

การควบคุมการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหยของเหลวดำ



นางสาวมัญญา รุดติษฐ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLLING SCALING IN BLACK LIQUOR EVAPORATORS



Miss Mananya Ruddit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวต่ำ

โดย

นางสาวมนัญญา รุดติษฐ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

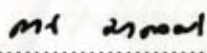
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

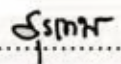
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

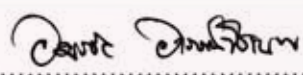
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरองวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรราร มงคลศรี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

ศูนย์วิทยานิพนธ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มณัญญา รุดติษฐ์: การควบคุมการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวดำ.

(CONTROLLING SCALING IN BLACK LIQUOR EVAPORATORS) อ.ที่ปรึกษา

วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. สุรเทพ เขียวหอม, 66 หน้า.

การเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวดำ ทำให้ประสิทธิภาพในการระเหยของเครื่องระเหยลดลง ซึ่งส่งผลให้กำลังการผลิตและประสิทธิภาพการผลิตลดลง ตลอดจนการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นและสูญเสียโอกาสในการผลิตจากการหยุดการทำงานเพื่อทำความสะอาดเครื่องระเหย งานวิจัยนี้ได้หาปัจจัยที่มีผลกระทบและวิธีการควบคุมการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยโดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ และคำนวณหาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ (Critical black liquor solid: critical BLS) นำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดการละลายของของเหลวดำที่เกิดตะกอนจริง ผลจากการศึกษาพบว่าสมการอย่างง่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำกับปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของแข็งของของเหลวดำสามารถทำนายตำแหน่งการเกิดตะกอนได้ จากนั้นได้หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซัลเฟตและแอสเพื่อควบคุมการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวดำ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต มณัญญา รุดติษฐ์
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สุรเทพ
ปีการศึกษา.....2552.....

5170604021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SCALING / BLACK LIQUOR / EVAPORATOR

MANANYA RUDDIT : CONTROLLING SCALING IN BLACK LIQUOR

EVAPORATORS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.SOORATHEP

KHEAWHOM, Ph.D., 66 pp.

Scale formation in black liquor evaporators decrease evaporation efficiency resulting in decreasing of production capacity, production efficiency. Moreover, it also leads to increasing of energy consumption and loss of production opportunity caused by stop production in order to clean the evaporators. This research studies important factors affecting scale formation and the method to control scale formation in black liquor evaporators by analyzing the amount of sodium sulfate (Na_2SO_4), sodium carbonate (Na_2CO_3), and total sodium in black liquor and predicting the critical black liquor solid (critical BLS). The critical BLS obtained is compared with the solubility limits in black liquor. Results from the study shows that the empirical correlation between the critical black liquor solid and the concentrations of sodium sulfate sodium carbonate, and total sodium in black liquor can correctly predict the location where scale formation occurred. The best position to add sodium sesqui-sulfate and ash to controlling scaling in black liquor evaporators is then determined.

Department :Chemical Engineering.....

Student's Signature Mananya Ruddit

Field of Study :Chemical Engineering.....

Advisor's Signature Soorathep Kheawhom

Academic Year : 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมรชัย อภรณ์วิชานพและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.- อุตสาหกรรม สัญญาเลขที่ MRG-WI525E015 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ).....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.2 องค์ประกอบของกระดาษ.....	11
2.3 ประเภทของกระดาษ.....	15
2.4 เครื่องระเหย.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 ศึกษากระบวนการระเหยจากเครื่องระเหยในโรงงาน.....	32
3.2 การเก็บตัวอย่างของเหลวดำที่โรงงาน.....	34
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวดำ.....	36
3.4 หาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ.....	43
3.5 ทำคุณมวลสารย่อยเพื่อหาปริมาณของ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมทั้งหมดในโซเดียมซัลไฟด์และแอส.....	44
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	47

บทที่ หน้า

4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำ.....	47
4.2 เปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำจากการทำนายกับความ เข้มข้น (%dry solid) ของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนในกระบวนการจริง.....	48
4.3 หาดำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซิลเฟตและแอส.....	48
5 สรุปผลการทดลอง.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก	62
ภาคผนวก ข	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำ.....	47
4.2	องค์ประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตจากการดูดมวลสารย่อย.....	48
4.3	องค์ประกอบในของเหลวดำที่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ 1-4 เมื่อเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตจากการดูดมวลสารย่อย.....	49
4.4	องค์ประกอบในของเหลวดำที่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ 5-7 เมื่อไม่เติมโซเดียมซีควิซัลเฟตจากการดูดมวลสารย่อย.....	49
4.5	ช่วงความเข้มข้นของของเหลวดำที่เครื่องระเหยตำแหน่งต่างๆ.....	51
4.6	วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำตัวอย่างที่ 9.....	52
4.7	องค์ประกอบของแอสจากการดูดมวลสารย่อย.....	52
4.8	เปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตกับแอส.....	52
ก-1	ข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นในของเหลวดำ.....	62
ก-2	ข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์ Na_{total}	62
ก-3	ข้อมูลดิบในการหาปริมาณ Na_2SO_4	63
ก-4	ข้อมูลดิบในการหาปริมาณ Na_2CO_3	63
ก-5	ข้อมูลดิบการเผาของของเหลวดำ.....	64

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	การเกิดตะกอนในเครื่องระเหย.....	2
2.1	กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต.....	10
2.2	วงจรรนำสารเคมีกลับคืน.....	11
2.3	เครื่องระเหยท่อยาวแนวราบ.....	17
2.4	เครื่องระเหยท่อยาวแนวตั้ง.....	18
2.5	เครื่องระเหยท่อยาวแนวตั้ง.....	19
2.6	เครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตก.....	20
2.7	เครื่องระเหยชนิดใช้แรงทำให้เกิดการไหลเวียน.....	21
2.8	เครื่องระเหยฟิล์มปั่นป่วน.....	22
2.9	เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว.....	23
2.10	Forward - feed multiple effect evaporator.....	24
2.11	Backward - feed multiple effect evaporator.....	25
2.12	เครื่องระเหยหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน.....	28
3.1	ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.2	เครื่องระเหยแบบหลายตัวต่อกันชนิด Backward ในโรงงาน.....	33
3.3	ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างของเหลวดำ.....	35
3.4	จัดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.5	คุณลักษณะย่อยรอบเครื่องระเหยตำแหน่ง F.....	44
3.6	ขั้นตอนในการคำนวณของของเหลวดำเมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์.....	45
3.7	คุณลักษณะย่อยของตัวอย่างที่ 4 หลังเติมแอส.....	46
3.8	ขั้นตอนในการคำนวณของเหลวดำเมื่อเติมแอส.....	46
4.1	เปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมซัลไฟด์.....	50
4.2	ตำแหน่งการเติมโซเดียมซัลไฟด์และแอสก่อนการปรับปรุง.....	54
4.3	ตำแหน่งการเติมโซเดียมซัลไฟด์และแอสแบบที่ 1.....	55
4.4	ตำแหน่งการเติมโซเดียมซัลไฟด์และแอสแบบที่ 2.....	57

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงบทนำของงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญในการทำงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ) และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต (Kraft process) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษทางเคมี ซึ่งมีการใช้สารเคมีในปริมาณมาก จึงต้องมีการนำสารเคมีจากการต้มเยื่อกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดค่าใช้จ่าย ของเหลวที่ได้จากการต้มเยื่อ เรียกว่าของเหลวดำ หรือน้ำมันยางดำ (Black liquor) ประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ลิควิน สารเคมี ยางไม้ และส่วนประกอบอื่นของเส้นใย โดยสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในของเหลวดำได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ของเหลวดำ จากการต้มเยื่อ จะถูก บ้อน เข้าสู่เครื่องระเหย (Evaporator) เพื่อระเหยน้ำออก เครื่องระเหยที่ใช้ในโรงงานที่ทำการวิจัยนี้เป็นเครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตก (Falling-film-type evaporator) โดยเครื่องระเหย ชนิดนี้เป็นแบบหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน (multi-effect evaporator) ซึ่งทำให้ของเหลวดำที่มีความเข้มข้นประมาณ 17% dry solid หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเจือจาง (Weak black liquor; WBL) มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 75% dry solid หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้น (Heavy black liquor; HBL) ก่อนจะถูกส่งไปเผาที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery boiler) เพื่อเปลี่ยนสารเคมีในของเหลวดำให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการทำของเหลวขาต่อไป

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นที่เครื่องระเหยคือ การเกิดตะกรัน (Scaling) ภายในเครื่องระเหย ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพในการระเหยของเครื่องระเหยลดลง ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิต ประสิทธิภาพการผลิต การใช้พลังงานและ การสูญเสียโอกาสในการผลิตเนื่องจากการหยุดการทำงานเพื่อทำความสะอาดเครื่องระเหย

งานวิจัยนี้ได้หาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและประสิทธิภาพของเครื่องระเหย โดยศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ทำนายพฤติกรรมของการเกิดตะกรันในเครื่องระเหย หาปัจจัยที่มีผลกระทบและวิธีการยับยั้งการเกิดตะกรันในเครื่อง ระเหยและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต (Sodium sesqui-sulfate) และแอส (ash) ในเครื่องระเหย



รูปที่ 1.1 การเกิดตะกรันในเครื่องระเหย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อและวิธีการยับยั้งการเกิดตะกรันในเครื่องระเหย
2. เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสในเครื่องระเหย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อและวิธีการยับยั้งการเกิดตะกรันในเครื่องระเหย โดยพิจารณาจากปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ จากนั้น หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสในเครื่องระเหย

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

1. ศึกษาทฤษฎี กระบวนการผลิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บ ตัวอย่างและข้อมูลของของเหลวดำ จากโรงงานเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดตะกรันในเครื่องระเหย
3. ศึกษาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำนายตำแหน่งในการเกิดตะกรัน และคำนวณหาตำแหน่งในการเกิดตะกรันจากค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ
4. หาวิธีการยับยั้งการเกิดตะกรันในเครื่องระเหย
5. หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสในเครื่องระเหย

6. สรุปผลและจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบและวิธีการยับยั้งการเกิดตะกอนในเครื่องระเหย
2. ทราบตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซิลเฟตและแอสในเครื่องระเหย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้สามารถแบ่งเนื้อหาออกได้เป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการผลิตเยื่อกระดาษ ประเภทของกระดาษและเครื่องระเหยชนิดต่างๆ และส่วนที่สองเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าขีดจำกัดการละลายในของเหลวดำ (Solubility limits in black liquor) และงานวิจัยที่เกี่ยวกับตะกอนและแนวทางในการลดเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวดำ

2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอน [1] คือ

1. ขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)
2. ขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping)

2.1.1 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)

การจัดเตรียมวัตถุดิบมีจุดประสงค์เพื่อเตรียมวัตถุดิบให้มีความเหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในการผลิตเยื่อในขั้นตอนต่อไป โดยในขั้นตอนนี้จะทำการแปรรูปไม้ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเยื่อ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การลอกเปลือก (Debarking)

เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากเปลือกไม้เป็นส่วนที่ไม่มีประโยชน์ต่อการผลิตเยื่อกระดาษและยังส่งผลเสียต่อการผลิตเยื่อกระดาษอีกด้วย เปลือกไม้เป็นส่วนที่มีเส้นใยน้อยและมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนมาก หากลอกเปลือก ไม้จะไม่หมดและเปลือก ไม้ถูกป้อนเข้าไปในกระบวนการผลิตอื่นเช่น ในการต้มเยื่อจะ ส่งผลให้ สิ้นเปลืองสารเคมีและไอน้ำมาก ขณะที่ได้ผลตอบแทนไม่คุ้มค่า รวมทั้งยังได้เยื่อกระดาษที่มีคุณภาพต่ำ

การสับชิ้นไม้ (Chipping)

หลังจากลอกเปลือกแล้ว ไม้ท่อนจะถูกสับให้มีขนาดเล็กลงเพื่อความเหมาะสมในการต้มเยื่อ ไม้ท่อนเมื่อผ่านเครื่องสับไม้แล้ว จะได้ชิ้นไม้สับ (Chip) ซึ่งขนาดชิ้นไม้สับมีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อ ขนาดของชิ้นไม้ควรมีความสม่ำเสมอ โดยความยาวและความหนามีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความกว้าง โดยควรมีความยาวและความกว้างประมาณ 20-30 มิลลิเมตร ความหนาประมาณ 6-10 มิลลิเมตร จากนั้นชิ้นไม้สับจะถูกส่งโดยสายพานลำเลียงมากองไว้บนลานกลางแจ้ง โดยจะกองเป็นวงกลมหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การคัดขนาด (Screening)

ชิ้นไม้สับทั้งหมดจะถูกคัดขนาดโดยเครื่องคัดขนาด โดยแยกชิ้นไม้ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ออก และนำกลับไปสับอีกครั้งเพื่อให้มีขนาดเล็กลง เส้นไม้และฝุ่นจะถูกคัดแยกออกแล้วส่งไป รวมกับเปลือกไม้เพื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) สำหรับชิ้นไม้ที่ได้ขนาดแล้วจะ ถูกส่งไปที่หม้อต้มเยื่อต่อไป

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping)

หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบแล้ว จะนำชิ้นไม้สับมาผ่านขั้นตอนการย่อยเยื่อ เพื่อแยกเส้นใยภายในเนื้อไม้ออกมา ซึ่งกระบวนการผลิตเยื่อโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. กระบวนการเชิงกล (Mechanical pulping process)
2. กระบวนการกึ่งเคมี (Semi-chemical pulping process)
3. กระบวนการเคมี (Chemical pulping process)

โดยในที่นี้จะกล่าวถึง เฉพาะกระบวนการเคมี เพราะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับวิทยุวิจัยใน งานวิจัยนี้

กระบวนการเคมี (Chemical pulping process)

กระบวนการทางเคมีเป็นกรรมวิธีการผลิตเยื่อที่ใช้สารเคมีละลายสารในเนื้อไม้ที่เป็นตัวยึด เส้นใยกับเส้นใยที่จับตัวกันไว้ออกมา โดยการนำวัตถุดิบมาต้มกับสารเคมีความเข้มข้นสูงในหม้อ ต้มเยื่อ (Digester) เยื่อที่ได้จากกระบวนการจะมีปริมาณเซลลูโลสสูง มีลิกนินและสารอินทรีย์อื่นๆ ปนอยู่น้อยมาก มีความเหนียวสูง ใช้ผลิตกระดาษที่มีคุณภาพดี กระบวนการนี้แบ่งตามประเภท สารเคมีที่ใช้ได้ดังนี้

1. กระบวนการโซดา (Soda process)

เป็นกระบวนการที่ใช้โซดาไฟ (NaOH) เป็นน้ำยาต้มเยื่อ เยื่อที่ได้ส่วนใหญ่ใช้ทำ กระดาษพิมพ์เขียน นอกจากนั้นยังใช้ผลิตชนิดพิเศษเช่น กระดาษสา

2. กระบวนการซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulfate or Kraft process)

การผลิตเยื่อกระดาษโดยกระบวนการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1 ชิ้นไม้จะถูกต้มด้วยน้ำยาต้มเยื่อ ที่เรียกว่า ของเหลวขาว (White liquor) ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียม ซัลไฟด์ (Na_2S) แต่เรียกว่ากระบวนการซัลเฟตเพราะใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็น Make up chemical ในการทำน้ำยาสารเคมีกลับคืน เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษห่อ ของกระดาษเหนียว (Kraft paper) กระดาษผิวกล่อง (Kraft linerboard) นอกจากนี้เยื่อที่นำไป

ฟอกขาวแล้ว ใช้ทำกระดาษได้หลายชนิดตั้งแต่กระดาษพิมพ์เขียนจนถึงกระดาษอนามัย (sanitary paper) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับโจทย์วิจัยในงานวิจัยนี้ สำหรับขั้นตอนการผลิตเยื่อโดยใช้กระบวนการทางเคมี โดยทั่วไปจะเริ่มจากการนำวัตถุดิบจากหน่วยเตรียมวัตถุดิบเข้าสู่หม้อต้มเยื่อ หม้อต้มเยื่อมีทั้งแบบชนิดที่เป็นกะ (Batch) และชนิดที่เป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous) หม้อต้มแบบกะมีการลงทุนที่ต่ำกว่า โดยการผลิตแบบกะนั้น ชี้นไม้ ของเหลวขาวและของเหลวดำเจือจางจะถูกป้อนเข้าไปในหม้อต้มและต้มให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิระหว่าง $55 - 175^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง ส่วนหม้อต้มแบบต่อเนื่องนั้นจะมีการลงทุนที่สูงกว่า โดยชี้นไม้จะเข้าและออกจากหม้อต้มอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อได้เปรียบว่าการต้มแบบกะคือ ระบบต่อเนื่องจะทำการควบคุมได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ผลผลิตสูงกว่าและใช้สารเคมีน้อยกว่า นอกจากนี้ยังใช้แรงงานน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูงกว่า

กระบวนการต้มเยื่อมีจุดประสงค์ เพื่อละลายลิกนินออกจากเส้นใย แต่ถ้าหากลิกนินละลายออกมามาก ร้อยละผลได้ (Yield) จะต่ำ เพราะไม่ได้มีแต่ลิกนินเท่านั้นที่ถูกแยกออกมา เมื่อต้มเยื่อนานเกินไป ร้อยละผลได้จะลดลงอย่างรวดเร็ว และความแข็งแรงของเยื่อก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบระดับของการต้มเยื่อ โดยการตรวจวัดปริมาณสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งเรียกว่าค่า Kappa number

การคัดขนาด (Screening)

หลังจากผ่านขั้นตอนการผลิตเยื่อแล้ว เยื่อที่ได้จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการคัดขนาดเพื่อแยกเอาสิ่งแปลกปลอมออกจากเยื่อ สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ได้แก่ ตาไม้ (Knot), ชี้นไม้ดิบที่ผ่านการต้มไม่สมบูรณ์, เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดขนาด ได้แก่ เครื่องแยกตาไม้ (Disc Knotter) ตะแกรงหยาบ (Vibrating Knotter Screen) เครื่องร่อนแยกเยื่อ (Delta Screen), Pressure Screen และเซนตริคคีนเนอร์ (Centricleaner)

การล้างเยื่อ (Washing)

เมื่อผ่านการคัดขนาดแล้วจะต้องนำเยื่อที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการล้างซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย ในขั้นตอนนี้ของเหลวจากการต้มเยื่อจะถูกล้างแยกออกจากเยื่อ ของเหลวนั้นประกอบด้วย สารเคมี ลิกนินและส่วนประกอบอื่นของเส้นใย ของเหลวที่ได้นี้เรียกว่า ของเหลวดำ (Black Liquor) ซึ่งจุดประสงค์ในการล้างเยื่อคือ ล้างของเหลวดำออกจากเยื่อ ลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนการผลิตถัดไปและนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการต้มเยื่ออีกครั้ง

การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O₂ delignification)

ในการผลิตเยื่อเคมีซึ่งใช้ยูคาลิปตัสหรือไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบ เมื่อเยื่อผ่านขั้นตอนการล้างแล้ว เยื่อจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O₂-delignification) ซึ่งจะเป็นการฟอกเยื่อขั้นตอนแรกโดยใช้ออกซิเจน (O₂) ทำปฏิกิริยากับลิกนินให้ลิกนินหลุดออกจากเยื่อเพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ค่า Kappa Number ลดลง ค่า Kappa Number ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการต้มและการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน มีค่าประมาณ 25-28 และหลังจากทำปฏิกิริยาในถังปฏิกิริยาที่เติมออกซิเจนแล้วจะได้เยื่อที่มีค่า Kappa Number ประมาณ 10-12 ซึ่งหมายความว่า ปริมาณลิกนินจะเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณที่ได้จากการต้ม ทำให้การใช้สารเคมีในขั้นตอนการฟอกลดน้อยลง รวมทั้งลดปริมาณน้ำเสียจากการฟอกเยื่อด้วยสารเคมี

การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยานี้ประมาณ 20 กิโลกรัมออกซิเจนต่อตันเยื่อที่ผลิต (หรือประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) การฟอกเกิดจากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไปสกัดลิกนินในเยื่อ โดยมีไอน้ำเพื่อรักษาอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ระหว่าง 90-110°C ระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ประมาณ 20-60 นาที เยื่อที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้ว จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องล้าง โดยปกติภายหลังจากการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนแล้ว จะทำการล้าง 1-2 ครั้ง แล้วส่งไปเก็บในถังเก็บเยื่อความเข้มข้นปานกลางถึงสูง (High Density Towers) ก่อนส่งเข้าหน่วยฟอกขาวสำหรับการผลิตเยื่อฟอก

การฟอกเยื่อ (Bleaching)

ขั้นตอนการฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาว (Brightness) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตกระดาษบางชนิดเช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษทิชชู กระดาษสา กระบวนการฟอกเยื่อยังแบ่งเป็นแบบหลายขั้นตอนและขั้นตอนเดียว ทั้งนี้ขึ้นกับความขาวของเยื่อที่ต้องการ เช่น กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษทิชชูต้องการความขาวของเยื่อมากจะใช้วิธีการฟอกหลายขั้นตอน ส่วนกระดาษสาความขาวของเยื่อที่ต้องการเพื่อให้สามารถย้อมสีได้เท่านั้น จึงใช้การฟอกแบบขั้นตอนเดียว สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อมีหลายชนิดได้แก่ ไฮโปคลอไรท์ คลอรีนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

หน่วยทำความสะอาดเยื่อหลังการฟอก (Bleached Stock screening)

เยื่อที่ฟอกแล้วจะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ทำความสะอาดเยื่อก่อนเข้าสู่ขั้นตอนทำแผ่นเยื่อเพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรก (Dirt Material) ปะปนไปกับผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ เซนติคัลลินเนอร์

ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheet Forming) และอบแห้ง (Drying)

เยื่อที่ได้จากหน่วยทำความสะอาดหลังการฟอกจะเข้าสู่เครื่องเดินแผ่น (Sheet forming machines) โรงงานที่ผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่จะมีระบบน้ำวงจรปิด (closed water system) ซึ่งจะนำน้ำได้ลวดเดินแผ่นวนกลับเข้าไปเจือจางเยื่อที่เฮดบ็อกซ์ (Head box) และน้ำล้นส่วนที่เหลือ (Overflow) จะนำกลับเข้าไปใช้ในขั้นตอนการล้างเยื่อและเมื่อเยื่อผ่านกระบวนการเดินแผ่นแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เพื่อให้เหลือความชื้นประมาณ 10% ก่อนส่งขายลูกค้า โดยเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 18 ชั่วโมง

ระบบการนำสารเคมีกลับคืน (Chemical Recovery)

ระบบการนำสารเคมีกลับคืนจะมีเฉพาะสำหรับการผลิตเยื่อเคมี เนื่องจากการผลิตเยื่อเคมีจะใช้สารเคมีในปริมาณมาก ถ้าหากไม่มีการนำสารเคมีกลับมาใช้อีก จะทำให้เยื่อกระดาษมีราคาสูงขึ้น เนื่องจากสารเคมีมีราคาแพง อีกทั้งยังทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการนำสารเคมีกลับคืนคือ เพื่อนำสารเคมีจากการต้มเยื่อกลับมาใช้ใหม่ และการนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สารอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ ระบบนำสารเคมีกลับคืนประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ หน่วยทำระเหย (Evaporation Plant) หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery Boiler) และหน่วยทำด่างและเตาเผาปูน (Causticizing Plant & Lime Kiln) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

หน่วยทำระเหย (Evaporation Plant)

หน่วยทำระเหยมีหน้าที่ระเหยน้ำออกจากของเหลวดำเจือจางให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้น ก่อนที่จะส่งไปเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำสารเคมีกลับคืน ของเหลวดำเจือจางที่เกิดจากการล้างเยื่อที่ผ่านการต้มแล้ว มีความเข้มข้นประมาณ 15-20% dry solid จะถูกส่งเข้าเครื่องทำระเหย โดยเครื่องทำระเหยจะมีหลายตัวต่อเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำและภายในเครื่องจะมีสภาพเป็นสุญญากาศเพื่อให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ เครื่องทำระเหยทุกเครื่องจะใช้ไอน้ำความดันต่ำเป็นตัวให้ความร้อน โดยเมื่อน้ำระเหยออกจากของเหลวดำจะมีพลังงานความร้อนอยู่ในไอน้ำนั้น ซึ่งสามารถส่งไประเหยน้ำจากของเหลวดำในเครื่องระเหยตัวต่อไป เพื่อประหยัดไอน้ำและพลังงานโดยของเหลวดำที่ได้จากหน่วยทำระเหยจะมีความเข้มข้นประมาณ 65-70% dry solid

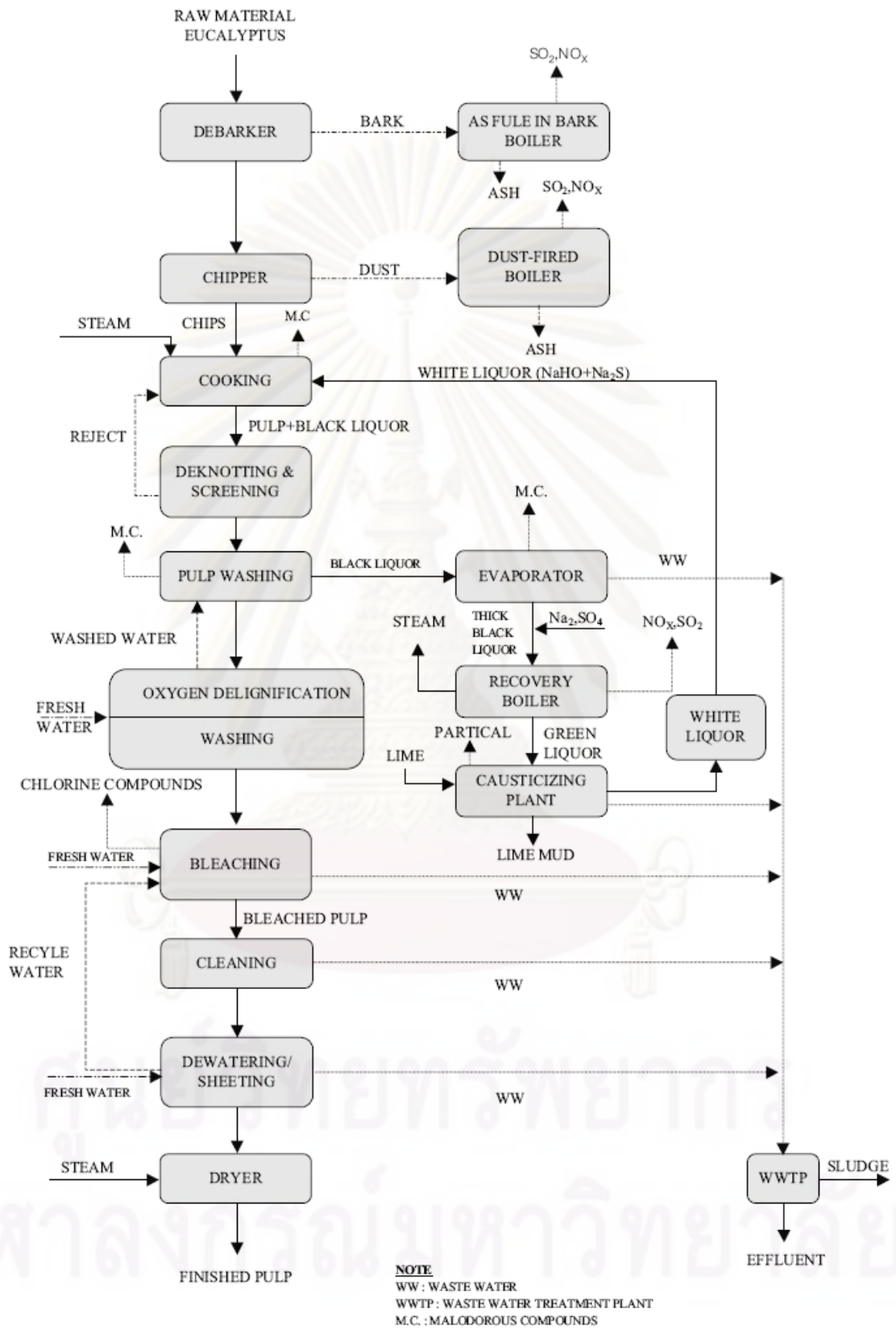
หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery Boiler)

หน้าที่ของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน คือ การเผาของเหลวดำที่ส่งมาจากหน่วยทำระเหย เพื่อให้สารเคมีในของเหลวดำเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการทำของเหลวขาว ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ให้เป็นพลังงานความร้อนและนำความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อนำไอน้ำไป

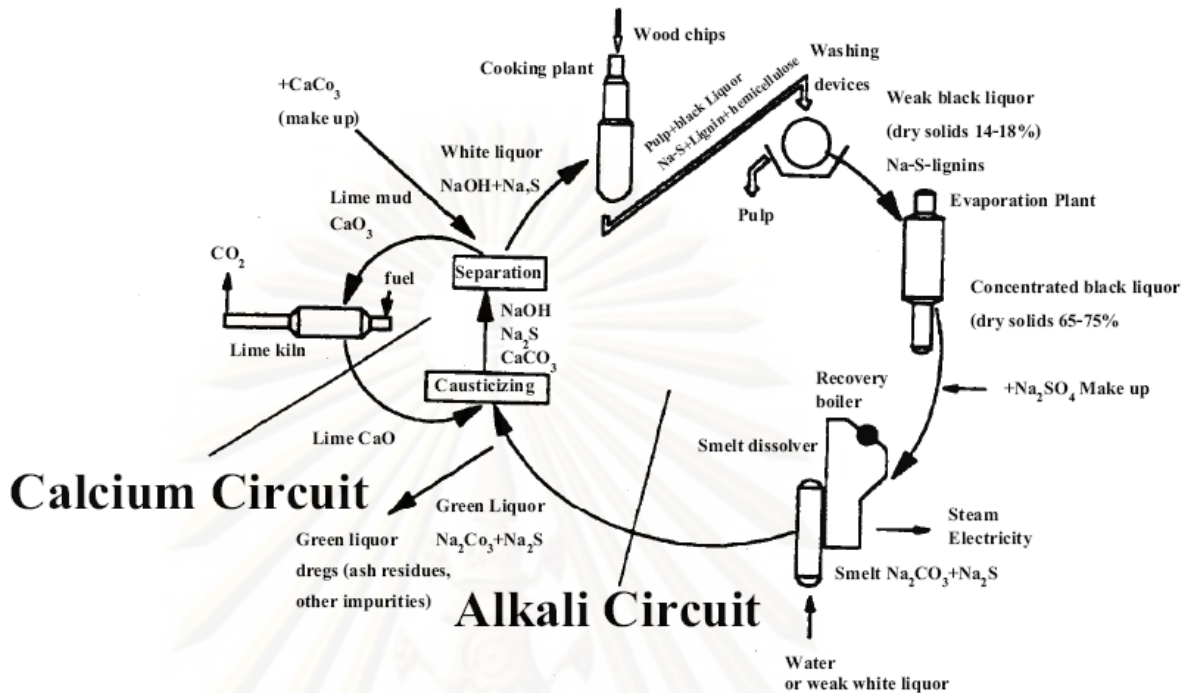
ใช้ ส่วนสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์โซเดียมจะเปลี่ยนเป็นของแข็งหลอมเหลว (Smelt) ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ของแข็งหลอมเหลวจะถูกระบายออกจากทางด้านล่างของเตาลงมาที่ถังทำละลาย (Dissolving tank) ภายในถังทำละลายจะมีน้ำที่มาจาก 3 ส่วน คือ น้ำเจือจางจากหน่วยทำต่าง น้ำที่ได้จากการล้างโคลนปูน (lime mud) และน้ำจากการล้างกากของเหลวเขียว (dreg) เมื่อของแข็งหลอมเหลวผสมกับของเหลวในถังทำละลายจะถูกเปลี่ยนเป็นของเหลวเขียว (green liquor) และของเหลวเขียวที่เกิดขึ้นจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยทำต่างต่อไป เนื่องจากในการเผาไหม้จะเกิดอนุภาคฝุ่นและควัน (Ash) ดังนั้นที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืนจึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ

หน่วยทำต่างและเตาเผาปูน (Causticizing plant & Lime Kiln)

หน่วยทำต่างมีหน้าที่ผลิตของเหลวขาวจากของเหลวเขียวโดยการเติมปูนขาวและผลิตปูนขาวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ของเหลวเขียวจากหม้อไอน้ำนำสารกลับคืนจะถูกนำมาแยกเอาสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายน้ำออกที่ถัง Green liquor clarifier จากนั้นส่วนที่เป็นของเหลวเขียวจะถูกส่งต่อไปผสมกับปูนขาวที่ Slaker เกิดเป็นของเหลวขาว ซึ่งก่อนที่จะส่งของเหลวขาวไปยังหม้อต้มเยื่อจะต้องทำการแยกโคลนปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตออกก่อน ส่วนวิธีการที่ใช้แยกโคลนปูนนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบการตกตะกอนและการกรอง หลังจากนั้นจึงล้างโคลนปูนและกำจัดน้ำออกแล้วส่งไปเผาที่เตาเผาปูน (Lime Kiln) เพื่อผลิตปูนขาวกลับมาใช้ที่ Slaker อีกครั้ง อุณหภูมิในเตาเผาปูนอยู่ในช่วง $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต [1]



รูปที่ 2.2 วงจรนำสารเคมีกลับคืน [1]

2.2 องค์ประกอบของกระดาษ [2]

กระดาษเป็นแผ่นวัสดุซึ่งได้จากการนำวัสดุหลายๆ ชนิดมาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปทำเป็นแผ่น วัสดุที่ใช้ในการผสมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous material) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ ในกระดาษโดยทั่วไปจะมีส่วนของเส้นใยผสมอยู่ในปริมาณ 70-95% ของน้ำหนักกระดาษประมาณ ส่วนของเส้นใยจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ต้องการผลิต ส่วนของเส้นใยนี้จะได้จากพืชชนิดต่างๆ เช่น ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็งและพืชล้มลุก ส่วนของเส้นใยหรือที่เรียกว่า เยื่อ ที่ใช้ทำกระดาษส่วนมากจะเป็นเยื่อผสมของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น

เยื่อใยยาวได้จากไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ขึ้นบริเวณที่สูง อากาศเย็น โตช้า ใบมีลักษณะแคบเรียวยาว (needle) เส้นใยมีลักษณะหยาบ มีความแข็งแรงสูง มีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 20-40 ไมครอน (1 ไมครอนเท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร) ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่สน (Pine) และสปรูซ (Spruce) เป็นต้น

เยื่อใยสั้นได้จากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ซึ่งเป็นไม้ที่ขึ้นในบริเวณเขตร้อน โตเร็ว ใบมีลักษณะกว้าง เส้นใยมีลักษณะเล็กละเอียดและความแข็งแรงต่ำ มีความยาวประมาณ 1

มิลลิเมตร กว้างประมาณ 10-20 ไมครอน ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) กระถิน เทพา (Acacia) เบิร์ช (Birch) และแอสเพน (Aspen) เป็นต้น

ส่วนที่ไม่ใช้เส้นใย เป็นสารเติมแต่งที่ใช้เติมผสมลงไปในส่วนของเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.2.1 องค์ประกอบหลักของกระดาษที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษของโรงงาน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเส้นใยและส่วนที่ไม่ใช้เส้นใย

1. ส่วนที่เป็นเส้นใย

1.1 เยื่อใยสั้นเคมีฟอก (Leaf Bleached Kraft Pulp; LBKP) เยื่อเส้นใยสั้นผลิตจากไม้เนื้อแข็งเมืองร้อน เช่น ที่โรงงานผลิตเยื่อจากไม้ยูคาลิปตัสมีความยาวประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร คุณสมบัติเด่นของเยื่อใยสั้นคือ ช่วยให้เนื้อกระดาษแน่นสม่ำเสมอ เรียบและมีความทึบแสงดี เนื่องจากเยื่อใยสั้นมีขนาดเล็ก สามารถแทรกตัวตามร่องช่องว่างของเยื่อใยยาวได้ แต่มีข้อเสียคือ ไม่สร้างความแข็งแรงให้กับกระดาษ ทำให้กระดาษขาดง่าย

1.2 เยื่อใยยาวเคมีฟอก (Needle Bleached Kraft Pulp; NBKP) เยื่อเส้นใยยาวเป็นเยื่อที่ผลิตจากไม้อ่อนจำพวกสน โรงงานผลิตกระดาษในประเทศไทยไม่มีการผลิตเนื้อเยื่อใยยาว จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศเส้นใยยาวมีความยาวประมาณ 3-3.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีความสามารถในการยึดเกี่ยวกันสูง ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงดีขึ้น ทนต่อแรงดึง แรงฉีกขาด ทำให้การเดินเครื่องดีขึ้น แต่ถ้าใส่ส่วนผสมในเนื้อกระดาษมากจะเกิดทำให้การก่อตัว (Formation) ของกระดาษไม่ดี เกิดการรวมตะกอน (Flocculation) คือ เกิดกระหรือจุดของเส้นใยโดยเยื่อจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะเกิดเมื่อการกระจายตัวของเยื่อไม่ดี เมื่อมองทะลุแผ่นกระดาษผ่านแสงจะเห็นเหมือนก้อนเมฆเป็นหย่อมๆ ในเนื้อกระดาษเป็นจำนวนมากและทำให้ผิวกระดาษไม่เรียบ นอกจากนี้ยังมีเศษกระดาษหมุนเวียน (Broke) จากส่วนต่างๆ ของสายการผลิตรวมทั้ง Recovered fiber ด้วย

2. ส่วนที่ไม่ใช้เส้นใย ส่วนมากเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษซึ่งมีหลายชนิดที่โรงงานใช้และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สารเคมีเหล่านี้เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.1 ตัวเติม (filler) สารเติมแต่งชนิดนี้จะเป็นผงแร่สีขาว ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนศาสตร์ (แสง) และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ นอกจากนี้ยังใส่ลงไปเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตกระดาษอีกด้วย เพราะตัวเติมส่วนมากจะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใย ผงแร่ที่ใช้เป็นตัวเติมลงในกระดาษจะต้องมีขนาดเล็กละเอียด ตัวเติมที่ดีควรมีขนาดประมาณ

1-10 ไมครอน ผงแร่ที่มีขนาดเล็กนี้เมื่อเติมลงไปจะช่วยเพิ่มเนื้อที่ผิวภายในกระดาษ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างผงแร่กับอากาศและผงแร่กับเส้นใย ทำให้เพิ่มค่าการกระเจิงแสง (light scattering) ของกระดาษ ทำให้กระดาษมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นและเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยมาก เมื่อใส่ลงไปจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น ผงแร่ที่ใช้เป็นตัวเติมในกระดาษได้แก่ ดินขาว (kaolin clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ผงแร่เมื่อใส่ลงไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของกระดาษให้ดีขึ้นดังนี้คือ ทำให้ผิวกระดาษเรียบขึ้น เพิ่มความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ ทำให้กระดาษมีการดูดซับหมึกได้ดีขึ้นและลดต้นทุนการผลิตกระดาษ แต่การเติมผงแร่ลงไปก็มีส่วนลดสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษลงด้วย ผงแร่แต่ละชนิดมีลักษณะรูปร่าง ขนาดและดัชนีการหักเหของแสงต่างกัน สำหรับตัวเติมที่ทางโรงงานใช้คือ PCC (Precipitated CaCO_3) เป็นหินปูนจากธรรมชาติสังเคราะห์

2.2 สารต้านการซึมน้ำ (sizing-agent) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการต้านทานการซึมน้ำของกระดาษ ทำให้กระดาษต้านทานการเปียกน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากกระดาษทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง กระดาษที่ไม่ได้ใส่สารต้านการซึมน้ำจึงเปียกน้ำและดูดซับน้ำได้ง่ายเช่น กระดาษชำระและกระดาษซับ (blotting paper) การเติมสารต้านการซึมน้ำลงไปจะช่วยลดพื้นที่ผิวของการตั้งดูระหว่างเส้นใยและโมเลกุลของน้ำทำให้ลดอัตราการซึมน้ำเข้าสู่เนื้อกระดาษ เมื่อกระดาษโดนน้ำจะไม่เปียกหรือซับน้ำในทันทีทันใด การเติมสารต้านการซึมน้ำแบ่งเป็น 3 ระดับ มีชื่อเรียกกระดาษที่เติมสารต้านการซึมน้ำแต่ละระดับ ดังนี้

กระดาษที่ไม่ใส่สารต้านการซึมน้ำเลย (water-leaf) เช่น กระดาษชำระ

กระดาษที่ใส่สารต้านการซึมน้ำเล็กน้อย มีระดับการซึมน้ำปานกลาง (slack-sized) เช่น กระดาษพิมพ์และเขียน

กระดาษที่ใส่สารต้านการซึมน้ำในปริมาณสูงมาก มีระดับต้านการซึมน้ำสูง (hardsized) เช่น กระดาษทำถ้วย กระดาษทำกล่องนม สารต้านการซึมน้ำที่ใช้ในการทำกระดาษได้แก่ สารส้มและชันสน (alum/rosin size) ไขผึ้ง (wax) ยางมะตอย (asphalt) และอัลคิลคีทีนไดเมออร์ (alkyl ketene dimmer, AKD) ซึ่งที่โรงงานใช้อัลคิลคีทีนิกแอนไฮไดรด์ (alkenyl succinic anhydride, ASA)

2.3 สารเพิ่มความเหนียว สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ โดยเฉพาะความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุ นอกจากนี้ยังช่วยลดการหลุดลอกของเส้นใยที่ผิวกระดาษและเพิ่มพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของกระดาษแข็ง ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากเพราะถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำจะทำให้เกิดการ

แยกชั้นของกระดาษแข็งในระหว่างการพิมพ์ได้ สารเพิ่มความเหนียวที่ใช้ได้แก่ แป้งธรรมชาติ (native starch) แป้งปรุงแต่ง (modified starch) แป้งเป็นสารเพิ่มความเหนียวที่รู้จักกันดีและมีใช้มานานแล้ว แต่ในปัจจุบันนิยมใช้แป้งประจุบวกและพอลิอะคริลเอไมด์มากกว่า เนื่องจากสารเหล่านี้มีประจุบวกจึงสามารถจับกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบได้ดี ทำให้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สำหรับที่โรงงานใช้ wet-end starch และ size-press starch โดย wet-end starch นี้จะมีประจุบวกมาก เติมลงใน mixing chest เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษส่วน size-press starch มีประจุบวกลดกว่า เป็นแป้งแปรรูปที่ใช้เคลือบผิวกระดาษ เพื่อปรับปรุงให้ผิวกระดาษมีความเรียบเพิ่มขึ้น (smoothness) มีความมันวาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (glossiness) เพิ่มความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษ (surface strength) เพิ่มความคงตัวของกระดาษ (stiffness) ลดฝุ่นละอองบนผิวกระดาษ (dusting) และมีความต้านทานการขีมน้ำเพิ่มมากขึ้น

2.4 สารฟอกขาว (optical brightening agent: OBA) หรือสารเพิ่มความขาวสว่าง สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารสีย้อมประเภทเรืองแสง (fluorescent dye) เมื่อเติมลงไปจะช่วยทำให้กระดาษมีความขาวสว่าง (brightness) เพิ่มมากขึ้นโดยปกติจะเติมที่ machine chest หรือหน้า fan pump

2.5 สารสีย้อม (dyes) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปเพื่อรักษาโทนสีของกระดาษให้คงที่และชดเชยกับสีของลิกนินซึ่งมีสีเหลือง โดยปกติถ้ากระดาษสัมผัสกับความร้อนหรือแสงอาทิตย์ ลิกนินที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อกระดาษจะส่งสีของตัวเองออกมา ทำให้กระดาษมีสีเหลือง สารสีย้อมยังใช้แต่งสีกระดาษขาวให้ได้ระดับคล้ำสีที่ต้องการหรือเพื่อให้ดูขาวขึ้น ซึ่งเรียกว่าสีแต่ง (tinting dye) โดยใช้สีแต่งในปริมาณน้อย ๆ เติมในส่วนผสมของน้ำเยื่อ สีที่ใช้แต่งนี้อาจเป็นสีอะไรก็ได้ แต่ในกระดาษขาวจะใช้สีม่วงหรือสีน้ำเงิน

2.6 สารควบคุมจุลชีวะ (microbiological control agent หรือ biocide) เป็นสารที่ช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีวะจำพวกเชื้อราหรือแบคทีเรียในระบบ เพื่อป้องกันการเกิดเมือกจุลินทรีย์ (filler) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระดาษสกปรกและทำให้กระดาษขาดในระหว่างการผลิตได้ง่าย

2.7 สารเพิ่มการตกค้าง (retention aid) เป็นสารเคมีที่ช่วยให้เยื่อและตัวเติม (Filler) จับตัวกันและคงอยู่ในเนื้อกระดาษให้มากที่สุดในช่วงการระบายน้ำบนตะแกรงลวดเดินแผ่น ซึ่งสารเคมีประเภทนี้จะทำหน้าที่คล้ายกาวยึดเหนี่ยวทั้งเยื่อและอนุภาคเล็กๆของตัวเติมเข้าด้วยกัน สารเพิ่มการตกค้างที่โรงงานใช้มี 2 ชนิดคือ Cationic polymer และ Anionic clay

2.3 ประเภทของกระดาษ [3]

ผลิตภัณฑ์กระดาษของโรงงานที่ร่วมทำวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้

2.3.1 กระดาษชนิดไม่เคลือบผิวหรือกระดาษปอนด์ (Uncoated paper) เป็นกระดาษที่ใช้ในกิจการพิมพ์หรือเขียนซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 4 เกรดคือ

Print: กระดาษปอนด์สำหรับงานพิมพ์คุณภาพสูงเช่น สิ่งพิมพ์ธุรกิจหรือหนังสือแบบเรียน นิตยสารทั่วไปและงานพิมพ์อื่น ๆ

แกรมที่ผลิต: 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 120

ข้อดี : ผิวกระดาษเรียบ ขาวและทึบแสงกว่ารายอื่น ๆ พิมพ์แล้วให้ภาพที่ชัดเจน ค่าความเปรียบต่าง (contrast) สูงและปริมาณการใช้หมึกพิมพ์ต่ำกว่ารายอื่น

Note: กระดาษปอนด์สำหรับงานเขียนและสมุดประเภทต่าง ๆ

แกรมที่ผลิต: 55, 60

ข้อดี : มีความทนต่อการซีมน้ำและหมึกสูงกว่ากระดาษทั่วไป เหมาะสำหรับการใช้ปากกาหมึกซึมหรือ rotting เขียนไม่มีการแตกพร่าของเส้นหมึก

Comp: กระดาษปอนด์เพื่อใช้เฉพาะงานกระดาษคอมพิวเตอร์ต่อเนื่อง เหมาะสำหรับเทคโนโลยียุคใหม่

แกรมที่ผลิต: 50, 60, 100

ข้อดี : เส้นใยมีการเรียงตัวสม่ำเสมอทำให้การป้อนแนวพับทำได้ง่าย พับลงกล่องได้ดีไม่เอียงและทนต่อแรงดึงของเครื่องพิมพ์ได้สูง

Copy: กระดาษปอนด์สำหรับงานเครื่องโทรสาร ถ่ายเอกสารและเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์

แกรมที่ผลิต : 70, 80

ข้อดี : กระดาษลื่นไม่ติดกัน ไม่มีไฟฟ้าสถิตและไม่ยับขณะถ่ายเอกสาร เมื่อถ่ายเอกสารแล้วกระดาษไม่งอเนื่องจากกระดาษมีความชื้นต่ำและกระดาษมีความทึบแสงทำให้สามารถถ่ายเอกสารได้สองหน้า โดยมีกำลังการผลิต 217,200 ตันต่อปี กระดาษที่ผลิตได้จะแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ แบบม้วน (Roll) และแบบแผ่น (Sheet)

2.3.2 กระดาษชนิดเคลือบผิวหรือกระดาษอาร์ต (Coated paper) เป็นกระดาษที่เคลือบด้วยสารสีขาวแบบสองหน้าแล้วนำไปผ่าน Supercalender เพื่อให้กระดาษเรียบและมันเรียกว่ากระดาษอาร์ตมัน (Gloss paper) แต่ถ้าเคลือบผิวกระดาษอย่างเดียวโดยไม่นำไปขัดผิวจะเรียกว่า

กระดาษอาร์ตด้าน (Matt paper) มีกำลังการผลิตจริงปีละ 121,000 ตัน โดยจะอยู่ในลักษณะแบบม้วนและแบบแผ่น ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 เกรดคือ

Gloss: กระดาษอาร์ตมันสองหน้า สำหรับงานพิมพ์ที่ต้องการความมันวาวและเน้นความสวยงามเป็นพิเศษ

แกรมที่ผลิต : 90,100,115,130,150,160

Matt: กระดาษอาร์ตด้านสองหน้า สำหรับงานพิมพ์ที่ต้องการความละเอียดอ่อนของภาพ

แกรมที่ผลิต : 90,100,115,130,150,160

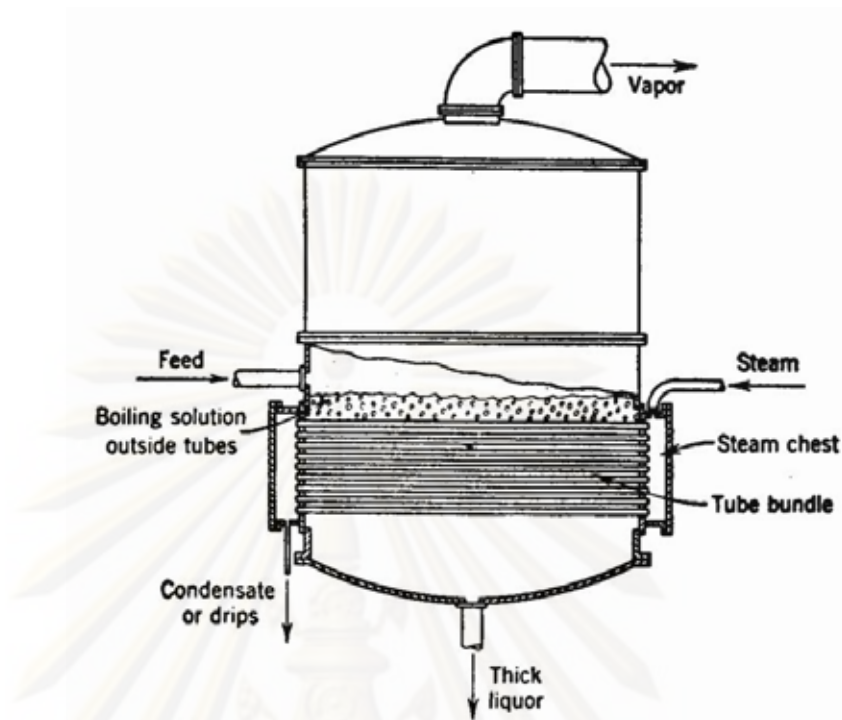
2.4 เครื่องระเหย (Evaporator) [4]

2.4.1 ประเภทของเครื่องระเหย

ในการระเหย ความร้อนจะถูกเพิ่มเข้าไปในสารละลายเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นน้ำ โดยไอน้ำเป็นตัวในการให้ความร้อน

1. **กาต้มน้ำ (Open kettle or pan)** กาต้มน้ำเป็นเครื่องระเหยที่ง่ายที่สุด ความร้อนที่ใช้ในการระเหยได้จาก jacket หรือชุดลวดที่จุ่มในของเหลว กาต้มน้ำบางประเภทจะได้รับความร้อนจากไฟโดยตรง ซึ่งจะมีราคาถูกและง่ายต่อการใช้งาน แต่ให้พลังงานความร้อนต่ำ ในบางกรณีจะใช้ใบพัด (paddles) กวนด้วย

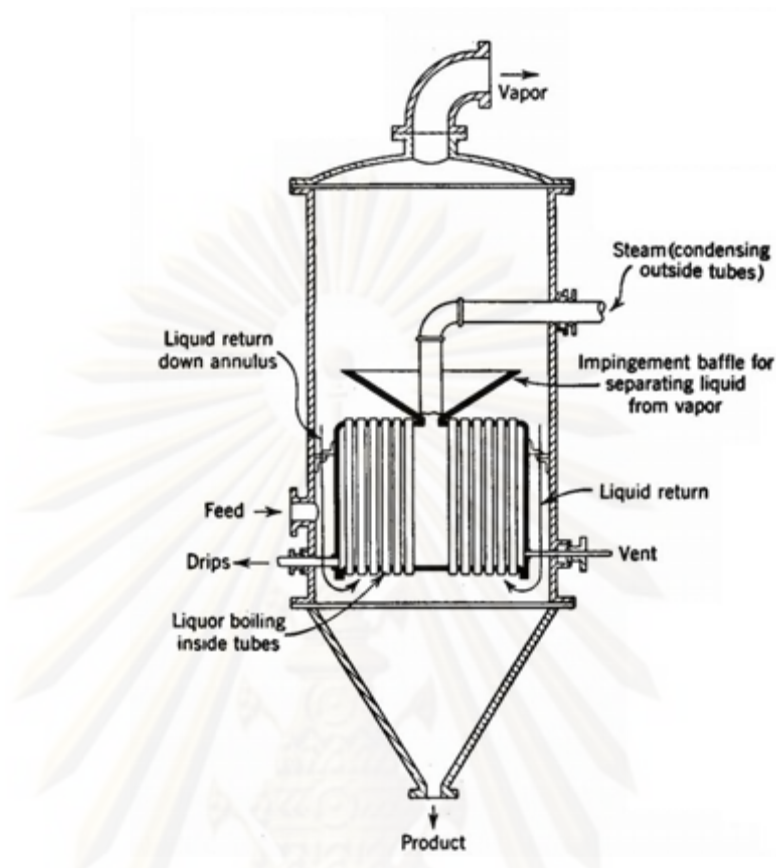
2. **เครื่องระเหยท่อยาวแนวราบ (Horizontal-tube natural circulation evaporator)** ประกอบด้วยกลุ่มท่อทรงกระบอกที่วางตัวในแนวราบคล้ายกับกลุ่มท่อที่อยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งด้านล่างของเครื่องระเหยภายในท่อเป็นไอน้ำที่ควบแน่น ในขณะที่สารละลายที่ต้องการระเหยจะอยู่นอกกลุ่มท่อ ไอรระเหยจะออกจากผิวหน้าของสารละลายและถูกปล่อยออกทางด้านบนของเครื่องระเหย การกวนอย่างช้าๆหรือการหมุนเวียนตามธรรมชาติทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟอง ดังนั้นเครื่องระเหยประเภทนี้จะใช้กับสารละลายที่มีความหนืดต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวที่มีการถ่ายโอนความร้อน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องระเหยท่อยาวแนวราบ [5]

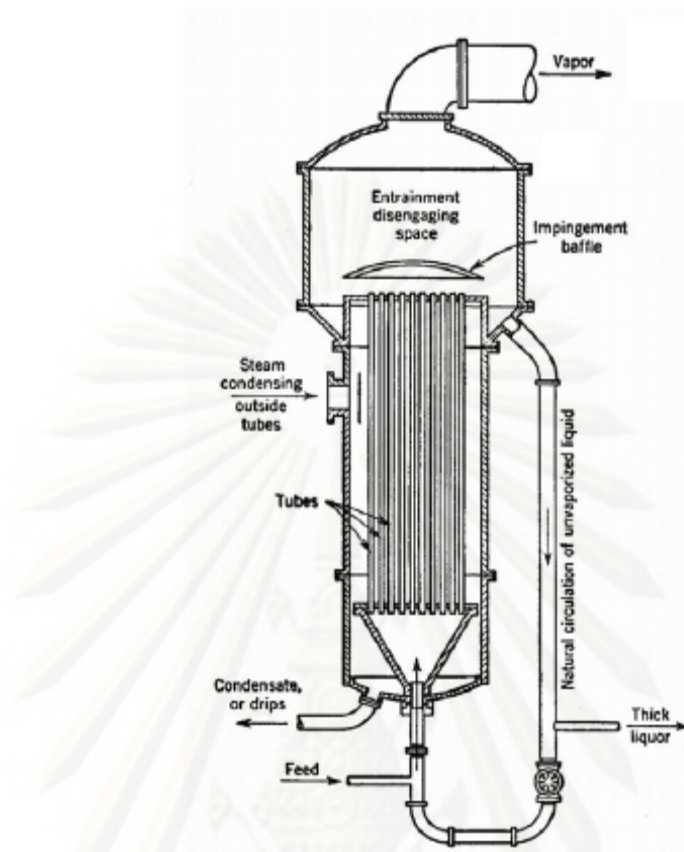
3. เครื่องระเหยท่อสั้นแนวตั้ง (Vertical-type natural circulation evaporator or short-tube evaporator) สารละลายที่ต้องการระเหยอยู่ภายในท่อ ส่วนไอน้ำอยู่นอกท่อ การเดือดของสารละลายในท่อทำให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มการไหลเวียนให้กับสารละลาย ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมสูงขึ้น สารละลายถูกป้อนเข้าสู่เครื่องระเหยทางด้านล่างแล้วไหลขึ้นไปตามท่อจากนั้นจะไหลกลับลงมาบริเวณกลางเครื่องระเหยซึ่งมีท่อขนาดใหญ่เพื่อให้อุณหภูมิของสารละลายเกิดการไหลเวียนจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ทำให้ภายในท่อขนาดเล็กจะเกิดฟองของสารละลายจำนวนมาก ผลผลิตถูกปล่อยออกทางด้านล่างของเครื่องระเหย การจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อในแนวตั้ง ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาได้ดีขึ้น เครื่องระเหยแบบนี้ต้นทุนการสร้างและค่าดูแลรักษาต่ำ แต่ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีความหนืดสูง นิยมใช้กับการระเหยน้ำเชื่อม น้ำเกลือและน้ำผลไม้ ดังรูปที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



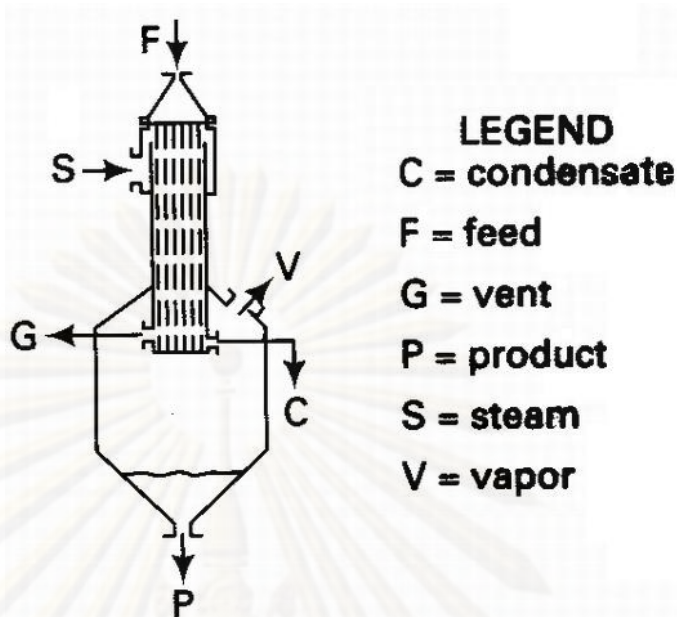
รูปที่ 2.4 เครื่องระเหยท่อสั้นแนวตั้ง [5]

4. เครื่องระเหยท่อยาวแนวตั้ง (Long-tube vertical-type evaporator) ใช้กับสารละลายที่มีความเร็วสูงและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนฝั่งไอน้ำมีค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับฝั่งสารละลาย โดยเครื่องระเหยประเภทนี้สารละลายจะอยู่ภายในท่อ ปกติท่อจะยาวประมาณ 3-10 เมตร ของผสมระหว่างไอน้ำของเหลวจะลอยตัวขึ้นทางส่วนบนของท่อและกระทบกับกะบังด้านบน ความเร็วของของเหลวสูงพอที่จะทำให้ฟองแตกออกที่กะบังด้านบนของเครื่องระเหย จากรูปที่ 2.5 สารละลายถูกป้อนจากด้านล่างเข้าไปและเกิดการเดือดในกลุ่มท่อ ไอน้ำป้อนอยู่รอบกลุ่มท่อ สารละลายไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ของผสมระหว่างไอน้ำของเหลวแยกออกจากกันบริเวณด้านบนของเครื่องระเหย หลังจากนั้นสารละลายที่เข้มข้นไหลลงสู่ด้านล่างและถูกปล่อยออกจากเครื่องระเหย



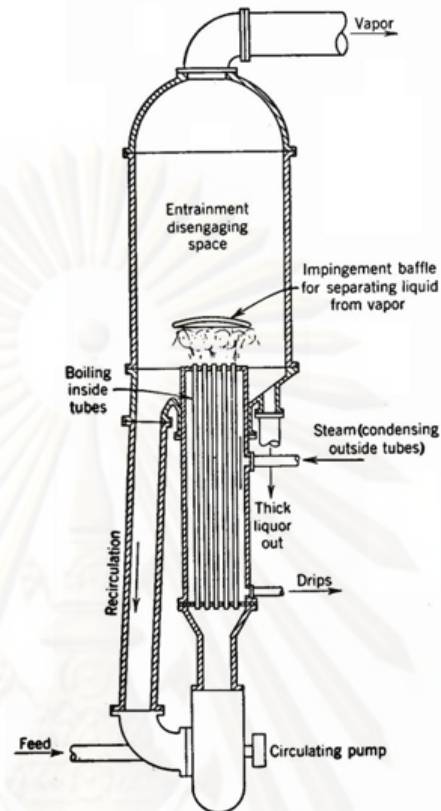
รูปที่ 2.5 เครื่องระเหยท่อยาวแนวตั้ง [5]

5. เครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตก (Falling-film-type evaporator) เครื่องระเหยประเภทนี้มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการทำให้สารละลายมีความเข้มข้น เมื่อสารละลายนั้นไม่คงทนต่อความร้อนเช่น น้ำผลไม้ สารละลายถูกป้อนเข้าด้านบนและไหลคล้ายฟิล์มลงมาด้านล่างข้างผนังท่อ สารละลายที่เข้มข้นและไอจะถูกแยกออกทางด้านล่าง ส่วนไอที่เกิดจากของเหลวของตัวทำละลายที่ได้รับความร้อนจะออกมาทางด้านล่างพร้อมกับของเหลวและถูกนำออกทางด้านล่างของเครื่องระเหย ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตก [6]

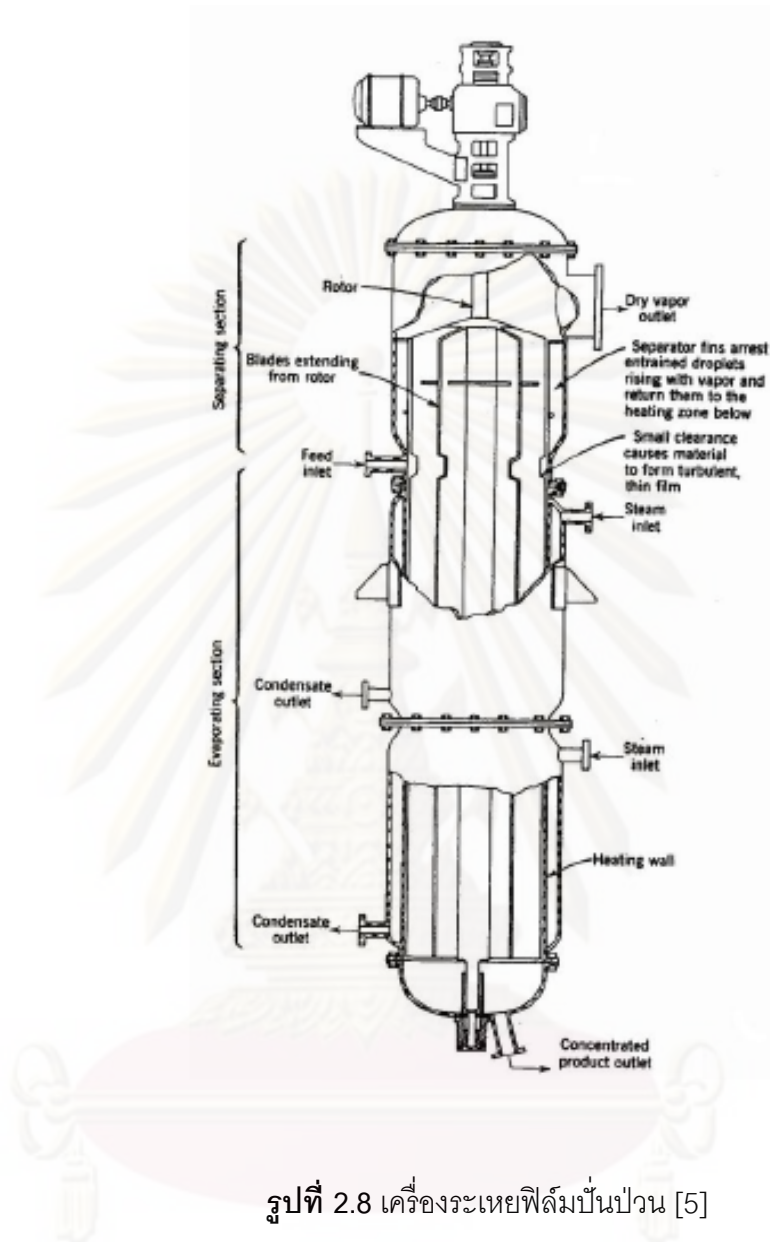
6. เครื่องระเหยชนิดใช้แรงทำให้เกิดการไหลเวียน (Force-circulation-type evaporator) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนฟิล์มสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการบีบสารละลายเข้าไปในท่อ อาจจะทำให้ได้โดยต่อท่อเชื่อมระหว่างบีบกับจุดออกของ Concentrate กับจุดเข้าของสารป้อน (Feed) ของเครื่องระเหยท่อยาวแนวตั้ง อย่างไรก็ตามเครื่องระเหยชนิดใช้แรงทำให้เกิดการไหลเวียนจะมีท่อแนวตั้งที่สั้นกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เครื่องระเหยประเภทนี้ใช้กับสารละลายที่มีความหนืดสูง



รูปที่ 2.7 เครื่องระเหยชนิดใช้แรงทำให้เกิดการไหลเวียน [5]

7. เครื่องระเหยฟิล์มปั่นป่วน (Agitated-film evaporator) เป็นเครื่องระเหยแบบใหม่ที่ ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตกเพื่อแก้ปัญหาด้านความหนืดและการกัดกร่อนของสารละลาย เครื่องระเหยฟิล์มปั่นป่วนมีการติดตั้งเครื่องช่วยกวนในขณะปฏิบัติการ ดังรูปที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

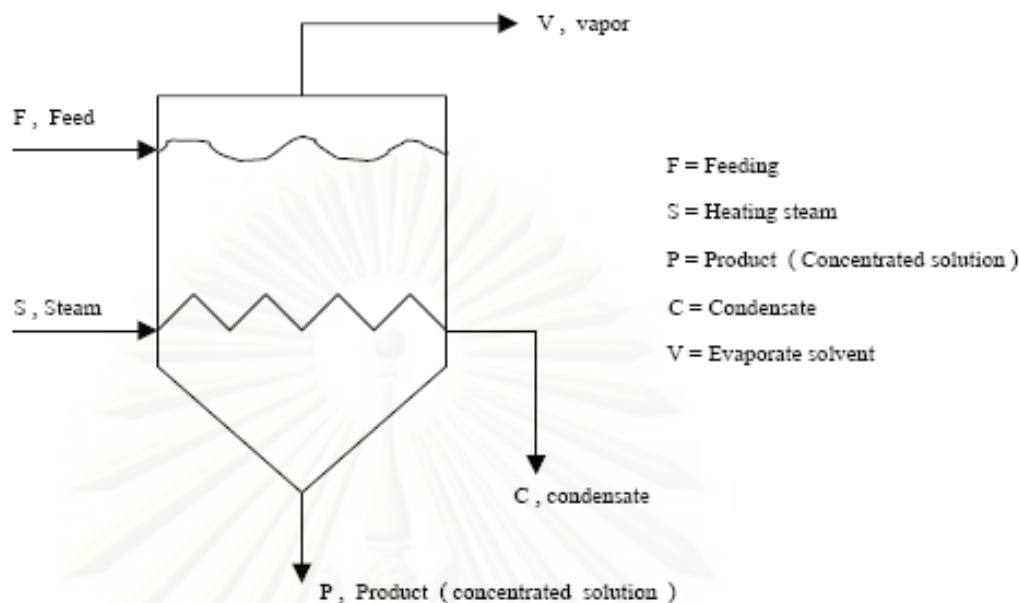


รูปที่ 2.8 เครื่องระเหยฟิล์มปั่นป่วน [5]

2.4.2 การดำเนินการของเครื่องระเหย

1. เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว (Single-Effect Evaporator)

เครื่องระเหยชนิดนี้ประกอบด้วยเครื่องระเหยเพียงตัวเดียว หลักการทำงานคือ สารละลายที่ต้องการทำให้มีความเข้มข้นสูงจะป้อนเข้ามาทาง F, Feed (ดังรูปที่ 2.9) และความร้อนที่ใช้ในการระเหยได้จากไอน้ำซึ่งป้อนเข้าทาง S, Steam สารละลายที่ถูกระเหยตัวทำละลายไปจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และไหลออกมาทาง P ส่วนตัวทำละลาย (สมมติเป็นน้ำ) จะระเหยออกมาทาง V เมื่อไอน้ำให้ความร้อนกับสารละลายแล้ว จะควบแน่นเป็นของเหลว เรียกว่า condensate, C



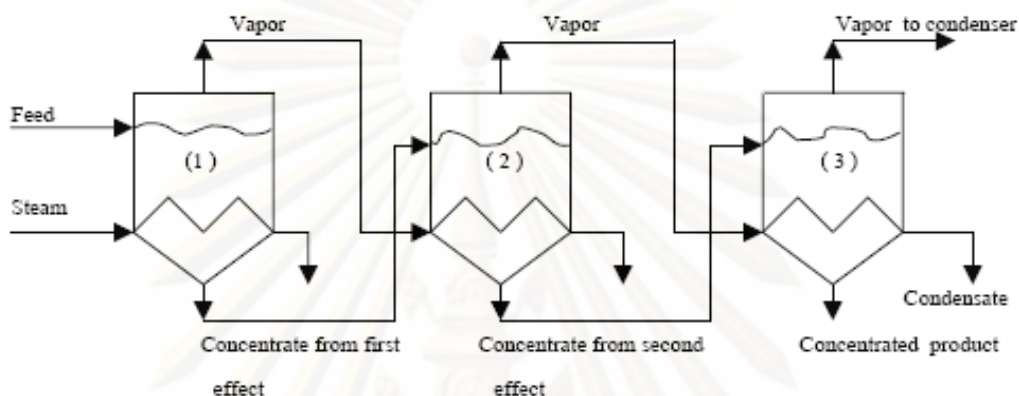
รูปที่ 2.9 เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว [4]

2. เครื่องระเหยผลหลายเชิงหรือแบบหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน (Multi-Effect Evaporator)

เนื่องจากเครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยวข้างต้นมีการปล่อยตัวทำละลาย (สมมติว่าเป็นน้ำ) ออกมาในรูปไอน้ำทาง V ซึ่งสามารถนำไอน้ำดังกล่าวมาเป็นตัวให้ความร้อนในเครื่องระเหยตัวอื่นต่อไป แต่เนื่องจากไอน้ำที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ single-effect จึงจำเป็นที่จะต้องลดความดันในเครื่องระเหยตัวต่อไปลง เพื่อให้สารละลายมีจุดเดือดต่ำลง การนำ เครื่องระเหยตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่อกันเป็นระบบเรียกว่า multiple-effect evaporator โดยมีระบบการต่อ 3 แบบ ดังนี้

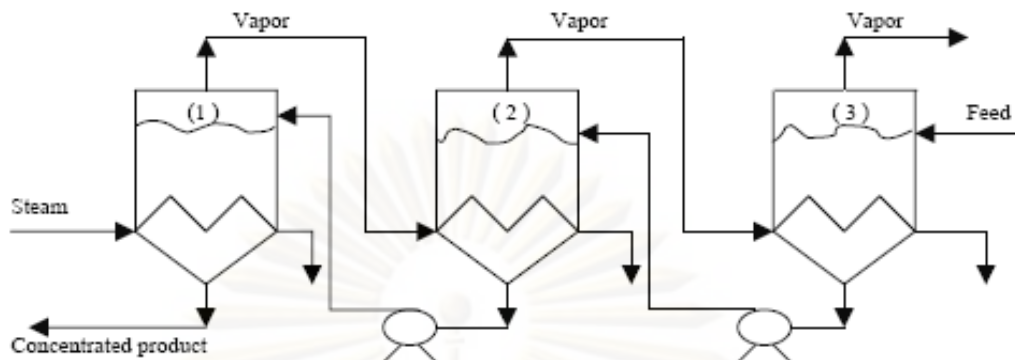
2.1 Forward-feed multiple-effect evaporator สารละลายและไอน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันเรียกว่า การป้อนไปข้างหน้า (forward feed) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจากเครื่องระเหยตัวแรกจนถึงเครื่องระเหยสุดท้าย รูปแบบการไหลของสารละลายแบบนี้เป็นรูปแบบที่ง่าย การไหลในลักษณะนี้ต้องการปั๊มช่วยสำหรับการป้อนสารละลายที่เจือจางเข้าสู่เครื่องระเหยที่หนึ่งเนื่องจากว่าโดยปกติที่เครื่องระเหยนี้จะมี ความดันเท่ากับความดันบรรยากาศและใช้ปั๊มในการปั๊มสารละลายที่เข้มข้นออกจากเครื่องระเหยสุดท้าย การป้อนสารละลายจากเครื่องระเหยตั้งแต่ตัวที่สองจนถึงเครื่องระเหยก่อนตัวสุดท้ายสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยแต่อย่างใด เนื่องจากเป็นการไหลในทิศทางที่ความดันภายในเครื่องระเหย

ลดลงและมีวาล์วควบคุมในทิศทางการป้อนเท่าที่จำเป็นเท่านั้น การป้อนไปข้างหน้ามีข้อดีคือ เป็นวิธีการที่เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้งานง่าย ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยในการป้อนสารละลายระหว่างเครื่องระเหย แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำ เมื่อของเหลวมีความหนืดสูง ทำให้อัตราการระเหยลดลงในเครื่องระเหยต่อไป



รูปที่ 2.10 Forward - feed multiple effect evaporator [4]

2.2 Backward-feed multiple-effect evaporator สารละลายและไอน้ำเคลื่อนที่สวนทางกัน เรียกว่า การป้อนย้อนกลับ (backward feed) วิธีนี้ทำโดยสารละลายที่เจือจางถูกป้อนเข้าไปในเครื่องระเหยสุดท้ายและหลังจากนั้นจะปั๊มให้สารละลายไหลผ่านต่อมาจนถึงเครื่องระเหยที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 วิธีการป้อนแบบนี้ต้องใช้ปั๊มช่วยระหว่างเครื่องระเหยแต่ละคู่ เนื่องจากเป็นการไหลจากบริเวณที่มีความดันต่ำ ไปยังบริเวณที่มีความดันสูง การป้อนย้อนกลับจะให้ความจุที่สูงกว่าการป้อนไปข้างหน้า แต่อาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการป้อนแบบไปข้างหน้า เมื่อของเหลวที่ป้อนมีอุณหภูมิต่ำ การป้อนย้อนกลับมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยป้อนสารละลายในตอนแรกและมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายที่ป้อน แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ปั๊มช่วยในระหว่างเครื่องระเหยในแต่ละคู่ เมื่อสารละลายที่เข้มข้นขึ้นเคลื่อนที่ได้เข้าอาจทำให้เกิดตะกอน



รูปที่ 2.11 Backward - feed multiple effect evaporator [4]

2.3 Parallel-feed multiple-effect evaporator: สารละลายจะถูกป้อนผ่านเครื่องระเหยแต่ละเครื่องแยกจากกัน ในทิศทางที่ขนานกัน การป้อนแบบนี้เรียกว่า การป้อนแบบขนาน (parallel feed) การป้อนแบบนี้ไม่มีการถ่ายเทของเหลวในแต่ละเครื่องระเหย สารละลายที่ป้อนจะถูกป้อนที่ด้านล่างของแต่ละเครื่องระเหยพร้อมๆกัน ผลผลิตที่ได้ปล่อยออกที่ด้านบนของแต่ละเครื่อง การป้อนแบบขนานมีข้อดีคือ มีความเหมาะสมกับการใช้ตกผลึกสาร เนื่องจากมีการควบคุมการตกผลึกได้ดี ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยในการปั้มน้ำผลึก ใช้ระเหยน้ำออกเพื่อทำเกลือ วิธีนี้มีข้อเสีย คือ เครื่องมีความสลับซับซ้อนและมีราคาสูงมาก ต้องใช้ปั๊มเพื่อการสกัดการไหลของสารในเครื่องระเหยแต่ละเครื่อง สารละลายและไอน้ำมีทั้งเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและสวนทางกัน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าขีดจำกัดการละลายในของเหลวดำ

ปี ค.ศ.1975 Grace [7] ได้ทำการทดลองหาค่าขีดจำกัดการละลาย (Solubility limits) ในของเหลวดำ ค่าขีดจำกัดการละลาย คือ ความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกละลายที่ละลายได้ในตัวทำละลาย ในช่วงอุณหภูมิ 100-140°C โดยโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) จะตกตะกอนร่วมกันในรูปของ Burkeite ($2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$) ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อค่าขีดจำกัดการละลายได้แก่ ปริมาณของโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ (Total sodium content) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่อยู่ในของเหลวดำ (liquor solids content) มีการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดจำกัดการละลายกับปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต และโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ ซึ่งอุณหภูมิและสารอินทรีย์ที่อยู่ในของเหลวดำมีผลกระทบต่อค่าการละลายน้อยมากในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

ปี ค.ศ.1997 Rosier [8] ได้นำข้อมูลซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดจำกัดการละลาย กับปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ จาก การศึกษาของ Grace [7] มาใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการตกตะกอน ของ Burkeite ในเครื่องระเหยแบบหลายเครื่องต่อกัน (Multiple-effect evaporator) โดยกล่าวว่าการเกิดตะกอนเกิดจากการตกผลึกของของเหลวดำที่อิ่มตัว เมื่อของเหลวดำนั้นมีความเข้มข้นเกิน ขีดจำกัดการละลาย (solubility limits) ซึ่งจะเรียกว่า ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ (Critical black liquor solid; Critical BLS) แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้วัดค่าวิกฤตของ ของแข็งในของเหลวดำ ก่อนที่ของเหลวดำจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องระเหย

$$criticalBLS, \% = \frac{\left[f \left(\frac{BLS}{100} \right) \right]}{\left\{ 1 - \left[(1-f) \left(\frac{BLS}{100} \right) \right] \right\}} \quad (2.1)$$

เมื่อ f = correction factor
 BLS = black liquor solids content, %

ปี ค.ศ.2001 Adams [9] ได้หาสมการในการหาค่าวิกฤตของของแข็งในของของเหลวดำที่ ง่ายและมีความถูกต้องมากขึ้นโดยการพัฒนาข้อมูลจาก Grace [7]

$$Critical\ solids = \frac{1}{\left[1 + 6.18 \times (Na_{total})^{0.365} \times (Na_2SO_4)^{0.323} \times (Na_2CO_3)^{0.131} \right]} \quad (2.2)$$

โดยที่ Na_{total} คือ โซเดียมทั้งหมด Na_2SO_4 คือ โซเดียมซัลเฟตและ Na_2CO_3 คือ โซเดียม คาร์บอเนต โดยความเข้มข้นที่ใช้ในสมการนี้เป็นเศษส่วนมวลในของแข็งทั้งหมดในของเหลวดำ (Black liquor solids)

ช่วงของปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของแข็งของ ของเหลวดำที่สามารถใช้สมการ(2.2) ได้ แสดงดังนี้

$$45\% < Crical\ Solids < 65\%$$

$$14\% < total\ Na < 22wt\% BLS$$

$$2\% < Na_2CO_3 < 14wt\% BLS$$

$$1.5\% < Na_2SO_4 < 10wt\% BLS$$

โดย Adams [9] กล่าวว่า การทำงานของเครื่องระเหยในสภาวะที่ต่ำกว่าค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวต่ำเป็นการป้องกันการเกิดตะกอนและการทำงานของเครื่องระเหยที่เหนือค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวต่ำจะลดหรือกำจัดกระบวนการเกิดตะกอนได้

ปี ค.ศ.2008 Bialik และคณะ [10] ได้ศึกษาหาแบบจำลองในการทำนายค่าการละลายและองค์ประกอบที่อยู่ในวัฏภาคของแข็งของของเหลวต่ำเพื่อลดผลกระทบของการเกิดตะกอนและได้การทดลองหาค่าการละลายของ dicarbonate ($\text{Na}_2\text{CO}_3\text{Na}_2\text{SO}_4$) เพื่อหาแบบทดลองอย่างง่ายของค่าการละลายโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-squares technique) จากนั้นหาแบบจำลองของค่าคงที่การละลาย (Solubility constant) โดยใช้สมการ Ion-interaction ของ Pitzer [11]

$$K_{sp} = \prod_c a_c^{v_c} \prod_a a_a^{v_a} = \prod_c (\gamma_c m_c)^{v_c} \prod_a (\gamma_a m_a)^{v_a} \quad (2.3)$$

K_{sp} = solubility constant

a = ionic or water activity, mol / kg solvent

m = salt molality, mol / kg solvent

เมื่อ v = stoichiometric coefficient of anion in the precipitate

γ = ionic activity coefficient

subscripts

a = anion

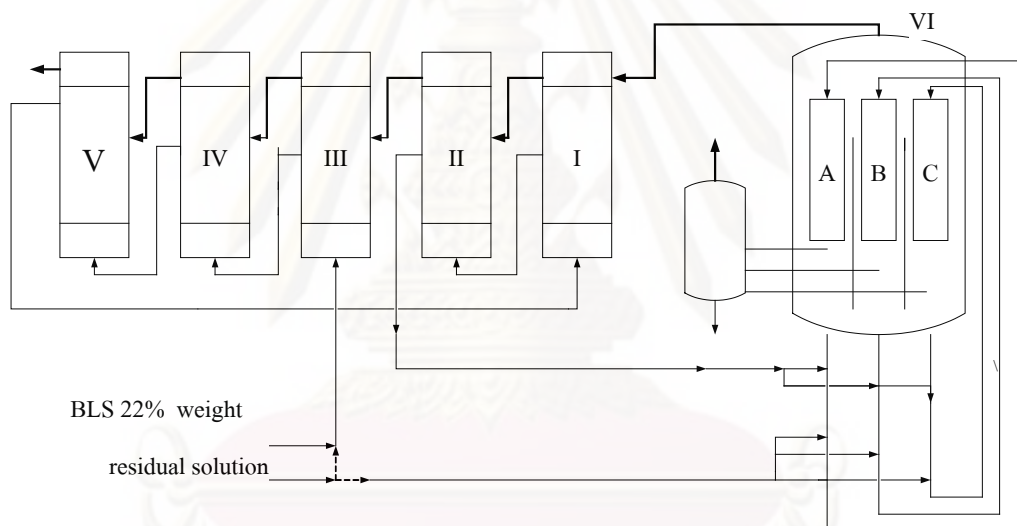
c = cation

ปี ค.ศ.2009 Wadsborn และ Radestrom [12] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการละลายของ burkeite ซึ่งแสดงว่าสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของ burkeite กับเกลือโซเดียมในเครื่องระเหย โดยโดยใช้สมการ Ion-interaction ของ Pitzer [11] เช่นกัน โดยในการทดลองจะครอบคลุมการตกตะกอนของ burkeite และ dicarbonate

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวกับตะกอนและแนวทางในการลดการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยของเหลวต่ำ

ปี ค.ศ.1985 Pettersson [13] ได้คิดค้นวิธีลดการสูญเสียสารเคมีในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต โดยทั่วไปจะมีการเติม residual solution ลงในของเหลวต่ำเจือจาง ซึ่งจะเป็นเหมือนการเติมโซเดียมซัลเฟตจำนวนมากลงในของเหลวต่ำเจือจาง ที่ช่วงอุณหภูมิ 145-155°C

ของเหลวดำจะมีความเข้มข้นประมาณ 40-45% dry solid ซึ่งโดยทั่วไปในช่วงความเข้มข้นนี้ของเหลวดำจะถึงจุดที่จำกัดการละลายและเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้นภายในเครื่องระเหย เครื่องระเหยแบบหลายตัวต่อกันนั้นโดยปกติจะต่อกันประมาณ 5-7 ตัว หรืออาจจะมากกว่านั้น แนวความคิดคือ หากเติม residual solution ลงในของเหลวดำเจือจางก่อนที่ของเหลวดำจะเข้าสู่เครื่องระเหย จะทำให้โซเดียมซัลเฟตของทั้งระบบเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อของเหลวดำมีความเข้มข้นประมาณ 40-45% ก็ต้องมีการหยุดเครื่องระเหยในส่วน VI เพิ่มล้างทำความสะอาดตะกอนที่เกิดขึ้น ถ้าหากเปลี่ยนมาเติม residual solution ที่เครื่องระเหย VI ในแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งภายในเครื่องจะแบ่งย่อยออกเป็น 3 ส่วน คือ A B และ C โดยอาจจะเติมในส่วน B หรือ C ซึ่งจะเป็นการลดการสูญเสียสารเคมี ซึ่งเกิดจากการเกิดตะกอนและการล้างทำความสะอาดเครื่องระเหย



รูปที่ 2.12 เครื่องระเหยหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน (Multi-Effect Evaporator) [11]

ปี ค.ศ.1997 Vaistomaa และคณะ [14] ได้หาวิธีในการลดการเกิดตะกอนบนพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยของเหลวดำ โดยกล่าวว่าหากเติมแอสและสารอื่นที่มีองค์ประกอบของโซเดียมซัลเฟตหลังจากแยก Soap ออกจากของเหลวดำ ซึ่งของเหลวดำในช่วงนี้ จะมีความเข้มข้นประมาณ 30-40 % dry solid จะทำให้โซเดียมซัลเฟตและองค์ประกอบอื่นของแอสละลายในของเหลวดำได้หมดเพราะยังไม่เกินค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ ซึ่งการเติมแอสจะเป็นการเพิ่มตัวล่อผลึก (seed crystal) ในของเหลวดำ ผลึกที่เกิดขึ้นจะเกาะกับตัวล่อผลึก

แล้วตกลงในของเหลวตำแหน่งที่จะไปเกาะที่พื้นผิวของเครื่องระเหย ซึ่งเป็นการลดการเกิดตะกรันบนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยได้

ปี ค.ศ.1998 Steinhagen [15] ได้ทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ (Optimum operating conditions) และตารางในการทำความสะอาด เครื่องระเหยหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาว่าสภาวะในการดำเนินการของเครื่องระเหยมีผลต่อการเกิดตะกรันอย่างไร กล่าวว่า induction period และอัตราการเกิดตะกรันขึ้นกับอุณหภูมิที่ผิวของเครื่องระเหย อัตราการเกิดตะกรันจะเพิ่มขึ้นและ induction time จะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิผิวของเครื่องระเหยต่ำและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของเครื่องระเหยกับอุณหภูมิภายในเครื่องระเหยมีค่าน้อยจะลดอัตราการเกิดตะกรันได้ ผลจากการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นทำให้ได้สมการที่ใช้ในการหาเวลาที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องระเหย (Optimum evaporator operating time) ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องระเหย

$$t_{evp}^{opt} = t_{clean} + \sqrt{\frac{2t_{clean}}{\alpha_0 \left(\frac{\partial R_f}{\partial t} \right)_{t=0}}} \quad (2.4)$$

t_{evp}^{opt} = optimum evaporator operating time, min

t_{clean} = cleaning time, min

เมื่อ α_0 = clean heat transfer coefficient, $Wm^{-2}K^{-1}$

R_f = fouling resistance, $m^2 KkW^{-1}$

t = time, min

ปี ค.ศ.2001 Shi และ Rousseau [16] ได้ศึกษาคุณสมบัติของผลึกและจลนพลศาสตร์ของการเกิดนิวเคลียสจากสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซัลเฟต โดยศึกษากลไกการเกิดผลึก ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดผลึกและหาความกว้างของช่วง สภาพกึ่งเสถียร (metastable zone width) ของการเกิดผลึกในระบบของโซเดียมคาร์บอเนต-โซเดียมซัลเฟต-น้ำจากความเข้มข้นของสารละลายและอัตราส่วนของโซเดียมคาร์บอเนตต่อโซเดียมซัลเฟตและในปี ค.ศ. 2003 Shi และ Rousseau [17] ได้ศึกษาโครงสร้างของ Burkeite และผลึกรูปแบบใหม่ซึ่งได้จากสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซัลเฟต

ปี ค.ศ.2004 Chen และ Gao [18] ได้นำเสนอแบบจำลองในการตกผลึกของตะกั่ว เพื่อวิเคราะห์ปรากฏการณ์ในการเคลื่อนที่ของของเหลวดำและตะกั่วที่เกิดขึ้นและได้กล่าวว่า หากควบคุมให้ความต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของเครื่องระเหยกับอุณหภูมิที่ของเหลวดำต่างกัน ประมาณ 5-10 K จะสามารถควบคุมการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหยได้

ปี ค.ศ.2008 Shevchenko และคณะ [19] ได้หาวิธีในการตรวจสอบและยับยั้งการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหยของเหลวดำ โดยติดตั้งเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ผิวเครื่องระเหยและวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนบนผิวด้านนอกของเครื่องวัด จากนั้นเครื่องควบคุมจะตีความค่าที่วัดได้และคำนวณระดับในการเกิดตะกั่ว ถ้าระดับในการเกิดตะกั่วเกินระดับที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เครื่องควบคุมจะส่งคำสั่งให้ป้อนสารยับยั้งการเกิดตะกั่วลงในของเหลวดำ

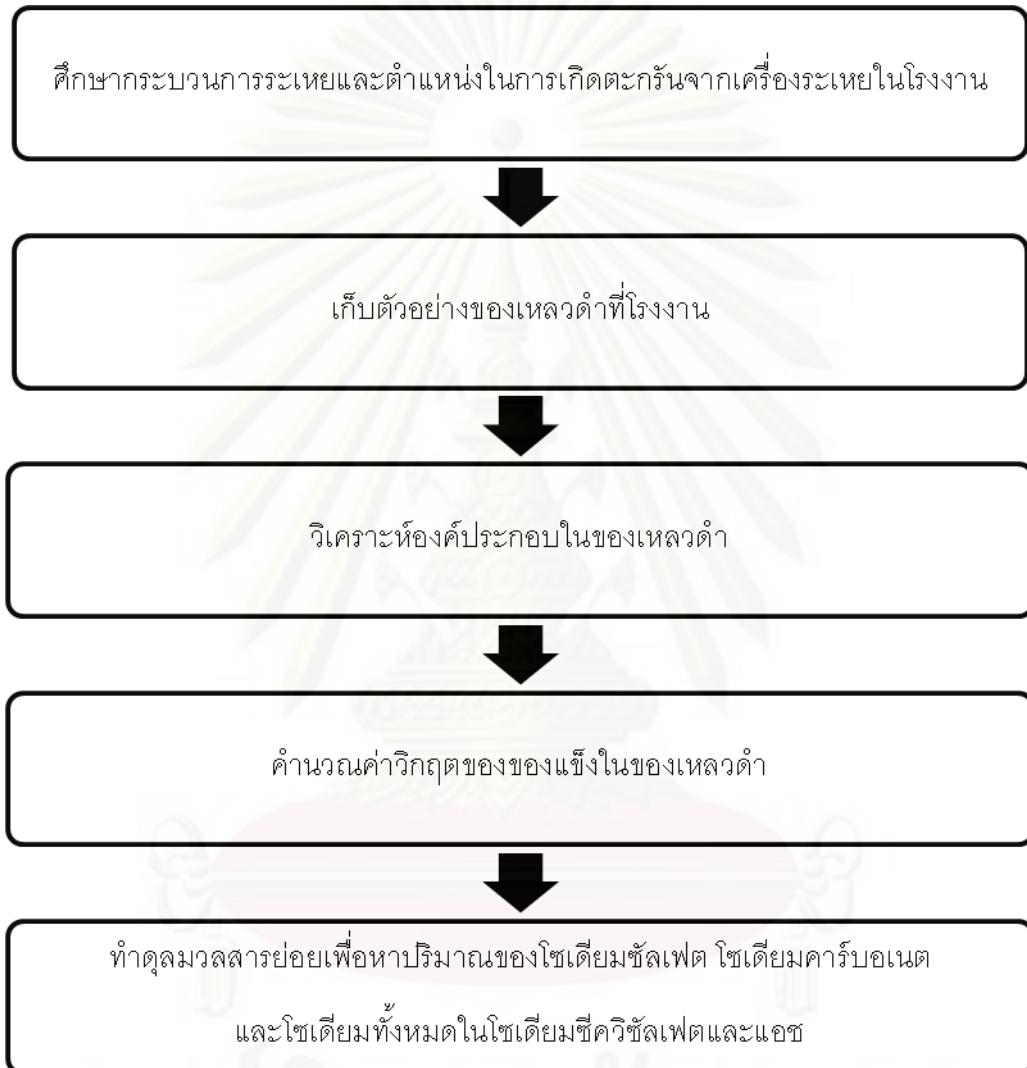


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

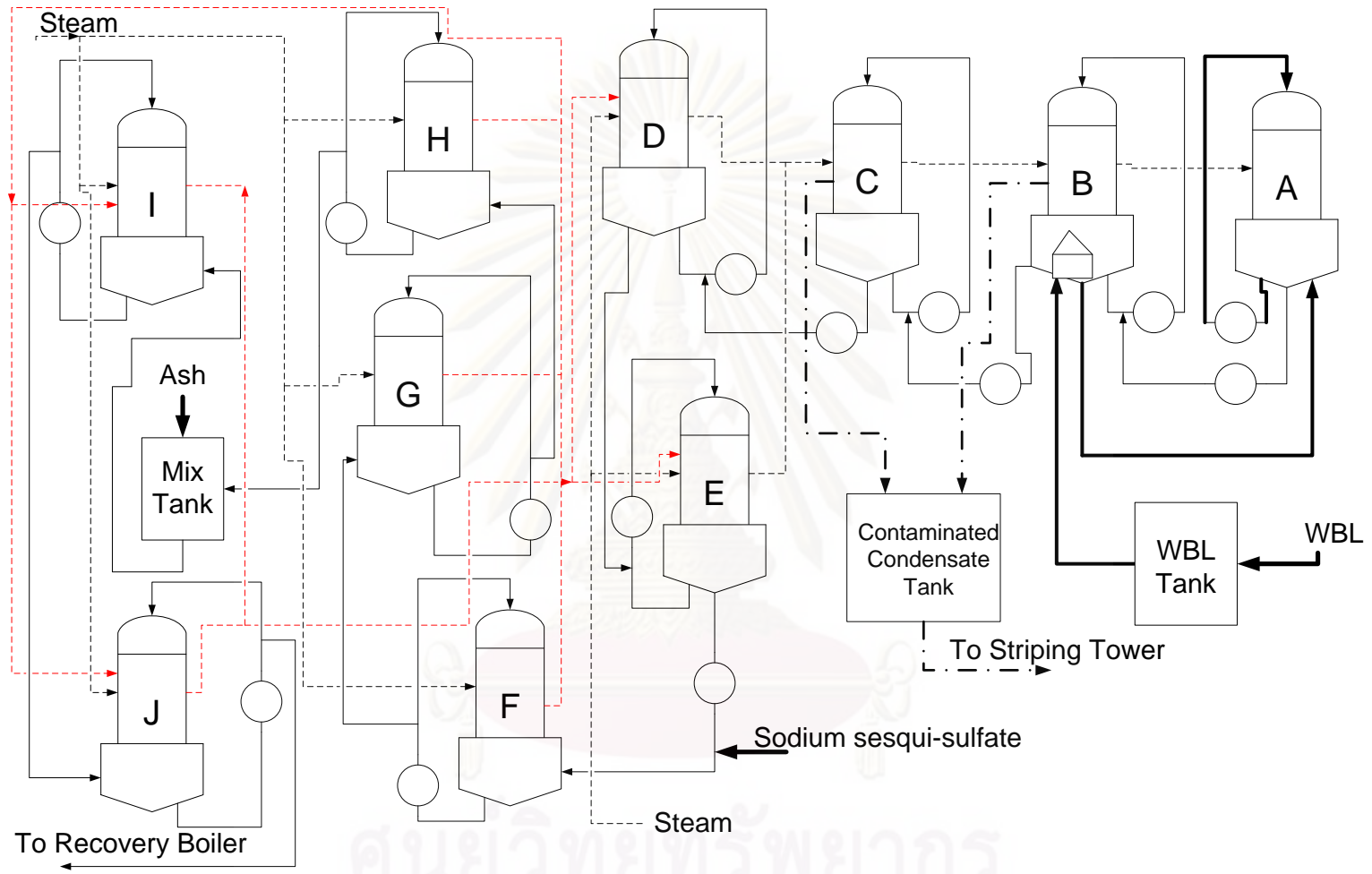
3.1 ศึกษากระบวนการระเหยจากเครื่องระเหยในโรงงาน

การศึกษาระบวนการระเหยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบวนการ ในโรงงาน จากเอกสารของทางโรงงานและจากการสอบถามพนักงานทำให้ทราบว่า เครื่องระเหยที่ใช้ในโรงงานเป็นเครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลัง โดยเครื่องระเหยแบบหลายตัวต่อกันชนิด Backward ซึ่งมีเครื่องระเหยต่อกัน 10 เครื่อง ซึ่งเรียกว่า หน่วยทำระเหย แสดงดังรูปที่ 3.2 ของเหลวดำที่มีความเข้มข้นประมาณ 17% dry solid ซึ่งเรียกว่า ของเหลวดำเจือจาง จะถูกทำการระเหยให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นประมาณ 75% dry solid หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้น ก่อนจะถูกส่งไปเผาที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืนต่อไป

ของเหลวดำเจือจางถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องระเหย B จากนั้นจะถูกป้อนย้อนกลับไปที่เครื่องระเหย A โดยของเหลวดำจะถูกระเหยที่เครื่องระเหย A ก่อน จากนั้นของเหลวดำจะถูกส่งไประเหยต่อที่ไปเครื่องระเหย B, C, D, E, F, G, H, I และ J ตามลำดับ ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการระเหยคือ ไอน้ำจะไหลสวนทางกับของเหลวดำ โดยไอน้ำที่เข้าเครื่องระเหยมี 2 สาย ไอน้ำสายที่ 1 ถูกป้อนเข้าเครื่องระเหย F, G, H, I และ J ไอน้ำที่ออกจากเครื่องระเหย H, G และ F ถูกส่งเข้าเครื่องระเหย I และ J ไอน้ำที่ออกจากเครื่องระเหย I และ J ถูกส่งเข้าเครื่องระเหย D และ E ไอน้ำสายที่ 2 ถูกป้อนเข้าเครื่องระเหย D และ E จากนั้นไอน้ำที่ออกจากเครื่องระเหย D และ E จะถูกส่งไปให้ความร้อนในเครื่องระเหย C, B และ A ต่อไป ซึ่งจะต้องมีปั๊มช่วยระหว่างเครื่องระเหยแต่ละคู่ เนื่องจากเป็นการไหลจากบริเวณที่มีความดันต่ำไปยังบริเวณที่มีความดันสูง

ในหน่วยทำระเหยนี้มีสารเคมีถูกเติมลงในหน่วยระเหยด้วยคือ โซเดียมซีควิซัลเฟต (Sodium sesqui-sulfate) และแอส (Ash) ซึ่งโซเดียมซีควิซัลเฟตเป็นผลพลอยได้ (by product) จากหน่วยผลิตสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (Cl_2O Plant) เป็นสารเคมีที่มีโซเดียมซัลเฟตเจือปนอยู่ และมีสถานะเป็นของเหลวถูกเติมที่เครื่องระเหย F แอชเป็นอนุภาคฝุ่นผงและเถ้าที่เกิดจากการเผาของเหลวดำที่หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน ซึ่งในหม้อไอน้ำนำสารกลับคืนจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นก่อนระบายออกสู่บรรยากาศ แอชมีโซเดียมซัลเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีโซเดียมซัลเฟตประมาณ 80 % โดยมวล แอชถูกเติมที่เครื่องระเหย I ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นของไอน้ำ เรียกว่า Contaminated Condensate ซึ่งมีปริมาณของเมทานอลมากกว่า 25 ppm ถูกแยกออกจากเครื่องระเหย B และ C

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นที่เครื่องระเหยคือ การเกิดตะกอนภายในท่อ โดยเฉพาะที่เครื่องระเหย F จะเกิดปัญหารุนแรงมากที่สุดจนเกิดการอุดตันภายในท่อ ทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพในการทำระเหยของเครื่องระเหยลดลง โดยที่ความเข้มข้น (% dry solid) สูงๆ จะมีตะกอนเกิดขึ้นลดลง



รูปที่ 3.2 เครื่องระเหยแบบหลายตัวต่อกันชนิด backward ในโรงงาน

3.2 การเก็บตัวอย่างของเหลวดำที่โรงงาน

ทำการเก็บตัวอย่างของเหลวดำ 8 ตำแหน่ง รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างของเหลวดำ ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมทั้งหมดและความเข้มข้น(%dry solid) ที่แตกต่างกัน

ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างของเหลวดำมีดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 ของเหลวดำเจือจางก่อนป้อนเข้าหน่วยทำระเหย

ตำแหน่งที่ 2 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหยD

ตำแหน่งที่ 3 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหยE

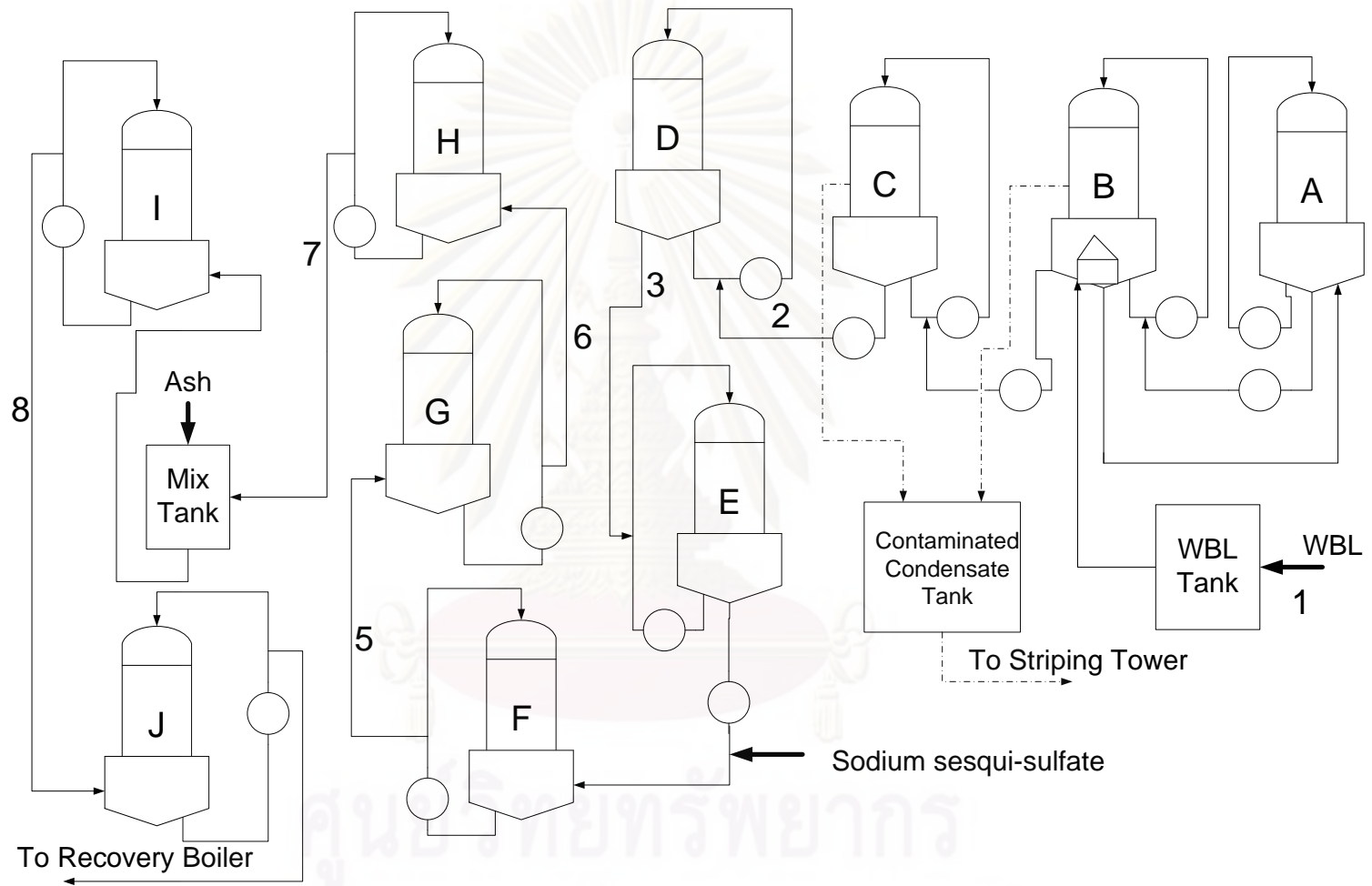
ตำแหน่งที่ 4 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหยF และก่อนเติมโซเดียมซึควิซัลเฟต

ตำแหน่งที่ 5 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหยG และหลังเติมโซเดียมซึควิซัลเฟต

ตำแหน่งที่ 6 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหยH

ตำแหน่งที่ 7 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหย และก่อนเติมแอส

ตำแหน่งที่ 8 ของเหลวดำก่อนเข้าเครื่องระเหย และหลังเติมแอส



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างของเหลวดำ

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวดำ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวดำทำได้ดังนี้ การหาค่าความเข้มข้นในของเหลวดำ(% dry solid) หาได้โดยการอบของเหลวดำ ปริมาณของโซเดียมซัลเฟตหาได้โดยการตกตะกอนด้วยแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตหาได้โดยการหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและปริมาณโซเดียมทั้งหมดหาได้โดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุโลหะด้วยการดูดกลืนแสงอะตอมต่างๆ (flame atomic absorption spectrometry)

3.3.1 การหาความเข้มข้น (%Dry Solid Content) ของของเหลวดำ

Dry solid content คือ ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่แตกต่างกันก่อนและหลังอบของของเหลวดำ

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เตาอบ
3. เดซิเคเตอร์
4. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3
5. แท่งแก้วคน
6. ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร 2 ใบ
7. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. นำปีกเกอร์และกระดาษกรองเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $105-110^\circ\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างของเหลวดำประมาณ 5 กรัม จากนั้นใส่ลงในปีกเกอร์
3. เติมน้ำให้มีน้ำหนัก 30 กรัมที่แน่นอน
4. ผสมตัวอย่างกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน
5. นำกระดาษกรองใส่ในปีกเกอร์จากนั้นนำไปวางบนเครื่องชั่ง กดที่เครื่องชั่ง ให้แสดง 0.0000 กรัม จากนั้นเทตัวอย่างที่เจือจางแล้วประมาณ 1-2 กรัม ลงในปีกเกอร์และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $105-110^\circ\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

6. นำบีกเกอร์ออกจากเตาอบแล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก นำไปชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเข้าเดซิเคเตอร์อีกครั้งนำไปชั่งน้ำหนักซ้ำจนได้น้ำหนักที่คงที่ (± 0.0004 กรัม)

7. สำหรับ Weak black liquor ซึ่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ไม่ต้องเจือจางด้วยน้ำ จากนั้นทำตามขั้นตอน 5-7

การคำนวณหาความเข้มข้นในของเหลวดำ (%dry solid)

$$\% \text{Dry solid content} = \frac{(B - T) \times D \times 100}{A \times C}$$

B = น้ำหนักบีกเกอร์และตัวอย่างหลังอบ

T = น้ำหนักบีกเกอร์ก่อนอบ

A = น้ำหนักตัวอย่าง

C = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเจือจาง (C=1 ถ้าไม่เจือจางตัวอย่าง)

D = น้ำหนักตัวอย่างและน้ำหลังจากเจือจาง

(D=1 ถ้าไม่เจือจางตัวอย่าง)

3.3.2 การหาปริมาณโซเดียมทั้งหมด (Na_{total}) ในของเหลวดำ

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม
2. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3
3. แท่งแก้วคน
4. เตาเผา
5. น้ำกลั่น
6. Glycerol in acid (เตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกลีเซอรอล 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น)
7. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างของเหลวดำประมาณ 3 กรัม ในคูลูซิเบอร์
2. นำตัวอย่างเข้าเตาเผา เเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนได้เถ้าเป็นสีเทาขาว
3. ละลายเถ้าที่ได้ด้วยน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย กรองผ่านกระดาษกรองลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตรด้วย Glycerol in acid
4. ทำการเจือจางเพื่อหาปริมาณโซเดียมทั้งหมด โดยนำตัวอย่างจากขั้นตอน 3 มา 5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วย Glycerol in acid ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าหาปริมาณโซเดียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer ซึ่งเมื่อผู้ทดลองทำการเตรียมตัวอย่างแล้วได้ส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

3.3.3 การหาปริมาณโซเดียมซัลเฟตโดยการตกตะกอนในรูปแบบเบรียมซัลเฟต

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เตาอบ
3. เตาเผา
4. อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ
5. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. แท่งแก้วคน
7. ปีกเกอร์ขนาด 500 ml
8. น้ำกลั่น
9. เดซิเคเตอร์
10. คูลูซิเบอร์
11. กรด HCl เข้มข้น
12. สารละลายเบรียมคลอไรด์เข้มข้น 5 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยเตรียมเบรียมคลอไรด์ ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หนัก 5 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การเผาตัวอย่าง
2. การตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต

การเผาตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างของเหลวดำประมาณ 10 กรัม ในคลุชิเบอร์
2. นำตัวอย่างเข้าเตาเผา เผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนได้เถ้าเป็นสีเทาขาว
3. นำคลุชิเบอร์และเถ้าตัวอย่างที่เผาแล้วมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
4. นำคีมคีบคลุชิเบิลออกจากเตาและทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำไปชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเข้าเดซิเคเตอร์อีกครั้งนำไปชั่งน้ำหนักซ้ำจนได้น้ำหนักที่คงที่ (± 0.0004 กรัม)

การตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต

1. ชั่งตัวอย่างที่เผาแล้ว (เถ้า) ประมาณ 0.3 กรัม และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นใส่ลงในปิកเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. อบกระดาษกรองที่อุณหภูมิ 105-110°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง
3. ละลายเถ้าด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น ประมาณ 0.3-0.6 มิลลิลิตร (20 หยด)
4. นำสารละลายไปต้มให้เดือด แล้วค่อยๆเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตรอย่างช้าๆทีละหยด ขณะเติมให้คนสารละลายไปด้วยอย่างสม่ำเสมอ ตั้งสารละลายทิ้งไว้จนตะกอนนอนก้นและทดสอบการตกตะกอนว่าสมบูรณ์หรือไม่ โดยค่อยๆหยดสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 2-3 หยด ลงในสารละลายโดยไม่ให้กระทบกระเทือนต่อตะกอนที่นอนก้น ถ้าเกิดตะกอนขุ่นขาวเพิ่มขึ้น แสดงว่าการตกตะกอนยังไม่สมบูรณ์ ต้องเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์เพิ่มอีก 3 มิลลิลิตร และทดสอบการตกตะกอนอีกจนกว่าการตกตะกอนจะสมบูรณ์
5. นำปิกเกอร์จากข้อ 6 ไปตั้งในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ ระวังอย่าให้สารละลายเดือด ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง โดยปิดฝาด้วยกระจกนาฬิกาและระวังอย่าให้สารละลายในปิกเกอร์ลดลงต่ำกว่า 150 มิลลิลิตร

6. ยกบีกเกอร์ลงและล้างกระจกนาฬิกาโดยใช้ น้ำกลั่นฉีดให้สารละลายมารวมกันในบีกเกอร์
7. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง ล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนจนกว่าจะไม่มีคลอไรด์เหลือค้างบนตะกอน วิธีการทดสอบการค้างของคลอไรด์ทำได้โดยใช้ สารละลายที่กรองครั้งหลังสุดมาเติมด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) 0.1 โมลาร์ ถ้าไม่มีตะกอนขุ่นขาวเกิดขึ้นแสดงว่าไม่มีคลอไรด์เหลือค้างบนตะกอน
8. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนออกจากกรวยและพับใส่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้และนำไปประเหย ให้แห้งที่อุณหภูมิ $105-110^\circ\text{C}$ ประมาณ 1 ชั่วโมง นำเอาออกจากเตาและทิ้งให้เย็นใน เดซิเคเตอร์ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก นำไปชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเข้าเดซิเคเตอร์อีกครั้งนำไปชั่ง น้ำหนักซ้ำจนได้น้ำหนักที่คงที่ (± 0.0004 กรัม)

การคำนวณปริมาณโซเดียมซัลเฟตโดยการตกตะกอนในรูปแบบเบรียมซัลเฟต



$$W_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{W_{\text{BaSO}_4}}{MW_{\text{BaSO}_4}} \times MW_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$$

$$W_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \text{น้ำหนักของโซเดียมซัลเฟต}$$

$$W_{\text{BaSO}_4} = \text{น้ำหนักของตะกอนเบรียมซัลเฟต}$$

$$MW_{\text{BaSO}_4} = \text{มวลโมเลกุลของเบรียมซัลเฟต}$$

$$MW_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \text{มวลโมเลกุลของโซเดียมซัลเฟต}$$

3.3.4 การหาปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตโดยการตกตะกอนในรูปแบบของแคลเซียมคาร์บอเนต

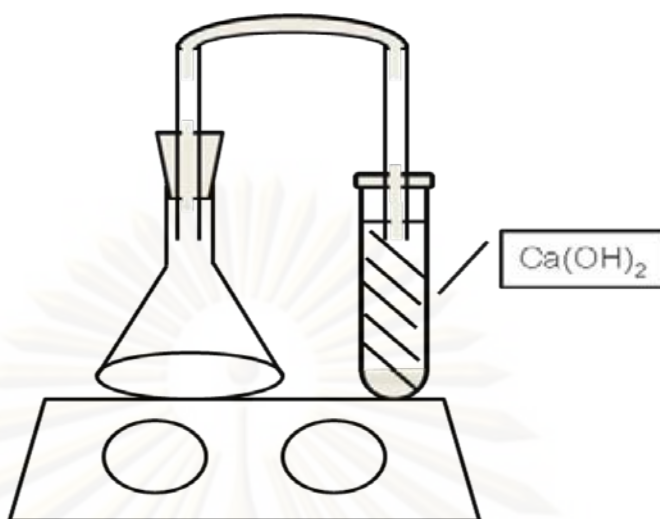
อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม
2. เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
3. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3
4. หลอดทดลอง
5. ขวดวัดปริมาตรพร้อมจุกยางที่มีหลอดนำแก๊สเสียบอยู่และต่อกับสายยาง
6. น้ำกลั่น

7. กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์
8. น้ำปูนใส ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

วิธีการทดลอง

1. นำกระดาษกรองเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $105-110^\circ\text{C}$ ประมาณ 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง
2. ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าไล่อากาศในขวดวัดปริมาตร
3. ชั่งตัวอย่างที่เผาแล้วประมาณ 0.2 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำใส่ลงในขวดวัดปริมาตร
4. เทน้ำปูนใสลงในหลอดทดลอง
5. ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายในขวดวัดปริมาตร จากนั้นนำขวดวัดปริมาตรตั้งบนเครื่องกวนสารละลาย
6. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.4
7. เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร จากนั้นรีบปิดจุกยางทันที ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะผ่านลงสู่น้ำปูนใส ทำให้น้ำปูนใสขุ่น
8. เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา กรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง
9. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนออกจากกรวยและพับใส่ในปิเปตที่เตรียมไว้และนำไประเหยให้แห้งที่อุณหภูมิ $105-110^\circ\text{C}$ ประมาณ 1 ชั่วโมง นำเอาออกจากเตาและทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก นำไปชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเข้าเดซิเคเตอร์อีกครั้งนำไปชั่งน้ำหนักซ้ำจนได้น้ำหนักที่คงที่ (± 0.0004 กรัม)



รูปที่ 3.4 จัดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตโดยการตกตะกอนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น $2\text{HCl} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \longrightarrow 2\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

$\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

$$w_{\text{CO}_2} = \frac{w_{\text{CaCO}_3}}{MW_{\text{CaCO}_3}} \times MW_{\text{CO}_2}$$

$$w_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{w_{\text{CO}_2}}{MW_{\text{CO}_2}} \times MW_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$$

w_{CO_2} = น้ำหนักของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

w_{CaCO_3} = น้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต

$w_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ = น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต

MW_{CO_2} = มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

MW_{CaCO_3} = มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

$MW_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ = มวลโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอเนต

3.4 หาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ

จากผลการศึกษาของ Adams [7] ได้หาสมการอย่างง่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำกับปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของแข็งของของเหลวดำโดยการพัฒนาจากข้อมูลของ Grace [5]

$$Critical\ solids = \frac{1}{[1 + 6.18 \times (Na_{total})^{0.365} \times (Na_2SO_4)^{0.323} \times (Na_2CO_3)^{0.131}]} \quad (2.2)$$

โดยที่ Na_{total} คือ โซเดียมทั้งหมด Na_2SO_4 คือ โซเดียมซัลเฟตและ Na_2CO_3 คือ โซเดียมคาร์บอเนต โดยความเข้มข้นที่ใช้ในสมการนี้เป็นเศษส่วนมวลในของแข็งทั้งหมดในของเหลวดำ (Black liquor solids)

ช่วงของความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของแข็งของของเหลวดำที่สามารถใช้สมการ(2.2) ได้ แสดงดังนี้

$$45\% < Crical\ Solids < 65\%$$

$$14\% < total\ Na < 22wt\% BLS$$

$$2\% < Na_2CO_3 < 14wt\% BLS$$

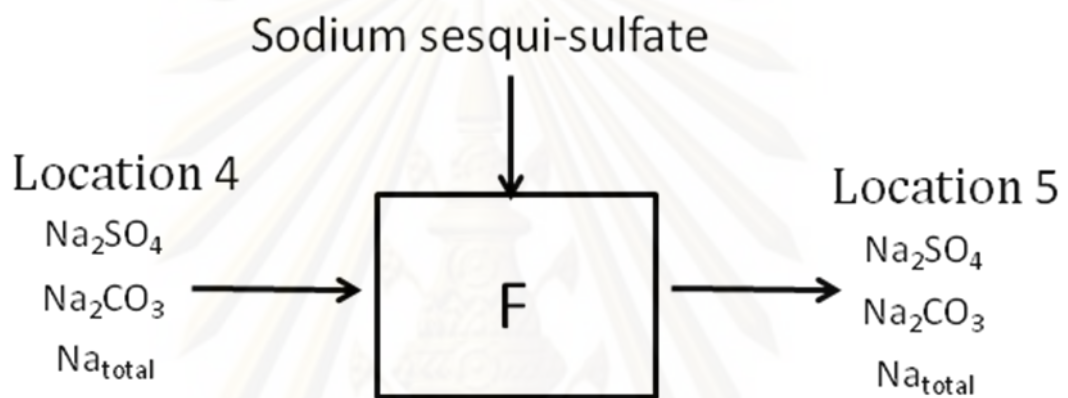
$$1.5\% < Na_2SO_4 < 10wt\% BLS$$

นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำ มาคำนวณหาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำจากสมการ (2.2) เพื่อทำนายการเกิดตะกอนในเครื่องระเหย ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำที่ได้จากการคำนวณกับค่าความเข้มข้นของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนจากกระบวนการผลิตจริง หากพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนต่ำแสดงว่าสมการที่ใช้ในการทำนายสามารถทำนายตำแหน่งในการเกิดตะกอนได้จริง

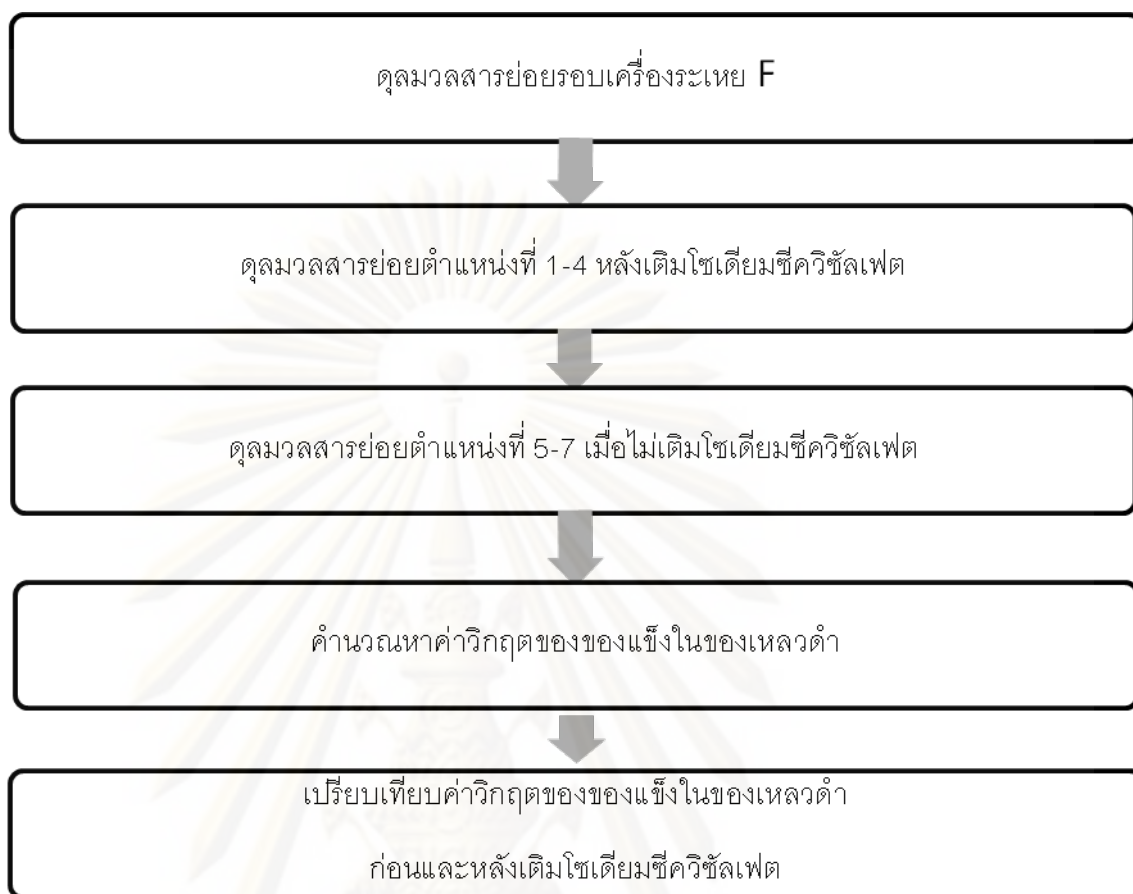
3.5 ทำดุลมวลสารย่อยเพื่อหาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในโซเดียมซัลเฟตและแอส

ทำดุลมวลสารย่อย (Component balance) เพื่อหาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในโซเดียมซัลเฟตโดยการดุลมวลสารย่อยรอบเครื่องระเหย F เพื่อหาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในโซเดียมซัลเฟตดังรูปที่ 3.5

จากนั้นนำค่าองค์ประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตที่ได้ มาคำนวณต่อโดยทำการคูณมวลสารย่อยในตำแหน่งที่ 1-4 หลังเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและทำคูณมวลสารย่อย ในตำแหน่งที่ 5-7 เมื่อไม่เติมโซเดียมซีควิซัลเฟต จากนั้นนำค่าองค์ประกอบในของเหลวดำที่ได้จากการคูณมวลสารย่อย มาคำนวณหาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำจากสมการ (2.2) ทำการเปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำก่อนและหลังเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต ขั้นตอนในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.6

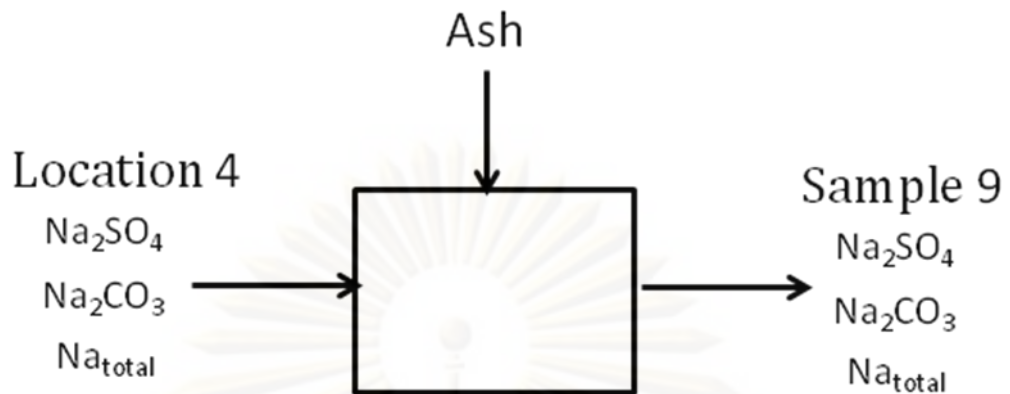


รูปที่ 3.5 คูณมวลสารย่อยรอบเครื่องระเหยตำแหน่ง F

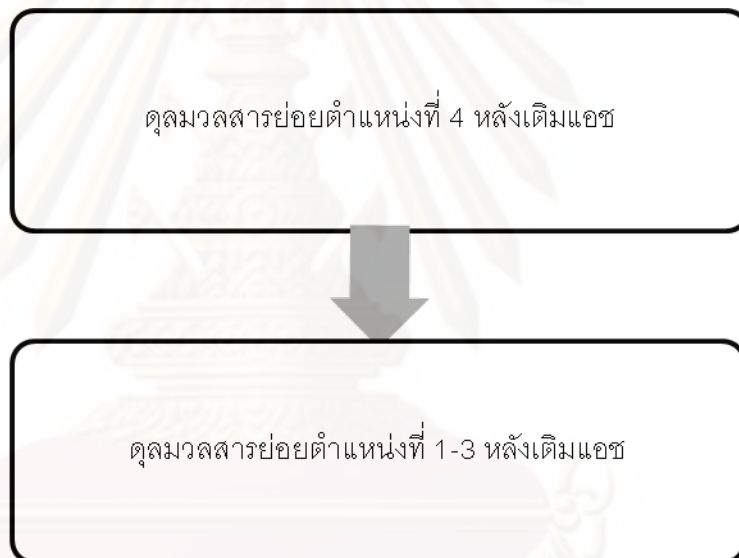


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในการคำนวณของเหลวดำเมื่อเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต

นำของเหลวดำ ตำแหน่งที่ 4 มาเติมแอส กำหนดให้เป็นตัวอย่างที่ 9 โดยปริมาณของแอสที่เติมในของเหลวดำคือ 8 % ของของแข็งทั้งหมดในของเหลวดำ ซึ่งเป็นปริมาณของแอสที่เติมลงในของเหลวดำจากกระบวนการจริง วิเคราะห์หาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ ทำดูผลมวลสารย่อยของ ตำแหน่งที่ 4 หลังเติมแอส เพื่อหาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในแอสดังรูปที่ 3. 7 จากนั้นนำค่าองค์ประกอบของแอสที่ได้ มาคำนวณต่อโดยทำการดูผลมวลสารย่อย ในตำแหน่งที่ 1-3 หลังเติมแอส ขั้นตอนในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ดุลมวลสารย่อยตำแหน่งที่ 4 หลังเติมแอส



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนในการคำนวณของเหลวดำเมื่อเติมแอส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดตะกอนในเครื่องระเหยได้แก่ ปริมาณของ โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ

4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำได้แก่ ความเข้มข้น (%dry solid) ปริมาณโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ จากการเก็บตัวอย่างของเหลวดำ 8 ตำแหน่ง พบว่าในตำแหน่ง ที่ 5 เมื่อเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต (sodium sesqui-sulfate) ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ (critical black liquor solids) ลดลงจาก 51.02% ในตำแหน่งที่ 4 เป็น 48.59% ในตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตลงในของเหลวดำเป็นการเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลเฟตของทั้งระบบ ซึ่งโซเดียมซัลเฟตเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ตะกอนเกิดเร็วขึ้น จึงมีผลทำให้ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำลดลง

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำ

Location	Black liquor composition, wt.% BLS				critical BLS, wt.%
	dry solid	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}	
1	16.99	5.79	7.58	14.87	52.02
2	38.81	6.26	7.47	17.44	50.43
3	40.29	7.40	7.54	16.53	50.29
4	43.18	7.61	7.31	15.52	51.02
5	51.73	8.98	8.16	17.33	48.59
6	66.38	8.16	7.95	15.76	49.98
7	69.19	7.16	6.52	15.71	52.03
8	71.26	8.90	6.79	16.31	50.65

4.2 เปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำจากการทำนายกับความเข้มข้น (%dry solid) ของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนในกระบวนการจริง

เปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำที่ได้จากการคำนวณกับความเข้มข้นของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนจากกระบวนการผลิตจริง ค่าความเข้มข้นของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอน จากเครื่องระเหย F ในกระบวนการผลิตจริง เท่ากับ 49% วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ แสดงในภาคผนวก ข โดยเมื่อพิจารณาของเหลวดำตำแหน่งที่ 5 คือ ของเหลวดำหลังเข้าเครื่องระเหย F และหลังเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต เหตุที่พิจารณาของเหลวดำตัวอย่างที่ 5 เนื่องจากในการสอบถามข้อมูลกับทางโรงงาน พบว่าเครื่องระเหย F เป็นเครื่องระเหยตำแหน่ง ที่เริ่มเกิดตะกอนและมีความรุนแรงของตะกอนมากที่สุด จากการคำนวณพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของ ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำที่ได้จากการคำนวณ กับความเข้มข้นของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนจริงต่ำ เท่ากับ 0.83 % ดังนั้นหากค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำในตัวอย่างที่ 5 กับ ค่าความเข้มข้นของของเหลวดำที่เริ่มเกิดตะกอนจากกระบวนการผลิตจริง มีค่าใกล้เคียงกัน แสดง ว่าสมการที่ใช้ทำนายตำแหน่งในการเกิดตะกอนมีความสอดคล้องกับตำแหน่งของเครื่องระเหยที่เกิดตะกอนจริง ดังนั้นสมการที่ใช้ ในการทำนายสามารถใช้ทำนายตำแหน่งในการเกิดตะกอนได้

4.3 หาดำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอส

4.3.1 หาดำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต

ทำดุลมวลสารย่อยเพื่อหาปริมาณของโซเดียมซีควิซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในโซเดียมซีควิซัลเฟต รอบเครื่องระเหยตำแหน่งที่ F ค่าที่ได้จากการทำดุลมวลสารย่อย เพื่อหาค่าประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตจากการดุลมวลสารย่อย

Sodium sesqui-sulfate composition, %wt BLS		
Na_2SO_4	Na_2CO_3	Na_{total}
1.36	0.85	1.81

ค่าขององค์ประกอบในของเหลวดำในตำแหน่งที่ 1-4 เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ที่ได้จากการดูลมวลสารย่อยแสดงดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ทำให้ปริมาณของโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 48.62% ค่าขององค์ประกอบในของเหลวดำของตัวอย่างที่ 5-7 เมื่อไม่เติมโซเดียมซัลไฟด์ที่ได้จากการดูลมวลสารย่อยแสดงดังตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่เติมโซเดียมซัลไฟด์จะทำให้ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อไม่เติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 52.83

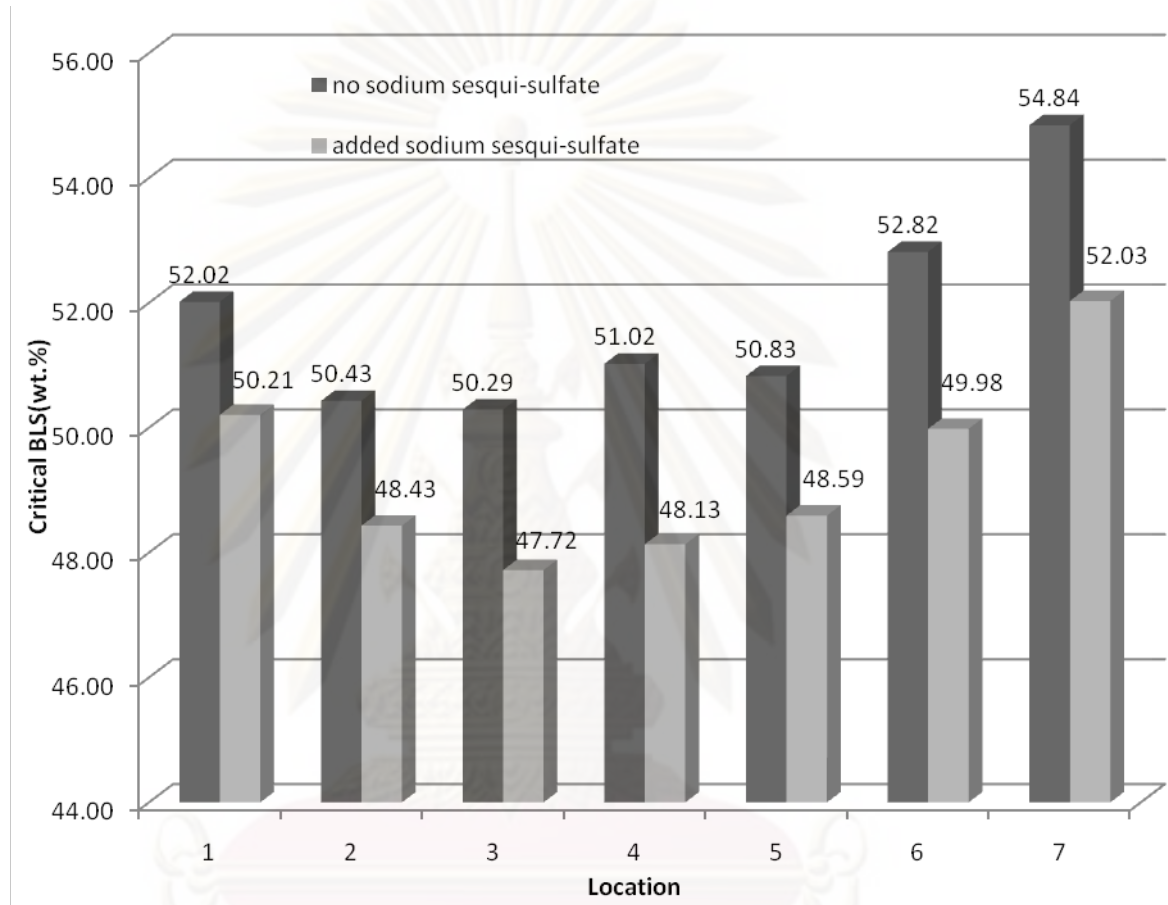
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบในของเหลวดำที่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ 1-4
เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์จากการดูลมวลสารย่อย

Location	Black liquor composition, %wt BLS			critical BLS, %wt
	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}	
1	7.16	8.43	16.68	50.21
2	7.63	8.31	19.25	48.43
3	8.76	8.39	18.34	47.72
4	8.98	8.16	17.33	48.13
Average				48.62

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบในของเหลวดำที่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ 5-7
เมื่อไม่เติมโซเดียมซัลไฟด์จากการดูลมวลสารย่อย

Location	Black liquor composition, %wt BLS			critical BLS, %wt
	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}	
5	7.61	7.31	15.52	50.83
6	6.79	7.10	13.95	52.82
7	5.80	5.68	13.90	54.84
Average				52.83

รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมซีควิซัลเฟต จะเห็นว่าเมื่อไม่เติมโซเดียมซีควิซัลเฟต ค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำจะสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำเมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมซีควิซัลเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการศึกษาของ Terry N. Adams [7] พบว่าการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตควรเติมในเครื่องระเหยตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของของเหลวต่ำกว่าเกณฑ์ของของแข็งในของเหลวต่อไปแล้ว เพื่อลดความรุนแรงในการเกิดตะกอน เนื่องจากโซเดียมซีควิซัลเฟตมีสถานะเป็นของเหลวเพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของของเหลวต่ำลง จึงความเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตลงในเครื่องระเหยที่ตำแหน่งของของเหลวต่ำมีความเข้มข้นเกินค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวเล็กน้อย ตารางที่ 4.5 แสดงช่วงความเข้มข้นของเหลวในเครื่องระเหยตำแหน่งต่างๆ เพื่อลดความรุนแรงในการเกิดตะกอนควรเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตที่เครื่องระเหย G

ตารางที่ 4.5 ช่วงความเข้มข้นของของเหลวตำแหน่งเครื่องระเหยตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งเครื่องระเหย	ช่วงความเข้มข้นของของเหลว (%dry solid)
B	15-25
C	25-35
D	36-42
E	43-47
F	48-51
G	51-55
H	56-66
I	67-71
J	71-78

4.3.2 หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมแอส

นำของเหลวดำ ตำแหน่งที่ 4 มาเติมแอส โดยกำหนดให้เป็นตัวอย่างที่ 9 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่า ไม่มีการคำนวณหาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ เนื่องจากเมื่อเติมแอสในตัวอย่างแล้ว ทำให้ปริมาณของโซเดียมซัลเฟตในของเหลวดำสูงขึ้น จนเกินค่าของช่วงของปริมาณของโซเดียมซัลเฟตที่สามารถใช้สมการ (2.2) หาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำได้

ทำดูลมพลสารย่อยของของเหลว ตำแหน่ง ที่ 4 หลังเติมแอส เพื่อหาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในแอส ค่าที่ได้จากการทำดูลมพลสารย่อย แสดงดังตารางที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบในโซเดียมซีควิซัลเฟตกับแอส ดังรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณของโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมทั้งหมดในแอสมีมากกว่าในโซเดียมซัลเฟตมาก ในขณะที่ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่า การเติมแอสมีผลต่อการเกิดตะกอนมากกว่าการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟต

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวดำตัวอย่างที่ 9

Sample	Black liquor composition, wt.% BLS		
	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}
9	13.04	8.22	20.64

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของแอสจากการดูลมพลสารย่อย

Ash composition, wt.% BLS		
Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}
5.43	0.68	5.12

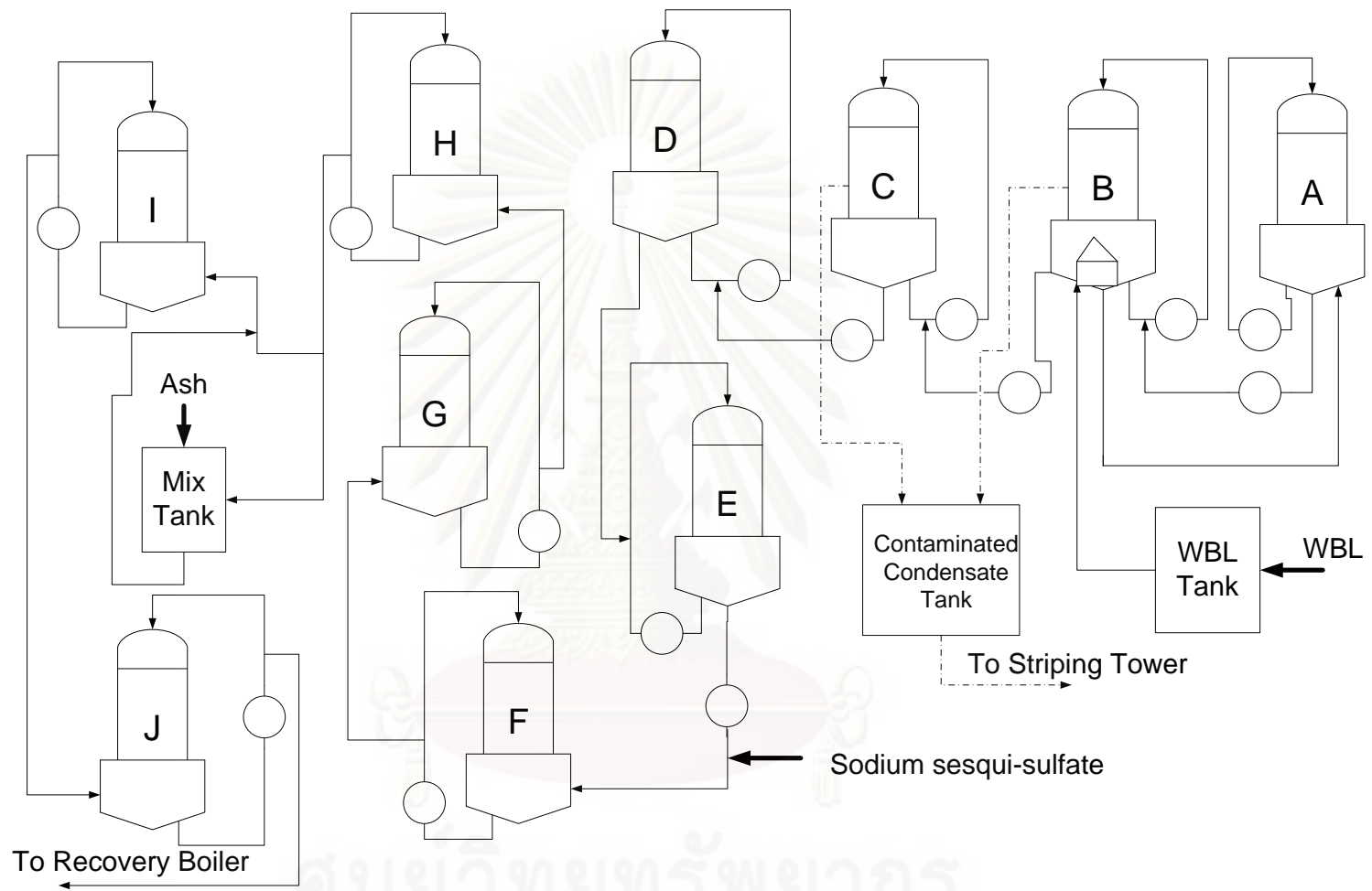
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบระหว่างองค์ประกอบของโซเดียมซีควิซัลเฟตกับแอส

Chemical	composition, wt.% BLS		
	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃	Na _{total}
Sodium sesqui-sulfate	1.36	0.85	1.81
Ash	5.43	0.68	5.12

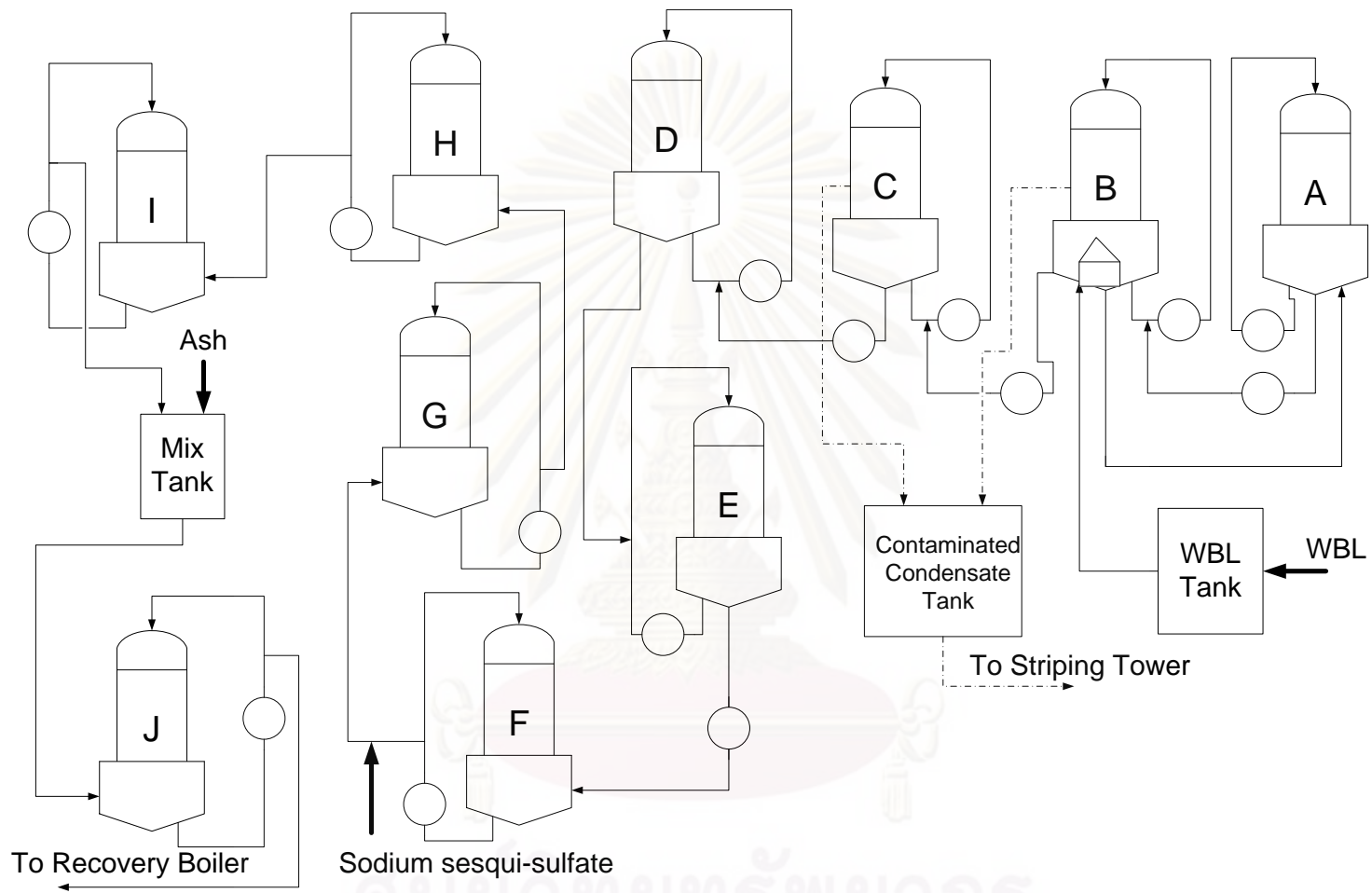
จากผลการศึกษาของ Karl B. Pettersson [11] พบว่าในการเติมแอสและสารอื่นที่มีองค์ประกอบของโซเดียมซัลเฟตควรเติมในเครื่องระเหยตัวสุดท้ายก่อนที่ของเหลวดำจะถูกปั๊มเข้าสู่หม้อไอน้ำนำสารเคมีกลับคืนจะเป็นการลดการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหยได้ แต่เนื่องจากโซเดียมซัลเฟตมีสถานะเป็นของเหลว หากเติมลงในเครื่องระเหยตัวสุดท้ายอาจจะทำให้ความเข้มข้นของของเหลวต่ำลง รูปที่ 4.2 แสดงรูปตำแหน่งในการเติมโซเดียมซัลเฟตและแอสก่อนการปรับปรุง โดยเติมโซเดียมซัลเฟตเข้าเครื่องระเหย G และเติมแอสที่เครื่องระเหย J รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซัลเฟตและแอส โดยเติมโซเดียมซัลเฟตในเครื่องระเหยที่ตำแหน่งที่ G และเติมแอสที่เครื่องระเหยตำแหน่ง J



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



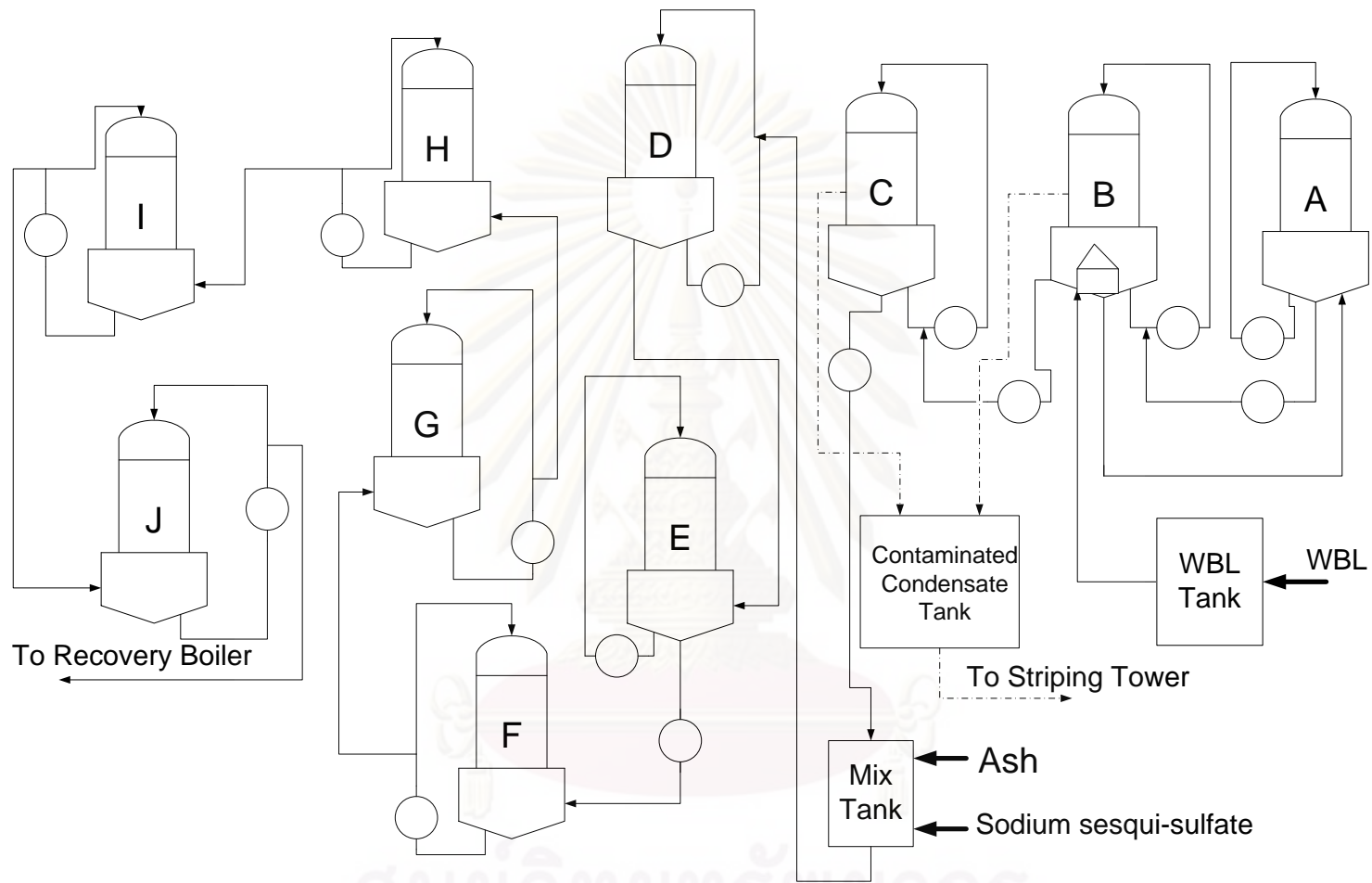
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสเบบที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการศึกษาของ Vaistomaa และคณะ [12] พบว่า หากเติมแอสและสารอื่นที่มีองค์ประกอบของโซเดียมซัลเฟตหลังจากแยก Soap ออกจากของเหลวดำ เมื่อที่ของเหลวดำมีความเข้มข้นไม่เกิน 65% dry solid จะทำให้โซเดียมซัลเฟตและองค์ประกอบอื่นของแอสละลายในของเหลวดำได้หมดเพราะยังไม่เกินค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ องค์ประกอบใน Soap ได้แก่ กรดไขมันและเรซิน มีลักษณะเป็นฟองสีขาวขนาดเล็กคล้ายโฟมลอยอยู่บนผิวของของเหลวดำ แยก Soap ออกจากของเหลวดำเพื่อลดโฟมและลด contaminated condensate ในของเหลวดำ การเติมแอสเป็นการเพิ่มตัวล่อผลึก (seed crystal) ในของเหลวดำ ผลึกที่เกิดขึ้นจะเกาะกับตัวล่อผลึกแล้วตกลงในของเหลวดำแทนที่จะไปเกาะที่พื้นผิวของเครื่องระเหย ซึ่งเป็นการลดการเกิดตะกักรันบนพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยได้ แต่เนื่องจาก Soap มีเฉพาะในเยื่อเส้นใยยาว ซึ่งเยื่อที่ผลิตได้จากโรงงานเป็นเยื่อเส้นใยสั้น ดังนั้นควรเติม โซเดียมซัลเฟตและแอส หลังแยก contaminated condensate ออกจากของเหลวดำแล้ว รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งการเติมโซเดียมซัลเฟตและแอส แบบที่ 2 โดยเติมโซเดียมซัลเฟตและแอสที่ถังผสม (Mix Tank) จากนั้นบ่อนของเหลวดำจากถังผสมเข้าสู่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ D



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการเติมโซเดียมซีควิซัลเฟตและแอสเบบที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้หาปัจจัยที่มีผลกระทบและวิธีการควบคุมการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหย โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณของโซเดียมซัลเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมทั้งหมดในของเหลวดำ และคำนวณหาค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ จากนั้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟตและแอส

ผลการ คำนวณหาค่าวิกฤตการละลายของของแข็งในของเหลวดำเมื่อพิจารณาของเหลวดำตำแหน่งที่ 5 คือ ตัวอย่างของเหลวดำหลังเข้าเครื่องระเหย F และหลังเติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟต ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำ มากคือ 0.83 % แสดงว่าสมการที่ใช้ทำนายตำแหน่งในการเกิดตะกั่วมีความสอดคล้องกับตำแหน่งของเครื่องระเหยที่เกิดตะกั่วจริง ดังนั้น สมการที่ใช้ในการทำนายสามารถทำนายผลการเกิดตะกั่วได้จริง

วิธีการควบคุมการเกิดตะกั่วในเครื่องระเหยทำได้โดยการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟตและแอส แบ่งตำแหน่งการเติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟตและแอส ออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 เติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟต ที่เครื่องระเหยตำแหน่ง G และเติมแอสที่เครื่องระเหยตำแหน่ง J และแบบที่ 2 เติมโซเดียมซี้ควิซัลเฟตและแอสในถังผสม จากนั้นป้อนของเหลวดำจากถังผสมเข้าสู่เครื่องระเหยตำแหน่งที่ D

รายการอ้างอิง

- [1] โครงการส่งเสริมการพัฒนากระบวนการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม. การผลิตเยื่อกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf.
- [2] double A paper. องค์ประกอบของกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.doublepaper.com/knowing/paper_element1.pdf.
- [3] double A paper. ประเภทของกระดาษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.doublepaper.com/knowing/paper_type1.pdf.
- [4] Geankoplis, C.J.. Transport Process and Separation Process Principles. 4th ed. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 2003.
- [5] Foust, A.S., Wenzel L.A., Clump C.W., Manus L., and Anderson L.B.. Principle of Unit Operations. New York : John Wiley & Son, 1980.
- [6] Seader, J.D., and Henley, E.J.. Separation Process Principles. 2^{ed}. Hoboken, N.J : John Wiley & Son, 2006.
- [7] Grace, T. M.. Solubility limits in black liquor. . AIChE Symposium Series (1976).
- [8] Rosier, M.A.. Model to predict the precipitation of burkeite in the multiple-effect evaporator and techniques for controlling scaling. Tappi Journal (1997) : 203-209.
- [9] Adams, T.N.. Sodium salt scaling in black liquor evaporators and concentrators. Tappi Journal (June 2001).
- [10] Bialik, M.A., Theliander, H., and Sedin, P.. Solubility and solid-phase composition in Na₂CO₃-Na₂SO₄ solutions at boiling temperature: A modeling approach. Ind. Eng. Chem. Res. (2008) : 3233–3238.
- [11] Pizer, K.S.. Thermodynamics; McGraw-Hill Series in Advanced Chemistry. New York : McGraw-Hill, 1995.
- [12] Wadsbor, R., and Rådeström, R.. Modeling of the solubility of different inorganic sodium salts in black liquor under varying conditions. Tappi Journal (March 2009).

- [13] Pettersson, K.B.. Method of covering the chemical losses in pulp production. US Patent 4533433(1985).
- [14] Vaistomaa, J., Kaila, J., Rikkinen, J., and Knuutila, M.. Method for the treatment of spent liquor from kraft pulp production. US Patent 5647955 (1997).
- [15] Steinhagen, H.M.. Mitigation of process heat exchanger fouling: An integral Approach. Trans IchemE (February 1998).
- [16] Shi, B., and Rousseau, R.W.. Crystal properties and nucleation kinetics from aqueous solutions of Na_2CO_3 and Na_2SO_4 . Ind. Eng. Chem. Res. (2001) : 1541-1547.
- [17] Shi, B., and Rousseau, R.W.. Structure of burkite and a new crystalline species obtained from solutions of sodium carbonate and sodium sulfate. J. Phys. Chem. (2007) : 6932-6937.
- [18] Chen, F.C., and Gao, Z.. An analysis of black liquor falling film evaporation. International journal of heat and mass transfer (2004) : 1657-1671.
- [19] Shevchenko, S.M., Duggirala, P.Y., and Kouznetsov, D.L.. Method of monitoring and inhibiting scale deposition in pulp mill evaporators and concentrators. WO 2008/141121 A1 (20 November 2008).



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นในของเหลวดำ (%dry solid)

ตำแหน่งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (g)	น้ำหนัก ตัวอย่าง หลังเจือ จาง (g)	น้ำหนัก บีกเกอร์ (g)	น้ำหนัก ตัวอย่าง ก่อนอบ (g)	น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ		
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	2.1021	-	46.1917	-	46.5300	46.5487	46.5489
2	5.0931	30.1200	50.8474	2.0115	50.9685	50.9790	50.9794
3	5.4282	32.1679	49.6251	2.0208	49.7596	49.7621	49.7625
4	5.1228	32.3717	51.5685	2.0518	51.6965	51.7085	51.7087
5	5.0124	33.3594	50.9320	2.0404	51.0857	51.0901	51.0906
6	5.2015	30.4758	50.3543	2.0283	50.5605	50.5837	50.5841
7	5.0293	30.1250	51.8444	2.0631	52.0861	52.0824	52.0827
8	5.1568	33.0100	49.7135	2.0338	49.9121	49.9394	49.9399
9	5.2023	30.301	51.9835	2.0658	52.0586	52.1164	52.1169

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์ Na_{total}

ตำแหน่งที่	น้ำหนัก คลูซีเบอร์ (g)	น้ำหนัก ตัวอย่าง ก่อนเผา (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	Na_{total} ที่อ่านได้ (ppm)		
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	63.7457	3.3822	64.0208	0.0212	0.0212	0.0217
2	64.945	3.1245	65.4636	0.0529	0.0526	0.0531
3	59.2129	3.3854	59.8326	0.0567	0.0559	0.0565
4	53.9514	3.0516	54.5193	0.0511	0.0511	0.0512
5	59.8206	3.2343	60.6507	0.0724	0.0724	0.0727
6	61.9406	3.1276	62.8802	0.081	0.0819	0.0825
7	59.198	3.3234	60.3761	0.0902	0.0903	0.0905

ตำแหน่งที่	น้ำหนัก คลูซีเบอร์ (g)	น้ำหนัก ตัวอย่าง ก่อนเผา (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	Na _{total} ที่อ่านได้ (ppm)		
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
8	56.5247	3.3679	57.6142	0.0971	0.0988	0.0976
9	65.6246	3.1548	66.3346	0.71	0.0611	0.0612

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลดิบในการหาปริมาณ Na₂SO₄

ตำแหน่งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง (g)	น้ำหนัก กระดาษ กรอง(g)	น้ำหนัก คลูซีเบอร์ (g)	น้ำหนักหลังอบ(g)			น้ำหนัก ตะกอน (g)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	0.3024	0.8672	59.1759	60.0984	60.1000	60.1006	0.0575
2	0.3036	0.8886	53.874	53.8245	54.8442	54.8445	0.0819
3	0.3042	0.8488	61.9036	61.8098	62.8221	62.8225	0.0701
4	0.3089	0.8787	56.4836	57.4356	57.4523	57.4524	0.0901
5	0.3176	0.8823	63.7322	64.6981	64.7249	64.7251	0.0895
6	0.3090	0.8573	64.9151	64.8422	65.8641	65.8644	0.0920
7	0.3077	0.8774	59.7991	60.7526	60.7666	60.7669	0.0704
8	0.3004	0.8861	65.5912	65.5403	66.5641	66.5644	0.0871
9	0.312	0.8469	59.1835	59.1879	60.1424	60.1421	0.1117

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลดิบในการหาปริมาณ Na₂CO₃

ตำแหน่งที่	น้ำหนัก ตัวอย่าง(g)	น้ำหนักกระดาษกรอง(g)	น้ำหนักตะกอนหลังอบ(g)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.2079	0.8542	0.8502	0.8836	0.8839
2	0.2263	0.8527	0.8547	0.8890	0.8895
3	0.2069	0.8516	0.8521	0.8761	0.8764
4	0.2189	0.8525	0.8598	0.8874	0.8877
5	0.2106	0.8539	0.8513	0.8845	0.8849
6	0.2083	0.8532	0.8578	0.8876	0.8879

ตำแหน่งที่	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	น้ำหนักกระดาษกรอง(g)	น้ำหนักตะกอนหลังอบ(g)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
7	0.2212	0.8575	0.8547	0.8843	0.8840
8	0.2161	0.8585	0.8593	0.8864	0.8860
9	0.2175	0.8534	0.8492	0.8817	0.8819

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลดิบการเผาของของเหลวดำ

ตำแหน่งที่	น้ำหนักคลูซีเบอร์(g)	น้ำหนักตัวอย่าง(g)	น้ำหนักหลังเผา(g)
1	59.8524	20.2114	61.5688
2	63.7978	20.0830	67.1786
3	62.0549	20.1994	66.8960
4	54.0053	20.1251	57.7266
5	59.2426	20.0479	64.6637
6	65.6583	20.2059	71.6874
7	56.6049	20.3379	63.8330
8	59.2254	20.2855	66.5060
9	65.6072	21.1014	65.6072

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่าวิกฤตของของแข็งในของเหลวดำ

$$\% Error = \frac{(Real\ data - Calculate\ data)}{Real\ data} \times 100$$

<i>% Error</i>	=	ค่าความคลาดเคลื่อน
<i>Real data</i>	=	ค่าจริงจากโรงงาน
<i>Calculate data</i>	=	ค่าที่ได้จากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมัญญา รุดติษฐ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2528 จังหวัดสกลนคร มีพี่น้องรวม 2 คน เป็นบุตรคนโตของครอบครัว สำเร็จการศึกษาในระดับในระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2550 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์เช่นเดียวกับระดับปริญญาตรี ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย