

การหาตัวแปรสำคัญเพื่อแยกกลไกจากรูปถ่ายโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ



นางสาว ดลฤดี ยนต์สุวรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF IMPORTANT FACTORS FOR BLACK LIQUOR LIGNIN
SEPARATION BY ELECTROCHEMICAL AND PHYSICAL PROCESS



Miss Dolludee Yonsuwan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาตัวแปรสำคัญเพื่อแยกกลไกการนำน้ำดำโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ

โดย

นางสาว ดลฤดี ยนต์สุวรรณ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

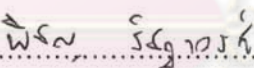
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรัมย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ ไชษิตานนท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.हरษา ปุณณะพยัคฆ์)


..... กรรมการภายนอก
มหาวิทยาลัย
(ดร.ดวงเดือน อากองค์)

ดลฤดี ยนต์สุวรรณ : การหาตัวแปรสำคัญเพื่อแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ. (DETERMINATION OF IMPORTANT FACTORS FOR BLACK LIQUOR LIGNIN SEPARATION BY ELECTROCHEMICAL AND PHYSICAL PROCESS) อ. ที่ปริกษานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 62 หน้า.

น้ำดำเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งมีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก การศึกษาตัวแปรสำคัญในการแยกลิกนินจาก น้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกลิกนินจากน้ำดำ และหาสมการที่สามารถทำนายร้อยละของลิกนินที่เหลืออยู่ในน้ำดำได้ โดยใช้ตัวอย่างน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส จากโรงเยื่อบ้านโป่ง จ.ราชบุรี ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า (X1), ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (X2), อัตราการกวนช้า (X3) และระยะเวลาในการกวนช้า (X4) เมื่อดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆตามที่กำหนดแล้ว จึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล โดยนำผลการทดลองคือร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ ที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมากและวาดกราฟ จากกราฟทำให้สามารถจำแนกกลุ่มผลการทดลองออกได้เป็น 3 กลุ่ม จากนั้นนำผลที่ดีที่สุด กลุ่มที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) พบว่า ระยะเวลาในการกวนช้า ไม่มีความสัมพันธ์กับร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ ต่อจากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองและหาค่าสมการการถดถอย (Regression Analysis) พบว่าสมการ $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$ เป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำจากโรงผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส โรงเยื่อบ้านโป่ง ดังแสดงจากค่าความแปรปรวน และ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพคือ X1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 3 mA/cm^2 , X2 ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 10 นาที และ X3 อัตราการกวนช้า เท่ากับ 10 รอบต่อนาที และที่สภาวะดังกล่าว % lignin removal = 81.75%

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อผู้ผลิต.....*Y. Polude*.....

ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิพนธ์หลัก.....*พิชญ รัชฎาวงศ์*.....

5087133620 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : BLACK LIQUOR / LIGNIN RECOVERY / ELECTROCOAGULATION

DOLLUDEE YONSUWAN : DETERMINATION OF IMPORTANT FACTORS FOR BLACK LIQUOR LIGNIN SEPARATION BY ELECTROCHEMICAL AND PHYSICAL PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PICHAYA TACHDAWONG, Ph.D, 62 pp.

Black liquor is the waste generated by pulp manufacturing process which contains lignin as a core component. Studying of variables to separate lignin from black liquor by electrochemical and physical processes may provide suitable conditions for increase lignin concentration in black liquor and yield equation for prediction of percentage of lignin remaining in black liquor. Here, we used black liquor from semi-chemical pulping process from Banpong pulp mill, Rachaburi province where current density (X1), discharging time (X2), slow mix rate (X3) and slow mix time (X4) were varied. The experiment result was analyzed by sorting from the remaining lignin from low to high and graphs were drawn. The graphs can be divided into three groups. Then, the groups 1 and 2 of the highest performance was used for regression analysis. It was found that the slow mix time was not significant. Repeated group 1 experiments and regression analysis showed that equation $\hat{Y} = -0.14X1 + 1.72X2 + 0.24X3$ was the best for forecasting the remaining percentage of lignin in black liquor from Banpong pulp mill as shown by the variance. The optimal condition for separating lignin from black liquor were current density of 3 mA/cm², discharging time of 10 min. and slow mix rate of 10 rpm. At the optimum conditions, the highest lignin removal was 81.75%.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Field of Study : Environmental Science (Inter-Department) Student's Signature.....*Y. D. Nuda*
Academic Year : 2009 Advisor's Signature.....*พิจราย ทัดดางวงศ์*

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการหากรอบความสามารถในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพในการแยกกลินินจากน้ำดำ วัสดุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดทั้งในแง่ของการจัดการของเสียจากโรงงาน และในแง่ของการลงทุนเพื่อในอนาคตกระบวนการนี้จะสามารถนำไปใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลแห่งความสำเร็จด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาในการให้ความช่วยเหลือแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่ให้คำแนะนำและดูแลลูกศิษย์อย่างดียิ่ง ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบและให้คำแนะนำต่างๆ อย่างดียิ่ง ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.หรรษา ปุณณะพยัคฆ์ และ ดร.ดวงเดือน อางองค์ ที่กรุณาเข้าร่วมเป็นกรรมการในการสอบ ขอขอบคุณบริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) ให้ความอนุเคราะห์ด้านตัวอย่างน้ำดำ

ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ ให้กำลังใจด้วยความรักและความห่วงใย ทำให้ผู้วิจัยมีจิตใจที่มั่นคง มานะ บากบั่น เข้มแข็ง อดทน และมีกำลังใจในการเผชิญอุปสรรคต่างๆ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ท่านเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ผู้ศึกษาค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้ออาทร พร้อมทั้งคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้า และคอยเป็นกำลังใจเสมอมาจนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.1.1 ลิกนิน (Lignin)	3
2.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping Process)	4
2.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อของบริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน).....	5
2.1.4 น้ำดำ (Black Liquor).....	6
2.1.5 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry)	7
2.1.6 กระบวนการ Coagulation – Flocculation	7
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	13
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	13
3.2 การเตรียมรีเอเจนต์.....	13
3.3 วิธีการทดลอง.....	14
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	16

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	17
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำ.....	17
4.2 ผลการทดลองเมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ	20
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และอิทธิพลของแต่ละตัวแปร	23
4.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์การถดถอย	23
4.3.2 วิเคราะห์โดยใช้กราฟสามมิติ.....	24
4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีเรียงลำดับและจัดกลุ่ม	31
4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์การถดถอย	35
4.3.5 การทดสอบสมการ.....	40
4.4 สรุปผลที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	62

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงการกำหนดค่าให้กับตัวแปร X1, X2, X3 และ X4.....	15
ตารางที่ 4.1	แสดงลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำ.....	18
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำที่ปรับ pH.. และน้ำดำที่ไม่ได้ปรับ pH	19
ตารางที่ 4.3	แสดงร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ..... เมื่อผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ	20
ตารางที่ 4.4	แสดงการเรียงลำดับข้อมูลร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ..... จากน้อยไปมาก	31
ตารางที่ 4.5	แสดงการแบ่งกลุ่มของร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ.....	34
ตารางที่ 4.6	แสดงกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์.....	36
ตารางที่ 4.7	แสดงค่า R^2 จากการวิเคราะห์ regression ของข้อมูลในตารางที่ 4.6	37
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ regression.....	38
ตารางที่ 4.9	แสดงผลการคำนวณหาความแปรปรวนของสมการ.....	39
ตารางที่ 4.10	แสดงการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองซ้ำ.....	40
ตารางที่ 4.11	แสดงร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำจากการทำการทดลองซ้ำ.....	41
ตารางที่ 4.12	แสดงผลการแทนค่าตัวแปรในสมการ.....	42


 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมีของ..... บริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน)	6
รูปที่ 3.1	Experimental set up.....	15
รูปที่ 4.1	แสดงการตกตะกอนของน้ำดำเมื่อทิ้งไว้ข้ามคืน.....	17
รูปที่ 4.2	แสดงการเกิดฟองเมื่อเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น.....	18
รูปที่ 4.3	แสดงกราฟร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ.....	22
รูปที่ 4.4	แสดงกราฟสามมิติของ X1, X2 และ Y.....	24
รูปที่ 4.5	แสดงกราฟสามมิติของ X1, X3 และ Y.....	25
รูปที่ 4.6	แสดงกราฟสามมิติของ X1, X4 และ Y.....	26
รูปที่ 4.7	แสดงกราฟสามมิติของ X2, X3 และ Y.....	27
รูปที่ 4.8	แสดงกราฟสามมิติของ X2, X4 และ Y.....	28
รูปที่ 4.9	แสดงกราฟสามมิติของ X3, X4 และ Y.....	29
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงการเรียงลำดับจากน้อยไปมากของร้อยละ..... ของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ	33
รูปที่ 4.11	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลทดลองที่วิเคราะห์จริง.....	44
รูปที่ 4.12	แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลทดลองที่ควรนำไปใช้.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอัตราการบริโภคกระดาษต่อคนทั้งประเทศไทยและประเทศต่างๆ ทั่วโลก มีปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับในอดีต เนื่องจากกระดาษถูกนำมาเป็นองค์ประกอบในการใช้ชีวิตประจำวันมากขึ้น อัตราการบริโภคกระดาษของคนไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ภาวะการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ ปี 2549 มีปริมาณการผลิต 0.9 และ 3.5 ล้านตัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปีก่อนเพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 6.9 และ 2.8 ตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม, 2550) อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษจึงเติบโตอย่างรวดเร็ว และอุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐาน ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ นอกจากนี้อัตราการบริโภคกระดาษยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเจริญก้าวหน้าทางสังคมและการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศได้เป็นอย่างดีอีกด้วย เทคโนโลยีในการผลิตกระดาษที่ดีสามารถผลิตกระดาษคุณภาพซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายก็เป็นปัจจัยในการบริโภคกระดาษให้เพิ่มมากขึ้นด้วย การผลิตกระดาษสามารถทำได้ตั้งแต่เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรืออุตสาหกรรมในครัวเรือน ไปจนถึงโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ผลิตได้มากกว่าหนึ่งล้านตันต่อวัน

เมื่ออัตราการผลิตกระดาษเพิ่มมากขึ้น ของเสียที่เกิดจากการผลิตเป็นอีกหนึ่งตัวแปรตามที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ น้ำดำ (Black liquor) คือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และเพิ่มความยุ่งยากให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำดำ มีลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 12 – 20% ถือเป็นปริมาณที่ไม่มาก แต่เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำดำที่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยรวมแล้วถือว่าเป็นปริมาณที่มีนัยสำคัญ จึงมีผู้คิดค้นวิธีการในการแยกลิกนินออกจากน้ำดำโดยวิธีการแยกนั้นมีหลายแนวทางด้วยกัน แต่ละแบบมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันออกไป และลิกนินที่แยกได้จากน้ำดำสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นหรือเป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอื่นๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้จะเป็นการลดปริมาณของเสียแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำดำที่มาจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส จากโรงเยื่อบ้านโป่ง จ.ราชบุรี
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลในการแยกกลินินจากน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส ได้แก่
 - a) ปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current Density)
 - b) ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Discharging Time)
 - c) อัตราการกวนช้า (Slow Mix Rate)
 - d) ระยะเวลาในการกวนช้า (Slow Mix Time)
3. สรุปผลที่เหมาะสมในการแยกกลินินจากน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมียูคาลิปตัสโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. น้ำดำที่ใช้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงเยื่อบ้านโป่ง (Banpong Pulp Mill) อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ซึ่งผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส
2. ใช้ขั้วเหล็ก (Iron Electrode) ขนาด 12 x 4 x 0.5 เซนติเมตร ในการทดลอง
3. กำหนด pH เริ่มต้นของตัวอย่างที่ pH = 6
4. ใช้ Multiple Regression ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกกลินินจากน้ำดำโดยกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมียูคาลิปตัส ได้แก่
 - a) ปริมาณกระแสไฟฟ้า
 - b) ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า
 - c) อัตราการกวนช้า
 - d) ระยะเวลาในการกวนช้า
2. ผลการทดลองนำไปสู่การพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืชในไม้เนื้อแข็ง จะมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 17–25 ในไม้เนื้ออ่อนจะมีสัดส่วนประมาณ ร้อยละ 24–32 ในเส้นใย เปลือกลำต้น (bast fibres) เช่น ป่านลินิน ป่านมินลา และปอ มีอยู่เล็กน้อยและแทบจะไม่มีเลย ในเส้นใยฝ้าย ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปผลึก จะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่าง เส้นใย (middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และมีบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใย ด้วย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane หรือสาร ประกอบ hydrocarbon ปัจจุบัน ยังไม่สามารถแยกลิกนินบริสุทธิ์ออกมาได้ ดังนั้น การศึกษาถึงโครงสร้างของลิกนินให้ชัดเจนจึงไม่ อาจทำได้ แต่มีผู้ศึกษาสูตรเคมีซึ่ง วิเคราะห์ได้เป็น $C_9^{8.83}O_{2.37}(OCH_3)_{3^{0.96}}$ โดยมีน้ำหนัก โมเลกุลอยู่ระหว่าง 3,000–30,000

ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางดังนี้

1. ใช้เป็นสารยึดติด (adhesives) เช่น สารกันซึม (sizes) สารเชื่อมติด (binders) และสารเคลือบ (coatings) ในอุตสาหกรรมกระดาษ
2. ใช้ในด้านเคมีภัณฑ์เกษตร (agricultural chemicals) ได้แก่เคมีภัณฑ์ปรับปรุง ดิน เคมีภัณฑ์ควบคุมฝูง ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช ใช้ในการหมัก และเป็น สารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เป็นต้น
3. ใช้ทำเคมีภัณฑ์สำหรับผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ สารพวก ion exchange
4. ใช้ผสมในซีเมนต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ เช่น ช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดี เพิ่ม ความแข็งแรงคงทน
5. ใช้ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน เช่น เป็น drilling fluids และ oil well sealants
6. ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นสารเติมแต่ง สารเร่งปฏิกิริยา สารช่วยให้มีการยึด (elastomer) และสารช่วยให้ความเป็น พลาสติกดีขึ้น (plasticizer)
7. ใช้เป็นสารช่วยกระจาย (dispersing agent) มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลาย อย่างเช่น การกำจัดหมึกในอุตสาหกรรมกระดาษ การชุบเคลือบ และ อุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ การฟอกย้อม เป็นต้น
8. ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมฟอกหนัง และอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย , 2551)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยึดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มี ลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน ไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็ง ไม้ที่มีอายุมาก จะมีปริมาณ ลิกนินมาก ลิกนินในธรรมชาติมีสีน้ำตาล ลิกนินส่วนมากละลายในสารละลายเบส ลิกนินที่แยกได้จากการทดลอง และลิกนินในเชิงพาณิชย์เป็นของแข็งชิ้นเล็กๆ โดยปกติเป็นผงสีน้ำตาล

คุณสมบัติทางกายภาพของลิกนิน

- ความหนาแน่น (Density) ประมาณ 1.3-1.4 g/cm³
 - refractive index = 1.6
 - ลิกนิน อิสระ (Free lignin) ไม่ละลายในน้ำ กรดเข้มข้น และไฮโดรคาร์บอน
 - ลิกนินในทางการค้า (Commercial lignin) จะละลายใน aqueous alkaline solution และบางส่วนละลายใน oxygenated organic compounds และใน amines, ลิกนินไม่ถูกหกลอมละลาย แต่บางส่วนอาจนุ่ม (soften) และทั้งหมด จะ กลายเป็นถ่านเมื่อถูกเผาไหม้
 - Heat combustion ประมาณ 29.5 MJ/kg (12,700 Btu/lb)
- (สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี , 2550)

จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเบื้องต้นของลิกนิน พบว่าโครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ Phenylpropane (C₆ – C₃) มีมวลโมเลกุลประมาณ 184 ต่อหนึ่งโมโนเมอร์

ในอุตสาหกรรมลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ได้อย่างมากมาย ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของลิกนิน เช่น ใช้เป็นสารยึดติด (adhesives), ใช้ผสมในซีเมนต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ เช่น ช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดี เพิ่มความแข็งแรงคงทน นอกจากนี้ ลิกนินที่ได้จากการต้มเยื่อกระดาษสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกด้วย

2.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping Process)

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษนิยมแบ่งตามกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่

1. กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping)

โดยการบดเนื้อไม้ด้วยลูกกลิ้ง (Grinder or Grinding Stone) ขนาดใหญ่ จนเนื้อไม้ละเอียดแล้วนำมาแยกเยื่อออกจากเศษไม้ชิ้นหยาบ ๆ ต้นทุนดำเนินการของกระบวนการนี้ จะต่ำ ผลที่ได้ (Yield) สูงเนื่องจากลิกนินถูกสกัดออกไปน้อยมาก เยื่อที่ได้จึงมีความแข็งแรงต่ำ เหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพต่ำ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์

2. กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping)

การสกัดเยื่อจะใช้สารเคมี เพื่อแยกเซลลูโลสออกมาให้มากที่สุด หรืออีกนัยหนึ่ง เพื่อสกัดเอาลิกนินออกไปให้มากที่สุด บางกรณีจะสกัดเฮมิ - เซลลูโลสออกไปด้วย เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงสูง ผลที่ได้ต่ำเนื่องจากลิกนินส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปเหมาะกับการนำไปผลิตกระดาษคุณภาพชั้นดี แต่ต้นทุนดำเนินการสูง สารเคมีที่ใช้สกัดเยื่อจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ

กระบวนการ เช่น กระบวนการโซดา (Soda Process) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) กระบวนการซัลเฟต (Sulphate Process) จะใช้โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate, NaSO₄) กระบวนการนี้บางครั้งเรียก กระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงที่สุดและกระดาษที่ผลิตจากเยื่อคราฟท์จะเรียก กระดาษคราฟท์ ส่วนกระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite Process) จะใช้สารพวกไบซัลไฟต์ (Bisulphite) และหรือกรดซัลฟิวรัส (Sulphurous acid)

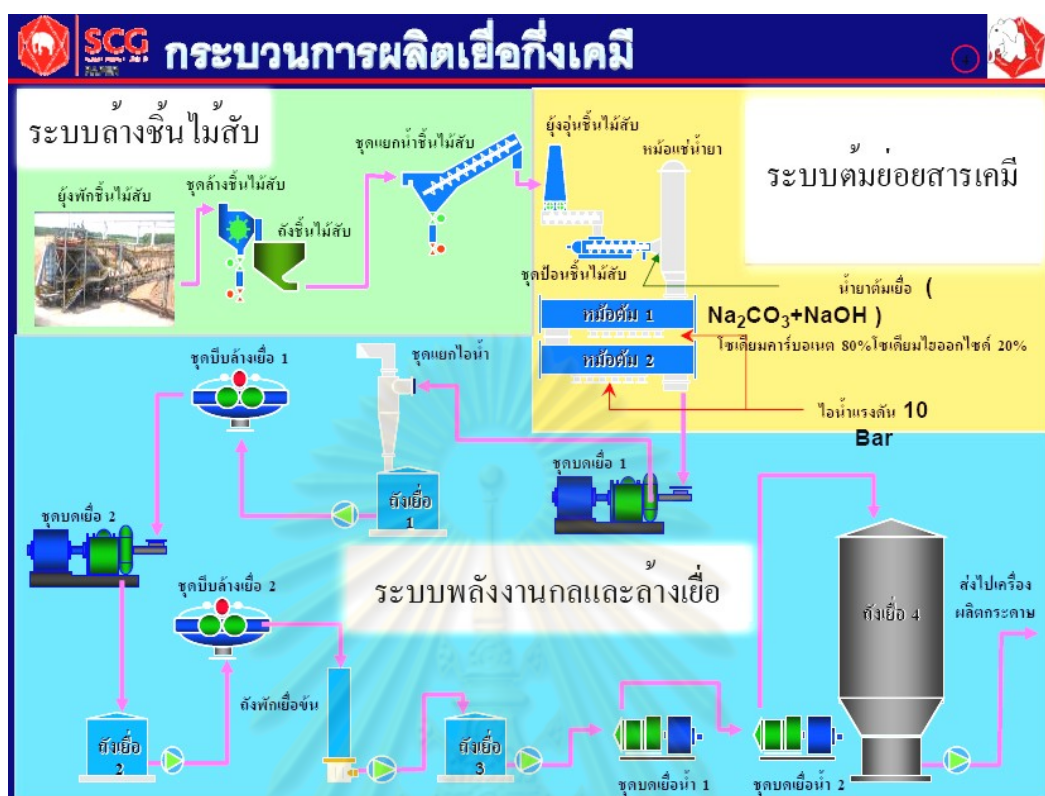
3. กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi – Chemical Pulping)

เป็นกระบวนการ 2 ขั้นตอน โดย ขั้นตอนแรกเป็นการใช้สารเคมีเพื่อทำให้สารที่ยืดเส้นใยอ่อนตัวลงทำให้สามารถสกัดเยื่อออกมาง่ายขึ้นและใช้พลังงานน้อยลง ขั้นตอนที่ 2 เป็นการบดเนื้อไม้หรือวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ผ่านการแช่สารเคมีมาแล้วเพื่อสกัดเยื่อออกมา เยื่อที่ได้จากวิธีนี้จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่สกัดโดยกระบวนการทางกล แต่ก็แข็งแรงน้อยกว่าเยื่อที่สกัดด้วยกระบวนการทางเคมี ผลที่ได้ต่ำกว่ากระบวนการทางกล เนื่องจากลักษณะบางส่วนถูกกำจัดออกไป

2.1.3 กระบวนการผลิตเยื่อของบริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน), โรงเยื่อบ้านโป่ง

สถานที่ตั้งโรงงาน	:	โรงงานบ้านโป่ง ต.ท่าผา อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี
ผลิตภัณฑ์	:	เยื่อกระดาษใยสั้นฟอกขาวยูคาลิปตัสและเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส
กำลังการผลิต	:	เยื่อกระดาษใยสั้นฟอกขาวยูคาลิปตัส 42,500 ตันต่อปี
	:	เยื่อกระดาษใยสั้นกึ่งเคมียูคาลิปตัส 58,000 ตันต่อปี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษซัลไฟด์ของ บริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน)

2.1.4 น้ำดำ (Black Liquor)

น้ำดำหรือน้ำมันยางดำ เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ องค์ประกอบของน้ำดำจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากการมีลิกนินเป็นองค์ประกอบมากๆ จะทำให้เยื่อกระดาษมีสีเข้ม และเมื่อนำไปผลิตผลิตเป็นกระดาษแล้วกระดาษจะมีความแข็งแรงต่ำ ในขั้นตอนของการต้มเยื่อ (Cooking) เพื่อให้เยื่อกระดาษที่ได้มีสีขาว จึงต้องละลายลิกนินออกจากของเสียที่ออกมาจากขั้นตอนการต้มเยื่อจะมีลักษณะเป็นสารละลายชั้นสีดำเข้ม มีลิกนิน เฮมิ-เซลลูโลส และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต้มเยื่อเป็นองค์ประกอบ การวัดความเข้มข้นของลิกนินที่อยู่ในน้ำดำสามารถวิเคราะห์ได้โดยวัด phenolic group ที่เป็นองค์ประกอบของลิกนินใช้ Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 nm. (Wallberg,2003)

2.1.5 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry)

ไฟฟ้าเคมีเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะเกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังสารหนึ่ง และเมื่อมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาเคมีก็จะสามารถทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าได้ ในทำนองกลับกัน พลังงานไฟฟ้าก็สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เช่นกัน ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันนี้เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) โดยสารที่รับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา เรียกว่าตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) และ สารให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (reducing agent)

At anode :



At cathode :



2.1.6 กระบวนการ Coagulation – Flocculation

อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มม. เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง ในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจุจำตัว โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก และพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ ทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพสูง ดังนั้นการทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนจะมีขั้นตอน 2 ขั้นตอน คือ

1. ทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์โดยกลไกวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้

1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

- ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีอิออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์
- ไม่ว่าจะเติมอิออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal)

1.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพนั่นเอง

1.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ เหมือนวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็นฟล็อกได้

1.4 กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้ก้อนเป็นจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆเพื่อทำให้เกิดฟล็อก

2. ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพ แล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกคูลูเลชัน (Flocculation)

2.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัตินี้เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคูลูเลชันเรียกว่า ถังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูลูเลชันแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล

2.2 การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า Perikinetic Flocculation

2.3 การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูลูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆกับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูลูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดัง

กล่าวอาจเกิดฟล็อกคูเลชันมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

2.4 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสมันแบบ Orthokinetic Flocculation แต่อาจเกิดขึ้นซ้ำเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำดังนี้

2.4.1 ใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสมันให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้ถังกรองช่วยสร้างฟล็อกคูเลชันเช่นนี้เรียกว่ากรองสัมผัส (Contact Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล. การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้แต่เป็นการลดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นจึงอาจได้ผลในทางฟล็อกคูเลชันไม่ดีเท่าชั้นทราย

2.4.2 ใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งคือนำเอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์จากนั้นจึงสร้างสัมผัสตามแบบ Orthokinetic Flocculation ไปตามปกติ การใช้ถังตกตะกอนแบบ Solids Contact Clarifier ก็ใช้หลักนี้

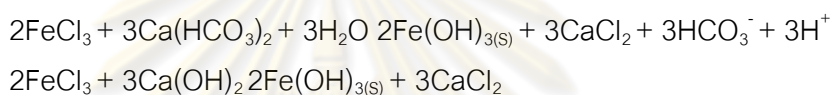
2.5 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

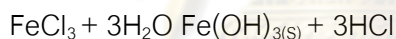
กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์

เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ FeCl_3 anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และมีรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำดิบในรูปของสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)

เฟอริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำ ตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังนี้



การสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้มกรณีนี้นี้เฟอริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่า เมื่อเติมเฟอริกคลอไรด์ให้กับน้ำ จะมีผลึกเฟอริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นดังนี้



ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารเคมีชนิดนี้ คือ สามารถสร้างโคแอกกูเลชันกับน้ำที่มี H_2S ได้ดี เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนได้ทั้ง 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 Coagulation เฟอริกคลอไรด์นี้จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของอนุภาคต่างๆทั้งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุ และทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอ่อนลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นตะกอนเล็กๆขนาดระหว่าง $10^0 - 10^7$ ม. 12

ขั้นตอนที่ 2 Flocculation เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่รวมตะกอนเล็กๆที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 ให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดมากกว่า 10^7 ม. ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของตะกอนที่ใหญ่และหยาบทำให้ง่ายต่อขบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำในขบวนการต่อไป (กองการจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ, 2551)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัชรินทร์ เพิ่มไพศาลสกุล (2550) การเพิ่มความเข้มข้นลิกนินจากน้ำ ต้มเยื่อกระดาษของต้นยูคาลิปตัสจากกระบวนการโซดาด้วยกระบวนการ อัลตราฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นที่ผลิตจาก รีเจเนอเรตเตดเซลลูโลสขนาด MWCO 30 kDa และ 10 kDa พบว่าภายใต้สภาวะการกวนคองที่ เมื่อเวลาการดำเนินการนานขึ้น ฟลักซ์มีค่าลดลง และความดันมีผลต่อฟลักซ์เพียงช่วงแรกเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์กับลิกนินของกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นลิกนินเป็นไปตามแบบจำลอง Gel Polarization (GP) ความเข้มข้นของลิกนินในชั้นเจลมีค่าในช่วง 273.12 – 355.45 กรัมต่อลิตร โดยความต้านทานต่อการไหลเนื่องจากชั้นโพลาไรซ์ (Rp) เป็นความต้านทานหลักที่ทำให้ฟลักซ์ลดลง หลังจากวิเคราะห์ความเข้มข้นของลิกนินด้วย UV-VIS Spectrophotometer พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นรีเทนเทมมีความเข้มข้นของลิกนินมากขึ้นค่าการกักกันเพิ่มขึ้น

ศศิวิมล โชตินันทเศรษฐ์ (2550) ศึกษาการแยกลิกนินจากน้ำยางดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ใช้ตัวอย่างน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม และไอรอนโดยใช้การกวนเร็วเพียงอย่างเดียว 3000 rpm จากการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุดคือ pH = 6 และ %recovery ของ aluminum electrode และ Iron electrode มีค่า 82.86 และ 78% ตามลำดับ

วิชชา พิชัยณรงค์ (2545) ศึกษาการแยกน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจาก ยูคาลิปตัส โดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนลิกนินโดยใช้กรดอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อทดลองกับสารละลายลิกนินที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของ ลิกนินมากที่สุดคือที่ pH 3 โดยตกตะกอนลิกนินได้ 64.66% และเมื่อทดลองกับน้ำเสียที่ได้จากการผลิตเยื่อกระดาษยูคาลิปตัสโดยใช้กระบวนการแบบคราฟท์และผ่านการระเหยน้ำออก 30% พบว่า pH ที่เหมาะสมที่สุดคือที่ pH = 3 เช่นเดียวกันโดยสามารถตกตะกอนลิกนินได้ถึง 94.24%

Kalyani et al (2009) ทดลองเรื่องการกำจัดสีและลดปริมาณ COD ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษด้วยวิธี electrocoagulation พบว่าสามารถกำจัดสีได้ 92% สำหรับขี้เหล็ก และ 84% สำหรับขี้วอลูมินัม และสามารถลดค่า COD ได้มากที่สุด 95% และ 89% สำหรับขี้เหล็ก และขี้วอลูมินัมตามลำดับ

Ugurlu et al (2007) ทำการทดลองเรื่องการกำจัดลิกนินและฟีนอลจากของเสียจากโรงงานผลิตกระดาษด้วยวิธี electrocoagulation โดยทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน, ฟีนอล, COD และ BOD ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างๆ ใช้ electrode 2 ชนิดคือ Al และ Fe จ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 1, 2.5, 5 และ 7.5 นาที พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 77.13 mA และเวลา

7.5 นาที electrode Al จะสามารถกำจัด ลิกนินได้ 80%, ฟีนอล 98%, COD 75% และ BOD 70% ส่วน electrode Fe สามารถกำจัดได้ 92%, 93%, 55% และ 80% ตามลำดับ

Mussatto et al (2007) ทดลองตกตะกอนน้ำดำจาก brewer's spent grain (BSG) จาก Microbrewery of the Engineering College of Lorena ประเทศบราซิล วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษคือต้นข้าวโพดและฟางข้าว โดยทดลองในช่วงความเป็นกรดต่าง 12.56 – 2.15 ผลการทดลองพบว่าเมื่อลดค่าความเป็นกรดต่างจาก 12.56 ลงมาที่ 2.15 จะทำให้ลิกนินสามารถตกตะกอนได้มากถึง 81.43% ของลิกนินที่ละลายอยู่ในน้ำดำ

Adhoum et al (2004) ทำการทดลองการกำจัดสีและ phenolic compound ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกโดยใช้กระบวนการ electrocoagulation โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมในการทดลอง พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมคือที่ $\text{pH} = 4-6$ และพบว่าการเริ่มปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้ามีผลทำให้การใช้เวลาในการกำจัดลดลง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้การกำจัดใช้เวลาน้อยที่สุดและค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดคือที่ 75 mA/cm^2 เมื่อนำตัวอย่างมาผ่านการทดลองพบว่า COD ลดลง 76%, polyphenol ลดลง 91% และสีลดลง 95% เมื่อผ่านกระบวนการทดลอง 25 นาที

Wallberg et al (2003) ทดลองกรองน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบกราฟท์ด้วยเซรามิกเมมเบรน (Ceramic Membrane) น้ำดำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นตัวอย่างน้ำดำจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ Sodra Cell Varo pulp mill ประเทศสวีเดน ซึ่งใช้ไม้สนและต้นสับปะรดเป็นวัตถุดิบในการผลิต ผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิ 70°C และ 90°C ที่ความดันเดียวกันการกรองที่อุณหภูมิ 90°C มีประสิทธิภาพในการกรองมากกว่าที่ 70°C และสามารถกรอง ลิกนินออกมาได้ประมาณ 62 – 65%

Kan et al. (2001) ศึกษาเวลาการกวนเร็วในการ coagulation ของสารละลายดินเหนียวโดยใช้ alum และ PACL ผลการทดลองพบว่าอัตราการกวนเร็วที่เหมาะสมในการจับตัวกันของอนุภาคดินเหนียวโดยใช้ alum 5 mg คือ 200 rpm และใช้เวลา 20 วินาที ส่วน PACL 0.6 mg ใช้อัตราการกวนเร็ว 200 rpm เช่นเดียวกันและเวลาที่เหมาะสมคือ 180 วินาทีขึ้นไป จากการทดลองพบว่าเวลาในการกวนเร็วมีผลต่อการจับตัวของอนุภาคสารละลายดินเหนียว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. UV spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo Spectronic
2. pH meter ยี่ห้อ Mettler Toledo
3. Magnetic stirrer ยี่ห้อ Velp
4. Jar Test ยี่ห้อ Velp
5. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) ยี่ห้อ GW
6. ขั้วเหล็ก ขนาด 12 x 4 x 0.5 เซนติเมตร
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) A.R., Carlo
8. อัลคาไลน์ลิกนิน (Alkali,Lignin) A.R., Aldrich, USA
9. กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) A.R.,Merck, Germany
10. กรดบอริก (Boric Acid 99.5%), Fisher

3.2 การเตรียมรีเอเจนต์

1. สารละลายบอริก 0.1 โมล
ละลายกรดบอริก 6.183 กรัม ลงในน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับ pH ให้เป็น 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายมาตรฐานลิกนิน 1000 ppm
นำอัลคาไลน์ลิกนินมาอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชั่งมา 1 กรัม ปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมลที่เตรียมไว้
3. สารละลายลิกนินมาตรฐาน 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm
ปิเปตสารละลายลิกนิน 1000 ppm มา 1, 2, 4, 6, 8, และ 10 มิลลิลิตรตามลำดับ แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมล
(วิชา พิชัยณรงค์, 2545)

3.3 วิธีการทดลอง

1. การกำหนดตัวแปร

ตัวแปรต้น	X1	ปริมาณกระแสไฟฟ้า / Current Density (mA/cm^2)
	X2	ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า / Discharging Time (min.)
	X3	อัตราการกวนช้า / Slow Mix Time (rpm)
	X4	ระยะเวลาในการกวนช้า / Slow Mix Time (min)
ตัวแปรตาม	Y	ร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานลิกนิน

นำสารละลายมาตรฐานลิกนินที่มีความเข้มข้นต่างๆ มาวัดการดูดกลืนแสงด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยการวาดกราฟระหว่าง ความเข้มข้น และการดูดกลืนแสง จะได้สมการเส้นตรงซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของลิกนินในตัวอย่าง

3. เตรียมตัวอย่างน้ำดำ

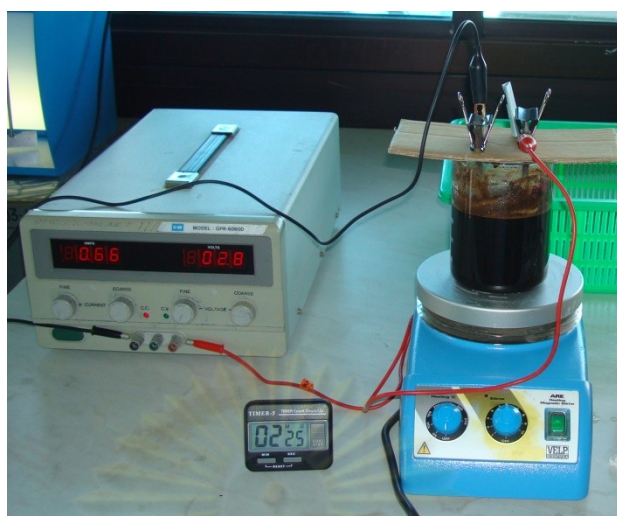
นำน้ำดำมากรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นปรับค่า pH ด้วยกรด H_2SO_4 เข้มข้น โดยการค่อยๆหยดทีละหยดจนกระทั่งมี pH เป็น 6 น้ำดำที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปใช้ในทุกลการทดลอง

4. วัดความเข้มข้นเริ่มต้นของลิกนินในน้ำดำ

นำน้ำดำที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มา 350 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ 600 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ปิดฝาส่วนบนของน้ำดำ 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเปิดมา 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 250 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมล แล้วนำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วย spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นเริ่มต้นของลิกนินโดยแทนค่าในสมการจากข้อ 1

5. การแยกลิกนินจากน้ำดำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกระบวนการทางกายภาพ

นำตัวอย่างน้ำดำที่เตรียมไว้ในข้อ 2 มา 350 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ 600 มิลลิลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) นำขั้วเหล็กต่อเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าทั้งสองด้าน แล้วจุ่มลงในบีกเกอร์ ตาม รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Experimental set up

จากนั้นนำไปกวนซ้ำโดยใช้ Jar Test โดยกำหนดอัตราการกวนซ้ำและระยะเวลาในการกวนซ้ำดังแสดงใน ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการกำหนดค่าให้กับตัวแปร X1, X2, X3 และ X4

Experiment	Current Density (X1) (mA/cm ²)	Discharging Time (X2) (min.)	Slow mix rate (X3) (rpm.)	Slow mix Time(X4) (min.)
1	3	5	10	10
2	3	5	10	20
3	3	5	10	30
4	3	5	30	10
5	3	5	30	20
6	3	5	30	30
7	3	5	60	10
8	3	5	60	20
9	3	5	60	30
10	3	10	10	10
11	3	10	10	20
12	3	10	10	30
13	3	10	30	10
14	3	10	30	20

ตารางที่ 3.1 แสดงการกำหนดค่าให้กับตัวแปร X1, X2, X3 และ X4 (ต่อ)

Experiment	Current Density (X1) (mA/cm ²)	Discharging Time (X2) (min.)	Slow mix rate (X3) (rpm.)	Slow mix Time(X4) (min.)
15	3	10	30	30
16	3	10	60	10
17	3	10	60	20
18	3	10	60	30
19	10	5	10	10
20	10	5	10	20
21	10	5	10	30
22	10	5	30	10
23	10	5	30	20
24	10	5	30	30
25	10	5	60	10
26	10	5	60	20
27	10	5	60	30
28	10	10	10	10
29	10	10	10	20
30	10	10	10	30
31	10	10	30	10
32	10	10	30	20
33	10	10	30	30
34	10	10	60	10
35	10	10	60	20
36	10	10	60	30

ทุกการทดลองเมื่อเสร็จแล้วให้ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นปิเปตส่วนบนของน้ำดำ 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปิเปตมา 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 250 มิลลิลิตรด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมลนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณลิกนินที่เหลือในน้ำดำและเปอร์เซ็นต์ลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. คัดกรองข้อมูลโดยวิธี Ranking
2. วิเคราะห์ผลโดย Multiple Regression Analysis

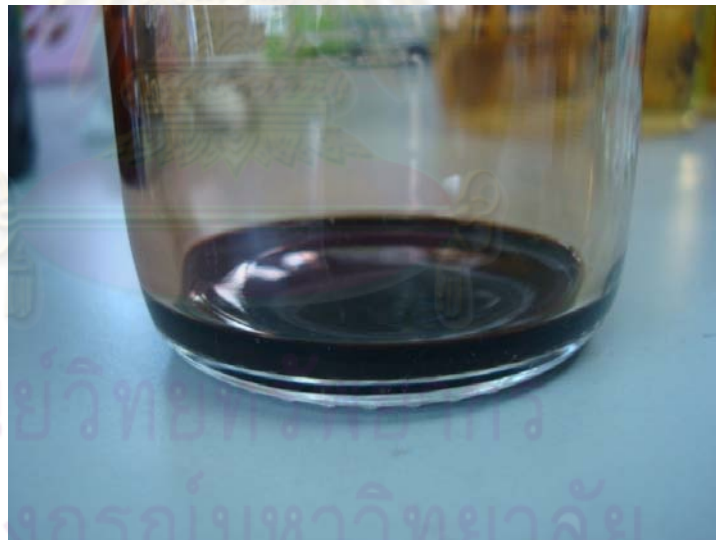
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำ

น้ำดำจากบริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) หรือโรงเยื่อบ้านโป่ง ซึ่งเป็นโรงงานผลิตเยื่อกระดาษใยสั้นฟอกขาวยุคาลิปัตต์และเยื่อกระดาษกึ่งเคมียุคาลิปัตต์ จากการศึกษาลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำดังตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ดังนี้

น้ำดำมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย สีดำเข้ม อุณหภูมิขณะทำการทดลอง (วันที่ 12 พฤศจิกายน 2551) ประมาณ 29.2 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระหว่างการเก็บตัวอย่าง (วันที่ 15 กรกฎาคม 2551) ประมาณ 78.4 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 11.60 ค่า oxidation-reduction potential (ORP) -279 mV ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ไม่สามารถวัดได้เช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงได้เนื่องจากมีสีเข้มมาก เมื่อตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนจะพบตะกอนมีลักษณะชั้นเหนียวสีดำในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการตกตะกอนของน้ำดำเมื่อทิ้งไว้ข้ามคืน

เมื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 6 โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นจะเกิดฟองของก๊าซ H_2 และกลั่นจุนดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการเกิดฟองเมื่อเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น

คำนวณความเข้มข้นเริ่มต้นของลิกนิน โดยนำน้ำดำมาปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 6 แล้วนำมาเจือจาง 1000 เท่าด้วยสารละลายกรดบอริก จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร พบว่าการดูดกลืนแสง (absorbance : ABS) มีค่าเท่ากับ 6.7868 เมื่อนำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานลิกนินจะได้ค่าความเข้มข้นลิกนินเริ่มต้นเท่ากับ 147.32 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะเบื้องต้นของน้ำดำ

ตัวแปร	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
ลักษณะทางกายภาพ	-	มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย เมื่อตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนจะพบตะกอนลักษณะชั้นเหนียวสีดำ เมื่อปรับค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นจะเกิดฟอง และกลิ่นฉุน
สี (Color)	-	สีดำเข้ม
อุณหภูมิขณะทำการทดลอง (Temp.)	°c	29.2
อุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่าง (Temp.)	°c	78.4
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	11.60
ปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอน	mV	-279
ความขุ่น (Turbidity)	µS	over range
การดูดกลืนแสง (Absorbance)	nm	over range
ปริมาณของแข็งเริ่มต้น (Initials Solid)	g/L	147.32

เมื่อทำการทดลองตกตะกอนน้ำดำโดยการปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 6 เทียบกับตัวอย่างน้ำดำที่ไม่ได้ปรับค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าตัวอย่างน้ำดำที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6 ที่สภาวะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำดำที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6 ให้ผลการตกตะกอนที่ดีกว่าในทุกๆ สภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำที่ปรับ pH และน้ำดำที่ไม่ได้ปรับ pH

X1 (Current Density)	X2 (DisCharging Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	%ลิกนินที่เหลือ ในน้ำดำ pH = 6	%ลิกนินที่เหลือ ในน้ำดำที่ไม่ ได้ปรับค่า pH	ผลต่าง (%)
3	5	10	10	25.45	40.87	15.42
3	5	60	30	43.49	69.46	25.97
3	10	10	10	20.58	37.82	17.24
3	10	60	30	51.79	69.46	17.67
10	5	10	10	45.70	82.26	36.56
10	5	60	30	58.61	79.58	20.97
10	10	10	10	29.09	54.42	25.33
10	10	60	30	28.71	54.63	25.92

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองของตัวอย่างน้ำดำที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 6 และตัวอย่างน้ำดำที่ไม่ได้ปรับค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อนำตัวอย่างน้ำดำมาผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ ซึ่งสภาวะที่เลือกมาเป็นช่วงการทดลองที่ครอบคลุมการทดลองทั้งหมด พบว่าตัวอย่างน้ำดำที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6 มีผลการแยกลิกนินจากน้ำดำที่ดีกว่าในทุกสภาวะการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าการแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพนั้นจำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยกรดควบคู่ไปด้วยจึงจะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า จากทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ แสดงให้เห็นว่าลิกนินสามารถตกตะกอนได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ยิ่งค่าความเป็นกรดต่างต่ำมากๆ จะยิ่งตกตะกอนได้มาก เช่นที่ค่าความเป็นกรดต่าง 5 สามารถตกตะกอนลิกนินได้ 73.33% และที่ค่าความเป็นกรดต่าง 1 สามารถตกตะกอนลิกนินได้ 88.97% (วิชา พิษัยณรงค์, 2545) แต่เนื่องจากการปรับค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่าต่ำมากๆ จะต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และจะเป็นการเพิ่มขึ้นต้นทุนในการปรับสภาพน้ำทิ้งก่อนทิ้งลงในบ่อบำบัดอีกด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 6 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 – 9.0 (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) และยังส่งผลดีกับการทดลองอยู่

4.2 ผลการทดลองเมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ

เมื่อนำตัวอย่างน้ำดำมาผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 โดยค่าร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 การทดลองในสภาวะเดียวกัน (3 ซ้ำ) ข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์โดยการวาดกราฟเพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลต่อไป โดยกำหนดให้แกน Y คือค่าร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ เมื่อผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ

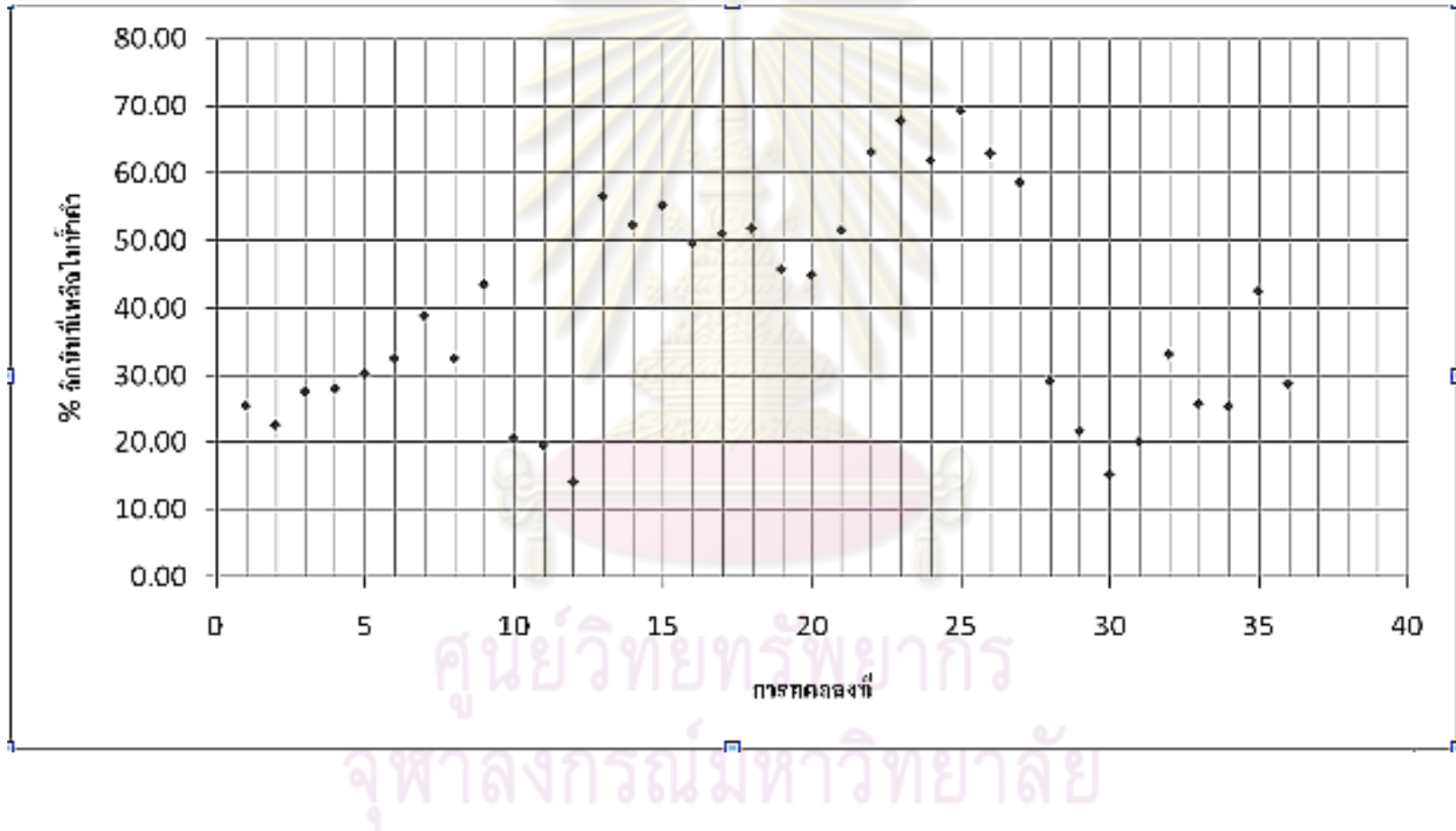
Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisChargin g Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	Y (% Remaining Lignin)
1	3	5	10	10	25.45
2	3	5	10	20	22.58
3	3	5	10	30	27.55
4	3	5	30	10	28.00
5	3	5	30	20	30.21
6	3	5	30	30	32.44
7	3	5	60	10	38.85
8	3	5	60	20	32.45
9	3	5	60	30	43.49
10	3	10	10	10	20.58
11	3	10	10	20	19.61
12	3	10	10	30	14.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ เมื่อผ่านการทดลองที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisChargin g Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	Y (% Remaining Lignin)
13	3	10	30	10	56.55
14	3	10	30	20	52.27
15	3	10	30	30	55.2
16	3	10	60	10	49.58
17	3	10	60	20	51.00
18	3	10	60	30	51.79
19	10	5	10	10	45.70
20	10	5	10	20	44.86
21	10	5	10	30	51.47
22	10	5	30	10	63.09
23	10	5	30	20	67.79
24	10	5	30	30	61.88
25	10	5	60	10	69.32
26	10	5	60	20	62.94
27	10	5	60	30	58.61
28	10	10	10	10	29.09
29	10	10	10	20	21.68
30	10	10	10	30	15.23
31	10	10	30	10	20.12
32	10	10	30	20	33.09
33	10	10	30	30	25.74
34	10	10	60	10	25.33
35	10	10	60	20	42.45
36	10	10	60	30	28.71

เมื่อนำค่าร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ (Y) มาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟร้อยละของลิกนินที่ละลายในน้ำดำ

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และอิทธิพลของแต่ละตัวแปร

4.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์การถดถอย

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.3 ทั้งหมดมาวิเคราะห์การถดถอย พบว่าผลที่ออกมาไม่สามารถนำมาสรุปผลใดๆ ได้ ถึงแม้ว่าค่า R^2 และค่า adjusted R^2 จะมีค่าสูง แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของ X2 (DisCharging Time) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า X2 ไม่มีอิทธิพลต่อค่า Y (% Remaining Lignin) ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยอื่นๆ จึงต้องมีการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีอื่นต่อไป

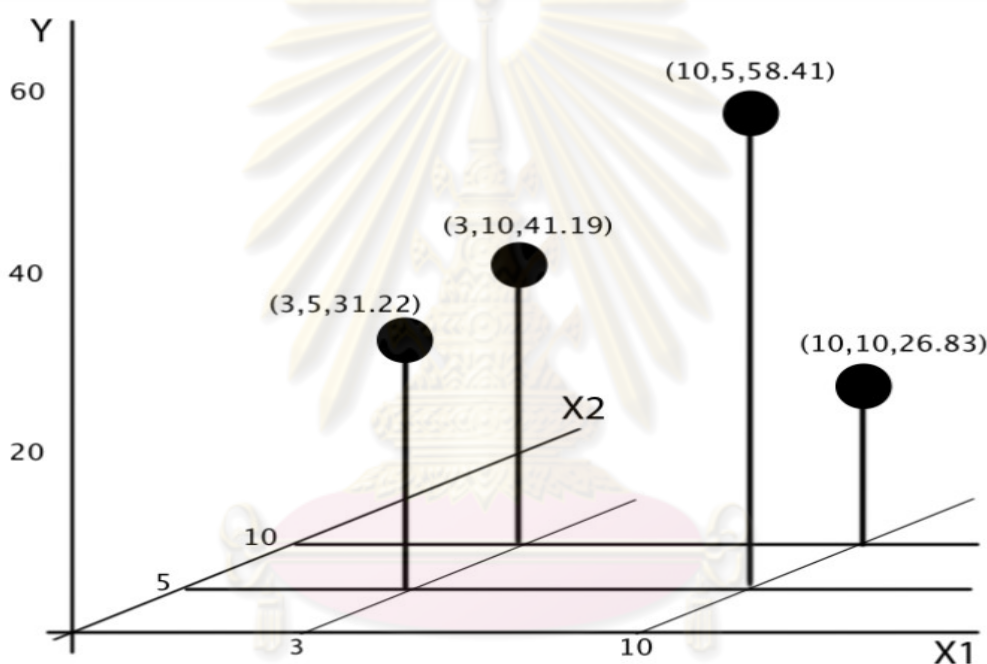
Regression Statistics						
Multiple R	0.93					
R Square	0.87					
Adjusted R Square	0.83					
Standard Error	16.35					
Observations	36.00					
ANOVA						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>	
Regression	4.00	56624.92	14156.23	52.95	0.00	
Residual	32.00	8555.55	267.36			
Total	36.00	65180.47				
	<i>Coefficients</i>	<i>Std Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.00					
X Variable 1	1.85	0.72	2.59	0.01	0.39	3.31
X Variable 2	-0.05	0.84	-0.06	0.95	-1.76	1.66
X Variable 3	0.48	0.12	3.84	0.00	0.22	0.73
X Variable 4	0.51	0.28	1.77	0.09	-0.08	1.09

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 วิเคราะห์โดยใช้กราฟสามมิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้กราฟสามมิติ วิเคราะห์โดยการนำค่าร้อยละของ ลิกนินที่เหลือในน้ำดำมาวาดกราฟที่ละสองตัวแปร โดยใช้ค่าตัวแปร X ที่ใช้จริงในการทดลอง และเฉลี่ยค่า Y (% Remaining Lignin) ที่ได้จากการทดลอง เช่น เมื่อต้องการวาดกราฟของ X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time) และ Y (% Remaining Lignin) ที่ X1 (Current Density) = 3, X2 (DisCharging Time) = 5 นำค่า Y (% Remaining Lignin) ที่ได้จากค่า X 1 และ X2 ที่ค่านั้นมาเฉลี่ย จากนั้นนำค่า X และ Y มาวาดกราฟในโปรแกรม Visio

1. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X1 (Current Density), X2(DisCharging Time) และ Y (% Remaining Lignin)

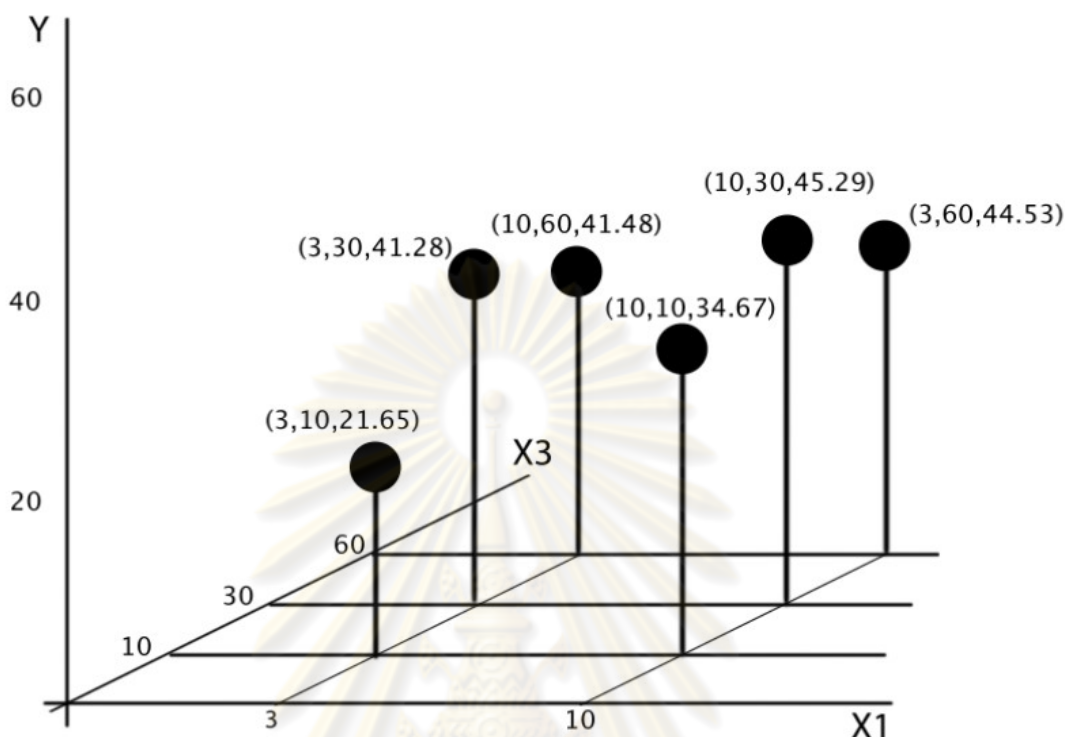


รูปที่ 4.4 แสดงกราฟสามมิติของ X1 (Current Density), X2(DisCharging Time) และ

Y (% Remaining Lignin)

จากรูปที่ 4.4 เมื่อดูที่เส้น X1 (Current Density) = 3 พบว่าจุด X2 (DisCharging Time) = 5 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าที่จุด X2 (DisCharging Time) = 10 แต่เมื่อดูที่เส้น X1 (Current Density) = 10 กลับให้ผลการทดลองที่ตรงกันข้าม เมื่อดูที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 5 พบว่าจุด X1 (Current Density) = 3 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าที่จุด X1 (Current Density) = 10 แต่เมื่อดูที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 10 ก็ให้ผลที่ตรงกันข้ามเช่นเดียวกัน ดังนั้นกราฟสามมิติระหว่างค่า X1 (Current Density), X2(DisCharging Time) และ Y (% Remaining Lignin) ไม่สามารถบอกบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามได้

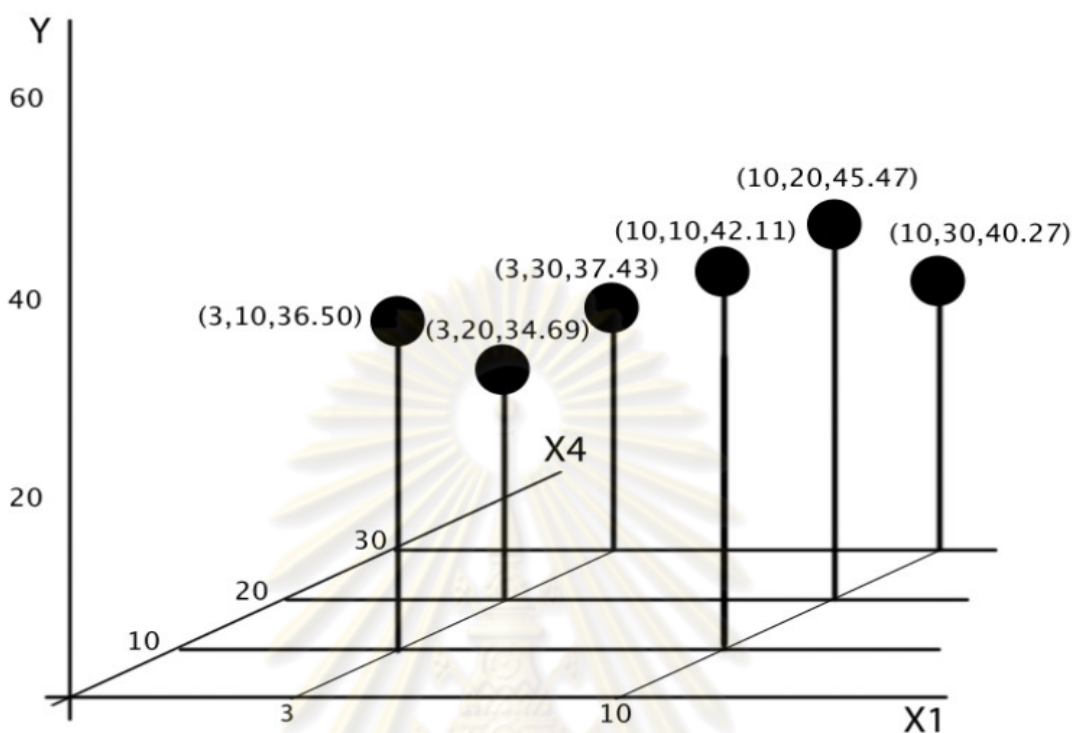
2. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X1 (Current Density), X3 (Slow Mix Rate) และ Y (% Remaining Lignin)



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟสามมิติของ X1 (Current Density), X3 (Slow Mix Rate) และ Y (% Remaining Lignin)

จากรูปที่ 4.5 เมื่อดูที่เส้น X1 (Current Density) = 3 จะพบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) = 10 ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ส่วนที่เส้น X1 (Current Density) = 10 พบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) ก็ให้ผลการทดลองที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน จากกราฟนี้พบว่าแนวโน้มของ X3 (Slow Mix Rate) ที่ทำให้ผลการทดลองดีน่าจะเป็น X3 (Slow Mix Rate) = 10 เมื่อดูที่เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 10 พบว่าจุด X1 (Current Density) = 3 ให้ผลการทดลองดีที่สุด ที่เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 30 และ 60 ก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน ดังนั้นแนวโน้มของ X1 (Current Density) น่าจะเป็น X1 (Current Density) = 3 จึงจะให้ผลการทดลองที่ดีกว่า

3. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X1 (Current Density), X4(Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin)

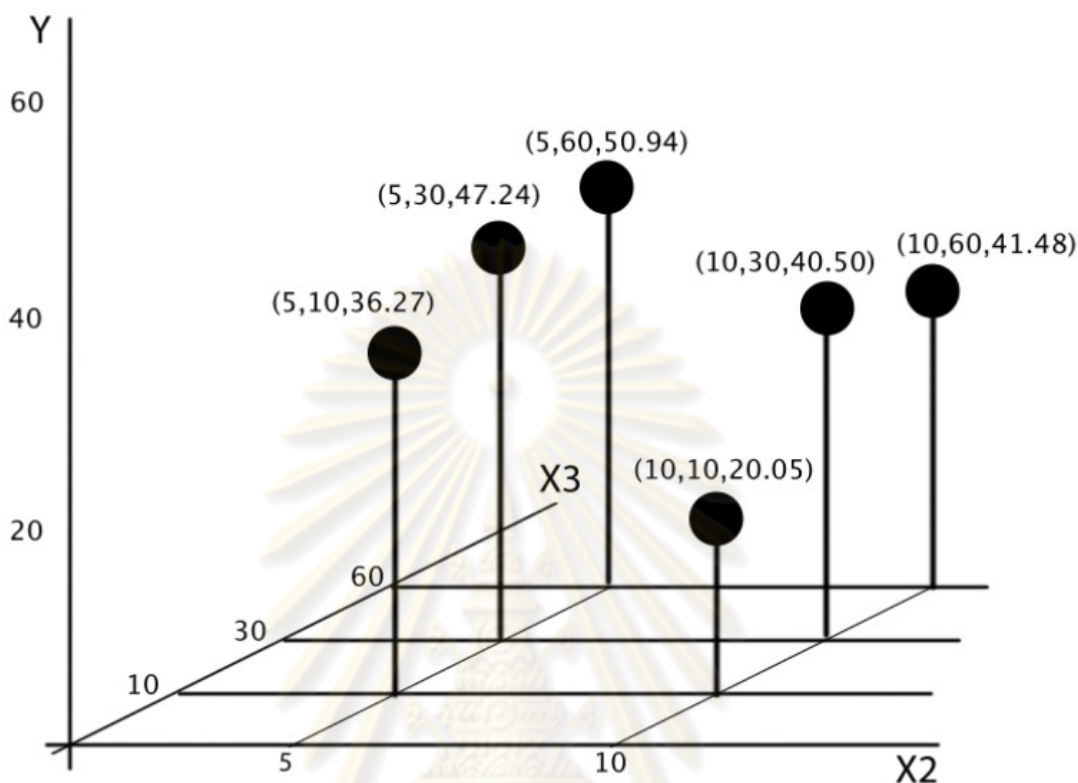


รูปที่ 4.6 แสดงกราฟสามมิติของ X1 (Current Density), X4(Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin))

จากรูปที่ 4.6 พบว่าจากกราฟที่วาดจากค่าของ X1 (Current Density), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin) มีการกระจายตัวและไม่มีแนวโน้มใดๆ จึงไม่สามารถสรุปหรือมองเห็นความน่าจะเป็นของความสัมพันธ์ระหว่าง X1 (Current Density), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin) ได้ หรือแนวโน้มอาจเป็นไปในแนวทางที่ตัวแปร X1 (Current Density) และ X4 (Slow Mix Time) อาจไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

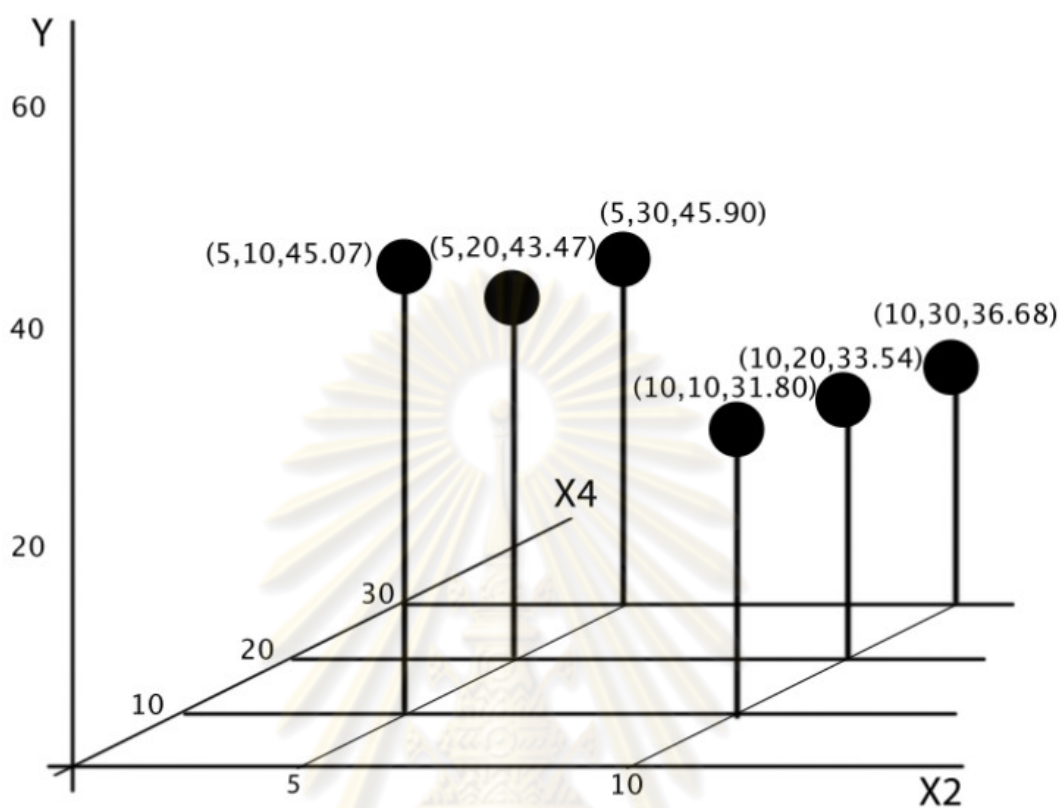
4. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate) และ Y (% Remaining Lignin)



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟสามมิติของ X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate) และ Y (% Remaining Lignin)

จากรูปที่ 4.7 เมื่อดูที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 5 พบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) = 10 ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดและที่ เส้น X2 (DisCharging Time) = 10 ก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน และสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4.5 เมื่อดูที่ เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 10 พบว่าจุด X2 (DisCharging Time) = 10 ให้ผลการทดลองดีกว่าที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 5 และที่จุด X3 (Slow Mix Rate) = 30 และ 60 ก็ให้ผลการทดลองไปในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นที่ X2 (DisCharging Time) = 10 จึงมีแนวโน้มที่จะทำให้ผลการทดลองมีผลที่ดีกว่า X2 (DisCharging Time) = 5

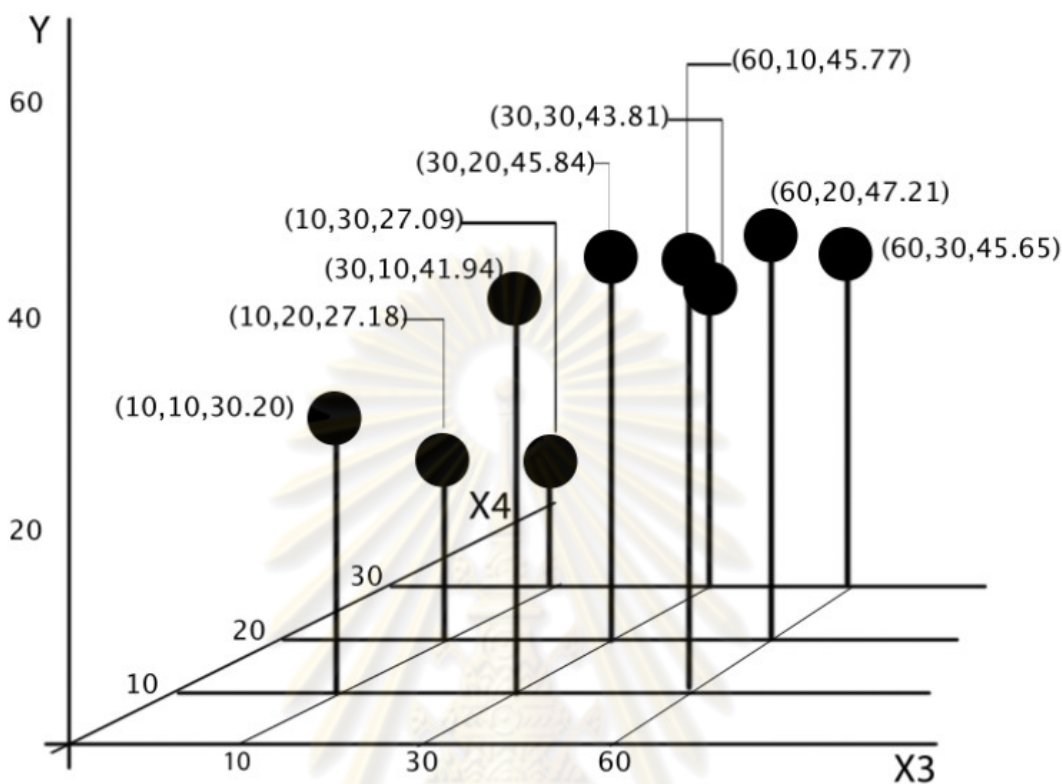
5. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X2 (DisCharging Time), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin)



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟสามมิติของ X2 (DisCharging Time), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin)

จากรูปที่ 4.8 เมื่อดูที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 5 พบว่าจุด X4 (Slow Mix Time) = 20 ให้ผลการทดลองดีกว่าค่าอื่นๆ และที่เส้น X2 (DisCharging Time) = 10 พบว่าจุด X4 (Slow Mix Time) = 10 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่า เมื่อพิจารณาเส้น X4 (Slow Mix Time) = 10 และ 20 พบว่าจุด X2 (DisCharging Time) = 10 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่า แต่ที่เส้น X4 (Slow Mix Time) = 30 พบว่าจุด X2 (DisCharging Time) = 5 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่า จากรูปที่ 4.8 ดังนั้นกราฟสามมิติระหว่างค่า X2 (DisCharging Time), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin) ไม่สามารถบอกบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามได้

6. ดูความสัมพันธ์ระหว่าง X3 (Slow Mix Rate), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin)



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟสามมิติของ X3 (Slow Mix Rate), X4 (Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin)

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาที่เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 10 พบว่า จุด X4 (Slow Mix Time) = 30 ให้ผลการทดลองดีที่สุด แต่ที่เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 30 พบว่าจุด X4 (Slow Mix Time) = 10 กลับให้ค่าดีกว่าที่ 20 และ 30 ที่เส้น X3 (Slow Mix Rate) = 60 พบว่าจุด X4 (Slow Mix Time) = 20 ให้ผลที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับ 10 และ 30 เมื่อพิจารณาที่เส้น X4 (Slow Mix Time) = 10 พบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) = 10 ให้ผลการทดลองดีที่สุด ที่เส้น X4 (Slow Mix Time) = 20 พบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) = 10 ให้ผลการทดลองดีที่สุด และที่เส้น X4 (Slow Mix Time) = 30 พบว่าจุด X3 (Slow Mix Rate) = 10 ให้ผลการทดลองดีที่สุด แนวโน้มของ X3 (Slow Mix Rate) จึงน่าจะเป็นค่า X3 (Slow Mix Rate) = 10 แต่ X4 (Slow Mix Time) ไม่สามารถระบุหรือดูแนวโน้มได้

7. ผลจากการวิเคราะห์ผลด้วยกราฟสามมิติ

จากรูปที่ 4.4 – 4.9 แสดงให้เห็นว่ารูปสามมิติดังกล่าวสามารถบอกได้เพียงแนวโน้มที่น่าจะเป็นไปได้ของผลการทดลอง แต่ไม่สามารถนำไปใช้สรุปผลการทดลองในเชิงปริมาณได้ สาเหตุอย่างหนึ่งก็เนื่องมาจากค่าที่ใช้ในการวาดกราฟสามมิติเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ละ 2 ตัวแปรจาก 4 ตัวแปร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่า Y (% Remaining Lignin) ผิดไปจากค่าที่เกิดขึ้นจริงไปมาก เนื่องจากเป็นการลดมิติของตัวแปรต้นในการทดลองลงจากการเฉลี่ยค่าและหากตัวแปรนั้นเป็นค่าที่สำคัญต่อตัวแปรตาม เช่น X1 หรือ X2 จะยิ่งทำให้กราฟที่ออกมาไม่สามารถแสดงแนวโน้มใดๆได้ เนื่องจากอิทธิพลของค่าตัวแปรนั้นที่ระดับสูงต่ำถูกทำให้หายไปจากการทำค่าเฉลี่ย เมื่อวาดกราฟสามมิติออกมาแล้วจึงไม่สามารถมองเห็นความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีวิเคราะห์แบบอื่นๆ ที่ไม่จำเป็นต้องลดหรือลดมิติของข้อมูลอย่างน้อยกว่าและสามารถยืนยันผลการทดลองได้อย่างถูกต้องมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์จากวิธีการวิเคราะห์ในแบบต่างๆ ก็ควรมีผลการวิเคราะห์ที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการเรียงลำดับและการจัดกลุ่ม

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 พบว่าผลการทดลองที่ออกมา นั้นมีการกระจายของข้อมูลค่อนข้างมาก และกราฟไม่สามารถบอกแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate), X4 (Slow Mix Time) กับ Y (% Remaining Lignin) ได้จึงต้องนำข้อมูลของตัวแปรตามมาจัดเรียงใหม่จากค่าน้อยไปมาก โดยทางผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่า หากค่าตัวแปรตามมีการลดลงที่เด่นชัด น่าจะมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้นที่สำคัญ ดังนั้นหากนำผลการทดลองมาจัดเรียงตามประสิทธิภาพการกำจัดย้อมระบุค่าสำคัญของตัวแปรต้นนั้นๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงการเรียงลำดับข้อมูลของตัวแปรตามจากค่าน้อยไปมาก เพื่อดูว่าภาวะใดมีผลต่อการแยกสีออกจากน้ำดำในระดับใด โดยเมื่อนำข้อมูลมาเรียงจากจากค่าน้อยไปมากแล้วจะทำการแบ่งกลุ่มผลการทดลอง เพื่อนำกลุ่มผลการทดลองไปวิเคราะห์การถดถอย (Regressions Analysis)

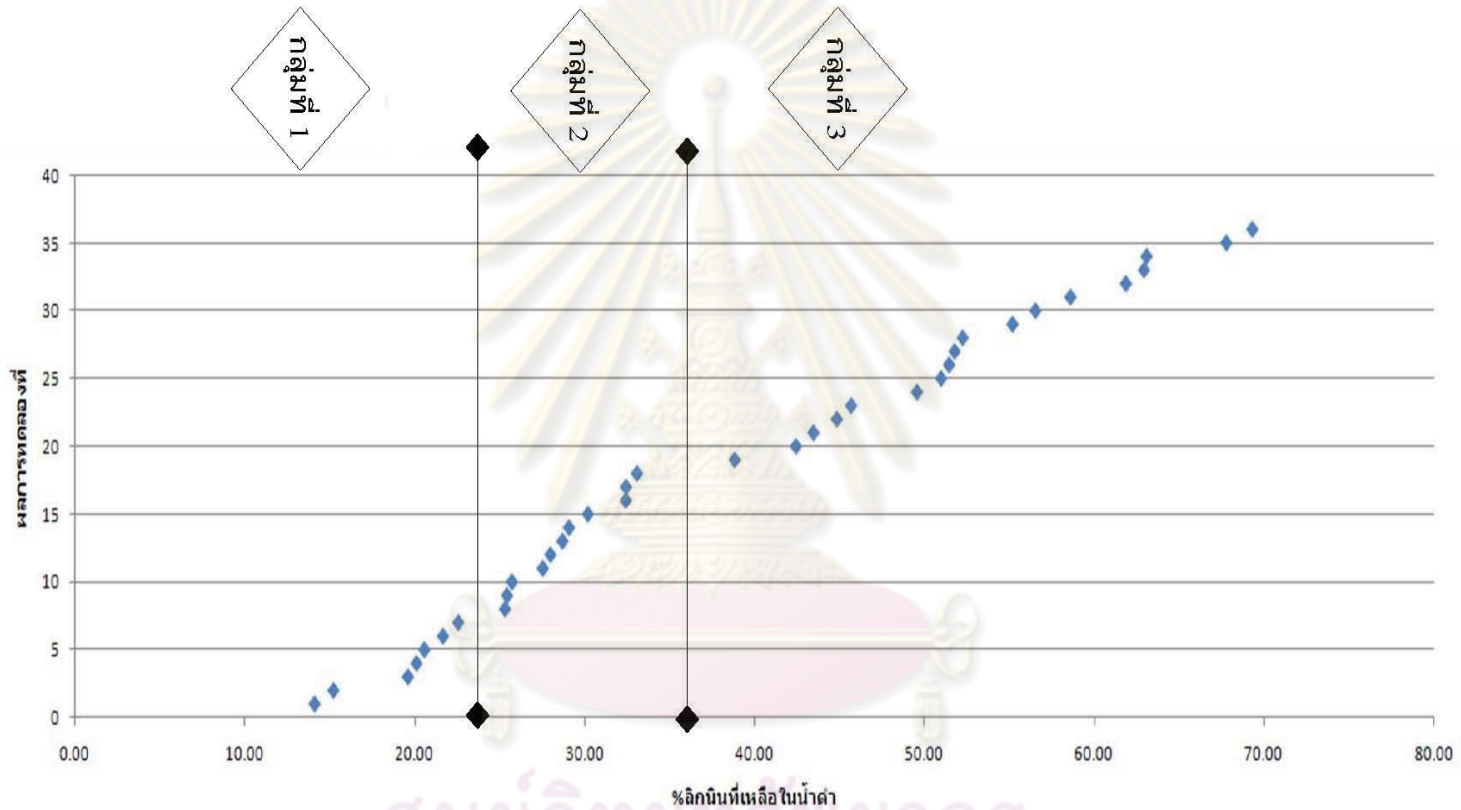
ตารางที่ 4.4 แสดงการเรียงลำดับข้อมูลร้อยละของสีในน้ำดำจากน้อยไปมาก

Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisCharging Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	Y (% Remaining Lignin)
12	3	10	10	30	14.12
30	10	10	10	30	15.23
11	3	10	10	20	19.61
31	10	10	30	10	20.12
10	3	10	10	10	20.58
29	10	10	10	20	21.68
2	3	5	10	20	22.58
34	10	10	60	10	25.33
1	3	5	10	10	25.45
33	10	10	30	30	25.74
3	3	5	10	30	27.55
4	3	5	30	10	28.00
36	10	10	60	30	28.71
28	10	10	10	10	29.09
5	3	5	30	20	30.21
6	3	5	30	30	32.44

ตารางที่ 4.4 แสดงการเรียงลำดับข้อมูลร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำจากน้อยไปมาก (ต่อ)

Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisChargin g Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	Y (% Remaining Lignin)
8	3	5	60	20	32.45
32	10	10	30	20	33.09
7	3	5	60	10	38.85
35	10	10	60	20	42.45
9	3	5	60	30	43.49
20	10	5	10	20	44.86
19	10	5	10	10	45.70
16	3	10	60	10	49.58
17	3	10	60	20	51.00
21	10	5	10	30	51.47
18	3	10	60	30	51.79
14	3	10	30	20	52.27
15	3	10	30	30	55.20
13	3	10	30	10	56.55
27	10	5	60	30	58.61
24	10	5	30	30	61.88
26	10	5	60	20	62.94
22	10	5	30	10	63.09
23	10	5	30	20	67.79
25	10	5	60	10	69.32

จากนั้นนำข้อมูลที่เรียงลำดับแล้วมาเขียนกราฟ เพื่อให้มองเห็นผลการทดลองที่ชัดเจนมากขึ้น โดยกำหนดให้แกน Y เป็นร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ ดังรูปที่ 4.10



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเรียงลำดับจากน้อยไปมากของร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

4.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

จากการจัดกลุ่มในข้อ 4.3.2 พบว่ามี 2 กลุ่มที่น่าสนใจคือ กลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจาก 2 กลุ่มนี้ให้ผลการทดลองในระดับปานกลาง ถึงระดับดี จึงนำทั้ง 2 กลุ่มนี้มาพิจารณาต่อโดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ให้มีค่าดังนี้

Current Density (mA/ cm ²)	=	X1 (Current Density)		
โดยที่ X1 (Current Density) ที่มีค่า 10 กำหนดให้เป็น			+1	ค่าสูง
และ X1 (Current Density) ที่มีค่า 3 กำหนดให้เป็น			-1	ค่าต่ำ
Discharging Time (min.)	=	X2(DisCharging Time)		
โดยที่ X2 (DisCharging Time) ที่มีค่า 10 กำหนดให้เป็น			+1	ค่าสูง
และ X2 (DisCharging Time) ที่มีค่า 5 กำหนดให้เป็น			-1	ค่าต่ำ
Slow Mix Rate (rpm.)	=	X3(Slow Mix Rate)		
โดยที่ X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 60 กำหนดให้เป็น			+1	ค่าสูง
X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 30 กำหนดให้เป็น			0	ค่ากลาง
และ X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 10 กำหนดให้เป็น			-1	ค่าต่ำ
Slow Mix Time (min.)	=	X4(Slow Mix Time)		
โดยที่ X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 30 กำหนดให้เป็น			+1	ค่าสูง
X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 20 กำหนดให้เป็น			0	ค่ากลาง
และ X3 (Slow Mix Rate) ที่มีค่า 10 กำหนดให้เป็น			-1	ค่าต่ำ

การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงกำหนดค่าสูงต่ำให้ตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปร

กลุ่มที่	Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisCharging Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	Y (% Remaining Lignin)
1	12	-1	1	-1	1	14.12
	30	1	1	-1	1	15.23
	11	-1	1	-1	0	19.61
	31	1	1	0	-1	20.12
	10	-1	1	-1	-1	20.58
	29	1	1	-1	0	21.68
	2	-1	-1	-1	0	22.58
2	34	1	1	1	-1	25.33
	1	-1	-1	-1	-1	25.45
	33	1	1	0	1	25.74
	3	-1	-1	-1	1	27.55
	4	-1	-1	0	-1	28.00
	36	1	1	1	1	28.71
	28	1	1	-1	-1	29.09
	5	-1	-1	0	0	30.21
	6	-1	-1	0	1	32.44
	8	-1	-1	1	0	32.45
	32	1	1	0	0	33.09

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.6 ไปวิเคราะห์การถดถอย เพื่อดูความสัมพันธ์ของตัวแปร X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate), X4 (Slow Mix Time) ที่มีต่อ Y (% Remaining Lignin) โดยดูจากค่า R^2 โดยวิเคราะห์ค่าของตัวแปรของทั้งสองกลุ่มที่ละสองตัวคือ (X1,Y), (X2,Y), (X3,Y) และ (X4,Y) จะได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า R^2 จากการวิเคราะห์ regression ของข้อมูลในตารางที่ 4.6

ตัวแปร	R^2
X1 (Current Density),Y (% Remaining Lignin)	0.006
X2(DisCharging Time),Y (% Remaining Lignin)	0.02
X3(Slow Mix Rate),Y (% Remaining Lignin)	0.03
X4(Slow Mix Time),Y (% Remaining Lignin)	0.00002

จากตารางที่ 4.7 พบว่า X4(Slow Mix Time) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.00002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่นๆ หลายเท่า แสดงให้เห็นว่า X4(Slow Mix Time) และ Y (% Remaining Lignin) ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน หรืออาจสรุปได้ว่า X4(Slow Mix Time) ไม่มีผลต่อค่าของ Y (% Remaining Lignin) เลย ส่วน X1 (Current Density) ค่า R^2 ก็มีค่าต่ำเช่นเดียวกันแต่เนื่องจาก X1 (Current Density) ซึ่งเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวอย่างเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำการทดลอง จึงจำเป็นต้องนำมาพิจารณาต่อไป ส่วน X4(Slow Mix Time) จะไม่นำมาพิจารณาอีกเนื่องจากไม่มีผลต่อผลการทดลอง

การหาความสัมพันธ์ของตัวแปร X1 (Current Density), X2(DisCharging Time), X3(Slow Mix Rate) และ Y (% Remaining Lignin)สามารถหาได้โดยการนำมาวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งใช้ค่าจริงของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมาวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์จะแบ่งเป็นกลุ่มที่ 1 กับกลุ่มที่ 1 และ 2 ตามที่ได้แยกกลุ่มไว้ในตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอย จะได้สมการและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ regression

สมการที่	กลุ่ม	สมการ	ตัวแปรในสมการ	R ²	Adj. R ²	สัมประสิทธิ์		
						X1	X2	X3
1	1	$\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$	X1, X2, X3	0.92	0.64	-0.14	1.72	0.24
2		$\hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$	X1, X2	0.92	0.70	0.09	1.91	-
3		$\hat{Y} = 1.02X_1 + 0.74X_3$	X1, X3	0.80	0.56	1.02	-	0.74
4		$\hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$	X2, X3	0.92	0.71	-	1.67	0.21
5	1 และ 2	$\hat{Y} = -0.71X_1 + 2.33X_2 + 0.35X_3$	X1, X2, X3	0.89	0.81	-0.71	2.33	0.35
6		$\hat{Y} = -0.03X_1 + 2.79X_2$	X1, X2	0.82	0.75	-0.03	2.79	-
7		$\hat{Y} = 1.64X_1 + 0.42X_3$	X1, X3	0.82	0.74	1.64	-	0.42
8		$\hat{Y} = 1.84X_2 + 0.33X_3$	X2, X3	0.88	0.81	-	1.84	0.33

โดยสมการที่ 1- 4 คำนวณจากกลุ่มที่ 1, สมการที่ 5 - 8 คำนวณจากกลุ่มที่ 1 และ 2

สมการที่มีค่า R² เข้าใกล้ 1 มากที่สุด 3 อันดับแรกคือ

$$\text{สมการที่ 1} \quad \hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$$

$$\text{สมการที่ 2} \quad \hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$$

$$\text{และ สมการที่ 4} \quad \hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$$

ทั้ง 3 สมการมีค่า adjusted R² ใกล้เคียงกัน ส่วนสมการอื่นๆ มีค่า R² สูงพอสมควร อย่างไรก็ตามค่า R² และค่า adjusted R² ก็ยังไม่ชัดเจนมากพอที่จะสรุปได้ว่าสมการใดที่เหมาะสมในการใช้ทำนายค่าร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ เนื่องจากเมื่อดูที่ค่า R² ของสมการที่ 1, 2 และ 4 มีค่าสูงคือ 0.92 แต่เมื่อดูที่ค่า adjusted R² ของทั้ง 3 สมการกลับไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงต้องนำทั้ง 3 สมการไปวิเคราะห์ต่อโดยการคำนวณหาค่าความแปรปรวนของแต่ละสมการ ทั้งนี้ตามสมมุติฐานที่ว่า สมการที่ดีที่สุดจะมีค่าของการพยากรณ์ที่เกาะกลุ่มหรือมีค่าความแปรปรวนต่ำนั่นเอง โดยคำนวณจาก

$$\text{ความแปรปรวนของสมการ} = \sum (Y - \hat{Y})^2$$

$$\text{ความแปรปรวนของสมการเฉลี่ยต่อตัวอย่าง} = [\sum (Y - \hat{Y})^2] / (N - k)$$

โดยที่ค่า	Y	คือร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำที่ได้จากการทดลอง
	\hat{Y}	คือร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำที่ได้จากการคำนวณโดยการแทนค่า X1 (Current Density), X2(DisCharging Time), X3(Slow Mix Rate) และ X4(Slow Mix Time) ลงในสมการ
	N	คือจำนวนการทดลอง
	K	คือจำนวนตัวแปรในสมการ

การหาความแปรปรวนของสมการเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าจริงจากการทำการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อดูว่าค่าจากการคำนวณแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองมากเท่าใด ความแตกต่างหากมีน้อยย่อมแสดงถึงความแม่นยำของสมการ หรือแสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ถูกเลือกมาใช้นั้นเอง ผลการคำนวณหาความแปรปรวนของสมการสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการคำนวณหาความแปรปรวนของสมการ

สมการที่	กลุ่ม	สมการ	ตัวแปรในสมการ	$\Sigma(Y - \hat{Y})^2$	$[\Sigma(Y - \hat{Y})^2]/(N-k)$
1	1	$\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$	X1, X2, X3	200.97	50.24
2		$\hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$	X1, X2	217.49	43.50
3		$\hat{Y} = 1.02X_1 + 0.74X_3$	X1, X3	1327.88	265.58
4		$\hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$	X2, X3	202.2	40.44
5	1 และ 2	$\hat{Y} = -0.71X_1 + 2.33X_2 + 0.35X_3$	X1, X2, X3	1346.25	89.75
6		$\hat{Y} = -0.03X_1 + 2.79X_2$	X1, X2	2149	134.31
7		$\hat{Y} = 1.64X_1 + 0.42X_3$	X1, X3	2191.94	137.00
8		$\hat{Y} = 1.84X_2 + 0.33X_3$	X2, X3	1399.97	87.50

จากตารางที่ 4.9 พบว่าสมการที่ 1, 2 และ 4 มีความแปรปรวนของสมการน้อยกว่าสมการอื่นๆ อย่างชัดเจน โดยสมการที่ 4 มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 40.44 สมการที่ 2 ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 43.50 และสมการที่ 1 ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 50.24 จึงใช้สมการที่ 1, 2 และ 4 ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแยกลิกนินจากน้ำดำ

4.3.5 การทดสอบสมการและหาสภาวะที่เหมาะสม

จากในข้อ 4.3.3 จะได้สมการออกมา 3 สมการที่คาดว่าจะใช้ในการทำนายร้อยละของลิกนินในน้ำดำ (Y) เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรต้นได้ (X) แต่ก่อนที่จะนำสมการมาใช้ต้องมีการทดสอบก่อนว่าสมการนั้นให้ความถูกต้องแม่นยำอยู่ในขั้นที่ยอมรับได้หรือไม่ การทดสอบสมการสามารถทำได้โดย ทำการทดลองซ้ำ โดยการกำหนดค่าของตัวแปร X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time) และ X3 (Slow Mix Rate) ที่สภาวะต่างๆ นั้น อ้างอิงมาจากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 โดยเลือกจากกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นกลุ่มที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด 7 อันดับแรก จะได้สภาวะในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองซ้ำ

Experiment	X1 (Current Density)	X2 (Discharging Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)
12	3	10	10	30
30	10	10	10	30
11	3	10	10	20
31	10	10	30	10
10	3	10	10	10
29	10	10	10	20
2	3	5	10	20

การทดลองซ้ำจะทำการทดลอง 3 การทดลองที่สภาวะเดียวกัน (3 ซ้ำ) เมื่อทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองที่สภาวะต่างๆ ตามที่กำหนด จะได้ผลร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ผลการทดลองดังกล่าวจะถูกนำไปแทนค่าในสมการที่ 1, 2 และ 4 ตามที่ได้เลือกไว้ เพื่อดูความแปรปรวนของสมการ แล้วสรุปหาสมการที่เหมาะสมในการใช้ทำนายความเข้มข้นของลิกนินในน้ำดำเมื่อเปลี่ยนค่าของตัวแปร X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate) และ X4 (Slow Mix Time) และหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแยกลิกนินจากน้ำดำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ

ตารางที่ 4.11 แสดงร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำจากการทำการทดลองซ้ำ

Experiment	X1 (Current Density)	X2 (DisCharging Time)	X3 (Slow Mix Rate)	X4 (Slow Mix Time)	% ลิกนิน ที่เหลือ	%Removal
12	3	10	10	30	16.91	83.09
30	10	10	10	30	14.82	85.18
11	3	10	10	20	18.94	81.06
31	10	10	30	10	23.68	76.32
10	3	10	10	10	19.43	81.1
29	10	10	10	20	21.36	78.64
2	3	5	10	20	22.62	77.38

นำผลการทดลองที่ได้ไปแทนค่าในสมการทั้ง 3 สมการที่ได้เลือกไว้ คือสมการที่ 1, 2 และ 4 จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการแทนค่าตัวแปรในสมการ

สมการที่	สมการ	การทดลองที่	% ลิกนินที่เหลือ	\hat{Y}	$(Y-\hat{Y})^2$	$\Sigma(Y-\hat{Y})^2$
1	$\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$	12	16.91	19.18	5.15	172.12
		30	14.82	18.20	11.42	
		11	18.94	19.18	0.06	
		31	23.68	23.00	0.46	
		10	18.90	19.18	0.08	
		29	21.36	18.20	9.99	
		2	22.62	10.58	144.96	
2	$\hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$	12	16.91	19.37	6.05	212.52
		30	14.82	20.00	26.83	
		11	18.94	19.37	0.18	
		31	23.68	20.00	13.54	
		10	18.90	19.37	0.22	
		29	21.36	20.00	1.85	
		2	22.62	9.82	163.84	
4	$\hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$	12	16.91	52.20	1245.38	72351.05
		30	14.82	169.10	23802.32	
		11	18.94	52.20	1106.23	
		31	23.68	173.3	22386.14	
		10	18.90	52.20	1108.89	
		29	21.36	169.10	21827.11	
		2	22.62	52.20	874.98	

จากตารางที่ 4.12 เมื่อดูจากค่า $\Sigma(y-\hat{Y})^2$ พบว่า ค่าที่ได้จากการแทนค่าในสมการที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด หมายถึงค่าที่คำนวณจากสมการกับค่าที่เกิดขึ้นจริงมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นสมการที่ 1 จึงเป็นสมการที่สามารถทำนายร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำได้ใกล้เคียงกับผลการทำการทดลองมากที่สุดใน 3 สมการนี้

พิจารณาสมการที่ 1 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จากการทดลองซ้ำ และคำนวณหาค่าความแปรปรวนของสมการโดยการคำนวณจาก $(Y-\hat{Y})^2$ พบว่าการทดลองที่ 11 และ 10 มีความแปรปรวนน้อยที่สุด คือ 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ หากสังเกตค่าของ \hat{Y} จะพบว่าค่า \hat{Y} ของการทดลองที่ 12, 11 และ 10 จะมีค่าเท่ากันเนื่องจากไม่ได้ใช้ค่า X_4 (Slow Mix Time) ในการแทนค่าสมการ เมื่อตัด X_4 (Slow Mix Time) ออกทำให้แทนค่า X_1 (Current Density), X_2 (DisCharging Time) และ X_3 (Slow Mix Rate) เป็น 3, 10 และ 10 ตามลำดับ เมื่อแทนค่า X_1 (Current Density), X_2 (DisCharging Time) และ X_3 (Slow Mix Rate) ในสมการจึงได้ค่า \hat{Y} ออกมาเท่ากันทั้ง 3 การทดลองที่กล่าวมา

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 ก็ให้ผลในทางเดียวกัน คือการทดลองที่ 11 และ 10 มีความแปรปรวนน้อยที่สุดคือมีค่า 0.18 และ 0.22 ตามลำดับ แต่ค่าความแปรปรวนของการทดลองที่ 11 และ 10 ในสมการที่ 2 มีความแปรปรวนมากกว่าในสมการที่ 1 แสดงว่าเมื่อแทนค่าในสมการที่ 2 จะมีความแปรปรวนมากกว่าแทนค่าในสมการที่ 1 ส่วนค่า \hat{Y} ที่มีค่าเท่ากันก็มีสาเหตุคล้ายกันคือ ในสมการที่ 2 ใช้ตัวแปรเพียง 2 ตัวคือ X_1 (Current Density) และ X_2 (DisCharging Time) เมื่อตัดค่า X_3 (Slow Mix Rate) และ X_4 (Slow Mix Time) ออกทำให้ค่า X_1 (Current Density) และ X_2 (DisCharging Time) มีค่าที่ซ้ำกันส่งผลให้ค่า \hat{Y} ออกมาเท่ากัน

พิจารณาสมการที่ 4 พบว่ามีค่าความแปรปรวนของสมการมากกว่าสมการที่ 1 และ 2 มาก เนื่องจากไม่ได้ใช้ตัวแปร X_1 (Current Density) ในการคำนวณด้วย แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าจำเป็นต้องใช้ตัวแปร X_1 (Current Density) ในการวิเคราะห์ด้วย ส่วนค่า \hat{Y} ที่เท่ากันก็มีสาเหตุเดียวกันกับสมการที่ 1 และ 2



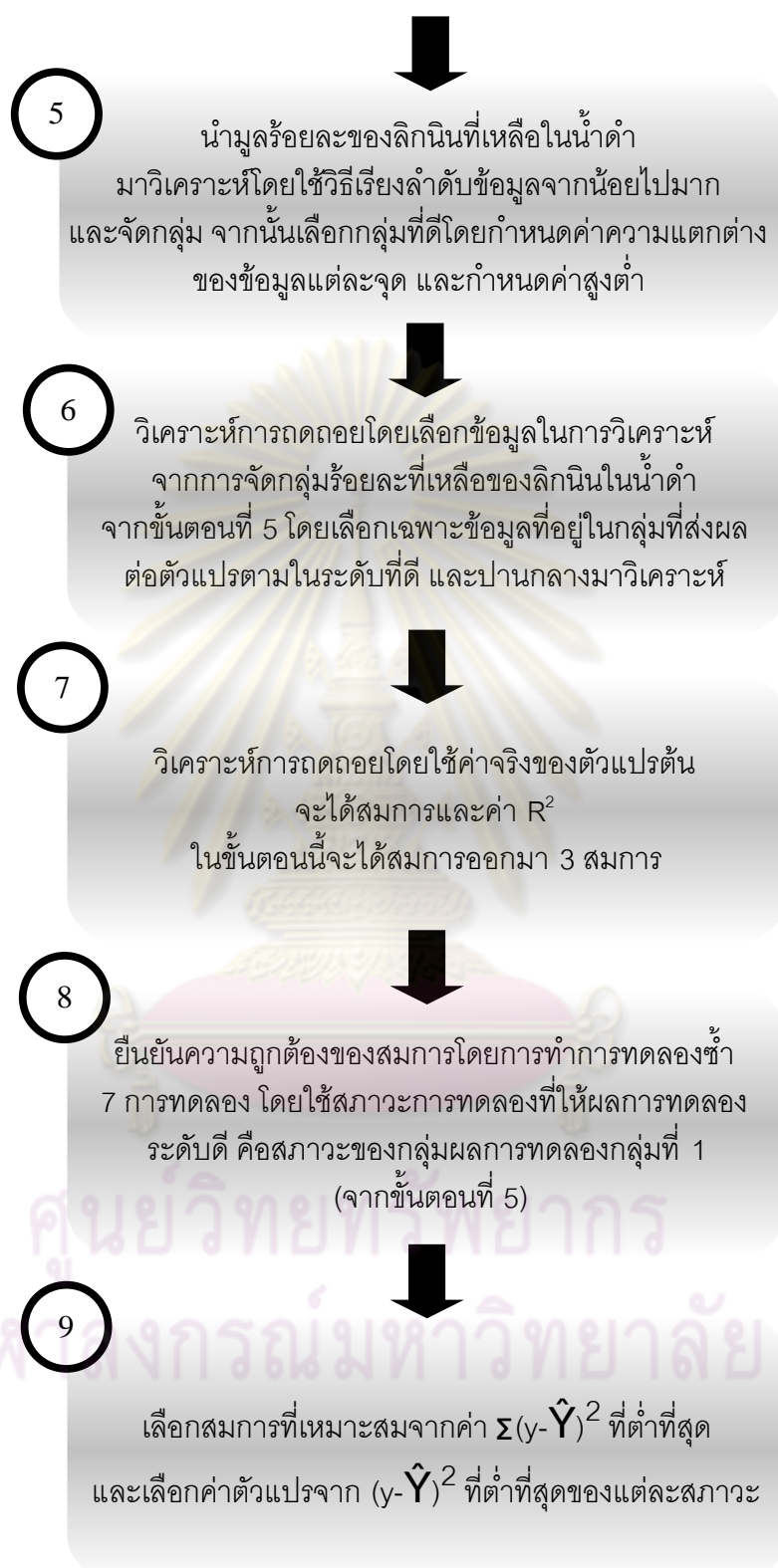
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 สรุปผลที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองในการหาตัวแปรสำคัญในการแยกลิกนินจากน้ำดำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ

การวิจัยเรื่องการหาตัวแปรสำคัญในการแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X1 (Current Density), X2 (DisCharging Time), X3 (Slow Mix Rate) และ X4 (Slow Mix Time) ว่าตัวแปร X แต่ละตัวมีความสัมพันธ์กันหรือสัมพันธ์กับ Y (% Remaining Lignin) หรือไม่ หากมีความสัมพันธ์จะมีในแง่ใด ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองที่วิเคราะห์จริง





จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 ในการทดลองเมื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปรต่างๆ และดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆตามที่กำหนดแล้ว จึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล แต่เนื่องจากผลการทดลองที่ออกมาไม่มีแนวโน้มและไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ใดๆได้ จึงต้องมีการคัดเลือกเฉพาะผลการทดลองที่ค่อนข้างดีมาวิเคราะห์ โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาเรียงลำดับจากค่าน้อยไปมากและวาดกราฟเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจน จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 5 จากกราฟดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งกลุ่มผลการทดลองออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่มีผลการทดลองในระดับที่ดี, กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีผลการทดลองในระดับปานกลาง และกลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มที่มีผลการทดลองในระดับไม่ดี จากนั้นนำกลุ่มที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง X_1 (Current Density), X_2 (DisCharging Time), X_3 (Slow Mix Rate) และ X_4 (Slow Mix Time) ต่อ Y (% Remaining Lignin) โดยการกำหนดค่าของตัวแปรทั้ง 4 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ค่าต่ำแทนเป็น -1 ค่ากลางแทนเป็น 0 และค่าสูงแทนเป็น +1 แล้วนำไปวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 6 ผลการวิเคราะห์พบว่า X_4 (Slow Mix Time) มีความสัมพันธ์กับ Y (% Remaining Lignin) แบบไม่มีนัยสำคัญ จึงตัดตัวแปร X_4 (Slow Mix Time) ออกและนำตัวแปร X_1 (Current Density), X_2 (DisCharging Time) และ X_3 (Slow Mix Rate) ไปวิเคราะห์ต่อไป

เมื่อนำผลการทดลองกลุ่มที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยทำให้ได้สมการออกมา 8 สมการ จากนั้นเลือกสมการที่มีค่า R^2 มากที่สุด พบว่ามี 3 สมการที่มีค่า R^2 มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.92 โดยทั้ง 3 สมการนี้ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของผลการทดลองกลุ่มที่ 1 กลุ่มเดียวเท่านั้นวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ขั้นตอนนี้เพื่อต้องการหาสมการที่สามารถใช้ในการทำนายค่าร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำเมื่อกำหนดค่าของตัวแปร X ที่ค่าต่างๆได้

ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 8 นำการทดลองกลุ่มที่ 1 จากตารางที่ 4.5 มาทำการทดลองซ้ำ นำค่าของตัวแปร X และ Y ที่ได้จากการทดลองซ้ำมาแทนค่าในสมการทั้ง 3 สมการที่เลือกไว้เพื่อหาสมการที่เหมาะสม จากรูปที่ 4.11 ขั้นตอนที่ 9 พบว่าสมการที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุดคือสมการ $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$ ซึ่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 172.12 และจากตารางที่ 4.12 การทดลองที่ให้ค่าความแปรปรวนน้อยที่สุดคือการทดลองที่ 11 และ 10 โดยมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.06 และ 0.08 ตามลำดับสภาวะที่ทำการทดลองของการทดลองที่ 11 คือ จ่ายกระแสไฟฟ้า (X_1) 3 mA/cm², ระยะเวลาในการจ่ายกระแส (X_2) 10 นาที, กวนซ้ำ (X_3) 10 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการกวนซ้ำ (X_4) 10 นาที สภาวะในการทำการทดลองที่ 11 คือจ่ายกระแสไฟฟ้า (X_1) 3 mA/cm², ระยะเวลาในการจ่ายกระแส (X_2) 10 นาที, กวนซ้ำ (X_3) 10 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการกวนซ้ำ (X_4) 10 นาที แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการกวนซ้ำไม่ส่งผลใดๆ ต่อการทดลอง จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแยกลิกนินจากน้ำดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพคือ

X1 กระแสไฟฟ้า	3	มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
X2 ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า	10	นาที
X3 อัตราการกวนซ้ำ	10	รอบต่อนาที

โดยที่สภาวะการทดลองดังกล่าวมี % lignin removal เฉลี่ยเท่ากับ 81.75% และสมการที่สามารถทำนายร้อยละที่เหลือในน้ำดำได้ดีที่สุดสำหรับตัวอย่างน้ำดำจากโรงผลิตเยื่อกระดาษกระดาษกึ่งเคมียุคาลิปตัส โรงเยื่อบ้านโป่ง คือ

$$\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$$

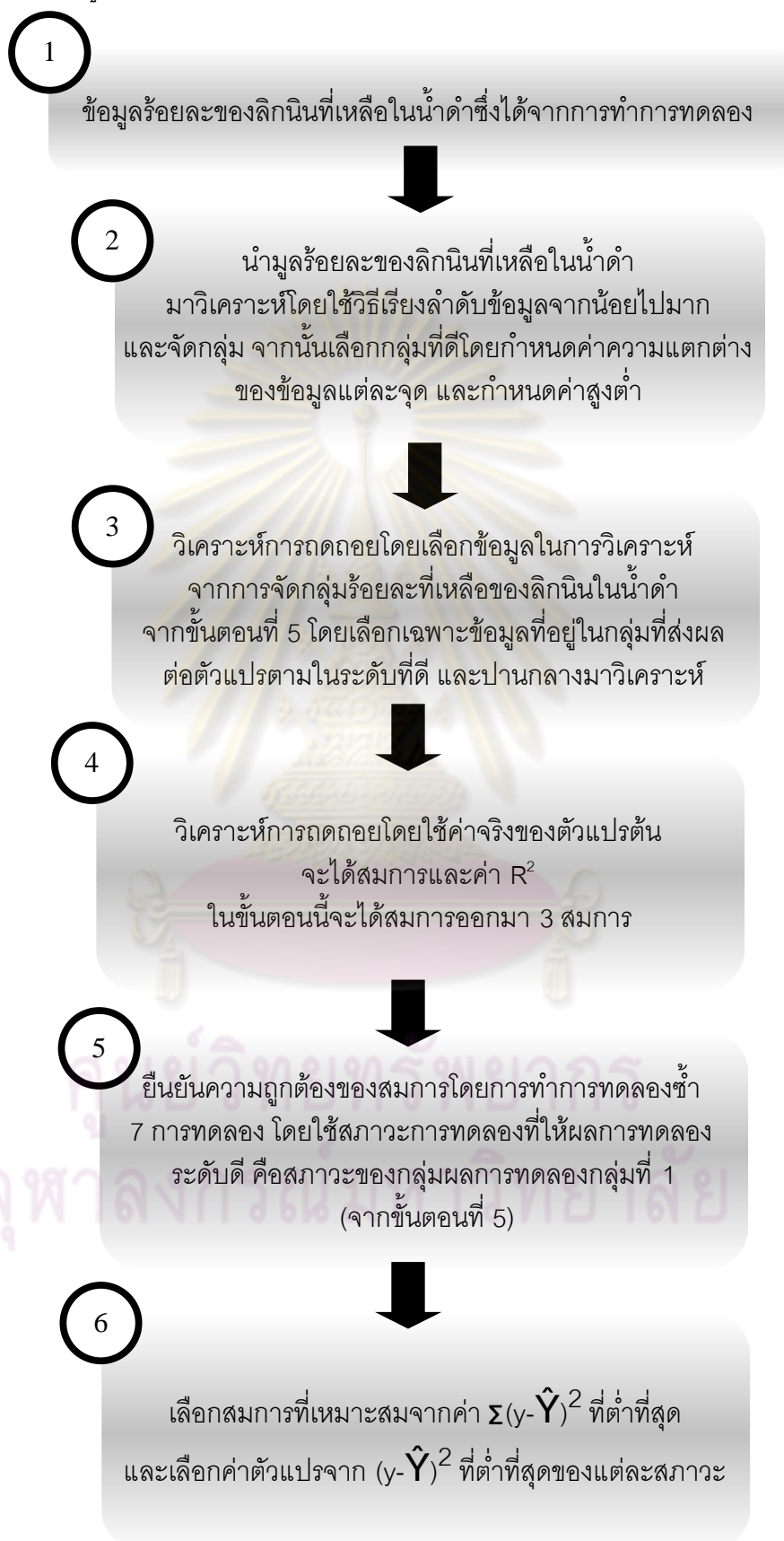
โดยที่ X1 คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

X2 คือ ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (นาที)

X3 คือ อัตราการกวนซ้ำ (รอบต่อนาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4. 12 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลทดลองที่ควรนำไปใช้



ลิกนินมีคุณสมบัติเป็นสารแขวนลอย เมื่ออยู่ในรูปของสารละลายจะมีสภาพประจุเป็นลบ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วเหล็กก่อให้เกิด Fe^{3+} เปรียบเสมือนการเติมประจุบวกให้กับสารละลาย เป็นการลดความหนาของชั้นการกระจาย (Diffuse Layer) และทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย จากนั้นการกวนซ้ำเป็นวิธีในการทำให้อนุภาคสารแขวนลอยเคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสดังเกิดขึ้น เป็นการเพิ่มโอกาสในการที่จะทำให้อ่อนนุ่มของสารแขวนลอยที่หมดเสถียรภาพแล้วมารวมตัวกันเป็นกลุ่ม และสามารถแยกตัวออกจากสารละลายได้มากขึ้น ปฏิริยาดังกล่าวยิ่งค่าความเป็นกรดต่ำมีค่าน้อย หรือมีสภาพความเป็นกรดมากจะยิ่งมีประจุบวกมากและจะส่งผลให้ การตกตะกอนมีประสิทธิภาพดีขึ้น แต่เนื่องจากในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม การปรับค่าความเป็น กรดต่ำให้มีค่าต่ำมากๆ จะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตอย่างมาก เพราะต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการปรับค่าความเป็นกรดต่ำให้ต่ำ และเมื่อตกตะกอนลิกนินออกมาแล้วต้องใช้สารเคมีในการปรับค่าความเป็นกรดต่ำขึ้นมาให้อยู่ในช่วงมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (pH 5.5 – 9.0) อีกด้วย

การจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วเหล็กจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มปริมาณประจุบวกให้กับน้ำดำ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทดลองคือ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ได้กำหนดให้เป็นค่าที่อยู่ในระดับต่ำ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการแยกลิกนินจากน้ำดำมีค่าดีกว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับสูง เนื่องจากประสิทธิภาพการแยกลิกนินจากน้ำดำนั้นจำเป็นต้องกำหนดค่าให้เหมาะสมทั้งปริมาณกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพราะทั้งปริมาณกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกลิกนินจากน้ำดำร่วมกัน จากสมการ $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้า (X_1) และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (X_2) ให้ผลในทางตรงกันข้าม หาก X_1 ใช้ค่าต่ำ X_2 ควรจะใช้ค่าสูงจึงจะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพการแยกลิกนินจากน้ำดำ แต่ถ้าหากใช้ค่าสูงทั้งปริมาณกระแสไฟฟ้า (X_1) และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (X_2) จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกลิกนินจากน้ำดำลดลง เนื่องจากเกิดฟองก๊าซ H_2

ส่วนการกวนซ้ำ (X_3) เป็นการเพิ่มโอกาสในการเกาะตัวกันของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว จากการทำการทดลองอัตราการกวนซ้ำที่เหมาะสมต่อการทดลองคือที่ 10 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดให้อยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากการกวนซ้ำในระดับสูงส่งผลให้อนุภาคที่กำลังจะเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (floc) นั้นแตกกระจายและทำให้อนุภาคไม่สามารถมาสัมผัสกันได้ เนื่องจากน้ำดำถูกกวนด้วยอัตราการกวนที่มากเกินไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาตัวแปรสำคัญในการแยกกลินินจากน้ำดำด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี และกายภาพ ใช้ตัวอย่างน้ำดำจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมียูคาลิปตัส จากโรงเยื่อ บ้านโป่ง จ.ราชบุรี จากการทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองมี ดังนี้

ในการทดลองเมื่อกำหนดค่าให้กับตัวแปรต่างๆ และดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆตามที่กำหนดแล้ว จึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผล การคัดกรองเฉพาะผลการทดลองที่ดีมาวิเคราะห์ผลการทดลอง มีความจำอย่างมากเนื่องจากหากไม่มีการคัดกรองข้อมูล ก่อนทำการวิเคราะห์ผล จะทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองทำได้ยากและอาจทำให้การสรุปผล ผิดพลาดได้ วิธีการอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการคัดกรองข้อมูลคือ นำผลการทดลองที่ได้มา เรียงลำดับจากค่าน้อยไปมากและวาดกราฟเพื่อให้เห็นประสิทธิภาพที่ชัดเจน จากนั้นแบ่งกลุ่ม ของผลการทดลองและกำหนดให้เป็นกลุ่มที่มีผลการทดลองที่ดี ปานกลาง และไม่ดี นำผลการทดลองกลุ่มที่ดี และปานกลางไปวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

จากขั้นตอนวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการออกมาสามสมการด้วยกัน คือ สมการที่ 1 คือ $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$, สมการที่ 2 คือ $\hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$ และสมการที่ 3 คือ $\hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$ โดย การเลือกสมการดูจากค่า R^2 ซึ่งทั้งสามสมการมี ค่า R^2 เท่ากับ 0.92 เท่ากันทั้งสามสมการ และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าความแปรปรวนของสมการ พบว่าทั้งสามสมการดังกล่าวมีค่าความแปรปรวนของสมการเฉลี่ย สมการที่ 1 เท่ากับ 50.24, สมการที่ 2 เท่ากับ 43.50 และสมการที่ 3 เท่ากับ 40.44 สมการที่แทนค่าออกมาได้ผลใกล้เคียง กับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด คือสมการที่มีค่าความแปรปรวนของสมการน้อยที่สุด สมการ ที่ 1 $\hat{Y} = -0.14X_1 + 1.72X_2 + 0.24X_3$ ซึ่งมีค่าผลรวมความแปรปรวนของสมการเท่ากับ 172.12 ส่วนสมการที่ 2 $\hat{Y} = 0.09X_1 + 1.91X_2$ และ 3 $\hat{Y} = 1.67X_2 + 0.21X_3$ นั้นมีค่าผลรวมความแปรปรวนของสมการเท่ากับ 212.52 และ 72,315.05 ตามลำดับ

กลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วเหล็ก ก่อให้เกิด Fe^{3+} เป็นการเติมประจุบวกให้กับสารละลายเป็นการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย จากการทดลองค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า 10 นาที แต่ถ้าหากจ่ายกระแสไฟฟ้ามักเกินไปคือมากกว่า 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือนานเกินไปคือมากกว่า 10 นาที จะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลที่ไม่ดีต่อประสิทธิภาพการแยกกลินินจากน้ำดำ ส่วนการกวนช้า

เป็นการเพิ่มโอกาสในการที่จะทำให้สารแขวนลอยทั้งหมดเสถียรภาพแล้วมารวมตัวกันเป็นกลุ่ม และตกตะกอน อัตราการกวนช้าที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือที่ 10 รอบต่อนาที หากอัตราการกวนช้ามีค่ามากเกินไปคือมากกว่า 10 รอบต่อนาทีจะทำให้อนุภาคที่กำลังจะเกาะกลุ่มรวมตัวกัน (floc) นั้นแตกกระจายและประสิทธิภาพการแยกกลินินจากน้ำดำก็จะลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการหากรอบความสามารถในการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพในการแยกกลินินจากน้ำดำ ซึ่งการกำหนดตัวแปรต่างๆ และค่าที่กำหนดให้กับตัวแปรนั้นอ้างอิงมาจากการวิจัยอื่นที่เคยมีผู้วิจัยมาก่อน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรบางตัวไม่ส่งผลต่อการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกำหนดค่าให้กับตัวแปรนั้นอาจยังไม่เหมาะสม

1. การกำหนดระยะเวลาในการกวนช้ายังมีช่วงการทดลองที่ไม่เหมาะสมควรกำหนดระยะเวลาในการกวนช้าใหม่โดยกำหนดช่วงให้เหมาะสมมากขึ้น
2. ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เนื่องจากในการทดลองมี 4 ตัวแปร หากนำมาวิเคราะห์ผลโดยการสร้างกราฟสามแกน ซึ่งดูความสัมพันธ์ได้ที่ละสองตัวแปร ทำให้ต้องเฉลี่ยค่าอีกสองตัวแปรที่เหลือ และหากตัวแปรที่นำมาเฉลี่ยนั้น เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการทดลอง กราฟที่ออกมาจะไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ใดๆได้เลย
3. ควรศึกษาเพิ่มในเรื่องของปริมาณกลินินเริ่มต้นที่ปริมาณต่างๆ (Initials Solid) และหาสมการในการทำนายร้อยละของกลินินที่เหลือในน้ำดำเพื่อที่จะสามารถนำสมการนั้นไปใช้ประโยชน์ได้จริงในอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ, กอง. 2551. กระบวนการ Coagulation และ Flocculation [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mwa.ac.th/download/etc01coagulation.pdf> [2551, มีนาคม 23]
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/Info_serv/reg_std_water04.Html#s1 [2551, มีนาคม 23]
- พัชรินทร์ เพิ่มไพศาลสกุล. 2550. การเพิ่มความเข้มข้นลิกนินที่ได้จากของเหลวดำด้วยกระบวนการอัลตราฟิเตรชัน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.kmutt.ac.th/EEM_conference/Proceedings/index_files/PDF/MTP17%20UF.pdf [2551, มีนาคม 23]
- วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, สถาบัน. 2551. ลิกนิน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=80&i2=11 [2551, มีนาคม 23]
- วิชา พิชัยณรงค์. 2545. การแยกน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศศิวิมล โชตินันทเศรษฐ์. 2550. การแยกลิกนินจากน้ำยางดำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เศรษฐกิจอุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2550. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไทยปี 2549 และแนวโน้มปี 2550 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://oie.go.th> [2551, มีนาคม 23]
- หอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สำนัก. 2550. ลิกนิน (lignin) มีคุณสมบัติอย่างไร [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://siweb.dss.go.th/Information/FAQ/search_FAQ.asp?QA_ID=75 [2551, มีนาคม 23]
- เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน), บริษัท. 2551. กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมี [ซีดีรอม]. กรุงเทพฯ. [2551, มีนาคม 23]

ภาษาอังกฤษ

- Gosselink, R. J. A., Jong, E., Guran, B., and Abacherli, A. 2004. Co-ordination network for lignin-standardisation, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). Industrial Crops and Products. 20, 2 (September): 121-129.
- Kan, C., Huang, C., and Pan, J. R. 2001. Time requirement for rapid-mixing in coagulation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 203, 1-3 (April): 1-9.
- Mussatto, S. I., Fernandes, M., and Roberto, I. C. 2007. Lignin recovery from brewer's spent grain black liquor. Carbohydrate polymers. 70, 2 (September): 218-223.
- Norgren, M., Edlund, H., Wågberg, L., Lindström, B., and Annergren, G. 2001. Aggregation of kraft lignin derivatives under conditions relevant to the process, part I: phase behaviour. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 194, 1-3 (December): 85-96.
- Parama Kalyani, K. S., Balasubramanian, N., and Srinivasakannan, C. 2009. Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation. Chemical Engineering Journal. 151, 1-3 (August): 97-104.
- Ugurlu, M., Gurses, A., Dogar, C., and Yalcin, M. 2008. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electro coagulation. Journal of Environmental Management. 87, 3 (May): 420-428.
- Wallberg, O., Jönsson, A., and Wimmerstedt, R. 2003. Ultrafiltration of kraft black liquor with a ceramic membrane. Desalination. 156, 1-3 (August): 145-153.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐานลิกนิน

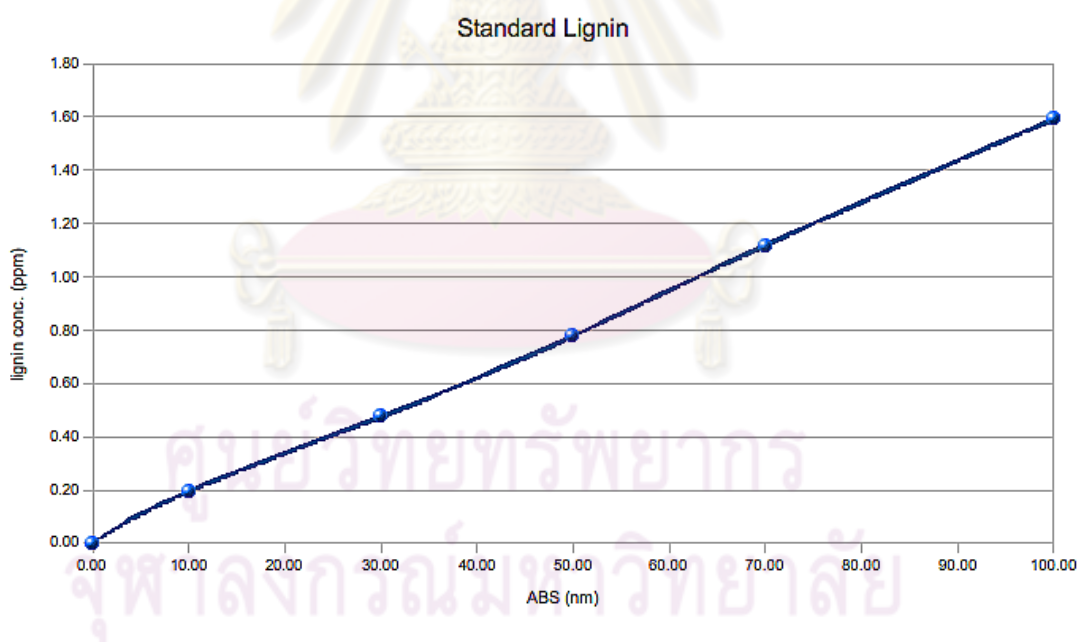
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กราฟมาตรฐานลิกนิน

นำสารละลายมาตรฐานลิกนินที่มีความเข้มข้นต่างๆ มาวัดการดูดกลืนแสงด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร

ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานลิกนินที่มีความเข้มข้นต่างๆ

สารละลายมาตรฐานลิกนิน (ppm)	Absorbance at 280 nm
300	3.4150
100	1.5910
70	1.1180
50	0.7780
30	0.4750
10	0.1950



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานลิกนิน



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองเมื่อผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีและกายภาพ

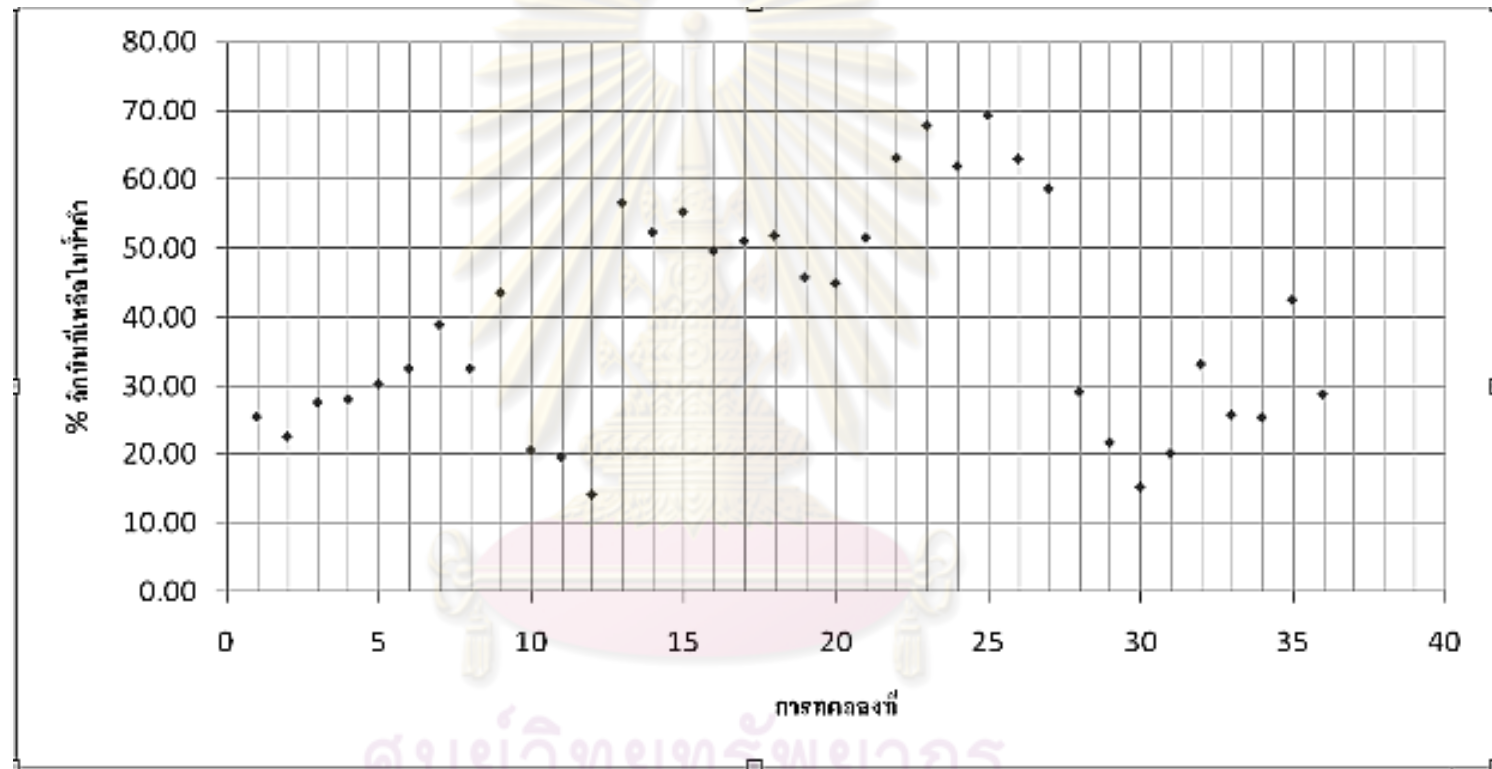
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าการดุกดื่นแสง, ค่าเฉลี่ย,
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน

ABS (1)	ABS (2)	ABS (3)	ABS	X-bar	SD	%CV
1.72	1.97	1.93	1.87	1.87	0.11	5.86
1.70	1.58	1.75	1.68	1.68	0.07	4.25
1.68	2.21	2.15	2.01	2.01	0.24	11.81
1.93	2.33	1.87	2.04	2.04	0.20	9.99
2.51	1.94	2.10	2.18	2.18	0.24	10.99
2.48	2.48	2.03	2.33	2.33	0.21	9.10
2.85	2.74	2.67	2.75	2.75	0.07	2.69
2.37	2.87	1.74	2.33	2.33	0.46	19.87
2.87	3.24	3.08	3.06	3.06	0.15	4.95
1.58	1.45	1.63	1.55	1.55	0.08	4.89
1.28	1.53	1.62	1.48	1.48	0.14	9.74
1.13	1.05	1.19	1.12	1.12	0.06	5.17
4.09	3.89	3.78	3.92	3.92	0.13	3.28
3.84	3.65	3.44	3.64	3.64	0.16	4.41
4.03	3.77	3.68	3.83	3.83	0.15	3.82
3.38	3.53	3.49	3.46	3.46	0.06	1.85
3.42	3.69	3.55	3.55	3.55	0.11	3.10
3.22	3.72	3.90	3.61	3.61	0.29	7.97
3.14	2.97	3.48	3.20	3.20	0.21	6.63
3.36	2.99	3.11	3.15	3.15	0.15	4.82
3.83	3.60	3.30	3.58	3.58	0.22	6.15
4.58	4.19	4.27	4.35	4.35	0.17	3.90
4.79	4.59	4.61	4.66	4.66	0.09	1.92
4.38	4.21	4.22	4.27	4.27	0.08	1.80
4.83	4.58	4.86	4.76	4.76	0.13	2.64
4.25	4.43	4.33	4.34	4.34	0.07	1.68
3.86	3.94	4.38	4.06	4.06	0.23	5.62
2.00	2.22	2.11	2.11	2.11	0.09	4.35
1.58	1.69	1.58	1.62	1.62	0.05	3.10
1.23	1.11	1.23	1.19	1.19	0.06	4.65
1.40	1.56	1.61	1.52	1.52	0.09	6.01
2.40	2.39	2.31	2.37	2.37	0.04	1.63
1.80	2.02	1.85	1.89	1.89	0.10	5.08
1.97	2.05	1.57	1.86	1.86	0.21	11.27
3.18	3.01	2.77	2.99	2.99	0.17	5.61
1.97	1.85	2.43	2.08	2.08	0.25	12.14

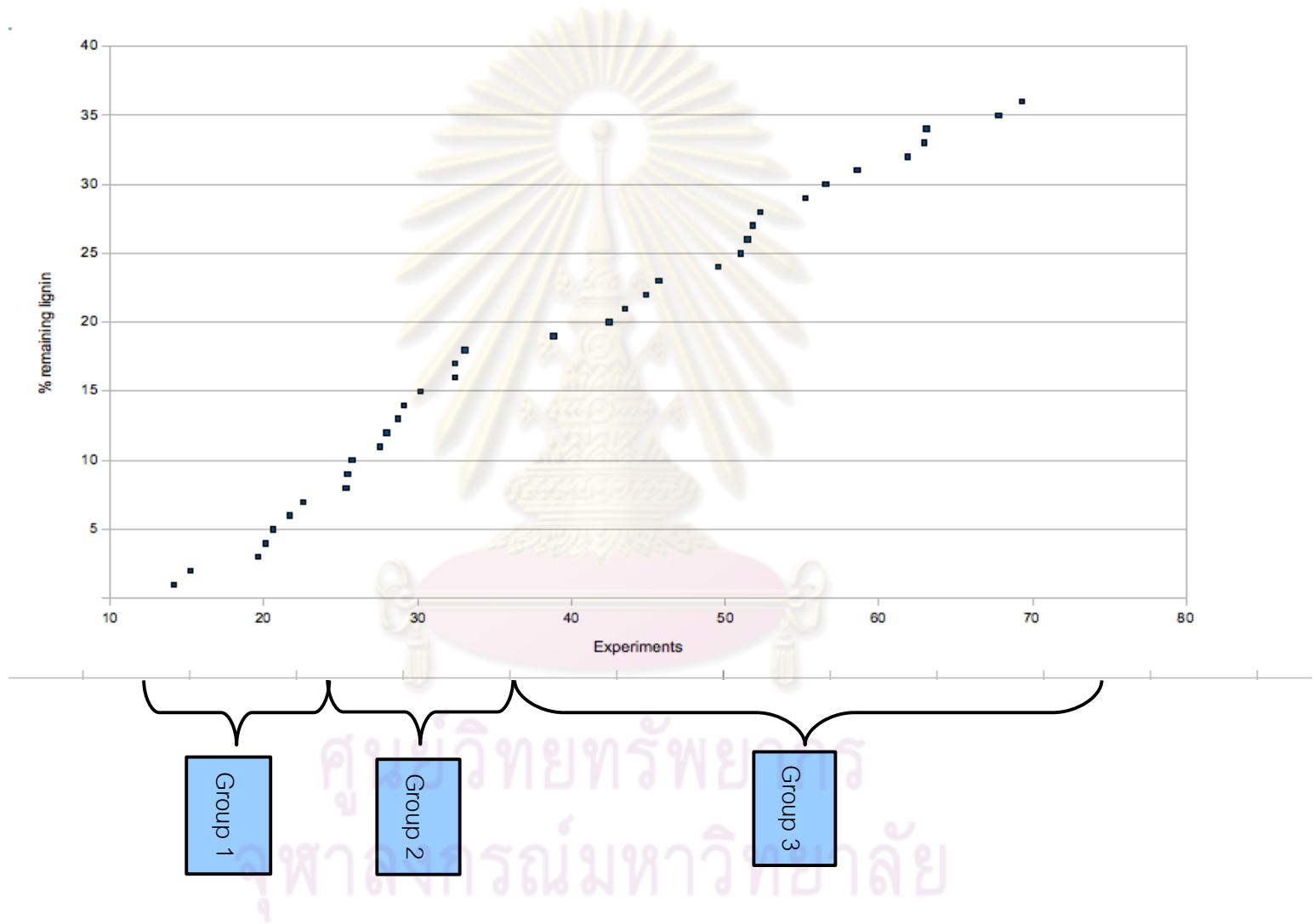
ตารางที่ ข-2 แสดงแทนค่าผลการทดลองเพื่อหาร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

Experiment	X1	X2	X3	X4	%ลิกนินที่เหลือ
1	3	5	10	10	25.45
2	3	5	10	20	22.58
3	3	5	10	30	27.55
4	3	5	30	10	28.00
5	3	5	30	20	30.21
6	3	5	30	30	32.44
7	3	5	60	10	38.85
8	3	5	60	20	32.45
9	3	5	60	30	43.49
10	3	10	10	10	20.58
11	3	10	10	20	19.61
12	3	10	10	30	14.12
13	3	10	30	10	56.55
14	3	10	30	20	52.27
15	3	10	30	30	55.20
16	3	10	60	10	49.58
17	3	10	60	20	51.00
18	3	10	60	30	51.79
19	10	5	10	10	45.70
20	10	5	10	20	44.86
21	10	5	10	30	51.47
22	10	5	30	10	63.09
23	10	5	30	20	67.79
24	10	5	30	30	61.88
25	10	5	60	10	69.32
26	10	5	60	20	62.94
27	10	5	60	30	58.61
28	10	10	10	10	29.09
29	10	10	10	20	21.68
30	10	10	10	30	15.23
31	10	10	30	10	20.12
32	10	10	30	20	33.09
33	10	10	30	30	25.74
34	10	10	60	10	25.33
35	10	10	60	20	42.45
36	10	10	60	30	28.71



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข-1 กราฟแสดงการกระจายของผลการทดลอง



รูปที่ ข-2 แสดงกราฟการจัดกลุ่มของผลการทดลองร้อยละของลิกนินที่เหลือในน้ำดำ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดลฤดี ยนต์สุวรรณ เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 6 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญา มหา บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย