



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเชื้อจากทางใบปาล์มน้ำมันโดยใช้ค้าง
โดย นางสาวสุธิดา เหล่าสิงห์

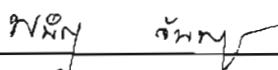
ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

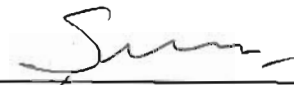
(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

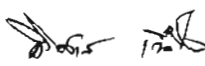
20 พฤษภาคม 2551

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนิตนาฎ จันทรานุกาพ)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประวิตร จันทรานุกาพ)

 กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์ ชัยมั่น)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศิริศาสตร์ เอื้อใจ)

การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเชื้อจากทางใบปาล์มน้ำมันโดยใช้ค้าง

นางสาวสุธิดา เหล่าสิงห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวสุธิดา เหล่าสิงห์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเยื่อจาก
ทางใบปาล์มน้ำมันโดยใช้ค่า
สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนิตนาฏ จันทรานุกภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประวิตร จันทรานุกภาพ
ปีการศึกษา : 2550

บทคัดย่อ

กระบวนการโซดา-แอนทราควิโนน (Sodium Hydroxide-Anthraquinone : Soda-AQ) ที่ใช้ในการขจัดลิกนินจากทางใบปาล์มน้ำมัน ทำการศึกษาที่สภาวะต่างๆ คือ ความเข้มข้นของสารเคมี 35-45 เปอร์เซ็นต์ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของสารละลายต่อเนื้อไม้แห้ง คือ 14 : 1 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการต้มเยื่อ 155-165 องศาเซลเซียส เวลาในการต้มที่อุณหภูมิสูงสุดอยู่ในระหว่าง 60-300 นาที และเติมแอนทราควิโนน 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเยื่อไม้แห้ง คุณสมบัติทางเคมีที่ศึกษานั้นใช้มาตรฐาน TAPPI พบว่า ในการสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์สามารถใช้พื้นฐาน Power Law และหลักการของ Avrami ได้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 93 หน้า)

คำสำคัญ : โซดา-แอนทราควิโนน, ทางใบปาล์มน้ำมัน, การสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์

Name : Miss Suthida Laosing
Thesis Title : Study on Kinetic Models of The Heterogeneous Alkaline Pulping of
Oil Palm Frond
Major Field : Chemical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr.Panitnad Chandranupap
Co-Advisor : Assistant Professor Pravitra Chandranupap
Academic Year : 2007

Abstract

Sodium hydroxide-anthraquinone (soda-AQ) delignification pulping of oil palm frond was conducted with pulping conditions as follow: 35-45% NaOH charged, 14 : 1 liquor-to-wood ratio, temperature of 155-165°C, time at maximum temperature 60-300 minutes and 0.1% anthraquinone. The chemical properties of the obtained pulp were investigated by using TAPPI standard methods. The effects of all process conditions were combined using the developed kinetic model, based on the power law of growth and Avrami's concepts in nuclei growth.

(Total 93 pages)

Keywords : Soda-antraquinone, Oil palm fronds, Kinetic Models

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคลากรแขนงต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์และความร่วมมือทางด้านข้อมูลวิชาการ เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี ทางผู้จัดทำงานวิจัยจึงขอขอบพระคุณคณาจารย์ และหน่วยงานที่ให้ความอนุเคราะห์ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนิตนาฏ จันทรานูภาพ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประวิตร จันทรานูภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พยุง เดชอยู่ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองที่ทำให้งานสำเร็จได้ด้วยดี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือชุดหม้อต้มเชื้อพร้อมชุดควบคุม รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความร่วมมืออย่างดี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งสอนวิธีการทดสอบ

คณาจารย์ซึ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และความคิดเห็นต่างๆ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ศิษย์ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สุธิดา เหล่าสิงห์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 ความเป็นมาของกระดาษ	5
2.2 ความรู้เบื้องต้น	6
2.3 กระบวนการผลิตเยื่อ	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	25
3.1 อุปกรณ์ในกระบวนการต้มเยื่อ	25
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	25
3.3 วิธีการต้มเยื่อ	26
3.4 การทดสอบเยื่อ	29
3.5 การหาค่าแคลป์ตามมาตรฐาน TAPPI T 236 cm-85	29
บทที่ 4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์	33
4.1 การศึกษาการออกแบบสมการจลนพลศาสตร์ในการขจัดลิกนินจากเยื่อของ ทางใบปาล์มน้ำมัน	33
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	37
5.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน	37
5.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อหลังผ่านกระบวนการต้มเยื่อ	39
5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	49
6.1 การวิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน	49
6.2 สภาพต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเชื้อ และสมบัติของเชื้อ	49
6.3 ผลการวิเคราะห์จากการสร้างแบบจำลอง	49
6.4 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	55
ผลการทดลอง	56
ภาคผนวก ข	59
การเตรียมสารเคมี	60
ภาคผนวก ค	71
วัตถุดิบทางใบปาล์มน้ำมันและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	72
ภาคผนวก ง	77
การแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม	78
การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	86
ประวัติผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2-1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้ใบกว้างและไม้ใบแคบ	10
2-2	เปรียบเทียบกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ 3 แบบ	20
3-1	รายการและวิธีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน	27
3-2	แสดงสถานะที่ใช้ในการต้มเยื่อทางใบปาล์ม	28
3-3	แสดงมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อ	29
3-4	ค่า f สำหรับปรับค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเปอร์แมงกานีสที่ใช้	31
5-1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน	37
5-2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจำพวกไม้ไผ่ไม้บางชนิด	39
5-3	แสดงผลการทดลองในการต้มเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมัน	40
5-4	แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์	46
ก-1	แสดงค่าความชื้นของเยื่อที่ได้ ปริมาณเยื่อที่ผ่านการคัดแยกเยื่อและปริมาณเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดแยก	56
ก-2	แสดงค่าแคปปา	57
ง-1	ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	90

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 องค์ประกอบภายในของเนื้อไม้	7
2-2 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	8
2-3 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส	9
2-4 โครงสร้างของลิกนิน	9
2-5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้	10
2-6 รูปร่างของเซลล์ชนิดต่างๆ ในไม้ใบแคบและไม้ใบกว้าง	12
2-7 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย	14
2-8 แสดงกระบวนการผลิตเยื่อกราฟท์และกระดาษในปัจจุบัน	18
3-1 หม้อต้มเยื่อพร้อมชุดควบคุม	26
5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปาที่อุณหภูมิในการต้มเยื่อต่างๆ กันกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด	41
5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาดกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด	42
5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาด	43
5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาดกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด	44
5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของผลผลิตรวมกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด	45
5-6 ค่าแคปปาที่ได้จากแบบจำลองกับค่าแคปปาที่ได้จากการทดลอง	47
ค-1 ดันและทางใบปาล์มน้ำมันตามธรรมชาติ	72
ค-2 ลักษณะของทางใบปาล์มน้ำมันที่ลอกเปลือกออกแล้ว	72
ค-3 แสดงส่วนประกอบของหม้อต้มเยื่อ	73
ค-4 เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrater)	74
ค-5 เครื่องคัดแยกเยื่อแบบตะแกรงราบ (Screener)	74
ค-6 เครื่องชั่ง (Analytical Balance)	75
ค-7 เครื่องวัดปริมาณความชื้นแบบอัตโนมัติ (Moisture Analyzer)	75
ค-8 ตู้อบแห้ง (Oven Dry)	75
ง-1 แสดงระยะตามแนวดิ่งจากจุด (x_k, y_k) ใดๆ ถึงเส้น $y = a + bx$	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ง-2 แสดงจุดและเส้นตามตัวอย่างที่ 1	80
ง-3 แสดงจุดข้อมูล	83
ง-4 แสดงจุดข้อมูลและเส้น Polynomial กำลังหนึ่ง	83
ง-5 แสดงจุดข้อมูลและเส้น Polynomial กำลังสอง	83
ง-6 แสดงจุดข้อมูลและเส้น Polynomial กำลังสาม	83
ง-7 แสดงการเติมข้อมูลในโปรแกรม Polymath	86
ง-8 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Polymath	87
ง-9 กราฟของ $\ln k$ กับ $1/T$	88
ง-10 แสดงบริเวณที่ยอมรับหรือปฏิเสธการทดสอบค่า t-distribution	89
ง-11 โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณค่า p-value	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการศึกษาคูณสมบัติของเชื้อจากพืชเป็นที่นิยมกันอย่างมากในทางวิศวกรรม และวิทยาศาสตร์เคมี เพื่อใช้ประโยชน์ในการนำมาผลิตกระดาษในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานผลิตเยื่อในต่างประเทศส่วนใหญ่ตัดไม้จากป่าธรรมชาติมาเป็นวัตถุดิบ สำหรับประเทศไทยมีการผลิตเยื่อโดยใช้วัตถุดิบจากป่าปลูก จึงสามารถกล่าวได้ว่าการผลิตเยื่อนั้นไม่มีส่วนรบกวนป่าธรรมชาติแต่อย่างใด ได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของเยื่อในพืชแต่ละชนิด ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ประเทศไทยนั้นมีพืชเยื่อใยสั้นเป็นส่วนใหญ่และมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจโดยการแปรรูปอย่างเหมาะสม ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน กระดาษเป็นวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ได้แก่ การใช้กระดาษเพื่อการสื่อสาร การบันทึกเรื่องราวต่างๆ การบรรจุผลิตภัณฑ์และอื่นๆ

ปาล์มน้ำมันเป็นไม้ตระกูลเดียวกับมะพร้าว ตาล จาก สละ ระกำ เป็นไม้ลำต้นเดี่ยวขึ้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน เมื่อเติบโตเต็มที่ในป่าอาจสูงถึง 20–30 เมตร แต่สำหรับสวนปาล์มน้ำมันที่มีระยะห่างระหว่างต้นพอสมควรจะมีความสูง 15–20 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 60–80 เซนติเมตร ลักษณะเด่น คือ โตใบอาจติดอยู่กับลำต้นได้นานถึง 20 ปี ด้วยเหตุนี้เมื่อปาล์มน้ำมันอายุได้ 12–14 ปี จึงเห็นลำต้นปกคลุมด้วยก้านใบเป็นเกลียวรอบลำต้น สมบัติทางกายภาพของทางใบปาล์มน้ำมันมีรูปร่างโดยทั่วไปคล้ายใบมะพร้าวหรือใบจาก รูปใบยาวคล้ายขนนกหรือขนไก่ คือ มีก้านทางยาวและใบย่อยๆ แดงออกตามก้านใบประมาณ 100–160 คู่ โดยมีใบยาวที่สุดอยู่ตรงก้านใบ มีความยาวประมาณ 2–5 เมตร ส่วนใบย่อยตรงกลางอาจยาวถึง 3 ฟุตและค่อยๆ สั้นลง ที่หัวท้ายมีความกว้างประมาณ 1.2–2 นิ้ว มีหนามแหลมเล็กอยู่หนาแน่นตามบริเวณโคนใบ และหนามจะค่อยๆ โค้งขึ้นเมื่อห่างจากโคนใบขึ้นมา ต้นที่มีอายุมากๆ อาจมีใบอยู่ถึง 20–40 ทาง

จากสำนักงานประสานงานวิจัยและพัฒนาปาล์มน้ำมัน (สกว.) พบว่าในปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 2.1 ล้านไร่ ส่วนใหญ่อยู่บริเวณภาคใต้ของประเทศไทย โดยมีพื้นที่เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ราว 1.75 ล้านไร่ ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากการทำสวนปาล์มน้ำมันเป็นปริมาณมาก เช่น น้ำหนักแห้งทางใบปาล์มน้ำมันที่ตัดทิ้งราว 1.7 ล้านตันต่อปี น้ำหนักลำต้นแห้งที่มีความสูง 9 เมตรราว 2 ล้านตันต่อปีและทะลายปาล์มเปล่าน้ำมันราว 1.4 ล้านตันต่อปี จะเห็นได้ว่า เศษเหลือทิ้งจากทางใบปาล์มน้ำมันสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ

ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ แล้วยังเป็นการช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งในการศึกษา จลนพลศาสตร์จะต้องพิจารณาปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารเคมี จะเห็นว่าเราสามารถอธิบายได้ด้วยอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งขึ้นกับเวลา เช่น การผลิตเยื่อโดยวิธีกราฟท์

การสร้างแบบจำลองของการผลิตเยื่อโดยทั่วๆ ไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ธรรมดา ที่มีการใช้ข้อมูลเฉพาะเจาะจงไม่สามารถอธิบายถึงกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ จึงได้มีการนำเสนอ การสร้างแบบจำลองของเยื่อเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตเยื่อ แล้วยังสามารถอธิบายถึงกลไก ในการเกิดได้ แต่การหาค่าแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีข้อจำกัดรูปแบบในการวิเคราะห์ได้ใช้ระเบียบ วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ให้มีความน่าเชื่อถือหรือหาค่า ความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulp) จากทางใบของต้นปาล์มน้ำมัน
- 1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการผลิตเยื่อ
- 1.2.3 สร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเยื่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเยื่อ
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการผลิตเยื่อด้วยการใช้ด่าง (Alkaline Pulping)
- 1.3.3 ออกแบบการทดลองและทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เวลาและความเข้มข้นของสารเคมี
- 1.3.4 นำผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม

1.4 วิธีการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเยื่อจากทางใบของต้นปาล์มน้ำมัน
- 1.4.2 จัดหาและเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อจากทางใบของต้นปาล์มน้ำมัน
- 1.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขจัดลิกนินในการผลิตเยื่อ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อและเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อ
- 1.4.4 ออกแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเยื่อจากทางใบของต้นปาล์มน้ำมัน

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.5.1 เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางอุตสาหกรรมการเกษตรมาเพิ่มมูลค่า
- 1.5.2 ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการผลิตเชื้อกระดาษจากปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป
- 1.5.3 เป็นทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนในการผลิตเชื้อกระดาษ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความเป็นมาของกระดาษ

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษนับวันยิ่งมีความสำคัญมากยิ่งขึ้นทุกขณะ จากอดีตถึงปัจจุบันความต้องการใช้กระดาษมีปริมาณมากขึ้นทุกๆ ปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่กำลังการผลิตภายในประเทศมีไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษต้องใช้เทคโนโลยีและการลงทุนค่อนข้างสูง ดังนั้นจำเป็นต้องมีวัตถุดิบปริมาณมากพอและสม่ำเสมอเพื่อป้อนเข้าโรงงาน เมื่อกำลังการผลิตภายในประเทศมีไม่เพียงพอ จึงมีการนำเข้าเยื่อและกระดาษ รวมทั้งเคมีภัณฑ์จากต่างประเทศ ได้แก่ แคนาดา สหรัฐอเมริกา และกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป กระดาษพิมพ์เขียนปรากฏขึ้นครั้งแรกในราวปี 2500–2000 ก่อนคริสต์ศักราช ทำจากไม้ตระกูลกกชื่อ ปาปิรัส (Papyrus) ซึ่งขึ้นอยู่ตลอดแนวลำน้ำไนล์ ประเทศอียิปต์ แผ่นจากต้นจะถูกปะติดกันด้วยแป้ง มีคุณภาพดีกว่าหนังวัว หนังแพะ แผ่นอิฐ แผ่นใบ หรือวัสดุที่ใช้เขียนอื่นๆ ที่มีอยู่ขณะนั้น ชาวจีนได้ประดิษฐ์กรรมวิธีทำกระดาษจากไม้ไผ่ใน พ.ศ. 105 และยังมีการทำกระดาษด้วยมือมาจนทุกวันนี้ ซึ่งทางยุโรปได้เรียนรู้กรรมวิธีนี้และเริ่มต้นทำกระดาษจากเศษผ้าในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 14 อังกฤษเริ่มทำในคริสต์ศตวรรษที่ 17 และมีการตั้งโรงงานกระดาษในสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1690 ในขณะนั้นกระดาษที่ผลิตขึ้นในยุโรปทำจากเศษผ้าฝ้ายและเศษผ้าลินิน การพิมพ์หนังสือได้เริ่มโดยการพิมพ์พระคัมภีร์ไบเบิลของลูเตินเบอร์เกอร์ และเป็นการเพิ่มความต้องการกระดาษอย่างสูง [1]

สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมกระดาษไม่ใช่ของใหม่ สำหรับชาวไทยรู้จักการทำกระดาษมาแต่โบราณกาลแล้ว รัฐบาลในอดีตได้เริ่มเห็นความสำคัญของการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อทดแทนการนำเข้า โดยจัดตั้งโรงงานขึ้น 2 แห่ง คือ โรงงานกระดาษสามเสน เมื่อปี พ.ศ. 2466 เป็นการริเริ่มของกรมแผนที่ทหารบก กระทรวงกลาโหม ทำการผลิตกระดาษด้วยเศษกระดาษได้วันละ 1 ตัน และโรงงานกระดาษกาญจนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2478 ทำการผลิตเยื่อกระดาษ และกระดาษพิมพ์เขียนโดยใช้ไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบผลิตกระดาษเขียนได้วันละ 10 ตันและต่อมาในปี พ.ศ. 2485 ได้มีการจัดตั้งกระทรวงอุตสาหกรรมขึ้น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษทั้ง 2 แห่ง จึงได้มีการโอนกิจการขึ้นกับกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2488 รัฐบาลในสมัยนั้นได้จัดตั้งโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษพิมพ์เขียนขึ้นอีก 1 แห่ง คือ โรงงานกระดาษบางปะอินโดยใช้ฟางข้าวและหญ้าขจรจบเป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยสามารถผลิตเยื่อกระดาษได้ประมาณปีละ 9,000 ตัน กระดาษพิมพ์เขียนได้ประมาณปีละ 12,000 ตัน [2]

2.2 ความรู้เบื้องต้น [3]

2.2.1 ประเภทของเส้นใย

ปัจจุบันจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้มนุษย์สามารถสังเคราะห์เส้นใยขึ้นมาใช้เองได้ นอกเหนือจากเส้นใยที่มีอยู่เดิมในธรรมชาติ ดังนั้น อาจแบ่งแหล่งที่มาของเส้นใยได้ ดังนี้

2.2.1.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fiber) อาจแยกตามแหล่งกำเนิดได้ ดังนี้

ก) เส้นใยสัตว์ (Animals Fiber) เส้นใยชนิดนี้มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโปรตีนโดยส่วนใหญ่แหล่งเส้นใย ได้แก่

1. ขนสัตว์และผม (Wool and Hair) เป็นเส้นใยที่ได้จากขนและผมของสัตว์ เช่น ขนแกะ และผมอูฐ เป็นต้น

2. เส้นไหม (Silk) เช่น เส้นไหมที่ได้จากตัวไหม

ข) เส้นใยไม้ (Wood Fiber) เส้นใยชนิดนี้มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ได้จากไม้ยืนต้นและพวกที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood) เช่น ไม้สน ไม้ยูคาลิปตัสและฟางข้าว เป็นต้น

ค) เส้นใยจากแร่ (Mineral Fiber) เป็นเส้นใยแร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น Asbestos ชนิดต่างๆ

2.2.1.2 เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic or Man-made Fiber) เกิดขึ้นจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่มนุษย์นำมาผลิตเส้นใย จากการสังเคราะห์นั้น เส้นใยที่ได้มีทั้งที่ทำจากวัตถุดิบจำพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เส้นใยในกลุ่มนี้มีมากมายและใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เช่น Viscose-Rayon, Nylon, Acrylic, Elastomer และ Glaso-fiber เป็นต้น

2.2.2 แหล่งเส้นใยในการผลิตเยื่อกระดาษ

ไม้จัดเป็นวัตถุดิบสำคัญในการทำเยื่อกระดาษ (Wood Pulp) สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.2.2.1 ไม้ยืนต้น (Wood) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ไม้ใบแคบ (Softwood) เป็นไม้จำพวก Coniferous หรือ Gymnosperm มีใบเป็นรูปเข็มไม่ผลัดใบ เช่น Spruce, Pine และ Fir ในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ สนสองใบและสนสามใบ เส้นใยมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 มิลลิเมตร เยื่อที่ได้จากไม้ใบแคบเรียกว่า เยื่อใยยาว และการเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร “N” (Needle) นำหน้า เช่น NBKP (Needle Bleached Kraft Pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเยื่อใยยาว

ข) ไม้ใบกว้าง (Hardwood) เป็นไม้จำพวก Angiosperm โดยทั่วไปมีใบกว้าง (Board Leaved) เช่น สนทะเลและสนประดิพัทธ์ ในเขตอบอุ่นไม้พวกนี้จะผลัดใบ (Deciduous) เส้นใยของไม้ใบกว้างมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1–2 มิลลิเมตร เช่น Eucalyptus, Birch, Aspen และ

การเรียกชื่อทางการค้ามักมีอักษร “L” (Leaved) นำหน้า เช่น LBKP (Leaved Bleached Kraft Pulp) เพื่อบ่งชี้ว่าเป็นเยื่อไม้ใบกว้าง

2.2.2.2 พวกที่ไม่ใช่ไม้ยืนต้น (Non-wood) เส้นใยที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้จาก

ก) ส่วนที่เหลือทิ้งทางการเกษตร (Agriculture Residue) เช่น ฟางข้าวและ
ชานอ้อย

ข) พืชตระกูลหญ้า (Natural Growing Plants) เช่น ไม้ไผ่และหญ้าขจรจบ

ค) พืชเส้นใยต่างๆ (Crop Fiber)

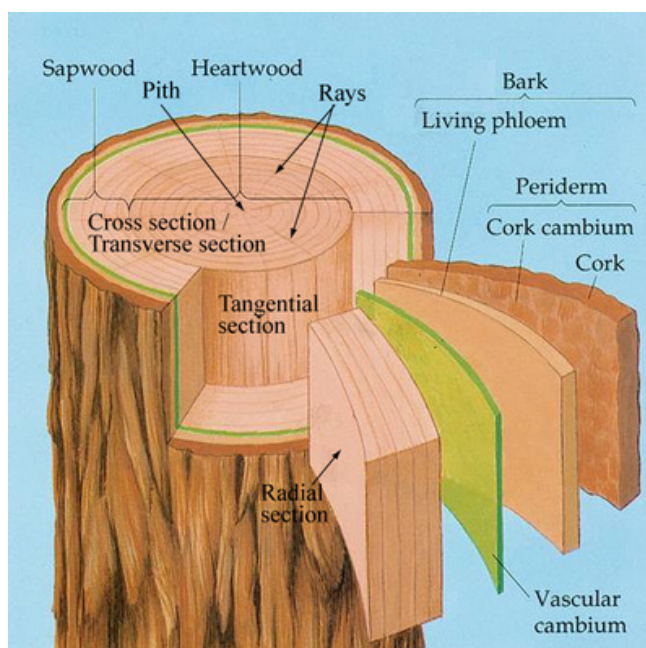
1. เส้นใยที่ได้จากส่วนเปลือกและลำต้น (Bast or Stem) เช่น Hemp, Ramie, Flax, ปอกระเจา (Jute), ปอแก้ว (Kenaf) และปอกระสา เป็นต้น

2. เส้นใยที่ได้จากส่วนใบ (Leaf Fiber) เช่น Abaca, สับปะรดและ ป่านสรนารายน์ (Sisal) เป็นต้น

3. เส้นใยที่ได้จากเมล็ด (Seed Fiber) เช่น ฝ้าย

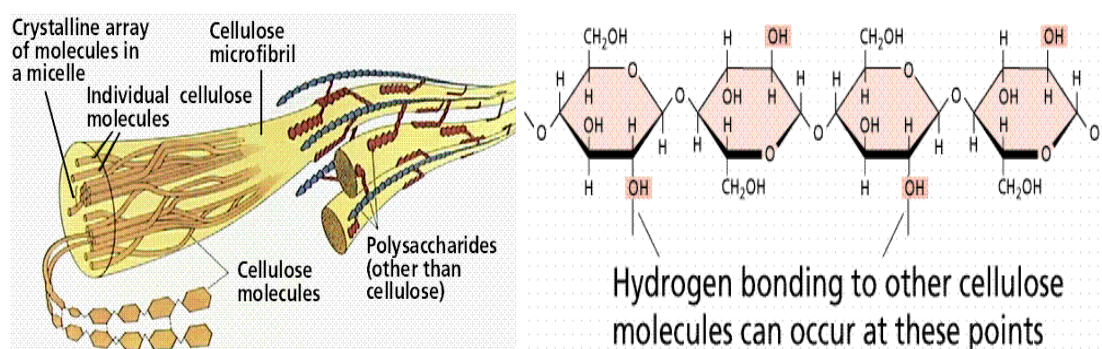
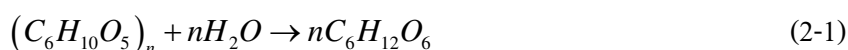
2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Chemical Composition of Wood)

องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษไม่ว่าจะเป็นไม้ใบกว้าง ไม้ใบแคบ หรือพวกที่ไม่ใช่ไม้ยืนต้น ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารแทรก (Extractive) เป็นต้น ดังภาพที่ 2-1 และตารางที่ 2-1



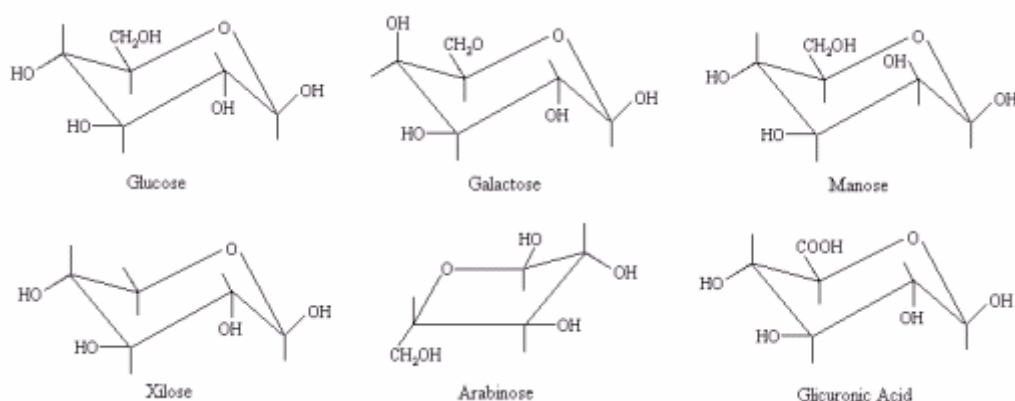
ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบภายในของเนื้อไม้ [4]

2.2.3.1 เซลลูโลส คือโฮโมโพลิเมอร์ (Homopolymer) ของดี-กลูโคส (D-Glucose) เกาะกันด้วย 1,4-Glucosidic Bond มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Straightened Chain) มีความยาวตามธรรมชาติ ประมาณ 10,000 หน่วย ในระหว่างแฉะมีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ซึ่งมีขนาด ประมาณ 35° A เรียกว่า Elementary Fibril อันเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่ปรากฏเป็นเอกเทศตามธรรมชาติ ดังภาพที่ 2-2 เซลลูโลสมีความเป็นผลึกประมาณมากกว่าร้อยละ 60–80 ทนทานต่อสารเคมี โดยมีสารเคมีที่ละลายเซลลูโลสได้ไม่กี่ชนิด เช่น กรดซัลฟูริกความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 68 กรดเกลือความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 41 ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$), Quarternary Ammonium Compound และ Complexing Agents บางชนิด เช่น CuO , NH_3H_2O , CuO -ethylene diamine- H_2O เป็นต้น



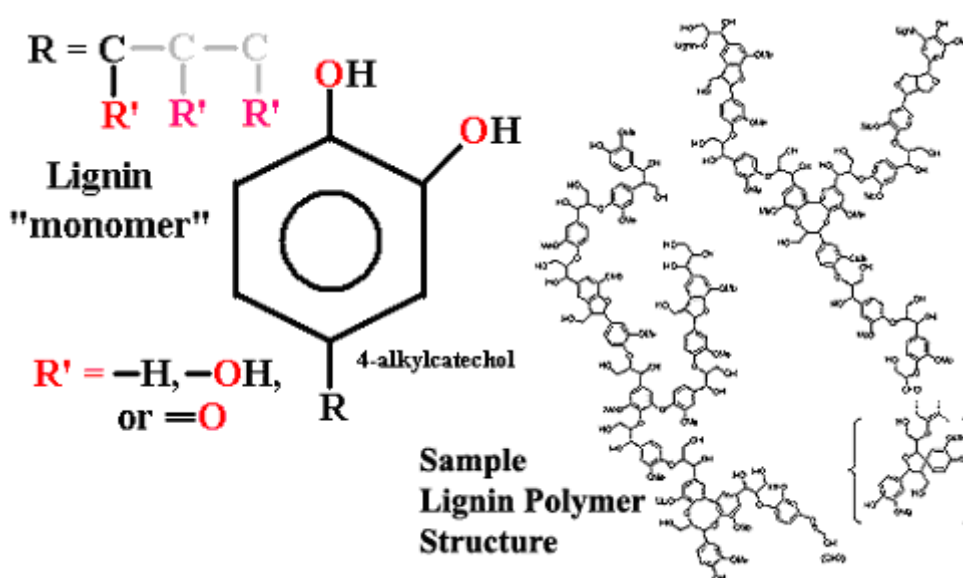
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส [5, 6]

2.2.3.2 เซมิเซลลูโลส คือ เฮเทอโรโพลิเมอร์ (Heteropolymer) ของน้ำตาลชนิดต่างๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส (Glucose) แมนโนส (Mannose) ไซโลส (Xylose) และอราบินโนส (Arabinose) เฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย มีหมู่กรด เช่น อะเซทิล (Acetyl) และยูโรนิค (Uronic) จับอยู่ด้วย ดังภาพที่ 2-3 เซมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานสามารถหุ้มน้ำและพองตัวได้ดี คุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการทำกระดาษ เซมิเซลลูโลสในไม้ใบกว้างจะเป็นพวกไซแลน (Xylan) ส่วนไม้ใบแคบส่วนใหญ่เป็นกลูโคแมนแนน (Glucomannans)



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส [7]

2.2.3.3 ลิกนิน (Lignin) ประกอบด้วย Phenyl Propane Unit เล็กๆ ประมาณ 2,500 หน่วย เป็นอสัณฐาน (Amorphous) จับตัวกันเป็นโครงร่างสามมิติด้วย Ether Bond และ C-C Bond ส่วนใหญ่เป็น Phenyl-O-Aryl Ether Bond ลิกนิน พบมากในส่วนที่เรียกว่า Middle Lamella ทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย เป็นสารซึ่งไม่ชอบน้ำ (Hydropobic) มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) อุณหภูมิที่อ่อนตัวประมาณ 120–200°C ขึ้นอยู่กับความชื้น ดังภาพที่ 2-4 แสดงโครงสร้างของลิกนิน

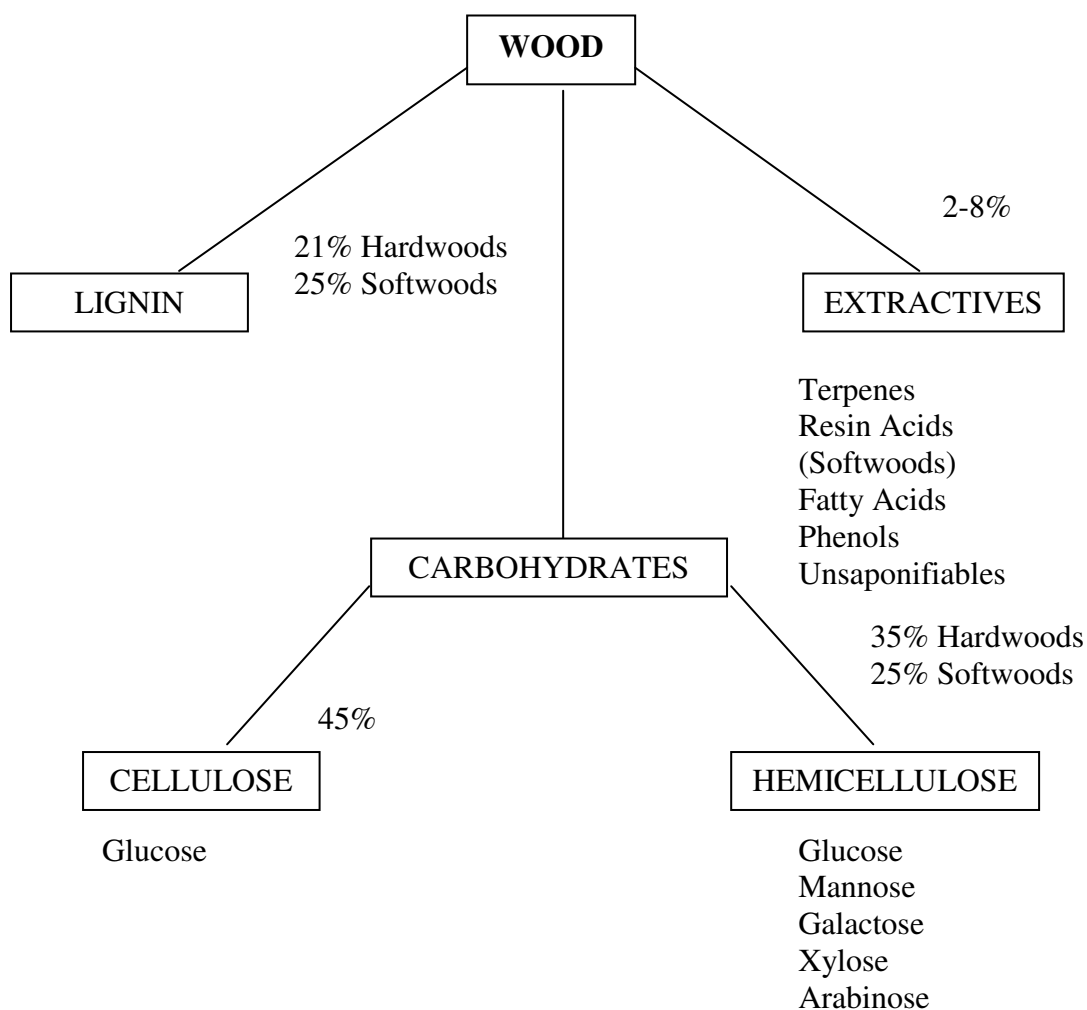


ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของลิกนิน [8]

2.2.3.4 สารแทรก (Extractives) หมายถึง ส่วนประกอบในไม้หรือพืชที่สามารถละลายตัวได้ ในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) เช่น อะซีโตน แอลกอฮอล์ ไคลอโรฟอร์ม และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น ทั้งนี้ไม่รวมถึงอนินทรีย์สาร (Inorganic Material) ที่อาจจะละลายปะปนออกมาด้วย สารสกัดที่ได้นี้มักเป็นชันสน หรือยางไม้

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้ใบกว้างและไม้ใบแคบ [3]

องค์ประกอบทางเคมี หน่วย : ร้อยละ	ไม้ใบแคบ (Softwood)	ไม้ใบกว้าง (Hardwood)
เซลลูโลส (Cellulose)	~ 45	~ 43
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	15 – 20	15 – 30
ลิกนิน (Lignin)	24 – 32	17 – 25
สารแทรก (Extractives)	~ 3.4	~ 2.0



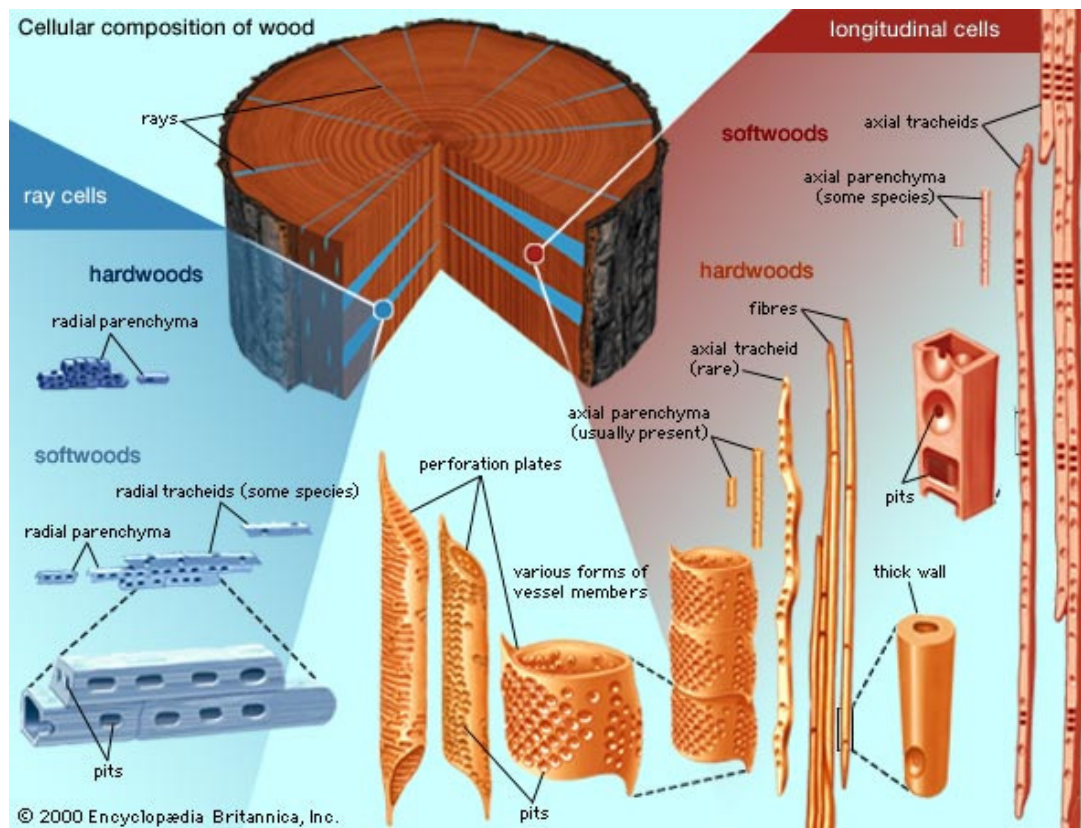
ภาพที่ 2-5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้ [9]

2.2.4 องค์ประกอบของกระดาษในส่วนเส้นใย

กระดาษเป็นแผ่นวัสดุซึ่งได้จากการนำวัสดุหลายๆ ชนิดมาผสมให้เข้ากันดีแล้วนำไปทำเป็นแผ่นวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมเหล่านี้ ได้แก่ เส้นใยสั้น เส้นใยยาว แป้ง ชันสน ดินขาว และผงสี เป็นต้น เราสามารถแยกวัสดุที่ใช้ผสมเหล่านี้ ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous Materials) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Non Fibrous Materials) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งใช้เติมผสมลงไปในส่วนเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.2.4.1 ส่วนเส้นใย (Fibrous Materials) ในกระดาษโดยทั่วไปจะมีส่วนเส้นใยผสมอยู่ประมาณร้อยละ 70–95 ของน้ำหนักกระดาษ โดยปริมาณส่วนเส้นใยจะมีน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ต้องการผลิต ส่วนเส้นใยหรือที่เรียกทั่วไปว่า เยื่อ (Pulp) ที่ใช้ทำกระดาษส่วนมาก จะเป็นเยื่อผสมของเยื่อใยยาวและใยสั้น ดังนั้น ในส่วนเส้นใยจึงประกอบด้วยเซลล์พืชชนิดต่างๆ ผสม กันอยู่ เซลล์เหล่านี้ ได้แก่ เส้นใย (Fiber) เซลล์สำรองอาหาร (Parenchyma Cell) และเซลล์ลำเลียงน้ำ (Vessel Element) ถ้าเป็นเยื่อที่ได้จากไม้ไม่ขึ้นต้น อาจมีเซลล์ชนิดอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น เซลล์วงแหวน (Ring thickening) เซลล์ปากใบ (Stomata Cell) และเซลล์ผิวหนัง (Epidermis Cell) เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อความเข้าใจและรู้จักส่วนเส้นใยได้ดีขึ้น จึงควรเริ่มจากการรู้จักกายวิภาคของไม้ (Wood Anatomy) ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ชนิดต่างๆ ที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน แสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 รูปร่างของเซลล์ชนิดต่างๆ ในไม้ใบแคบและไม้ใบกว้าง [10]

1. เส้นใย (Fiber or Tracheid) เป็นเซลล์รูปยาวเรียวปิดหัวปิดท้าย มีผนังเซลล์ตรงกลางเป็นช่องว่าง เรียกว่า ลูเมน (Lumen) เส้นใยของไม้แต่ละชนิดจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามความหนาของผนังเซลล์ ความกว้างของลูเมนและลักษณะของรูเปิด (Pit) ถ้าเป็นเส้นใยของไม้ใบแคบจะเรียกว่า Tracheid เส้นใยทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ต้นไม้ เส้นใยส่วนมาก จะเรียงตัวตามความยาวในแนวขนานกับลำต้น ซึ่งเส้นใยเป็นส่วนสำคัญที่สุดที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ

2. พาเรนไคมาเซลล์ (Parenchyma Cell) เป็นเซลล์ปิด มีขนาดเล็กมาก รูปร่างโดยทั่วไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำหน้าที่เก็บสำรองอาหาร

3. เวสเซลอีลีเมนต์ (Vessel Element) เป็นเซลล์ขนาดใหญ่ รูปร่างคล้ายเส้นใยที่ปลายเปิดทั้งสองข้างและมีลักษณะของรูเปิดที่แตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของไม้ ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำ

2.2.4.2 โครงสร้างของเส้นใย (Fiber Structure) เส้นใยจะมีผนังเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยชั้นของเซลลูโลส ไมโครไฟบริลที่ฝังตัวอยู่ในชั้นออสันฐานของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เส้นใยแต่ละเส้นเมื่อนำมาตัด ตามขวางแล้วส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆ พบว่าผนังเส้นใยมิได้เป็นวัสดุเนื้อเดียวสม่ำเสมอโดยตลอด แต่ประกอบขึ้นด้วยผนังย่อยๆ หลายชั้น ซึ่งสามารถแยกความแตกต่างได้เป็น 4 ชั้นด้วยกัน คือ ผนังชั้นนอกสุดหรือผนังชั้นแรกของเส้นใย เรียกว่า Primary Wall Layer (P)

ผนังชั้นที่ 2 ของเส้นใย เรียกว่า Secondary Wall Layer (S) ในผนังชั้นที่ 2 ของเส้นใยนี้ ประกอบด้วยผนังย่อย 3 ชั้น มีลักษณะแตกต่างกัน โดยมีชื่อเรียกตามลำดับ ดังนี้ Outer Secondary Wall Layer (S_1), Middle Secondary Wall Layer (S_2), Inner Secondary Wall Layer (S_3) หรือเรียกว่า Tertiary Wall ผนังเส้นใยทั้ง 4 มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกัน ดังนี้

ก) ผนังชั้นนอกสุดของเส้นใย หรือผนังชั้นที่ 1 หรือ เรียกว่า Primary Wall ในชั้นนี้จะมีผนังค่อนข้างบางโดยมีความหนาประมาณ 0.1–0.2 ไมครอนเท่านั้น ประกอบด้วยน้ำ ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 30 ส่วนที่เหลือเป็นของแข็ง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลสที่อยู่ในรูปของไมโครไฟบริล เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ในชั้นที่ 1 นี้ ไมโครไฟบริลจะมีเพียงชั้นเดียวและสานตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะคล้ายร่างแหที่ถักพันกัน สานตัวตลอดแนวกว้างยาวของเส้นใยผนังชั้นนอกของเส้นใยแต่ละเส้นจะยึดเชื่อมติดกันด้วยชั้นบางๆ ซึ่งเรียกว่า Middle Lamella

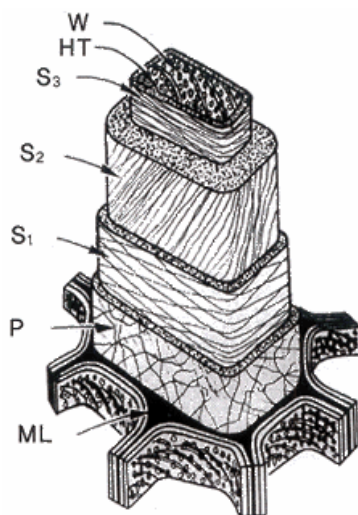
ข) ผนังชั้นที่ 2 หรือเรียกว่า Secondary Wall ผนังชั้นที่ 2 ของเส้นใยนี้จะอยู่ถัดเข้ามาจากผนังชั้นที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่นเดียวกับชั้นที่ 1 แต่มีความแตกต่างกันมากเรื่องรูปร่าง ชั้นนี้มีความหนามากกว่าชั้นที่ 1 ไมโครไฟบริลจะซ้อนกันอยู่หลายชั้น ในขณะที่ชั้นที่ 1 มีไมโครไฟบริลเพียงชั้นเดียวมีช่องว่างระหว่างกันกว้างและสานตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่ในชั้นที่ 2 จะมีชั้นย่อย 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นจะมีการจัดตัว ซ้อนกันอย่างแน่นหนาของไมโครไฟบริลและไมโครไฟบริลจะมีทิศทางการเรียงตัวทั้งในแนวขวาง และขนานกับแกนเส้นใย ซึ่งแต่ละชั้นย่อยจะมีความแตกต่างกัน ดังนี้

1. ชั้น S_1 Outer Secondary Wall ในชั้น S_1 นี้ค่อนข้างบาง มีความหนาใกล้เคียงกับชั้นที่ 1 โดยทั่วไปจะประกอบด้วย ชั้นของแผ่นบางๆ ซ้อนกันอยู่ประมาณ 4–6 แผ่น ไมโครไฟบริลของชั้นนอกสุด จะมีการเรียงตัวแบบบันไดเวียน (Spiral) โดยทำมุมประมาณ 60° กับแนวแกนยาวของเส้นใย

2. ชั้น S_2 Middle Secondary Wall ในชั้น S_2 นี้จะอยู่ถัดจากชั้นของ S_1 เข้าไปข้างใน ชั้นนี้จะประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นบางๆ ซ้อนกันประมาณ 150 แผ่น ซึ่งเป็นชั้นที่หนาที่สุด ไมโครไฟบริลในชั้นนี้จะเรียงตัวกันแบบบันไดเวียนหรือก้นหอย (Helix) โดยมีความชันมากกว่าชั้น S_1 โดยทำมุมประมาณ $10-20^\circ$ กับแกนยาวของเส้นใย ชั้นนี้จะหนาประมาณ 10–30 ไมครอน

3. ชั้น S_3 Inner Secondary Wall หรือ Tertiary wall ชั้น S_3 นี้จะอยู่ถัดจากชั้น S_2 เข้าไปข้างใน ประกอบไปด้วยชั้นของแผ่นบางๆ ซ้อนกันประมาณ 12 แผ่น ไมโครไฟบริลของชั้นนอกจะเรียงตัวในทิศทางขนานกับไมโครไฟบริล S_2 แต่ชั้นในสุดของ 4 แผ่นสุดท้ายไมโครไฟบริลจะเรียงตัวขวางกับแกนยาวของเส้นใยในไม้บางชนิด ตรงส่วนที่ติดกับลูเมน (Lumen) จะมีลักษณะคล้าย ปุ่มเกิดขึ้น เรียกว่า Warty Layer ดังภาพที่ 2-7

จากภาพที่ 2-7 จะเห็นได้ว่าชั้น S_2 มีปริมาณมากที่สุดและมีเฮมิเซลลูโลสสูงที่สุด ผนังชั้นนี้จึงเป็นส่วนสำคัญมากสำหรับคุณลักษณะในการทำกระดาษของเส้นใย



ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย [11]

2.3 กระบวนการผลิตเยื่อ [12]

มีหลายกระบวนการที่เป็นกระบวนการพื้นฐานในการผลิตเยื่อกระดาษไม้ กระบวนการบางอย่างใช้ไม้ใบแคบดีกว่าไม้ใบกว้าง ซึ่งบางกระบวนการให้ผลผลิตผลิตภัณฑ์สูงแต่คุณภาพกระดาษต่ำ หรือบางกระบวนการให้ผลผลิตผลิตภัณฑ์ต่ำแต่ให้กระดาษที่มีคุณภาพสูง เป็นต้น การจะเลือกใช้กระบวนการใดต้องคำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์ ในที่นี้จะพิจารณาการผลิตเยื่อแบบเคมีซึ่งปัญหาที่สำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ คือ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

2.3.1 กระบวนการคราฟท์ (Kraft or Sulfate Process)

กระบวนการคราฟท์หรือซัลเฟตเป็นกระบวนการทำเยื่อกระดาษที่นิยมใช้กันมาก สารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายต่าง กระบวนการนี้พัฒนามาจากกระบวนการโซดาซึ่งเลิกใช้ไปแล้ว ในกระบวนการโซดาจะทำการต้มเยื่อ โดยใช้สารละลายที่เป็นด่างแก่ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการโซดาจะต่ำ สามารถใช้ได้กับไม้ใบกว้างที่มีเส้นใยสั้น

สำหรับกระบวนการคราฟท์ สารเคมีที่ใช้เดิมลงไปในการละลายต้มเยื่อ คือ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ในกระบวนการผลิต จะใช้สารละลายของโซเดียมซัลไฟท์ (Na_2S) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ซึ่งเตรียมจากซัลเฟต และจากสารละลายที่ใช้ต้มเยื่อ (Cooking Liquor) ที่ได้จากกระบวนการ

กระบวนการกราฟท์ สามารถนำมาใช้กับไม้ได้ทุกชนิดและเส้นใยที่ได้จะมีความแข็งแรงที่สำคัญ คือ สารเคมีที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก ซึ่งเป็นการลดหรือช่วยกำจัดภาวะมลพิษได้ แต่กลิ่นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ปล่อยออกมา ทำให้เกิดสภาวะมลพิษที่ร้ายแรง และควบคุมได้ยาก

กระบวนการกราฟท์ส่วนมากใช้กับไม้สน หม้อต้มเยื่อที่ใช้เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Digester) แม้ว่าจะมีการคิดค้นหม้อต้มเยื่อเป็นแบบไม่ต่อเนื่องมีขนาดใหญ่ขึ้นมาใช้ในกระบวนการผลิต และสามารถควบคุมการผลิตได้ดีก็ตาม แต่หม้อต้มเยื่อที่ใช้เป็นแบบต่อเนื่องจะลงทุนน้อยกว่า ในแง่ของปริมาณ และสามารถควบคุมการเกิดภาวะมลพิษได้ง่ายกว่า และขนาดเล็กกว่า จึงนิยมใช้ระบบแบบต่อเนื่องมากกว่า

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการต้มเยื่อ (Cooking Process) คือ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเกิดการละลาย (Solubilization) ของลิกนินออกมาทำให้เซลลูโลสแยกออกมา น้ำมันสนที่อยู่ในเนื้อไม้ ก็จะถูกระเหยออกไปและได้สับซุโซเดียมของกรดของยางสน (Rosin Acid) ซึ่งในกระบวนการไฮโดรไลซิส จะแยกเมอแคปเทน (Mercapton, R-SH) และสารอินทรีย์ซัลไฟด์ (Organic Sulfides) ออกมาเป็นอิสระ ซึ่งพวกนี้จะมีกลิ่นเหม็น

2.3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ไม้จะถูกตัดลอกเปลือกออกก่อนและนำมาตัดให้ได้ขนาดความยาวที่เหมาะสม ต่อจากนั้นจะตัดเป็นชิ้นๆ ด้วยจานหมุนขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยใบมีดที่หนัก 4 อัน หรือมากกว่า ให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นผ่านเข้าเครื่องร่อนแบบหมุน หรือแบบสั่นเพื่อแยกไม้ที่มีขนาดใหญ่ ไม้ขนาดที่ต้องการ และแยกขี้เลื่อยออก ชิ้นไม้ที่มีขนาดโตเกินไป เศษไม้ และขี้เลื่อย จะถูกส่งเข้าเครื่องใหม่เพื่อลดขนาดของมันให้มีขนาดที่เหมาะสมอีกครั้ง

2.3.1.2 การต้มเยื่อ

ก) ชิ้นไม้ขนาดที่เหมาะสมจะถูกส่งเข้าหม้อต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่ความดัน 100 กิโลปาสคัล เพื่อระเหยน้ำมันสนและก๊าซที่ไม่กลั่นตัวออกไป จากนั้นทำให้ความดันเพิ่มเป็น 900 กิโลปาสคัลที่อุณหภูมิที่ปรับไว้เหมาะสมแล้ว เพื่อให้ชิ้นไม้ทำปฏิกิริยากับสารเคมีในสารละลายที่ใช้ต้มเยื่อ (Cooking Liquor) ทำการต้มประมาณหนึ่งชั่วโมงครึ่ง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

ข) ในการหยุดปฏิกิริยาการต้มเยื่อทำได้โดยผ่านสารเคมีที่เป็น Cooking Liquor ที่เย็นเข้าไปอย่างรวดเร็ว โดยให้มีทิศทางการไหลสวนทางกับตอนแรก ซึ่งเป็นการล้างสารเคมีในไม้ ออก รวมทั้งยังลดความดันลงอีกด้วย

ค) ไม้ที่ได้จะมีของเหลวออกมาด้วย เรียกว่า Brown Stock

2.3.1.3 การล้าง

จากนั้นแยกเยื่อออกจากของเหลว แล้วล้างด้วยน้ำ นำไปผ่านเครื่องร้อนเพื่อแยกเศษไม้ สิ่งเจือปน ขยะอื่นๆ ออก ส่งต่อไปยังเครื่องทำให้ชื้น และเครื่องกรอง

2.3.1.4 การฟอกสี

เยื่อกระดาษที่ได้จากการทำให้ชื้น (Thickened) นำมาฟอกสีเพื่อกำจัดสีแทนนินในไม้เยื่อที่ได้ จะมีสีขาวหรือสีอ่อน สารที่ใช้ในการฟอกสีที่เป็นตัวรีดิวซ์ ได้แก่ โซเดียมไดไทโอเนต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) โซเดียมโบโรไฮไดรด์หรือไบซัลไฟต์ (Bisulfite) ส่วนสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ โอโซน (O_3), Na_2O_2 , H_2O_2 , ClO_2 และคลอรีน หลังจากฟอกสี เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการจะถูกล้างด้วยน้ำอีกครั้งและเก็บเป็นแผ่นเยื่อ ทำให้แห้ง มัดเก็บ และขนส่ง ซึ่งเยื่อกระดาษของขั้นตอนนี้อาจนำไปใช้ทำกระดาษได้เลย

เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการทำเยื่อกระดาษแบบกราฟท์นั้นมีเส้นใยยาวที่สุด นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในกระบวนการก็ไม่รุนแรงเหมือนปฏิกิริยาเคมีในการทำเยื่อกระดาษอื่นๆ กระดาษที่ได้มีความแข็งแรง โดยทั่วไปกระดาษที่ได้จากกระบวนการกราฟท์เป็นกระดาษสีทึบ นิยมนำไปใช้ห่อของทำถุงใส่ของ ทำกระดาษแข็ง ต่อมาเมื่อมีการพัฒนากระบวนการฟอกสีใหม่ให้ดีขึ้น ทำให้ได้กระดาษที่สว่างและมีสีขาวขึ้น

2.3.1.5 การนำสารละลายสีดำกลับมาใช้ใหม่

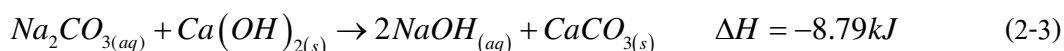
สารละลายสีดำ (Black Liquor) จะแยกจากเยื่อกระดาษในเครื่องล้างเยื่อ หรือเครื่องกระจายเยื่อ ประมาณร้อยละ 95–98 ของสารที่แยกได้ ประกอบด้วยสารเคมีที่ใส่เข้าไปในหม้อต้มเยื่อ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ของซัลเฟอร์รวมอยู่ในรูปของโซเดียมซัลไฟด์ และมีของแข็งประมาณร้อยละ 20 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต เกลือ ซิลิกา ปูนขาว เหล็กออกไซด์ อะลูมินา

ทำสารละลายสีดำให้เข้มข้นขึ้น ซึ่งจะมีปริมาณของแข็งร้อยละ 35 โดยใช้เครื่องระเหยแบบหลายขั้นตอน จากนั้นฉีดสารละลายที่ได้เข้าไปในเตาเผา เกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลไฟด์ตามสมการ



ในเตาเผาสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนจากไม้จะถูกทำให้สลายตัวไป ส่วนสารอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Na_2CO_3 และจะมี Na_2S ปนอยู่ด้วย จะถูกเผาจนละลายเกิดไอน้ำ และเกลือที่หลอมเหลว (Molten Salt หรือ Smelt) ปฏิกิริยาของเกลือที่หลอมเหลว ถ้ามี่น้ำผสมอยู่เล็กน้อยอาจทำให้เกิดการ ระเบิดได้ การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไพโรลิซิส (Hydropyrolysis) ของของแข็งที่แห้งในสารละลายสีดำจะ ทำให้ได้ก๊าซเผาไหม้ และถ้าใช้เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้เป็นแบบฟลูอิดไคซ์ของเหลวร้อยละ 35 ของสารละลายจะให้เม็ดสารเคมีแทนที่จะหลอมเหลว

สารเคมีที่หลอมเหลวนำไปละลายในสารละลายเจือจางที่ได้จากกระบวนการต้มเยื่อ ทำให้ได้สารละลายเป็นของเหลวสีเขียว (Green Liquor) สารเจือปนที่ไม่ละลายจะถูกขับออก จากนั้นเติมปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลงไปเพื่อให้เกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดังปฏิกิริยา

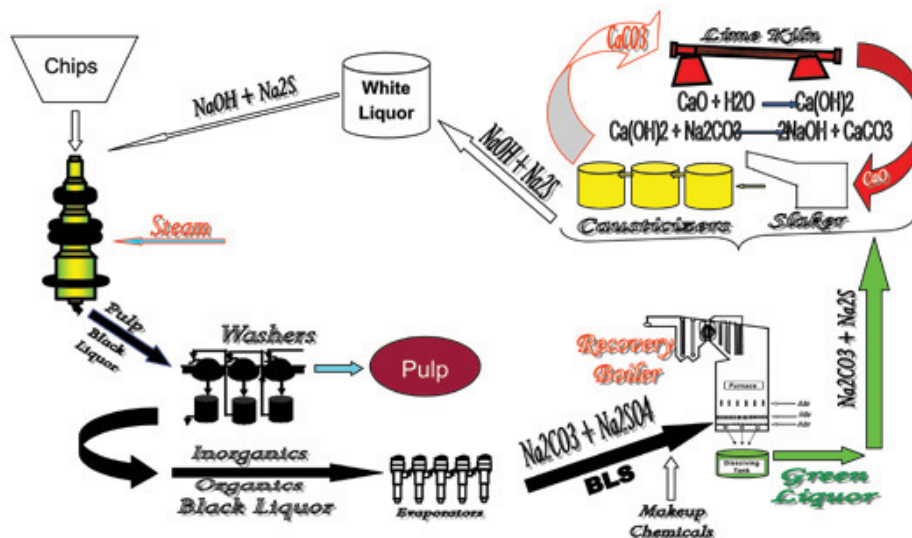


ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น ปล่อยให้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนแยกในถังตะกอน จากนั้นกรองแยกตะกอนออกมาได้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปโคลนแล้วนำไปเผาในเตาเผาได้แคลเซียมออกไซด์นำกลับไปใช้ในกระบวนการได้อีก ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่กรองแยกออกมาได้ เรียกว่า ของเหลวสีขาว (White Liquor) ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ กับส่วนน้อยของพวกโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต โซเดียมซัลไฟด์ และไทโอซัลเฟตนำกลับไปใช้ในการต้มเยื่ออีก

ผลผลิตพลอยได้จากของเหลวสีดำ คือ Tall Oil มีลักษณะสีดำ หนืด เหลว ประกอบด้วยเรซินและกรดไขมัน ทำการแยกออกมาด้วยการเซนตริฟิวส์ หรือใช้วิธี Flotation หม้อต้มเยื่อ (Digester) จะปล่อยก๊าซออกมาประกอบด้วยน้ำมันสน 11–42 ลิตรต่อเยื่อกระดาษ 1 เมตริกตัน บางครั้งในการทำให้บริสุทธิ์จะให้ Sulfate Turpentine ออกมา

2.3.2 กระบวนการโซดา

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดามีลักษณะคล้ายกับกระบวนการคราฟท์ หรือซัลเฟต ยกเว้น สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคาร์บอเนต ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$) และสารเคมีปรุงแต่งเป็นโซเดียมคาร์บอเนตแทนที่จะเป็นโซเดียมซัลเฟต ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบโซดานิยมใช้กับวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ยืนต้น (Non-Wood) มากกว่า



ภาพที่ 2-8 แสดงกระบวนการผลิตเยื่อกราฟท์และกระดาษในปัจจุบัน [13]

2.3.3 กระบวนการซัลไฟต์

เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการซัลไฟต์มีปริมาณน้อย แต่คุณภาพสูง ปัญหาที่เกิดจากกระบวนการนี้ คือ จะเกิดน้ำที่เป็นมลพิษ ต้นไม้ที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ ต้นสน และต้น Hemlock และส่วนต้น Balsam ใช้ในปริมาณปานกลาง สำหรับขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษของกระบวนการซัลไฟต์แบ่งได้ดังนี้

2.3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ ไม้ถูกนำมาลอกเปลือกทำความสะอาดและทำให้เป็นชิ้นเนื้อยาวประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วถูกนำไปเก็บไว้ก่อนจะใส่ลงในหม้อต้มเยื่อ

2.3.3.2 ขั้นตอนการต้มเยื่อ

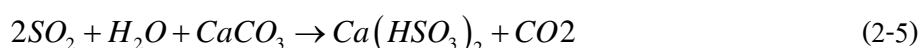
- ก) กระบวนการย่อยเซลลูโลสโดยใช้ซัลไฟต์ยังไม่เป็นที่เข้าใจเท่าที่ควร
- ข) กระบวนการซัลไฟต์ต้องการใช้พลังงานสูงมาก
- ค) กระบวนการย่อยไม้ ใช้สารละลายที่มีแคลเซียมไบซัลไฟต์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์จำนวนมาก

กระบวนการซัลไฟต์มีปฏิกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา

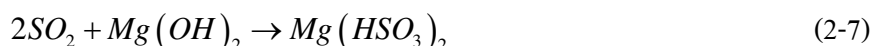
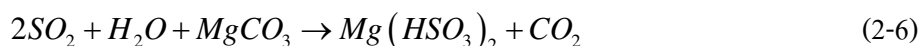
1. ปฏิกิริยาซัลไฟเนชัน และการละลายลิกนินด้วยไบซัลไฟต์
2. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ทำให้เกิดการแยกตัวออกของสารประกอบเชิงซ้อนเซลลูโลส-ลิกนิน ส่วนของเฮมิเซลลูโลสจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นสารประกอบง่าย ๆ และส่วนประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องหรือไม่ต้องการจากไม้ก็จะถูกไฮโดรไลซ์ออกมาด้วย

เนื่องจากของเสียที่ได้จากกระบวนการจะรวมอยู่ในน้ำอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เกิดภาวะมลพิษทางน้ำ จึงมีการคิดวิธีการกำจัดสารเหล่านี้ออกไปหรือนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ เช่น มีการนำแมกนีเซียมออกไซด์มาใช้แทนหินปูน เพราะว่าสามารถนำสารเคมีและความร้อนกลับมาใช้ได้อีก และใช้โซเดียมและแอมโมเนียแทนแคลเซียม เพราะของเสียที่อยู่ในรูปของเหลวจากกระบวนการแคลเซียมซัลไฟด์ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากแคลเซียมซัลไฟด์ไม่ย่อยสลายไปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่แมกนีเซียมสามารถย่อยได้ และเกิดแอมโซเนียมซัลเฟต (CaSO_4) แล้วหายไป ในปัจจุบันได้มีการใช้กระบวนการใหม่ๆ ที่ยอมรับได้บนพื้นฐานของแมกนีเซียมซัลไฟด์ โดยใช้สารประกอบแคลเซียม ซึ่งจะให้ความเข้มข้นมากกว่า และสามารถรวมตัวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่า ไม่มีอันตรายจากปฏิกิริยาคตะกอนและสามารถแยกตัวได้อย่างรวดเร็ว และการละลายของส่วนประกอบพวกที่ไม่ใช่ลิทินินและเฮมิเซลลูโลส

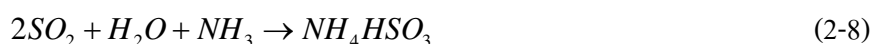
ปฏิกิริยาในการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการต้มเชื้อของกระบวนการซัลไฟต์มีดังนี้คือ



หรือ



หรือ



2.3.3.3 การผลิตเยื่อกระดาษโดยวิธี Neutral Sulfite Semi-Chemical หรือ NSSC

วิธีการนี้จะใช้สารเคมีน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการนี้สูงถึงร้อยละ 65-80 ส่วนใหญ่นำไปใช้ทำกระดาษอัดและกระดาษย่น หม้อต้มเชื้อที่ใช้มีทั้งแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง สารต้มเชื้อที่ใช้ค่อนข้างอ่อน ใช้ในการทำลายสารยึดเกาะระหว่างเยื่อที่แข็งแรงน้อย จากนั้นแยกเยื่อกระดาษโดยวิธีเชิงกล

สารต้มเชื้อ ใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ แล้วทำให้เป็นบับเฟอร์ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ส่วนสารตัวอื่นๆ ที่ใช้ในการต้มเชื้อ เช่น ของเหลวสีเขียวจากกระบวนการคราฟท์

อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเชื้อเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษที่อ่อนนุ่มเพียงพอที่สามารถทำให้บริสุทธิ์ขึ้นโดยวิธีทางกลได้ง่าย

2.3.3.4 การผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการทางเชิงกล (Mechanical) และเชิงกลรวมกับความร้อน (Thermomechanical)

กระบวนการนี้ไม่ใช่สารเคมี ไม้ที่ใช้เป็นจำพวกสนอ่อน เช่น Spruce และ Balsam ทำการกะเทาะเปลือกไม้ซุงด้วยวิธีการวางไม้ให้ด้านกรมนของก้อนหิน ทำให้ใยกระดาษถูกฉีกออกแต่ไม่แตกเสียหาย แล้วเติมน้ำลงไปเพื่อลดความร้อนจากการเสียดทานและเพื่อให้ใยกระดาษหลุดออกไป

ส่วนที่ยังหยาบจะถูกแยกออกไปเพื่อส่งไปแปรรูปใหม่เพื่อให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นผ่านเข้าเครื่องร่อนแยกส่วนที่ละเอียดเกินไปตกตะกอนในถังกรองได้ Mechanical Pulp น้ำที่ล้นออกมาจากถังกรองจะประกอบด้วยเส้นใยเดิมร้อยละ 15-20 นำกลับไปวนซ้ำในเครื่องฉีกเส้นใยอีกครั้ง แล้วนำไปเก็บใน Stock Sewer

ในกระบวนการการเติมน้ำสะอาดลงไปในระบบเพื่อช่วยลดอุณหภูมิ น้ำสีขาวจะถูกแยกออกไปหลังจากแยกเส้นใยออกไปแล้ว ส่วนที่เหลือจะเป็นของเสีย การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปฏิกิริยาไฮโดรชันของเซลลูโลสมีเพียงเล็กน้อย โดยทำปฏิกิริยากับน้ำอุ่นที่เติมลงไป

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ 3 แบบ [1]

ชนิดของกระบวนการ	กระบวนการกราฟท์หรือซัลเฟต (ค้าง)	กระบวนการซัลไฟต์ (กรด)	กระบวนการ NSSC
วัตถุดิบในการผลิตเซลลูโลส	ใช้ได้ทั้งไม้ใบแคบและไม้ใบกว้าง	ไม้ใบแคบจะได้สีที่ดี และได้สารประกอบฟีนอลออกมา	ส่วนมากใช้ใบกว้าง ถ้าเป็นไม้ใบแคบจะได้เศษไม้ขนาดเล็ก
กระบวนการหลักในหม้อต้มเยื่อ	เกิดไฮโดรลิซิสของลิกนิน เป็นกรด และแอลกอฮอล์ และมีเมอร์แคปแทนเกิดขึ้น	$RH = CH + Ca(H_2SO_4)$ จะได้ $(RCHR-SO_2)_4C$	เกิดปฏิกิริยาซัลไฟต์ในชั้นของลิกนินและไฮโดรลิซิสของเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดอะซิเตทและฟอร์เมต
ส่วนประกอบของ cooking liquor	NaOH ร้อยละ 12.5, NaOH, Na_2S ตัวเกิด ปฏิกิริยา คือ NaOH และ Na_2S ส่วน Na_2CO_3 ไม่เกิด	SO_2 ร้อยละ 4.5 จะรวมกับกรดซัลฟิวริก ร้อยละ 2.5 จะรวมกับ Ca และ $Mg(HSO_3)_2$ ถ้าต้มเยื่อ 1 ตัน ใช้ 175-222 kg ของ SO_2 , 56-68 kg ของ MgO ใช้ $Mg(OH)_2, NH_4OH$ เร่งการละลายลิกนิน	Na_2 เป็นบัฟเฟอร์ของ Na_2CO_3 ไบคาร์บอเนต Kraft Green liquor ความเข้มข้นของ Na_2S 90-100 g/l Cooking liquor จะให้เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ แต่การปฏิบัติทางการกลสามารถทำได้
สภาวะของหม้อต้ม	เวลา 2-5 ชม. อุณหภูมิ 170-176 องศาเซลเซียส ความดัน 660-925 กิโลปาสกาล	เวลา 6-12 ชม. อุณหภูมิ 125-160°C หรือสูงกว่าความดัน 620-755 กิโลปาสกาล	

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

ชนิดของ กระบวนการ	กระบวนการกราฟท์หรือ ซัลเฟต (ค้าง)	กระบวนการซัลไฟด์ (กรด)	กระบวนการ NSSC
สารเคมีที่ได้ กลับคืนมา	กระบวนการทั้งหมดจะได้ สารเคมีกลับคืนมาโดยความ ร้อนจะทำให้ตกกระทบ กลับผ่านสารประกอบ อินทรีย์ถูกเผา และละลายใน ของเหลวจากไม้สารเคมีที่ หายไปจากระบบจะเติมด้วย Salt Oake (Na_2SO_4)	ได้ก๊าซ SO_2 และของเหลว แมกนีเซียมกลับคืนมา และนำ กลับไปใช้หลังจากการย่อยและการ ล้างเชื้อกระดาษ	ให้ผลผลิตสูงถึงร้อยละ 65-85 เชื้อ กระดาษหายไปร้อยละ 35-15 ของไม้ที่ใช้ ได้สารเคมีกลับคืน มาแบบวิธีพิเศษ และสารเคมี ยังคงใช้ต่อไปได้
วัสดุที่ใช้สร้าง อุปกรณ์	หม้อต้มเชื้อ ท่อป้อน และถังทำ ด้วยเหล็กอ่อนหรือบางที่อาจ ทำด้วยสแตนเลส	ของเหลวเป็นกรด ใช้หม้อต้มที่บุ ด้วย Acid-Proof Brick แล้วปิดให้ แน่นด้วยนิเกิล, โครม, ตะกั่ว หรือ บรอนซ์	มีปัญหาการเกิดสนิมในหม้อต้ม เชื้อและอุปกรณ์ที่ใช้มือ ใช้สแตน เลสป้องกันได้
สมบัติของเชื้อ กระดาษ	สีน้ำตาล ฟอกยาก เส้นใยแข็ง มีความต้านทานต่อการฟอก เชิงกล	สีเขียวจาง ง่ายต่อการฟอกเส้นใย อ่อนกว่าเส้นใยจากกระบวนการ กราฟท์	เหนียว มีความมันวาวน้อย เส้นใย แข็งแรง
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระดาษ	ทำถุงกระดาษ กระดาษเหนียว และ Paperboard ใช้ทำกล่อง กระดาษในการบรรจุขวดนม และทำบอร์ดที่เป็นลอน	มีสีขาว ใช้ทำกระดาษเขียน กระดาษ ทิชชู	ถ้ายังไม่ฟอกใช้ทำ Corrugating board กระดาษหนังสือพิมพ์ บอร์ดชนิดพิเศษ ถ้าฟอกแล้วทำ กระดาษเขียนและ กระดาษโร เนียว ทิชชู

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wanrosli, Zainuddin and Roslan [14] ได้ทำการพัฒนาคุณสมบัติของกระดาษรีไซเคิล โดยการเติมเยื่อกระดาษจากทะเลสาปาล์ม ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อทำการรีไซเคิลกระดาษจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและความแข็งแรงของกระดาษจะลดลง เมื่อทำการศึกษาโดยการผสมเยื่อปาล์ม จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ มีแนวโน้มที่ดีขึ้นเพียงแค่เติมเยื่อปาล์ม 20 % จะสามารถทำให้คุณสมบัติของกระดาษกลับมาเหมือนเดิมได้ แล้วเมื่อทำการเติมเยื่อปาล์มที่ 10-100 % พบว่า ความแข็งแรง ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความหนาแน่นของกระดาษ ค่าดัชนีด้านการฉีกขาด มีแนวโน้มดีขึ้นเป็นลำดับ

Rosli, et al. [15] ศึกษาสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการการต้มเยื่อจากต้นปาล์มน้ำมัน ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อระหว่าง 160-180 องศาเซลเซียส เวลาในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด 1-2 ชั่วโมง ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป 20-30 เปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักเยื่อแห้ง จากผลการทดลองพบว่า ได้ปริมาณเยื่อผลผลิตประมาณ 35-45 เปอร์เซ็นต์ โดยเวลาที่ใช้

ในการต้มเยื่อไม่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อเท่ากับอุณหภูมิในการต้มเยื่อและปริมาณสารเคมีที่เติมลงไป

Khoo and Lee [16] ศึกษากระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ โดยทำการเปรียบเทียบกระบวนการทางกลแบบร้อน (Thermomechanical Pulp: TMP) และกระบวนการกึ่งเคมี (Neutral Sulfite Semichemical: NSSC) พบว่า การผลิตเยื่อโดยกระบวนการทางกลแบบร้อนจากส่วนของทะลายปาล์มเพียงอย่างเดียว จะได้ปริมาณเยื่อผลผลิตไม่เก็ยร้อยละ 76 แต่มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและความแข็งแรงสูง ส่วนเส้นใยปาล์มที่เตรียมจากกระบวนการกึ่งเคมี จะได้ปริมาณผลผลิตเยื่อที่ดีและความแข็งแรงปานกลาง แต่ให้ค่าต้านทานแรงยึดดึงที่สูงกว่าการเตรียมโดยกระบวนการทางกลแบบร้อน 8 เปอร์เซ็นต์

Law and Roali [17] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์และสมบัติของเส้นใยกระดาษที่ได้จากส่วนต่างๆ ของต้นปาล์ม เช่น ลำต้น ทางใบ ทะลาย พบว่า ทางใบจะให้เส้นใยที่ยาวที่สุด ความยาวเฉลี่ยประมาณ 1.59 มิลลิเมตร ซึ่งยาวกว่าเส้นใยของพีชขึ้นต้นที่ยาวที่สุดด้วย เนื่องด้วยประสิทธิภาพของทางใบของปาล์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะการทนต่อการยืดหยุ่นและการฉีกขาดได้ดีของเส้นใยนี้ ทำให้เกิดการค้นคว้าถึงลักษณะของเส้นใยจากทางใบของต้นปาล์ม โดยออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (CCD) เพื่อทดสอบผลกระทบที่มีต่อสมบัติของเส้นใย โดยใช้การผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ประกอบด้วยลิกนินร้อยละ 14.81 ไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 86.53 แอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 62.34 สารแทรกร้อยละ 1.8 ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่าง 160-180 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแอคติฟอลคาไลด์ร้อยละ 20-30 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-2 ชั่วโมง พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ดีคือ เวลาในช่วงสั้นๆ ประมาณ 60 นาที อุณหภูมิ 160-180 องศาเซลเซียสและปริมาณความเข้มข้นของแอคติฟอลคาไลด์ร้อยละ 20-30 จะสามารถจัดลิกนินออกได้ดี และถ้าเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยา

Sulemen and Yusoff [18] ศึกษาการผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้ระบบ เอทานอล-น้ำและใช้ไฮโดรเจนคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เวลาในการผลิตเยื่อกระดาษ 90 นาที อุณหภูมิสูงสุด 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเอทานอลกับน้ำเป็น 60:40 อัตราส่วนระหว่างของเหลวกับเยื่อกระดาษคือ 12:1 พบว่า ได้ปริมาณผลผลิตสูง ค่าแคลปาต้าและได้คุณสมบัติของกระดาษที่ดี

Zhinan and Raimo [19] ศึกษากระบวนการผลิตเยื่อจากหญ้า Reed Canary โดยวิธีโซดา-แอนทราควิโนน ภายใต้สภาวะต่างๆ ได้แก่ Effective Alkali, EA ที่ 12 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อ 145 155 และ 165 องศาเซลเซียส เวลาที่ทำให้ถึงอุณหภูมิสูงสุด 70 90 และ 110 นาที และเวลาในการต้มเยื่อสูงสุด 0 15 และ 30 นาที ที่มีผลต่อ

คุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อ อันได้แก่ ปริมาณผลผลิต ค่าแคปปาและค่าความหนืด พบว่า ค่า EA มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อมากที่สุด

กนิษฐ์ [20] ศึกษาสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการขจัดลิกนิน ในกระบวนการผลิตกระดาษจาก ใบสับปะรด โดยวิธีโซดาในหม้อระบบปิด ตัวแปรสำคัญในการขจัดลิกนินที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณ สารเคมีที่เติมลงไปอยู่ในช่วง 15-21 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อุณหภูมิในหม้อต้ม 100-130 องศาเซลเซียส และกำหนดตัวแปรคงที่อื่นๆ ได้แก่ อัตราส่วนของของเหลวต่อเนื้อไม้อยู่ที่ 10:1 ใช้ในลักษณะใบสับปะรดแห้ง ความชื้นประมาณ 10-12 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการต้ม 2 ชั่วโมง พบว่า ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเคมีที่เติมลงไปมีผลกระทบต่อกระบวนการขจัดลิกนินมากกว่า ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดในกระบวนการต้ม คุณสมบัติของเยื่อที่ได้มีค่าแคปปา อยู่ในช่วงระหว่าง 29.3-43.0

วิทยา [21] ได้นำพืชที่ไม่ใช่ไม้มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อ และกระดาษ ผลการวิเคราะห์พบว่า เปลือกในของปอทุกชนิด คือ ปอสา ปอแก้ว ปอกระเจา ปอควา เหมาะสมที่จะใช้ทำเยื่อกระดาษ กาบกล้วยไม่เหมาะสม ส่วนเปลือกในของหม่อน ใบสับปะรด กาบปาล์มน้ำมันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำกระดาษ เพราะมีองค์ประกอบทางเคมี ใกล้เคียงกับชานอ้อยและฟางข้าว ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษในปัจจุบัน

ประเทือง [22] ได้นำไม้ไผ่ตงมาศึกษากระบวนการผลิตเยื่ออัลคาไลซัลไฟท์ (AS) และเยื่อ อัลคาไลซัลไฟท์ที่เติมแอนทราควิโนน (AS-AQ) โดยใช้สภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ ปริมาณสารเคมี 20-35 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SO}_3:\text{NaOH}$ คือ 70:30 อัตราส่วนน้ำยาต้มเยื่อต่อเนื้อไม้ 4:1 อุณหภูมิสูงสุด 170 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุด 90 นาที ระยะเวลาที่อุณหภูมิสูงสุด 90 นาที และในการต้มเยื่อแบบ AS-AQ จะเติมแอนทราควิโนนลงไป 0.1 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเยื่อที่ได้ จากผลการศึกษา พบว่า ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อจะมีผลต่อค่าผลผลิตเยื่อของ AS และ AS-AQ น้อยมาก แต่การเพิ่มปริมาณสารเคมี จะทำให้ค่าแคปปาลดลง การเติมแอนทราควิโนนจะมีผลเพียง เล็กน้อยต่อผลผลิตเยื่อ แต่จะช่วยเพิ่มอัตราการขจัดลิกนิน (Delignification) อย่างมาก

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ในกระบวนการต้มเยื่อ

3.1.1 หม้อต้มสเตนเลส เกรด 304 ขนาด 40 ลิตร (ปริมาตรใช้จริง 20 ลิตร) พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2 น้ำมันให้ความร้อน

3.1.3 ตะแกรง

3.1.4 ถังพลาสติก

3.1.5 ประแจ

3.1.6 ปีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร

3.1.7 ถังมือยางทนเบส

3.1.8 ตู้อุ่นสำหรับเก็บเยื่อ

3.1.9 อุปกรณ์ทดสอบเยื่อกระดาษเป็นไปตามมาตรฐาน Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI)

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ทางใบปาล์มน้ำมันพันธุ์ *Elaeil guineensis* จากสวนอำเภอพระแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี ตัดทางใบปาล์มน้ำมันขณะการเก็บเกี่ยวผลปาล์มน้ำมัน หรือตัดแต่งทางใบปาล์มน้ำมันประจำปี นำทางใบปาล์มน้ำมันมาทำความสะอาดด้วยน้ำ แล้วลอกเปลือกทางใบออก หลังจากนั้นสับทางใบปาล์มเป็นชิ้นขนาดความยาวประมาณ 1-3 เซนติเมตร จะได้ทางใบปาล์มน้ำมันที่มีความชื้น ประมาณ 77.49% และค่าแคลปเปอร์เท่ากับ 65.15



ภาพที่ 3-1 หม้อต้มเชื้อพร้อมชุดควบคุม

3.3 วิธีการต้มเชื้อ

3.3.1 นำทางไบปาล์มน้ำมันที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 3-1

3.3.2 นำทางไบปาล์มน้ำมันที่เตรียมไว้แล้วมาหาความชื้น เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำหนักวัตถุดิบแห้งให้ได้ปริมาณทางไบปาล์มน้ำมันแห้ง 250 กรัม

3.3.3 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ (ร้อยละ 35 และ 45 ของน้ำหนักเชื้อแห้ง) ปริมาตร 3.5 ลิตร โดยปริมาณน้ำจะคิดรวมกับปริมาณความชื้นในทางไบปาล์มน้ำมันแห้งด้วย

3.3.4 นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ผสมกับทางไบปาล์มน้ำมันแห้ง แซ่ทิ้งไว้ 1 คืน หลังจากนั้นใส่ในหม้อต้มเชื้อ (คิดเป็นอัตราส่วนของสารละลายต่อทางไบปาล์มน้ำมันแห้ง เท่ากับ 14 ต่อ 1)

3.3.5 ปิดฝาหม้อต้มให้แน่น ปิดวาล์ว ตรวจสอบปริมาณน้ำมันรอบนอกในหม้อต้มโดยให้สูงเกินกว่าระดับของ Heater

3.3.6 เปิดเครื่องให้ความร้อน กำหนดอุณหภูมิสูงสุดในการต้มเชื้อตามการทดลองที่ตั้งไว้ (150 ถึง 165 องศาเซลเซียส) ดังสภาวะการทดลองตารางที่ 3-2

3.3.7 จับเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดเครื่องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นจับเวลาต่ออีกตามเวลาที่ใช้ต้มในสภาวะต่างๆ (ความดันในหม้อต้มจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในหม้อต้มเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 3-1 รายการและวิธีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน

รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ
1. การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน (Alcohol-Benzene Solubility)	TAPPI-T204 cm-97
2. การละลายน้ำร้อน (Hot Water Solubility)	TAPPI-T207 om-93
3. การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 (1%NaOH Solubility)	TAPPI-T212 om-98
4. ปริมาณเถ้า (Ash)	TAPPI-T211 om-93
5. ปริมาณลิกนิน (Lignin)	TAPPI-T222 om-98
6. ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส (Hoolcellulose)	Acid chlorite Method of browning
7. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (Alpha-Cellulose)	TAPPI-T203 om-93
8. ปริมาณเบต้าเซลลูโลส (Bata-Cellulose)	TAPPI-T203 om-93
9. ปริมาณแกมมาเซลลูโลส (Gamma-Cellulose)	TAPPI-T203 om-93
10. ปริมาณเพนโตแซน (Pentosan)	TAPPI-T222 om-84

ตารางที่ 3-2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการต้มเชื้อทางใบปาล์ม

สภาวะ ที่	ปริมาณวัตถุดิบแห้ง (กรัม)	ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (% เทียบกับวัตถุดิบแห้ง)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนของ สารละลายต่อ วัตถุดิบแห้ง	เวลาที่ใช้ในการ ต้มเชื้อที่อุณหภูมิ สูงสุด (นาที)
1.	250	35	150	14:1	60
2.	250	35	150	14:1	90
3.	250	35	150	14:1	120
4.	250	35	150	14:1	180
5.	250	35	150	14:1	300
6.	250	35	165	14:1	60
7.	250	35	165	14:1	90
8.	250	35	165	14:1	120
9.	250	35	165	14:1	180
10.	250	35	165	14:1	300
11.	250	45	150	14:1	60
12.	250	45	150	14:1	90
13.	250	45	150	14:1	120
14.	250	45	150	14:1	180
15.	250	45	150	14:1	300
16.	250	45	165	14:1	60
17.	250	45	165	14:1	90
18.	250	45	165	14:1	120
19.	250	45	165	14:1	180
20.	250	45	165	14:1	300

หมายเหตุ : การทดลองทุกครั้งเติมแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 เมื่อเทียบกับวัตถุดิบแห้ง

3.3.8 ปิดเครื่องให้ความร้อน

3.3.9 ต่อกับวาล์วด้านบนให้ปลายท่อผ่านลงในน้ำ เพื่อดักแก๊สที่เป็นเบสจากภายในหม้อต้ม จากนั้นค่อยๆ เปิดวาล์ว ให้ความดันภายในหม้อต้มลดลงจนเหลือ 1 บาร์

3.3.10 เปิดฝามือ ปล่อน้ำเบสภายในหม้อทิ้ง นำเชื้อในตระแกรงไปล้างด้วยน้ำสะอาดจนไม่เหลือปริมาณเบสในเชื้อ (ทดลองด้วยใช้กระดาษลิตมัส โดยกระดาษไม่เปลี่ยนจากสีแดงเป็นน้ำเงิน)

3.3.11 เก็บเชื้อในลักษณะเชื้อเปียกในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำไปทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3-3 แสดงมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเยื่อ

รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ
1. Screened Yield	TAPPI T 275 sp-98
2. Kappa Number	TAPPI T 236 cm-85
3. Basis Weight	เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
4. Moisture content	TAPPI T 258 cm-06

3.4 การทดสอบเยื่อ

3.4.1 เยื่อที่ผ่านกระบวนการต้มแล้วไปคัดแยกเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 275-sp98 (Screening of pulp (Somerville-Type Equipment))

3.4.2 เยื่อที่ผ่านการคัดแยกเยื่อแล้วไปทดสอบหาปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ โดยหาจากค่าแคลปตามมาตรฐาน TAPPI T 236 cm-85

3.5 การหาค่าแคลปตามมาตรฐาน TAPPI T 236 cm-85 [23]

3.5.1 คำจำกัดความ

ค่าแคลป คือ จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่ใช้ไปต่อเยื่อ 1 กรัม (คิดจากน้ำหนักแห้ง) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

3.5.2 อุปกรณ์

3.5.2.1 เครื่องกวน ทำจากวัสดุที่ไม่เกิดการกัดกร่อน เช่น แก้ว หรือ วัสดุที่ไม่เกิดการกัดกร่อนชนิดอื่นๆ (ในการทดลองใช้เครื่องกวนแบบ Magnetic Stirrer)

3.5.2.2 เครื่องปั่นเยื่อชนิดความเร็วรอบสูง เพื่อปั่นแยกเยื่อออกเป็นชิ้นเล็กๆ

3.5.2.3 บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ใช้ใส่ตัวอย่างขณะทำปฏิกิริยา

3.5.2.4 ปีเปตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน

3.5.2.5 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร ความละเอียด 0.1 มิลลิลิตร

3.5.2.6 อุปกรณ์อื่นๆ : Bucher funnel และกระดวยกรอง นาฬิกาจับเวลา กระบอกตวงขนาด 10, 50, 100 มิลลิลิตร และบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

3.5.3 สารเคมี

3.5.3.1 สารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ความเข้มข้น $0.1000 \pm 0.0005 \text{ N}$

3.5.3.2 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ความเข้มข้น $0.2 \pm 0.0005 \text{ N}$

3.5.3.3 สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น $1.0 \text{ N}/16.6\%$

3.5.3.4 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น $4.0 \text{ N}/20\%$

3.5.3.5 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 1.0 N/5%

3.5.3.6 น้ำแป้ง ความเข้มข้น 0.2 %

3.5.4 วิธีการทดลอง

3.5.4.1 ชั่งน้ำหนักเชื้อตัวอย่าง ขณะชั่งต้องรองจนกว่าน้ำหนักเชื้อบนเครื่องชั่งจะคงที่ โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.5.4.2 การชั่งน้ำหนักจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.0001 กรัม สำหรับตัวอย่างที่จะนำไปทดลองและนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์เนื้อเชื้อ

3.5.4.3 ปั่นแยกเชื้อตัวอย่างในบีกเกอร์ 1000 มิลลิลิตร เทน้ำกลั่นลงไป 250 มิลลิลิตร ปั่นให้เชื้อแยกออกจากกัน ไม่จับเป็นก้อน เทน้ำกลั่น 125 มิลลิลิตร เพื่อชะล้างเชื้อที่ติดค้างอยู่ในเครื่องปั่นแยกและบริเวณผนังของบีกเกอร์ให้ลงไปอยู่ในบีกเกอร์ทั้งหมด

3.5.4.4 นำบีกเกอร์วางบนเครื่องกวน (Magnetic Stirrer) กวนอย่างต่อเนื่อง ที่ความเร็วรอบไม่สูงมากนักให้เกิดลักษณะ Vortex เล็กน้อย

3.5.4.5 ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต 50 ± 0.1 มิลลิลิตร และ สารละลายกรดซัลฟูริก 50 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตรที่บรรจุเชื้อตัวอย่างอยู่และจับเวลาทันที เทน้ำกลั่นที่เหลืออีก 25 มิลลิลิตร ชะล้างสารเคมีที่ติดค้างอยู่ให้หมด ดังนั้นในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จะมีปริมาตรสารละลายทั้งหมดจำนวน 500 มิลลิลิตร ปฏิบัติกำหนดดำเนินไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

3.5.4.6 เมื่อเวลาผ่านไปจนครบ 10 นาที เติมสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา

3.5.4.7 จากนั้นไตเตรททันทีด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เมื่อเข้าใกล้จุดยุติ (สารละลายมีสีเหลืองอ่อน) เติมอินดิเคเตอร์ (น้ำแป้ง) เล็กน้อย จะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไตเตรทต่อจนกระทั่งได้สีน้ำเงินอ่อนๆ เกือบจางหายไป

3.5.4.8 หาค่า Blank โดยใช้วิธีการดังกล่าวมาแต่ไม่ต้องเติมเชื้อลงไป

3.5.5 การคำนวณ

คำนวณค่าแคปปา (K) ตามสมการที่ (3-1)

$$\text{Kappa Number (K)} = (p \times f) / w \quad (3-1)$$

$$p = (b - a) N / 0.1 \quad (3-2)$$

บทที่ 4

แบบจำลองจลนพลศาสตร์

4.1 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการจัดลิกนินจากเยื่อทางใบปาล์มน้ำมัน

การศึกษาแบบจำลองในการจัดลิกนินจากทางใบปาล์มน้ำมันโดยออกแบบบนพื้นฐานของ Nucleation Growth ที่อธิบายได้ด้วย Power Law และหลักการถ่ายโอนมวลของ Nuclei Growth ที่เสนอโดย Avrami [24] โดยมีการนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการฟอกเยื่อและการจัดลิกนินในการผลิตเยื่อโดยกระบวนการกราฟท์ ด้วยค่าความเที่ยงตรงที่สูง [24, 25, 26, 27, 28] ดังนั้นจึงอาจนำมาประยุกต์ใช้กับจลนพลศาสตร์ของการจัดลิกนินในกระบวนการผลิตเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมันได้ถ้ามีลักษณะเฉพาะของความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous Characteristic) ของปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีในการผลิตเยื่อกับองค์ประกอบของ Lignocellulose ที่คล้ายคลึงกัน โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับส่วนประกอบลิกนินในทางใบปาล์มน้ำมันจะเกิดขึ้นที่บริเวณ reactive site โดยถือว่าจำนวน reactive site มีค่าที่แน่นอนค่าหนึ่ง
2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเคมีกับส่วนประกอบลิกนิน โดยสารเคมีจะทำให้ส่วนประกอบลิกนินละลายออกมาทำให้เกิดช่องเปิดของโครงสร้าง จึงทำให้สารเคมีสามารถซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างของปาล์มน้ำมันได้ โดยสารเคมีจะแพร่ไปในโครงสร้างของปาล์มน้ำมันแบบสุ่มและเป็นแบบ 3 มิติ ในกระบวนการที่เกิดขึ้นนั้นสามารถสมมติได้ว่าการกระจายตัวของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive Zone, Transformed Zone) จาก Reactive Site เป็นฟังก์ชันแบบยกกำลังของเวลา ให้ขนาดของ Reaction Zone แทนด้วยสัญลักษณ์ R จะได้ว่า

$$R = \beta (Dt)^n, \quad 1 > n > 0 \quad (4-1)$$

เมื่อ β และ n เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับ Nature of the Transformation ส่วน D เป็นสัมประสิทธิ์ที่บ่งถึงอัตราการกระจายตัว Reaction Zone โดยอัตราการเติบโตของ Reaction Zone อาจลดลง ($0 > n > 1$) หรือเพิ่มขึ้น ($n > 1$) ขึ้นอยู่กับความผันแปรของโครงสร้างของปาล์มน้ำมันที่สารเคมีแพร่ไปถึง

3. ณ เวลา t อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา, dV_R/dt ภายในปาล์มน้ำมัน คือ

$$\frac{dV_R}{dt} = IV_i \left(\frac{dR}{dt} \right) \quad (4-2)$$

เมื่อ I คือ จำนวนเริ่มต้นของ Reactive Site ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับแต่ละองค์ประกอบ (เช่น ลิแกนด์, เซลลูโลส เป็นต้น) ส่วน V_i คือ ปริมาตรเริ่มต้นของที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและ $\alpha = n\beta$

ให้นำสมการที่ (4-1) หาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน หลังจากนั้นนำฟังก์ชันที่ได้แทนในสมการที่ (4-2) จะได้

$$dV_R = \alpha IV_i D^n t^{n-1} dt \quad (4-3)$$

4. เมื่อบริเวณการเติบโตของ Reaction Zone มีการทับซ้อนกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ Reaction Zone จริง (แทนด้วยสัญลักษณ์ dV_{R_a}) เป็นการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าการอธิบายด้วยสมการที่ (4-3) ดังนั้นสมมติให้ Actual Growth คือ [24]

$$dV_{R_a} = dV_R \left(1 - V_{R_a} / V_i \right) \quad (4-4)$$

นำสมการที่ (4-4) จัดรูปแบบใหม่แล้วไปแทนในสมการที่ (4-3) จะได้

$$\frac{dV_{R_a}}{\left(1 - \frac{V_{R_a}}{V_i} \right)} = \alpha IV_i D^n t^{n-1} dt \quad (4-5)$$

เมื่อ V_{R_a} คือ ปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา

5. ถ้าพิจารณาว่าค่า I และ D เป็นค่าคงที่

นำสมการที่ (4-5) อินทิเกรตจาก $t = 0$ ถึงเวลาที่ $t = t$ ใด ๆ ดังข้างล่าง

$$\frac{V_{R_a}}{V_i} = \exp \left[-\alpha ID^n t^n \right] \quad (4-6)$$

ถ้าปริมาณลิกนินที่ศึกษาสามารถบ่งบอกได้ด้วยค่าแคปปา (แทนด้วยสัญลักษณ์ K) จะได้

$$\frac{K}{K_i} = \exp[-kt^n] \quad (4-7)$$

เมื่อ $k = \alpha ID^n$ และค่า k เป็นค่าคงที่

เมื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเคมี สมมติให้จำนวนของ Reactive Site ที่เกี่ยวข้องในตอนเริ่มต้นของกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ ดังนั้นสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาของสมการจลนพลศาสตร์อธิบายด้วยฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารเคมีและอุณหภูมิ ดังนี้

$$\frac{K}{K_i} = \exp\left(-\left[a^*[\text{OH}^-]^b * \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)^n * t^n\right]\right) \quad (4-8)$$

กำหนดให้

K = ค่าแคปปาเมื่อเวลาใดๆ

K_i = ค่าแคปปาเริ่มต้น

a = ค่าคงที่ Pre-exponential Rate

b = ค่าคงที่

E = ค่าพลังงานกระตุ้น หน่วยกิโลจูลต่อโมล (kJ/kmol)

n = Transformation Exponent

R = ค่าคงที่แก๊ส เท่ากับ 8.314 กิโลจูลต่อกิโลโมล.เคลวิน (kJ/kmol K)

T = อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการต้มเยื่อ หน่วยเคลวิน (K)

t = เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด หน่วยนาที (minute)

$[\text{OH}^-]$ = ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ ไอออนใน Cooking Liquor หน่วยโมลต่อลิตร (mol/L)

บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 5-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ (ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง)
1. การละลายในแอลกอฮอล์ - เบนซีน (Alcohol - Benzene Solubility)	10.9
2. การละลายในน้ำร้อน (Hot Water Solubility)	26.1
3. การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 (1% NaOH Solubility)	50.1
4. ปริมาณขี้เถ้า (Ash)	6.2
5. ปริมาณลิกนิน (Lignin)	9.3
6. ปริมาณโฮโลเซลลูโลส(Holocellulose)	64.3
7. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (Alpha-Cellulose)	39.8
8. ปริมาณเบต้าเซลลูโลส (Beta-Cellulose)	13.0
9. ปริมาณแกรมมาเซลลูโลส (Grmma-Cellulose)	11.5
10. ปริมาณเพนโตแซน(Pentosan)	19.7

จากตารางที่ 5-1 บอกปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์ม โดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI พบว่าทางใบปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.3 ซึ่งแบ่งเป็นปริมาณแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 39.8 ปริมาณเบต้าเซลลูโลสร้อยละ 13.0 และปริมาณแกรมมาเซลลูโลสร้อยละ 11.5 ถือว่าในทางใบปาล์มที่นำมาทดลองนี้มีเส้นใยเซลลูโลสที่สามารถนำไปใช้ทำเป็นเยื่อกระดาษอยู่ในปริมาณมากพอสมควร เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษต่อไป ในขณะที่ปริมาณลิกนินที่มีอยู่ มีปริมาณไม่มากนัก คือ ร้อยละ 9.3 นอกจากนั้นองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่มีผลต่อการผลิตเยื่อ ได้แก่ การละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน (Alcohol-Benzene Solubility) คิดเป็นร้อยละ 10.9 การละลายในน้ำร้อน (Hot Water Solubility) คิดเป็นร้อยละ 26.1 การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 (1% NaOH Solubility) คิดเป็นร้อยละ 50.1 จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีในการต้มเยื่อ นอกจากนี้ ปริมาณขี้เถ้า (Ash) คิดเป็นร้อยละ 6.2 ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆ และจากตารางที่ 5-2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจำพวกไม้ พบว่าปริมาณไฮโดรเซลลูโลสอยู่ในระดับสูง คือ ร้อยละ 55-90 และมีปริมาณลิกนินอยู่ในระดับร้อยละ 7-15 ดังนั้นเปลือกในปอทุกชนิดข้างต้นเหมาะที่จะนำมาผลิตเยื่อกระดาษได้ ส่วนฟางข้าวจะมีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 16.93 อาจจะมีปัญหาในขั้นตอนของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ แต่กากกล้วยมีไฮโดรเซลลูโลสดำและลิกนินสูงจึงไม่เหมาะที่จะทำเยื่อกระดาษแต่ถ้าใช้ผสมในเยื่ออื่นเพื่อทำให้เกิดลายบนแผ่นกระดาษดีกว่า [21]

ถ้าพิจารณากระบวนการที่จะใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ วิธีการคราฟท์ที่ไม่เหมาะสมเพราะสำหรับทางใบปาล์มน้ำมันมีปริมาณขี้เถ้าค่อนข้างสูง และสารเคมีที่เหลือจากในกระบวนการต้มเยื่อ (Black Liquor) จะไม่สามารถผ่านกระบวนการการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากมีสารพวกซัลฟอนที่มีอยู่ในวัตถุดิบประเภทที่ไม่ใช่ไม้ (Non-wood) อยู่มาก ซึ่งจะไปรบกวนกระบวนการต้มเยื่อดังกล่าว ส่วนกระบวนการซัลไฟต์ ซึ่งใช้กรดเป็นสารเคมีในกระบวนการต้มเยื่อไม่เป็นนิยมนเท่าไร กระบวนการต้มเยื่อที่เหมาะสมสำหรับทางใบปาล์มน้ำมัน คือ กระบวนการโซดาเป็นที่นิยมในกระบวนการต้มเยื่อสำหรับวัตถุดิบจำพวกที่ไม่ใช่ไม้ ดังนั้นสำหรับการทดลองในครั้งนี้ใช้กระบวนการโซดาและเติมแอนทราควิโนนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปด้วย

ตารางที่ 5-2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจำพวกไมโซไมบางชนิด [21]

พืช	ไฮโดรเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	สารแทรกที่ละลาย ในเอทานอล+ เบนซีน	เพนโตแซน	แอลฟา เซลลูโลส
เปลือกในปอสา	77.55	7.64	6.30	6.13	10.29	71.03
เปลือกในปอกระเจา	89.92	9.65	0.62	0.94	16.68	67.10
เปลือกในปอแก้ว	72.90	15.12	7.24	3.71	17.85	66.34
เปลือกในปอควบา	78.06	15.19	1.92	2.74	9.26	62.44
เปลือกหม่อน	68.89	14.83	9.37	8.24	12.41	65.05
ใบสับปะรด	67.05	17.41	5.98	11.23	24.34	49.22
ชานอ้อย	71.41	21.09	3.85	2.98	27.83	51.04
ฟางข้าว	64.89	21.27	16.93	0.30	21.15	46.30
กากกล้วย	55.50	19.43	15.34	10.34	14.78	47.37
ก้านใบปาล์มน้ำมัน	69.36	8.47	1.29	7.75	26.64	54.24

5.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อหลังผ่านกระบวนการต้มเยื่อ

5.2.1 ผลการทดลองจากการต้มเยื่อที่สภาวะต่างๆ

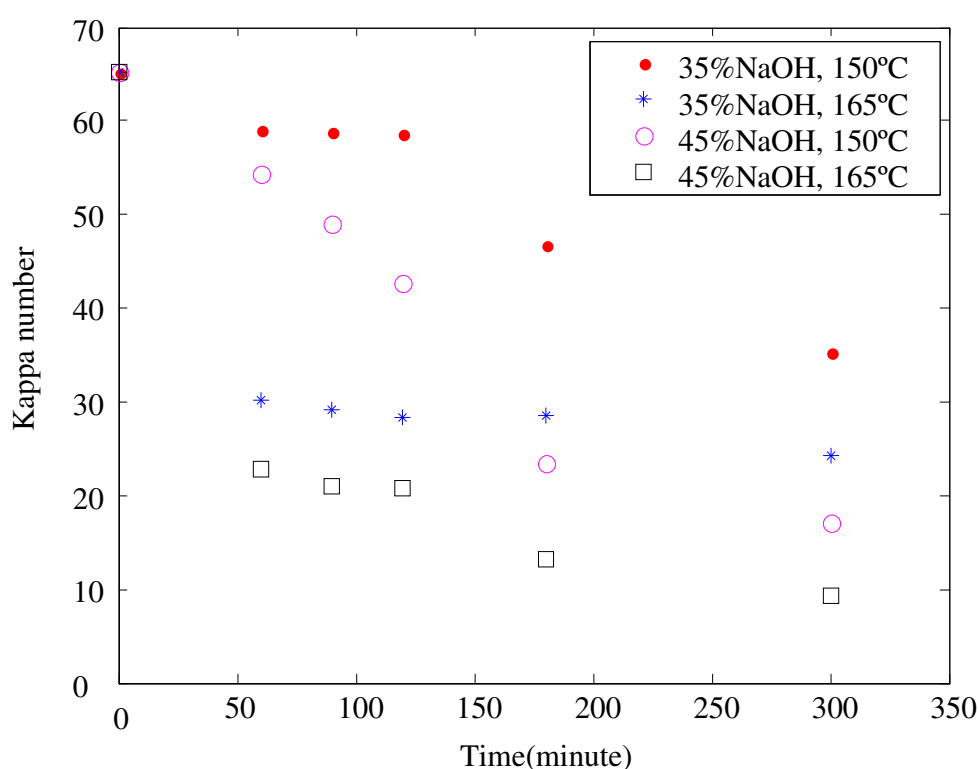
จากตารางที่ 5-3 แสดงผลการทดลองในการต้มเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมัน พบว่า ที่ร้อยละของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดในการต้มทำให้ค่าแคปาลลดลงได้ การเพิ่มอุณหภูมิในการต้มเยื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาในการจัดลิกนิน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการต้มสูงขึ้น มีผลต่อความดันในหม้อต้มระบบปิดมีความดันสูงขึ้นด้วย ทำให้การซึมผ่านและการแพร่ของสารเคมีเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น เพราะเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์คือหม้อต้มเยื่อที่ใช้ในการทดลองที่สามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส จึงทำให้ออกแบบการทดลองได้ไม่เกินอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปถ้าจะให้กระบวนการจัดลิกนินมีประสิทธิภาพสูงสุด จะใช้อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อในช่วง 170-180 องศาเซลเซียส ดังนั้นประสิทธิภาพการจัดลิกนินในการทดลองนี้น่าจะได้เส้นใยที่สามารถนำไปใช้ขึ้นเป็นกระดาษได้ โดยในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนของสารละลายต่อเนื้อไม้แห้งที่ 14 ต่อ 1 ซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้ระดับของสารละลายอยู่ในระดับเหนือเนื้อไม้ที่ใช้ในกระบวนการต้ม อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อที่ 150 และ 165 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด 60-300 นาที ร้อยละของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 35 และ 45 ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง พบว่าในการทดลองที่ร้อยละของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 45 ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อ 165 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด 300 นาที ได้ค่าแคปาลต่ำสุด ซึ่งหมายความว่า เป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองนี้ในการจัดลิกนินออกจากทางใบปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 5-3 แสดงผลการทดลองในการต้มเยื่อจากทางใบปาล์มน้ำมัน

No.	Factor of Pulping					Response			
	Coded		Values			Screened	Rejected	Total	Kappa
	NaOH	T	NaOH (% on o.d. rawmaterial)	T (°C)	Time (min)	Yield (%)	Yield (%)	Yield (%)	No.
1	-1	-1	35	150	60	32.53	1.19	33.72	59.08
2	-1	-1	35	150	90	31.26	0.2	31.46	58.79
3	-1	-1	35	150	120	32.99	0.72	33.71	58.71
4	-1	-1	35	150	180	31.27	0.22	31.49	46.76
5	-1	-1	35	150	300	32.37	0.34	32.71	35.21
6	-1	1	35	165	60	32.26	0.13	32.39	30.12
7	-1	1	35	165	90	31.43	0.12	31.55	29.22
8	-1	1	35	165	120	38.58	0.28	38.86	28.34
9	-1	1	35	165	180	31.49	0.18	31.67	28.49
10	-1	1	35	165	300	30.50	0.16	30.66	24.31
11	1	-1	45	150	60	32.08	0.29	32.37	54.41
12	1	-1	45	150	90	30.80	0.25	31.05	48.92
13	1	-1	45	150	120	36.30	0.24	36.54	42.58
14	1	-1	45	150	180	31.67	0.22	31.89	23.46
15	1	-1	45	150	300	30.12	0.37	30.49	17.11
16	1	1	45	165	60	30.47	0.79	31.26	22.87
17	1	1	45	165	90	34.38	0.4	34.78	21.05
18	1	1	45	165	120	44.83	0.12	44.95	20.75
19	1	1	45	165	180	31.69	0.55	32.24	13.23
20	1	1	45	165	300	34.97	0.18	35.15	9.41

5.2.2 ค่าแคปปา (Kappa Number)

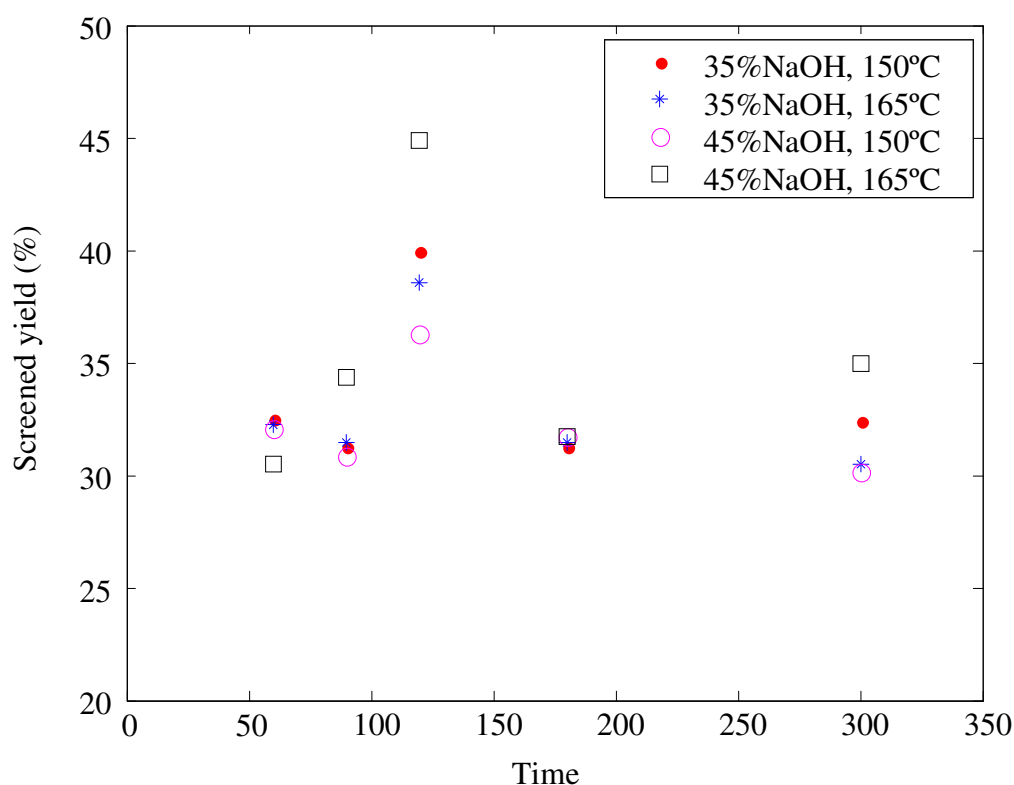
จากภาพที่ 5-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กันกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแคปปาของเยื่อลดลง หมายถึงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด (300 นาที) สามารถลดค่าแคปปาของเยื่อได้ต่ำสุด คือ ลดค่าแคปปาลงเหลือ 9.41 ที่อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อ 165 องศาเซลเซียสและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 45 ของวัตถุดิบน้ำหนักแห้ง พบว่าทุกจุดของการทดลองในสภาวะเดียวกัน หากเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแคปปาที่ได้ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสารเคมีที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินนานขึ้น แล้วยังพบว่าจากกราฟในช่วงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุดน้อยกว่า 120 นาที สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดในการต้มเยื่อมีผลทำให้ค่าแคปปาลดลงเพราะอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างของลิกนินเปิดออกมากขึ้น ดังนั้นสารเคมีสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และจากกราฟในช่วงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 120 นาที สามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของสารเคมีส่งผลทำให้ค่าแคปปาลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสารเคมีเพิ่มขึ้นจะทำให้สารเคมีสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้มากขึ้น เพราะโครงสร้างของลิกนินที่เปิดออกอยู่แล้วนั้น ทำให้ปริมาณสารเคมีซึมผ่านเข้าสู่เนื้อไม้ได้เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด

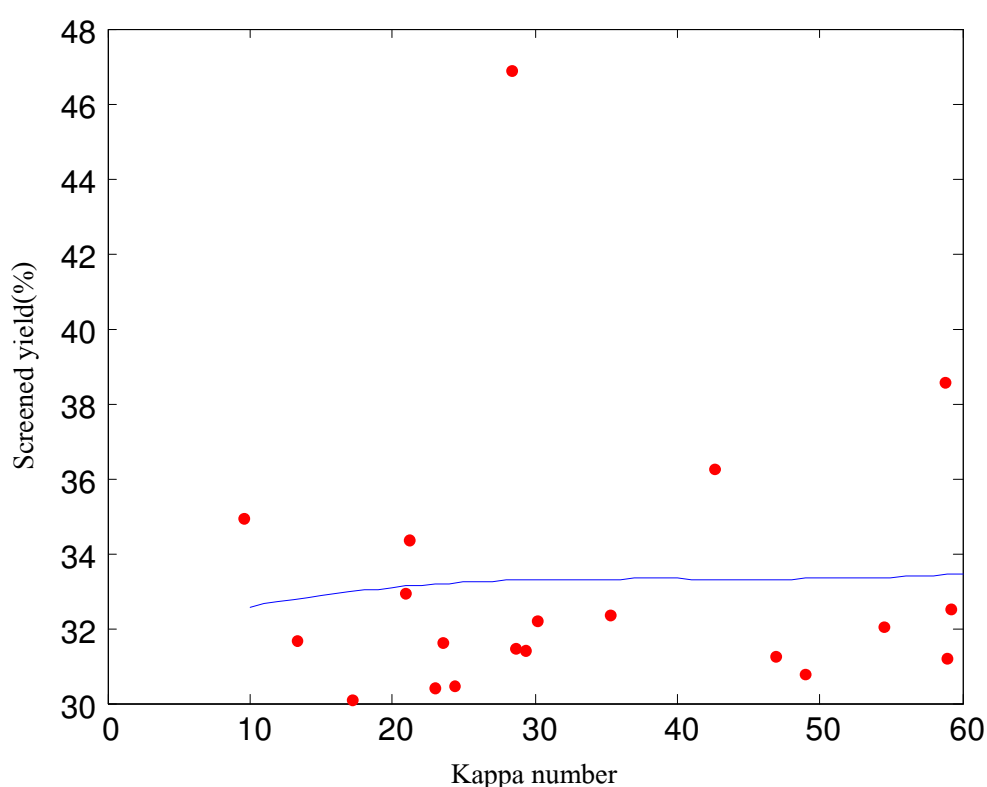
5.2.3 ปริมาณเยื่อที่ผ่านการคัดขนาด (Screened Yield)

จากภาพที่ 5-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาด จะเห็นได้ว่าการทดลองครั้งนี้ปริมาณเยื่อที่ผ่านการคัดขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 30-40 ถ้าพิจารณาในช่วงเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อตั้งแต่ 0-120 นาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เยื่อเปื่อยยุ่ยมากจึงสามารถผ่านตะแกรงในการแยกเยื่อได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมากกว่า 120 นาที ปริมาณเยื่อที่ผ่านการคัดขนาดลดลง อาจเนื่องมาจากลิกนินที่ถูกแยกออกมาเกิดการรวมตัวของลิกนินใหม่ซึ่งจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นส่วนใหญ่ควรจะใช้เวลาในการต้มที่ 120 นาทีน่าจะเป็นเวลาเหมาะสมที่ใช้ในการต้มเยื่อทางไบโพลัมน์น้ำมัน ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมากจะทำให้ได้ค่าแคปปาล้นลงก็ตาม แต่อาจจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของเยื่อเสียไปหรือเซลลูโลสถูกทำลายก็ได้ สำหรับการนำเยื่อไปฟอกนั้นจะเลือกค่าแคปปาที่ลดลงไม่มากนัก เพราะถ้าค่าแคปปาสูงๆ ต้องใช้ปริมาณสารเคมีในการฟอกมากทำให้ต้นทุนในการผลิตกระดาษสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาดกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด

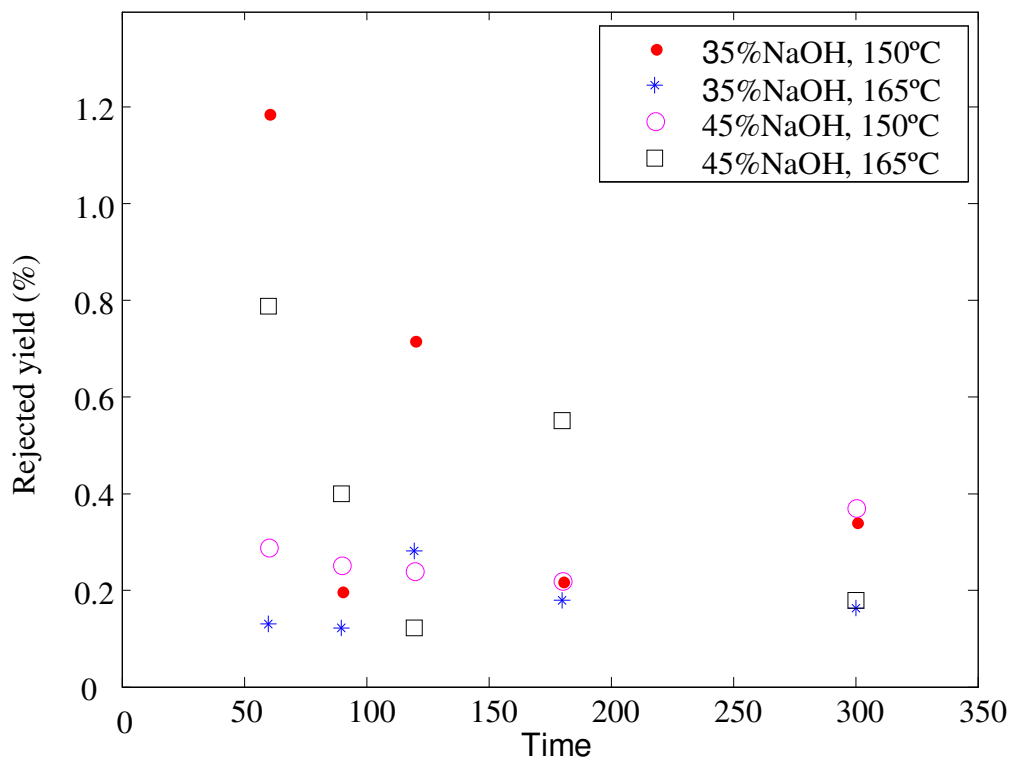
ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับร้อยละของเชื้อที่ผ่านการคัดขนาดโดยใช้หลักการแทนกลุ่มข้อมูลด้วยค่าที่เหมาะสม และการประมาณค่าในฟังก์ชันพหุนามโดยทั่วไปด้วยโปรแกรม MatLab 5.3 (ภาคผนวก ง) ภาพที่ 5-3 พบว่าเมื่อทำการประมาณค่าในฟังก์ชันพหุนามทั่วไปปริมาณเชื้อที่ผ่านการคัดขนาดอยู่ที่ร้อยละ 33 (คิดเทียบกับน้ำหนักเชื้อแห้งทั้งหมดก่อนต้มเชื้อ) แสดงว่าเชื้อที่ได้หลังการต้มจะนำเขื่อนั้นมาขึ้นรูปกระดาษได้และเส้นใยที่ได้แยกออกจากกันได้ดีพอๆ กัน



ภาพที่ 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับร้อยละของเชื้อที่ผ่านการคัดขนาด

5.2.4 ปริมาณเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาด (Rejected Yield)

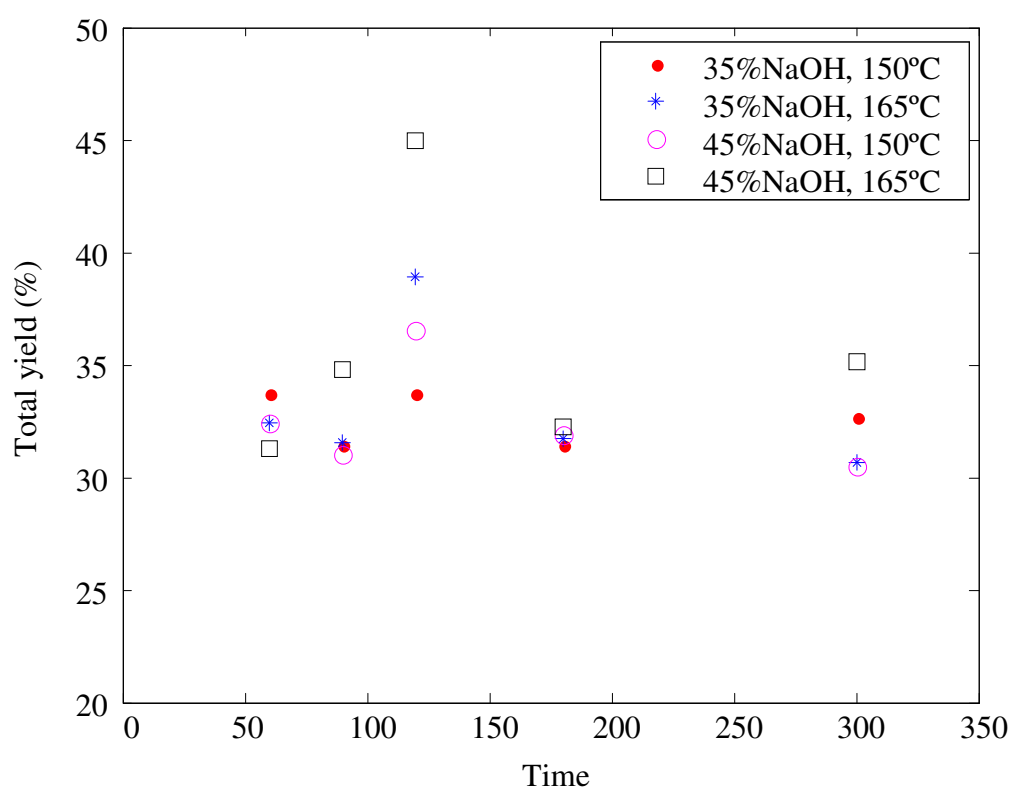
จากภาพที่ 5-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคลปากับร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาด จะเห็นได้ว่าการทดลองครั้งนี้ปริมาณเยื่อที่ผ่านการคัดขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-0.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมากขึ้น จะส่งผลให้ร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาดลดลง แต่เมื่อเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อมากกว่า 120 นาที ส่งผลให้ร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านการคัดขนาดเพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นส่วนที่เกิดจากการจับกันเป็นกลุ่มของลิกนินที่ถูกแยกออกมาได้



ภาพที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของเยื่อที่ไม่ผ่านขนาดกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด

5.2.5 ปริมาณผลผลิตรวม (Total Yield)

จากภาพที่ 5-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับร้อยละของผลผลิตรวม จะเห็นได้ว่าในการทดลองนี้จะได้รับร้อยละของผลผลิตรวมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 30-40 ร้อยละของผลผลิตรวมจะมีความคล้ายคลึงกับร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาด นั่นคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะได้อะไรของผลผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่จะมีร้อยละของผลผลิตเยื่อมากที่สุดที่เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ 120 นาที ส่วนในช่วงเวลาอื่นๆ จะได้อะไรของผลผลิตรวมใกล้เคียงกัน เช่น จากกราฟที่เวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ 180 นาที ได้อะไรของผลผลิตรวมเกือบจะเท่ากัน



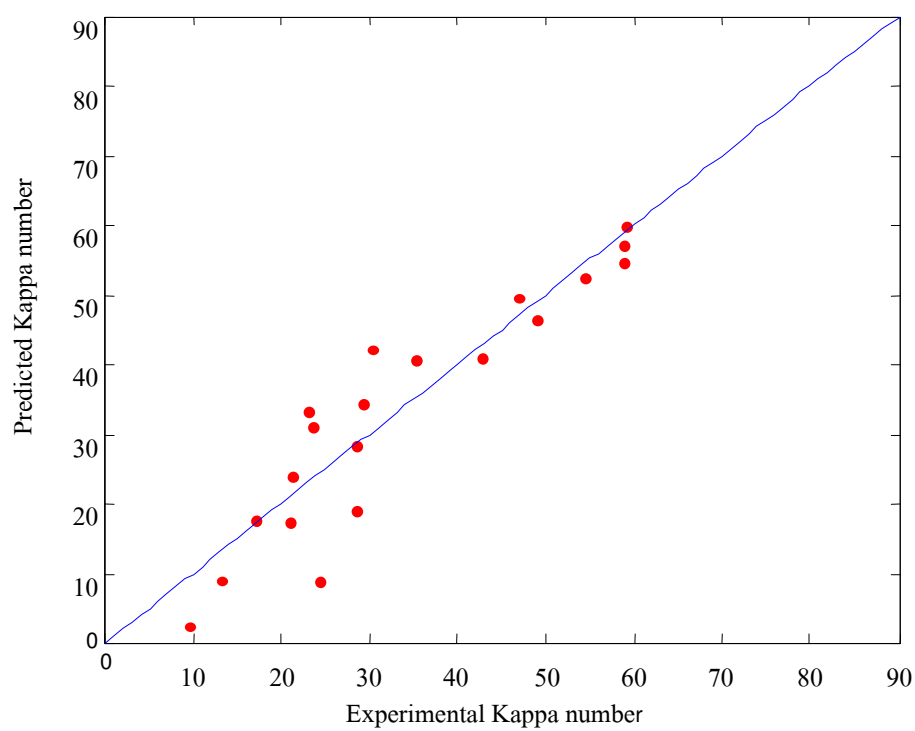
ภาพที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของผลผลิตรวมกับเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูงสุด

5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ (สมการที่ 4-8)

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการจัดลิกนินออกจากเชื้อทางไบโพลีเมอร์น้ำมัน ด้วยการใส่ค่าคงที่ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 เมื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้ตามตารางที่ 5-4 ค่าพารามิเตอร์ Transformation Exponent (n) เท่ากับ 1.03 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าพลังงานการกระตุ้น (E) เท่ากับ 91.33 กิโลจูลต่อโมล ถ้าพลังงานกระตุ้นต่ำและเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง (b) เท่ากับ 0.98 หลังจากนั้นได้นำค่าแคปปาที่ได้จากการสร้างแบบจำลองมาเขียนกราฟกับค่าแคปปาที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 5-6 จะเห็นได้ว่าจุดที่ได้มีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรง แต่พบว่าบริเวณที่ค่าแคปปาต่ำๆ นั้น กราฟที่ได้ค่อนข้างจะเกิดความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) ซึ่งเป็นตัวที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูล โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ถ้าต้องการความน่าเชื่อถือในการประมาณค่ามากๆ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานควรจะมีค่าน้อยๆ เข้าใกล้ศูนย์จากการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ยกเว้นค่าพลังงานกระตุ้นที่มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงๆ อาจเนื่องมาจากการออกแบบที่เลือกใช้อุณหภูมิเพียง 2 ค่าเท่านั้น สำหรับค่า P-value เป็นค่าที่ใช้การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis) ว่าค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการทดลองเป็น 0 หรือไม่ โดยที่ค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะแสดงว่ามีสัมประสิทธิ์อย่างน้อย 1 ค่าในแบบจำลองไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองจลนพลศาสตร์นี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกสถานะในการต้มเชื้อจากทางไบโพลีเมอร์น้ำมันได้

ตารางที่ 5-4 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์

Transformation equation: $K = K_i \exp \left(- \left[a * [OH^-]^b * \exp \left(- \frac{E}{RT} \right)^n * t^n \right] \right)$			
Parameter		P-value	Standard Error
$a * 10^{-3}$	8.55	<0.001	0.00156
b	0.98	<0.001	0.01397
n	1.03	<0.001	0.01989
E (kJ/mol K)	91.33	<0.001	2.57511



ภาพที่ 5-6 ค่าแคปปาที่ได้จากแบบจำลองกับค่าแคปปาที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 การวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน

จากการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์มน้ำมัน สรุปได้ว่า องค์ประกอบหลักของทางใบปาล์มน้ำมันประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินคิดเป็นร้อยละ 64.3 ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้งตามลำดับ ซึ่งปริมาณเซลลูโลสที่มีอยู่ในทางใบปาล์มน้ำมันมีปริมาณสูง ในขณะที่มีปริมาณลิกนินอยู่ไม่มากนัก ทางใบปาล์มน้ำมันจึงเหมาะที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอีกระคายได้ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 6.2 ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่นๆ แต่มีปริมาณเถ้าที่น้อยเมื่อเทียบกับวัตถุดิบจำพวกไม้ไผ่ และทางใบปาล์มน้ำมันจัดเป็นวัตถุดิบจำพวก Non-wood ด้วย

6.2 สถานะต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเอี

สถานะที่เป็นตัวแปรในการทดลองนี้คือ ปริมาณสารเคมีที่เติมลงไป อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเอี และเวลาที่ใช้ในการต้มเอีที่อุณหภูมิสูงสุด พบว่า ทั้งสามตัวแปรมีผลต่อกระบวนการผลิตเอี ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณลิกนินที่ถูกขจัดออกไปโดยบ่งบอกไว้ด้วยค่าแคปปา โดยที่ปริมาณสารเคมี เวลาที่ใช้ในการต้มเอีที่อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิสูงสุดในการต้มเอี มีผลต่อกระบวนการผลิตเอีทั้งนั้น ซึ่งสถานะที่สามารถขจัดลิกนินได้ปริมาณสูงสุดคือ สถานะสูงสุดของการทดลองที่อุณหภูมิสูงสุดในการต้มเอีเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์คิดจากน้ำหนักแห้ง และเวลาที่ใช้ในการต้มที่อุณหภูมิสูงสุด 300 นาที เอีที่ได้หลังกระบวนการต้มเอีในการทดลองนี้ มีลักษณะเป็นเส้นใยที่กระจายตัว ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มเท่าไรนัก เนื่องจากปริมาณเอีที่ไม่ผ่านการคัดแยกขนาดมีปริมาณน้อย ดังนั้นเอีที่ได้จึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระคาย เป็นการนำวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้อีกทางเลือกหนึ่ง

6.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองจลนพลศาสตร์

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์ของการแยกลิกนินจากเอีทางใบปาล์มน้ำมันด้วยการใช้ต่างสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับเวลาเท่ากับ 1.03 อันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.98 และค่าพลังงานการกระตุ้น เท่ากับ

91.33 กิโลจูลต่อโมล สมการจลนพลศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองเหมาะสำหรับนำไปเป็นแนวทางในการเลือกสถานะในการคัมเชื้อจากทางไบโพลีเมอร์น้ำมัน

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 วัสดุคัมเชื้อที่นำใช้ คือ ทางไบโพลีเมอร์น้ำมัน ก่อนนำมาคัมเชื้อต้องปอกเปลือกแล้วนำแช่เย็นเพื่อป้องกันการเน่าเปื่อยของวัสดุคัมเชื้อ ดังนั้นควรใช้วัสดุคัมเชื้อได้เลยโดยไม่ต้องปอกเปลือกและควรหาวิธีในการเก็บวัสดุคัมเชื้อก่อนนำไปคัมเชื้อให้นาน

6.4.2 หม้อคัมเชื้อที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบกะ และมีขนาดใหญ่ แต่ช่องทางออกของเชื้อควรขยายให้กว้างกว่าเดิม

6.4.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการแยกกลีนินจากทางไบโพลีเมอร์น้ำมันด้วยการใช้ค่า ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพิ่มเติม เช่น ความขาวสว่าง ความหนืดของเชื้อ เป็นต้น

6.4.4 ควรศึกษาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาแยกกลีนิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อกระดาษของประเทศไทยด้วยการใช้ค่า

เอกสารอ้างอิง

1. Austin, G.T. **Shreve's Chemical Process Industries**. 5th ed. New York : McGraw-Hill Book Company, 1984.
2. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. การศึกษาขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. รายงานการวิจัย. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2529.
3. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ**. กรุงเทพมหานคร : ห้องปฏิบัติการเชื้อและกระดาษ กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2541.
4. University of Cambridge. **The structure and mechanical behaviour of wood**. [online] 2006. [cited 2008 Jan 1]. Available from : URL : http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure_wood_pt2.php
5. M.J. Farabee. **Cellulose**. [online] 1992. [cited 2008 Jan 5]. Available from : URL : <http://www.modares.ac.ir/elearning/Dalimi/Proto/Lectures/week2/week2-gloss.htm>
6. **Building blocks of organic compounds**. [online] 2004. [cited 2008 Jan 26]. Available from : URL : www.Chemistryland.com/ElementarySchool/BuildingBlocks/BuildingOrganic.htm
7. University of Michigan. **Hemicellulose**. [online] 2004. [cited 2008 Jan 26]. Available from : URL : http://www.engin.umich.edu/dept/che/research/avage/Fernando/Fernando_main.htm
8. T. White. **Lignin**. [online] 2008. [cited 2008 Feb 25]. Available from : URL : <http://www.palaeos.com/Plants/Lists/Glossary/GlossaryL.html>
9. ปรีชา เกียรติกระจาย และ ทรงกลด จารุสมบัติ. “เคมีของเนื้อไม้.” เรียบเรียงโดย สุรัชย์ ศรีชินราช. **องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท บุรณพากรูปจำกัด, 2526.
10. University of Phoenix. **Wood : cellular composition of wood**. [online] 1768. [cited 2008Feb 25]. Available from : URL : <http://student.Britannica.com/eb/art-55253/Types-of-cells-present-in-hardwood-And-softwood>.
11. Kenneth, W. Britt. **Handbook of pulp and paper technology**. Philadelphia : Van Nostrand Company, 1970.

12. พิศมัย เจนวนิชปัญญกุล. “เทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.”
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ฉบับที่ 15 3 (2543).
13. AQuinde Pulping Consulting Inc. **Enzymes in the Pulp and Paper Industry: A Review**.
[online] 1994. [cited 2008 Jan 25]. Available from : URL : <http://www.quindeconsulting.ca>
14. W.D. Wanrosli, Z. Zainuddin and S. Roslan. “Upgrading of recycled paper with oil palm fiber soda pulp.” **Industrial Crops and Products**. 21 (2005) : 325-329.
15. W.D. Wan Rosli, et al. “Effect of pulping variables on the characteristics of Oil - palm frond - fiber.” **Bioresource Technology**. 93 (2004) : 233-240.
16. K.C. Khoo, and T.W. Lee. “Pulp and paper from the oil palm.” **Appita**. ฉบับที่ 44 6 (1991) : 385-388.
17. Law, K.N. and Wan Rosli, W.D. **Nonwood materials [with special reference to oil palm fibers] as papermaking materials : Potentials and challenges in the new millennium**. Proceedings of USMJIRCAS Joint International Symposium on Lignocellulosic Materials, Penang, Malaysia, 2001 : (1-13).
18. Y.Suleman and M.N.M. Yusoff. **4th National Seminar on Utilisation of oil Palm Tree – Oil Palm**. Residues-Progress towards Commercialication, Malaysia, 1997.
19. F. Zhinan and A. Raimo. “Soda – AQ pulping of reed canary grass.” **Industrial Crops and Products**. 14 (2001) : 31-39.
20. กนิษฐ์ ตรีสุวรรณ. การผลิตเยื่อกระดาษจากใบสับปะรด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
21. วิทยา ปิ่นสุวรรณ. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรุงเทพมหานคร : สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
22. ประเทือง พุฒซ้อน. การผลิตเยื่อเคมีจากไม้โตเร็วที่ก่อกมลภาวะน้อย. กรุงเทพมหานคร : สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
23. TAPPI. **1998-1999 Test Methods**. USA. : Tappi Press., 1998.
26. Avrami, M. “Kinitics of phase change II.” **Journal of Chemical Physics**. 8 (1940) : 212-224.

24. Chandranupap, P. and Nguyen, K.L. “Kinetics of chlorine dioxide delignification.” **Appita**. ฉบับที่ 51 1 (1998) : 57.
25. Dang, V. and Nguyen, K.L. “Characterisation of the heterogeneous alkaline pulping kinetics of hemp woody core.” **Bioresource Technology**. ฉบับที่ 97 12 (2006) : 1353-1359.
26. Nguyen, K.L. and Dang, V.Q. “The fractal nature of kraft pulping kinetics applied to thin eucalyptus nitens chips.” **Carbohydrate Polymers**. ฉบับที่ 64 (2006) : 104-111.
27. Nguyen, K.L. and Liang, H. “Effects of fibre type on kinetics of oxygen delignification.” **Appita**. (1997) : 243-248.
28. มนต์ สัจวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, 2543.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าความชื้นของเชื้อที่ได้ ปริมาณเชื้อที่ผ่านการคัดแยกเชื้อและปริมาณเชื้อที่ไม่สามารถผ่านการคัดแยกเชื้อ

Batch No.	ปริมาณ NaOH(%)	Temperature (°C)	Time (minute)	Moisture (%)	Fibers (%)	Total fibers after Screen (g)		Screen Yield (%)	Reject (g)	Reject Yield (%)	Total yield (%)
						wet	dry				
1	35	150	60	67.81	32.19	252.64	81.33	32.53	2.98	1.19	33.72
2	35	150	90	68.27	31.73	246.30	78.15	31.26	0.50	0.20	31.46
3	35	150	120	77.42	22.58	365.30	82.48	32.99	1.80	0.72	33.71
4	35	150	180	67.31	32.69	240.99	78.78	31.27	0.55	0.22	31.49
5	35	150	300	68.07	31.93	253.44	80.93	32.37	0.85	0.34	32.71
6	35	165	60	75.08	24.92	323.64	80.65	32.26	0.33	0.13	32.39
7	35	165	90	74.43	25.57	307.31	78.58	31.43	0.30	0.12	31.55
8	35	165	120	75.59	24.41	395.10	96.44	38.58	0.70	0.28	38.86
9	35	165	180	71.69	28.31	278.10	78.73	31.49	0.45	0.18	31.67
10	35	165	300	71.40	28.60	266.61	76.25	30.50	0.40	0.16	30.66
11	45	150	60	70.95	29.05	276.08	80.20	32.08	0.73	0.29	32.37
12	45	150	90	70.59	29.41	261.82	77.00	30.80	0.63	0.25	31.05
13	45	150	120	70.60	29.40	308.70	90.76	36.30	0.60	0.24	36.54
14	45	150	180	68.90	31.10	254.60	79.18	31.67	0.55	0.22	31.89
15	45	150	300	66.23	33.77	222.98	75.30	30.12	0.93	0.37	30.49
16	45	165	60	62.82	37.18	204.90	76.18	30.47	1.98	0.79	31.26
17	45	165	90	64.17	35.83	239.88	85.95	34.38	1.00	0.40	34.78
18	45	165	120	73.89	26.11	429.20	112.06	44.83	0.30	0.12	44.95
19	45	165	180	63.75	36.25	218.57	79.23	31.69	1.38	0.55	32.24
20	45	165	300	66.70	33.30	262.55	87.43	34.97	0.45	0.18	35.15

ตารางที่ ก-2 แสดงค่าแคลปปาที่สภาวะต่างๆ

Batch No.	ปริมาณ NaOH(%)	Temperature (°C)	Time (minute)	Kappa number
1	35	150	60	59.08
2	35	150	90	58.79
3	35	150	120	58.71
4	35	150	180	46.76
5	35	150	300	35.21
6	35	165	60	30.12
7	35	165	90	29.22
8	35	165	120	28.34
9	35	165	180	28.49
10	35	165	300	24.31
11	45	150	60	54.41
12	45	150	90	48.92
13	45	150	120	42.58
14	45	150	180	23.46
15	45	150	300	17.11
16	45	165	60	22.87
17	45	165	90	21.05
18	45	165	120	20.75
19	45	165	180	13.23
20	45	165	300	9.41

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมี

การเตรียมสาร

การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ Kappa Number ตามมาตรฐาน TAPPI USEFUL METHOD 246 สูตรที่ใช้คำนวณน้ำหนักที่ใช้เพื่อให้ได้ค่า ค่านอร์มัลลิตี (N) [25]

$$\text{น้ำหนักของสาร (g)} = \text{ค่านอร์มัลลิตี (N)} \times \text{ปริมาตร (L)} \times \text{น้ำหนักสมมูล}$$

** น้ำหนักสมมูลของสาร คือ มวลโมเลกุลของสารหารด้วยจำนวนครั้งการแตกตัวของอิเล็กตรอน

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน KMnO_4 ความเข้มข้น 0.1 N

จากสูตรความสัมพันธ์ค่านอร์มัลลิตี (N) ต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐาน KMnO_4 ความเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร KMnO_4 มีมวลโมเลกุล 158.04 มีจำนวน 5 สมมูล สามารถหาน้ำหนักสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐาน KMnO_4 ความเข้มข้น 0.1 N คือ

$$\begin{aligned} \text{จากสูตรน้ำหนักของสาร} &= \text{ค่านอร์มัลลิตี (N)} \times \text{ปริมาตร (L)} \times \text{น้ำหนักสมมูล} \\ &= 0.1 \times 1.0 \times (158.04/5) \\ &= 3.16 \text{ g} \end{aligned}$$

ฉะนั้นต้องทำการชั่งสาร KMnO_4 จำนวน 3.16 g ลงในขวดวัดปริมาตร 1000 mL ผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่ขวดวัดเก็บสารสีชาเนื่องจากสารละลายมาตรฐาน KMnO_4 จะสลายตัวในแสงอาจทำให้ความเข้มข้นผิดพลาดได้

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 ความเข้มข้น 4.0 N

จากสูตรความสัมพันธ์ค่านอร์มัลลิตี (N) ต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 ความเข้มข้น 4.0 N ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร H_2SO_4 มีมวลโมเลกุล 98 แตกตัว 2 ครั้ง สามารถหาน้ำหนักสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 ความเข้มข้น 4 N คือ

$$\begin{aligned} \text{จากสูตรน้ำหนักของสาร} &= \text{ค่านอร์มัลลิตี (N)} \times \text{ปริมาตร (L)} \times \text{น้ำหนักสมมูล} \\ &= 4 \times 1.0 \times (98 / 2) \\ &= 196 \text{ g} \end{aligned}$$

แต่สาร H_2SO_4 เป็นของเหลวจึงต้องหาเป็นปริมาตรสารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 97%

จาก น้ำ 100 g มี H_2SO_4 97 g

ถ้าต้องการ H_2SO_4 196 g ต้องปิเปตมา $= (196 \times 100) / 97 = 202.06 \text{ g}$

สาร H_2SO_4 มีความหนาแน่น 1.84 เพราะฉะนั้นจากปริมาตร (V) = น้ำหนัก (g) / ความหนาแน่น (D)

$$= 202.06 / 1.84$$

$$= 109.82 \text{ mL}$$

ทำการปิเปตสารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 97% จำนวน 109.82 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL ผสมให้เข้ากัน

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน KI ความเข้มข้น 1.0 N

จากสูตรความสัมพันธ์ค่าออร์มาลิตี (N) ต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐาน KI ความเข้มข้น 1.0 N ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร KI มีมวลโมเลกุล 166 แยกตัว 1 ครั้ง สามารถหาน้ำหนักสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐาน KI ความเข้มข้น 1.0 N คือ

จากสูตรน้ำหนักของสาร = ค่าออร์มาลิตี (N) x ปริมาตร (L) x น้ำหนักสมมูล

$$= 1 \times 1.0 \times 166$$

$$= 166 \text{ g}$$

ฉะนั้นต้องทำการชั่งสาร KI จำนวน 166 g ลงในขวดวัดปริมาตร 1000 mL ผสมให้เข้ากัน

4. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.2 N

จากสูตรความสัมพันธ์ค่าออร์มาลิตี (N) ต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.2 N ปริมาตร 500 มิลลิลิตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ มีมวลโมเลกุล 248.18 แยกตัว 2 ครั้ง สามารถหาน้ำหนักสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.2 N คือ

จากสูตรน้ำหนักของสาร = ค่าออร์มาลิตี (N) x ปริมาตร (L) x น้ำหนักสมมูล

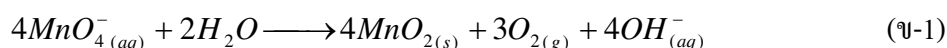
$$= 0.2 \times 0.5 \times (248.18 / 2)$$

$$= 12.4 \text{ g}$$

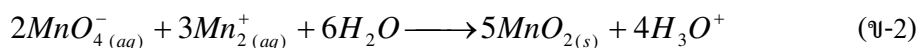
ฉะนั้นต้องทำการชั่งสาร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จำนวน 12.4 g ลงในขวดวัดปริมาตร 500 mL ผสมให้เข้ากัน

การใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารละลายมาตรฐาน [25]

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารที่ใช้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถทำให้สารนี้บริสุทธิ์ได้ เพราะจะมี MnO_2 บนอยู่ตลอดเวลา แม้แต่น้ำกลั่นที่ละลายสารนี้ก็มีสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ปนอยู่เล็กน้อย เช่น สารประกอบทางอินทรีย์ที่เล็ดลอดออกมาจากกระบวนการไอออนเอกซ์เชนจ์ (ion exchange) ในการทำน้ำกลั่น สารนี้จะทำปฏิกิริยากับ $KMnO_4$ แล้วทำให้เกิด MnO_2 และนอกจากนี้ถ้าเก็บสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไว้นานๆ จะเกิดการสลายตัวแบบ autodecomposition ขึ้น

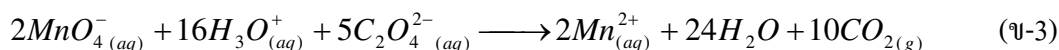


ถ้ามี Mn_2^+ ปนอยู่ในสารละลายเปอร์แมงกาเนตจะทำให้เปอร์แมงกาเนตไม่อยู่ตัวทำปฏิกิริยาให้ MnO_2



การเปลี่ยนแปลงแบบนี้จะเกิดขึ้นช้าถ้าสารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด แต่จะเกิดเร็วขึ้นถ้าสารละลายเป็นกลาง ด้วยเหตุดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เราจึงไม่เตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจาก $KMnO_4$ ที่บริสุทธิ์แบบรีเอเจนต์เกรด แต่เราจะใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีขายอยู่ทั่วไปมาละลายน้ำกลั่นแล้วต้มบน حمامอ่างน้ำ (water bath) ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วกรองบนซินเทอร์กลาสเบอร์ 4 หรือกระดาษกรองวอทแมนเบอร์ 42 ถ้าไม่ต้มสารละลายจะต้องทิ้งสารละลายนั้นไว้ 2-3 วันก่อนการทดลอง สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตควรเก็บไว้ในขวดสีน้ำตาลที่มีจุกแก้วอุด สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบสค่อนข้างจะอยู่ตัวน้อยกว่าสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง

การหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำได้โดยนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมออกซาลेट ($Na_2C_2O_4$) ซึ่งเป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ



จากสมการเราสามารถหามวลสารสัมพันธ์ได้ดังนี้

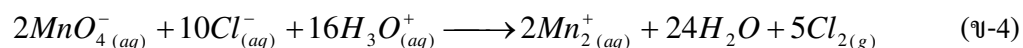
จำนวนโมลของ $KMnO_4$ / จำนวนโมลของ $Na_2C_2O_4 = 2 / 5$

การหาความเข้มข้นสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สำหรับการทดลองนั้นจะแทนค่าหาความเข้มข้นได้ดังนี้

$$[\text{ความเข้มข้น } KMnO_4 \text{ M} \times \text{ปริมาตร } KMnO_4 \text{ ml (ไทเทรต)}] / [0.05 \text{ M} \times 25 \text{ ml}] = 2 / 5$$

ค่าความเข้มข้นที่ได้เป็นหน่วย โมล/ลิตร เมื่อคูณด้วย 5 (น้ำหนักกรัมสมมูล) จะได้ค่าในหน่วย นอร์มัล (N)

ในการวิเคราะห์แร่เหล็ก แร่เหล็กจะต้องถูกรีดิวส์ให้เป็นไอร์ออน(II) หมกโดยสารละลายทิน (II)คลอไรด์ สารละลายที่ได้หลังจากการรีดิวส์จะมีปริมาณของคลอไรด์อยู่มาก ถ้านำมาไทเทรตกับ สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต คลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ MnO_4^- ด้วย



ผลก็คือทำให้เราต้องใช้ปริมาณของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มากกว่าความเป็นจริง ซิมเมอร์มานน์ (Zimmermann) ได้เสนอข้อแก้ไขอันนี้โดยการเติมแมงกานีส (II) ลงไปใน สารละลายแมงกานีส (II) จะไปทำให้รีดักชันโพเทนเชียล (reduction potential) ของปฏิกิริยา MnO_4^- ไปเป็น Mn_2 เปลี่ยนแปลงไปจนไม่สามารถที่จะออกซิไดส์คลอไรด์ไอออนให้กลายเป็นก๊าซคลอรีน

ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอร์ออน (II) จะทำให้เกิดไอร์ออน (III) ขึ้น ซึ่งสารนี้มีสีเหลือง และทำให้การหาจุดยุติลำบากขึ้น เรินฮาร์ดต์ (Reinhardt) เสนอข้อแก้ไขอันนี้โดยการเติมสารละลาย กรดฟอสฟอริกลงไปเพื่อทำให้เกิดไอออนเชิงซ้อนของเหล็ก (Iron-phosphate complex ion) ที่ไม่มี สี ดังนั้นสารละลายซึ่งประกอบด้วยแมงกานีส (II) และกรดฟอสฟอริกที่ใช้ในการไทเทรตหา ปริมาณของเหล็กจึงถูกเรียกว่า สารละลายป้องกันของซิมเมอร์มานน์ – เรินฮาร์ดต์ (Zimmermann – Reinhardt Preventive Solution)

การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

การเตรียม $KMnO_4$ 0.1 N

ชั่ง $KMnO_4$ ประมาณ 3.2-3.25 g ในปิเกอร์ 1500 mL

↓
เติมน้ำกลั่น 1000mL

↓
ปิดปิเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกาให้ความร้อนถึงจุดเดือด 15-30 นาที

↓
ตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

↓
กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42

↓
เก็บสารละลายในภาชนะที่ทำความสะอาดด้วยกรด Chromic แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกที

↓
เก็บสารละลายในขวดสีชา

การหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

มีสารที่เป็นมาตรฐานปฐมภูมิหลายชนิด ที่ใช้ในการหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่นิยมใช้กันมาก คือ โซเดียมออกซาลेट ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) แต่เราไม่นิยมใช้กรดออกซาลิก ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) เนื่องจากสารนี้เป็นผลึกที่มีจำนวนโมเลกุลของน้ำผลึกไม่แน่นอน ในการไทเทรตสารละลาย $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตตามวิธีเดิมนั้น ต้องทำสารละลาย $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ในสารละลายกรดให้มีอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เสียก่อน แล้วจึงเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงไปอย่างช้าๆ (10-15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่ออนาทิ) โดยทำให้สารละลายที่ได้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส ต่อมาเฟาเลอร์ (Fowler) และไบรต์ (Bright) ได้แสดงให้เห็นว่าการทดลองแบบเดิมนั้นจะให้ผลสูงกว่าความเป็นจริง 0.10-0.45 เปอร์เซ็นต์ทั้งสองได้เสนอวิธีการไทเทรตสารละลายโซเดียมออกซาลेटกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตใหม่ โดยเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้มีปริมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณที่ใช้ทั้งหมดลงในสารละลายโซเดียมออกซาลेटที่มีอยู่ในกรด 1.0 ฟอร์มัล (F) H_2SO_4 ด้วยอัตราเร็ว 25-30 ลบ.ซม ต่ออนาทิที่อุณหภูมิห้อง ตั้งทิ้งไว้จนสีชมพูจางหายไป แล้วทำให้สารละลายมีอุณหภูมิระหว่าง 55-60 องศาเซลเซียส นำเอาไปไทเทรตต่อไปกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จนถึงจุดยุติ

แต่ถ้าการไทเทรตแบบเฟาเลอร์และไบรต์ไม่สะดวกแก่การทดลอง เราอาจจะดัดแปลงการไทเทรตแบบเดิมมาใช้ก็ได้ โดยทำให้อุณหภูมิของสารละลาย $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ในกรดมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปไทเทรตอย่างช้าๆ (10-15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาทิ) จนได้สารละลายที่มีสีชมพูอ่อนที่จุดยุติ

รีเอเจนต์

1. สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 0.02 ฟอร์มัล

ละลาย KMnO_4 นึก 1.6 กรัมในน้ำกลั่น 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วต้มบน حمامอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้สารละลายที่ได้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วกรองเอาตะกอนออกด้วยกระดาษวอทแมนเบอร์ 42 หรือซินเตอร์กลาสเบอร์ 4

2. สารละลาย 2.0 ฟอร์มัล H_2SO_4

3. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมออกซาลेट

นำ $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ชนิดรีเอเจนต์เกรดหรือแอนาลาร์เกรดไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำมาชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน และใกล้เคียงกับ 0.67 กรัม

ละลายโซเดียมออกซาเลตในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นจนได้สารละลาย 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมออกซาเลต

วิธีทดลอง

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโซเดียมออกซาเลต 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลาย 2.0 โฟร์มัล H_2SO_4 ปริมาตร 75 ลูกบาศก์เซนติเมตร และน้ำกลั่นปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าให้เข้ากัน
2. นำสารละลายที่ได้ ไปไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากบิวเรต ด้วยอัตราเร็ว 25-35 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที พร้อมทั้งเขย่าสารละลายอยู่เสมอ จนสีชมพูอ่อนเกิดขึ้นในสารละลาย และวางทิ้งไว้จนสีชมพูอ่อนเกิดขึ้นในสารละลาย และวางทิ้งไว้จนสีชมพูไม่จางหายไป
3. นำสารละลายที่ได้ไปอ่านจนมีอุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส จนสีชมพูของสารละลายจางหายไปแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจากบิวเรตต่อทันที จนสารละลายกลายเป็นสีชมพูอ่อนอีกครั้ง และไม่จางหายไปภายในเวลา 30 วินาที
4. คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยอาศัยมวลสารสัมพันธ์จากสมการข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว

การ Standardization หาความเข้มข้นที่แน่นอนของ KMnO_4

อบ Sodium Oxalate ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) ที่อุณหภูมิ 105-110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

↓
ทำให้เย็นโดยนำไปใส่ไว้ใน Desiccator

↓
ชั่ง Sodium Oxalate ที่แห้งประมาณ 0.3 g ในบีกเกอร์ 600 mL

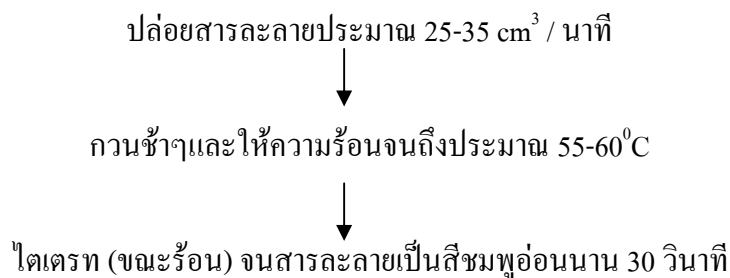
↓
เติมน้ำกลั่น 240 mL และ Conc. H_2SO_4 12.5 mL

(หรือ 2 N H_2SO_4 250 mL)

↓
ทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 25-30°C กวนเบาๆจน Oxalate ละลายหมด

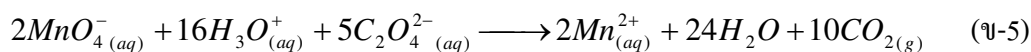
↓
เติมสารละลาย 0.1 N KMnO_4 90-95% ลงในบิวเรต





การคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยอาศัยมวลสารสัมพันธ์

การหาความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำได้โดยนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมออกซาเลต (Na₂C₂O₄) ซึ่งเป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ



จากสมการเราสามารถหามวลสารสัมพันธ์ได้ดังนี้

จำนวน โมลของ KMnO₄ / จำนวน โมลของ Na₂C₂O₄ = 2 / 5 หรือ

KMnO₄ 2 Mole ทำปฏิกิริยาพอดีกับ Na₂C₂O₄ 5 Mole

ค่าความเข้มข้นที่ได้เป็นหน่วย โมล/ลิตร เมื่อคูณด้วย 5 (น้ำหนักกรัมสมมูล) จะได้ค่าในหน่วย นอร์มัล (N)

จากสูตร

$$\text{Mole} = \frac{\text{น้ำหนัก (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุล (กรัม)}}$$

;

$$\text{Mole} = \frac{\text{g}}{\text{MW}}$$

จากการทดลองซัง Na₂S₂O₃ มา 0.355 กรัม คิดเป็น

$$\text{Mole} = \frac{0.355 \text{ (กรัม)}}{158 \text{ (กรัม)}} = 2.25 \times 10^{-3}$$

จากการไทเทรต ใช้ปริมาณ KMnO₄ 38 ml

ดังนั้น Na₂S₂O₃ 5 Mole ทำปฏิกิริยาพอดีกับ KMnO₄ 2 Mole

ถ้า Na₂S₂O₃ 2.25 x 10⁻³ Mole ทำปฏิกิริยาพอดีกับ KMnO₄ $\frac{2 \times 2.25 \times 10^{-3}}{5}$

$$= 8.98 \times 10^{-4} \text{ Mole}$$

หาความเข้มข้นของสารละลาย KMnO₄ ในหน่วย Mole / L

จาก KMnO₄ 38 mL คิดเป็น 8.98 x 10⁻⁴ Mole

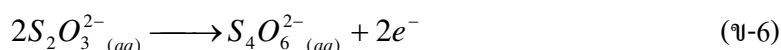
ถ้า KMnO₄ 1000 mL คิดเป็น $\frac{8.98 \times 10^{-4} \times 1000}{1} = 0.02$ Mole / L

หาความเข้มข้นของสารละลาย KMnO₄ ในหน่วยนอร์มัล (N)

ความเข้มข้นของสารละลาย KMnO_4 0.02 Mole / L คิดเป็น $0.02 \times 5 = 0.1$ นอร์มัล (N)
 เพราะฉะนั้น สารละลาย KMnO_4 มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N)

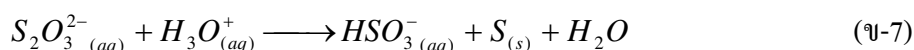
โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)กับการเป็นสารละลายมาตรฐาน

สารนี้นิยมเรียกในชื่อว่า ไฮโป (hypo) เป็นสารที่อยู่ตัว แต่เนื่องจากจำนวนโมเลกุลของน้ำผลึกไม่แน่นอน เราจึงไม่ใช้สารนี้เป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ ครึ่งปฏิกิริยาของการรีดิวซ์ของสารนี้คือ



การไทเทรตไอโอดีนด้วยสารละลายไทโอซัลเฟต ควรกระทำในสารละลายที่เป็นกลางหรือสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง ปกติประมาณ 2.0 ฟอร์มัล HCl แต่ถ้าความเข้มข้นของกรดสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการสลายตัวของไทโอซัลเฟตได้

สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เตรียมได้โดยละลายสารนี้ในน้ำกลั่นที่ได้ต้มไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกแล้ว แต่ถ้าในสารละลายมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ จะทำให้เกิดการสลายตัวของไทโอซัลเฟต

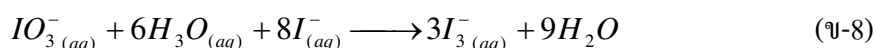


นอกจากนี้ การสลายตัวอาจจะเกิดจากปฏิกิริยาของแบคทีเรียในสารละลายได้ถ้าตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ เพื่อป้องกันการสลายตัวของไทโอซัลเฟต ควรปฏิบัติดังนี้

1. ใช้น้ำกลั่นที่ต้มจนเดือดเตรียมสารละลาย
2. เติม 3 หยดของคลอโรฟอร์ม หรือ 10 มิลลิกรัม ของเมอร์คิวรี (II) ไอโอไดด์ (HgI_2) ลงในสารละลาย 1 ลิตร
3. อย่าให้สารละลายที่เตรียมถูกแสงสว่างโดยตรง ใช้ขวดที่มีสีบรรจุสารละลาย

สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate, KIO_3)

สารที่ใช้เป็นสารมาตรฐานปฐมภูมิ สำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ที่ใช้กันมากได้แก่ โพแทสเซียมไดโครเมตกับโพแทสเซียมไอโอเดต สารทั้งสองนี้มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่มากเกินไปในสารละลายที่เป็นกรด ให้ไอโอดีนปริมาณของไอโอดีนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่เป็นมาตรฐานปฐมภูมิที่ใช้ เมื่อนำเอาไอโอดีนที่เกิดขึ้นไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตอีกทีหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตได้



1. รีเอเจนต์

1.1 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 ฟอर्मัล สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)หนัก 25 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดแล้วและทำให้เย็นใหม่ๆ เติมโซเดียมคาร์บอเนตหนัก 0.1 กรัมลงไป แล้วทำให้ปริมาตรของสารละลายเป็น 1 ลิตร ควรเก็บสารละลายนี้ในขวดสีน้ำตาล และสารละลายนี้ควรไทเทรตหาความเข้มข้นก่อนใช้ทุกวัน

1.2 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 1/60 ฟอर्मัล โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ไปทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ซึ่งโพแทสเซียมไอโอเดตที่ได้ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน และใกล้เคียงกับ 0.356 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและทำให้สารละลายมีปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในขวดวัดปริมาตร คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายนี้

1.3 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 10 กรัม ต่อ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ชนิดรีเอเจนต์เกรด 10 กรัม ในน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

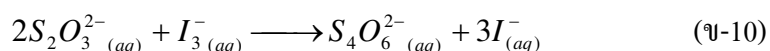
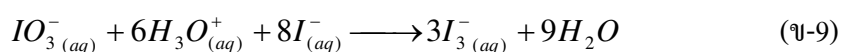
1.4 น้ำแป้ง น้ำแป้งที่ละลายน้ำได้ (soluble starch) หนัก 1.0 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อยคนให้เป็นแป้งเปียกในบีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำร้อนที่เดือด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปแล้วคนให้แป้งละลาย ต้มสารละลายที่ได้ 1 นาที แล้วทำสารละลายที่ได้ให้เย็น เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) หนัก 2 กรัม คนสารละลายที่ได้ให้ผสมกันแล้วเก็บไว้ในขวดที่มีจุกอุด (ถ้าต้องการใช้สารละลายนี้เป็นเวลานานหลายเดือนควรเติมเมอร์คิวรี (II) ไอโอไดด์ (HgI_2) หนัก 5 มก. แทน KI)

ใช้สารละลายน้ำแป้ง 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นอินดิเคเตอร์ในการไทเทรตไอโอดีนแต่ละครั้ง และจะต้องไม่ใส่น้ำแป้งก่อนจนกว่าจะเกือบถึงจุดยุติ เพราะจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสีเห็นได้ชัด ถ้าเติมน้ำแป้งลงไปในขณะที่ไอโอดีนมีความเข้มข้นสูง ไอโอดีนอาจจะถูกดูดซับบนสารที่มีสี

1.5 สารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 1.0 ฟอर्मัล

2. วิธีทดลอง

ปีเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดค์ร้อยละ 10 ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร และสารละลาย 1.0 ฟอร์มัล H_2SO_4 ปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำสารละลายที่ได้มาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจากบิวเรตจนสารละลายที่ได้มีสีจางอ่อน เติมน้ำเปล่า 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน นำไปไทเทรตต่อจนได้สีน้ำเงินอ่อนๆ เกือบจางหายไป ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง ผลที่ได้ไม่ควรแตกต่างกันเกิน 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจากสมการข้างล่าง



จากสมการทั้งสองนี้และอาศัยมวลสารสัมพันธ์ เราจะได้

จำนวนโมลของ I_3^- ต่อ จำนวนโมลของ KIO_3 = 3 ต่อ 1

จำนวนโมลของ I_3^- ต่อ จำนวนโมลของ $Na_2S_2O_3$ = 1 ต่อ 2

ดังนั้น จำนวนโมลของ $Na_2S_2O_3$ ต่อ จำนวนโมลของ KIO_3 = 6 ต่อ 1

การหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต สำหรับการทดลองนั้นจะแทนค่าหาความเข้มข้นได้ดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต x ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (ไทเทรต) / (1 / 60 F x 25 ml) = 6 / 1 ค่าความเข้มข้นที่ได้เป็นหน่วยฟอร์มัล (F) เมื่อคูณด้วย 1 (น้ำหนักกรัมสมมูล) จะได้ค่าในหน่วยมอร์ล (N)

หน่วยน้ำหนักกรัมตามสูตร (gram formular weight) แล้วความเข้มข้นของสารละลายที่แสดงเป็นฟอร์มัล (Formality)

1. กรัมตามสูตร (gram formular weight, gfw หรือเขียนอย่างย่อเป็น fw)

สารบางชนิดเราไม่ทราบสูตรโมเลกุลเป็นอย่างไร เช่น โซเดียมคลอไรด์ และเกลือของโลหะส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยพันธะไอออนิก โครงสร้างของสารเหล่านี้ต่อเนื่องกันจนไม่ทราบว่าโมเลกุลของสารเหล่านี้เริ่มต้นที่ไหนและสิ้นสุดที่ใด เราจึงไม่ทราบสูตรโมเลกุลที่แน่นอนของสารเหล่านี้ ในกรณีแบบนี้มวลตามสูตร (formular weight) จะถูกนำมาใช้แทนมวลโมเลกุล โดยยึดเอาสูตรอย่างง่าย (empirical formular) มาใช้แทน เมื่อเราแทนค่ามวลอะตอมลงไปในสูตรอย่างง่ายของสาร เราจะได้มวลตามสูตรของสารนั้น จำนวนกรัมตามสูตร (fw) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนกรัมฟอร์มูลาของสาร X} &= \frac{\text{น้ำหนักของสาร X เป็นกรัม}}{\text{มวลตามสูตรของสาร X}} \\ \text{ตัวอย่างเช่น NaCl มวลตามสูตร} &= 22.99 + 35.45 \\ &= 58.44 \text{ กรัม / fw} \\ \text{ดังนั้น 1 fw ของ NaCl จะมีค่า} &= 58.44 \text{ กรัม} \\ \text{NaClหนัก 0.123 กรัม} &= 0.123 / 58.44 \\ &= 2.10 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

แต่อย่างไรก็ดี สารที่มีสูตรโมเลกุลที่แน่นอน บางครั้งเรานิยมบอกหน่วยน้ำหนักในรูปของจำนวนกรัมตามสูตรเหมือนกัน เช่น

$$\begin{aligned} \text{สาร 1 fw ของ H}_2 \text{ จะหนัก } 1.008 \times 2 &= 2.016 \text{ กรัม} \\ \text{ก๊าซไฮโดรเจนหนัก 100 กรัม} &= 100 / 2.016 = 49.603 \text{ fw} \end{aligned}$$

2. ความเข้มข้นที่แสดงเป็นฟอร์มัล (Formality)

หมายถึงความเข้มข้นที่แสดงถึงจำนวนมวลตามสูตรของตัวถูกละลายในสารละลาย 1 ลิตร เช่น NaOH หนัก 25 กรัม ละลายในน้ำเป็นสารละลาย 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลตามสูตรของ NaOH} &= 22.99 + 15.999 + 1.008 \\ &= 39.997 \text{ กรัม / fw} \\ \text{NaOH หนัก 25 กรัม} &= 25 \text{ กรัม / (39.997 กรัม / fw)} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ก

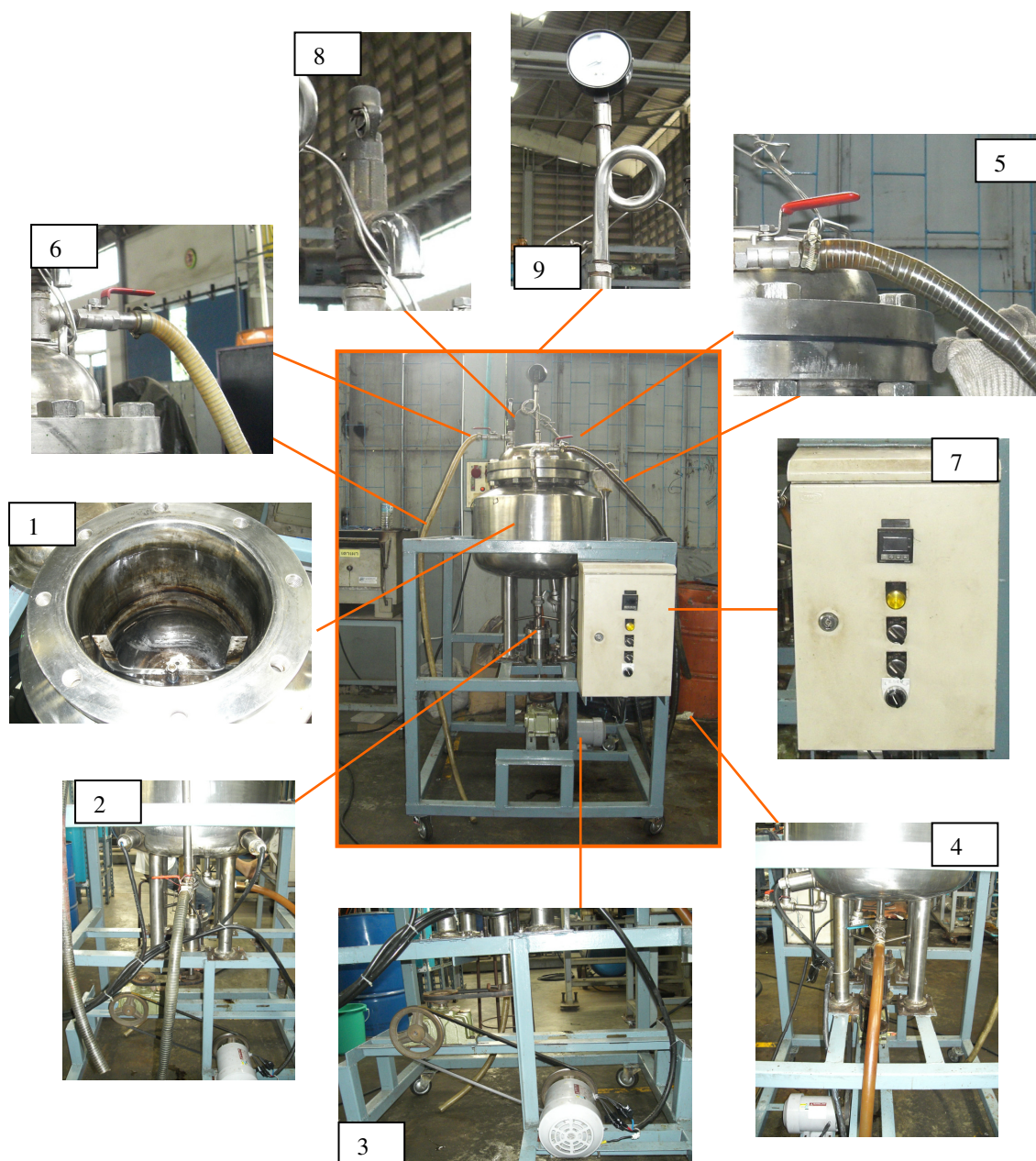
วัตถุดิบทางใบปาล์มน้ำมันและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ค-1 ต้นและทางใบปาล์มน้ำมันตามธรรมชาติ



ภาพที่ ค-2 ลักษณะของทางใบปาล์มน้ำมันที่ลอกเปลือกออกแล้ว



ภาพที่ ค-3 แสดงส่วนประกอบของหม้อต้ม

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหม้อต้มเยื่อ

หมายเลข 1 : ส่วนภายในหม้อต้มเยื่อและ ใบกวน

หมายเลข 2 : วาล์วและท่อปล่อยน้ำมันออก

หมายเลข 3 : มอเตอร์ควบคุมใบกวน

หมายเลข 4 : วาล์วและท่อปล่อยสารเคมีเหลือทิ้ง

หมายเลข 5 : วาล์วลดความดันของน้ำมันและท่อ

หมายเลข 6 : วาล์วลดความดันไภายในหม้อต้ม

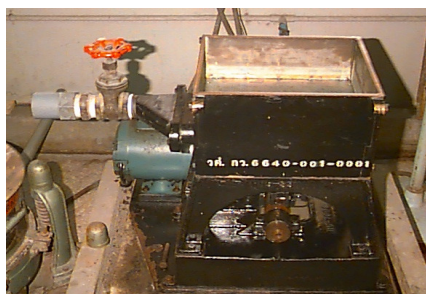
หมายเลข 7 : ชุดควบคุมหม้อต้ม (Power, Heater, Motor)

หมายเลข 8 : Release Pressure

หมายเลข 9 : เกจวัดความดัน



ภาพที่ ค-4 เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrater)



ภาพที่ ค-5 เครื่องคัดแยกเยื่อแบบตะแกรงราบ (Screener)



ภาพที่ ค-6 เครื่องชั่ง (Analytical balance)



ภาพที่ ค-7 เครื่องวัดปริมาณความชื้นแบบอัตโนมัติ (Moisture Analyzer)



ภาพที่ ค-8 ตู้อบแห้ง

ภาคผนวก ง

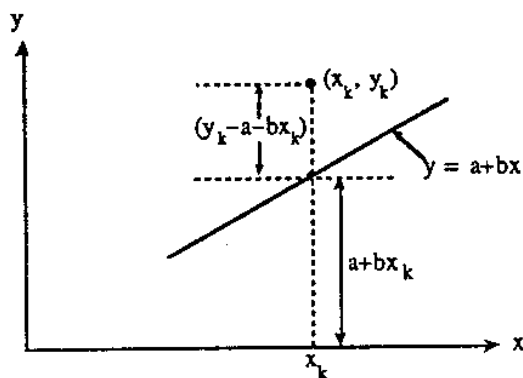
- การแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม
- การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

1. การแทนกลุ่มข้อมูลด้วยเส้นที่เหมาะสม [28]

จากการรวบรวมข้อมูลทางสถิติหนึ่งได้ x และ y ที่เป็นตัวเลขจำนวนมาก ไม่สามารถที่จะนำเสนอเป็นรายงานให้เป็นที่เข้าใจด้วยข้อมูลตัวเลขเหล่านั้นได้ จึงจำเป็นต้องแทนข้อมูลเหล่านี้ด้วยเส้นที่เหมาะสมเส้นหนึ่ง ซึ่งทฤษฎีที่ใช้แพร่หลายกันโดยทั่วไปคือ ทฤษฎีของ Least Square และเราเรียกวิธีนี้ว่า Polynomial Regression

1.1 Method of least squares

เส้นตรงเส้นหนึ่ง $y = a + bx$ ที่เหมาะสมที่จะแทนกลุ่มของข้อมูล $(x, y), \dots, (x, y)$ เมื่อผลรวมของกำลังสองของระยะห่างจากจุดนั้นไปถึงเส้นตรงนั้นน้อยที่สุด ระยะห่างที่วัดตามแนวตั้งดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แสดงระยะตามแนวตั้งจากจุด (x_k, y_k) ใด ๆ ถึงเส้น $y = a + bx$

จุดบนเส้นตรงที่ x จะมี $y = a + bx$ ดังนั้นระยะห่างจากเส้นตรงถึงจุด (x, y) คือ $|y_k - a - bx_k|$ และเมื่อคิดทั้งหมด ผลรวมของกำลังสอง คือ

$$r = \sum (y_k - a - bx_k)^2 \quad (4-1)$$

r ขึ้นอยู่กับทั้ง a และ b สถานะเงื่อนไขที่จำเป็น เพื่อให้ r มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{\partial r}{\partial a} = -2 \sum_{k=1}^n (y_k - a - bx_k) = 0 \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial r}{\partial b} = -2 \sum_{k=1}^n x_k (y_k - a - bx_k) = 0 \quad (4-3)$$

เขียนสมการที่ (ง-2) และสมการที่ (ง-3) ใหม่ในรูปผลรวมของแต่ละเทอม จะได้

$$an + b \sum_{k=1}^n x_k = n \sum_{k=1}^n y_k \quad (\text{ง-4})$$

$$a \sum_{k=1}^n x_k + b \sum_{k=1}^n x_k = n \sum_{k=1}^n x_k y_k \quad (\text{ง-5})$$

ซึ่งสมการนี้เรียกว่า normal equations มี unknown สองตัวคือ a และ b เมื่อกำหนดกลุ่มของจุดข้อมูล (x,y),..., (x,y) ใด ๆ ทำให้สามารถแก้สมการ (ง-4 และ ง-5) เพื่อหา a และ b ได้

ตัวอย่างที่ 1 กำหนดจุด (-1,1), (-0.1,1.1), (0.2,0.8), (1.0,1.0) จงหาเส้นตรงที่เหมาะสมที่จะใช้แทนกลุ่มข้อมูลนี้โดยใช้ Method of least square

วิธีทำ ในที่นี้จะได้น = 4, $\sum x_k = 0.1$, $\sum x_k^2 = 2.05$, $\sum y_k = 3.9$, $\sum x_k y_k = 0.5$

จากสมการ (ง-4) และ (ง-5) จะได้

$$4a + 0.1b = 3.9$$

$$0.1a + 2.05b = 0.05$$

แก้สมการหาค่า a และ b จะได้ a = 0.97 และ b = -0.02

ดังนั้นสมการของเส้นตรงที่ใช้แทนกลุ่มข้อมูลนี้ คือ

$$y = -0.02x + 0.97 \quad (\text{ง-6})$$

ได้ค่า

x = [-1,-0.1,0.2,1.0];

y = [1,1.1,0.8,1.0];

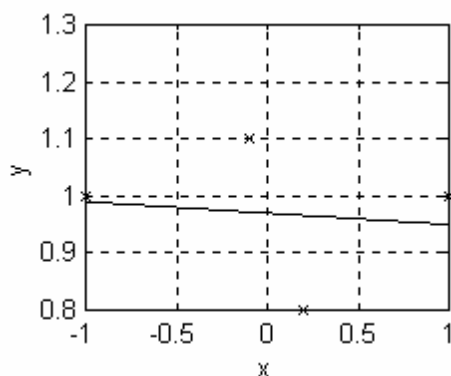
x1 = -1:0.01:1;

y1 = -0.02 * x1 + 0.97;

subplot(221) , plot (x,y,'*',x1,y1),.....

xlabel ('x'),ylabel('y'),.....

grid



ภาพที่ ง-2 แสดงจุดและเส้นตามตัวอย่างที่ 1

วิธีการนี้สามารถนำไปใช้แทนด้วยสมการ Polynomial กำลัง m ใด ๆ สำหรับข้อมูลที่มีจุด n จุด

$$f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (\text{ง-7})$$

สมการที่ (ง-1) จะเปลี่ยนเป็น

$$r = \sum_{j=1}^n (y_k - p(x_k))^2 \quad (\text{ง-8})$$

ซึ่งพารามิเตอร์ $m+1$ ตัว คือ $a_0, \dots, a_m$ สภาวะเงื่อนไขที่จำเป็นเพื่อให้ r มีค่าน้อยที่สุดจะมี $m+1$ เงื่อนไข

$$\frac{\partial r}{\partial a_0} = 0, \dots, \frac{\partial r}{\partial a_m} = 0 \quad (\text{ง-9})$$

ซึ่งจะทำให้สมการ normal มี $m+1$ สมการเมื่อแก้สมการ normal สมการที่ (ง-9) นี้ สามารถทำให้ได้พารามิเตอร์ $a_0, \dots, a_m$ เพื่อให้ได้สมการ polynomial ที่ (ง-7) ตามต้องการ

ในทาง MATLAB เราใช้ฟังก์ชัน `polyfit` สำหรับหาสัมประสิทธิ์ของสมการ polynomial ที่เหมาะสม (ซึ่ง polynomial กำลังหนึ่ง คือสมการเส้นตรง) สมการที่ใช้เป็นมาตรฐาน คือ

$$f(x) = a_nx^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_1x + a_0 \quad (\text{ง-10})$$

n คือกำลังสูงสุดของ polynomial นั้น ๆ

1.2 Function Polyfit

`polyfit (x,y,n)` เป็นฟังก์ชันมี 3 argument ; สมมุติเป็น x และ y ตามลำดับ เป็นเวกเตอร์ของกลุ่มข้อมูลจุดที่สัมพันธ์กัน n เป็นกำลังสูงสุดของ polynomial ที่ต้องการ ผลที่ได้จะเป็นเวกเตอร์ขนาด $1 \times (n+1)$ โดยตัวแรกจะเป็นของ polynomial กำลังสูงสุด แล้วไล่ลงไปตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 2 จากข้อมูลตัวอย่างที่ 1 จงใช้ฟังก์ชัน `polyfit` หาเส้นที่เหมาะสมตั้งแต่เส้นตรง polynomial กำลังสองและสาม

วิธีทำ

```
x = [-1 -0.1 0.2 1 ]
y = [1 1.1 0.8 1]
coef_1 = polyfit (x , y ,1)
coef_2 = polyfit (x ,y ,2)
coef_3 = polyfit (x ,y, 3)
ผลที่ได้      coef_1 = [-0.0232 0.9756 ]
```

เขียนในรูปสมการได้ คือ

$$y = -0.0232 + 0.9752x$$

$$\text{coef_2} = [0.0455 \ -0.0222 \ 0.9752]$$

เขียนในรูปสมการ คือ

$$y = 0.0455x^2 - 0.0021x + 0.9752$$

$$\text{coef_3} = [1.0311 \ 0.0021 \ -1.0311 \ 0.9979]$$

เขียนในรูปสมการคือ

$$y = 1.0311x^3 + 0.0021x^2 - 1.0311x + 0.9979$$

หากเรามีสัมประสิทธิ์ polynomial ใด ๆ แล้ว ต้องการที่จะนำไป plot เพื่อความสะดวกเราสามารถ
ใช้ฟังก์ชัน `polyval`

1.3 Function Polyval

`polyval (coef,x)` ฟังก์ชันนี้มี 2 argument ; ตัวแรกเป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของ polynomial นั้น ๆ ให้กำลังเรียงลำดับจากมากไปน้อย ตัวที่สองเป็นสเกลาร์หรือเวกเตอร์ของค่าต่าง ๆ ที่ต้องการประมาณ

ตัวอย่างที่ 3 จากตัวอย่างที่ 2 นำไปพล็อตกราฟแสดงให้เห็น

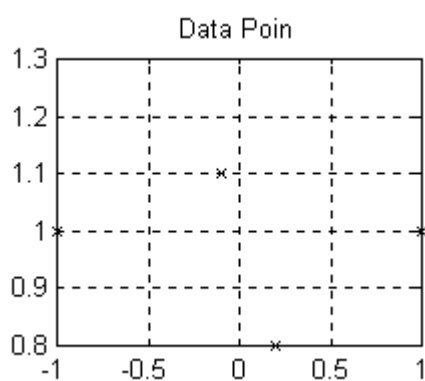
วิธีทำ เขียนโปรแกรมต่อจากตัวอย่างที่ 4.2 ดังนี้

```
x1 = -1 : 0.01 : 1 ;
y_1 = polyval (coef_1 , x1);
y_2 = polyval (coef_2 , x1);
y_3 = polyval (coef_3 ,x1 );
% ภาพแสดงจุดข้อมูล
subplot (221) ,plot (x , y,'x') , grid ,.....
title('Data Point')

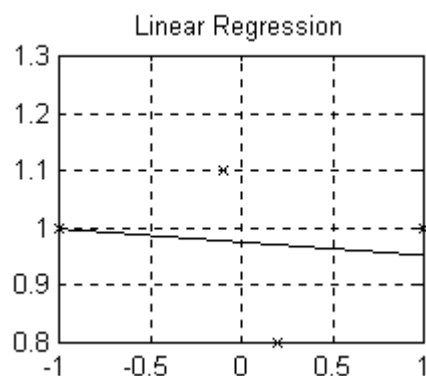
%ภาพแสดงจุดข้อมูลและเส้น polynomial กำลังหนึ่งที่เหมาะสม
subplot (222) ,plot (x,y,'x',x1,y_1),grid,.....
title ('Second Degree')

%ภาพแสดงจุดข้อมูลและเส้น polynomial กำลังสองที่เหมาะสม
subplot (223) ,plot (x,y,'x',x1,y_2),grid,.....
title ('Second Degree')

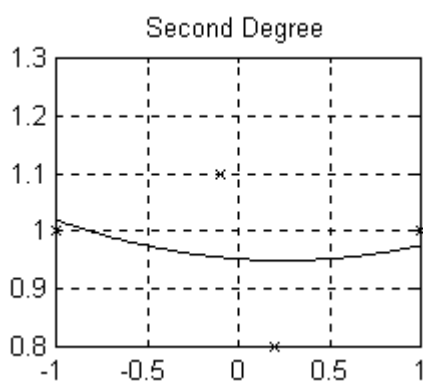
%ภาพแสดงจุดข้อมูลและเส้น polynomial กำลังสี่ที่เหมาะสม
subplot (224) ,plot (x,y,'x',x1,y_3),grid,.....
title ('Second Degree')
```



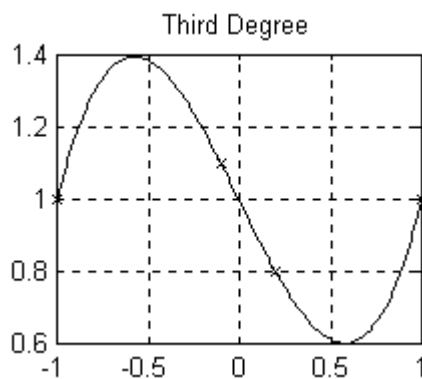
ภาพที่ ง-3 แสดงจุดข้อมูล



ภาพที่ ง-4 แสดงจุดข้อมูลและเส้น
polynomial กำลังหนึ่ง



ภาพที่ ง-5 แสดงจุดข้อมูลและเส้น
polynomial กำลังสอง



ภาพที่ ง-6 แสดงจุดข้อมูลและเส้น
polynomial กำลังสาม

****ข้อควรระวัง**** : หากข้อมูล n จุด กำลังของ polynomial ที่เหมาะสมมากที่สุด คือ กำลัง $n-1$ ถ้า polynomial ที่ใช้มีกำลังมากกว่า $n-1$ จะเกิดความผิดพลาดได้ ดังสังเกต ได้จากการพิจารณาสมการ (ง-8)

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ค่าแคปปากับร้อยละของเยื่อที่ผ่านการคัดขนาด

```

close all

clc

x=[59.08 58.79 58.71 46.76 35.21
30.12 29.22 28.34 28.49 24.31
54.41 48.92 42.58 23.46 17.11
22.87 21.05 20.75 13.23 9.41];
y=[32.53 31.26 32.99 31.27 32.37
32.26 31.43 38.58 31.49 30.50
32.08 30.80 36.30 31.67 30.12
30.47 34.38 44.83 31.69 34.97];
coef_1=polyfit(x,y,3);
x1=10:1:60;
y_1=polyval(coef_1,x1);
figure(1);
subplot(2,1,1);plot (x,y,'m.')
subplot(2,1,2): plot(y_1)
figure(2);
plot(x,y,'r.',x1,y_1,'b')
xlabel('Kappa number');
ylabel('Screened yield(%)')

```

โปรแกรมแสดงกราฟค่าเคปปาที่ได้จากแบบจำลองกับค่าเคปปาที่ได้จากการทดลอง

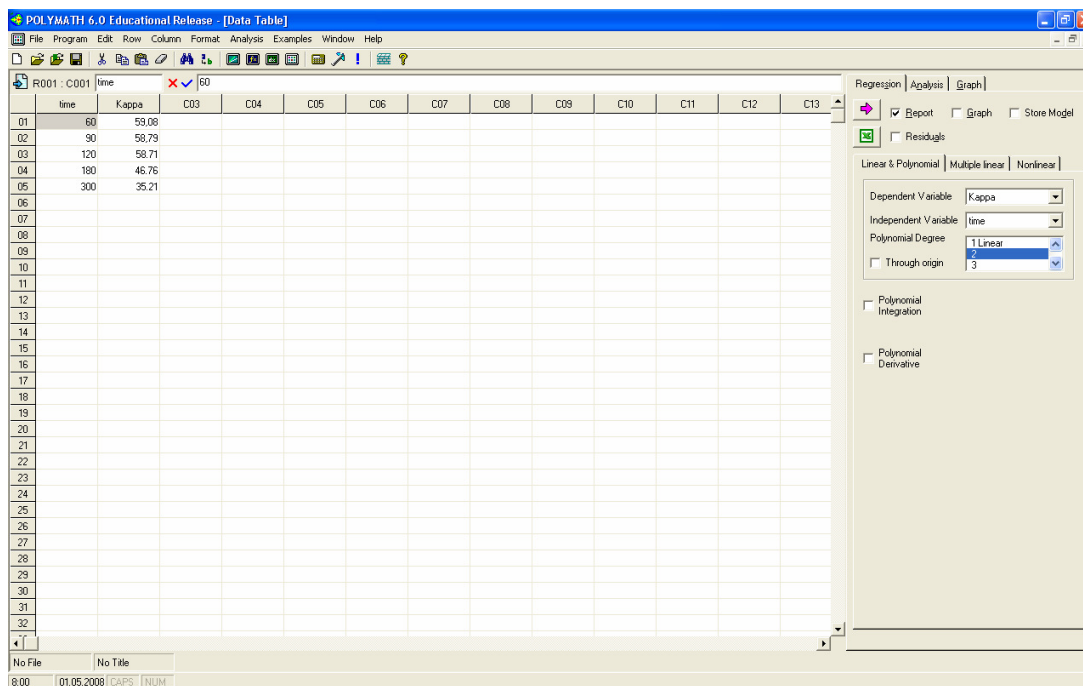
```
clc;
clear;
x=[59.08 58.79 58.71 46.76 35.21
30.12 29.22 28.34 28.49 24.31
54.41 48.92 42.58 23.46 17.11
22.87 21.05 20.75 13.23 9.41]
y=[59.99 57.32 54.71 49.69 40.69
42.20 34.42 28.16 18.99 8.80
52.49 46.41 40.84 31.31 17.88
33.34 24.04 17.38 9.11 2.54]
w=0:90;
z=0:90;
plot (x,y,'r.',w,z,'b')
xlabel('Experimental Kappa number');
ylabel('Predicted Kappa number');
axis([0 90 0 90])
```

2. การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

2.1 การคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา

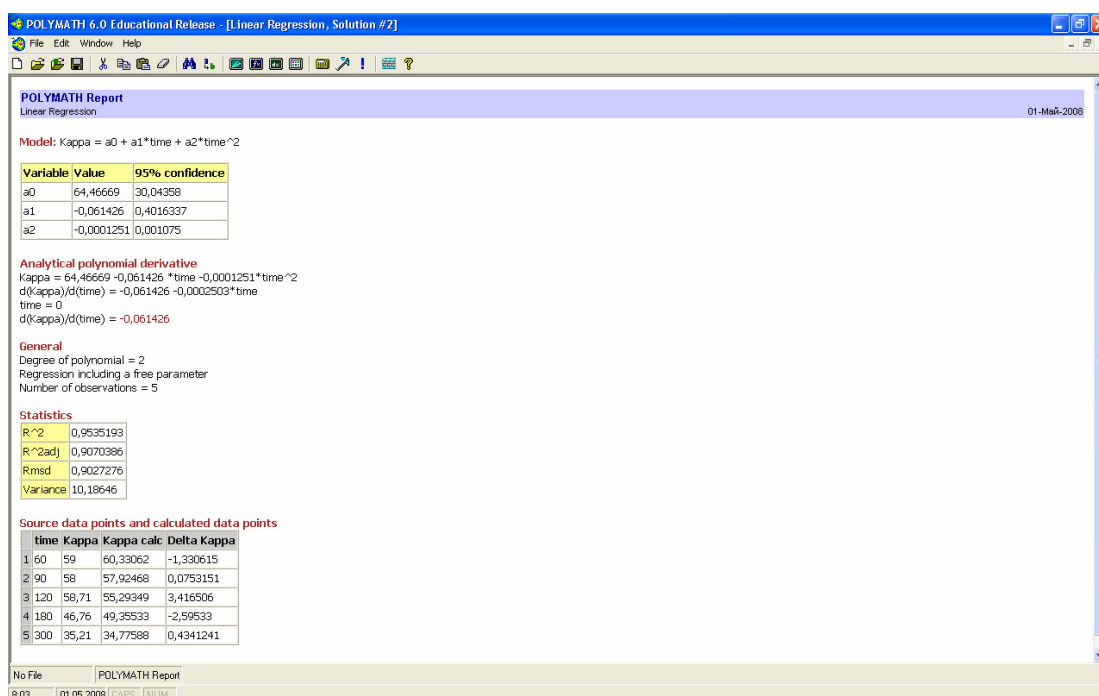
2.1.1 เติมข้อมูลลงในโปรแกรม Polymath 6.0 (เลือกหัวข้อการทำงาน Regress and analyze data ชื่อว่า REG)

2.1.2 เลือกการวิเคราะห์แบบ Polynomial derivative กำหนดค่าเริ่มต้นเป็น 0 และเลือก Polynomial degree 2



ภาพที่ ง-7 แสดงการเติมข้อมูลในโปรแกรม Polymath

2.1.3 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Polymath 6.0



ภาพที่ ง-8 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Polymath

2.2 การคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น

จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) ได้ตั้งสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ ดังนี้

$$k = Ae^{\frac{E}{RT}} \quad (\text{ง-11})$$

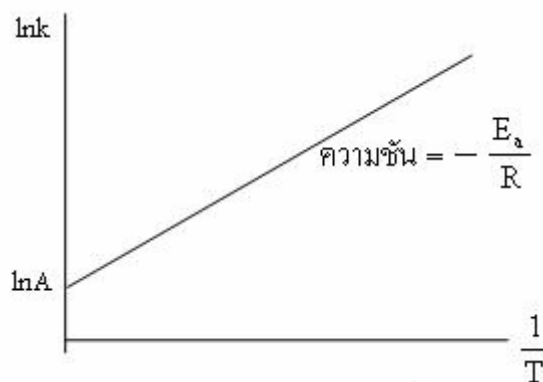
หรือ $\ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (\text{ง-12})$

เมื่อ A = ค่าคงตัว เรียกว่าแฟกเตอร์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius's factor หรือ frequency factor)

E = พลังงานกระตุ้น

R = ค่าคงตัวของแก๊ส เท่ากับ $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

นำค่า $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ จากสมการที่ (ง-12) มาเขียนกราฟ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเป็นลบ ดังภาพที่ ง-9



ภาพที่ ง-9 กราฟของ $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$

2.3 การทดสอบค่ากลาง

สมมติประชากรที่ทำการศึกษามีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) ไม่รู้ค่ากลางของประชากร (μ) และค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) เมื่อต้องการทดสอบสมมติฐานโดยเทียบกับค่าหนึ่งที่ค่าหนึ่งใช้วิธี Two-sided alternative สามารถเขียนสมมติฐานได้ดังนี้

$$\text{สมมติฐานหลัก} \quad H_0 : \mu = \mu_0 \quad (\text{ง-13})$$

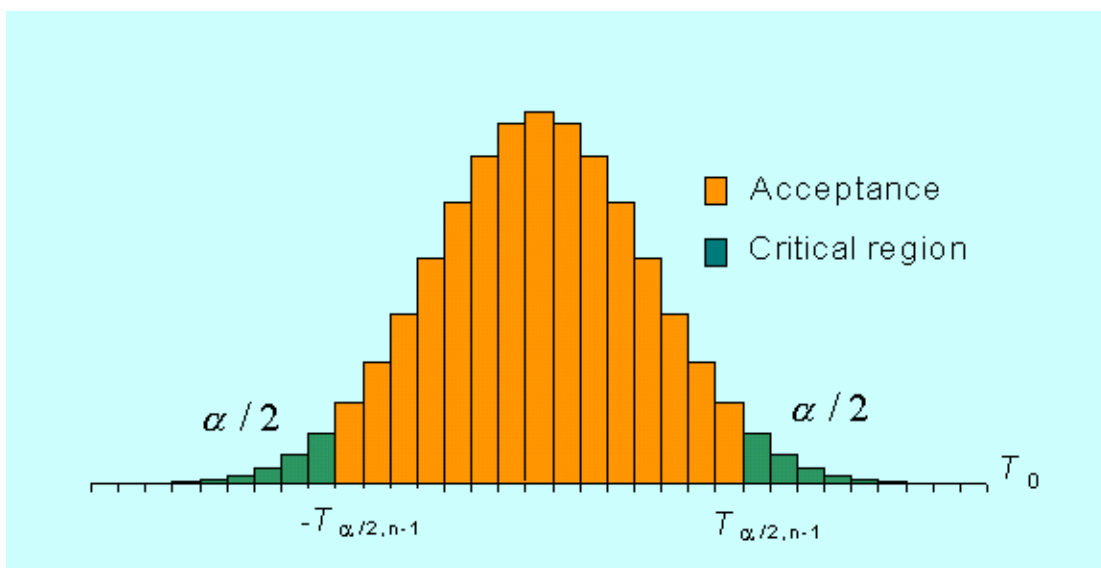
$$\text{สมมติฐานรอง} \quad H_0 : \mu \neq \mu_0 \quad (\text{ง-14})$$

เมื่อ μ_0 คือค่าคงที่ที่เราระบุในสมมติฐาน โดยที่ไม่รู้ค่าความแปรปรวนของประชากร จึงต้องทำการสุ่มตัวอย่างออกมาจากประชากรแล้วคำนวณค่าความเบี่ยงเบน (s) ของข้อมูลตัวอย่าง ($n < 30$) เราจึงเลือกใช้ T ในการทดสอบ

$$T_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad (\text{ง-15})$$

T_0 เรียกว่าตัวทดสอบสถิติ (Test statistic) นั่นคือจะใช้ t-Distribution ในการอ้างอิงและใช้ degree of freedom เท่ากับ $n-1$ ด้วย

จากสมมติฐาน เราปฏิเสธ $H_0 : \mu = \mu_0$ ถ้าค่า T_0 จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-t_{\alpha/2, n-1}$ และ $t_{\alpha/2, n-1}$ และยอมรับ $H_0 : \mu = \mu_0$ ถ้า $-T_{\alpha/2, n-1} \leq T_0 \leq T_{\alpha/2, n-1}$ ดังภาพที่ ง-10



ภาพที่ ง-10 แสดงบริเวณที่ยอมรับหรือปฏิเสธการทดสอบค่า t-distribution

2.4 การคำนวณค่า p-value

สำหรับการใช้งานโดยการหาค่า T_0 จากหัวข้อการทดสอบค่ากลาง (ง.2.3) และเลือก degree of freedom เท่ากับ $n-1$ แล้วนำค่าเหล่านั้นใส่ลงในโปรแกรมดังภาพที่ ง-11 จะได้ค่า p-value

ภาพที่ ง-11 โปรแกรมคำนวณค่า p-value

2.5 การคำนวณหาค่า standard error

สำหรับการบันทึกผลจากการวัดหลาย ๆ ครั้งสามารถหาค่า standard error ได้จากสมการ

$$\text{standard error} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{ง-16})$$

เมื่อ n = จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หาได้จากสมการ

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{ง-17})$$

ตารางที่ ง-1 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

Parametor	a	b	n	E
35%, 150°C	0.0015425	0.9419801	1.1287751	89.54
	0.0017331	1.0606568	1.0238679	
	0.0010438	0.9859742	1.0638825	
	0.0019178	0.8741334	1.0767976	
	0.0018187	1.0689088	1.1142488	
35%, 165°C	0.019148	1.0381471	1.0282136	85.71
	0.0184935	0.9376832	0.9408845	
	0.0106796	0.91261	1.0047273	
	0.0117567	0.9941774	0.9134919	
	0.0114034	0.9136354	0.8609284	
45%, 150°C	0.002087	0.9659547	1.147574	82.1
	0.0029358	0.9776002	1.071573	
	0.0029004	0.9941529	1.0931062	
	0.0035952	0.9714479	1.1343659	
	0.0030311	1.0269898	1.1119294	

ตารางที่ ง-1 (ต่อ)

Parametor	a	b	n	E
45%, 165°C	0.0154268	0.9850465	1.0892243	108
	0.0182855	0.9990357	0.9702546	
	0.0125989	0.8531861	0.9858308	
	0.0109779	1.0558473	1.0078767	
	0.0196562	1.0685914	0.8492341	
mean	0.0107903	0.8794899	0.9032636	92.575
SD	0.0064222	0.3226818	0.3298268	13.641091
Sdt. Error	0.001436	0.0721538	0.0737515	3.0502408

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นางสาวสุธิดา เหล่าสิงห์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการผลิตเชื้อจากทางใบปาล์มน้ำมัน
 โดยการใช้ค้าง
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี

ประวัติ

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรม
 และอุปกรณ์การแพทย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2547

ผลงานทางวิชาการ Suthida Laosing, Panitnad Chandranupap and Pravitra Chandranupap.
 “The Implementation of Kinetic Model of Oil Palm Frond.” 6th Regional Symposium on
 Membrane Science and Technology 2008, Prince of Songkla University, Patong, Phuket,
 Thailand, August 2008.

สถานที่ติดต่อ เลขที่ 51/2 หมู่ 3 ตำบลสินปุน อำเภอพระแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84210
 e-mail : suthida.laosing@gmail.com