค่า 47.4%

Chen. et al. (2009) ศึกษาการใช้ Ozone ในการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้สีย้อมรีแอคทีฟเกรดการค้า 2 สีคือ Reactive Blue 19 และ Reactive Orange 13 ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการและถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทดลองมีขนาด 14 ลิตร พารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ pH ปริมาณโอโซน และระยะเวลาการบำบัด ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มสีของน้ำเสียลดลงจาก 2000 ADMI เหลือเพียง 200 ADMI หลังจากเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ที่อัตราการป้อนโอโซน 2.66 g/hr และค่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Blue 19 คือ 3 และค่า pH ที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Orange 13 คือ 10 โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ pH ต่ำและสูงในกระบวนการเติมโอโซนนี้เกิดจากโมเลกุลโอโซนที่เป็นตัว Oxidizing และ Hydroxyl radicals ตามลำดับ

Herath. et al. (2011) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดสีและปริมาณฟีนอลิก (phenolic compounds) ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้กระบวนการเติมโอโซนเพียงอย่างเดียวและใช้โอโซนร่วมกับกระบวนการอื่นซึ่งได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการกรองด้วยเมมเบรน ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ศึกษาคือ 225 mL ระยะเวลาการเติมโอโซน 3 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 0.2 g/m³ (76 mg/hr) โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ในการทดลองเมื่อใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวบำบัดน้ำเสียที่มี pH เริ่มต้น เท่ากับ 3, 5, 7 และ 10 พบว่าที่ pH 5 สามารถกำจัดสีได้ดีที่สุด ซึ่งกำจัดได้ประมาณ 50 % ประสิทธิภาพการกำจัดรองลงมาคือ pH 3, pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ ในส่วนของการกำจัดฟีนอลิก พบว่า ที่ pH 3 สามารถกำจัดฟีนอลิกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีที่สุดซึ่งกำจัดได้ประมาณ 70% ประสิทธิภาพการกำจัดรองลงมาคือ pH 5, pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ และเมื่อทำการศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับกระบวนการอื่นเพื่อบำบัดสีและปริมาณฟีนอลิกพบว่า ทั้งสามวิธีสามารถบำบัดสีและปริมาณฟีนอลิกได้ดีที่สุดในช่วง pH ของน้ำเสียเป็นกรด

Wu. et al. (2012) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมไม้ไผ่ด้วยโอโซน ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณโอโซนและปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้น ในการทดลองเมื่อทำการหาปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีในน้ำเสีย พบว่า สามารถกำจัดสีได้ 84, 95 และ 96 % เมื่อใช้ปริมาณโอโซนในการบำบัด 1.35, 3.15 และ 4.72 g/hr ที่ 25 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณโอโซน 3.15 และ 4.72 g/hr ให้ ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกปริมาณโอโซน 3.15 g/hr สำหรับทำการทดลองต่อไป และที่ปริมาณโอโซน 3.15 g/hr สามารถกำจัด COD และ TOC ได้ 56% 40% ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นในน้ำเสีย โดยใช้ปริมาณโอโซนในการบำบัด 3.15 g/hr และบำบัดเป็นเวลา 25 นาที ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัด COD และสี ได้สูงถึง 60 และ 95 % ตามลำดับ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นในน้ำเสียมีค่าต่ำกว่า 835 mg/L แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น COD เริ่มต้นถึง 1,020 mg/L ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดทั้งสองมีค่าลดลง (57% และ 91% ตามลำดับ) เมื่อศึกษาเกี่ยวกับชนิดสารอินทรีย์ในน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดด้วย GC-MS พบว่า สารอินทรีย์บางชนิดถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ และบางชนิดถูกกำจัดได้ไม่สมบูรณ์และมีโครงสร้างที่เปลี่ยนรูปไปเป็นสารตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) บริษัท ASIA-TECH รุ่น OZ-735
2. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกใส โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร
3. หัวกระจายอากาศ
4. พีเอชมิเตอร์ รุ่น 827 บริษัท Metrohm ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
5. เตาให้ความร้อน (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
6. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น T60 บริษัท TG Instrument ประเทศอังกฤษ
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
9. เครื่องแก้วต่างๆ

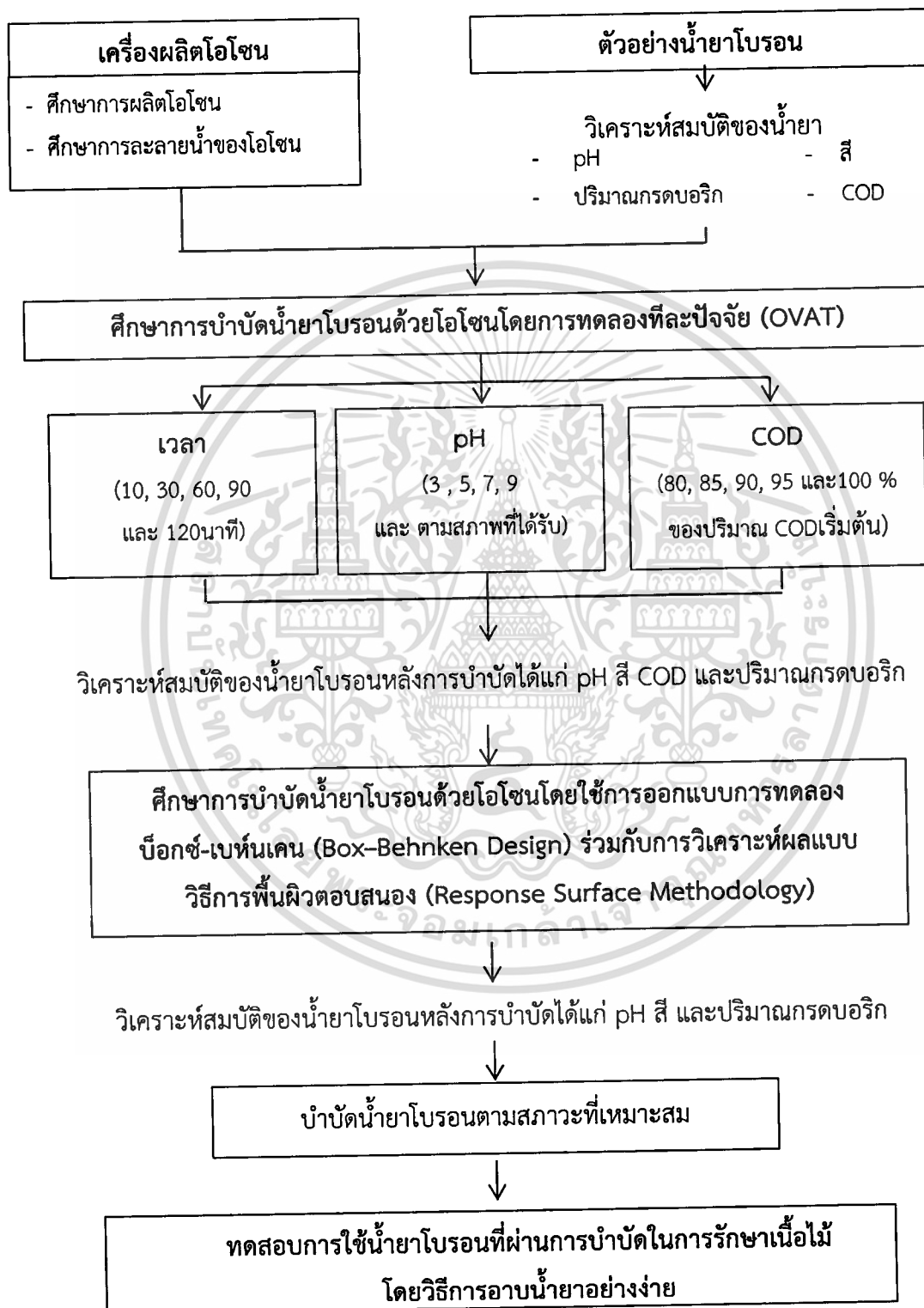
3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
2. โซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น ($\text{conc.H}_2\text{SO}_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Chemical ประเทศออสเตรเลีย
6. ดีแมนิทอล ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
8. เคอร์คูมิน ($\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_6$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโอโซนชั้นมีขั้นตอนดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลอง

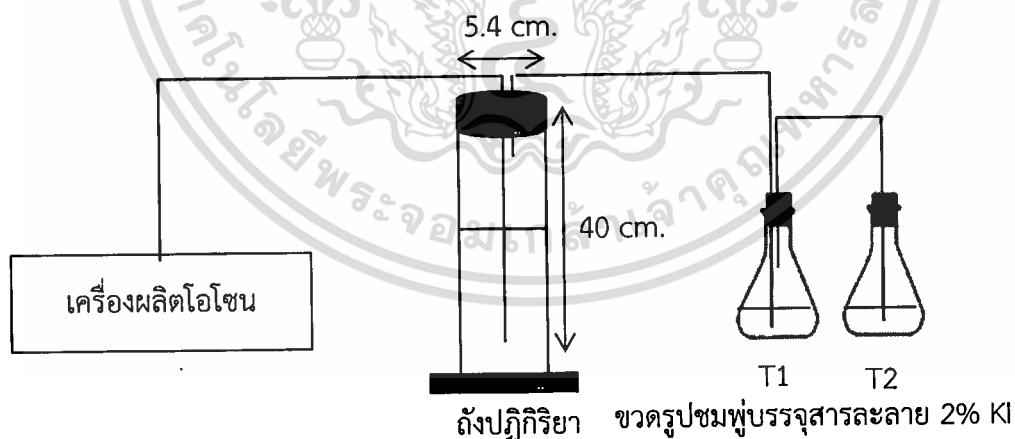
น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลองได้รับจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง นำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ศึกษา

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	pH meter
สี (color)	ADMI ตามวิธี Standard Methods 2120E (APHA, 1992 ; เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)
ปริมาณกรดบอริก (H_3BO_3)	Titration (ศุภชัย, 2543)
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Titrimetric Method ตามวิธี Standard Methods 5220 C (APHA, 1992)

3.2.2 การเดินระบบโอโซนขึ้น

การเดินระบบในงานวิจัยนี้เป็นแบบครั้ง (Batch test) ซึ่งแผนผังการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีอัตราการไหลของโอโซนก่อน - หลังเข้าถังปฏิกิริยาเท่ากับ 3.37 ± 0.13 L/min และ 1.12 ± 0.03 L/min ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเท่ากับ $30^\circ C$ และ 1,006 hPa ตามลำดับ (วัดอัตราการไหลของโอโซนโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ)



รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซไอโซน

1. จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.2
2. บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2% ลงในถังปฏิกิริยาและขวดดักจับก๊าซไอโซน (T1,T2) ปริมาตร 500 mL และ 200 mL ตามลำดับ
3. เปิดเครื่องผลิตไอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในถังปฏิกิริยาและขวด T1,T2 ไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้ (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ และการคำนวณปริมาณไอโซนในหัวข้อ ก-1 ภาคผนวก ก.)
5. ทำการทดลองข้อ 2-4 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเดินระบบเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองข้อ 2-5 อีก 2 ครั้ง

2) การศึกษาอัตราการละลายน้ำของไอโซน

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. เติมน้ำประปาลงในถังปฏิกิริยา 500 mL
3. เติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับไอโซน (T1,T2) ขวดละ 200 mL
4. เปิดเครื่องผลิตไอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในถังปฏิกิริยาและขวด T1,T2 ไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซน (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ และการคำนวณปริมาณไอโซนในหัวข้อ ก-1 ภาคผนวก ก.)
6. ทำการทดลองข้อ 2-5 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเดินระบบเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
7. ทำการทดลองข้อ 2-6 อีก 2 ครั้ง
8. คำนวณหาการละลายน้ำของไอโซนโดยนำปริมาณไอโซนที่ได้หักลบออกจากปริมาณไอโซนที่ผลิตได้จากการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซไอโซน

3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยไอโซนแบบที่ละลาย

1) ศึกษาผลของเวลาต่อการบำบัด

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. เติมน้ำยาโบรอนที่มีค่า pH และปริมาณ COD ตามสภาพที่ได้รับลงในถังปฏิกิริยาปริมาตร 500 mL และเติมสารละลาย 2% KI ลงในขวด ดักจับไอโซน (T1,T2) ขวดละ 200 mL
3. เปิดเครื่องผลิตไอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำยาโบรอนเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด ได้แก่ pH, color, COD และ H_3BO_3 พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณไอโซนที่ละลายในน้ำยาโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเวลาในการบำบัดเป็น 30, 60, 90 และ 120 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำ 2-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

2) ศึกษาผลของพีเอชเริ่มของน้ำยาโบรอนต่อการบำบัด

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. ปรับ pH ของน้ำยาโบรอนในข้อ 3.2.1 ให้มีค่า pH เท่ากับ 3 โดยใช้กรดซัลฟิวริก จากนั้นเทลงในถังปฏิกิริยา ปริมาตร 500 mL
3. เติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับโอโซน T1 และ T2 ขวดละ 200 mL
4. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำยาโบรอนเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1) เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดได้แก่ pH, color, COD และ H_3BO_3
5. ทำการทดลองซ้ำ 2-4 ซ้ำแต่เปลี่ยนค่า pH ของน้ำยาเป็น 5, 7, 9 และ ตามสภาพที่ได้รับ (as-recieve)
6. ทำการทดลองซ้ำ 2-5 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

3) ศึกษาผลของปริมาณ COD ของน้ำยาโบรอนต่อการบำบัด

1. จัดเตรียมระบบดังรูปที่ 3.2
2. เจือจางน้ำยาโบรอนให้มีค่า COD 80% ของปริมาณ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนในข้อ 3.2.1 แล้ววิเคราะห์ปริมาณ COD หลังจากการเจือจาง
3. ปรับค่า pH ของน้ำยาโบรอนที่เจือจางปริมาณ COD แล้วให้มีค่าเท่ากับ pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2) จากนั้นเทลงในถังปฏิกิริยา ปริมาตร 500 mL
4. เติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับโอโซน T1 และ T2 ขวดละ 200 mL
5. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำยาโบรอนเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1) เมื่อครบตามกำหนดเวลาทำการวิเคราะห์น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด ได้แก่ pH, color, COD และ H_3BO_3
6. ทำการทดลองซ้ำ 2-5 ซ้ำแต่เปลี่ยนการเจือจางน้ำยาโบรอนให้มีค่า COD เป็น 85, 90, 95 และ 100 % ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำ 2-6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.2.4 ศึกษาการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยโอโซนโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

1) รูปแบบการทดลอง Box-Behnken Design

รูปแบบการทดลอง Box-Behnken Design ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16.0 (รายละเอียดวิธีการใช้ดังแสดงในภาคผนวก จ) โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ เวลาที่ใช้ใน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการศึกษา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมโอโซน (time) ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอน (pH) และซีโอดีของน้ำยาโบรอน (COD) และในแต่ละตัวแปรจะทำการศึกษา 3 ระดับคือ -1, 0, 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ได้จาก Box-Behnken Design เป็นดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับค่าของตัวแปรของรูปแบบการทดลอง Box-Behnken Design

ตัวแปร	-1	0	1
เวลาที่ใช้ในการบำบัด (นาที)	10	60	120
ค่า pH ของน้ำยาโบรอน	3	5	8
ปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลองในรูป COD	2284 ± 47.7	2669 ± 47.7	2752 ± 47.7

ตารางที่ 3.3 สภาวะการทดลองที่ได้จากรูปแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design โดยใช้โปรแกรม MINITAB

ลำดับที่	เวลาที่ใช้ในการบำบัด (นาที)		ค่า pH ของน้ำยาโบรอน		COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอน (mg/L)	
	coded	Uncoded	coded	Uncoded	coded	Uncoded
1	-1	10	0	5	1	2752
2	0	60	0	5	0	2669
3	0	60	0	5	0	2669
4	1	120	0	5	1	2752
5	0	60	-1	3	1	2752
6	-1	10	1	8	0	2669
7	1	120	0	5	-1	2284
8	0	60	1	8	-1	2284
9	-1	10	-1	3	0	2669
10	0	60	0	5	0	2669
11	-1	120	-1	3	0	2669
12	0	60	-1	3	-1	2284
13	-1	120	1	8	0	2669
14	0	60	1	8	1	2752
15	-1	10	0	5	-1	2284

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ

1. ทำการบำบัดน้ำยาโบรอนตามลำดับการทดลองที่แสดงในตาราง 3.3 ทั้ง 15 การทดลอง โดยใช้ปริมาณน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการบำบัดครั้งละ 500 มิลลิลิตร และนำน้ำยาโบรอนทั้งก่อนและหลังการบำบัดมาวิเคราะห์ pH, color และ H_3BO_3

2. ทำชุดควบคุมตามสภาวะที่ใช้ในการทดลองในตารางที่ 3.3 แต่ไม่ต้องบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้น แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติ พีเอช สี และความเข้มข้นของกรดบอริก

3. บันทึกผลการทดลองและคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละการทดลอง ดังสมการ 3.1

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{\text{ค่าสีก่อนโอโซนชั้น} - \text{ค่าสีหลังโอโซนชั้น}}{\text{ค่าสีก่อนโอโซนชั้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

4. นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณไปวิเคราะห์ทางสถิติพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ต่อการบำบัดด้วยวิธี RSM (ในโหมด Uncoded units รายละเอียดดังภาคผนวก จ)

5. บำบัดน้ำยาโบรอนตามสภาวะที่เหมาะสมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.2.5 การทดสอบการนำน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดมาใช้ในการรักษาเนื้อไม้โดยวิธีการอาบน้ำยาอย่างง่าย

1. บำบัดน้ำยาโบรอนตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลอง

2. ตัดชิ้นไม้อย่างพาราเพื่อนำมาเป็นชิ้นไม้ทดสอบให้มีขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และมีความหนา 2 เซนติเมตร

3. เตรียมน้ำยาโบรอนขึ้นมาใหม่ในอัตราส่วนผสมของกรดบอริก : สารบอแรกซ์ ที่ 1:1 โดยให้มีปริมาณกรดบอริกเท่ากับน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด

4. ดำเนินการรักษาเนื้อไม้โดยนำชิ้นไม้ทดสอบมาแช่ในน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากโรงงาน โดยมีปริมาตรน้ำยาโบรอนในการรักษาเนื้อไม้ 3 ลิตร เป็นเวลา 3 วัน

5. เปรียบเทียบสีของเนื้อไม้หลังจากการแช่ระหว่างไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ ไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด และไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ไม่ได้บำบัด

6. ตรวจสอบการซึมซับของน้ำยาในเนื้อไม้โดยใช้น้ำยาทดสอบ Curcumin Reagent (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อ ก-5 ภาคผนวก ก) แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองของไม้อย่างพาราที่ไม่ผ่านการแช่น้ำยา ไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ ไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด และไม้อย่างพาราที่แช่ในน้ำยาที่ผ่านการใช้งานจากโรงงาน

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ มีอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดและหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากโรงงานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูปด้วยกระบวนการไอโซเนซัน รวมทั้งตรวจสอบความสามารถในการรักษาเนื้อไม้อย่างง่ายของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดแล้ว ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอน

น้ำยาโบรอนที่ใช้ในการทดลองได้รับจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปแห่งหนึ่งในจังหวัดระยอง เป็นน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพาราซ้ำหลายๆครั้ง ส่งผลให้น้ำยาโบรอนมีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำดังรูปที่ 4.1 ซึ่งลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่คล้ำขึ้นนี้สันนิษฐานว่าเกิดจากการปนเปื้อนของสารจำพวกโพลีฟีนอล แทนนิน เพคติน และลิกนิน ที่มาจากเนื้อไม้ระหว่างกระบวนการอัดน้ำยา (จรรยา และคณะ, 2554)



รูปที่ 4.1 ลักษณะของน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษา

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษา ผลที่วิเคราะห์ได้แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.95 มีความเข้มข้นสี 1,013 ADMI มีปริมาณของกรดบอริก 9.68 กรัมต่อลิตร มีความต้องการออกซิเจนทางเคมี 2,822 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

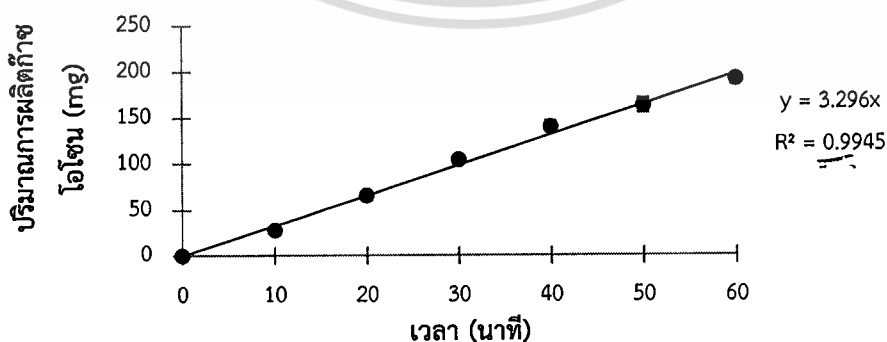
ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพารา

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	
	การศึกษารุ่นนี้	พินญาและคณะ (2556)
pH	7.95 ± 0.01	8.14 ± 0.01
สี (ADMI)	1,013 ± 6.08	813 ± 11
ปริมาณของกรดบอริก (g/L)	9.68 ± 0.03	9.78 ± 0.16
COD (mg/L)	2,822 ± 40.5	ไม่มีการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของน้ำยาโบรอนในการศึกษารุ่นนี้กับการศึกษาก่อนหน้าของพินญาและคณะ (2556) ซึ่งเป็นตัวอย่างของน้ำยาโบรอนที่ได้รับจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปเดียวกันพบว่า มีค่า pH และ ปริมาณของกรดบอริกใกล้เคียงกันแต่สีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษารุ่นนี้มีความเข้มสีสูงกว่า โดยอาจเกิดจากจำนวนรอบของการนำน้ำยาโบรอนไปใช้ซ้ำในการอัดน้ำยาไม้มากกว่าจึงส่งผลให้น้ำยาโบรอนมีสีที่คล้ำขึ้นเพิ่มตามจำนวนรอบของการอัดน้ำยา

4.2 อัตราการผลิตโอโซน

จากการศึกษาอัตราการผลิตโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนของ ASIA-TECH รุ่น OZ-735 เพื่อหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในเวลาต่างๆ โดยการเดินระบบให้โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิต (มีอัตราการไหลของโอโซนก่อน - หลังเข้าถึงปฏิกิริยาเท่ากับ 3.37 ± 0.13 L/min และ 1.12 ± 0.03 L/min ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30°C และความดันบรรยากาศ 1,006 hPa) เข้าสู่ถังปฏิกิริยาและขวดดักจับโอโซนจำนวนสองขวด (T1,T2) ซึ่งภายในถังปฏิกิริยาและขวด T1,T2 บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดต์เข้มข้น 2% (KI 2%) ปริมาตร 500 และ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีพบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้แต่ละช่วงเวลาเป็นไปดังรูปที่ 4.2



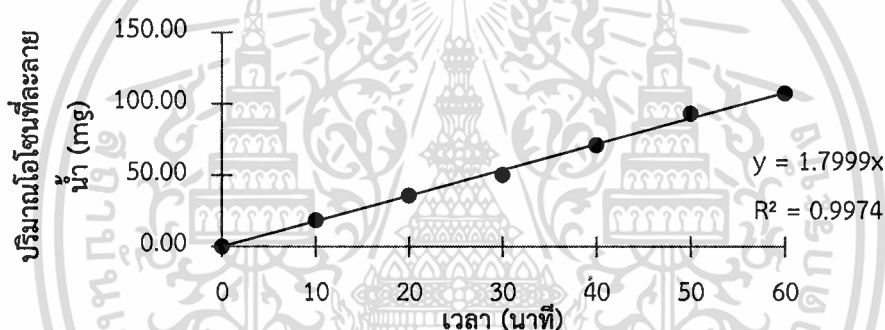
รูปที่ 4.2 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 พบว่าภายในระยะเวลา 60 นาที เวลาที่ใช้ในการเดินระบบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงกับปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิต ทำให้สามารถหาอัตราการผลิตจากความชันของเส้นตรงได้โดยมีค่าเท่ากับ 198 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

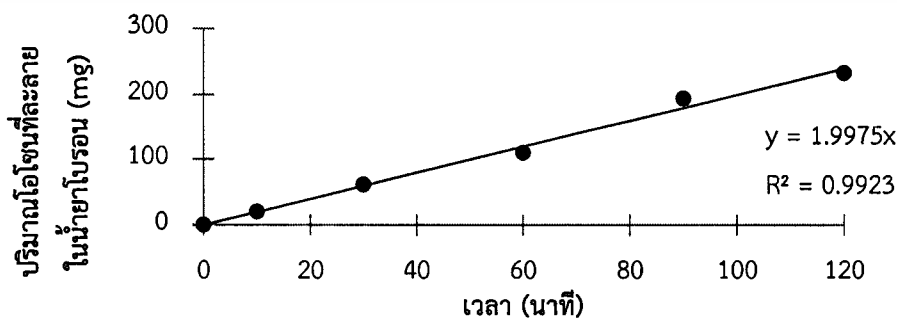
4.3 อัตราการละลายน้ำของโอโซน

การศึกษาอัตราการละลายน้ำของโอโซนในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตและปริมาณโอโซนที่ไม่ละลายน้ำซึ่งถูกดักจับด้วยสายละลาย KI 2% ในการทดลองทำการเดินระบบให้โอโซนที่ได้จากเครื่องผลิตเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่บรรจุน้ำประปาและน้ำยาโบรอนที่ใช้ในการศึกษาปริมาตร 500 มิลลิลิตรพร้อมดักจับโอโซนที่เหลือจากการละลายน้ำด้วยขวด T1,T2 ซึ่งภายในบรรจุสารละลาย KI 2% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำปริมาณโอโซนที่ได้จากขวดดักก๊าซหักลอบออกจากปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ทำให้ทราบค่าของปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำ อัตราการละลายในน้ำประปาและน้ำยาโบรอนของโอโซนแสดงได้ดังรูป 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าภายในเวลา 60 นาที ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเดินระบบกับปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง โดยอัตราการละลายของโอโซนในน้ำประปามีค่าเท่ากับ 216 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อลิตร คิดเป็น 54.5 % ของการละลายน้ำของโอโซนเมื่อเติมโอโซน 198 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงลงในระบบ



รูปที่ 4.4 ปริมาณโอโซนที่ละลายในน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่เวลาต่างๆ

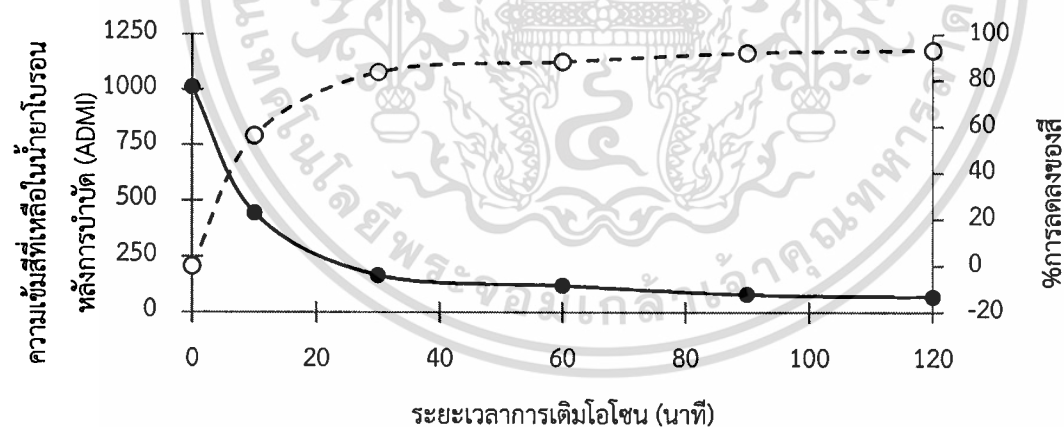
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนผู้ใดเห็นาเบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าภายในระยะเวลา 120 นาที เวลาที่ใช้ในการเดินระบบมีความสัมพันธ์แบบเป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรงกับปริมาณโอโซนที่ละลายในน้ำยาโบรอน โดยอัตราการละลายในน้ำยาโบรอนของโอโซนมีค่าเท่ากับ 240 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อลิตร คิดเป็น 60.5% ของการละลายน้ำของโอโซนเมื่อเติมโอโซน 198 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบการละลายของโอโซนในน้ำประปา กับน้ำยาโบรอนโดยวิธี One-way ANOVA และเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1) พบว่าการละลายของโอโซนในน้ำประปากับน้ำยาโบรอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยโอโซนจะมีอัตราการละลายในน้ำยาโบรอนมากกว่าในน้ำประปา ทั้งนี้สันนิษฐานว่าในน้ำยาโบรอนมีสารอินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนและส่งผลให้โอโซนสามารถละลายในน้ำยาโบรอนได้มากกว่าน้ำประปา

4.4 ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยการทดลองแบบทีละปัจจัย (One Variable At A Time)

4.4.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนในการบำบัด

เมื่อนำน้ำยาโบรอน ปริมาตร 500 mL ซึ่งมีค่าพีเอชและปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD ตามสภาพที่ได้รับมาบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยแปรค่าระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.5 ถึงรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเติมโอโซนกับความเข้มสีของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่เวลาต่างๆ

—●— ความเข้มสี (ADMI) -○- %การลดลงของสี

จากรูปที่ 4.5 พบว่าแนวโน้มของค่าความเข้มสีมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซน โดยที่ระยะเวลา 120 นาที มีความสามารถในการบำบัดสีได้สูงที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดสีเริ่มต้นจาก $1,013 \pm 6.08$ ADMI เหลือ 69 ± 3.41 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสี $93.14 \pm 0.34\%$ ส่วนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 10, 30, 60 และ 90 นาที สามารถบำบัดสีของน้ำยาโบรอนให้เหลือเท่ากับ 446 ± 22.65 , 167 ± 9.34 , 121 ± 22.03 และ 81 ± 8.00 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 56 ± 2.24 , 83.49 ± 0.92 , 88.08 ± 2.17 และ $92.03 \pm 0.79\%$ ตามลำดับ ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดแสดงในภาพที่ 4.6 การที่ความสามารถในการบำบัดสีสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซน เนื่องจากว่าการเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจะส่งผลให้มีปริมาณโอโซนเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จากนั้นโอโซนจะทำการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี เช่น ลิกนิน แทนนิน ที่มาจากเนื้อไม้ โดยจะเข้าไปออกซิไดซ์โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ที่สามารถดูดซับแสงที่มองเห็นได้ เมื่อพันธะคู่นั้นๆถูกทำลายส่งผลให้เกิดโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและสูญเสียความสามารถในการดูดซับแสงที่มองเห็น สีจึงหายไป โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของวราภรณ์และคณะ (2550) งานวิจัยเจตนิพิฐ และคณะ (2552) และงานวิจัยของสุรัชย์ (2553) ที่พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดจะส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้น

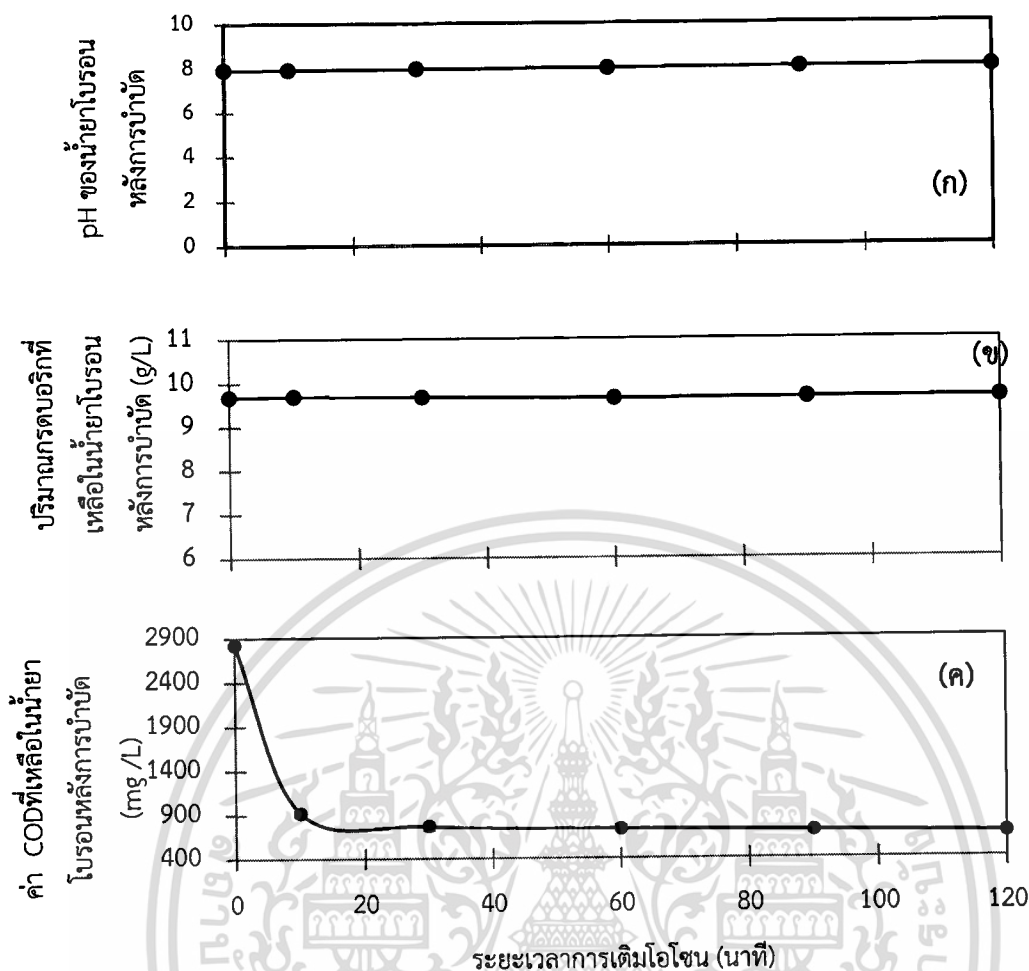
จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่า ที่เวลา 90 นาทีให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่เวลา 120 นาที (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.1.1) ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ระยะเวลาการเติมโอโซนครั้งที่ 90 นาที สำหรับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มของน้ำยาโบรอนและการศึกษาผลของปริมาณ COD ของน้ำยาโบรอนที่ส่งผลต่อการบำบัดในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.6 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่เวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ ได้แก่ พีเอช ปริมาณกรดบอริก และ COD ของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดด้วยโอโซน แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยจากรูปที่ 4.7 (ก) พบว่าค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนทั้งก่อนและหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.95 ± 0.01 และค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนหลังบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.99 ± 0.04 ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมโอโซนไม่ทำให้ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนเกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่มีค่าพีเอชและ COD ตามสภาพที่ได้รับหลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชันที่เวลาต่างๆ

กรดบอริกมีความจำเป็นต่อการรักษาเนื้อไม้สำหรับป้องกันไม่ให้มอดและปลวกกัดทำลายเนื้อไม้ ระดับปริมาณกรดบอริกในน้ำยาโบรอนจึงเป็นตัวชี้วัดที่บอกความเหมาะสมของการใช้กระบวนการโอโซนเนชันบำบัดน้ำยาโบรอน เมื่อพิจารณารูป 4.7 (ข) จะพบว่าปริมาณกรดบอริกทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค-2.1.2) โดยน้ำยาโบรอนก่อนบำบัดและหลังการบำบัดที่ระยะเวลา 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที มีปริมาณ กรดบอริกเฉลี่ยเท่ากับ 9.68 ± 0.03 , 9.69 ± 0.04 , 9.67 ± 0.05 , 9.64 ± 0.02 , 9.65 ± 0.01 และ 9.66 ± 0.06 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

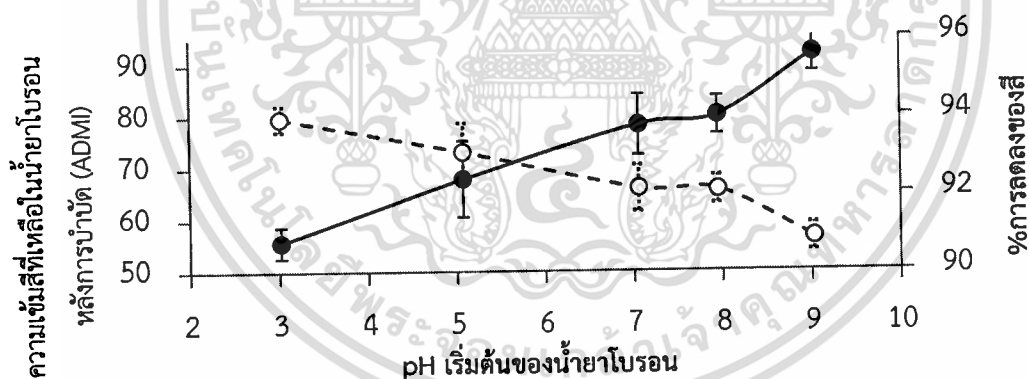
ในส่วนของปริมาณ COD ของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด (รูปที่ 4.7 ค) พบว่า COD ของน้ำยาโบรอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซน การลดลงของ COD นี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นมีการลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งระยะเวลาการเติมโอโซนผ่านไป 120 นาที สามารถกำจัด COD จาก $2,822.5 \pm 40.5$ mg/L เหลือ 682.5 ± 35.0 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด $75.81 \pm 1.2\%$ ทั้งนี้การลดลงของ COD นั้นสันนิษฐานว่า สารอินทรีย์ในน้ำยาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบรอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยพันธะ C=C ถูกออกซิไดซ์โดยโอโซน ทำให้สารอินทรีย์เหล่านั้นถูกกำจัดหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารตัวใหม่ที่ยากต่อการออกซิไดซ์ ทำให้ในเวลาต่อมาปริมาณ COD ลดลงได้ช้าหรือไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับกับงานวิจัยของธารกมล (2543) และงานวิจัยของ Wu. *et al.* (2012) ที่พบว่า การเพิ่มระยะเวลาการบำบัดจะส่งผลให้ COD มีค่าลดลง

ถึงแม้ว่าผลการบำบัดสีของระยะเวลาการเติมโอโซนที่ 90 และ 120 นาที จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การสอบถามจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปต้องการบำบัดน้ำยาโบรอนให้มีลักษณะที่ใส จึงได้เลือกใช้ระยะเวลาที่ 120 นาที สำหรับการกำหนดขอบเขตในระดับสูง และเวลาที่ 10 และ 60 นาที สำหรับการกำหนดขอบเขตในระดับต่ำ และ กลาง ตามลำดับ ในโหมด Uncoded (ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบที่ไม่มีรหัสและเป็นหน่วยของการวัดที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง) เพื่อใช้หาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

4.4.2 ผลของพีเอชต่อการบำบัด

เมื่อนำน้ำยาโบรอน ปริมาตร 500 mL ซึ่งมี COD ตามสภาพที่ได้รับ ($2,822 \pm 40.5$ mg/L) มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3, 5, 7, 9 และพีเอชตามสภาพที่ได้รับ (7.95 ± 0.01) ไปบำบัดโดยมีระยะเวลาการเติมโอโซนคงที่ที่ 90 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถึง 4.10



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH เริ่มต้นกับความเข้มสีของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด

—●— ความเข้มสี (ADMI) -○- %การลดลงของสี

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนอยู่ในช่วงกรด โดยที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.02 ± 0.02 สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56 ± 3.02 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด $93.95 \pm 0.33\%$ ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 3.02 , 5.07, 7.06, 7.95 และ 9.03 ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

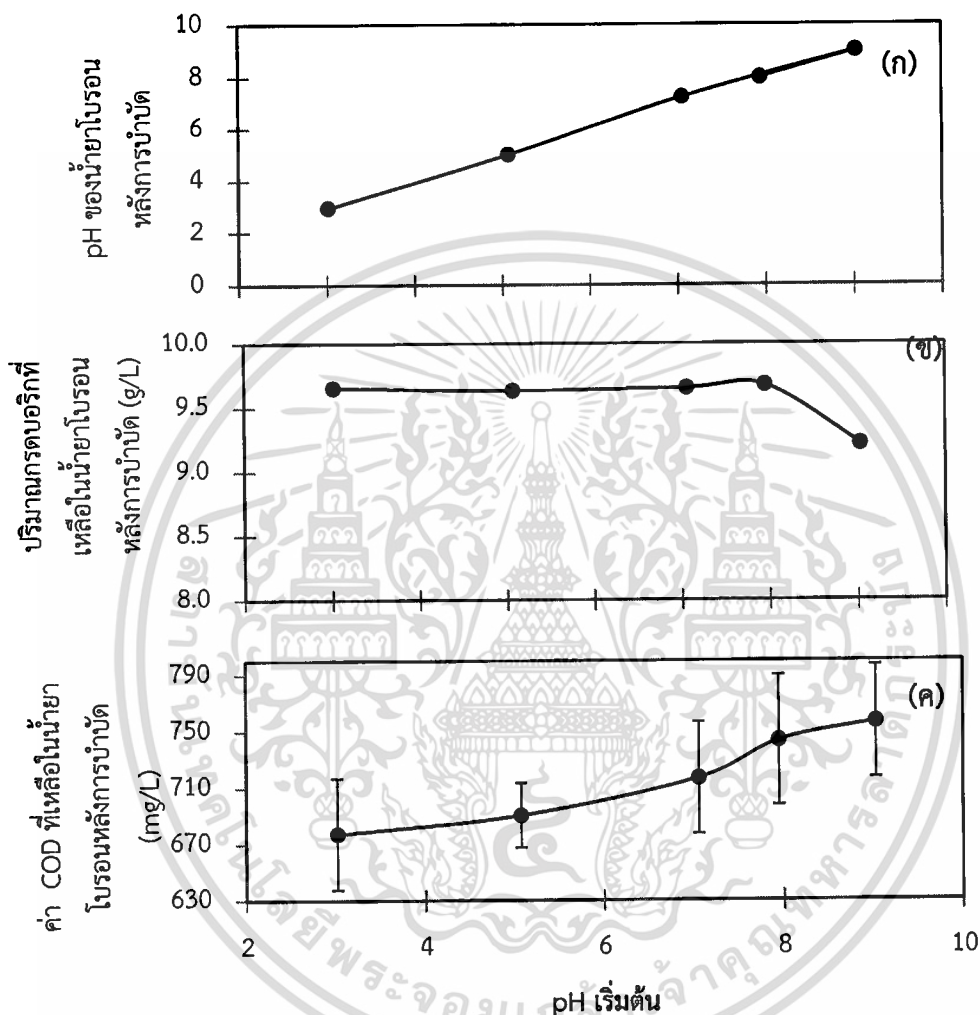
การที่ประสิทธิภาพการบำบัดสีเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชเป็นกรดนั้นเกิดจากปฏิกิริยาของไอออนกับสารอินทรีย์ที่เป็นแบบ direct attack โดยโมเลกุลไอออนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ในสารอินทรีย์โดยตรง ทำให้พันธะของโมเลกุลแตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้สีในน้ำยาโบรอนลดลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของนวพรรณ (2545) และงานวิจัยของ Herath *et al.* (2011) ที่พบว่าการกำจัดสีด้วยไอออนเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกรด ผลทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA และเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 3.02 ± 0.02 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าพีเอชเริ่มต้นค่าอื่นๆ (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.2.1) จากการศึกษาข้างต้น ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 3.02 ± 0.02 ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้เป็นพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่คงที่ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนโดยใช้การทดลองแบบที่ละปัจจัยในการทดลองต่อไป

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) พบว่าค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนก่อนและหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.02 ± 0.02 , 5.07 ± 0.02 , 7.06 ± 0.04 , 7.94 ± 0.01 และ 9.03 ± 0.03 และ ค่าพีเอชของน้ำยาโบรอนหลังบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.97 ± 0.08 , 5.01 ± 0.11 , 7.24 ± 0.12 , 7.99 ± 0.01 และ 9.01 ± 0.08 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ไอออนไม่ทำให้พีเอชในน้ำยาโบรอนเปลี่ยนแปลง

จากผลของปริมาณกรดบอริก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) พบว่า น้ำยาโบรอนที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 7.94 ± 0.01 เป็น 9.03 ± 0.03 จะส่งผลให้ปริมาณกรดบอริกหลังการบำบัดมีค่าลดลง ทำให้มีปริมาณกรดบอริกที่ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับปริมาณกรดบอริกที่ค่าพีเอชเริ่มต้นค่าอื่นๆ (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.2.2) ซึ่งอาจเกิดจากค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 9.03 ± 0.03 มีค่าใกล้เคียงกับค่า pK_{a1} ของกรดบอริก ($pK_{a1} = 9.2$) ส่งผลให้กรดบอริกบางส่วนมีการเปลี่ยนรูปฟอร์มไปทำให้ปริมาณกรดบอริกมีปริมาณลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณ COD หลังการบำบัด (รูป 4.10 ค) พบว่าเมื่อ pH อยู่ในช่วงที่เป็นกรด จะมีปริมาณ COD ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ ค่า pH ในช่วงเบส ทั้งนี้มีความสอดคล้องกับการลดลงของความเข้มข้น (pH 3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดมีค่าต่ำที่สุด) ซึ่งในผลการทดลองที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.02 ± 0.02 มีค่า COD ลดลงมากที่สุด ซึ่งสามารถลดค่า COD จาก 2593 ± 41.01 เหลือ 677.3 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด $73.88 \pm 1.54 \%$ ทั้งนี้การที่ pH เริ่มต้นอยู่ในช่วงกรดส่งผลให้มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COD หลังการบำบัดมีค่าต่ำ สันนิษฐานว่าการปรับ pH ของน้ำยาโบรอนให้เป็นกรด อาจส่งผลต่อโครงสร้างของสารอินทรีย์ในน้ำยาโบรอน โดยอาจเกิดเป็นรูปร่างที่ง่ายต่อการออกซิไดซ์โดยโมเลกุลของโอโซนในปฏิกิริยา Direct Reaction ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนุชนากัญจน์ (2550) และงานวิจัยของ Herath. *et al.* (2011)



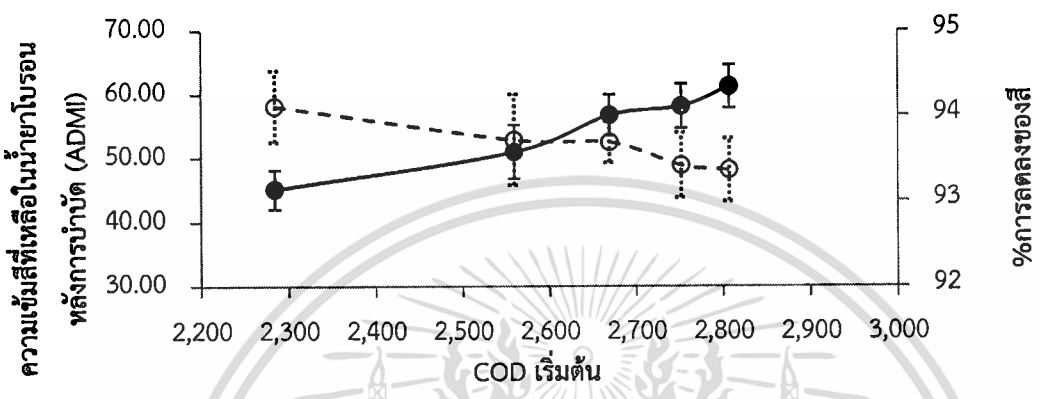
รูปที่ 4.10 สมบัติของน้ำยาโบรอนที่มีปริมาณ COD ตามสภาพที่ได้รับ หลังจากผ่านการเติมโอโซนที่ 90 นาทีและค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดที่มีผลต่อการบำบัดสีได้เลือกใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3, 5 และ 8 เพื่อใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตในระดับต่ำ กลาง สูง ตามลำดับในโหมด Uncoded สำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับ RSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของ COD ต่อการบำบัด

เมื่อนำน้ำยาโบรอน ปริมาตร 500 mL ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.02 ± 0.02 มาปรับให้มีปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD เริ่มต้น เท่ากับ $2,284 \pm 47.7$, $2,504 \pm 47.7$, $2,669 \pm 47.7$, $2,752 \pm 47.7$ และ $2,862 \pm 47.7$ mg/L มาบำบัดในระยะเวลาการเติมโอโซนที่คงที่ 90 นาที ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.13



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง COD เริ่มต้นกับความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด

● ความเข้มข้น (ADMI) - ○ - %การลดลงของซี

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีในน้ำยาโบรอนลดลงเมื่อน้ำยาโบรอนมีปริมาณ COD เริ่มต้นที่สูงขึ้น โดยที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2284 mg/L บำบัดได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถกำจัดซีเริ่มต้นจาก 766 ± 3.68 ADMI ลดลงเหลือ 45 ± 3.04 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 94.11% ลักษณะซีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 ทั้งนี้สันนิษฐานว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีลดลงเมื่อ COD เริ่มต้นมีปริมาณสูงขึ้น เพราะปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นในน้ำยาโบรอนสูงขึ้นแต่ปริมาณโอโซนที่ใช้บำบัดมีค่าคงเดิม ส่งผลให้ปริมาณโอโซนที่เติมลงสู่ระบบไม่เพียงพอต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu. et al. (2012) ที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีจะลดลงเมื่อตัวอย่างมีปริมาณ COD เริ่มต้นที่สูงขึ้น

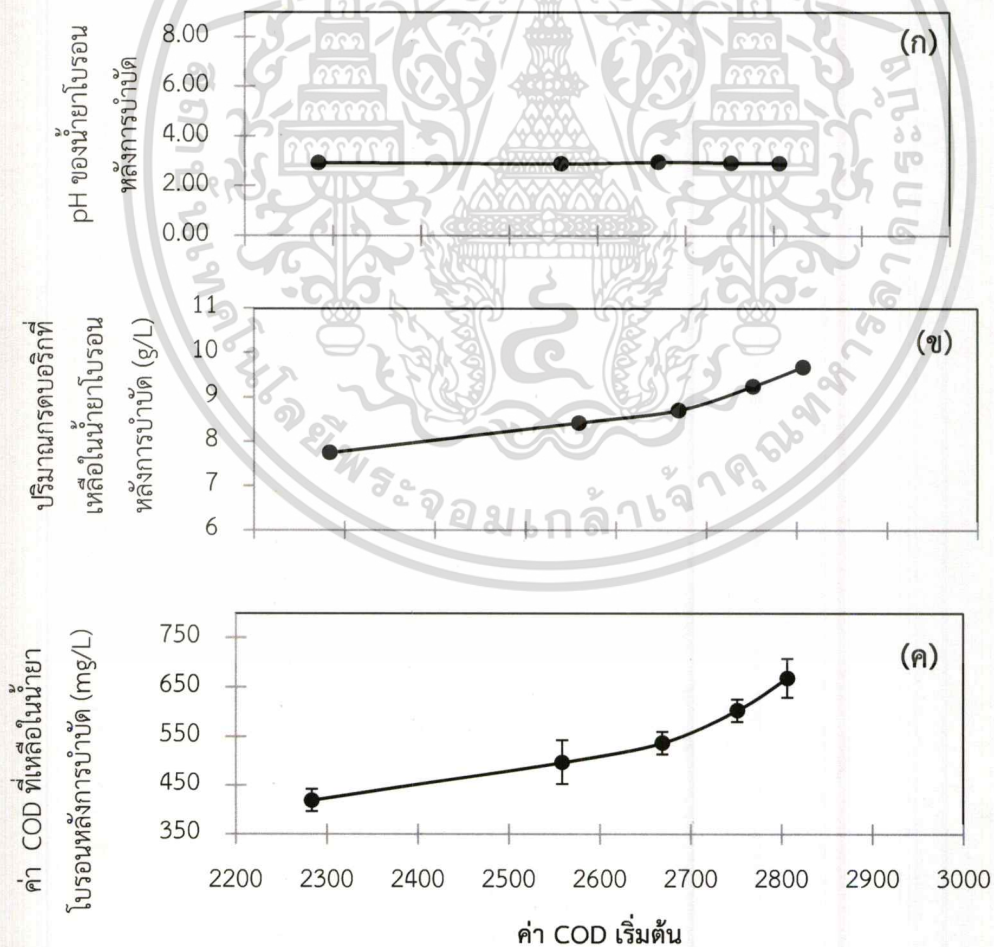
จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA พบว่าการบำบัดน้ำยาโบรอนที่มีค่า COD เริ่มต้นต่างกันจะมีความเข้มข้นหลังจากการบำบัดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่า ค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 2,848 mg/L มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่า COD เริ่มต้นค่าอื่นๆ (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2,284, 2,504, 2,669, 2,752 และ 2,862 mg/L ของครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดซึ่งได้แก่ พีเอช ปริมาณกรดบอริก และ COD ในรูปที่ 4.13 พบว่า พีเอชของน้ำยาโบรอนก่อนและหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.13 ก) โดยน้ำยาโบรอนที่มี COD เริ่มต้นเท่ากับ 2,284, 2,504, 2,669, 2,752 และ 2,862 mg/L มีค่าพีเอชก่อนบำบัด เท่ากับ 3.03 ± 0.05 , 3.02 ± 0.03 , 3.01 ± 0.01 , 3.00 ± 0.02 และ 3.02 ± 0.02 หลังการบำบัดเท่ากับ 2.98 ± 0.06 , 2.93 ± 0.08 , 2.99 ± 0.08 , 2.96 ± 0.07 และ 2.95 ± 0.03 ตามลำดับ แสดงว่าการเติมโอโซนไม่ทำให้พีเอชในน้ำยาโบรอนเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.13 สมบัติของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดด้วยการเติมโอโซน 90 นาที ที่พีเอชคงที่และปริมาณ COD เริ่มต้นต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาปริมาณกรดบอริกหลังการบำบัดพบว่า ปริมาณกรดบอริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ COD เริ่มต้นที่สูงขึ้น (รูปที่ 14.3 ข) เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่าปริมาณ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกกลุ่ม ($p < 0.05$) (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.3.2) ทั้งนี้อาจเกิดจากขั้นตอนในการทดลองที่ต้องการลดปริมาณ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนด้วยการเจือจางค่า COD ส่งผลให้กรดบอริกที่อยู่ในน้ำยาโบรอนถูกเจือจางตามไปด้วยและเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons เพื่อหาความแตกต่างของปริมาณกรดบอริกก่อนบำบัดและหลังการบำบัดที่มีปริมาณ COD เริ่มต้นคงที่ที่ 2,284, 2,504, 2,669, 2,752 และ 2,862 mg/L ตามลำดับ พบว่า ปริมาณกรดบอริกทั้งก่อนและหลังการบำบัดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-2.3.3)

จากรูปที่ 4.13 ค พบว่าปริมาณ COD หลังการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ COD เริ่มต้นสูงขึ้น โดยที่ปริมาณ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 2284 ± 47.7 mg/L สามารถบำบัด COD ได้ดีที่สุด โดยสามารถกำจัด COD 2078 ± 46.7 mg/L เหลือ 419.8 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด $79.8 \pm 1.09\%$ ทั้งนี้สันนิษฐานว่าการที่น้ำยาโบรอนมีปริมาณ COD สูงขึ้น แต่ปริมาณไอโซนที่เติมเข้าระบบมีค่าคงที่จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นหลังการบำบัด ที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่า 2284 ± 47.7 mg/L และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin และ Lai (2000) ที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ COD ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาผลของค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดที่มีผลต่อการบำบัดสีได้เลือกใช้ค่า COD เริ่มต้นเท่ากับ $2,284 \pm 47.7$, $2,669 \pm 47.7$ และ $2,752 \pm 47.7$ mg/L เพื่อใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตในระดับต่ำ กลาง สูง ตามลำดับในโหมด Uncoded สำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

4.5 ผลการศึกษาการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนโดยใช้การออกแบบการทดลอง Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย RSM

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานตามรูปแบบของ Box-Behnken Design ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.3 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดตามลำดับการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RSM โดยโปรแกรม Minitab Version 16.0 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีในน้ำยาโบรอน ผลการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดตามลำดับการทดลองที่ได้จาก Box-Behnken Design

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16.0 มีแบบจำลองที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการโอโซนในชั้นซึ่งมีตัวแปรอิสระ คือ ระยะเวลาการเติมโอโซน (time) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอน (pH) และ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอน อยู่ 4 แบบจำลอง ได้แก่ 1) Linear model 2) Linear + interaction model 3) Linear + square model และ 4) Full quadratic model เมื่อใช้โปรแกรม Minitab ประมวลผลด้วยวิธี Response Surface Methodology ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละแบบจำลองดังในตารางที่ 4.2 (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลอง

แบบจำลอง	S	R ² (%)	R ² (adj) (%)
Linear	7.12	78.92	73.17
Linear + square	2.37	98.30	97.03
Linear + interaction	8.17	79.79	64.63
Full quadratic	2.19	99.09	97.47

จากตารางที่ 4.2 พบว่าแบบจำลอง Full quadratic มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานน้อยที่สุดคือ 2.19 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R² (adj)) มากที่สุดคือ 97.47% แสดงว่าแบบจำลอง Full Quadratic มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวแบบอธิบายผลการทดลอง

4.5.2 ผลการวิเคราะห์จากการประมาณผลด้วย RSM จากแบบจำลอง Full Quadratic

ในงานวิจัยนี้ผลตอบสนองที่สนใจศึกษาคือประสิทธิภาพในการบำบัดสี ซึ่งได้นำผลการทดลองได้จากการวัดค่าผลตอบสนองมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Full Quadratic สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยในแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งตั้งสมมติฐานทางสถิติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H_0: \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

และวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมๆกัน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0: \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_K = 0$ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_i \neq 0$ หรือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจากแบบจำลอง Full Quadratic

Term	Coef.	SE Coef.	t	p
Constant	33.9378	129.632	0.262	0.804
time	0.6456	0.174	3.703	0.014*
pH	-7.1427	4.219	-1.693	0.151
COD	0.0445	0.104	0.428	0.687
time x time	-0.0037	0.000	-9.753	0.000*
pH x pH	0.5114	0.193	2.655	0.045*
COD x COD	-0.00001	0.000	-0.465	0.661
time x pH	0.01622	0.008	2.051	0.096
time x COD	0.00002	0.000	0.306	0.772
pH x COD	-0.00019	0.001	-0.134	0.899

หมายเหตุ S = 2.187 $R^2 = 99.01\%$ R^2 (adj) = 97.47%

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แปรปรวน (Variance) จากแบบจำลอง Full Quadratic

Source	p.
Linear	0.046*
Square	0.001*
Interaction	0.331

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของระยะเวลาการเติมโอโซน (time) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า p-value ของระยะเวลาการเติมโอโซนน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ค่าพีเอชเริ่มต้น (pH) และปริมาณ COD เริ่มต้น มีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แสดงว่าปัจจัยทั้งสองไม่มีผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาความแปรปรวนในตารางที่ 4.4 ในส่วนของ Linear terms (time, pH และ COD) ที่มีค่า p เท่ากับ 0.046 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญแสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี

เมื่อพิจารณาในส่วนของอิทธิพลหลักอันดับที่สอง (Square terms) ในตารางที่ 4.4 ซึ่งได้แก่ time \times time (time^2), pH \times pH (pH^2) และ COD \times COD (COD^2) พบว่า ความแปรปรวนของ Square terms มีค่า $p = 0.001$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญแสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี ซึ่งจากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ time^2 และ pH^2 มีค่า p -value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ค่า COD^2 มีค่า p -value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แสดงว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาในส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction terms) ในตารางที่ 4.4 ซึ่งได้แก่ time \times pH, time \times COD และ pH \times COD พบว่า ความแปรปรวนของ Interaction terms มีค่า $p = 0.331$ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าอิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สอดคล้องกับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในตารางที่ 4.3 พบว่า time \times pH, time \times COD และ pH \times COD มีค่า p -value มากกว่าระดับนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้ สามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการเติมไฮโซน ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอน และปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนไม่มีผลต่อกัน

สมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology จากแบบจำลอง Full Quadratic ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ระยะเวลาที่ใช้เติมไฮโซน ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอน และ ปริมาณสารอินทรีย์เริ่มต้นของน้ำยาโบรอน) กับประสิทธิภาพการบำบัดสี แสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการบำบัดสี (\%)} = & 33.9378 + 0.6456 \text{ time} - 7.1427 \text{ pH} + 0.0445 \text{ COD} \\ & - 0.003713 \text{ time}^2 + 0.5114 \text{ pH}^2 - 0.00001 \text{ COD}^2 \\ & + 0.01622 \text{ time} \times \text{pH} + 0.00002 \text{ time} \times \text{COD} \\ & - 0.00019 \text{ pH} \times \text{COD} \end{aligned} \quad (4.1)$$

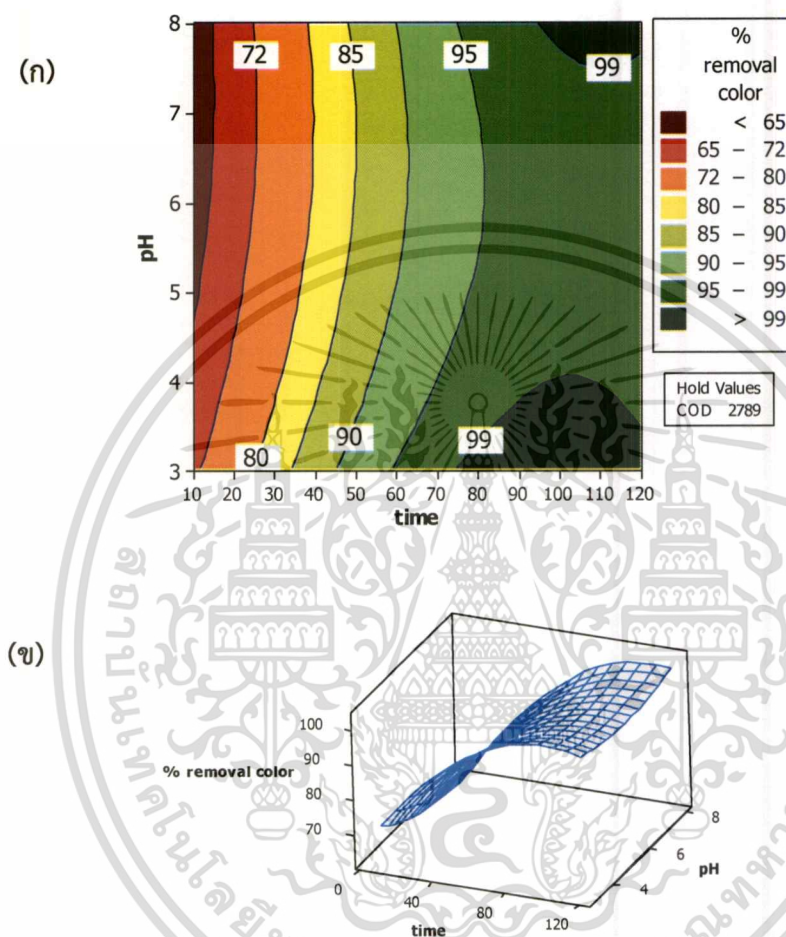
4.5.3 การสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) ระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

จากผลการทดลองโดยใช้ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RSM สามารถนำมาสร้างพื้นผิวผลตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี เมื่อกำหนดให้ปริมาณ COD มีค่าคงที่ที่ 2789 mg/L แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) กราฟโครงร่าง (Contour Plot) และ (ข) พื้นผิวผลตอบ (Surface Plot)

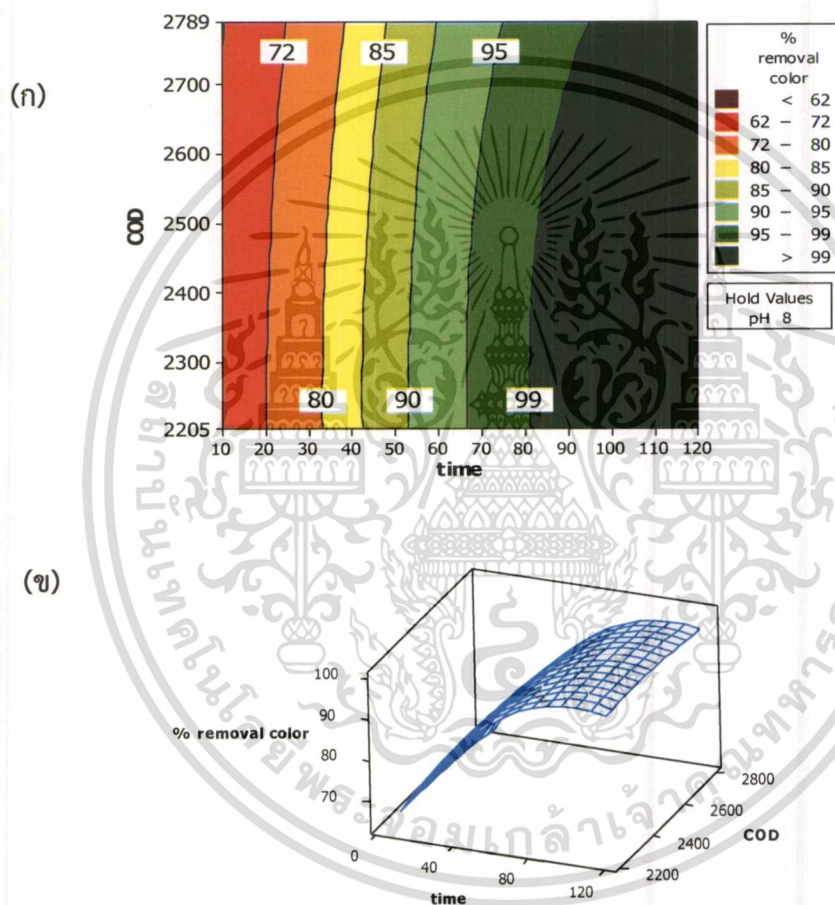
จากรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเติมโอโซนพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซน สอดคล้องกับงานวิจัยของวราภรณ์และคณะ (2550) เจตนิพิฐ และคณะ (2552) และสุรชัย (2553) โดยเมื่อเพิ่มเวลาการเติมโอโซนจาก 10 นาที เป็น 120 นาที จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 65% ให้มีค่ามากกว่า 99% และการที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเปลี่ยนแปลงจากเบสเป็นกรด (pH 8 เป็น 3) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนพพรช (2545) และ Herath. *et al.* (2011) โดยที่การเปลี่ยนแปลงพีเอชจากเบสเป็นกรด ที่การบำบัด 10 นาที จะเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยกว่า 65% ให้อยู่ในช่วง 65-72% แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูเห็นหน้าเว็บไซต์นี้เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดสีจะสูงขึ้น ทั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่าการเลือกใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่จะทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่สูงนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเติมโอโซน โดยระยะเวลาการเติมโอโซนตั้งแต่ 65 นาที จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีอย่างน้อย 95%

2. อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาอิทธิพลของอิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนและค่า COD ต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี กำหนดให้ pH มีค่าคงที่ที่ 8 แสดงในรูปที่ 4.16



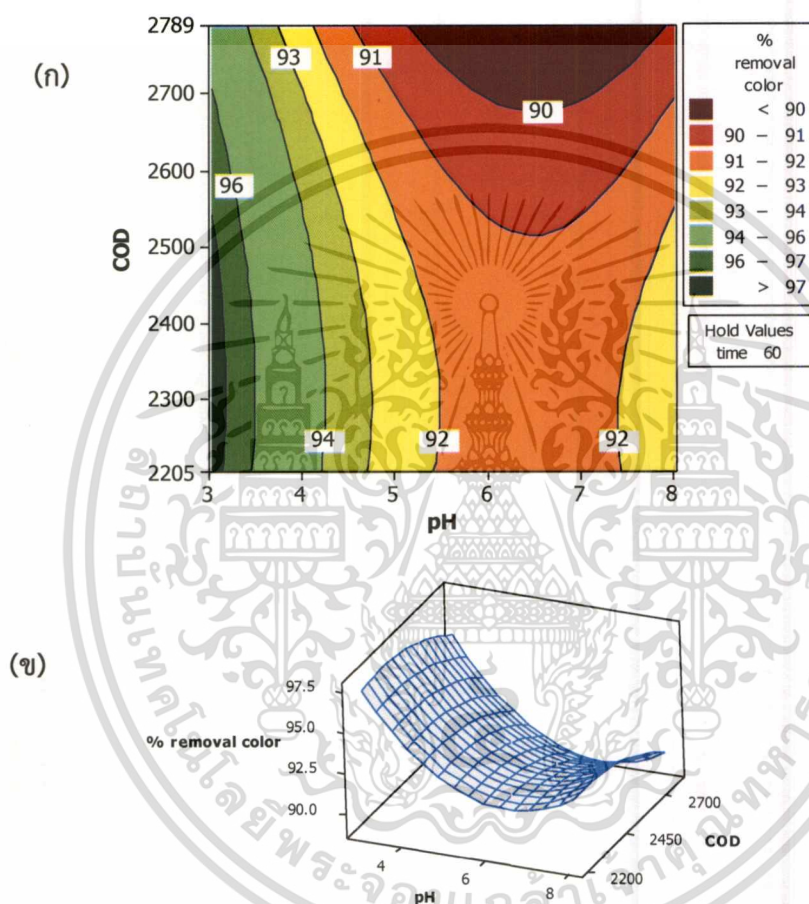
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของระยะเวลาการเติมโอโซนกับ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี (ก) กราฟโครงร่าง (Contour Plot) และ (ข) พื้นผิวผลตอบ (Surface Plot)

จากรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเติมโอโซนพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเติมโอโซน ซึ่งการเพิ่มเวลาจาก 10 นาที เป็น 80 นาที จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเปลี่ยนแปลงจากประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยกว่า 62% ให้มีค่ามากกว่า 99% หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสีจะมีค่าคงที่โดยการเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนมากกว่า 80 นาที จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี เมื่อพิจารณา COD เริ่มต้นในน้ำยาโบรอนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงจาก 2,205 เป็น 2,789 mg/L ที่ทุกเวลาการบำบัดไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเติมโอโซน

3. อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นและ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นและ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาการเติมโอโซนคงที่ที่ 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นกับ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี
(ก) กราฟโครงร่าง (Contour Plot) และ (ข) พื้นผิวผลตอบ (Surface Plot)

จากรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเปลี่ยนแปลงจากช่วงกรดเป็นช่วงเบสในทุกการเปลี่ยนแปลงของค่า COD เริ่มต้น แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง COD เริ่มต้น ที่ pH ต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (1-2 %) หรือไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้เวลาบำบัด 60 นาที น้ำยาโบรอนที่มี pH เท่ากับ 3 และค่า COD อยู่ในช่วง 2,205 -2,500 mg/L จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 97%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

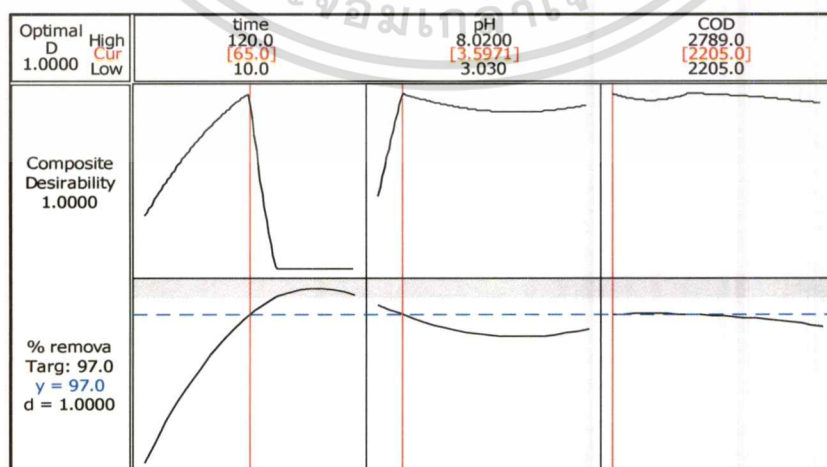
4.5.4 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

จากสมการการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic สามารถนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 16.0 สำหรับคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ โดยในการประมวลผล มีค่าที่ต้องกำหนดค่าดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดค่าขอบเขตบนเท่ากับ 99%
- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบ โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อต้องการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนให้มีลักษณะใส จึงกำหนดเป้าหมายเท่ากับ 97%
- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 60%

หมายเหตุ การกำหนดค่าขอบเขตบน ค่าเป้าหมายและค่าขอบเขตล่างของงานวิจัยนี้เกิดจากการสอบถามความต้องการลักษณะสีน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราซึ่งทางโรงงานต้องการลักษณะสีของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดในลักษณะที่ใส ดังนั้นจึงเลือกค่าเป้าหมายที่ 97% โดยน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดมีลักษณะใสตามความต้องการของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสี 97% แสดงดังรูปที่ 4.18 คือ ระยะเวลาการเติมโอโซนเป็นเวลา 65 นาที (คิดเป็นอัตราการเติมโอโซนเท่ากับ 214.5 mg/hr) มีค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 3.6 และมีค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 2205 mg/L นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย RSM ยังพบสภาวะที่เหมาะสมอื่นๆ ที่สามารถทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ 97% โดยเพิ่มระยะเวลาการบำบัดให้นานขึ้น (มากกว่า 80 นาที) เนื่องจาก ค่า pH เริ่มต้น และ COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี



รูปที่ 4.18 สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีของน้ำยาโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

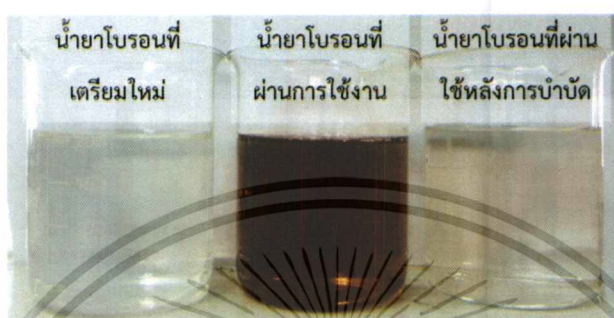
เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการการทำนายจากแบบจำลอง Full Quadratic จึงได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะดังกล่าว ซึ่งก็คือ ใช้ระยะเวลาการเติมโอโซนเป็นเวลา 65 นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเท่ากับ 3.59 ± 0.02 และค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 2247 ± 38.08 mg/L (ผลการบำบัดสีแสดงดังภาคผนวก ข.) และทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทดลองกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Full Quadratic ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทดลองกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง Full Quadratic

ลำดับการทดลอง	time (min)	pH เริ่มต้น	COD เริ่มต้น	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)		% ความคลาดเคลื่อน
				จากการทดลอง	จากการทำนาย	
1	10	5.03	2789	61.48	63.4	3.09
2	60	5.04	2662	91.05	90.8	0.28
3	60	5.04	2662	91.21	90.8	0.40
4	120	5.04	2789	99.14	96.5	2.64
5	60	3.03	2789	94.96	94.8	0.14
6	10	8.00	2662	63.71	62.3	2.14
7	120	5.03	2205	99.44	98.6	0.84
8	60	8.01	2205	92.75	92.6	0.12
9	10	3.03	2662	74.24	71.6	3.56
10	60	5.04	2662	91.40	90.8	0.66
11	120	3.03	2662	99.51	100.7	1.23
12	60	3.04	2205	96.66	97.3	0.65
13	120	8.02	2662	99.23	100.5	1.32
14	60	8.02	2789	90.86	89.6	1.38
15	10	5.03	2205	66.53	66.7	0.21
สภาวะที่เหมาะสม	65	3.59 ± 0.02	$2,247 \pm 38.08$	96.53 ± 0.57	97.0	0.49

จากตารางที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายมีค่าเท่ากับ $96.53 \pm 0.57\%$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดสีที่กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (97%) ดังนั้นแบบจำลอง Full Quadratic จึงมีความถูกต้องในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บำบัดสี และผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทดลองกับค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ได้จากแบบจำลองเล็กน้อย ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 3.09 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดเปรียบเทียบกับน้ำยาโบรอนที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับมาจากโรงงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ไม่ผ่านการใช้งาน ผ่านการใช้งานจากโรงงาน และ ผ่านการใช้งานที่ผ่านการบำบัดตามลำดับ

4.6 ผลการทดสอบน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ผ่านการบำบัดในการรักษาเนื้อไม้ โดยวิธีการอบน้ำยาไม้อย่างง่าย

จากการอบน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้แบบง่ายโดยใช้น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมข้างต้น พบว่าลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดเปรียบเทียบกับน้ำยาโบรอนที่ไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการใช้งานจากโรงงานมีสีที่ต่างกัน โดยสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากโรงงานนั้นมีลักษณะคล้ำกว่าน้ำยาโบรอนที่เตรียมใหม่และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสม แต่สีของน้ำยาโบรอนทั้ง 3 แบบหลังจากผ่านการใช้แช่ไม้ต่างก็สีที่คล้ำขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งลักษณะสีของเนื้อไม้และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานมีสีคล้ำนี้ สอดคล้องกับการอธิบายของจรรยาและคณะ (2554) เมื่อนำน้ำยาโบรอนที่มีสีคล้ำมาใช้ซ้ำในการรักษาเนื้อไม้จะส่งผลให้คุณภาพของสีไม้ที่อัดน้ำยามีสีคล้ำ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 4.20 และ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ น้ำยาโบรอนหลังจากการบำบัดและน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากโรงงาน ตามลำดับ (ก) ผิวหน้าเนื้อไม้ (ข) ภาพตัดขวางของไม้



รูปที่ 4.21 ลักษณะสีของน้ำยาโบรอนที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้น้ำยารักษาของน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด และน้ำยาโบรอนผ่านการใช้งานจากโรงงาน ตามลำดับ

เมื่อตรวจสอบสีของน้ำยาโบรอนขั้นต้นโดยการใช้ยาทดสอบ Curcumin reagent ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.22 พบว่า หลังจากทำการทดสอบด้วย Curcumin reagent แล้ว ไม้ที่ไม่ได้ผ่านการรักษาเนื้อไม้ด้วยน้ำยาโบรอนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแสดงว่ามีสารประกอบโบรอนแทรกซึมอยู่ในเนื้อไม้ น้อยมากหรือไม่มี การแทรกซึมของสารประกอบโบรอน แต่ไม้ที่ผ่านการแช่น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด เปลี่ยนเป็นสีแดงแสดงว่ามีปริมาณกรดบอริกแทรกซึมลงในเนื้อไม้เพียงพอต่อการรักษาเนื้อไม้ ซึ่งผลการทดสอบไม่ต่างจากน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นมาใหม่และน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับจากโรงงานที่ปรากฏเป็นสีแดงเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ลักษณะสีของเนื้อไม้ที่แช่น้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่ ที่ผ่านการใช้งานหลังจากการบำบัด และที่ผ่านการใช้งานที่ได้รับจากโรงงาน ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าน้ำยาโบรอนที่บำบัดแล้ว มีความเป็นไปได้ที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากหลังการบำบัดสีของน้ำยาโบรอนมีลักษณะใสขึ้น ปริมาณกรดบอริกซึ่งทำหน้าที่ในการป้องกันและรักษาเนื้อไม้ที่อยู่ในน้ำยาโบรอนไม่เปลี่ยนแปลงหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนขึ้น อีกทั้งผลการแช่น้ำยาพาราโดยใช้น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดไม่ส่งผลกระทบต่อสีของเนื้อไม้ที่แช่ และมีปริมาณกรดบอริกซึมลงสู่เนื้อไม้ได้อย่างเพียงพอโดยไม่ต่างจากน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่อย่างพาราแปรรูปด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ One Variable At A Time และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 198 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงสามารถละลายในน้ำประปาและน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่มีความเข้มข้น 1013 ± 6.08 ADMI ได้เท่ากับ 216 และ 240 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อลิตร ตามลำดับ

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นโดยใช้การทดลองแบบ One Variable At A Time พบว่า

2.1 การบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นไม่ทำให้ค่า pH ของน้ำยาโบรอนและปริมาณกรดบอริกเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการบำบัด

2.2 ความเข้มข้นของสี และ COD ของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซน ค่า pH เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนอยู่ในช่วงกรด และค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนมีค่าลดลง

3. การออกแบบการทดลองแบบ Box - Behnken Design พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB ด้วยวิธี Response Surface Methodology พบว่า

3.1 แบบจำลองแบบ Full Quadratic เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำยาโบรอน

3.2 ระยะเวลาการเติมโอโซนมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำยาโบรอนแต่ตัวแปรอิสระใน Interaction Terms ไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3 สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองคือ ระยะเวลาการเติมโอโซนเป็นเวลา 65 นาที มีค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเท่ากับ 3.6 และมีค่า COD เริ่มต้นของน้ำยาโบรอนเท่ากับ 2,205 mg/L และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายจากแบบจำลอง Full Quadratic พบว่าน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัด มีประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 96.57% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดสีที่กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (97%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. น้ำยาโบรอนมีลักษณะใสขึ้นและปริมาณกรดบอริกที่ทำหน้าที่ในการป้องกันและรักษาเนื้อไม้ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการบำบัด เมื่อนำไปใช้ในการแช่ไม้เพื่อรักษาเนื้อไม้ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อสีของเนื้อไม้ที่แช่และ มีปริมาณกรดบอริกซึมลงสู่เนื้อไม้ได้อย่างเพียงพอโดยไม่ต่างจากน้ำยาโบรอนที่เตรียมขึ้นใหม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่างๆของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานที่ส่งผลให้สีในน้ำยาโบรอนจางหายไปหลังผ่านกระบวนการโอโซนขึ้น
2. ควรศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงงานโดยทำพัฒนาการทดลองให้เป็นแบบระบบต่อเนื่อง
3. น้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดแล้วเมื่อนำไปใช้ซ้ำในกระบวนการรักษาเนื้อไม้ก็จะกลับมามีสีคล้ำอีก ดังนั้นจึงควรศึกษาการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดในครั้งแรกแล้วนำไปใช้รักษาเนื้อไม้ให้ใสอีกครั้ง
4. ควรศึกษาเกี่ยวกับลักษณะสีในน้ำยาโบรอนที่โรงงานยอมรับได้สำหรับนำมาใช้ซ้ำในการรักษาเนื้อไม้ (Benchmark ของสีในน้ำยาโบรอน)
5. ควรประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการโอโซนขึ้น เช่น ต้นทุนเครื่องผลิตโอโซน ค่าไฟฟ้า ค่าซ่อมบำรุง และ ค่าดำเนินการ เป็นต้น เพื่อประกอบการพิจารณาในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2549. อุตสาหกรรมแปรรูป อัดบ่น้ำยาไม้. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry3.asp. สืบค้นเมื่อ 29 พ.ย. 2557.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูป. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://rubber.oie.go.th/file/ไม้ยางพาราแปรรูป.PDF>. สืบค้นเมื่อ 18 ม.ค. 2558
- เกศระวี ปานทับ, สุทธิมา ลิมหลัก และณุพร โกไศยกานนท์. 2554. “การใช้ประโยชน์ของไขมันโคเจียวเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล.” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ข่าวในแวดวงยาง. 2553. การแปรรูปไม้ยางกับความเป็นพิษของโบรอนในดินปลูกยาง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.rubberthai.com/news/newsinfo/2553/01_news_Jan53/news_1401.htm. สืบค้นเมื่อ 26 พ.ย. 2557.
- โครงการหอศิลป์ไม้ไผ่ สถาบันอาศรมศิลป์. 2555. วิธีการรักษาเนื้อไม้ไผ่โดยใช้สารประกอบโบรอน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://facebook.com/notes/โครงการหอศิลป์ไม้ไผ่-สถาบันอาศรมศิลป์/วิธีการรักษาเนื้อไม้ไผ่โดยใช้สารประกอบโบรอน/417871991585048>. สืบค้นเมื่อ 8 พ.ย. 2557.
- จรรยา อินทมณี, จันทิมา ชังสิริพร และ จรรย์ บุญญาญจน์. 2554. “การนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำยาโบรอนในกระบวนการอัดเนื้อไม้ยางพารา.” ใน การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 วันที่ 10-11 พฤศจิกายน, 2554, อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
- จุฑามาศ ธธา. 2553. “การผลิตเอนโดกลูคานเนสโดยเชื้อราที่แยกจากดิน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เจตนิพัทธ์ สุตทองคง, ณ์รุพงศ์ โปรยสุรินทร์ และนาตยา สุขประเสริฐ. 2552. “การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชั้น.” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เจษฎา จิตรหลัง, จำเป็น อ่อนทอง, ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และ อัจฉรา เฟื่องน. 2550. “ปัญหาการใช้ น้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันเป็นแหล่งธาตุอาหารพืช.” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 10(2) : 62-73.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย์, จิรวัดน์ รียาพันธ์, เฉลิมพล ภูมิไชย์, กรรณิการ์ อีระวัฒนสุข และกฤษดา สังข์สิงห์. 2555. “คุณสมบัติของไม้ยางพาราเพื่อการคัดเลือกพันธุ์ยาง.” วารสารยางพารา. 33(3) : 38-51.
- เดชา เตียงเกตุ ให้สัมภาษณ์, 6 พฤษภาคม 2555. โครงการหอศิลป์ไม้ไผ่ สถาบันอาศรมศิลป์ ผู้สัมภาษณ์. อัตราส่วนผสมระหว่างบอแรกซ์และกรดบอริก
- ทรงกลด จารุสมบัติ. ม.ป.ป. ชนิดของน้ำยารักษาเนื้อไม้. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.baannatura.com/th/mat/content/detail/107.html>. สืบค้นเมื่อ 19 พ.ย. 2557.
- ทรงกลด จารุสมบัติ, อีระ วิณิน และอำไพ เปี่ยมอรุณ. 2556. การวิจัยและพัฒนาวิธีวัดความเข้มข้นของน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://rubber.oie.go.th/rd/file/wood.pdf>. สืบค้นเมื่อ 19 พ.ย. 2557.
- ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. 2550. “การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธารกมล ถาวรพานิช. 2543. “ผลของโอโซนที่มีต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อีระ วิณิน, รศ.ดร. ให้สัมภาษณ์, 26 มิถุนายน 2555. โครงการหอศิลป์ไม้ไผ่ สถาบันอาศรมศิลป์ ผู้สัมภาษณ์. อัตราส่วนผสมระหว่างบอแรกซ์และกรดบอริก
- นงเยาว์ ชูสุข. 2554. “เทคนิคในการพัฒนาผลิตภัณฑ์.” หน้า 1-37. ใน เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการวางแผนการตลาดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นนทพงษ์ ภาณุกุลกิตติ. 2548. “การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นวพรรษ ลักษณะานุรักษ์. 2545. “การบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นุชนกาญจน์ พรหมมาเทพย์. 2550. “การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเติมโอโซน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- บริษัทบูรณาพากรูปลูกจำกัด. 2556. ไม้ยางพารา. [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://www.buranapagroup.com/en/knowledge_rubbertree.php. สืบค้นเมื่อ 20 พ.ย. 2557.
- บริษัทโพรเฟสชันแนลโอโซนอินเตอร์เนชันแนลจำกัด. 2555. ความรู้เกี่ยวกับโอโซน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ozoneinter.com/knowlage.html>. สืบค้นเมื่อ 21 พ.ย. 2557.
- บริษัทแมนเดอร์เพ้นท์จำกัด. ม.ป.ป. การตรวจสอบการซึมซับน้ำยา Safebor. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.manderpaint.com/information/SAFEBOR1.pdf>. สืบค้นเมื่อ 4 ต.ค. 2557.
- บางรักษ์ เชษฐสิงห์. 2547. การใช้ประโยชน์ไม้ชั้นพื้นฐาน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://forprod.rod.forest.go.th/forprod/Tips/DETAILS/woodpreserv.htm>. สืบค้นเมื่อ 12 ก.พ. 2558
- ปวีณา วังซัง, ปิยดา จินศิริ และ มูนาตา สลามเต๊ะ. 2556. “การบำบัดน้ำยาโบรอนที่เสื่อมสภาพด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปิยะวิทย์ ทิพรส. 2552. “โอโซน : สมบัติทางเคมีกายภาพและการประยุกต์ใช้เพิ่มความขาวผลิตภัณฑ์เนื้อปลา.” วารสารสุทธิปริทัศน์. 23(70) : 105-120.
- พงษ์ทวี จูรัตน์, ยุทธนา เจริญศรีสกุล และ ศิริภัทร์ พลอยทับทิม. 2557. “การบำบัดน้ำยาโบรอนจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พรรณทิพย์ แสงสุขเอี่ยม และราตรี ชูยศิริญ. 2558. “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสีย้อมจากกลีบดอกอัญชันโดยใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง.” ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย.
- พรวิษา แกสมาน, ภัทรา คงภักดี และ ภาณุพงศ์ เฟ็งวัน. 2551. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พลาริน พลยั้ง. 2551. “การพัฒนาเทียนหอมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการตลาด.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- พิชญา ธนาผยนันต์, ศิริวัฒนา รินทราณี และ อธิวัฒน์ บุญสร้างสม. 2556. “การบำบัดน้ำยาโบรอนจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.” ปริญญาบัตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พีรวัฒน์ วงศ์คำ. 2556. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดไลโคปีนและบีต้าแคโรทีนจากเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าว โดยใช้คลื่นเสียงและวิธีพื้นผิวผลตอบ.” โครงการวิจัยวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิช เจียสกุล. 2548. “การกำจัดสีด้วยโอโซนจากสารละลายลิกนินในท่อแวนระนาบ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
- รัชดากร สำเนากลาง, กฤษณะศ ฝ้ายสงค์ และ พรพรรณ แม้นศิริ. 2553. “การประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับเพนตันในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.” โครงการงานนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ และ จำเป็น อ่อนทอง. 2551. “การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเพนตันเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปของปุ๋ยแคลเซียม-โบรอน.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- วรภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด, ต่อพงศ์ กรีธาชาติ และพิลาณี ไฉนอมสัจย์. 2550. “การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน.” ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีรยา อัจจงค์. 2549. “การบำบัดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเปียร์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีระพงศ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. “การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2543. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 142-144.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2554. โครงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมไม้และเครื่องเรือนภายใต้กฎเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมโลก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.oie.go.th/academic/รายงานการศึกษาโครงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมไม้และเครื่องเรือนภายใต้กฎเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมโลก> สืบค้นเมื่อ 1 พ.ย. 2557
- สุรัชย์ จอดพิมาย. 2553. “การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” การค้นคว้าอิสระ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- แสวง เกิดประทุม. 2558. การกำจัดโบรอนในน้ำทะเลด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (RO). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.tistr.or.th/ed/?p=520>. สืบค้นเมื่อ 9 พ.ค. 2558
- อรชуда ชันดีกุล. 2549. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับการลอยตะกอนด้วยหลักการละลายของอากาศ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- APHA, AWWA and WEF. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC : American Public Health Association
- Atav, R. 2013. *The Use of New Technologies in Dyeing of Proteinous Fibers : Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing*. Croatia : InTech. 111-116.
- Chen, T. Y., Kao, C. M., Hong A., Lin, C. E. and Liang, S. H. 2009. “Application of Ozone on the Decolorization of Reactive Dyes -Orange-13 and Blue-19.” *Desalination*. 249(3) : 1238-1242.
- CleanWaterTeam. 2014. *Color of Water Fact Sheet* . [Online]. Available : http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3159.pdf, Access Date 8 November 2014.
- Garland, L. 2005, “Vertical Soak Diffusion for Bamboo Preservation.” 3 Bali : Environmental Bamboo Foundation
- Gottschalk, C., Libra, J.A., and Saupe, A. 2000 . *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Application*. Weinheim : WILEY-VCH.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Dehouli, H., Chedeville, O., Cagnon, B., Caqueret, V. and Porte, C. 2010. "Influences of pH, Temperature and Activated Carbon Properties on the Interaction Ozone/Activated Carbon for a Wastewater Treatment Process." *Desalination*, 254(1-3), 12-16.
- Herath N.K., Ohtani Y. and Ichiura H. 2011. "Color and Phenolic Compounds Reduction of Kraft Pulp Mill Effluent by Ozonation with Some Pretreatments." *American Journal of Scientific and Industrial Research*. 2(5) :798-806.
- Lin S. H. and Lai C.L. 2000. "Kinetic Characteristics of Textile Wastewater Ozonation in Fluidized and Fixed Activated Carbon Beds." *Water Research*, 34(3) :763-772.
- Okafo Nduka. 2011. *Environmental Microbiology of Aquatic and Waste Systems*. New York : Springer Science & Business Media. 227-229
- Ozone Solutions Inc. 2012. Negatives of Ozone. [Online]. Available : <http://www.ozonesolutions.com/info/negatives-of-ozone>. Access Date 9 November 2014
- Pena, M., Coca, M., Gonzalez, G., Rioja, R., Garcia, M.T. 2003. "Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone." *Chemosphere* 51 : 893-900
- Pinzon, T. M. and Tistl, M. 2007. "Preservation of the *Guadua angustifolia* Kunth by submersion in aqueous boron solutions: The influence of temperature, concentration and duration of submersion in aqueous boron solutions on the effectiveness of the preservation of Colombian bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth)." *The Journal of the American Bamboo Society* 20(1) : 21-25.
- Soares, O.S., Orfão J.J., Portela, D., Vieira, A. and Pereira, M.F. 2006. "Ozonation of Textile Effluents and Dye Solutions under Continuous Operation: Influence of Operating Parameters." *Journal of Hazardous Materials*, 137(3) : 1664-1673.
- Weber, Jr. and Walter J. 1972. *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. New York. John Wiley and Sons, Inc. 184-281.
- Wikipedia. 2015. Lignin. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>
Access Date 2 June 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Wu, D., Yang, Z., Wang, W., Tian, G., Xu, S. and Sims, A. 2012. "Ozonation as an Advanced Oxidant in Treatment of Bamboo Industry Wastewater." *Chemosphere*, 88(9) : 1108-1113.
- Zeynep, B.G., Annel, K.G. and Seydim A. C. 2004. "Use of Ozone in the Food Industry." *LWT - Food Science and Technology*, 37(4) : 453-460.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

ก-1 การวัดปริมาณโอโซน

การวัดปริมาณโอโซนสามารถทำได้ด้วยวิธีไอโอดเมตรี (Iodometry) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2%
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 N

หมายเหตุ ต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตโดยนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปรัมภูมิ KIO_3 ดังนี้ ปิเปตสารละลาย KIO_3 10.00 mL ลงใน Erlenmeyer flask เติม 10% KI ประมาณ 1 mL และ 1 M H_2SO_4 ปริมาตร 1 mL นำไปไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมไว้ จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน จึงเติมน้ำแบ่งลงไป 2 mL จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนไม่มีสี บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

3. น้ำแบ่ง

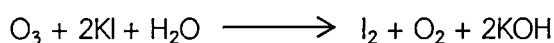
การทดลอง

1. การดูดซึมก๊าซโอโซนโดยผ่านก๊าซโอโซนลงในขวดดักก๊าซที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (KI 2%)
2. นำสารละลาย KI (มีสีเหลืองหรือส้ม) มาเติม 1 M H_2SO_4 ปริมาตร 1 mL เพื่อปรับ pH
3. นำมาไทเทรตกับสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อนๆ (สีม่วงขาว) เติมน้ำแบ่ง 2 mL จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนไม่มีสี
4. บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซนที่มีอยู่

ในระบบ

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

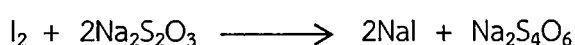
- การดูดซึมโอโซนโดยใช้สารละลาย KI



ไม่มีสี

สีเหลืองหรือส้ม

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



สีน้ำเงิน

ไม่มีสี

การคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซนสามารถคำนวณได้ดังสมการ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Ozone Production Rate (OPR)} = \frac{(V_{\text{titrant1}} \times N_1 + V_{\text{titrant2}} \times N_2) \times 24}{\text{time}}$$

- เมื่อ OPR คือ ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน (mg/min.)
 V_{titrant} คือปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1 นอร์มอล (0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 2% KI ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
 N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟต
 time คือ เวลาที่สัมผัสโอโซน (min)

ก-2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

1. นำตัวอย่างมาแยกตะกอนโดยใช้เครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดค่า %T ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นที่แสดงในตารางโดยใช้น้ำกลั่น เป็น blank

ตาราง ก-2 ความยาวคลื่นที่ใช้วัดค่า %T

Ordinate 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	645.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate	0.09806	0.100 00	0.118 14
Uesd			

2. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่าที่ได้ใส่ในโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่า ADMI (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-3 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดบอริก

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M
3. ดีแมนนิทอล

การทดลอง

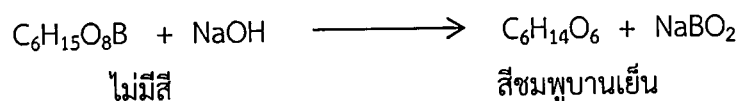
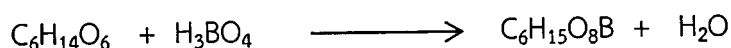
1. ปิเปิดน้ำยาโบรอนมา 10 มิลลิลิตรใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยใช้เมทิลเรดเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีส้มเมื่อถึงจุดยุติ ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้งแล้วหาปริมาตรเฉลี่ยของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต
3. ปิเปิดน้ำยาโบรอนมาใหม่ 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ให้มีปริมาตรเท่ากับค่าเฉลี่ยที่หาได้ในข้อ 2. จากนั้นนำไปให้ความร้อน จนเดือดนาน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เติมดีแมนนิทอล 2 กรัม นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสารละลายใสเป็นสีชมพูเมื่อถึงจุดยุติ
5. ทดลองเติมดีแมนนิทอลลงไปอีก 0.5 กรัม ถ้าสีชมพูจางหายไปให้นำไปไทเทรตอีกครั้งจนสารละลายมีสีชมพู เติมดีแมนนิทอลลงไปอีกครั้งถ้าสีชมพูไม่จางหาย บันทึกปริมาตร NaOH ที่ใช้

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 M HCl



- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 M NaOH



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\text{กรดบอริก (g/L)} = \frac{C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times MW_{\text{H}_3\text{BO}_3}}{V_{\text{ตัวอย่าง}}}$$

โดยที่ C_{NaOH} = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย NaOH (mol/L),

$V_{\text{ตัวอย่าง}}$ = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)

V_{NaOH} = ปริมาณ NaOH ที่ใช้ไทเทรต (mL) ,

$MW_{\text{H}_3\text{BO}_3}$ = มวลโมเลกุลของกรดบอริก (g/mol)

ก-4 การวิเคราะห์ซีโอทีโดยวิธีฟลักซ์แบบปิด/การไทเทรต (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digest Vessel) ควรใช้หลอดทดลองแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) ซึ่งมีขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งฝาจุก

1.2. เครื่องให้ความร้อนหรือเตาอบ ซึ่งสามารถให้ความร้อนและสามารถควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 150 ± 2 องศาเซลเซียส

2. สารเคมี

2.1. น้ำย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion Solution) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์

วิธีการเตรียม ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard) โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate) หนัก 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง (Desiccator) ใส่ลงไปในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2.2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์

วิธีการเตรียม ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulfate; Ag_2SO_4) จำนวน 5.5 กรัมต่อกรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) จำนวน 1 กิโลกรัม หรือ ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต จำนวน 22 กรัมในกรดซัลฟิวริก 4.0 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) โดยต้องใช้เวลาในการละลายนาน 1 - 2 วัน

2.3. เฟอโรอิน อินดิเคเตอร์

วิธีการเตรียม ละลาย 1,10 - Phenanthroline Monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) หนัก 1.48 กรัม และ Ferrous Sulfate Heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) หนัก 0.7 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วทำให้เจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตหรือสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียม ซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

วิธีการเตรียม ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1000 mL สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่จะนำมาใช้

วิธีการหาความเข้มข้นของ Ferrous Ammonium Sulfate เติมสารเคมีตามตาราง-4 ในภาชนะย่อยสลาย แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง น้ำ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วไทเทรตด้วย Ferrous Ammonium Sulfate โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

การคำนวณ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) คำนวณได้จาก สมการ

$$M_f = (6V_p M_p) / V_f$$

เมื่อ M_f = ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เป็นโมลาร์

V_f = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ เป็นมิลลิลิตร

V_p = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ เป็นมิลลิลิตร

M_p = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต เป็นโมลาร์

2.5. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (Standard Potassium Phthalate Solution; KHP)

วิธีการเตรียม ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท ซึ่งอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่แล้วที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นหนัก 425 มิลลิกรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจาง จนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี 500 mg/L โดยที่ในทาง ทฤษฎีสารละลาย KHP มีค่าซีไอดี 1.176 มิลลิกรัมออกซิเจน (O_2) ต่อมิลลิกรัม

วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) และฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกัน การปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์

2. เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตาราง ก-4

หมายเหตุ ในกรณีที่ใช้น้ำย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion Solution) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์ ค่าซีไอดีของตัวอย่างน้ำ ควรอยู่ระหว่าง 50 - 400 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีมากกว่านี้จะต้องทำการเจือจางตัวอย่างน้ำนั้นก่อน เพื่อให้ตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วมีซีไอดีอยู่ในช่วงของการวิเคราะห์

3. นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ เติมสารละลายที่สารละลายมาตรฐาน

โพแทสเซียมไดโครเมต ตามตาราง ก-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่อยๆเทกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ลงในหลอดโดยให้กรดซัลฟิวริกเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นตัวอย่างน้ำและน้ำย่าย่อยสลาย
5. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นแล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลายๆครั้งเพื่อ ผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
6. นำหลอดทดลองเหล่านี้ไปใส่ในเตาอบ (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง
7. เปิดฝาจุก เทของผสมลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดทดลองให้หมด เติมเพอร์อินอินดิเคเตอร์ 1 -2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ Ferrous Ammonium Sulfate ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากฟ้ามืด เป็นน้ำตาลแดง
8. ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง แล้วทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนข้างต้น
9. ใช้สารละลายละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท แทนตัวอย่างน้ำ โดยใช้รีเอเจนต์ต่างๆเหมือนกับที่ ใช้กับตัวอย่างน้ำ แล้วคำนวณหาค่าซีโอดีเพื่อตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์ว่าถูกต้องหรือไม่

ตาราง ก-4 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดหลอด (ม.มxม.ม)	ตัวอย่างน้ำ (มล.)	สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโคร เมต (มล.)		สารละลายกรด ซัลฟิวริกเอเจนต์ (มล.)	ปริมาตรสุทธิ ของสารละลาย (มล.)
16x100	2.5	1.5		3.5	7.5
20x150	5.0	3.0		7.0	15.0
25x150	10.0	6.0		14.0	30.0
standard	2.5	1.5		3.5	7.5

การคำนวณหาซีโอดี

$$\text{COD} = (A-B)(8000M)/C$$

เมื่อ	COD	=	ค่าซีโอดี หน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
	A	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรท แบลนค์ หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	B	=	ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรท ตัวอย่าง หน่วยเป็นมิลลิลิตร
	M	=	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต หน่วย เป็นโมลาร์
	C	=	ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-5 การตรวจสอบผลของการรักษาเนื้อไม้

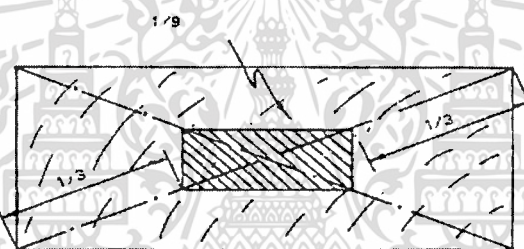
การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

สารละลายเคอร์คูมิน (curcumin solution)

- เตรียมโดย เติม
1. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 1.18) 100 มิลลิลิตร ลงในเอทานอล 800 มิลลิลิตร และเจือจางด้วยเอทานอล จนมีปริมาตรเป็น 1 ลิตร
 2. ละลายเคอร์คูมิน 0.25 กรัม และกรดซาลิไซลิก 10 กรัม ในสารละลายตามข้อ (1) 100 มิลลิลิตร

วิธีทดสอบ

พ่นหรือทาสารละลายตาม ที่ภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบ เนื้อไม้ที่บริเวณพื้นที่หนึ่งในเก้า ส่วนของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ ก-5 จะต้องปรากฏเป็นสีแดง จึงจะถือว่ามีการรักษาเนื้อไม้แล้ว หากปรากฏเป็นสีเหลืองให้ถือว่ายังไม่มีการรักษาเนื้อไม้



รูป ก-5 ลักษณะของชิ้นไม้ทดสอบ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 น้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัด

ตารางที่ ข-1. สมบัติของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้น

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
pH	7.95	7.94	7.96
สี (ADMI)	1009	1020	1010
ความเข้มข้นของกรดบอริก (g/L)	9.66	9.71	9.68
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)	2798.4	2798.4	2868.5

ข-2 อัตราการไหลของโอโซนปริมาณและโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ตารางที่ ข-2.1 อัตราการไหลของโอโซน

ครั้งที่	อัตราการไหลของโอโซน (L/min)	
	ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยา	หลังออกจากถังปฏิกิริยา
1	1.12	3.22
2	1.08	3.57
3	1.15	3.39
4	1.09	3.40
5	1.15	3.29

หมายเหตุ วัดอัตราการไหลที่อุณหภูมิ 30°C และความดันบรรยากาศที่ 1,006 hPa

ตารางที่ ข-2.2 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม)			อัตราการผลิตโอโซนที่ได้จาก เครื่องผลิต (มก./นาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	30.0	27.60	25.92	2.78±0.21
20	69.84	60.48	67.44	3.30±0.24
30	101.76	105.12	106.56	3.48±0.08
40	146.88	138.0	135.6	3.50±0.15
50	154.56	166.08	168.98	3.26±0.15
60	186.0	192.0	196.8	3.19±0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-3 ปริมาณการละลายน้ำของก๊าซโอโซน

ตารางที่ ข-3.1 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำประปา

เวลา (นาที)	ปริมาณ โอโซนที่ผลิต ได้ (มก.)	ปริมาณโอโซนที่ไม่ละลายน้ำ (มิลลิกรัม)			ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำ ต่อปริมาตรน้ำ 500 มล. (มก./นาที)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	32.97	14.4	12	16.8	1.86±0.24
20	65.94	29.28	29.04	31.44	1.80±0.07
30	98.91	46.08	48.48	50.64	1.68±0.08
40	131.88	60.96	58.56	62.64	1.78±0.05
50	164.85	72.48	69.84	72.48	1.86±0.03
60	191.6	89.04	91.68	90.24	1.79±0.02

ตารางที่ ข-3.2 ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำยาโบราณ

เวลา (นาที)	ปริมาณ โอโซนที่ผลิต ได้ (มก.)	ปริมาณโอโซนที่ไม่ละลายน้ำ (มิลลิกรัม)			ปริมาณโอโซนที่ละลายน้ำ ต่อปริมาตรน้ำ 500 มล. (มก./นาที)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	32.97	13.68	12.72	12.00	2.02±0.08
30	98.91	39.36	37.20	35.04	2.04±0.07
60	197.81	92.16	87.84	82.56	1.84±0.08
90	296.72	101.52	109.20	96.96	2.16±0.07
120	395.63	166.80	162.72	157.68	1.94±0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช-4 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการไอโซเนซัน

ตารางที่ ช-4.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสไอโซเน

เวลา (นาที)	สมบัติของน้ำยาโบรอน									
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		กรดบอริก(mg/L)		การสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD (mg/L)			
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
10	7.95 ± 0.01	7.94 ± 0.01	1013 ± 6.08	445.7 ± 22.65	9.68 ± 0.03	9.69 ± 0.04	2822 ± 40.5	922.9 ± 33.1	2822 ± 40.5	766.9 ± 41.1
30	7.95 ± 0.01	7.97 ± 0.01	1013 ± 6.08	167.3 ± 9.34	9.68 ± 0.03	9.67 ± 0.05	2822 ± 40.5	732.3 ± 46.0	2822 ± 40.5	710.4 ± 17.3
60	7.95 ± 0.01	7.99 ± 0.02	1013 ± 6.08	120.7 ± 22.03	9.68 ± 0.03	9.64 ± 0.02	2822 ± 40.5	682.5 ± 35.0	2822 ± 40.5	682.5 ± 35.0
90	7.95 ± 0.01	8.03 ± 0.02	1013 ± 6.08	80.8 ± 8.00	9.68 ± 0.03	9.65 ± 0.01	2822 ± 40.5		2822 ± 40.5	
120	7.95 ± 0.01	8.03 ± 0.03	1013 ± 6.08	69.4 ± 3.41	9.68 ± 0.03	9.66 ± 0.06	2822 ± 40.5		2822 ± 40.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4.2 ผลของพีเอชที่มีผลต่อการบำบัด

pH เริ่มต้น ของน้ำยา ไบรอน	สมบัติของน้ำยาไบรอน											
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		กรดบอริก(mg/L)		การสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD (mg/L)					
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด				
3	3.02±0.02	2.97 ± 0.08	919.9 ± 1.41	55.65 ± 3.02	9.67 ± 0.04	9.65 ± 0.04	2593 ± 0	677.3 ± 39.84				
5	5.07 ± 0.02	5.01 ± 0.11	981.1 ± 2.03	67.92 ± 7.32	9.61 ± 0.04	9.63 ± 0	2617 ± 41.01	690.6 ± 23.00				
7	7.06 ± 0.04	7.24 ± 0.12	995.2 ± 3.70	78.24 ± 5.87	9.63 ± 0.00	9.65 ± 0.04	2688 ± 41.01	717 ± 39.84				
ไม่รับ pH	7.94 ± 0.01	7.99 ± 0.01	1013 ± 3.23	80.01 ± 3.65	9.65 ± 0.04	9.67 ± 0.04	2735 ± 0.00	743.7 ± 46.00				
9	9.03 ± 0.03	9.01 ± 0.08	1007 ± 3.94	91.96 ± 3.57	9.24 ± 0.04	9.22 ± 0.04	2771 ± 41.01	757.0 ± 39.84				

ตารางที่ ข-4.3 ผลของภาระสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD ที่มีผลต่อการบำบัด

COD เริ่มต้นของ น้ำยาไบรอน	สมบัติของน้ำยาไบรอน											
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		กรดบอริก (mg/L)		COD (mg/L)					
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด				
2284 ± 47.7	3.03 ± 0.05	2.98 ± 0.06	765.9 ± 3.68	45.11 ± 3.04	7.73 ± 0.04	7.75 ± 0.04	2078 ± 46.7	419.84 ± 22.7				
2504 ± 47.7	3.02 ± 0.03	2.93 ± 0.08	811.3 ± 3.84	50.99 ± 4.22	8.47 ± 0.04	8.43 ± 0.04	2186 ± 81.0	498.56 ± 45.4				
2669 ± 47.7	3.01 ± 0.01	2.99 ± 0.08	857.1 ± 6.98	56.76 ± 3.21	8.74 ± 0.04	8.72 ± 0.02	2321 ± 46.7	537.92 ± 22.7				
2752 ± 47.7	3.00 ± 0.02	2.96 ± 0.08	883.0 ± 3.29	58.13 ± 3.48	9.28 ± 0.04	9.26 ± 0.02	2456 ± 46.7	603.52 ± 22.7				
2862 ± 47.7	3.02 ± 0.02	2.95 ± 0.03	922.4 ± 2.98	61.24 ± 3.40	9.71 ± 0.04	9.67 ± 0.04	2510 ± 81.0	669.12 ± 39.4				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-5 ผลการบำบัดน้ำยาโบรอนโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี RSM ในโหมด Uncoded units

หมายเหตุ ปริมาณ COD ในน้ำยาโบรอนที่เจือจางเพื่อให้มีค่า

2284± 47.7 mg/L พบว่าหลังจากการเจือจางแล้วนำไปวิเคราะห์ มีค่า 2205±34.3 mg/L

2669± 47.7 mg/L พบว่าหลังจากการเจือจางแล้วนำไปวิเคราะห์ มีค่า 2662±26.7 mg/L

2752± 47.7 mg/L พบว่าหลังจากการเจือจางแล้วนำไปวิเคราะห์ มีค่า 2789±23.7 mg/L

ตารางที่ ข-5.1 ผลการวิเคราะห์ค่า pH

ลำดับ การ ทดลอง	time (min)	pH เริ่มต้น	CODเริ่มต้น	ค่าpH หลัง การบำบัด	ค่าpH ชุด ควบคุม	ผลต่างระหว่างค่า pHหลังการบำบัด กับค่าpH ชุดควบคุม
1	10	5.03	2789	5.15	5.07	0.08
2	60	5.04	2662	5.17	5.05	0.12
3	60	5.04	2662	5.08	5	0.08
4	120	5.04	2789	5.12	5.08	0.04
5	60	3.03	2789	3.09	3	0.07
6	10	8.00	2662	8.00	8	0.00
7	120	5.03	2205	5.13	5.02	0.11
8	60	8.01	2205	8.00	8.02	0.02
9	10	3.03	2662	3.12	3	0.12
10	60	5.04	2662	5.09	5.05	0.04
11	120	3.03	2662	3.11	3.03	0.08
12	60	3.04	2205	3.18	3.05	0.13
13	120	8.02	2662	8.02	8.05	0.03
14	60	8.02	2789	8.04	8.03	0.01
15	10	5.03	2205	5.14	5.1	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดบอริก

ลำดับ การ ทดลอง	time (min)	pH เริ่มต้น	CODเริ่มต้น	ปริมาณกรดบอริก (g/L)		
				ก่อนบำบัด	หลังการบำบัด	ชุดควบคุม
1	10	5.03	2789	9.30	9.28	9.26
2	60	5.04	2662	8.70	8.74	8.70
3	60	5.04	2662	8.76	8.76	8.74
4	120	5.04	2789	9.26	9.30	9.28
5	60	3.03	2789	9.24	9.28	9.24
6	10	8.00	2662	8.52	8.45	8.43
7	120	5.03	2205	7.82	7.86	7.84
8	60	8.01	2205	7.86	7.84	7.82
9	10	3.03	2662	8.68	8.66	8.64
10	60	5.04	2662	8.64	8.66	8.64
11	120	3.03	2662	8.74	8.76	8.70
12	60	3.04	2205	7.92	7.96	7.92
13	120	8.02	2662	8.72	8.70	8.72
14	60	8.02	2789	9.28	9.24	9.32
15	10	5.03	2205	7.69	7.75	7.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น

ลำดับ การ ทดลอง	time (min)	pH เริ่มต้น	CODเริ่มต้น	ความเข้มข้น (ADMI)		
				ก่อนบำบัด	หลังการบำบัด	ชุดควบคุม
1	10	5.03	2789	982.9	378.7	979.3
2	60	5.04	2662	956.1	85.6	957.6
3	60	5.04	2662	958.1	84.3	955.8
4	120	5.04	2789	996.7	8.5	991.7
5	60	3.03	2789	894.2	45.0	889.4
6	10	8.00	2662	977.4	354.7	974.4
7	120	5.03	2205	879.5	5.0	895.0
8	60	8.01	2205	872.1	63.2	876.2
9	10	3.03	2662	884.2	227.7	880.3
10	60	5.04	2662	971.5	83.6	968.5
11	120	3.03	2662	977.9	4.8	968.1
12	60	3.04	2205	898.2	27.3	869.5
13	120	8.02	2662	908.5	7.0	906.4
14	60	8.02	2789	986.7	90.1	982.3
15	10	5.03	2205	897.5	300.4	894.7
สภาวะที่ เหมาะสม	65	3.59 ±	2247±	873.6 ±	30.29±4.97	871.2±5.45
		0.02	38.08	7.16		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค-1 การละลายน้ำของโอโซน

ตารางที่ ค-1 ผลของการละลายน้ำของโอโซนต่อชั่วโมงต่อลิตรในน้ำประปาเปรียบเทียบกับในน้ำยาโบรอนโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
Solubility	2	Water, Boron solutiob

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Solubility	1	5022	5022.4	25.12	0.000
Error	31	6198	200.0		
Total	32	11221			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการละลายน้ำต่อชั่วโมงต่อลิตรของโอโซนที่ละลายในน้ำประปาและน้ำยาโบรอนโดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Solubility	N	Mean	Grouping
Boron solution	15	240.31	A
Water	18	215.53	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งาน

ค-2.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน

ตารางที่ ค-2.1.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสโอโซนที่เวลาต่างๆกับค่าความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัด โดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	6	0, 10, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
time	5	2037027	407405	2040.37	0.000
Error	12	2396	200		
Total	17	2039423			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างโดยวิธี

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
0	3	1013.00	A
10	3	445.7	B
30	3	167.27	C
60	3	120.7	D
90	3	80.76	E
120	3	69.45	E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.1.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสไอโซนที่เวลาต่างๆกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอน
หลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	6	0, 10, 30, 60, 90, 120

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
time	5	0.009319	0.001864	1.40	0.292
Error	12	0.015980	0.001332		
Total	17	0.025299			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง
โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
0	3	9.707	A
10	3	9.6929	A
30	3	9.6723	A
120	3	9.6578	A
90	3	9.65166	A
60	3	9.6434	A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัด

ตารางที่ ค-2.2.1 ผลของของพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดกับความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	5	3.02, 5.07, 7.06, 7.95, 9.03

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	4	2242.5	560.62	22.75	0.000
Error	10	246.4	24.64		
Total	14	2488.9			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนก่อนการบำบัดที่ต่างกัน โดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
9.03	3	91.96	A
7.95	3	80.01	B
7.06	3	78.24	B
5.07	3	67.92	C
3.02	3	55.65	D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.2.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	5	3.02, 5.07, 7.06, 7.95, 9.03

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
pH	4	0.45666	0.114165	110.88	0.000
Error	10	0.01030	0.001030		
Total	14	0.46696			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานก่อนการบำบัดกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
7.95	3	9.6730	A
7.06	3	9.6523	A
3.02	3	9.6523	A
5.07	3	9.632	A
9.03	3	9.2173	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2.3 ผลของภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นวัดในรูป COD

ตารางที่ ค-2.3.1 ผลของภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นกับค่าความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
COD	5	2284, 2504, 2669, 2752, 2862

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
COD	4	492.5	123.12	10.09	0.002
Error	10	122.1	12.21		
Total	14	614.5			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นที่แตกต่างกันกับค่าความเข้มข้นของน้ำยาโบรอนหลังการบำบัดโดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
2862	3	61.24	A
2752	3	58.13	A
2669	3	54.09	A B
2504	3	50.99	B C
2284	3	45.11	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.3.2 ผลของภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดโดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
COD	5	2284, 2504, 2669, 2752, 2862

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
COD	4	6.57204	1.64301	1078.75	0.000
Error	10	0.01523	0.00152		
Total	14	6.58727			

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นกับปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดโดย Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

COD เริ่มต้น	N	Mean	Grouping
2862	3	9.6673	A
2752	3	9.2560	B
2669	3	8.701	C
2504	3	8.4332	D
2284	3	7.7544	E

ตารางที่ ค-2.3.3 ผลของปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนก่อนและหลังการบำบัดที่มีภาระสารอินทรีย์ของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการใช้งานเริ่มต้นคงที่โดยวิธี One-way ANOVA และผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณกรดบอริกที่ COD เริ่มต้นคงที่โดย Fisher Pairwise Comparisons ที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2284 mg/L

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
2284mg/L	1	0.002538	0.002538	2.00	0.230
Error	4	0.005077	0.001269		
Total	5	0.007615			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
ก่อนการบำบัด	3	7.7956	A
หลังการบำบัด	3	7.7544	A

ที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2504 mg/L

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
2504 mg/L	1	0.000001	0.000001	0.00	0.983
Error	4	0.005249	0.001312		
Total	5	0.005250			

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
ก่อนการบำบัด	3	8.4325	A
หลังการบำบัด	3	8.4332	A

ที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2669 mg/L

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
2669 mg/L	1	0.000696	0.000696	0.84	0.411
Error	4	0.003315	0.000829		
Total	5	0.004010			

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
ก่อนการบำบัด	3	8.7417	A
หลังการบำบัด	3	8.7202	A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2752 mg/L

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
2752 mg/L	1	0.000479	0.000479	0.57	0.492
Error	4	0.003349	0.000837		
Total	5	0.003828			

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
ก่อนการบำบัด	3	9.2765	A
หลังการบำบัด	3	9.2587	A

ที่ COD เริ่มต้นเท่ากับ 2862 mg/L

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
2862 mg/L	1	0.002538	0.002538	2.00	0.230
Error	4	0.005077	0.001269		
Total	5	0.007615			

Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
ก่อนการบำบัด	3	9.7085	A
หลังการบำบัด	3	9.6673	A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ค-3 ผลของปริมาณกรดบอริกของน้ำยาโบรอนที่ผ่านการบำบัดจากการใช้วิธีการ
ออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย
วิธี Response Surface Methodology**

ตารางที่ ค-3 ผลของปริมาณกรดบอริกหลังการบำบัดที่ลำดับการทดลองต่างๆ โดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
boric acid	3	ก่อนบำบัด, หลังบำบัด, ชุดควบคุม

Analysis of Variance

No.	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
1	boric acid	2	0.002538	0.001269	1.50	0.296
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.007615			
2	boric acid	2	0.003385	0.001692	0.57	0.593
	Error	6	0.017769	0.002962		
	Total	8	0.021154			
3	boric acid	2	0.000846	0.000423	1.00	0.422
	Error	6	0.002538	0.000423		
	Total	8	0.003385			
4	boric acid	2	0.002538	0.001269	1.50	0.296
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.007615			
5	boric acid	2	0.003385	0.001692	1.33	0.332
	Error	6	0.007615	0.001269		
	Total	8	0.011000			
6	boric acid	2	0.01100	0.005500	1.86	0.236
	Error	6	0.01777	0.002962		
	Total	8	0.02877			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลของปริมาณกรดบอริกหลังการบำบัดที่ลำดับการทดลองต่างๆ โดยวิธี One-way ANOVA

No.	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
7	boric acid	2	0.002538	0.001269	0.60	0.579
	Error	6	0.012692	0.002115		
	Total	8	0.015231			
8	boric acid	2	0.002538	0.001269	1.50	0.296
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.007615			
9	boric acid	2	0.002538	0.001269	1.50	0.296
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.007615			
10	boric acid	2	0.000846	0.000423	1.00	0.422
	Error	6	0.002538	0.000423		
	Total	8	0.003385			
11	boric acid	2	0.005923	0.002962	1.75	0.252
	Error	6	0.010154	0.001692		
	Total	8	0.016077			
12	boric acid	2	0.003385	0.001692	2.00	0.216
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.008461			
13	boric acid	2	0.000846	0.000423	0.50	0.630
	Error	6	0.005077	0.000846		
	Total	8	0.005923			
14	boric acid	2	0.01015	0.005077	1.50	0.296
	Error	6	0.02031	0.003385		
	Total	8	0.03046			
15	boric acid	2	0.005923	0.002962	2.33	0.178
	Error	6	0.007615	0.001269		
	Total	8	0.013538			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology

1. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear

Response Surface Regression: % removal color versus time, pH, COD

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % removal color

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	83.7801	21.6221	3.875	0.003
time	0.2899	0.0457	6.347	0.000
pH	-0.8128	1.0019	-0.811	0.434
COD	-0.0039	0.0080	-0.490	0.634

S = 7.11852 PRESS = 1116.35
R-Sq = 78.92% R-Sq(pred) = 57.77% R-Sq(adj) = 73.17%

Analysis of Variance for % removal color

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	2086.28	2086.28	695.43	13.72	0.000
Linear	3	2086.28	2086.28	695.43	13.72	0.000
time	1	2040.61	2041.52	2041.52	40.29	0.000
pH	1	33.52	33.36	33.36	0.66	0.434
COD	1	12.16	12.16	12.16	0.24	0.634
Residual Error	11	557.41	557.41	50.67		
Lack-of-Fit	9	557.35	557.35	61.93	2037.39	0.000
Pure Error	2	0.06	0.06	0.03		
Total	14	2643.69				

2. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + square

Response Surface Regression: % removal color versus time, pH, COD

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % removal color

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26.0057	138.433	0.188	0.856
time	0.7812	0.057	13.814	0.000
pH	-6.6431	2.371	-2.801	0.023
COD	0.0464	0.112	0.413	0.690
time*time	-0.0037	0.000	-9.018	0.000
pH*pH	0.5147	0.209	2.468	0.039
COD*COD	-0.0000	0.000	-0.444	0.668

S = 2.36928 PRESS = 179.840
R-Sq = 98.30% R-Sq(pred) = 93.20% R-Sq(adj) = 97.03%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance for % removal color

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	2598.78	2598.78	433.13	77.16	0.000
Linear	3	2086.28	1151.66	383.89	68.39	0.000
time	1	2040.61	1071.23	1071.23	190.83	0.000
pH	1	33.52	44.05	44.05	7.85	0.023
COD	1	12.16	0.96	0.96	0.17	0.690
Square	3	512.50	512.50	170.83	30.43	0.000
time*time	1	476.17	456.55	456.55	81.33	0.000
pH*pH	1	35.22	34.18	34.18	6.09	0.039
COD*COD	1	1.11	1.11	1.11	0.20	0.668
Residual Error	8	44.91	44.91	5.61		
Lack-of-Fit	6	44.85	44.85	7.47	245.91	0.004
Pure Error	2	0.06	0.06	0.03		
Total	14	2643.69				

3. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + interaction

Response Surface Regression: % removal color versus time, pH, COD

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % removal color

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	81.1694	84.3701	0.962	0.364
time	0.1420	0.6234	0.228	0.826
pH	0.4259	13.4932	0.032	0.976
COD	-0.0008	0.0325	-0.026	0.980
time*pH	0.0163	0.0295	0.550	0.597
time*COD	0.0000	0.0002	0.102	0.921
pH*COD	-0.0009	0.0052	-0.169	0.870

S = 8.17314 PRESS = 3669.40
R-Sq = 79.79% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 64.63%

Analysis of Variance for % removal color

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	2109.29	2109.29	351.548	5.26	0.018
Linear	3	2086.28	13.93	4.642	0.07	0.975
time	1	2040.61	3.47	3.466	0.05	0.826
pH	1	33.52	0.07	0.067	0.00	0.976
COD	1	12.16	0.05	0.045	0.00	0.980
Interaction	3	23.00	23.00	7.668	0.11	0.949
time*pH	1	20.38	20.23	20.231	0.30	0.597
time*COD	1	0.71	0.69	0.694	0.01	0.921
pH*COD	1	1.91	1.91	1.906	0.03	0.870
Residual Error	8	534.40	534.40	66.800		
Lack-of-Fit	6	534.34	534.34	89.057	2929.95	0.000
Pure Error	2	0.06	0.06	0.030		
Total	14	2643.69				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Full quadratic

Response Surface Regression: % removal color versus time, pH, COD

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for % removal color

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	33.93780	129.632	0.262	0.804
time	0.64560	0.174	3.703	0.014
pH	-7.14270	4.219	-1.693	0.151
COD	0.04450	0.104	0.428	0.687
time*time	-0.00371	0.000	-9.753	0.000
pH*pH	0.51140	0.193	2.655	0.045
COD*COD	-0.00001	0.000	-0.465	0.661
time*pH	0.01622	0.008	2.051	0.096
time*COD	0.00002	0.000	0.306	0.772
pH*COD	-0.00019	0.001	-0.134	0.899

S = 2.18770 PRESS = 367.233
 R-Sq = 99.09% R-Sq(pred) = 86.11% R-Sq(adj) = 97.47%

Analysis of Variance for % removal color

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	2619.76	2619.76	291.084	60.82	0.000
Linear	3	2086.28	80.80	26.933	5.63	0.046
time	1	2040.61	65.64	65.643	13.72	0.014
pH	1	33.52	13.72	13.716	2.87	0.151
COD	1	12.16	0.88	0.876	0.18	0.687
Square	3	512.50	510.47	170.157	35.55	0.001
time*time	1	476.17	455.21	455.209	95.11	0.000
pH*pH	1	35.22	33.73	33.730	7.05	0.045
COD*COD	1	1.11	1.04	1.037	0.22	0.661
Interaction	3	20.98	20.98	6.993	1.46	0.331
time*pH	1	20.44	20.13	20.127	4.21	0.096
time*COD	1	0.45	0.45	0.449	0.09	0.772
pH*COD	1	0.09	0.09	0.086	0.02	0.899
Residual Error	5	23.93	23.93	4.786		
Lack-of-Fit	3	23.87	23.87	7.956	261.77	0.004
Pure Error	2	0.06	0.06	0.030		
Total	14	2643.69				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

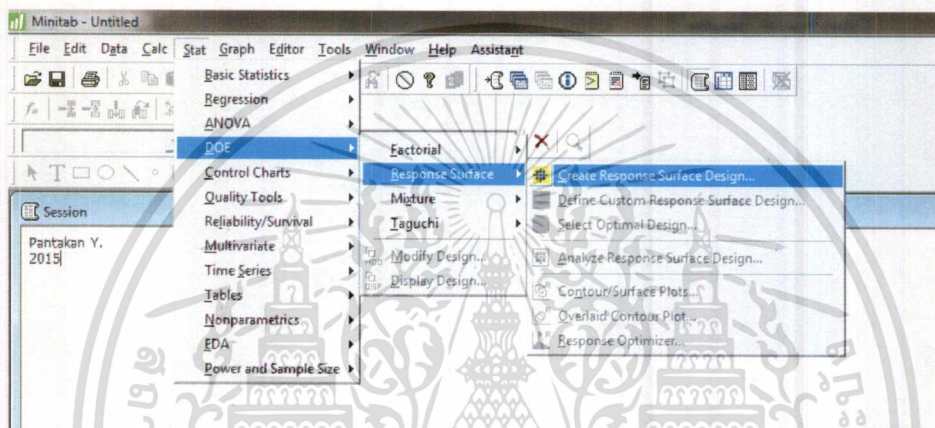
ภาคผนวก จ

วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการวิเคราะห์

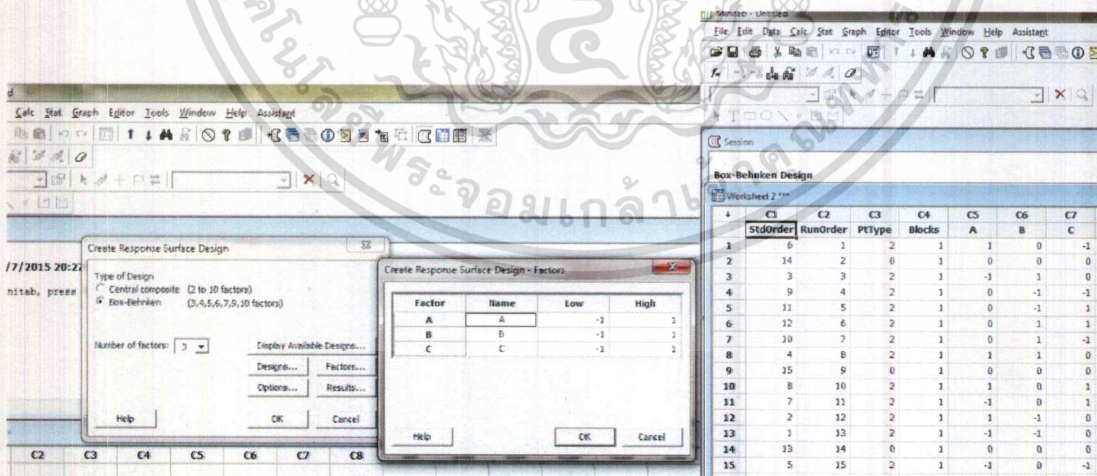
โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบการทดลองของงานวิจัยนี้คือ Minitab 16 Statistical Software มีขั้นตอนการตั้งค่าดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง

1.1 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design...



1.2 เลือก Box-Behnken > Design... > OK > Factor... ใส่ข้อมูลระดับต่ำสุดและสูงสุดที่จะศึกษา > OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางการทดลองใน work sheet

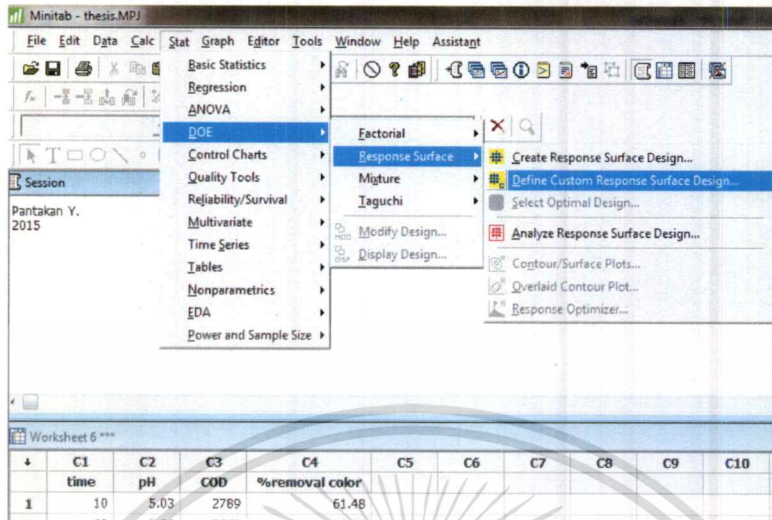


หมายเหตุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ละปัจจัยเพื่อกำหนดขอบเขตต่ำสุด สูงสุด จึงใช้การเข้ารหัส (Code, -1, 0, 1) แต่ในกรณีที่ทราบช่วงข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อ Yield อยู่แล้ว ก็สามารถใช้ ค่าต่ำสุด สูงสุดของข้อมูลที่จะศึกษานั้นๆ เพื่อออกแบบการทดลองได้เลยซึ่งโปรแกรมจะกำหนดค่ากลาง (0) ให้อัตโนมัติ

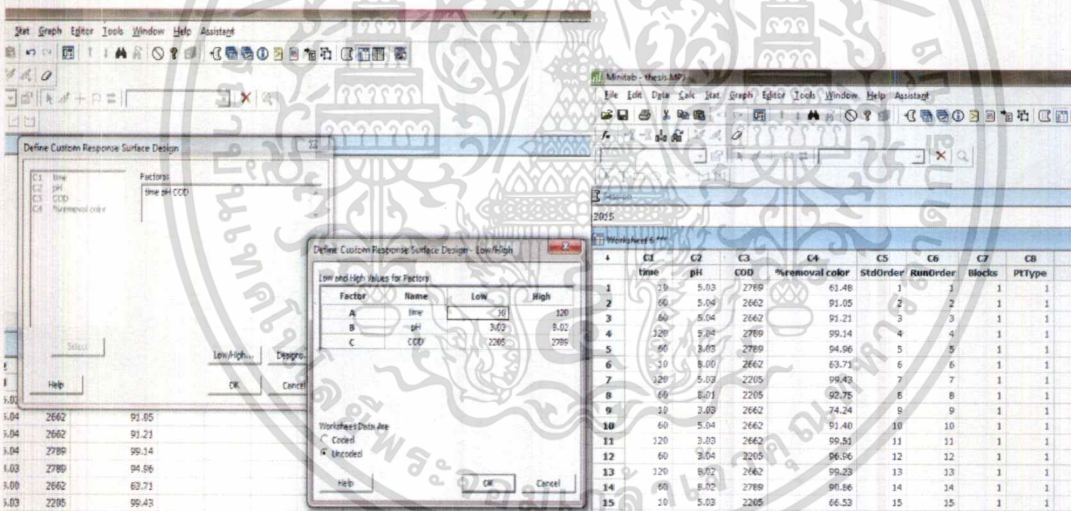
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาสภาวะที่เหมาะสม หลังจากที่ได้ทำการทดลองและทราบค่าผลตอบ (Y) แล้ว

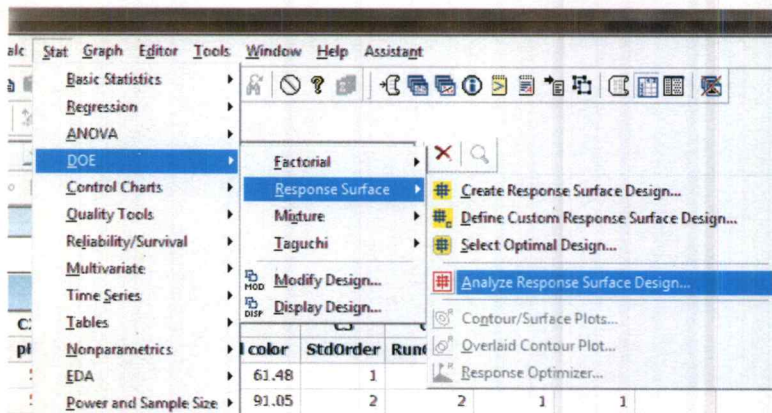
2.1 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Define Custom Response Surface Design..



2.2 เลือก Factors > Low/High > เลือก Uncode เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง > OK แล้วจะปรากฏเป็นตาราง work sheet

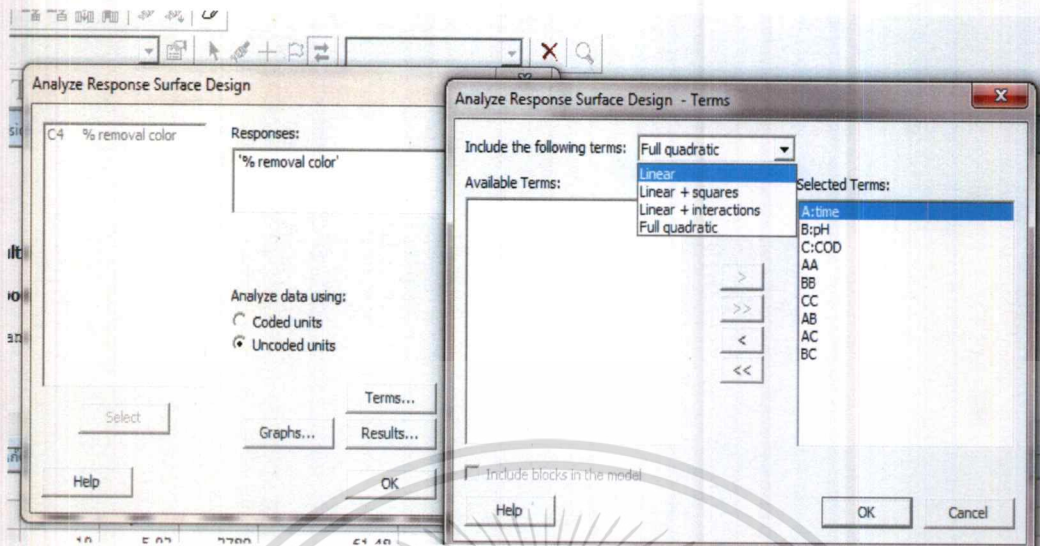


2.3 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design ...



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เลือก Response > เลือก Uncode > Terms เพื่อเลือกแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ > OK



2.5 เลือก Results > Coefficients and ANOVA table > OK > OK แล้วจะปรากฏเป็นตารางผลการวิเคราะห์ในหน้าต่างต่าง Session

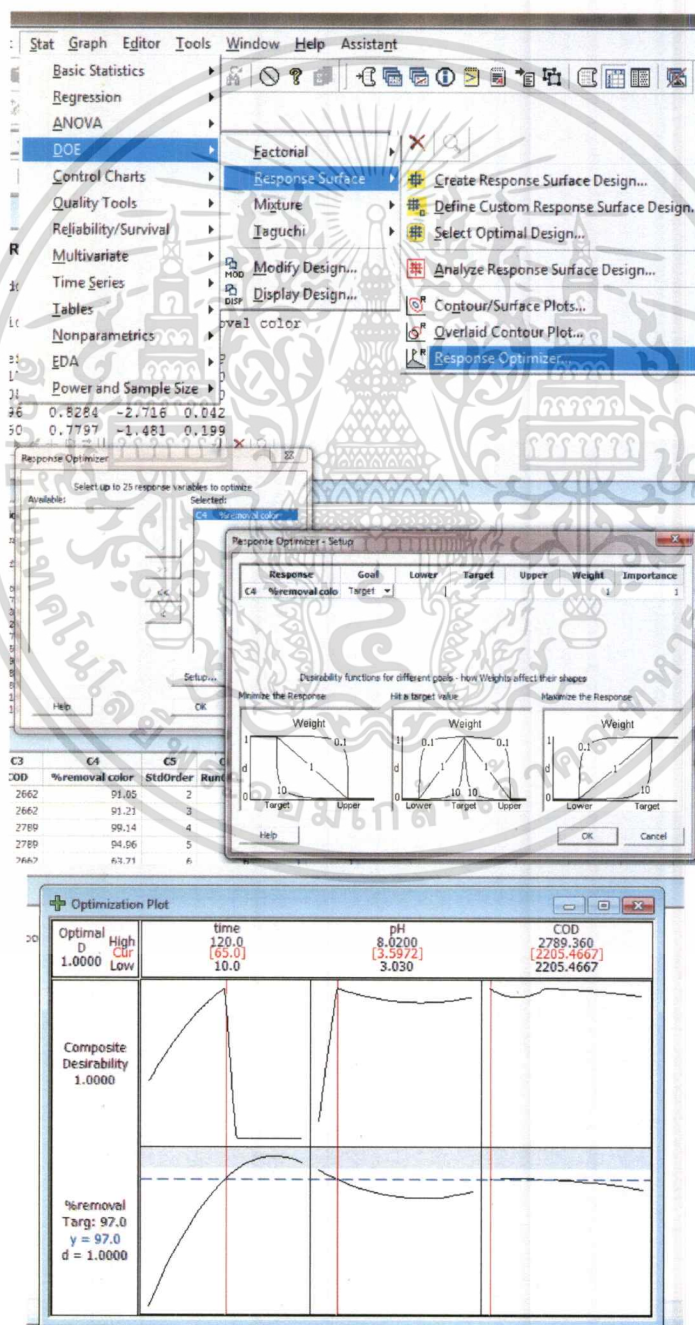
The Session window displays the following regression coefficients:

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	33.6377	129.885	0.259	0.806
time	0.6459	0.174	3.707	0.014
pH	-7.1415	4.218	-1.693	0.151
COD	0.0448	0.104	0.429	0.686
time*time	-0.0037	0.000	-9.751	0.000
pH*pH	0.5114	0.193	2.654	0.045
COD*COD	-0.0000	0.000	-0.467	0.660
time*pH	0.0162	0.008	2.051	0.096
time*COD	0.0000	0.000	0.304	0.773
pH*COD	-0.0002	0.001	-0.134	0.898

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เข้าเมนู Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer > ตั้งค่า Target Lower และ Upper ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ > OK > OK แล้วจะปรากฏสถานะที่เหมาะสม โดย

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่ต้องการ
- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา
- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพันธกานต์ ยนต์ฉิมพลี
วัน เดือน ปีเกิด	23 พฤษภาคม 2533
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี เกรดเฉลี่ย 2.65 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผลงานทางวิชาการ	ได้รับรางวัลชมเชยประเภทการนำเสนอผลงานแบบบรรยาย ในการประชุม วิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 7 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้