

การเพิ่มการกักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต
ในกระดาษโดยใช้พอลิอะคริเลตและพอลิอะคริลาไมด์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RETENTION ENHANCEMENT OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE
AND NANO CALCIUM CARBONATE IN PAPER
USING POLYACRYLATE AND POLYACRYLAMIDE

Miss Monnapa Lapnapornwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มการกักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด
ตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดาษโดย
ใช้พอลิอะคริเลตและพอลิอะคริลาไมด์

โดย

นางสาวมนต์นภา ลัภนพรวงศ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรทวิ พึ่งรัศมี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชยาน์ พงศ์สถาปตี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด)

มนต์นภา ลัภนพรวงค์ : การเพิ่มการกักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดาษโดยใช้พอลิอะคริเลตและพอลิอะคริลาไมด์ (RETENTION ENHANCEMENT OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE AND NANO CALCIUM CARBONATE IN PAPER USING POLYACRYLATE AND POLYACRYLAMIDE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.กุนทีณี สุวรรณกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.วันทนี พุกกะคุปต์, หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงผลจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างและโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว เพื่อเพิ่มปริมาณการกักเก็บตัวเติม 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตภายในเนื้อกระดาษ โดยใช้เยื่อเคมีพอกทางการค้าในอัตราส่วนเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 ของน้ำหนักแผ่นทดสอบ นำไปบดเยื่อเพื่อให้มีค่าสภาพการระบายน้ำ 325 ± 25 mL CSF จากนั้นศึกษาถึงปริมาณการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์และโซเดียมพอลิอะคริเลตที่เหมาะสมสำหรับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งสองชนิด เพื่อให้มีปริมาณการกักเก็บภายในเนื้อกระดาษที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักแผ่นทดสอบ โดยพบว่าเมื่อเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งส่งผลให้มีปริมาณการกักเก็บสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตในสารแขวนลอยแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ปริมาณการกักเก็บตัวเติมภายในกระดาษลดลง โดยเฉพาะในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคที่มากเกินไป ส่งผลให้อนุภาคเล็ก ๆ ลอดไปกับน้ำผ่านรูตะแกรงระหว่างทำการขึ้นแผ่น เมื่อได้ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่งแล้วนั้นจึงได้ศึกษาถึงการใช้ร่วมกันระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสัดส่วนที่ต่างกัน ตั้งแต่ 100:0 75:25 50:50 25:75 ถึง 0:100 ในการปรับปรุงสมบัติกระดาษโดยเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งใด ๆ พบว่าแม้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้สภาพพิมพ์ได้และสมบัติทางทัศนศาสตร์ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสัดส่วนของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นกลับทำให้ความเรียบของผิวกระดาษและความหนาแน่นของแผ่นทดสอบลดลง นอกจากนี้เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงฉีกพบว่าเกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นเมื่อแผ่นทดสอบฉีกขาด

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5872122923 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS: FILLER, NCC, PAPERMAKING, PAPER PROPERTIES, PCC

MONNAPA LAPNAPORNWONG: RETENTION ENHANCEMENT OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE AND NANO CALCIUM CARBONATE IN PAPER USING POLYACRYLATE AND POLYACRYLAMIDE. ADVISOR: KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph.D., pp.

The aim of this research is to study the effects of using cationic polyacrylamide (CPAM) as a retention aid and sodium polyacrylate (NaPA) as a dispersant (exhibiting dispersing ability) in order to enhance retention of 2 fillers, i.e. precipitated calcium carbonate (PCC) and nano calcium carbonate (NCC), in paper. The pulp was mixed commercial bleached kraft pulp, with a hardwood/softwood ratio of 70:30 by weight which was then beaten to 325 ± 25 mL CSF. The amount of CPAM and NaPA additions was individually optimized in order to get the total filler retention of 30%. The experimental results showed the addition of CPAM significantly offered filler retention, especially when using at 1.1 wt.% of dry pulp weight. Meanwhile, NaPA decreased filler retention particularly in NCC-containing suspension due to excessive deagglomeration. However, the dispersed NCC particles were generally too small to be entrapped in the sheet structure. It could be easily lost as white water during handsheet forming process. When the optimum amount of additives was determined, the effects of mixed PCC and NCC addition at five different ratios between 100:0 75:25 50:50 25:75 and 0:100 on paper properties compared with the controlled condition were observed. It was shown that PCC and NCC provided similar printability and optical properties. However, when the proportion of NCC was increased, the apparent density and smoothness of paper handsheets were decreased. During tensile and tear testing, it was found that there was some misting of filler particles in the handsheets with large amount of NCC.

Department: Imaging and Printing Student's Signature

Technology Advisor's Signature

Field of Study: Pulp and Paper Co-Advisor's Signature

Technology

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จและความเมตตาและช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้การดูแลเอาใจใส่ ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ พรทวี พึ่งรัมย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด ที่ช่วยเหลือในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำด้วยความเอาใจใส่ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำมาโดยตลอด ขอขอบคุณ อาจารย์ จุฬพงษ์ พาณิชกรียงไกร ที่ให้การดูแลช่วยเหลือให้คำแนะนำในทุกด้าน โดยเฉพาะกระบวนการทดสอบการพิมพ์และโปรแกรมในการวิเคราะห์คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ และห้องปฏิบัติการทดสอบกระดาษ สำหรับสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณพี่สมชาย ภาชินวร ที่คอยช่วยเหลือในการทำการทดลองต่าง ๆ รวมถึงพี่ ๆ เจ้าหน้าที่ หลักสูตรเยื่อและกระดาษ และภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ทุกคนที่ให้ความเมตตาและความช่วยเหลือในการประสานงานและงานเอกสารต่าง ๆ

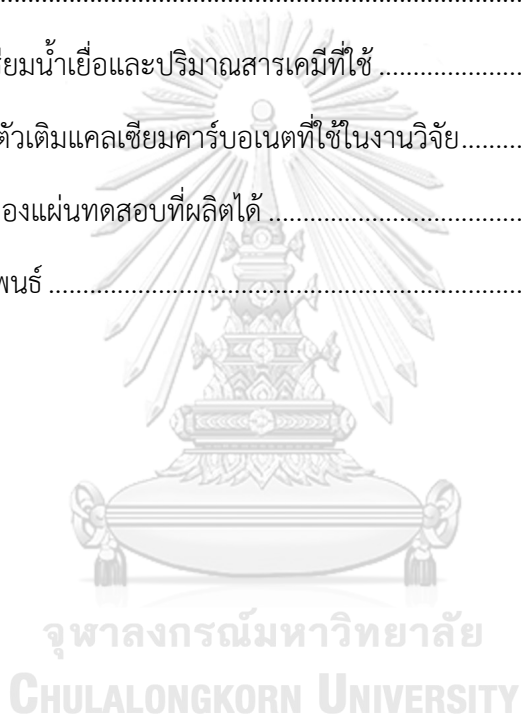
ขอขอบพระคุณคุณ บริษัทเอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เยื่อกระดาษ บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์สารช่วยกระจายตัว บริษัท เคมีร่า (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์สารเพิ่มการตกค้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และ บริษัท เซอร์ติฟายด์ แล็บ คอนซัลติง จำกัด (CLC) ที่ความอนุเคราะห์เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า และให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องมือทดสอบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 องค์ประกอบของกระดาษ.....	4
2.1.1 องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย.....	4
2.1.2 องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใย.....	6
2.2 สมบัติของกระดาษ.....	14
2.2.1 สมบัติทางโครงสร้าง.....	14
2.2.2 สมบัติเชิงกล.....	16
2.2.3 สมบัติด้านพื้นผิวและสมบัติการดูดซึม.....	18
2.2.4 สมบัติทางทัศนศาสตร์.....	19
2.3 กระบวนการพิมพ์แบบไร่แรงกด.....	21

2.3.1 การพิมพ์อิงก์เจ็ต (Inkjet printing)	21
2.3.2 การวัดค่าต่าง ๆ ในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์.....	23
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	26
3.1.2 อุปกรณ์.....	27
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
ตอนที่ 1 การเตรียมเยื่อและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเต็ม.....	32
ตอนที่ 2 การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง	33
ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	41
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเต็ม	41
4.2 ปริมาณที่เหมาะสมของการเติมสารเติมแต่ง	45
4.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคลอีนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง.....	45
4.2.2 ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว.....	49
4.3 ผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ.....	62
4.3.1 สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ (Optical properties).....	63
4.3.2 ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ (Apparent density).....	65
4.3.3 ความเรียบของแผ่นทดสอบ (Smoothness).....	66
4.3.4 ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ (Air resistance).....	67

4.3.5 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index).....	68
4.3.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)	69
4.3.7 ผลการควบคุมคุณภาพการพิมพ์ในการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing).....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก	82
ก. การคำนวณการเตรียมน้ำเยื่อและปริมาณสารเคมีที่ใช้	83
ข. สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัย.....	88
ค. สมบัติด้านต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ความแตกต่างระหว่างเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง.....	6
ตารางที่ 2-2 สมบัติทางกายภาพของตัวเติมดินขาว ทัลก์ และแคลเซียมคาร์บอเนต.....	8
ตารางที่ 3-1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อเพื่อวัดค่าศักย์ซีต้า.....	34
ตารางที่ 4-1 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และสีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC).....	42
ตารางที่ 4-2 ปริมาณการกักเก็บ ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	52
ตารางที่ 4-3 ปริมาณการกักเก็บ ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	54
ตารางที่ 4-4 ค่าสีของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	55
ตารางที่ 4-5 ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	56
ตารางที่ 4-6 ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ 4-7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ของแผ่นทดสอบเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ.....	58
ตารางที่ 4-8 สัญลักษณ์ของภาวะแผ่นทดสอบที่กำหนด.....	62
ตารางที่ 4-9 ค่าสี (L^* a^* และ b^*) ของแผ่นทดสอบ.....	64
ตารางที่ 4-10 คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) ของแผ่นทดสอบ.....	72
ตารางที่ 4-11 คุณภาพตัวอักษร (Text quality) ของแผ่นทดสอบ.....	73
ตารางที่ 4-12 สมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง...	74

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2-1 โครงสร้างผลึกแคลไซต์ [1].....	9
ภาพที่ 2-2 สัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด [1]	10
ภาพที่ 2-3 ภาพวาดการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคด้วย Loop, Train และ Tail ของสายโซ่ พอลิเมอร์ด้วยกลไกการกักเก็บแบบ Bridge model [13]	13
ภาพที่ 2-4 แผนผังกลไกการกักเก็บแบบ Dual polymer flocculation [13]	13
ภาพที่ 2-5 ปริภูมิสีสามมิติ (CIELAB color space).....	20
ภาพที่ 2-6 เทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ต [49]	22
ภาพที่ 2-7 การพิมพ์อิงค์เจ็ต [49].....	22
ภาพที่ 3-1 แผนผังการเตรียมเยื่อและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมทางการค้า.....	30
ภาพที่ 3-2 แผนผังการหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง	30
ภาพที่ 3-3 แผนผังการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ.....	31
ภาพที่ 3-4 สเกลมาตรฐานที่ใช้เทียบจำนวนพิกเซล	39
ภาพที่ 3-5 Test target ที่ใช้ในการทดสอบสภาพพิมพ์ได้.....	40
ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC).....	42
ภาพที่ 4-2 องค์ประกอบทางเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC).....	43
ภาพที่ 4-3 การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อได้รับความร้อน	44

ภาพที่ 4-4 ค่าศักย์ซีต้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ ปริมาณต่าง ๆ ของน้ำเยื่อที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโน แคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเทียบกับน้ำเยื่อที่ไม่เติมตัวเติม (Pulp).....45

ภาพที่ 4-5 ปริมาณเถ้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ ปริมาณต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC).....47

ภาพที่ 4-6 สันฐานวิทยาของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เมื่อเติมและไม่เติมแคตไอออนิก พอลิอะคริลาไมด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า...48

ภาพที่ 4-7 ค่าศักย์ซีต้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ใน ภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC).....50

ภาพที่ 4-8 ปริมาณเถ้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งใน แผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียม คาร์บอเนต (NCC).....51

ภาพที่ 4-9 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียม คาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัว (NaPA) ที่ระดับต่าง ๆ52

ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง กับปริมาณการ กักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) ที่ปริมาณต่าง ๆ53

ภาพที่ 4-11 สมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติม สาร ช่วยกระจาย (NaPA) ตัวที่ระดับต่าง ๆ54

ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง กับปริมาณการ กักเก็บของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ที่ปริมาณต่าง ๆ.....55

ภาพที่ 4-13 สันฐานวิทยาของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน ในภาวะ ต่าง ๆ เมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า.....60

ภาพที่ 4-14 สัณฐานวิทยาของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในภาวะต่าง ๆ เมื่อ
เติมและไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวจากกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า.....61

ภาพที่ 4-15 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบ.....63

ภาพที่ 4-16 ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ.....65

ภาพที่ 4-17 ความเรียบของแผ่นทดสอบ66

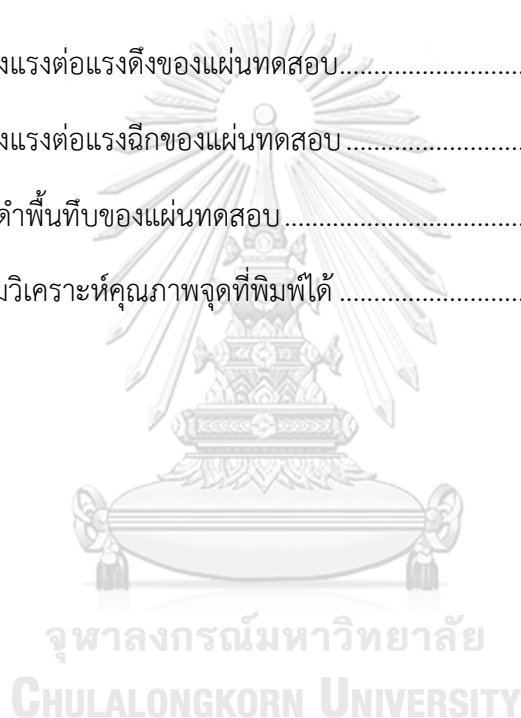
ภาพที่ 4-18 ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ67

ภาพที่ 4-19 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ.....68

ภาพที่ 4-20 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบ69

ภาพที่ 4-21 ค่าความดำพื้นทึบของแผ่นทดสอบ70

ภาพที่ 4-22 โปรแกรมวิเคราะห์คุณภาพจุดที่พิมพ์ได้71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษพิมพ์/เขียนนิยมเติมตัวเติมเพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในปริมาณร้อยละ 20-35 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าตัวเส้นใย [1] โดยสมบัติทางทัศนศาสตร์ เชิงกล หรือสภาพพิมพ์ได้ของกระดาษขึ้นอยู่กับสมบัติและชนิดของตัวเติม ตัวเติมที่อาจใช้เติมในการผลิตกระดาษ ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลก์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยนิยมเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากให้ค่าความขาวและความขาวสว่างสูงกว่าดินขาว และมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งยังมีสมบัติเด่นในการให้ความเรียบ ความทึบแสง และดูดซับหมึกพิมพ์ได้ดี [2]

แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เติมในกระดาษพิมพ์/เขียนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (Ground calcium carbonate) ซึ่งเป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบด เช่น หินปูน หินอ่อน และชอล์ก โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 10-100 ไมโครเมตร และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated calcium carbonate) เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติมาผ่านกระบวนการตกตะกอนด้วยปฏิกิริยาเคมี ลักษณะเป็นผงขนาดเล็กที่เกิดจากการตกตะกอน มีขนาดเล็กกว่า 3 ไมโครเมตร รูปร่างของผลึกอาจแตกต่างกันตามวิธีการผลิต โดยนิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ทางเคมีมากกว่า พื้นผิวเรียบกว่า มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจะเข้าไปขวางการเกิดพันธะระหว่างเส้นใย ทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง ผิวหน้ากระดาษไม่เรียบ และความคมของผลึกอนุภาคตัวเติมที่ไปเกาะตามส่วนต่าง ๆ ของเครื่องผลิตกระดาษและเครื่องพิมพ์ อาจทำให้เกิดรอยถลอกหรือรอยขีดข่วนได้ ในขณะที่ตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับหมึกพิมพ์ได้ดีกว่า เพิ่มการกระเจิงแสง และเพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์ โดยขัดขวางการเกิดพันธะระหว่างเส้นใยน้อยกว่า ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ทดลองใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate) เป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษ [2, 3] โดยนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกตะกอนเช่นเดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนโดยทั่วไป แต่อาจมีการเติมสารลดแรงตึงผิวและปรับภาวะในการตกตะกอนเพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร หรือ 1 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามยังอนุภาคมีขนาดเล็กพบว่ามีข้อจำกัดในด้านการเกาะรวมกันของอนุภาคส่งผลให้

กระจายตัวได้ไม่สม่ำเสมอ และมีปัญหาในการกักเก็บในเครือข่ายของเส้นใยโดยวิเคราะห์ได้จากน้ำที่ลอดผ่านตะแกรง (White water) [4, 5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษพิมพ์/เขียน โดยศึกษาการเพิ่มการกักเก็บของตัวเติมทั้งสองชนิดด้วยการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว และแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับปรุงสมบัติกระดาษ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการใช้พอลิอะคริเลตและพอลิอะคริลาไมด์ เพื่อเพิ่มการกักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดาษ
- 2) เพื่อศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ในการวิจัยนี้ใช้เยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเคมีฟอกทางการค้า ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 ตามลำดับ ตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าเพื่อควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาค
- 2) พิจารณาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง เพื่อเพิ่มปริมาณการกักเก็บแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จากค่าศักย์ซีต้าร่วมกันกับปริมาณเถ้าเมื่อเริ่มมีค่าคงที่
- 3) พิจารณาปริมาณการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในสารแขวนลอยของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จากค่าศักย์ซีต้าภายในระบบ ร่วมกับปริมาณเถ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางทัศนศาสตร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติที่พื้นผิว ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้
- 4) ศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางทัศนศาสตร์ สมบัติเชิงกล และสภาพพิมพ์ได้ในระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ตของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ร่วมกับกระดาษทางการค้า

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

- 1) เนื่องจากการวิจัยนี้ต้องใช้น้ำในการขึ้นแผ่นทดสอบเป็นปริมาณมาก ประกอบกับระหว่างการทำวิจัยนี้มีการปรับปรุงเครื่องกรองน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ภายในห้องปฏิบัติการ จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องกรองน้ำแบบ 5 ขั้นตอน ดังนี้ ไล่กรองหยาบ (Polypropylene, PP) ที่สามารถกรองอนุภาคขนาด 5 ไมโครเมตรได้ คาร์บอนบล็อก (Carbon block: Reduce Chlorine Taste and Odor) ไล่กรองน้ำเกลือ คาร์บอน (Granular Activated Carbon, GAC) ไล่กรองน้ำเรซิน (Resin) และไล่กรองน้ำเซรามิก (Ceramic) เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำให้สม่ำเสมอ
- 2) เนื่องจากสารเพิ่มการตกค้างและสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในงานวิจัย เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ในทางการค้าจึงไม่สามารถทราบข้อมูลในส่วนขงรายละเอียดของมวลโมเลกุล โครงสร้างทางเคมี และความหนาแน่นประจุ เนื่องจากเป็นความลับทางการค้า ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์หลักไในการทำงานของสารเติมแต่งกับอนุภาคภายในระบบโดยละเอียดได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีที่เหมาะสมในการใช้โซเดียมพอลิอะคริเลตและแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เพื่อเพิ่มการกักเก็บตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และข้อมูลผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติกระดาษ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่สำคัญและเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเรื่องขององค์ประกอบของกระดาษ สมบัติกระดาษ กระบวนการพิมพ์ระบบพ่นหมึก การวัดค่าต่าง ๆ ในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 องค์ประกอบของกระดาษ

กระดาษ (Paper) ตามความหมายในพจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 หมายถึง วัตถุเป็นแผ่นบาง ๆ โดยมากทำจากใยเปลือกไม้ ฟาง หญ้า หรือ เศษผ้า เป็นต้น ใช้เขียนหรือพิมพ์หนังสือหรือท่อของและอื่น ๆ [6] อย่างไรก็ตามกระดาษสามารถยึดตัวเป็นแผ่นได้จากการเชื่อมพันธะไฮโดเจนระหว่างเส้นใย โดยทั่วไปจะใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการให้ความแข็งแรงของกระดาษ โดยสามารถจัดกลุ่มขององค์ประกอบของกระดาษได้เป็น 2 กลุ่ม คือ องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย และองค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใยที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน รายละเอียดขององค์ประกอบทั้งสองมีดังนี้

2.1.1 องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย

เส้นใยที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษนั้นได้มาจากส่วนของเนื้อไม้ (Xylem) ของพืชมีเมล็ด โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ พืชเมล็ดเปลือย (Gymnosperm) ซึ่งเป็นกลุ่มของไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ลักษณะใบเหมือนเข็ม ไม้ผลัดใบ มีมากในประเทศเขตร้อน และพืชดอก (Angiosperm) ซึ่งในกลุ่มพืชดอกยังแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ พืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ โดยพืชใบเลี้ยงคู่ (Deciduous) จัดอยู่ในกลุ่มของไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ซึ่งเป็นไม้ผลัดใบ ใบกว้าง เนื้อไม้แข็ง ส่วนใหญ่เป็นไม้ยืนต้นในประเทศเขตร้อนเส้นใยที่ได้จะสั้นกว่าไม้เนื้ออ่อน ซึ่งความแตกต่างระหว่างไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นหรือความแข็งแรงของเนื้อไม้ แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ที่พบในเนื้อไม้เป็นหลัก โดยเส้นใยแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะและสมบัติที่ได้แตกต่างกันไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้ [7]

1) เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน (Softwood fiber)

โดยปกติไม้เนื้ออ่อนที่ได้จากพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของพวกไม้สน เช่น ไพน์ สปรูซ สนสองใบ และสนสามใบ เป็นต้น จะมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ที่พบในเนื้อไม้ในกลุ่มของไม้เนื้ออ่อนคือ เทรคีด (Tracheid) เซลล์พาราเนโคมา (Parenchyma cell) และเรซินเซลล์ (Resin cell) โดยเตรคีดทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำภายในลำต้น ซึ่งโดยทั่วไปจะมีเตรคีดอยู่ประมาณร้อยละ 90-95 ของปริมาตรของเนื้อไม้ มีลักษณะของเซลล์ยาว ตรง บริเวณหัวท้ายเซลล์มักจะเอียงและสอบคล้ายรูปลิ้ม เซลล์ไม่มีรูทงู ยาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตร นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ เยื่อที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะเรียกว่า เยื่อใยยาว และชื่อทางการค้ามักมีตัวอักษร N (Needle) นำหน้า เช่น NBKP (Needle Bleached Kraft Pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเยื่อใยยาวเคมีฟอก โดยมักนำเยื่อใยยาวมาผลิตกระดาษที่ต้องการความแข็งแรงสูง สามารถดูดซับน้ำ และยอมให้อากาศไหลผ่าน แต่ผิวของกระดาษที่ได้จะไม่เรียบ และเนื้อกระดาษไม่สม่ำเสมอ [8]

2) เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood fiber)

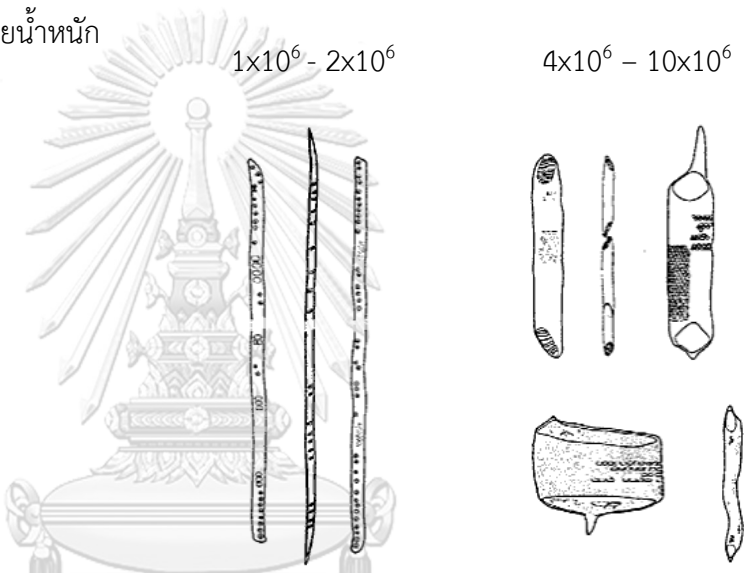
เป็นเส้นใยที่ได้จากเนื้อไม้ของพืชดอกในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่หรือตระกูลไม้ผลัดใบ เช่น ยูคาลิปตัส โอ๊ก เมเปิ้ล เป็นต้น ในกลุ่มของไม้เนื้อแข็งจะพบเซลล์หลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน โดยส่วนใหญ่หน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้นเป็นหน้าที่หลักของเซลล์ไฟเบอร์ (Fiber cell) พบในไม้เนื้อแข็งประมาณร้อยละ 30-75 ของปริมาตรเนื้อไม้ หัวท้ายของเซลล์มีลักษณะสอบแหลม มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ส่วนการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจะเป็นหน้าที่ของเซลล์เวสเซล (Vessel element) ซึ่งเป็นเซลล์ที่ไม่มีชีวิตและหัวท้ายเซลล์ทั้งสองด้านมีรูหรือช่องทงู เยื่อที่ได้จากไม้เนื้อแข็งจะเรียกว่า เยื่อใยสั้น และมีชื่อทางการค้ามักมีตัวอักษร L (Leaf) นำหน้า เช่น LBKP (Leaf Bleached Kraft Pulp) เพื่อระบุว่าเป็นเยื่อใยสั้นเคมีฟอก โดยกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อใยสั้นมีความแข็งแรงต่ำ แต่มีสมบัติด้านความเรียบ ความฟ้าม และความทึบแสงมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาว โดยความแตกต่างระหว่างเส้นใยจากไม้เนื้อแข็งและเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความแตกต่างระหว่างเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง

ดัดแปลงจาก [9, 10]

ลักษณะทางกายภาพ	เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน	เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง
ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร)	3-5	1-2
ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร)	36-43	19-22
ความหนาของผนังเซลล์ (ไมโครเมตร)	3-5	5-11
ความหยาบของเส้นใย (มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยเมตร)	15-25	10-16
จำนวนเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (จำนวนเส้นใยต่อกรัม)	$1 \times 10^6 - 2 \times 10^6$	$4 \times 10^6 - 10 \times 10^6$

ภาพตัวอย่างเซลล์



2.1.2 องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใย

องค์ประกอบในส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยของกระดาษนั้น หมายถึง สารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่เติมเข้าไปในระหว่างการผลิตเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน (Functional additives) หรือเพื่อให้กระบวนการผลิตกระดาษดำเนินไปอย่างราบรื่น (Chemical processing aids) ตัวอย่างสารเคมีที่นิยมใช้เติมลงในกระดาษ ได้แก่ สารกันซึมที่ใส่เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานของเหลวของกระดาษ สารฟอกนวลที่จะช่วยเพิ่มความขาวสว่างให้มากขึ้น สารเพิ่มความแข็งแรงที่ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษทั้งขณะเปียกและขณะแห้ง ตัวเติมใช้เพื่อให้กระดาษมีสมบัติทางทัศนศาสตร์และสภาพพิมพ์ได้ดีขึ้น สารช่วยกระจายตัวเพื่อกระจายอนุภาคของตัวเติมและเส้นใยไม่ให้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน และสารเพิ่มการตกค้างเพื่อเพิ่มปริมาณกักเก็บของเส้นใยและตัวเติมไว้ในกระดาษ เป็นต้น โดยในส่วนต่อจากนี้จะเป็นการอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้

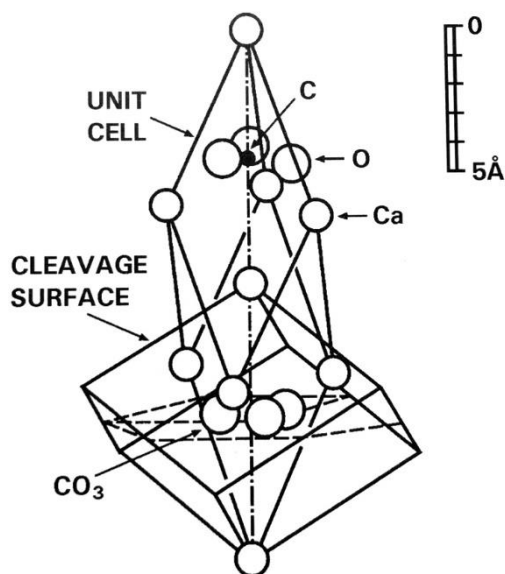
1) ตัวเติม (Fillers)

โดยปกติในกระดาษพิมพ์/เขียนนิยมเติมตัวเติม ลงไปในกระดาษในปริมาณร้อยละ 20-35 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ เพื่ออุดรูพรุนระหว่างเส้นใยเพื่อเพิ่มความเรียบที่ผิวหน้าของกระดาษ เพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์และปรับปรุงสภาพพิมพ์ได้ของกระดาษ นอกจากนี้ตัวเติมยังถูกใช้เพื่อลดต้นทุนในการผลิตกระดาษอีกด้วย เนื่องจากมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใย ตัวเติมที่นิยมใช้ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลก์ เป็นต้น ส่วนตัวเติมบางชนิดที่มีราคาแพงหรือถูกนำไปใช้เฉพาะทางสามารถเรียกว่า สารสี (Pigment) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยจะเติมในปริมาณเพียงร้อยละ 5-10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง การเลือกตัวเติมมาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ จะมีปัจจัยในการพิจารณาหลายประการ ได้แก่ สมบัติทางทัศนศาสตร์ การกระเจิงแสง ความมันวาว ขนาด รูปร่างของอนุภาค พื้นที่ผิว ดัชนีหักเห ความถ่วงจำเพาะ ความเป็นกรด-ด่าง การกระจายตัวของอนุภาค การกักเก็บอนุภาคภายในเครือข่ายของเส้นใย และราคาต้นทุน โดยในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษพิมพ์/เขียนนิยมนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นตัวเติม เนื่องจากให้ค่าความขาว ความขาวสว่าง ดัชนีหักเหสูงกว่าดินขาวและทัลก์ ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ทั้งยังมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีสมบัติเด่นในการเพิ่มความเรียบ และดูดซับหมึกพิมพ์ได้ดี [1, 2]

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ มีโครงสร้างผลึกที่สำคัญ คือ แคลไซต์ (Calcite) อะราโกไนต์ (Aragonite) และวาเทอไรต์ (Vaterite) ซึ่งแคลไซต์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของหินปูนจากธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกดังแสดงในภาพที่ 2-1 และมีรูปผลึกที่สำคัญ คือ Rhombohedral Scalenohedral และ Intermediary prismatic โดยแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (Ground calcium carbonate, GCC) ซึ่งเป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากธรรมชาติมาบด เช่น หินปูน หินอ่อน และชอล์ก โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 10-100 ไมโครเมตร และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated calcium carbonate, PCC) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการตกตะกอน

ตารางที่ 2-2 สมบัติทางกายภาพของตัวเติมดินขาว ทัลก์ และแคลเซียมคาร์บอเนต
ดัดแปลงจาก Krogerus, B. [1]

	ดินขาว	ทัลก์	GCC	PCC
สูตร	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	CaCO_3	CaCO_3
โครงสร้างผลึก	Triclinic, hexagonal platelets	Monoclinic, lamellae	Trigonic, rhombohedral	Scaleno- hedral, rhombo- hedral
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เดซิเมตร)	2.7	2.8	2.7	2.7
ดัชนีหักเห	1.56	1.57	1.6	
ความแข็ง (Mohs scale)	2-2.5	1-1.5	3	
ความขาวสว่าง (ร้อยละ)	> 81	> 82	ซอล์ก: 80-90 หินอ่อน: 85-95	> 93
การกระจายขนาดอนุภาค				
< 10 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	94	84	98	100
< 5 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	75	45	90	100
< 2 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	48	16	40	70
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) (ตารางเมตรต่อกรัม)	10	6	3	10
ศักย์ซีต้า (ζ) (มิลลิโวลต์)	-24 (pH 7)	-19 (pH 9)	-26 (pH 9)	+5 (pH 9)
การสลายตัว (ร้อยละ)				
ที่อุณหภูมิ 600 °C	11	5.5	0-2	0
ที่อุณหภูมิ 925 °C	12	6.3	42	42
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5	9	9	9

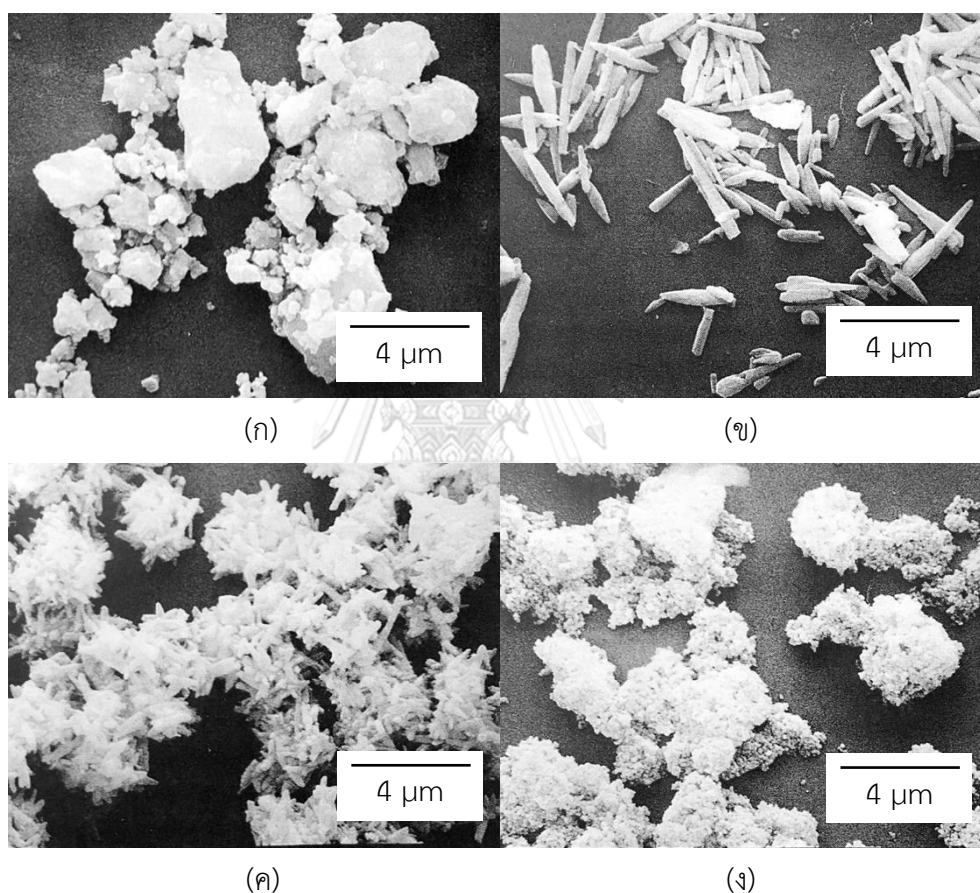


ภาพที่ 2-1 โครงสร้างผลึกแคลไซต์ [1]

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการคาร์บอเนชัน (Carbonation process) โดยนำหินปูนมาเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตออกมาเป็นปูนสุกหรือแคลเซียมออกไซด์ (Quick lime, CaO) แล้วนำปูนสุกไปละลายน้ำเป็นน้ำปูนใส (Lime, Ca(OH)₂) ที่มีลักษณะคล้ายน้ำนม (Milk of lime) จากนั้นอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปภายใต้การควบคุมสภาวะต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิ ความเข้มข้น และเวลา เป็นต้น เพื่อตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีขนาดเล็กกว่า 3 ไมโครเมตร รูปทรงผลึกอาจแตกต่างกันตามวิธีการผลิต ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่สำคัญ คือ อะราโกไนต์ โดยมีรูปทรงพื้นฐานเป็นผลึกแท่งเข็ม (Needles) และแคลไซต์ ที่มีรูปทรง Scalenohedral และ Rhombohedral ดังแสดงในภาพที่ 2-2

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษนิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเป็นตัวเติมมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด เนื่องจากมีความบริสุทธิ์ทางเคมีมากกว่า พื้นผิวเรียบกว่า ขนาดอนุภาคเล็กกว่า มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ให้ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงสูงรวมทั้งมีน้ำหนักเบาและเข้ากับเส้นใยที่เป็นวัตถุดิบหลักในการทำกระดาษได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดหรือตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะเข้าไปขวางการเกิดพันธะระหว่างเส้นใยทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง ผิวหน้ากระดาษไม่เรียบ และความคมของผลึกอนุภาคตัวเติมที่ไปเกาะตามส่วนต่าง ๆ ของเครื่องผลิตกระดาษและเครื่องพิมพ์ อาจทำให้เกิดรอยถลอกหรือรอยขีดข่วนได้ [4] ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนหรือตัวเติมขนาด

อนุภาคเล็กจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับหมึกพิมพ์ เพิ่มการกระเจิงแสง และเพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์ โดยขัดขวางการเกิดพันธะในแผ่นกระดาษน้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [2, 11] ปัจจุบันได้มีการใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano calcium carbonate) เป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษ โดยนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกตะกอนจากปฏิกิริยาเคมีให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กพบว่ามีข้อจำกัดในด้านการเกาะรวมกันของอนุภาคส่งผลให้กระจายตัวได้ไม่สม่ำเสมอ และการกักเก็บภายในเครือข่ายของเส้นใยโดยวิเคราะห์ได้จากน้ำที่ลอดผ่านตะแกรง (White water) [2-5, 12]



ภาพที่ 2-2 สัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [1]

(ก) ผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากหินปูนที่กำลังขยาย 5000 เท่า

(ข) ผลึก Aragonite ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่กำลังขยาย 4500 เท่า

(ค) ผลึก Scalenohedral ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่กำลังขยาย 4500 เท่า

(ง) ผลึก Rhombohedral ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่กำลังขยาย 4500 เท่า

2) สารช่วยกระจายตัว (Dispersant)

สารช่วยกระจายตัวเป็นสารที่ใส่เพื่อช่วยให้อนุภาคของตัวเติมมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นก่อนที่จะเติมลงในน้ำเยื่อ นิยมเติมสารพอลิอะคริเลต (Polyacrylates) และสารพอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยชนิด ประเภท และปริมาณในการเติมของสารช่วยกระจายตัวนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเติม เมื่ออนุภาคตัวเติมมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นจะช่วยส่งผลให้มีพื้นที่ผิวของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น ทำงานร่วมกับสารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น สารเพิ่มการตกค้าง ได้ดีขึ้น รวมถึงทำให้กระดาษมีสมบัติที่ดีขึ้น

3) สารเพิ่มการตกค้าง (Retention aid)

สารเพิ่มการตกค้างเป็นสารที่ช่วยเพิ่มการกักเก็บเส้นใย ไฟน์ (Fines) ซึ่งเป็นเส้นใยหรือชิ้นส่วนของเส้นใยที่มีขนาดเล็ก และอนุภาคตัวเติมให้จับตัวกันและคงอยู่ในเนื้อกระดาษ ในช่วงการระบายน้ำบนตะแกรงลวดเดินแผ่นในเครื่องผลิตกระดาษ โดยนิยมใช้สารพอลิเอไมด์ (Polyamines), แคตไอออนิก/แอนไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (Cationic/Anionic polyacrylamide) และแป้งประจุบวก (Cationic starch) เพื่อเป็นสารเพิ่มการตกค้างในการผลิตกระดาษ ซึ่งสารเคมีประเภทนี้จะทำหน้าที่คล้ายกาวช่วยยึดเหนี่ยวอนุภาคภายในระบบเข้าไว้ด้วยกัน

กลไกในการกักเก็บ (Retention) สามารถอธิบายออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) Sieving หรือการกักเก็บเส้นใยและไฟน์ที่มีขนาดใหญ่บนตะแกรงลวดเดินแผ่นในเครื่องผลิตกระดาษ 2) Mechanical entrapment เป็นการกักเก็บไฟน์และอนุภาคตัวเติมที่มีขนาดเล็กลงมาไว้ในเครือข่ายของเส้นใยในช่วงการระบายน้ำบนตะแกรงลวดเดินแผ่น และ 3) Colloid interaction จะเป็นการกักเก็บไฟน์และอนุภาคตัวเติมที่ขนาดเล็กโดยการดูดซับไว้บนผิวของเส้นใยและทำให้เกิดเป็นกลุ่มก้อนขึ้นมา โดยการเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation หรือ Flocs) นั้นจะขึ้นอยู่กับกลไกของ Colloid interaction ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีที่พื้นผิวของเส้นใย ไฟน์ ตัวเติม สารสี และสารเติมแต่งที่ใช้ โดยกลุ่ม Flocs ที่เกิดขึ้นมานั้นจะถูกกักเก็บอีกทีด้วยวิธี Sieving และ/หรือ Mechanical entrapment ดังนั้นขั้นตอนการเติมสารเพิ่มการตกค้างจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนของ Colloid interaction หรือ Colloid retention ซึ่งมี 4 แบบ โดยต้องการการชน (Collision) เพื่อให้เกิดการสัมผัสและสร้างพันธะร่วมกัน ดังนี้ [9, 13]

- I. Charge neutralization หรือ การทำประจุภายในระบบให้เป็นกลาง (0 mV) โดยปกติแล้วสารที่มีประจุเหมือนกันจะผลักกันทำให้เกิดการกระจายตัวไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Flocs) ดังนั้นการทำ Charge neutralization คือ การเติมสารที่มีประจุตรงข้ามกับ

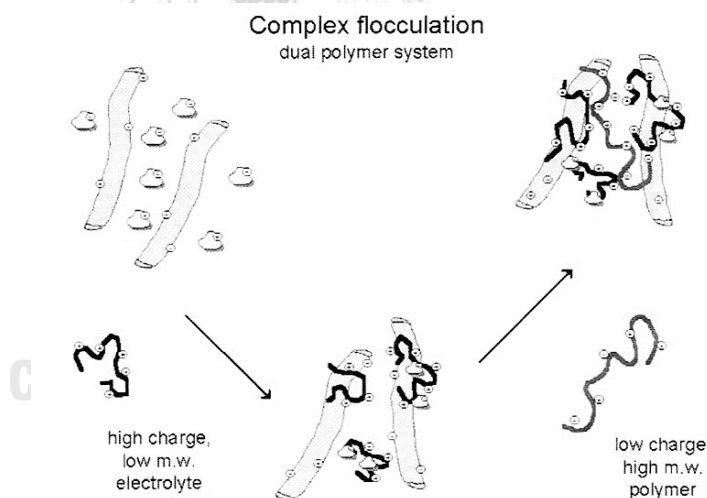
ระบบลงไปทำให้เกิดแรงดึงดูดกันระหว่างอนุภาค (หรือแรง Van der Waals) จนเกิดการรวมเป็นกลุ่มของอนุภาค (Flocculation) ขึ้นมา แต่กลุ่ม Floccs ที่ได้จากการเติมสารที่มีประจุบวก หรือพอลิเมอร์ประจุบวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Low molecular weight cationic polymers) เช่น กลุ่มของพอลิอะลูมิเนียม (Polyaluminum species) พอลิเอทิลีนเนมิน (Polyethyleneimine) และพอลิเอมีน (Polyamines) เข้าไปในระบบนั้นจะเป็น Soft floccs คือ มีโครงสร้างที่หลวมและไม่ทนต่อแรงเฉือน (Shear force) แต่สามารถเกิดการกลับมารวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหม่ได้ (Reflocculation)

- II. Patch model เป็นการใส่สารเพิ่มการตกค้าง (Retention aids) จำพวกพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกับระบบ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ควรมีค่าความหนาแน่นประจุสูง และมีค่ามวลโมเลกุลต่ำถึงปานกลาง เช่น พอลิเอทิลีนเนมิน (Polyethyleneimine) พอลิเอมีน (Polyamine) และพอลิอะคริลาไมด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (Polyacrylamide of low molecular weight) เมื่อใส่พอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามลงไปแล้ว จะถูกดูดซับไว้บนผิวหน้าของอนุภาคภายในระบบ ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับพอลิเมอร์นั้น แล้วเกิดการจับตัวกันเป็นแผ่นเรียบ (Patch) ขึ้นมา
- III. Bridge model เป็นการใส่พอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกับระบบเป็นสารเพิ่มการตกค้าง เหมือนในกรณีของ Patch model แต่พอลิเมอร์ที่ใช้ในแบบ Bridging model นั้นมีค่าความหนาแน่นประจุปานกลาง แต่มีค่ามวลโมเลกุลสูง เช่น โคพอลิเมอร์ของพอลิอะคริลาไมด์ (Copolymers of polyacrylamide) พอลิเมอร์ที่เติมลงไปในระบบจะถูกดูดซับบนผิวหน้าของอนุภาคในระบบซึ่งมีประจุตรงข้าม เกิดเป็นชุดของ Loop และ Train ขึ้นมา โดย Loop คือส่วนของพอลิเมอร์ที่ยื่นออกไปในระบบ ในขณะที่ Train คือส่วนของพอลิเมอร์ที่ถูกดูดซับที่ผิวหน้าของอนุภาค เมื่อส่วนที่เป็น Loop ได้ยื่นเกินออกมา (หรือเรียกว่า Tail) เจออีกอนุภาคหนึ่ง ก็จะถูกดูดซับโดยอีกอนุภาคนั้นทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างอนุภาคส่งผลให้เกิด Floccs ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-3 โดย Floccs ที่ได้จาก Bridging model นี้เป็น Hard floccs คือค่อนข้างทนต่อแรงเฉือน การเติมสารเพิ่มการตกค้างแบบ Bridging model มากเกินไป จะทำให้เกิดการผลัดกัน ไม่เกิดการเกาะรวมกันเป็นกลุ่มของอนุภาค



ภาพที่ 2-3 ภาพวาดการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคด้วย Loop, Train และ Tail ของสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยกลไกการกักเก็บแบบ Bridge model [13]

- IV. Dual polymer flocculation เป็นการใส่สารเพิ่มการตกค้างร่วมกันระหว่างพอลิเมอร์ประจุบวก และพอลิเมอร์ประจุลบ โดยมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากใส่ Low molecular weight cationic polymer เช่น Polyethyleneimine, Poly-DADMAC, หรือ แป้ง ประจุบวก เพื่อสร้างการดูดซับระหว่างตัวเติมที่มีประจุลบกับผิวเส้นใยแบบ “Patch” ขึ้นมาก่อน จากนั้นเติม High molecular weight anionic polymer เช่น Anionic polyacrylamide เพื่อสร้าง “Bridge” สำหรับการกักเก็บระหว่างอนุภาคขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 แผนผังกลไกการกักเก็บแบบ Dual polymer flocculation [13]

หมายเหตุ: โดยทั่วไปแล้วผิวของเส้นใยเซลลูโลสมีประจุเป็นลบจากหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-)

2.2 สมบัติของกระดาษ

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีในการทดสอบเพื่ออธิบายสมบัติของกระดาษ โดยควบคุมกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น ISO SCAN และ TAPPI เป็นต้น ทั้งนี้กระบวนการและผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสามารถใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ การทดสอบสมบัติของกระดาษนั้นสามารถสุ่มตัวอย่างทดสอบเพื่อเทียบสมบัติของกระดาษทั้งหมดได้ โดยทำการสุ่มตามมาตรฐาน ISO 186 [14] หรือ TAPPI T 400 [15] เช่น การเลือกบริเวณที่จะสุ่ม ปริมาณ และการเลือกตัวอย่างทดสอบ เป็นต้น การสุ่มทดสอบกระดาษนั้นสามารถทดสอบได้ทั้งขณะผลิตกระดาษก่อนเก็บเข้าม้วน (On-line) และหลังเก็บเข้าม้วนโดยเลือกสุ่มตัวอย่างจากบริเวณต่าง ๆ ของม้วนกระดาษ (Off-line) ซึ่งการทดสอบทั้ง on-line และ off-line นั้นจะใช้มาตรฐานในการทดสอบแยกกัน มีข้อดีข้อเสียต่างกันดังนี้ การทดสอบแบบ on-line จะเป็นการวัดข้อมูลแบบต่อเนื่อง โดยใช้รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่างกันเพื่อวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ เช่น น้ำหนักมาตรฐาน ความชื้น ความพรุน ความหนา และสมบัติทางทัศนศาสตร์ของกระดาษ แต่การวัดด้วยวิธีนี้ยังไม่สามารถใช้เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ส่วนการทดสอบแบบ off-line จะเป็นการทดสอบสมบัติของกระดาษหลังเก็บเข้าม้วนแล้ว โดยสามารถเลือกบริเวณที่ต้องการทดสอบได้ แต่อาจพบปัญหาจากการตัดสินใจของผู้ทดสอบในการสุ่มตัวอย่าง และสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของกระดาษนั้น จะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมในการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 187 [16] หรือ TAPPI T 402 [17] ที่อุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 และสำหรับในประเทศเขตร้อนอุณหภูมิจะถูกควบคุมอยู่ที่ 27 องศาเซลเซียสและที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65

สมบัติของกระดาษสามารถแบ่งออกได้เป็น สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสมบัติทางเคมี (Chemical properties) โดยสมบัติเชิงกายภาพของกระดาษในแต่ละด้านจะมีความสำคัญมากน้อยแตกต่างกันไปตามชนิดของกระดาษ สามารถแบ่งออกเป็น สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล สมบัติด้านพื้นผิว สมบัติการดูดซึม และสมบัติทางทัศนศาสตร์ นอกจากนี้กระดาษพิมพ์/เขียน ยังต้องมีการทดสอบสภาพพิมพ์ได้ของแต่ละระบบการพิมพ์ที่นำไปใช้อีกด้วย โดยในส่วนต่อจากนี้จะเป็นการอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ [18-21]

2.2.1 สมบัติทางโครงสร้าง

เป็นสมบัติที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเนื้อกระดาษ เนื่องจากกระดาษเกิดขึ้นจากเชื่อมกันระหว่างพันธะของเส้นใยและสารเติมแต่งที่แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของเส้นใย โดยสมบัติทางโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

- ปริมาณความชื้น (Moisture content) แสดงถึงร้อยละน้ำหนักของความชื้นภายในกระดาษ โดยคำนวณได้จากปริมาณน้ำหนักร่อนและหลังนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ISO 287 [22] หรือ TAPPI T 412 [23]
- น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight) คือ น้ำหนักของกระดาษต่อหน่วยพื้นที่ โดยคำนวณจากการชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่มีพื้นที่อย่างน้อย 500 ตารางเซนติเมตรหรือมีขนาด 200×250 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ISO 536 [24] หรือ TAPPI T 410 [25] น้ำหนักมาตรฐานนิยมรายงานในหน่วยกรัมต่อตารางเมตร หรือ Grammage (GSM)
- ความหนา (Thickness/caliper) คือ การวัดระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองด้านของแผ่นกระดาษภายใต้แรงกด 100 กิโลปาสคาล ตามมาตรฐาน ISO 534 [26] หรือ TAPPI T 411 [27] รายงานผลในหน่วยไมโครเมตร (ตามระบบ SI) มิลลิเมตร หรือนิ้ว (ในประเทศสหรัฐอเมริกา) ความหนามีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้งานและการแปรรูปของกระดาษ หากความหนาไม่สม่ำเสมออาจทำให้เกิดปัญหาในเครื่องพิมพ์หรือเครื่องแปรรูปกระดาษ เช่น เครื่องคัดแยก เครื่องเจาะรู เป็นต้น อีกทั้งความหนายังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษ เช่น ความทรงรูป เป็นต้น
- ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักมาตรฐานโดยมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามมาตรฐาน ISO 534 [26] หรือ TAPPI T 411 [27] ความหนาแน่นของกระดาษมีความสัมพันธ์กับสมบัติกระดาษด้านอื่น ๆ เช่น ความพรุน ความทึบแสง ความแข็งแรงต่อแรงดึง การดูดซึมของเหลว การดูดซับหมึกพิมพ์ และสภาพพิมพ์ได้ เป็นต้น โดยกระดาษที่มีความหนาแน่นเท่ากันยังมีน้ำหนักมาตรฐานสูงจะส่งผลให้มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่วนกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากันไม่จำเป็นต้องหนาเท่ากัน โดยที่ความฟวม (Bulk) จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของกระดาษ
- ปริมาณตัวเติม (Filler content) การคำนวณหาปริมาณตัวเติมในกระดาษ สามารถคำนวณจากร้อยละน้ำหนักของเถ้า (Ash content) ที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิ 525 หรือ 900 องศาเซลเซียสโดยขึ้นกับชนิดของตัวเติม [28] ซึ่งตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต จะทำการวิเคราะห์จากเถ้าที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียสเท่านั้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตจะเริ่มสลายตัวกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่า 525 องศาเซลเซียส [29]

2.2.2 สมบัติเชิงกล

หมายถึง สมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของกระดาษ เป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพและความทนทานในการนำกระดาษไปใช้งาน (Durability) ความแข็งแรงของกระดาษนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใย ความยาวของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใย ชนิดของสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ถึงความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tearing strength) และความแข็งแรงของผิวหน้า (Surface strength) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength หรือ Tensile breaking strength) เป็นสมบัติที่ใช้อธิบายความแข็งแรงของกระดาษโดยรวม เมื่อถูกจับที่ปลายทั้ง 2 ข้างก่อนที่จะยืดขาดออกจากกัน โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่จะกระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นขึ้นอยู่กับ การสร้างพันธะระหว่างเส้นใย (พันธะมาก ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง) ความแข็งแรงของเส้นใย (เส้นใยยิ่งแข็งแรงมาก ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง) ความชื้นของกระดาษ (ความชื้นมาก ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง แต่มีระยะยืดเพิ่มขึ้น) และทิศทางของเส้นใยที่เรียงตัวในด้านตามเกรน (MD) จะแข็งแรงกว่าเส้นใยที่เรียงตัวในด้านขวางเกรน (CD) ของกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index) จากสมการ (1) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานที่แตกต่างกันได้ ซึ่งวิธีการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ISO 1924-3 [30] หรือมาตรฐาน TAPPI T 494 [31]

$$\text{Tensile index (Nm/g)} = \frac{\text{tensile strength (kN/m)}}{\text{basis weight (g/m}^2\text{)}} \quad (1)$$

- ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tearing strength หรือ Tear strength) คือ แรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวตัดเริ่มต้น มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) หรือ มิลลินิวตัน (mN) ความแข็งแรงต่อแรงฉีกไม่สัมพันธ์กับความแข็งแรงตึงหรือความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุโดยตรง โดยปกติเวลาตี/บดเยื่อ ค่าความแข็งแรงตึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณการตี/บดเยื่อ (เนื่องจากพันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มมากขึ้น) แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่มีการตี/บดเยื่อเท่านั้น เมื่อมีค่าสูงถึงจุดหนึ่งแล้ว ความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะลดลง และเมื่อตี/บดเยื่อต่อค่าก็จะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับความยาวเส้นใย (ยิ่งยาว ความแข็งแรงต่อแรงฉีกยิ่งสูง) ความแข็งแรงของเส้นใย (ยิ่งเส้นใยแข็งแรงมาก ความแข็งแรงต่อแรงฉีกยิ่งสูง) ปริมาณพันธะระหว่างเส้นใย (ในกรณีที่มีพันธะไม่มาก ความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะขึ้นกับปริมาณพันธะ ในกรณีที่พันธะมีมากพอ ความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะแปรตามความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่า) และทิศทางเส้นใยที่เรียงตัวกันในแผ่นกระดาษ (ด้านขวางเกรน (Cross direction, CD) จะแข็งแรงกว่าตามเกรน (Machine direction, MD) ของกระดาษ) นอกจากนี้อาจเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่างกันได้เรียกว่า ดัชนีความต้านทานแรงฉีก (Tear index) โดยคำนวณได้จากสมการ (2) ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลินิวตันเมตรกำลังสองต่อกรัม ($\text{mN} \cdot \text{m}^2/\text{g}$) โดยสามารถทดสอบได้ตามวิธีมาตรฐาน ISO 1974:1990 [32] หรือ TAPPI T 414 [33] ตามวิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการวัดแรงกลที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากรอยตัดที่เริ่มไว้ โดยมีการกำหนดระยะทางการฉีก (ความกว้างของตัวอย่างกระดาษ) อาจวัดโดยใช้กระดาษซ้อนกันหลาย ๆ แผ่นหรือเลือกใช้ตุ้มน้ำหนักให้เหมาะสม

$$\text{Tear index (mN} \cdot \text{m}^2/\text{g)} = \frac{\text{tearing strength (mN)}}{\text{basis weight (g/m}^2\text{)}} \quad (2)$$

- ความแข็งแรงของผิวหน้า (Surface strength) คือ ความสามารถของกระดาษในการต้านแรงที่จะดึงเส้นใยออกจากผิว โดยผิวหน้ากระดาษที่ไม่แข็งแรงเส้นใยหรือสารเคลือบจะหลุดออกได้ง่าย เวลานำไปพิมพ์มักจะถูกหมึกพิมพ์ซึ่งมีความเหนียวดึงออกจากผิวหน้า (หรือเรียกว่า การถอนผิว) ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบภายในเครื่องพิมพ์สกปรกและปนเปื้อนแล้ว ยังทำให้คุณภาพงานพิมพ์เสีย เช่น เกิดจุดต่าง หรือ ภาพพิมพ์มีหมึกไม่สม่ำเสมอ มักใช้หมึกพิมพ์หรือน้ำมันที่มีความเหนียวสูงมาพิมพ์ลงบนกระดาษด้วย

ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยการทดสอบ IGT Tester ตามมาตรฐาน ISO 3783 [34] หรือการทดสอบความแข็งแรงของผิวหน้าด้วยแท่งขี้ผึ้ง (Wax pick test) ตามมาตรฐาน TAPPI T 459 [35] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบด้วยขี้ผึ้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยใช้แท่งขี้ผึ้งที่มีเบอร์ความเหนียวระดับต่าง ๆ ตั้งแต่เบอร์ 2A-26A (Critical wax strength number, CWSN) กระดาษที่ผิวหน้าแข็งแรงต้องใช้ขี้ผึ้งที่เหนียวมาก ๆ จึงจะเกิดการถอนผิว ในขณะที่กระดาษที่ผิวไม่แข็งแรงจะถอนผิวได้เมื่อใช้ขี้ผึ้งที่เหนียวน้อยกว่าหรือที่เบอร์ต่ำกว่า

2.2.3 สมบัติด้านพื้นผิวและสมบัติการดูดซึม

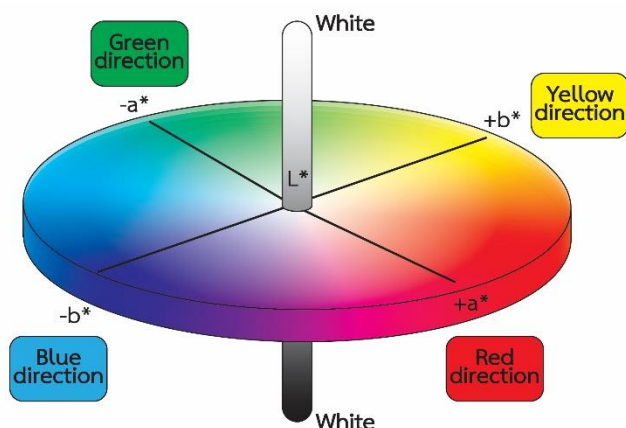
เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการรับหมึกพิมพ์และการนำไปใช้งานของกระดาษ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ถึงความเรียบและความต้านอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ความเรียบ (Smoothness) หรือความสม่ำเสมอของผิวหน้ากระดาษ ความเรียบเป็นสมบัติที่สำคัญต่อกระดาษพิมพ์/เขียน ส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ โดยทั่วไปหากกระดาษนั้นมีความเรียบมากจะทำให้ผลการพิมพ์ที่ดี แต่หากกระดาษมีความเรียบน้อยจะทำให้ภาพพิมพ์นั้นไม่คมชัดหรือผิวหน้าชั้นของหมึกพิมพ์ไม่เรียบ ในการวัดค่าความเรียบนั้นสามารถวัดได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีของเบกก์ (Bekk method) ตามมาตรฐาน ISO 5627 [36] หรือ TAPPI T 479 [37] ซึ่งจะเป็นการวัดค่าความเรียบโดยการจับเวลาที่ใช้ในการให้อากาศไหลผ่านผิวหน้าของกระดาษ ซึ่งทำการจับเวลาในระหว่างที่ความดันลดลงจาก 380 มิลลิเมตรปรอทจนถึง 360 มิลลิเมตรปรอท มีหน่วยเป็น วินาที หากผิวหน้าของกระดาษมีความเรียบสูง เวลาที่ใช้เพื่อให้อากาศไหลผ่านจะยิ่งมาก โดยทำการทดสอบทั้ง 2 ด้าน เนื่องจากกระดาษแต่ละด้านมีความเรียบไม่เท่ากัน
- ความต้านอากาศ (Air resistance) คือความต้านทานการไหลผ่านของอากาศ เนื่องจากไม่ได้วัดความพรุนของกระดาษโดยตรง แต่จะวัดเป็นค่าความต้านอากาศด้วยวิธีของเกอร์เลย์ (Gurley method) ตามมาตรฐาน ISO 5636-5 [38] หรือ TAPPI T 460 [39] ซึ่งเป็นการดันอากาศให้ทะลุเนื้อกระดาษจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ถ้าอากาศผ่านไปได้เร็ว แสดงว่ามีความพรุนสูง (เช่น กระดาษชำระ) ถ้าอากาศผ่านได้ช้าแสดงว่ามีความพรุนต่ำ (เช่น กระดาษแข็ง หรือกระดาษเคลือบผิว) โดยความต้านอากาศ/ความพรุนนั้นสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำของกระดาษ

2.2.4 สมบัติทางทัศนศาสตร์

เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของกระดาษที่ปรากฏสู่สายตา ซึ่งมีสัมพันธ์กับการนำไปใช้งานโดยเฉพาะสำหรับกระดาษพิมพ์/เขียน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ถึงความขาว ความขาวสว่าง ความทึบแสง และค่าสี โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ความขาว (Whiteness) คือ ค่าที่วัดที่ได้จากการสะท้อนแสงของกระดาษในช่วงความยาวคลื่นที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ประมาณ 400-700 นาโนเมตร (Visible light) โดยในอุตสาหกรรมกระดาษนิยมวัดค่าความขาวภายใต้สภาวะแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ D65 (แสงแดดที่อุณหภูมิสี 6500K) ที่มุมการสังเกตที่ 10 องศา สามารถทดสอบได้ตามวิธีมาตรฐาน ISO 11475 [40] หรือ TAPPI T 560 [41]
- ความขาวสว่าง (Brightness) สามารถทดสอบได้ตามวิธีมาตรฐาน ISO 2470-1 [42] หรือ TAPPI T 525 [43] โดยวัดการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตรเท่านั้น หรือเรียกได้ว่าเป็นการสะท้อนแสงสีน้ำเงิน เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดการสะท้อนแสงสูงสุดในการพิจารณาเปรียบเทียบผลของการฟอกเยื่อ
- ความทึบแสง (Opacity) คือ อัตราส่วนร้อยละของค่าการสะท้อนแสงของกระดาษ 1 แผ่นที่รองด้านหลังด้วยวัตถุดำ ต่อค่าการสะท้อนแสงของกระดาษที่ซ้อนกันมากพอในระดับที่แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ ซึ่งความทึบแสงนั้นขึ้นกับความสามารถในการให้แสงทะลุผ่านของกระดาษ กระดาษที่ทึบแสงโดยสมบูรณ์จะไม่ยอมให้แสงทะลุผ่านมาอีกด้านหนึ่ง สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ISO 2471 [44] หรือ TAPPI T 519 [45]
- ค่าสี (CIELAB Value) หรือ ค่าสีที่วัดมาจากค่าไตรสติมูลัส (Tristimulus Value) โดยเป็นค่าที่ใช้เพื่อระบุสีของวัตถุหนึ่ง ๆ ว่ามีปริมาณสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน อยู่มากน้อยเท่าไร โดยระบบสีซีไออีจะอ้างอิงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเห็นสี 3 ประการ คือ ค่าการสะท้อนแสงของวัตถุ (Reflectance) ค่ากระจายพลังงาน (Spectral Power Distribution, PSD) และค่าฟังก์ชันการเทียบสีของตา (Color Matching Functions) ในส่วนของการกำหนดค่าสี CIELAB นั้นมาจากทฤษฎีการมองเห็นคู่สีตรงข้าม ซึ่งจะแตกต่างไปจากการวัดค่าสีไตรสติมูลัสที่เป็นระบบที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีการมองเห็นสีไตรโครมาติก [46] โดยระบบสี CIE จะมีปริภูมิสีสามมิติ (CIELAB color space) ประกอบด้วยแกนหลัก 3 แกน ได้แก่ แกน L* แกน a* และแกน b* ตามภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ปริภูมิสีสามมิติ (CIELAB color space)

ซึ่งจะวัดค่าออกมาได้เป็น 3 ค่า ได้แก่ L^* a^* และ b^* โดยค่า L^* นั้นจะบ่งบอกถึงความมืดหรือสว่างของสี มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100 หากยังมีค่าสูงแสดงว่ายิ่งมีความสว่างมาก ค่า a^* เป็นการแสดงถึงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว โดยค่า a^* ที่เป็นบวก (+) จะใช้แสดงความเป็นสีแดง หากเป็นค่าลบ (-) จะใช้แสดงความเป็นสีเขียว และค่า b^* เป็นแกนที่แสดงถึงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน โดยถ้าค่า b^* เป็นบวก (+) จะใช้แสดงความเป็นสีเหลือง หากเป็นลบ (-) จะใช้แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

ทั้งนี้ค่าสีของวัตถุจะเปลี่ยนไปตามค่าแหล่งกำเนิดแสง และมุมมองผู้สังเกต หากปัจจัยทั้งสองไม่ตรงกันจะไม่สามารถเปรียบเทียบค่าสีของวัตถุทั้งสองได้ สามารถทดสอบได้ตามวิธีมาตรฐาน ISO 5631-2 [47]

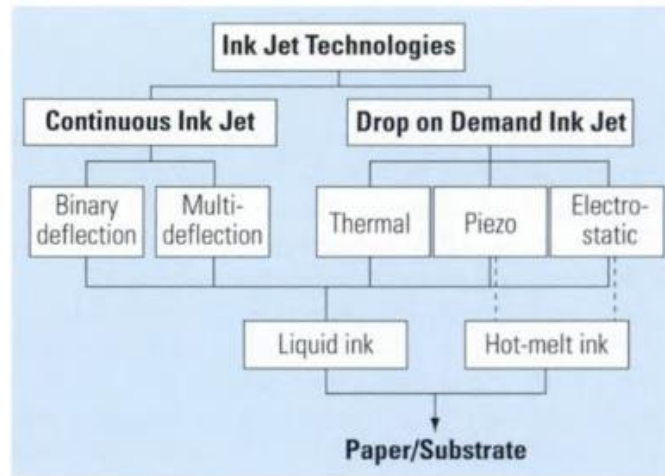
2.3 กระบวนการพิมพ์แบบไร้แรงกด

การพิมพ์ระบบไร้แรงกดหรือการพิมพ์ไม่สัมผัส เป็นการพิมพ์ที่ไม่ต้องอาศัยแม่พิมพ์ เครื่องพิมพ์ และการสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์ วัสดุพิมพ์ ไม่ต้องอาศัยแรงกด หรือแรงอัดสัมผัสในการทำให้เกิดภาพ การพิมพ์ระบบไร้แรงกดที่ใช้กันทั่วไปมีหลายประเภท โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียง การพิมพ์พ่นหมึกหรือการพิมพ์อิงค์เจ็ต

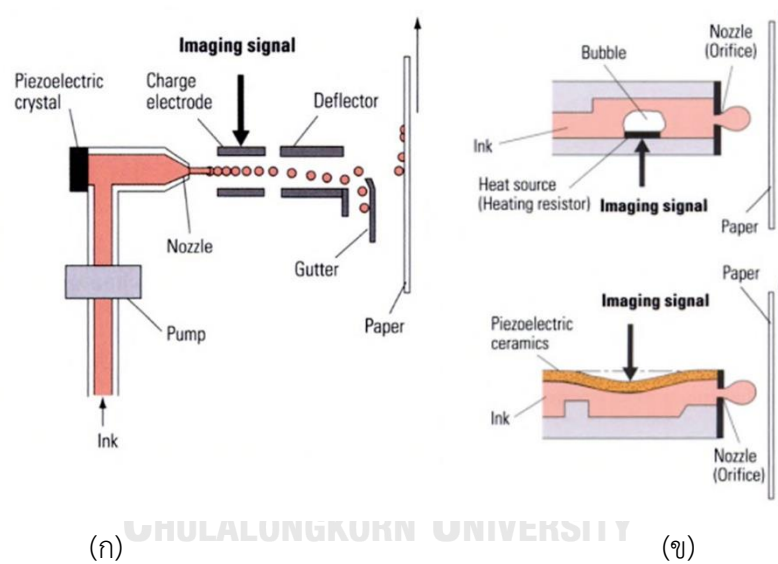
2.3.1 การพิมพ์อิงค์เจ็ต (Inkjet printing)

เป็นกระบวนการพิมพ์ที่ปล่อยหยดหมึกบนวัสดุพิมพ์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การพิมพ์ปล่อยหมึกแบบต่อเนื่อง (Continuous inkjet printing) โดยใช้ประจุไฟฟ้าเบี่ยงเบนทิศทางของหยดหมึกเพื่อสัมผัสกับวัสดุพิมพ์ โดยจะมีลักษณะเป็นจุดของหยดหมึกเรียงกัน ส่วนใหญ่มักใช้กับการพิมพ์ข้อมูลภายในสายการผลิตสินค้าเพราะต้องการความเร็ว เช่น การพิมพ์วันเดือนปีที่ผลิตหรือหมดอายุ แต่จะไม่สามารถพิมพ์ภาพที่มีความละเอียดสูงได้ อีกแบบหนึ่งเป็นการพิมพ์พ่นหมึกแบบหยดหมึกตามต้องการ (Drop-on-demand inkjet printing) สามารถพิมพ์ภาพที่มีความละเอียดสูงได้รวมถึงภาพสี นิยมใช้เป็นเครื่องพิมพ์ตามบ้านหรือสำนักงาน โดยจะมี 2 เทคโนโลยีที่สำคัญตามลักษณะการพิมพ์ ได้แก่ เพียโซ (Piezo) ใช้การสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซในการขับเคลื่อนหยดหมึก และเทอร์มัลหรือบับเบิลเจ็ต (Thermal, Bubble jet) ใช้ความร้อนเพื่อขับเคลื่อนหยดหมึกออกมา ทั้ง 2 แบบจะสามารถควบคุมขนาดและการปล่อยหยดหมึกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งแยกย่อยออกเป็นเทคโนโลยีแบบต่าง ๆ ได้อีกดังแสดงในภาพที่ 2-6 และภาพที่ 2-7

หมึกพิมพ์สำหรับการพิมพ์อิงค์เจ็ตนั้นสารให้สีของหมึกพิมพ์จะมีทั้งแบบสีย้อมและสารสี และหมึกพิมพ์จะมีทั้งที่เป็นแบบฐานน้ำ ฐานตัวทำละลาย ฐานแวกซ์ ซึ่งความแตกต่างนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของตัวพาและเทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ตแต่ละชนิด แต่ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ทั่วไปตามบ้านหรือสำนักงานนั้นมักเป็นแบบฐานน้ำหรือฐานตัวทำละลาย ซึ่งสามารถซึมลงบนกระดาษได้ดี จึงทำให้เกิดปัญหาการซึมและแตกออกเป็นลาย (Feathering) ซึ่งตามปกติแล้วการพิมพ์อิงค์เจ็ตหรือการพิมพ์พ่นหมึกนั้น เพื่อคุณภาพที่ดีนั้นจะต้องพิมพ์ลงบนกระดาษเคลือบผิวเฉพาะกับการพิมพ์อิงค์เจ็ต เพราะชั้นเคลือบผิวจะทำหน้าที่รับหยดหมึกและคงสภาพไว้ไม่ให้ซึมหรือแตกออก [48]



ภาพที่ 2-6 เทคโนโลยีการพิมพ์อิงค์เจ็ต [49]



ภาพที่ 2-7 การพิมพ์อิงค์เจ็ต [49]

(ก) การพิมพ์อิงค์เจ็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous inkjet printing)

(ข) การพิมพ์อิงค์เจ็ตแบบหยุดหมึกตามต้องการ (Drop-on-demand inkjet printing)

2.3.2 การวัดค่าต่าง ๆ ในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์

สำหรับการวัดค่าต่าง ๆ ในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์นั้นสามารถวัดได้หลายแบบ แต่ในที่นี้จะวัดค่า 3 แบบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้แก่ การวัดค่าความดำทางการพิมพ์ (Print density) คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) และคุณภาพตัวอักษร (Text quality) โดยในการวัดค่าต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ค่าความดำทางการพิมพ์ (Print density) บ่งบอกถึงระดับความเข้มหรือความทึบแสง โดยคำนวณจากค่าการสะท้อนแสงของชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เป็นค่าตัวเลข โดยมากนิยมใช้ระบุถึงความเข้มของหมึกพิมพ์ ซึ่งหากเข้มกว่าจะมีค่าความดำที่มากกว่า
- 2) คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) สามารถวิเคราะห์โดยการคำนวณพื้นที่เปรียบเทียบจุดที่สั่งพิมพ์และที่พิมพ์ได้ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จาก รูปร่างจุด ลักษณะ หรือ ขนาดของจุด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดของจุด อาศัยการคำนวณพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นของจุดที่พิมพ์ได้เทียบกับพื้นที่ของจุดที่สั่งพิมพ์ โดยหากขนาดของจุดมีขนาดใกล้เคียงกันค่าที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำ
- 3) คุณภาพตัวอักษร (Text quality) เพื่อดูความคมชัดและการอ่านได้ของตัวอักษรที่พิมพ์ได้ โดยจะรายงานเป็นขนาดตัวอักษรที่เล็กที่สุดที่ยังอ่านได้ชัดเจน โดยจะทำการวิเคราะห์ทั้งตัวอักษรลาตินแบบมีเชิง (Serif) และ ไม่มีเชิง (San serif) ทั้งนี้ในตัวอักษรแบบไม่มีเชิงจะทำการวิเคราะห์ทั้งแบบที่พิมพ์ตัวอักษรด้านบนพื้นขาว (Positive) และตัวอักษรขาวบนพื้นดำ (Negative)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิวัศ สุขณินยกุล [20] ได้เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากการเติมเยื่อเคมีฟอกทางการค้าผสมระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 100:0 70:30 50:50 และ 0:100 โดยทำการบดเยื่อแยกชนิดกันเพื่อให้ได้ค่าสภาพการระบายน้ำในช่วง 330-350 ml CSF ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์/เขียน จากนั้นเติมสารเติมแต่ง 3 ชนิด คือ 1) สารต้านการซึม (Alkyl Ketene Dimer, AKD) เพื่อให้สามารถทดสอบสภาพพิมพ์ได้กับหมึกพิมพ์ฐานน้ำได้ 2) แป้งประจุบวก (Cationic starch) เพื่อให้กระดาษมีความแข็งแรงและสามารถนำไปทดสอบสภาพพิมพ์ได้ในกระบวนการพิมพ์ โดยเฉพาะการพิมพ์ออฟเซต และ 3) สารเพิ่มการตกค้าง ประเภท CPAM (Cationic Polymers Polyacrylamide) เพื่อให้สารเติมแต่งที่ใส่ยังคงอยู่ในแผ่นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบ ร่วมกันในการผลิตแผ่นทดสอบที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อคัดเลือกหาอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมบัติ ของกระดาษ เช่น ความต้านอากาศ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความเรียบ และความแข็งแรงของผิวหน้า เป็นต้น โดยพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ผลิตกระดาษพิมพ์/เขียน คืออัตราส่วนระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 เนื่องจากให้ผลการทดสอบในด้านต่าง ๆ ดีที่สุดและให้ผลการพิมพ์ที่ให้ค่าความดำพื้นที่บ (Density) สูงสุดจากการทดสอบสภาพพิมพ์ได้ในระบบการพิมพ์ออฟเซต เฟล็กโซกราฟี อิงก์เจ็ต และอิเล็กทรอนิกส์ โดยในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงผลจากการเติมตัวเติม ในกระบวนการผลิตกระดาษพิมพ์/เขียน ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยเฉพาะสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์

ภัทรนรี ปานมา และ มนต์ภา ลักษณ์พรวงศ์ [50] ได้ทำการปรับสภาพวัตถุดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อเปรียบเทียบกับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (GCC) และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) ทางการค้า โดยควบคุมขนาดของอนุภาคทั้ง 3 ภาวะ ด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร) โดยเตรียมเยื่อเคมีฟอกทางการค้าที่อัตราส่วนเยื่อใยสั้นต่อเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 มาบดเยื่อเพื่อให้ได้ค่าสภาพการระบายน้ำ 350 ± 50 ml CSF ก่อนเติมด้วยสารต้านการซึม (AKD) สารเพิ่มการตกค้าง (CPAM) และตัวเติมในภาวะต่าง ๆ ในร้อยละ 15 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ จากนั้นขึ้นแผ่นทดสอบที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร และนำไปทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ และทดสอบสภาพพิมพ์ได้ด้วยกระบวนการพิมพ์อิงก์เจ็ต (Inkjet printing) โดยพบว่า การเติม CPAM ช่วยเพิ่มปริมาณการกักเก็บของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดและชนิดตกตะกอนได้ ทั้งยังพบว่าภาวะที่เติมตัวเติม PCC ให้สมบัติของ

กระดาษในด้านต่าง ๆ ได้ดีที่สุด โดยเฉพาะสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ ความเรียบ และค่าความดําพื้นทึบ เนื่องจาก PCC มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวในการเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ได้มากกว่า GCC แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงระดับการเติมสารเติมแต่งในปริมาณอื่น ๆ และปริมาณการกักเก็บที่คงเหลือภายในกระดาษหลังขึ้นแผ่นทดสอบ

ในการศึกษาผลของการใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมในกระบวนการผลิตกระดาษ พบว่านักวิจัยส่วนใหญ่ใช้วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิจัย เช่น El-Sherbiny และคณะ [2] ได้ทำการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูนทางการค้าและเศษหินอ่อนในอุตสาหกรรมด้วยวิธีคาร์บอเนชัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวประจุบวกในการควบคุมขนาด รูปร่าง และสมบัติที่พื้นผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากสารลดแรงตึงผิวทั้งสองภาวะมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงจากระดับไมโครสู่ระดับนาโน ประกอบไปด้วยเฟสหลัก คือ แคลไซต์ และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอนุภาคจาก Scalenohedral เป็น Rhombohedral จากนั้นขึ้นแผ่นทดสอบที่น้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ตามมาตรฐาน TAPPI T-205 ด้วยอัตราส่วนเยื่อใยสั้นต่อเยื่อใยยาวเท่ากับ 85:15 ตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และสารละลาย CPAM เป็นสารเพิ่มการตกค้ำที่ร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบเมื่อใช้ร่วมกับสายโซ่พอลิเมอร์ประจุบวก CPAM อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวในน้ำที่ดีขึ้น ส่งผลให้แบบตัวกับพอลิเมอร์ประจุบวกได้ดี ทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณการกักเก็บ (วิเคราะห์จากการเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส) เพิ่มความหนาแน่นปรากฏ ความทึบแสง และสมบัติเชิงกล เมื่อเทียบกับกระดาษที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากสารลดแรงตึงผิวประจุบวก และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (GCC) ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถควบคุมปริมาณของตัวเติมที่คงเหลือภายในเนื้อกระดาษได้

นอกจากนี้ม้งงานวิจัยหลากหลายที่ศึกษาถึงการใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้ำร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเช่นกัน โดย Rasteiro และคณะ [51] ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกาะรวมกันเป็นอนุภาค (Flocculation) และการดูดซับของ CPAM บนอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) ทางการค้า ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและเพิ่มสภาพการระบายน้ำในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ พบว่าเมื่อเติมสารเพิ่มการตกค้ำแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ในระบบ ส่งผลให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีอัตราการดูดซับและการเกาะรวมกันเป็นอนุภาคที่เร็วขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มการกักเก็บปริมาณตัวเติมและการระบายน้ำในขั้นตอนการผลิตกระดาษ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะแสดงถึงวัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการทดลอง และการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. เยื่อใยสีน้ำตาลฟอก (Bleached Hardwood Kraft Pulp)
จากบริษัท ฟินิกซ์ พัลป์ แอนเพเพอร์ จำกัด มหาชน
2. เยื่อใยขาวเคมีฟอก (Bleached Softwood Kraft Pulp)
จาก Crofton Pulp & Paper Mill, Canada
3. สารช่วยกระจายตัว Dispex® AA 4140
(pH = 8, Viscosity = 400 mPa·s, Solid content = 43%,
Active content = 40%) จากบริษัท บีเอสเอสเอฟ (ไทย) จำกัด
4. สารเพิ่มการตกค้าง Fennopol K 4230 T ประเภท Cationic Polyacrylamide
(CPAM) (Dry content = 91%) จากบริษัท เคมีร่า (ประเทศไทย) จำกัด
5. แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated Calcium Carbonate, PCC)
(Mean particle size = 4 Micron (Max)) จากบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล (จำกัด)
6. นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (Nano Calcium Carbonate, NCC)
(Mean particle size = 0.730 Micron (Max))
จากบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล (จำกัด)

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Determination Balance)
รุ่น FD-600, Kett Electric Laboratory, Japan
2. เครื่องบดเยื่อ (Valley beater)
รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India
3. เครื่องหาค่าสภาพการระบายน้ำ (Freeness tester)
รุ่น CF/A, Regmed Industria Technica de Frecisao, Brazil
4. เครื่องกวนผสมสาร (Magnetic stirrer) รุ่น TTS, Denver instrument, Japan
5. เครื่องวัดค่าศักย์ซีต้า (Fiber potential analyzer)
รุ่น B462 FPA, AFG Analytic GmbH, Leipzig, Germany
6. เครื่องปั่นผสมสาร (Homogenizer) รุ่น EURO-ST B,
IKA labortechnik staufen, Germany
7. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator)
รุ่น T-100, Formax, Adirondack Machine Corporation, USA
8. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) ตามมาตรฐาน TAPPI
Nanasiam Intertrade Co., Ltd., Thailand
9. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former) รุ่น RK-2A KWT, PTA RAPID-KÖTHEN
SHEET FORMER, PTI Laboratory Equipment, Austria
10. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester)
รุ่น Digital micrometer, The TMI Group of Companies, Holland
11. เครื่องวัดสมบัติทางทัศนศาสตร์ของกระดาษ
รุ่น Color Touch PC (CTP-ISO), Technidyne corporation, USA
12. เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) รุ่น Digi-Bekk, Smoothness Tester
No. 168, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan

3.1.2 อุปกรณ์ (ต่อ)

13. เครื่องวัดความต้านอากาศ (Air resistance tester) Gurley type Porosimeter Model B No. 158, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan
14. เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength tester) รุ่น Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan
15. เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Sheet cutter) รุ่น Saltaranpur, Germany
16. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester) รุ่น Pro-Tear, Thwing-Albert Instrument Company, USA
17. เตาเผา (Laboratory chamber furnace) รุ่น Lenton thermal designs, EF 11/8B, England
18. เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ต (Inkjet printer) รุ่น PIXMA iP4900, Canon, Thailand
19. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrodensitometer) รุ่น x-rite 530 series, X-rite Incorporated, USA
20. กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Stereo Microscope) รุ่น SZH10, Olympus, Japan พร้อมกล้องถ่ายภาพรุ่น Digital Sight DS-2MBWc, Nikon, Japan
21. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 2000, Malvern, UK
22. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8 advanced, Bruker, USA
23. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer, STA) รุ่น STA PT 1600, Linseis, USA
24. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น JSM-6480LV, JEOL, USA

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

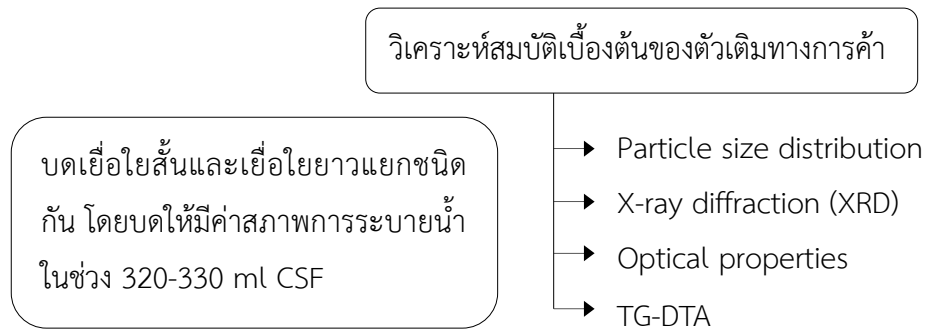
ในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ

ตอนที่ 1 คือ การเตรียมเยื่อและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมดังแสดงในภาพที่ 3-1

ตอนที่ 2 คือ การหาปริมาณที่เหมาะสมและศึกษาผลของการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างและโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว ต่อปริมาณการกักเก็บและสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ มีขั้นตอนการวิจัย 2 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ศึกษาปริมาณการกักเก็บแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างในปริมาณต่าง ๆ และคัดเลือกปริมาณการเติมพอลิอะคริลาไมด์ที่เหมาะสม 2) ศึกษาผลของการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ และคัดเลือกปริมาณการเติมพอลิอะคริเลตที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 3-2

ตอนที่ 3 คือ การศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3-3

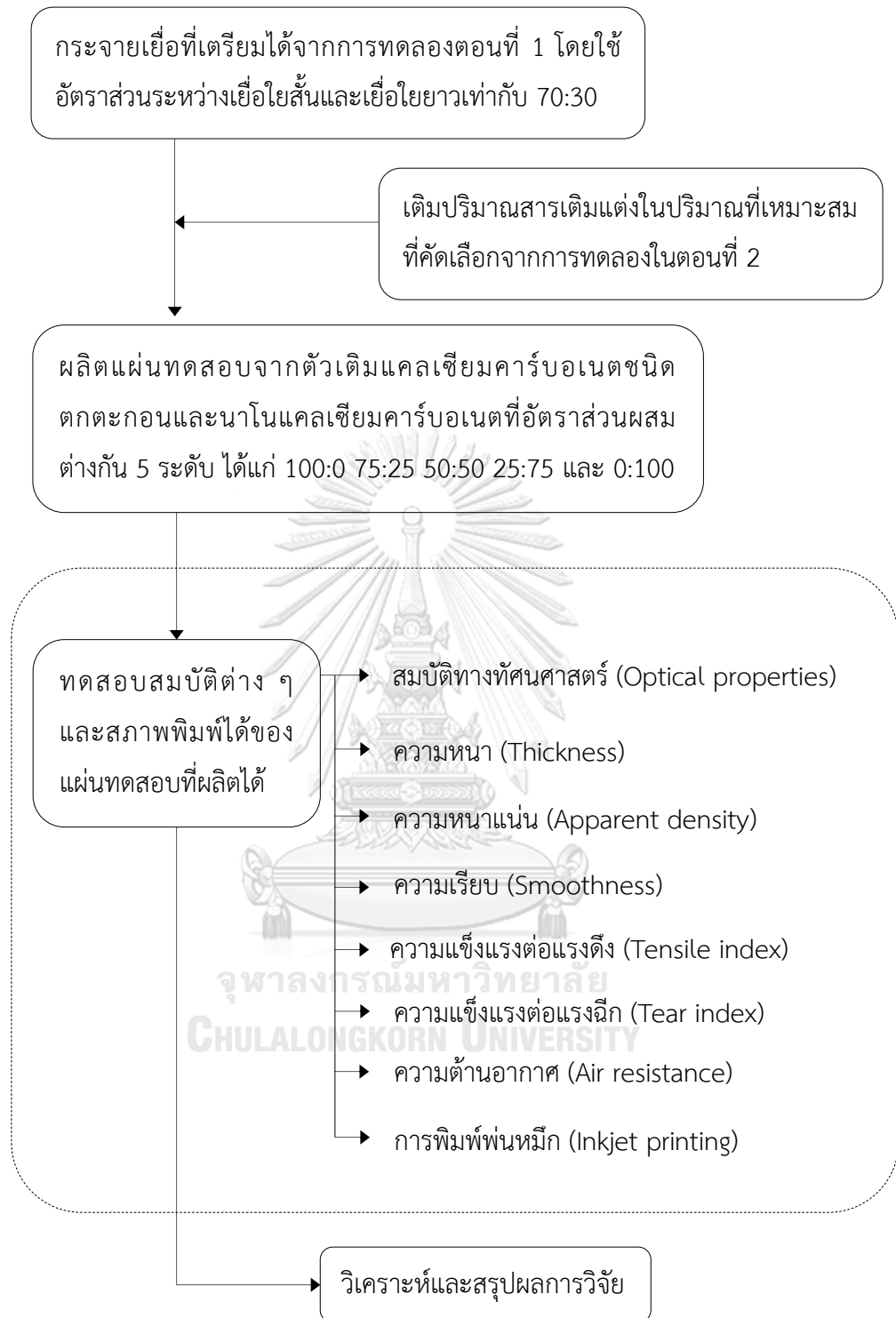
สำหรับรายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ เช่น การเตรียมน้ำเยื่อ การเตรียมสารแขวนลอยจากการกระจายตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต วิธีการเตรียมและคำนวณสัดส่วนการใช้สารเติมแต่ง วิธีการคำนวณปริมาณเยื่อแห้งสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) สามารถศึกษารายละเอียดดังกล่าวได้ในภาคผนวก ก.



ภาพที่ 3-1 แผนผังการเตรียมเยื่อและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมทางการค้า



ภาพที่ 3-2 แผนผังการหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง



ภาพที่ 3-3 แผนผังการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับ
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ

รายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมเยื่อและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติม

1.1) การเตรียมเยื่อ

นำเยื่อไม้สน (Hardwood) และเยื่อไม้ยาว (Softwood) มาตีกระจายและบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-10 [52] โดยบดเยื่อแยกชนิดกัน ทำการวัดค่าสภาพการระบายน้ำซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยวิธีมาตรฐาน TAPPI T 227 om-09 [53] เพื่อให้ได้ค่าสภาพการระบายน้ำ (Freeness) ในช่วง 325 ± 5 ml CSF (Canadian standard freeness)

1.2) การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติม

1.2.1) พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของอนุภาค

เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของอนุภาคตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction technique) โดยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

1.2.2) องค์ประกอบทางเฟส

เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสและรูปร่างของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometry (XRD) ด้วย Cu-K α radiation โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) ที่ Scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ช่วง 2θ เท่ากับ 5-80 องศา

1.2.3) สมบัติทางทัศนศาสตร์

เพื่อศึกษาสมบัติทางทัศนศาสตร์ในด้านความขาว (Whiteness) ความขาวสว่าง (Brightness) และค่าสี (CIELAB) ของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐาน ISO 11475 [40] ISO 2470-1 [42] และ ISO 5631-2 [47] ซึ่งวัดด้วยแหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมของผู้สังเกตการณ์ที่ 10 องศา ($D65/10^\circ$) โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางทัศนศาสตร์ Technidyne รุ่น Color Touch PC (CTP-ISO)

1.2.4) การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เพื่อศึกษาการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetry-differential thermal analysis (TG-DTA)

ตอนที่ 2 การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง

ในส่วนของขั้นตอนการหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง และ 2) การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว เพื่อพิจารณาหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่งสำหรับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด ตกตะกอน (PCC) และตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

2.1) การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง

เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง สำหรับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จากการพิจารณาปริมาณระหว่างค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และปริมาณเถ้า (Ash content) นอกจากนี้ยังพิจารณาประกอบกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.1.1) การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

เตรียมเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวในอัตราส่วน 70:30 กระจายในน้ำ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยใช้เครื่องปั่นผสมสาร (Homogenizer) ที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ก่อนผสมกับสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเป็นปริมาณการเติมที่ให้อัตราการกักเก็บประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรม จากนั้นนำน้ำเยื่อที่ผสมตัวเติมแล้วมาปั่นต่ออีก 10 นาที แล้วจึงเติมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ในช่วงของร้อยละ 0 โดยเติมเพิ่มขึ้นลำดับละ 0.1 จนถึงร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง รวมเป็น 15 ภาวะ ควบคุมอุณหภูมิระหว่างทำการทดลองที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ปั่นน้ำเยื่อในระบบอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบเท่ากัน เมื่อปั่นครบ 10 นาที จึงนำไปวัดค่าศักย์ซีต้าเป็นจำนวน 5 ครั้ง ทำการทดสอบซ้ำกับเยื่อเปล่า (Pulp) และเยื่อที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นและปริมาณที่เท่ากัน โดยลำดับขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อเพื่อวัดค่าศักย์ซีต้าจะสรุปไว้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อเพื่อวัดค่าศักร์ซีต้า

นาที่ที่	ขั้นการตอนการเตรียม
0	กระจายเยื่อในน้ำ
10	เติมสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายตัวเติม PCC / NCC
20	เติมสารละลาย CPAM ที่ปริมาณต่าง ๆ
30	วัดค่าศักร์ซีต้า

2.1.2) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content)

เตรียมขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) ตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-02 [54] ที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนจากน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดไม่เกินร้อยละ 5 (76-84 กรัมต่อตารางเมตร) ตามมาตรฐานกระดาษพิมพ์/เขียน (Printing and writing paper) มอก. 287-2533 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 กระจายในเครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator) ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเติมสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายตัวแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (เพื่อให้เหลือปริมาณตัวเติมภายในกระดาษทดสอบร้อยละ 30 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ) แล้วกระจายที่จำนวนรอบเท่ากัน ก่อนเติมสารละลายแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ตั้งแต่ร้อยละ 0 โดยเติมเพิ่มขึ้นลำดับละ 0.2 จนถึงร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง รวมเป็น 8 ภาวะ กระจายน้ำเยื่อที่ความเร็วรอบเท่ากัน ก่อนปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้อยู่ที่ระดับร้อยละ 0.3 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ หลังจากขึ้นแผ่นทดสอบ ทั้งแผ่นทดสอบไว้ข้ามคืนเพื่อให้แห้ง ก่อนนำไปอบที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ในส่วนอบร้อนของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (รุ่น RK-2A KWT, PTA RAPID-KÖTHEN SHEET FORMER) เพื่อให้ใกล้เคียงกับการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรม ทำการทดสอบซ้ำด้วยตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นและปริมาณที่เท่ากัน จากนั้นสุ่มตัดชิ้นตัวอย่างจากแผ่นทดสอบไปเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียสตามมาตรฐาน TAPPI T 211 om-02 [29] เพื่อพิจารณาปริมาณการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่เหมาะสมจากระดับการกักเก็บตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เริ่มคงที่ โดยคำนวณปริมาณเถ้าดังนี้

$$\text{Ash} = \frac{A \times 100}{B} \quad (3)$$

เมื่อ Ash คือร้อยละของเถ้า A คือ น้ำหนักของเถ้า (กรัม) และ B คือ น้ำหนักก่อนนำไปเผา (กรัม)

2.2) การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว

นำผลการหาปริมาณที่เหมาะสมของการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ในการกักเก็บตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งสองชนิดจากการทดลองที่ 2.1) มาใช้ร่วมกันในการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) ตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-02 [54] น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวสำหรับการเติมในสารแขวนลอยแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตระหว่างร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ โดยพิจารณาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารช่วยกระจายตัวจากค่าศักย์ซีต้า ปริมาณเถ้า รวมถึงสมบัติในด้านต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบ

2.2.1) การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

เตรียมสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนที่เติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตที่ระดับต่าง ๆ ในช่วงของร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม ก่อนเติมลงในน้ำเยื่อเพื่อวัดค่าศักย์ซีต้า โดยมีวิธีการวัดเช่นเดียวกันกับข้อ 2.1.1) ทำการทดสอบซ้ำกับตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.2) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content)

เติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตที่ระดับต่าง ๆ ในช่วงของร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม ลงในสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอน ก่อนเติมลงในน้ำเยื่อเพื่อขึ้นแผ่นทดสอบก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส โดยมีวิธีการคำนวณหาปริมาณเถ้าเช่นเดียวกันกับข้อ 2.1.2) จากนั้นทำการทดสอบซ้ำกับตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.3) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ (Optical properties)

ศึกษาสมบัติทางทัศนศาสตร์ในด้านความขาว (Whiteness) ความขาวสว่าง (Brightness) ความทึบแสง (Opacity) และค่าสี (CIELAB) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวลงในตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่ระดับต่าง ๆ ในช่วงของร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ Technidyne รุ่น Color Touch PC (CTP-ISO)

2.2.4) ความเรียบของแผ่นทดสอบ (Smoothness)

วัดค่าความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวลงในตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่ระดับต่าง ๆ ในช่วงของร้อยละ 0.0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม โดยใช้เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T 479 cm-09 [37] ด้วยวิธีของเบกก์ (Bekk method) ซึ่งจะเป็นการจับเวลาขณะทำการปล่อยอากาศให้ไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นทดสอบ ในหน่วยวินาที

2.2.5) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวลงในตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่ระดับต่าง ๆ ในร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T 220 sp-10 [55] และตั้งค่าความเร็วในการดึง (Speed range) 100 มิลลิเมตรต่อนาที ช่วงการอ่านค่า (Load range) 500 นิวตัน และระยะห่างระหว่างตัวยึดแผ่นทดสอบ 100 มิลลิเมตร วัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่วัดได้นั้นจะรายงานเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบ (ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง)

2.2.6) ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมสารละลายโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวลงในตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดที่ระดับต่าง ๆ ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติม โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester) ด้วยวิธีทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf method) ตามมาตรฐาน TAPPI T 220 sp-10 [55] วัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่วัดได้นั้นจะรายงานเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบ (ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก)

2.2.7) ความแข็งแรงของผิวหน้า (Surface strength)

ทดสอบความแข็งแรงของผิวหน้าแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ทั้ง 2 ด้านด้วยวิธีการใช้แท่งขี้ผึ้ง (Wax pick test) ตามมาตรฐาน TAPPI T 459 om-08 [35] วัดซ้ำ 3 ครั้ง รายงานค่า Critical wax strength number (CWSN) ที่มากที่สุดที่ไม่ถลอกผิวของผิวหน้ากระดาษ

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ

สำหรับการทดลองในส่วนนี้เป็นการผลิตแผ่นทดสอบจากตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยเติมสารเพิ่มการตกค้างและสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองในตอนที 2 ด้วยวิธีขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-06 [54] ที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนจากน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดไม่เกินร้อยละ 5 (76-84 กรัมต่อตารางเมตร) ตามมาตรฐานกระดาษพิมพ์/เขียน (Printing and writing paper) มอก. 287-2533 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ร่วมกับกระดาษทางการค้า ดังนี้

3.1) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ (Optical properties)

ศึกษาสมบัติทางทัศนศาสตร์ในด้านความขาว (Whiteness) ความขาวสว่าง (Brightness) ความทึบแสง (Opacity) และค่าสี (CIELAB) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางด้านทัศนศาสตร์ Technidyne รุ่น Color Touch PC (CTP-ISO)

3.2) ความหนาของแผ่นทดสอบ (Thickness)

วัดระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบ โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T 220 sp-10 [55] ค่าที่วัดได้จะออกมาเป็นไมโครเมตร ทำการวัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 5 จุด

3.3) ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ (Apparent density)

คำนวณจากการนำค่าน้ำหนักมาตรฐานหารด้วยความหนาของแผ่นทดสอบนั้น ๆ โดยรายงานในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4) ความเรียบของแผ่นทดสอบ (Smoothness)

วัดค่าความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่องวัดความเรียบ (Smoothness tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T 479 cm-09 [37] ด้วยวิธีของเบกก์ (Bekk method) โดยจะทำการปล่อยอากาศตามปริมาตรที่กำหนดให้ไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นทดสอบ จากนั้นจับเวลากระทั่งอากาศไหลผ่านผิวหน้ากระดาษจนหมดในหน่วยวินาที

3.5) ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ (Air resistance)

เป็นการวัดความสามารถของแผ่นทดสอบในการยอมให้อากาศไหลผ่าน โดยใช้เครื่องวัดความต้านอากาศ ตามมาตรฐาน TAPPI T 460 om-11 [39] ด้วยวิธีของเกอร์เลย์ (Gurley method) วัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง

3.6) การวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength tester) ตามมาตรฐาน TAPPI T 220 sp-10 [55] และตั้งค่าความเร็วในการดึง (Speed range) 100 มิลลิเมตรต่อนาที ช่วงการอ่าน (Load range) 500 นิวตัน และมีระยะห่างระหว่างตัวยึดแผ่นทดสอบ 100 มิลลิเมตร วัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่วัดได้นั้นจะรายงานเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบ (ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง)

3.7) การวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester) ด้วยวิธีทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf method) ตามมาตรฐาน TAPPI T 220 sp-10 [55] วัดแผ่นทดสอบชุดละ 5 แผ่น แผ่นละ 1 ครั้ง โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่วัดได้นั้นจะรายงานเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของแผ่นทดสอบ (ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก)

3.8) คุณภาพการพิมพ์ในการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ต (Inkjet printing)

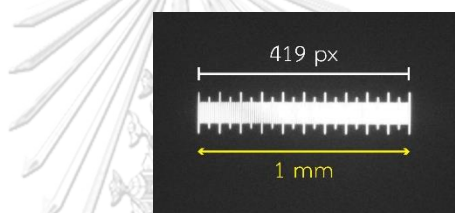
ทดสอบสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบด้วยแบบทดสอบการพิมพ์ตามภาพที่ 3-5 ทั้งด้านบน (Top side) หรือด้านสีกหลาด และด้านล่าง (Bottom side) หรือด้านตะแกรง ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึกทางการค้า (Canon PIXMA iP4900) จำนวน 3 ครั้ง โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์คุณภาพการพิมพ์ดังนี้

8.1) วัดค่าความดำที่พื้นทึบ (Solid density) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

โดยวัดที่แถบพิมพ์ที่ร้อยละ 100

8.2) วิเคราะห์คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) ที่ขนาด 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตร

จากภาพที่ถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ และคำนวณหาความละเอียดของภาพที่ถ่ายได้ โดยเทียบจำนวนพิกเซลในภาพด้วยสเกลมาตรฐานในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 สเกลมาตรฐานที่ใช้เทียบจำนวนพิกเซล

พื้นที่ของภาพต้นฉบับคำนวณได้จากขนาดของจุดร่วมกับความละเอียดของภาพ และพื้นที่ของจุดที่พิมพ์ได้คิดจากจำนวนพิกเซลสีดำในภาพ ดังสมการ (4) เมื่อได้พื้นที่ของจุดที่สั่งพิมพ์และพื้นที่จุดที่พิมพ์ได้ จะสามารถคำนวณความแตกต่างของพื้นที่ได้ตามสมการ (5)

$$\text{Dot area} = \pi \left(\frac{\text{Resolution} \times \text{Dot size}}{2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{Dot quality} = \frac{\text{Printing area} - \text{Dot area}}{\text{Dot area}} \times 100 \quad (5)$$

8.3) วิเคราะห์คุณภาพตัวอักษร (Text quality) โดยพิจารณาขนาดตัวอักษรเล็กที่สุดที่สามารถอ่านได้ ของตัวอักษรแบบมีเชิง (Serif) ที่พิมพ์ตัวอักษรด้านบนพื้นขาว (Positive) ที่ขนาดตัวอักษร 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 พอยต์ (Point, Pt.) รวมถึงตัวอักษรแบบไม่มีเชิง (San serif) ทั้งแบบที่พิมพ์ตัวอักษรด้านบนพื้นขาว (Positive) และตัวอักษรขาวบนพื้นดำ (Negative) ที่ขนาดตัวอักษร 6, 8, 10 และ 12 พอยต์ (Point, Pt.) ดังแสดงในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 Test target ที่ใช้ในการทดสอบสภาพพิมพ์ได้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการทดลองในบทที่ 4 นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ตอน โดยในตอนที่ 4.1 นี้จะเป็นผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติม ส่วนตอนที่ 4.2 เป็นผลการศึกษาปริมาณการกักเก็บแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) จากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างในปริมาณต่าง ๆ เพื่อนำไปศึกษาผลและคัดเลือกปริมาณการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้

และสำหรับผลการทดลองในตอนที่ 4.3 จะเป็นผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ รวมทั้งสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ จากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน โดยผสมกับพอลิอะคริเลตและพอลิอะคริลาไมด์ในปริมาณที่เหมาะสมจากการคัดเลือกในตอนที่ 4.2

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติม

ในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนทางการค้าและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า จะประกอบด้วย สมบัติทางทัศนศาสตร์ พื้นที่ผิวจำเพาะ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค องค์ประกอบทางเฟส การสูญเสียน้ำหนักหลังการเผา และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตได้รับความร้อน

1) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า

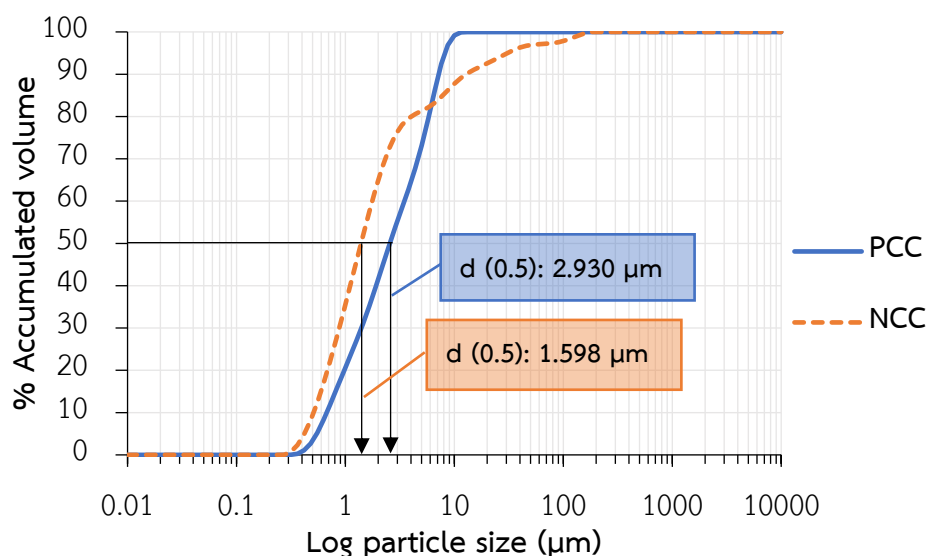
เมื่อวิเคราะห์ค่าความขาว ความขาวสว่าง และค่าสีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 4-1 พบว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีความขาวและความขาวสว่างสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอน เนื่องจากอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงเกิดการกระเจิงแสงและสะท้อนแสงออกมาจากผิวหน้าของอนุภาคได้มากกว่าความแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอน ส่วนค่าสี (CIELAB) ของตัวเติมทั้งสองชนิดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างสีเพียง 0.186 ($\Delta E^*_{ab}=0.186$)

ตารางที่ 4-1 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และสีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

สมบัติทางทัศนศาสตร์	PCC	NCC
ความขาว (%)	88.16	88.87
ความขาวสว่าง (%)	91.89	92.32
L*	97.43	97.54
a*	0.06	0.15
b*	1.21	1.09

2) พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

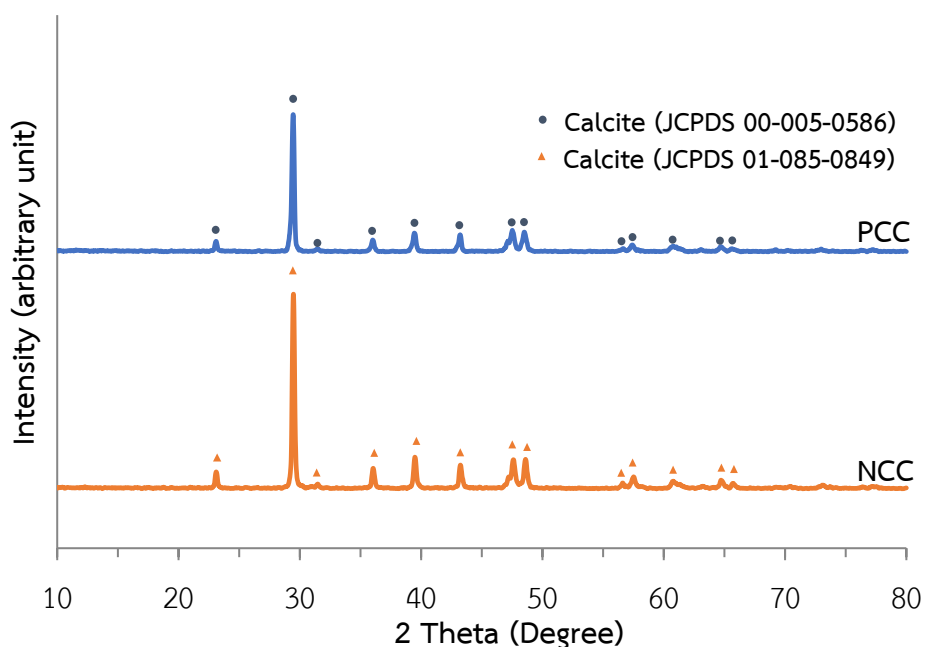
จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยการวิเคราะห์แบบเปียกโดยกระจายอนุภาคด้วยน้ำในระบบ Hydro 2000 MU พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3.21 และ 4.68 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ โดยในภาพที่ 4-1 เป็นการแสดงการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดเท่ากับ 2.930 และ 1.598 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

3) องค์ประกอบทางเฟสของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า

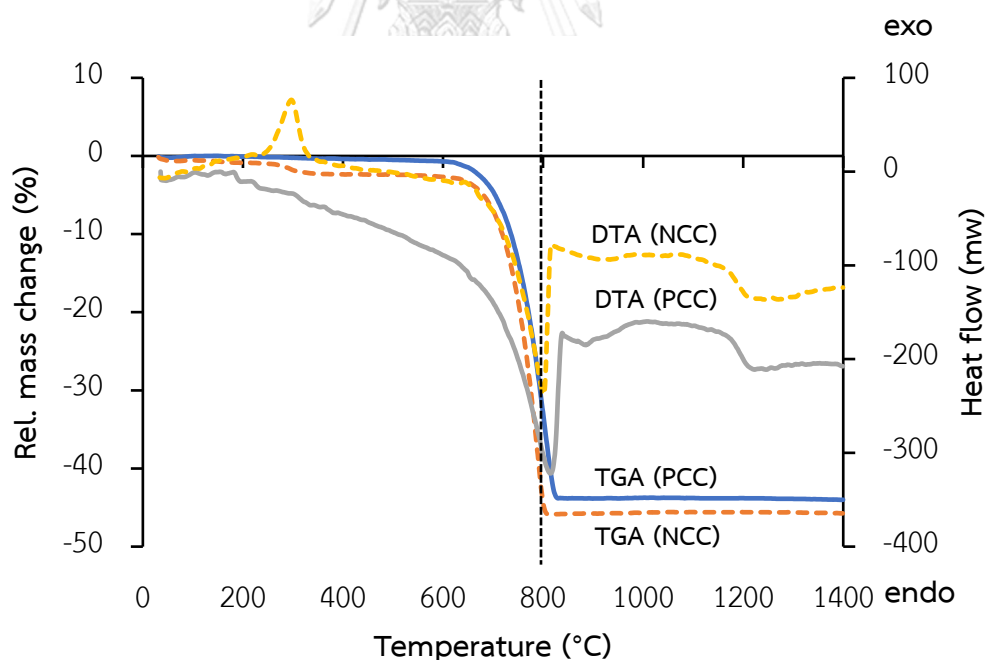
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (XRD) ของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่าตัวเติมทั้งสองชนิดประกอบด้วยเฟสหลัก คือ แคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) อยู่ในรูปผลึกกรมโอบีทรัล โดยตรงกับ JCPDS หมายเลข 00-005-0586 และ 01-85-0849 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงข้อมูลมาตรฐานที่ตรวจวัดโดยองค์กร Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด ดังนั้นสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบพีค (XRD pattern) และหมายเลขข้อมูล JCPDS เฉพาะตัว



ภาพที่ 4-2 องค์ประกอบทางเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

4) การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากผลการวิเคราะห์น้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนทางการค้าและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ดังแสดงในภาพที่ 4-3 พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนขึ้น แสดงถึงการสูญเสียน้ำทำให้มวลหายไปร้อยละ 1.38 เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มที่จะดีกว่า โดยเฉพาะความชื้นที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ และที่อุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส มวลของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างสมบูรณ์ [56] โดยมวลของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลดหายไปในปริมาณที่ใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 43.09 และ 43.03 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันได้ว่าปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาแผ่นทดสอบที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส เป็นปริมาณของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากเส้นใยเริ่มมีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [29]



ภาพที่ 4-3 การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อได้รับความร้อน

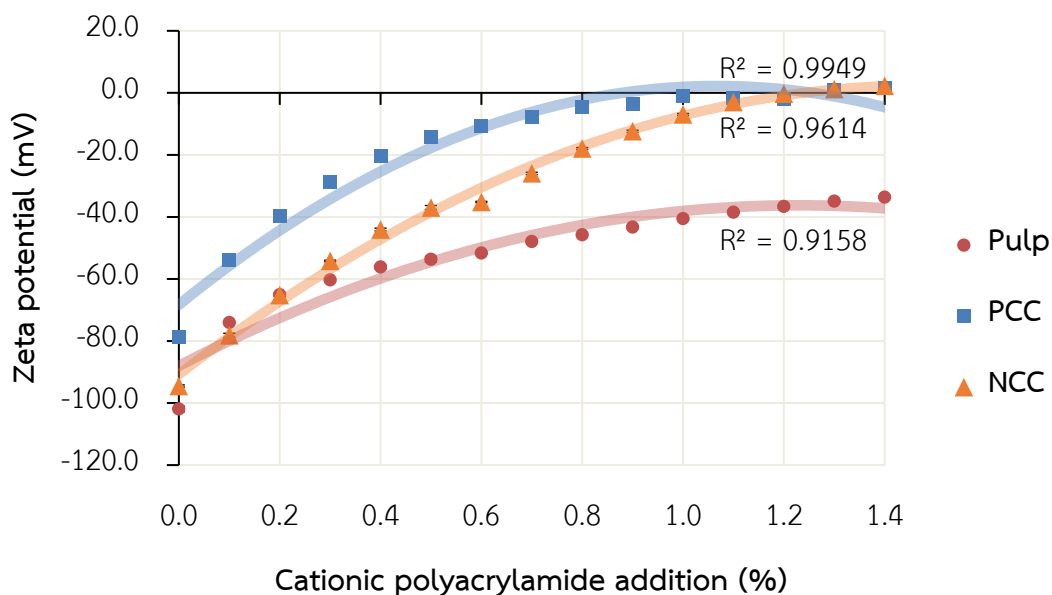
4.2 ปริมาณที่เหมาะสมของการเติมสารเติมแต่ง

4.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง

การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง นั้น จะพิจารณาค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และปริมาณเถ้า (Ash content) ประกอบกันโดยพิจารณาจากค่าศักย์ซีต้าของระบบเมื่อเริ่มเข้าใกล้ศูนย์และระดับการกักเก็บตัวเติมที่เริ่มคงที่

1) การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

เพื่อวิเคราะห์ผลการเติมสารเพิ่มการตกค้างเพื่อคัดเลือกปริมาณการเติมประจุบวกที่เหมาะสม (Cationic demand) ภายในระบบ สามารถพิจารณาจากค่าศักย์ซีต้าหรือค่าความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลายได้ ด้วยกระบวนการวัดแบบ Streaming potential ที่อาศัยหลักการวัดความต่างศักย์ของน้ำเยื่อขณะเคลื่อนที่ผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าสองจุด ดังแสดงในภาพที่ 4-4 ทั้งนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ มีผลต่อค่าศักย์ซีต้า



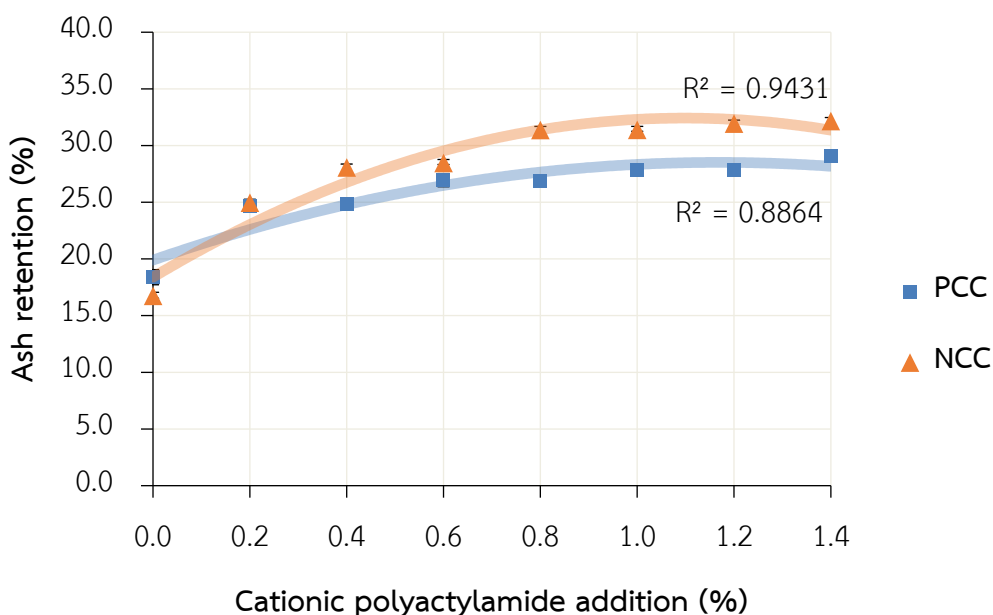
ภาพที่ 4-4 ค่าศักย์ซีต้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณต่าง ๆ ของน้ำเยื่อที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเทียบกับน้ำเยื่อที่ไม่เติมตัวเติม (Pulp)

สำหรับการเติมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ลงในน้ำเยื่อชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำเยื่อที่ไม่เติมตัวเติม (Pulp) น้ำเยื่อที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และน้ำเยื่อที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) โดยควบคุมสภาวะในการทดสอบที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 8.1-8.2 พบว่าในภาวะที่มีแต่เยื่อเปล่าก่อนเติมตัวเติมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และมีค่าศักย์ซีต้าเฉลี่ยอยู่ที่ -101.9 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงถึงประจุลบจากหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ในโครงสร้างเคมีของเส้นใยเซลลูโลส จากนั้นเมื่อเติมสารแขวนลอยจากแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในน้ำเยื่อ ค่าศักย์ซีต้าเฉลี่ยในระบบมีค่าสูงขึ้นถึง -78.7 มิลลิโวลต์ และ -94.5 มิลลิโวลต์ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันได้ว่าทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัวให้ไอออนประจุบวกจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำ และเมื่อเริ่มเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงในน้ำเยื่อทั้ง 3 ภาวะ พบว่าปริมาณการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับทุกภาวะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.1 ถึงร้อยละ 1.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เนื่องจากค่าศักย์ซีต้ารวมในระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าใกล้ 0 มิลลิโวลต์ (Isoelectric point) ซึ่งแสดงถึงความสมดุลภายในระบบ [57] แต่อย่างไรก็ตามถ้าเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปจะทำให้ระบบเริ่มเสถียรได้ สังเกตได้จากค่าศักย์ซีต้าเริ่มมีแนวโน้มกลับมามีค่าลบ

2) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าร้อยละของปริมาณเถ้าที่คำนวณได้จากการเผาผ่านทดสอบที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส เป็นปริมาณการกักเก็บของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำการทดสอบการเผาผ่านทดสอบที่ไม่ได้เติมตัวเติมพบว่าปริมาณเถ้าเหลือเพียงร้อยละ 0.3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าร้อยละของปริมาณเถ้าที่เหลือเป็นการกักเก็บแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปในการบวนการผลิตแผ่นทดสอบ

โดยในภาวะทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) พบว่าก่อนเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเถ้าเหลืออยู่ร้อยละ 18.4 และร้อยละ 16.7 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษตามลำดับ จากนั้นเมื่อเริ่มเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีปริมาณเถ้าของแคลเซียมคาร์บอเนตและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจนถึงระดับการเติมที่ประมาณร้อยละ 1.1-1.2 ปริมาณเถ้าของทั้ง 2 ภาวะจะเริ่มคงที่ที่ร้อยละ 27.1 และร้อยละ 30.0 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-5



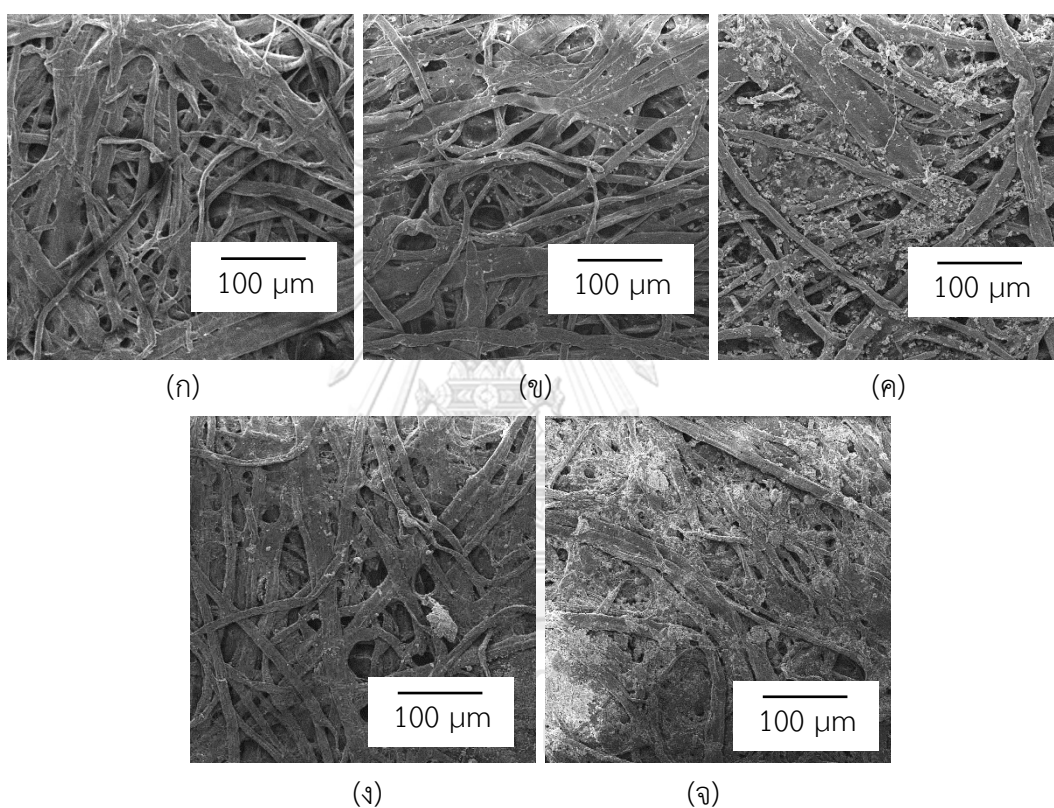
ภาพที่ 4-5 ปริมาณเถ้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

จากการพิจารณาผลการทดลองเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างสำหรับการกักเก็บตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในกระดาษที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าเมื่อเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณการกักเก็บตัวเติมภายในเนื้อกระดาษมากขึ้น โดยมีปริมาณการกักเก็บเริ่มคงที่สูงสุด ที่ระดับการเติมประมาณร้อยละ 1.1-1.2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งยังพบว่าค่าศักย์ซีต้าภายในระบบเข้าใกล้ 0 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงถึงความสมดุลเมื่อเติมพอลิเมอร์ประจุบวกเข้าไปภายในระบบ ในช่วงปริมาณการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 1.1-1.3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกระดับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อใช้สำหรับการหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในการทดลองส่วนถัดไป เนื่องจากเป็นปริมาณการเติมสารเพิ่มการตกค้างเริ่มต้นที่สามารถกักเก็บตัวเติมและมีค่าศักย์ซีต้าใกล้เคียงจุดสมดุลภายในระบบได้สูงสุด ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคภายในเนื้อกระดาษ เพื่อเป็นการยืนยันถึงการกักเก็บที่เพิ่มขึ้น ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่ใส่ตัวเติม ดังนี้

3) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างระดับจุลภาคของแผ่นกระดาษซึ่งได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 4-6 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะเป็นผงสีขาวเกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย โดยจะสังเกตเห็นว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 4-6 ง และ จ) มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (ภาพที่ 4-6 ข และ ค) นอกจากนี้การเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ยังช่วยเพิ่มปริมาณของตัวเติมทั้งสองชนิดอย่างเห็นได้ชัด



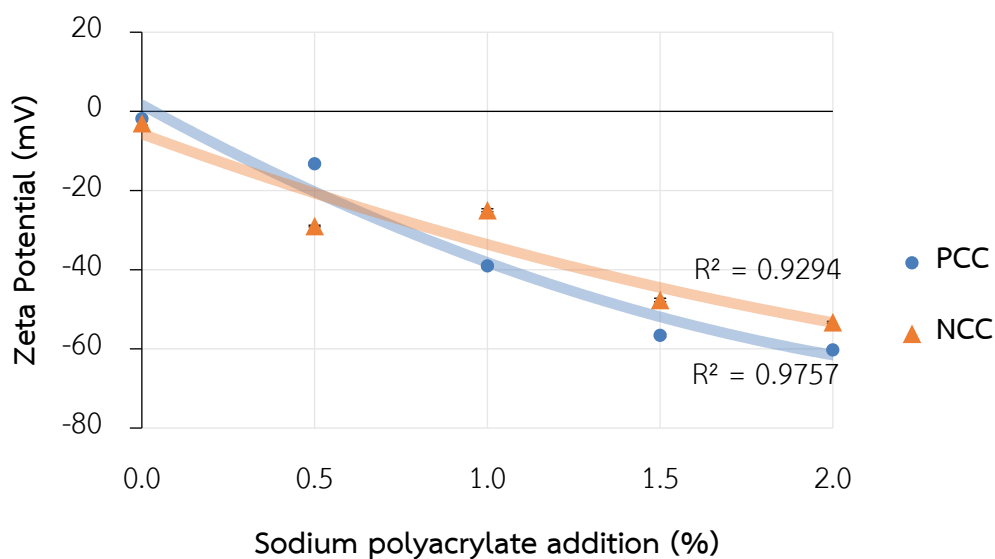
- ภาพที่ 4-6 สัณฐานวิทยาของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เมื่อเติมและไม่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า
- (ก) ภาวะที่ไม่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์
 - (ข) ภาวะที่เติมเฉพาะแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน
 - (ค) ภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ ในปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง
 - (ง) ภาวะที่เติมเฉพาะนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต
 - (จ) ภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ ในปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง

4.2.2 ปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว

การหาปริมาณที่เหมาะสมในการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งนั้น จะพิจารณาร่วมกันจากค่าศักย์ซีต้า ปริมาณการกักเก็บตัวเติม สมบัติทางทัศนศาสตร์ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความเรียบและความแข็งแรงของผิวหน้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

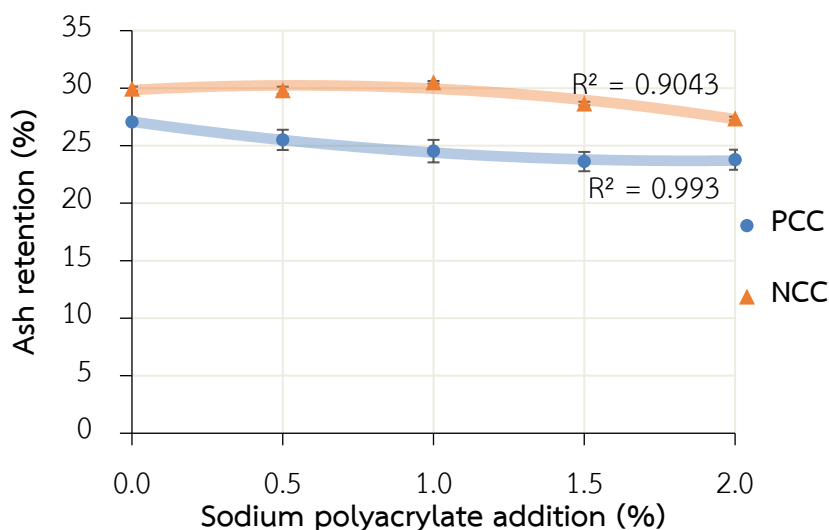
เมื่อพิจารณาค่าศักย์ซีต้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ลงในสารแขวนลอยจากแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และสารแขวนลอยจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยควบคุมสภาวะอุณหภูมิขณะทำการทดสอบอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียสและมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 8.3-8.4 ดังแสดงในภาพที่ 4-7 พบว่าในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับสารเพิ่มการตกค้าง ก่อนเติมสารช่วยกระจายตัว มีค่าศักย์ซีต้าภายในระบบเริ่มต้นที่ -1.8 และ -3.0 มิลลิโวลต์ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเริ่มเติมสารช่วยกระจายตัวลงในสารแขวนลอยแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนนำมาเติมลงในน้ำเยื่อ ค่าศักย์ซีต้าเฉลี่ยในระบบมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึงค่าศักย์ซีต้าที่เป็นค่าลบที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวโซเดียมพอลิอะคริเลต เนื่องจากโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารจำพวก Anionic polyelectrolyte จะเข้าไปดูดซับบนผิวหน้าของแคลไซต์ โดยทำหน้าที่เป็น Chelating agent หรือสารอินทรีย์ที่เข้าไปจับตัวกับประจุบวกของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ทำให้เกิดการคายตัวของประจุ CO_3^{2-} ออกมาจากผิวหน้าอนุภาคแคลไซต์ [58] สารแขวนลอยแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเป็นต่างมากขึ้น (สังเกตได้จากค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นจากการหาปริมาณแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่เหมาะสมในขั้นตอนการวิจัยในส่วนที่แล้ว) จึงทำให้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการกระจายตัวของประจุลบภายในระบบมากขึ้น ค่าศักย์ซีต้าจึงมีความเป็นลบมากขึ้นเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตในปริมาณที่มากขึ้น



ภาพที่ 4-7 ค่าศักย์ซีต้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

2) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash retention)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ดังแสดงในภาพที่ 4-8 พบว่าก่อนเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต มีปริมาณการกักเก็บอยู่ร้อยละ 27.1 และ 30.0 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเริ่มเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าทั้งสองภาวะมีปริมาณการกักเก็บของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดลงเหลือร้อยละ 23.8 และร้อยละ 27.4 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์นี้ช่วยยืนยันถึงความสัมพันธ์กับผลจากค่าศักย์ซีต้าที่มีแนวโน้มเป็นค่าลบมากขึ้น ทำให้น้ำเยื่อที่เตรียมได้มีความไม่สมดุลภายในระบบ อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวมากขึ้น อาจทำให้อนุภาคภายในน้ำเยื่อไม่สามารถยึดเกาะบนผิวของเส้นใย จึงสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างพันธะของเส้นใยหรือตะแกรงขณะขึ้นแผ่นทดสอบ ปริมาณการกักเก็บภายในเนื้อกระดาษจึงมีค่าลดลง เมื่อทำการทดสอบทางสถิติ (F-test) พบว่าเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการกักเก็บในกระดาษลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค)



ภาพที่ 4-8 ปริมาณเถ้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ปริมาณต่าง ๆ ร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

3) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ (Optical properties)

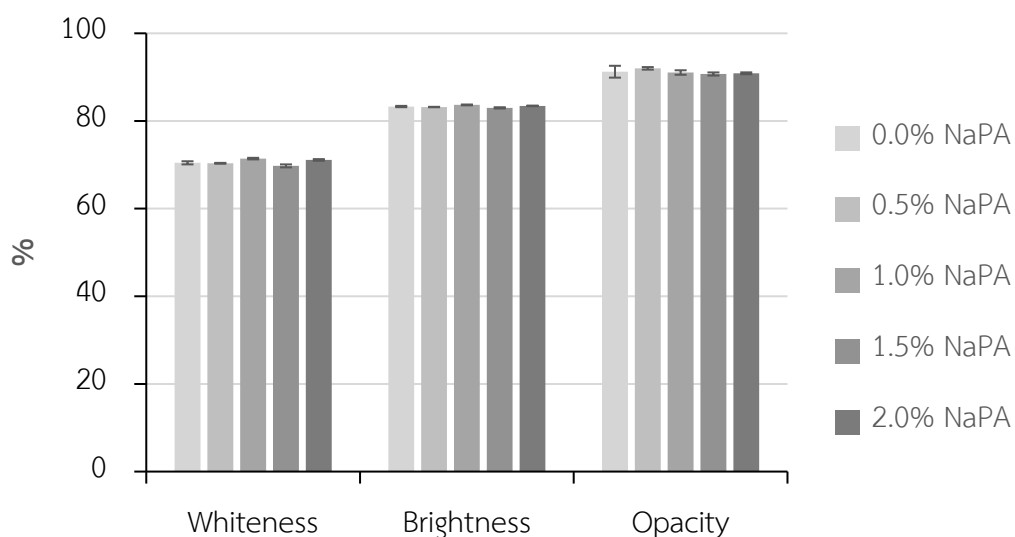
สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบจะเกี่ยวข้องกับลักษณะโดยทั่วไปของกระดาษที่ปรากฏสู่สายตา ค่าที่ทำการตรวจวัดได้แก่ ความขาว (Whiteness) ความขาวสว่าง (Brightness) และความทึบแสง (Opacity) โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน และภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ก่อนวิเคราะห์ค่าสี (CIELAB Value) ร่วมกัน

3.1) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

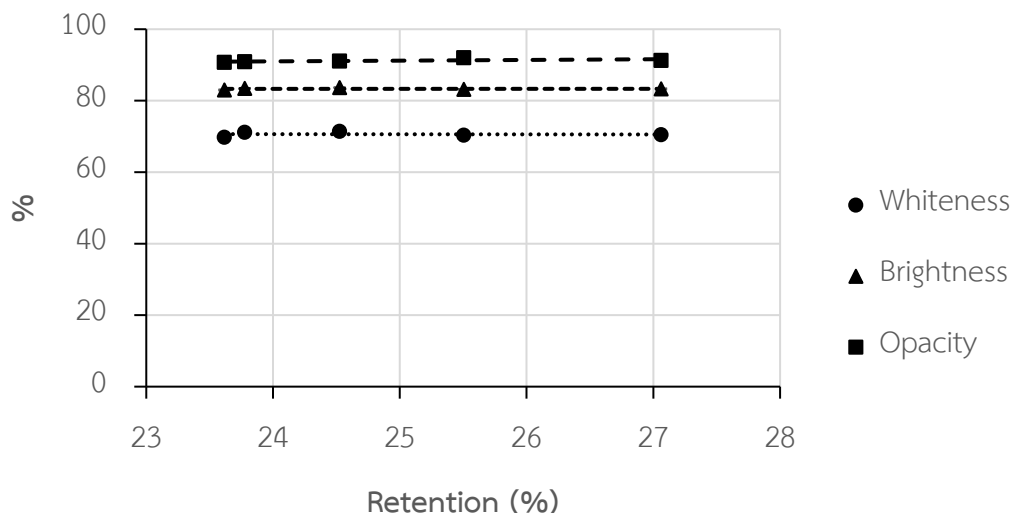
ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 4-2 สามารถสร้างเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 4-9 พบว่า สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มคงที่ทั้งก่อนเติมและหลังเติมสารช่วยกระจายตัว แม้หลังการเติมสารช่วยกระจายตัวจะมีปริมาณกักเก็บอนุภาคตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4-10 เมื่อทำการทดสอบทางสถิติ (F-test) พบว่าเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4-2 ปริมาณการกักเก็บ ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	PCC			
	Retention (%)	Whiteness (%)	Brightness (%)	Opacity (%)
0.0	27.06±0.18	70.45±0.35	83.3±0.15	91.24±1.35
0.5	25.50±0.88	70.34±0.10	83.18±0.05	92.01±0.29
1.0	24.52±0.98	71.41±0.18	83.66±0.10	91.06±0.51
1.5	23.62±0.84	69.75±0.35	82.99±0.15	90.72±0.36
2.0	23.78±0.87	71.11±0.19	83.44±0.07	90.88±0.21



ภาพที่ 4-9 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัว (NaPA) ที่ระดับต่าง ๆ



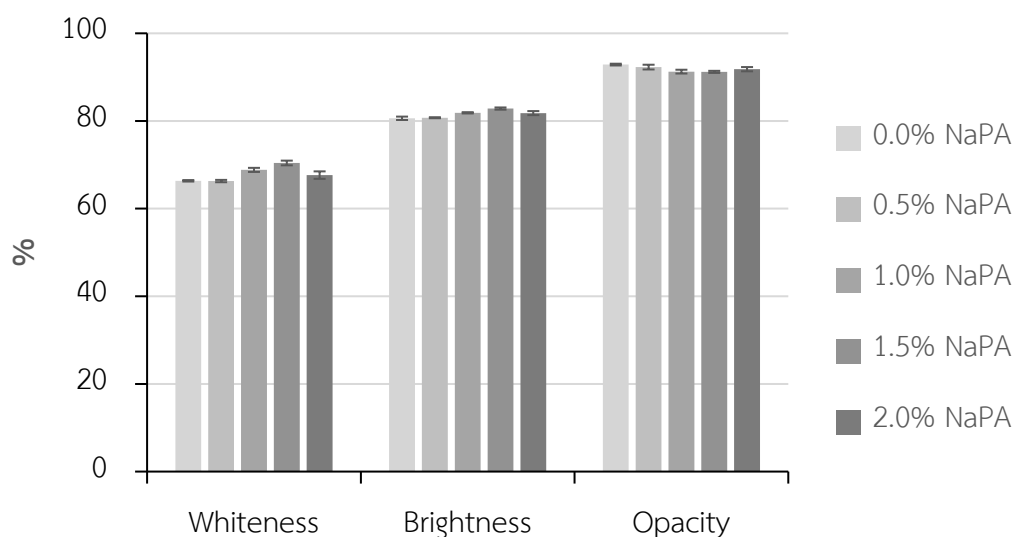
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง กับปริมาณการกักเก็บของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) ที่ปริมาณต่าง ๆ

3.2) สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

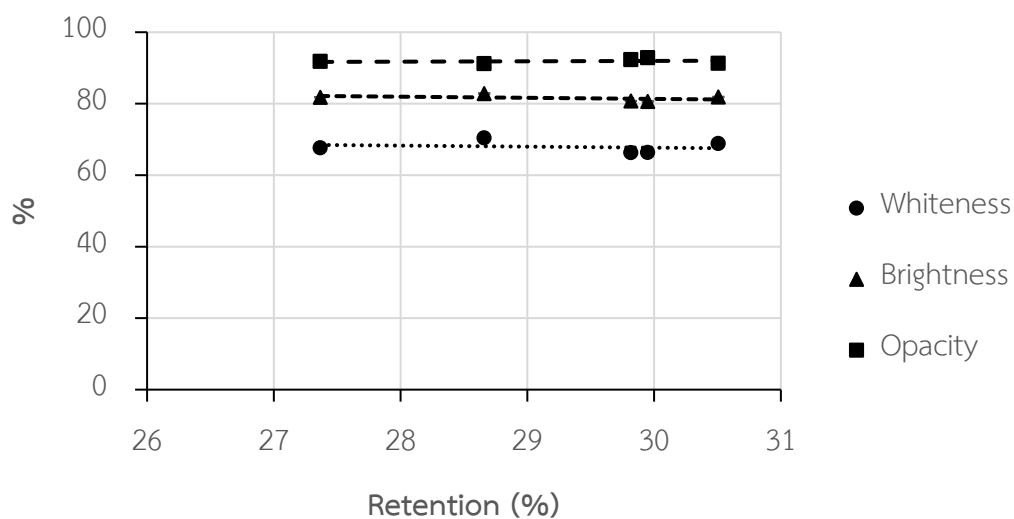
เมื่อทำการทดลองโดยใช้โซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในภาวะที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ได้ผลตามตารางที่ 4-3 และแผนภูมิเปรียบเทียบตามภาพที่ 4-11 พบว่าค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต มีความใกล้เคียงกันในทุกระดับปริมาณการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เมื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกักเก็บ ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ดังภาพที่ 4-12 พบว่าปริมาณการกักเก็บไม่ส่งผลต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ เช่นเดียวกับกับในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน เมื่อทำการทดสอบทางสถิติ (F-test) พบว่าเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความขาว ความขาวสว่าง แต่ส่งผลต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4-3 ปริมาณการกักเก็บ ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ของแผ่นทดสอบที่
เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	NCC			
	Retention (%)	Whiteness (%)	Brightness (%)	Opacity (%)
0.0	29.95±0.18	66.35±0.17	80.61±0.39	92.87±0.20
0.5	29.82±0.31	66.29±0.27	80.74±0.12	92.3±0.54
1.0	30.51±0.11	68.84±0.46	81.86±0.15	91.26±0.43
1.5	28.66±0.16	70.42±0.54	82.83±0.25	91.21±0.24
2.0	27.37±0.15	67.65±0.85	81.79±0.46	91.82±0.49



ภาพที่ 4-11 สมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติม
สารช่วยกระจาย (NaPA) ตัวที่ระดับต่าง ๆ



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง กับปริมาณการกักเก็บของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ที่ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสีของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ พบว่าระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวไม่ได้ส่งผลต่อค่าสีของกระดาษทดสอบจนสังเกตได้

ตารางที่ 4-4 ค่าสีของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) และ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	PCC			NCC		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0.0	95.32±0.03	0.08±0.02	3.93±0.05	94.46±0.13	0.26±0.03	4.34±0.28
0.5	95.30±0.03	0.11±0.01	3.81±0.02	94.51±0.02	0.28±0.01	4.28±0.04
1.0	95.38±0.04	0.07±0.01	3.67±0.03	94.77±0.03	0.20±0.02	3.96±0.08
1.5	95.31±0.02	0.06±0.02	3.94±0.03	95.01±0.05	0.13±0.03	3.79±0.07
2.0	95.30±0.02	0.06±0.02	3.72±0.04	94.81±0.11	0.23±0.03	4.57±0.29

4) ความเรียบและความแข็งแรงของผิวหน้าแผ่นทดสอบ

สมบัติด้านพื้นผิวของแผ่นทดสอบจะเกี่ยวข้องกับลักษณะโดยทั่วไปของกระดาษที่พบบนพื้นผิว ซึ่งค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความเรียบ (Smoothness) และความแข็งแรงของผิวกระดาษ (Surface strength) ที่วัดด้วยวิธีการใช้แท่งขี้ผึ้ง (Wax pick test) โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน และภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

4.1) ความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน

เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่าผิวหน้ากระดาษทั้งสองด้านมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยด้านล่างของแผ่นทดสอบ (Bottom side) ใช้เวลาในการให้อากาศไหลผ่านนานกว่าด้านบน แสดงถึงผิวที่มีความเรียบมากกว่า ถึงแม้ว่าจะเป็นด้านที่ติดกับตะแกรง เนื่องจากในการวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้แผ่นเหล็กมารองรับแผ่นทดสอบในด้านที่ติดกับตะแกรง และผ่านการนำไปอัดแผ่นหลังจากขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 ทำให้ด้านล่างของแผ่นทดสอบนั้นมีความเรียบสูง ทั้งยังพบว่าผิวหน้ากระดาษทั้งสองด้านมีแนวโน้มคงที่ทั้งก่อนและหลังเติมสารช่วยกระจายตัว เมื่อทำการทดสอบทางสถิติ (F-test) พบว่าเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อวิเคราะห์ถึงความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษพบว่าผิวของกระดาษทั้งสองด้านทนต่อการถอนผิวสูงสุดที่เบอร์ 7A โดยกระดาษที่ผลิตได้ทั้งสองด้านให้ค่าความแข็งแรงของผิวหน้าที่เท่ากันในทุกภาวะ ตารางที่ 4-5 ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	Smoothness (sec)		Wax pick (CWSN)	
	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side
0.0	9.42±0.80	41.84±3.88	7A	7A
0.5	8.58±0.53	42.90±1.06	7A	7A
1.0	8.76±0.29	45.68±3.68	7A	7A
1.5	8.96±0.52	47.76±2.68	7A	7A
2.0	7.82±0.77	43.26±1.99	7A	7A

4.2) ความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์ ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ จากตารางที่ 4-6 พบว่าผิวหน้ากระดาษทั้งสองด้านมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยด้านล่างของแผ่นทดสอบ (Bottom side) ใช้เวลาในการให้อากาศไหลผ่านนานกว่าด้านบน แสดงถึงผิวที่มีความเรียบมากกว่า เหมือนในภาพที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน แต่พื้นผิวด้านบนของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นพบว่ามีความเรียบต่ำ เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีอนุภาคขนาดเล็ก และมีพื้นที่ผิวเยอะกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนจึงทำให้เกาะรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomeration) ได้ง่าย รวมถึงมีน้ำหนักเบาจึงทำให้อนุภาคของตัวเติมอาจลอยอยู่ด้านบนของผิวน้ำเยื่อขณะทำการระบายน้ำออกในการผลิตกระดาษ เมื่อระบายน้ำออกจนหมด อนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงกองอยู่บนผิวหน้าของกระดาษเป็นจำนวนมาก ทำให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้มีความหยาบ มีลักษณะเป็นฝุ่นผง สีขาว อนุภาคขนาดเล็กอยู่ที่ผิวหน้าของกระดาษ จึงเป็นสาเหตุให้ความแข็งแรงของผิวหน้ากระดาษทั้งสองด้านทนต่อการถอนผิวสูงสุดไม่เท่ากัน โดยด้านบนหรือด้านที่มีอนุภาคตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อทดสอบความแข็งแรงของผิวหน้าพบว่าทุกภาวะการเติมสารช่วยกระจายตัว อนุภาคของตัวเติมที่ผิวหน้ากระดาษจะไม่หลุดลอกออกมาเมื่อทดสอบด้วยแท่งซี่ฟิ่งที่เบอร์ 2A แต่ในด้านล่างของแผ่นทดสอบจะสามารถทนต่อการถอนผิวสูงสุดได้ที่เบอร์ 7A เท่ากันกับแผ่นทดสอบในภาพที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน

ตารางที่ 4-6 ค่าความเรียบ และความแข็งแรงของผิวแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	Smoothness (sec)		Wax pick	
	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side
0.0	1.10±0.00	52.52±2.29	2A	7A
0.5	1.10±0.00	51.78±6.01	2A	7A
1.0	0.98±0.11	34.28±2.46	2A	7A
1.5	0.98±0.11	34.24±1.64	2A	7A
2.0	2.26±0.25	51.18±2.14	2A	7A

5) ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษทดสอบจะเกี่ยวข้องกับการต้านทานแรงที่ทำให้กระดาษขาด โดยค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear) และความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile) โดยรายงานเป็นค่าดัชนี เพื่อให้สามารถใช้เปรียบเทียบกันได้ จากตารางที่ 4-7 พบได้ว่าทั้งดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยกระจายตัว ทั้งในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยในภาวะของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเป็นตัวเติมนั้นมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงสุดเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักอนุภาค ส่วนในภาวะที่ใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมนั้นความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 2 ของน้ำหนักอนุภาค ซึ่งแนวโน้มของความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวเพิ่มขึ้น นั้นเกิดจากเครือข่ายของเส้นใยภายในระบบสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคตัวเติมมีการกระจายตัวออกจากกันและอาจมีบางส่วนหลุดลอดผ่านเครือข่ายเส้นใยและตะแกรงขึ้นแผ่นออกไปขณะทำการระบายน้ำเพื่อผลิตกระดาษ

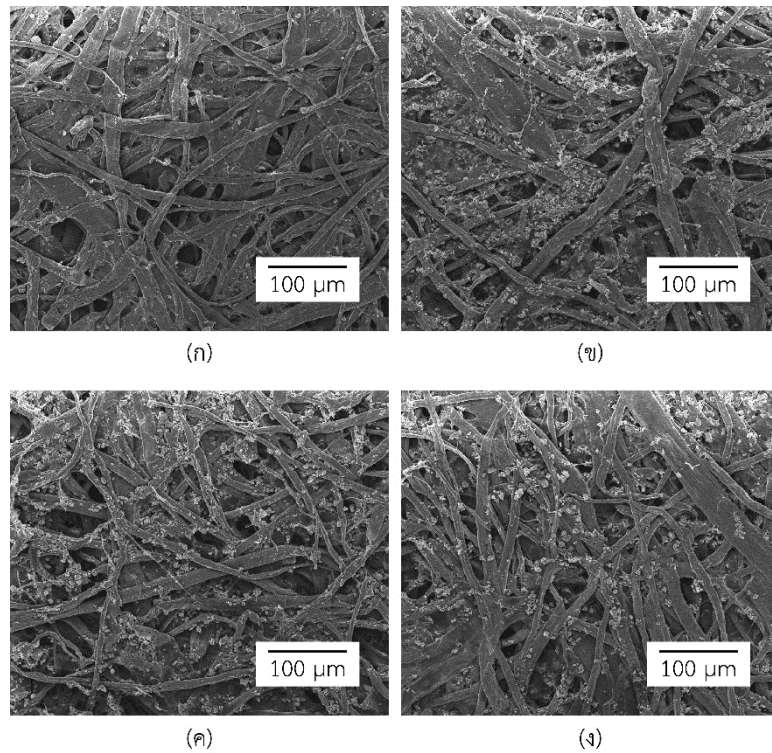
ตารางที่ 4-7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ของแผ่นทดสอบเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

NaPA (%)	PCC		NCC	
	Tear index (mN·m ² /g)	Tensile index (Nm/g)	Tear index (mN·m ² /g)	Tensile index (Nm/g)
0.0	6.52±0.12	27.18±0.79	5.49±0.10	24.28±0.75
0.5	7.01±0.13	31.80±1.78	5.34±0.10	25.53±2.07
1.0	8.09±0.15	29.23±1.15	7.60±0.14	26.07±1.56
1.5	9.07±0.17	31.30±0.75	5.54±0.10	29.90±1.99
2.0	6.72±0.12	31.53±1.86	8.63±0.16	30.97±1.38

จะเห็นได้ว่าการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในสารแขวนลอยของ แคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าศักย์ซีต้าภายในระบบมีแนวโน้มเป็นค่าลบมากขึ้น อนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้น อนุภาคมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อนุภาคไม่สามารถยึดเกาะบนผิวของเส้นใยได้ จึงสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างพันธะของเส้นใยและตะแกรงขณะขึ้นแผ่นทดสอบ ปริมาณการกักเก็บตัวเติมภายในกระดาษจึงมีปริมาณลดลง และเมื่อพิจารณาถึงสมบัติทางทัศนศาสตร์ ความเรียบ ความแข็งแรงของผิวหน้า ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ พบว่าการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตนั้นไม่ส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว

6) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

โครงสร้างระดับจุลภาคของแผ่นกระดาษซึ่งได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 4-13 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกักเก็บอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (ภาพที่ 4-13 ก และ ข) ทั้งยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณการกักเก็บของตัวเติมลดลงเนื่องจากอนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้นเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้อนุภาคบางส่วนลอดผ่านช่องว่างระหว่างเส้นใย (ภาพที่ 4-13 ค และ ง)



ภาพที่ 4-13 สัณฐานวิทยาของแผ่นทดสอบที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน ในภาวะต่าง ๆ เมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า

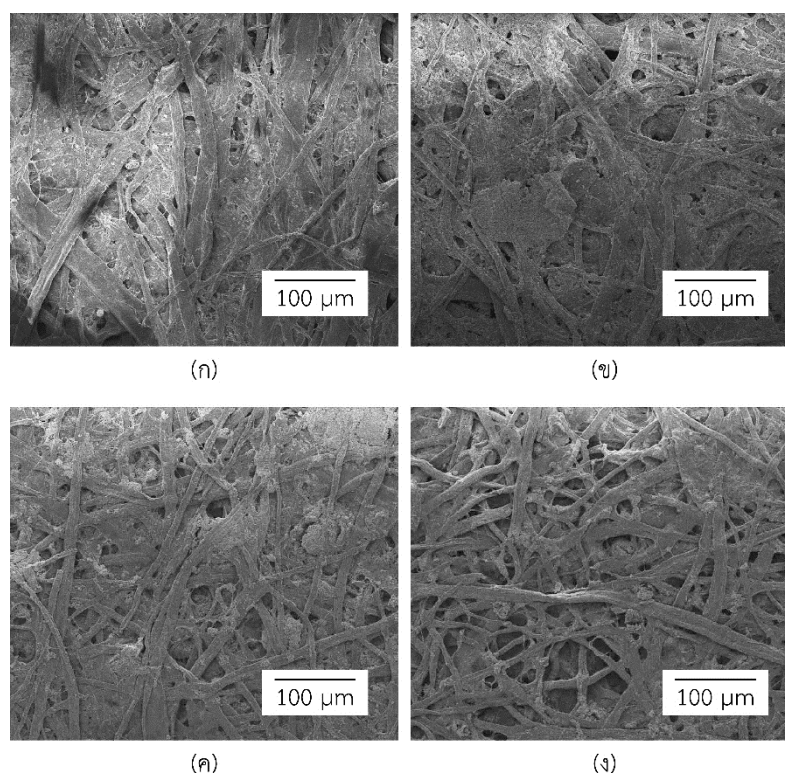
(ก) ภาวะที่ไม่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

(ข) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง

(ค) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง และโซเดียมพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักตัวเต็ม

(ง) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง และโซเดียมพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 2.0 ของน้ำหนักตัวเต็ม

ภาพที่ 4-14 แสดงถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของแผ่นกระดาษในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ซึ่งได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกักเก็บอนุภาคของ NCC ที่เพิ่มขึ้นและอนุภาคของตัวเติมที่เกาะรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (ภาพที่ 4-14 ก และ ข) ทั้งยังแสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้น จึงทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง และบางส่วนสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างเส้นใยได้เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4-14 ค และ ง)



ภาพที่ 4-14 สัณฐานวิทยาของแผ่นทดสอบที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในภาวะต่าง ๆ เมื่อเติมและไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ก) ภาวะที่ไม่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์

(ข) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้ง

(ค) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้งและโซเดียมพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักตัวเติม

(ง) ภาวะที่เติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักแห้งและโซเดียมพอลิอะคริลาไมด์ที่ร้อยละ 2.0 ของน้ำหนักตัวเติม

4.3 ผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ

ผลการทดลองในตอนที่ 3 นี้ เป็นผลการทดลองจากการวิเคราะห์สมบัติในด้านต่าง ๆ และสภาพพิมพ์ได้จากการพิมพ์ระบบอิงก์เจ็ตของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนผสมต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 เป็นตัวเติม โดยเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างในปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และไม่เติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองในตอนที่ 4.2

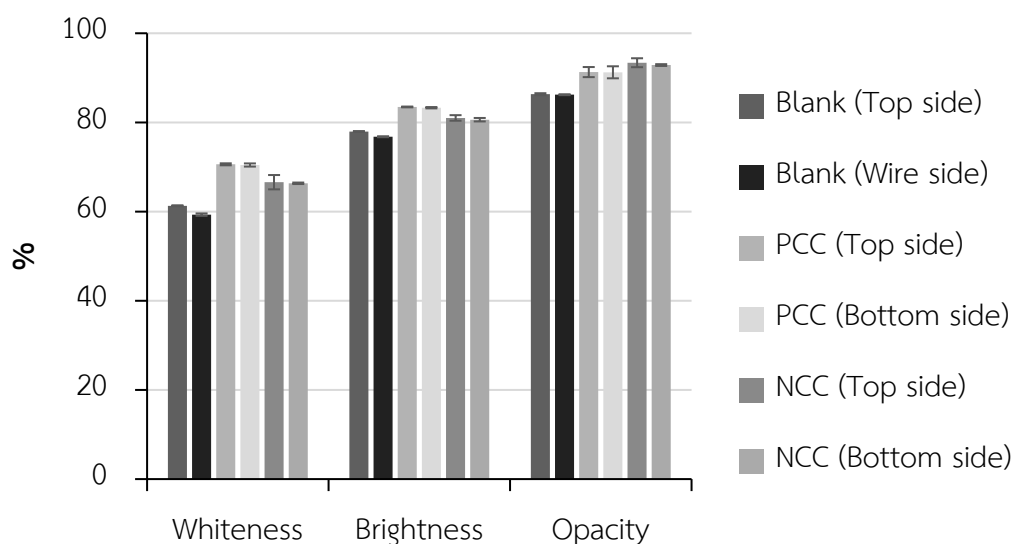
ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการแสดงและวิเคราะห์ผล จึงขอกำหนดสัญลักษณ์ต่าง ๆ ไว้เพื่อแสดงถึงภาวะของการผลิตแผ่นทดสอบ ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 สัญลักษณ์ของภาวะแผ่นทดสอบที่กำหนด

ลำดับที่	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
1	Blank	เยื่อผสมระหว่างเยื่อใยสั้นกับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วน 70:30 ที่ไม่เติมตัวเติมและสารเพิ่มการตกค้าง
2	100:0	อัตราส่วนผสมที่ 100:0 ระหว่าง PCC กับ NCC
3	75:25	อัตราส่วนผสมที่ 75:25 ระหว่าง PCC กับ NCC
4	50:50	อัตราส่วนผสมที่ 50:50 ระหว่าง PCC กับ NCC
5	25:75	อัตราส่วนผสมที่ 25:75 ระหว่าง PCC กับ NCC
6	0:100	อัตราส่วนผสมที่ 0:100 ระหว่าง PCC กับ NCC
7	Comm	กระดาษพิมพ์/เขียนทางการค้าที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 GSM

4.3.1 สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ (Optical properties)

ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบทั้งสองด้าน (Top side และ Bottom side) ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) ร้อยละ 100 และภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) ร้อยละ 100 เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (Blank) ในภาพที่ 4-15 แสดงถึง สมบัติทางทัศนศาสตร์ในด้าน Top side และ Bottom side ของทุกภาวะ ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน การเติมตัวเติมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความขาว ความขาวสว่าง โดยเฉพาะสมบัติด้านความทึบแสงของกระดาษ โดยพบว่าในภาวะที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้กระดาษมีความทึบแสงสูงกว่าการเติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงภายในเนื้อกระดาษจึงทำให้แสงที่ทะลุผ่านลดลง ทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความทึบแสงสูง ทั้งยังพบว่ากระดาษในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีค่าความขาวและความขาวสว่างสูงกว่าภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนเข้าไปแทรกตามช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ดีกว่าอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการสะท้อนแสงได้มากขึ้น



ภาพที่ 4-15 ค่าความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสงของแผ่นทดสอบ

เมื่อพิจารณาค่าสีของแผ่นทดสอบที่วัดได้จากตารางที่ 4-9 พบว่าค่าสีระหว่างด้าน Top side และด้าน Bottom side มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยในภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้มีความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น แต่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าสี เนื่องจากค่า a^* และค่า b^* ของแต่ละภาวะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีความสว่างสูงสุดทั้งด้าน Top side และด้าน Bottom side เมื่อเทียบกับภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (Blank) ซึ่งสัมพันธ์กันกับค่าความขาวและความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ได้รายงานไปข้างต้น นอกจากนี้เมื่อคำนวณค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ระหว่างแผ่นทดสอบในแต่ละภาวะเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง พบว่าในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีความแตกต่างสีมากกว่าภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีความสว่างของแผ่นทดสอบมากกว่า

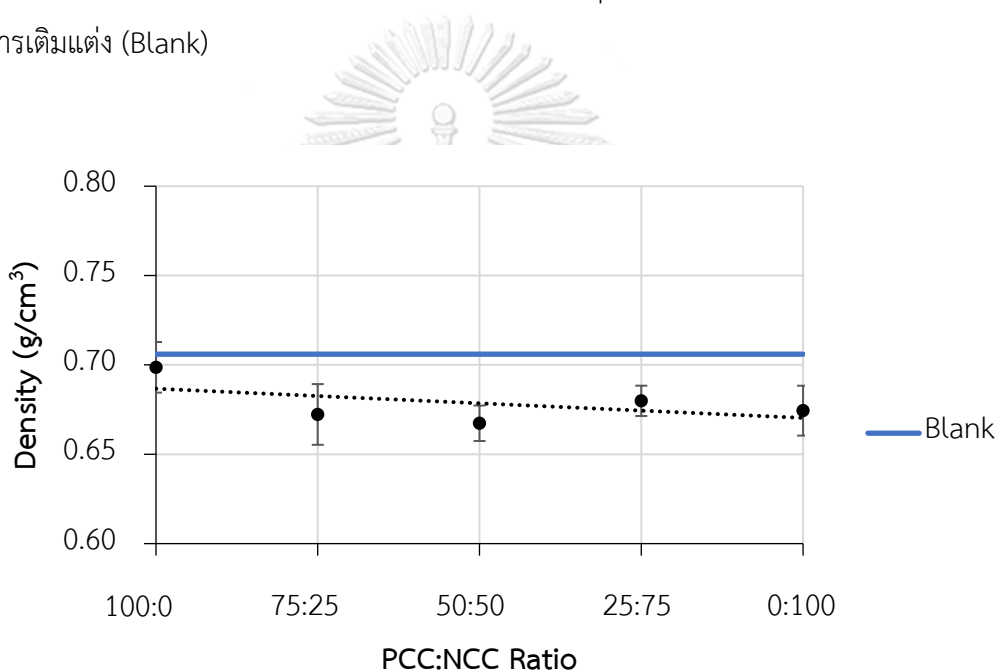
ตารางที่ 4-9 ค่าสี (L^* a^* และ b^*) ของแผ่นทดสอบ

CIELAB Value	Blank		PCC		NCC	
	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side
L^*	93.16±0.46	92.93±0.04	95.32±0.03	95.24±0.06	94.46±0.13	94.34±0.06
a^*	0.09±0.01	0.11±0.02	0.08±0.02	0.09±0.02	0.26±0.03	0.25±0.05
b^*	4.89±0.02	5.09±0.06	3.93±0.05	3.92±0.07	4.34±0.28	4.43±0.21
ΔE^*_{ab}			2.36	2.59	1.42	1.56

*เมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (Blank)

4.3.2 ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ (Apparent density)

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบในแต่ละภาวะเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (Blank) ดังแสดงในภาพที่ 4-16 พบว่าค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นในแต่ละภาวะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยในภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตักตะกอน (PCC) มีค่าความหนาแน่นภายในเนื้อกระดาศสูงกว่าภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เนื่องจากอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตักตะกอนเข้าไปแทรกตามช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้เส้นใยแนบตัวกันได้มากกว่าภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เนื้อกระดาศมีความฟู ซึ่งภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่าง ๆ นั้นมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง (Blank)

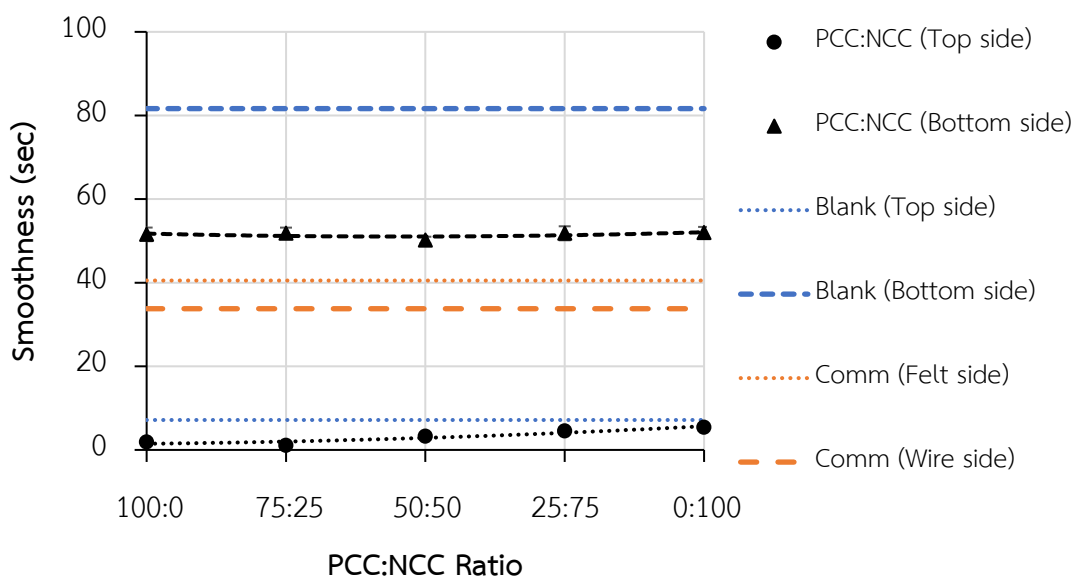


ภาพที่ 4-16 ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ

4.3.3 ความเรียบของแผ่นทดสอบ (Smoothness)

จากการวิเคราะห์ค่าความเรียบของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เต็มสารเติมแต่งและกระดาษทางการค้าดังแสดงในภาพที่ 4-17 พบว่าผิวหน้าของกระดาษทั้งสองด้านในแต่ละภาวะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยทุกภาวะของแผ่นทดสอบทั้งที่เต็มและไม่เต็มตัวเต็ม ผิวหน้ากระดาษด้านล่างของแผ่นทดสอบ (Bottom side) ซึ่งเป็นด้านตะแกรง เมื่อถูกประกบด้วยแผ่นเหล็กและผ่านขั้นตอนการอัดแผ่นในขั้นตอนการผลิตแผ่นทดสอบ จะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียกว่าด้านบน (Top side) และใช้เวลาในการให้อากาศไหลผ่านนานกว่าเสมอ โดยค่าความเรียบที่ได้จะตรงข้ามกับผิวหน้ากระดาษที่ถูกผลิตในอุตสาหกรรม (หรือที่เรียกว่ากระดาษทางการค้า) ซึ่งผิวหน้าด้านล่างหลักของกระดาษทางการค้านั้นมีผิวเรียบกว่าผิวทางด้านตะแกรง

เมื่อพิจารณาในส่วนของด้านล่างแผ่นทดสอบ (Bottom side) พบว่าภาวะที่ไม่เต็มตัวเต็มนี้มีค่าความเรียบสูงสุด เมื่อเทียบกับภาวะที่เต็มตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนตและกระดาษทางการค้า โดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสัดส่วนต่าง ๆ นั้น แม้ไม่ส่งผลต่อความเรียบที่ผิวของกระดาษมากนัก แต่พบว่าแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ด้าน Bottom side มีค่าความเรียบมากกว่ากระดาษทางการค้าทั้งทางด้านหลักและด้านตะแกรงและเมื่อพิจารณาในส่วนของด้านบนแผ่นทดสอบ (Top side) พบว่าผิวหน้าของกระดาษมีความเรียบลดลง ใช้เวลาให้อากาศไหลผ่านได้เร็วขึ้นทั้งในภาวะที่เต็มและไม่เต็มตัวเต็ม โดยภาวะที่เต็มตัวเต็มนี้มีความเรียบต่ำกว่าภาวะที่ไม่เต็มตัวเต็ม เนื่องจากอนุภาคตัวเต็มภายในแผ่นทดสอบอาจมีมากเกินไป ทำให้พื้นผิวนั้นมีความหยาบจากอนุภาคของตัวเต็มที่กองอยู่บนผิวของกระดาษ

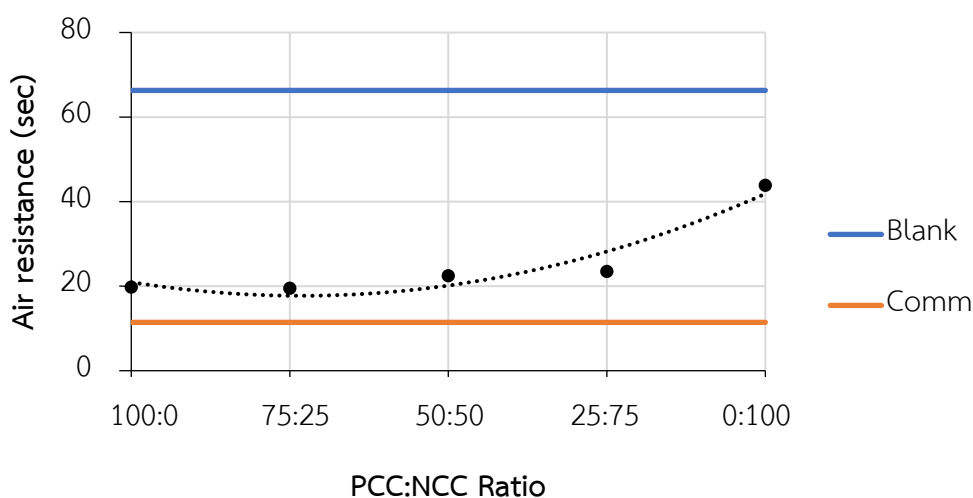


ภาพที่ 4-17 ความเรียบของแผ่นทดสอบ

4.3.4 ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ (Air resistance)

จากการวิเคราะห์ค่าความต้านอากาศของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งและกระดาศทางการค้าดังแสดงในภาพที่ 4-18 พบว่าแผ่นทดสอบในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งค่าความต้านอากาศที่วิเคราะห์ได้ซึ่งโดยปกติค่าความต้านอากาศจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเนื้อกระดาศ โดยกระดาศที่มีเนื้อแน่นจะมีความต้านอากาศสูง แต่ในกรณีนี้พบว่าแผ่นที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณมากกลับมีค่าความต้านอากาศสูง ทั้ง ๆ ที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าแผ่นที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน สันนิษฐานว่าการที่นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้กระดาศมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีจำนวนมากกว่า (เนื่องจาก ณ น้ำหนักที่เท่ากันจะได้จำนวนอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าเพราะมีขนาดเล็กกว่า) ทำให้การไหลของอากาศผ่านโครงสร้างของกระดาศเป็นไปได้ยากกว่า

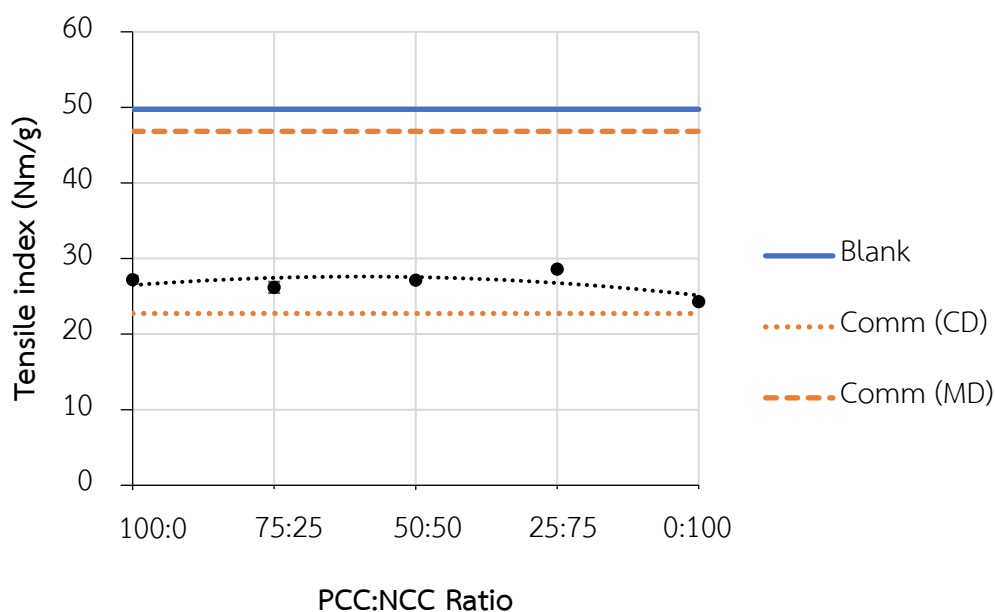
จากนั้นเมื่อเติมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกันนั้นส่งผลให้ค่าความต้านอากาศภายในเนื้อกระดาศมีแนวโน้มลดลง อากาศไหลผ่านได้เร็วขึ้น เนื่องจากเนื้อกระดาศเริ่มมีความหนาแน่นลดลง โดยแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งมีค่าความต้านอากาศภายในเนื้อกระดาศสูงกว่ากระดาศทางการค้า เนื่องจากกระดาศทางการค้าที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้เป็นกระดาศถ่ายเอกสาร ซึ่งจะมีความต้านอากาศค่อนข้างต่ำ ภายในมีรูพรุนสูง เนื้อฟาม เพื่อช่วยถ่ายเทความร้อน และช่วยให้กระดาศแกร่ง ไม่ติดภายในเครื่องถ่ายเอกสารง่าย



ภาพที่ 4-18 ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ

4.3.5 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

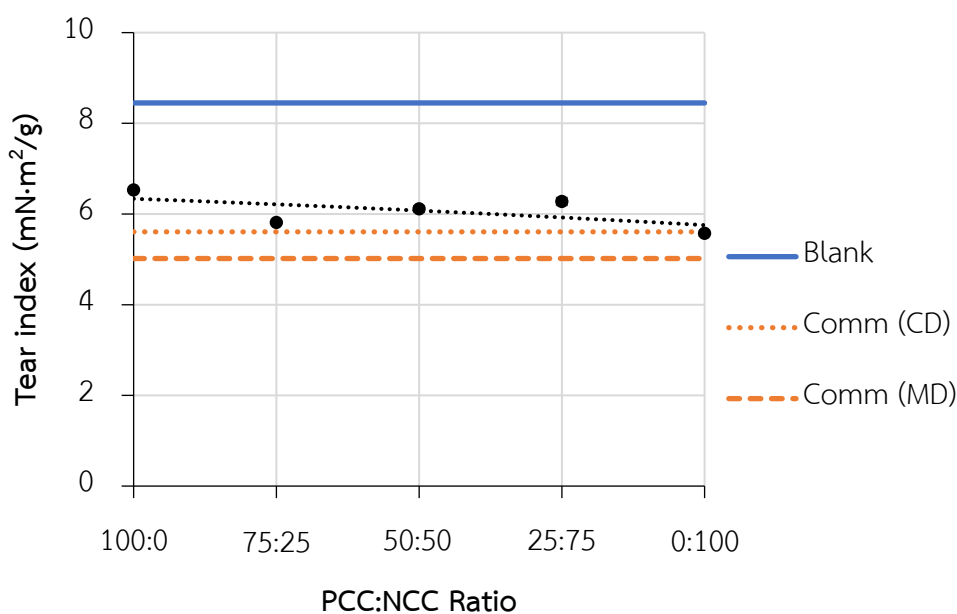
จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งและกระดาษทางการค้าดังแสดงในภาพที่ 4-19 พบว่า แผ่นทดสอบในแต่ละภาวะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในสัดส่วนที่มากขึ้นพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคของตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตบางส่วนที่เกาะรวมกันเป็นขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนั้นเข้าไปขวางกั้นในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย ดังนั้นความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งและเมื่อพิจารณาความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบในภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งเทียบกับกระดาษทางการค้า พบว่ามีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่ากระดาษทางการค้าทั้งในด้านตามเกรน (MD) และขวางเกรน (CD) นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อกระดาษขาดออกจากกันฝุ่นของอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการฟุ้งกระจายออกมาจนสังเกตได้ในขณะทำการทดลอง



ภาพที่ 4-19 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ

4.3.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)

ภาพที่ 4-20 แสดงถึงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งและกระดาษทางการค้า โดยปกติแล้วกระดาษที่มีการเติมตัวเติมลงไป จะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ใส่ตัวเติม ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า ภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดคอกตะกอนมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากกว่าภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีแนวโน้มของความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตบางส่วนอาจไปเกาะบริเวณผิวของเส้นใย ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง โดยภาวะที่เติมตัวเติมนั้นให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกใกล้เคียงกับกระดาษทางการค้า และเมื่อพิจารณาถึงภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงกว่าทั้งภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและกระดาษทางการค้า นั้นเป็นผลเนื่องมาจากเส้นใยไม่ถูกแทรกด้วยอนุภาคของตัวเติม เส้นใยจึงมีความแข็งแรงทำให้สร้างปริมาณพันธะระหว่างเส้นใยได้มาก กระดาษที่ผลิตได้จึงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูง



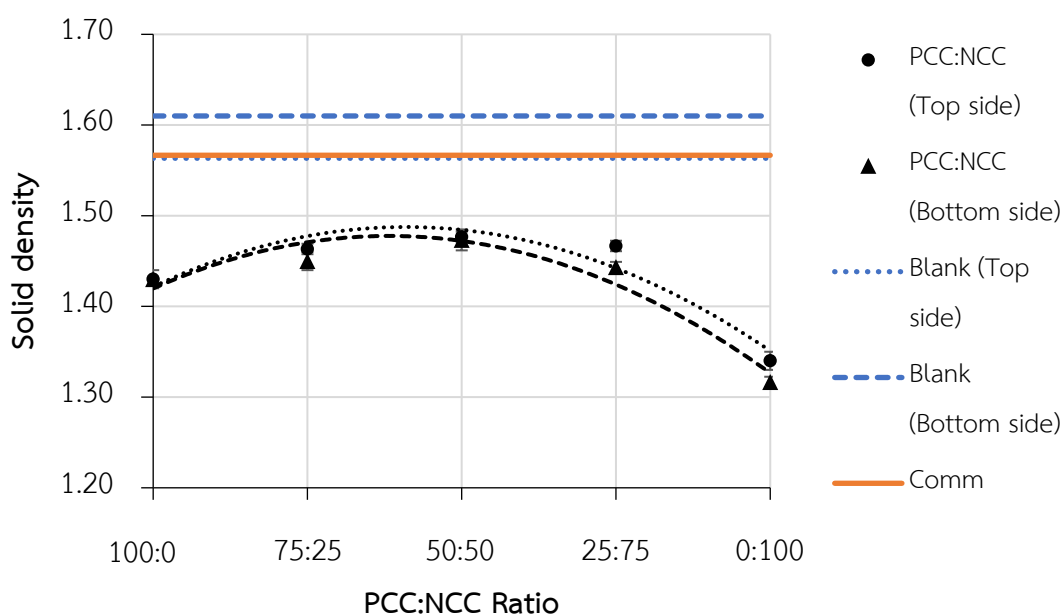
ภาพที่ 4-20 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบ

4.3.7 ผลการควบคุมคุณภาพการพิมพ์ในการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing)

ในการควบคุมคุณภาพการพิมพ์ในขั้นตอนนี้จะทดสอบโดยใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท Canon PIXMA iP4900 กับแผ่นทดสอบในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งและกระดาษทางการค้า ซึ่งมีลักษณะงานพิมพ์แบบพื้นที่ โดยจะวิเคราะห์คุณภาพที่พิมพ์ได้ดังนี้

1) ความดำที่พื้นที่ (Solid density) ของแผ่นทดสอบ

จากการวัดค่าสีดำพื้นที่ระดับสีร้อยละ 100 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-21 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความดำในภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นจะมีค่าความดำที่ต่ำกว่าภาวะที่ไม่เติมตัวเติม ในทั้งสองด้านของแผ่นทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของตัวเติมที่เติมเข้าไปส่งผลให้เนื้อกระดาษมีความพรุนสูงขึ้น เกิดช่องว่างภายในเนื้อกระดาษส่งผลให้หมึกสามารถซึมลงไปได้มากขึ้น ความดำพื้นที่ที่วัดบริเวณผิวกระดาษจึงมีค่าลดลงเนื่องจากหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทที่ใช้ในการทดลองนี้มีฐานตัวทำละลายเป็นน้ำ ทั้งนี้ที่การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 ให้ค่าความดำที่วัดได้มากกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ของแผ่นทดสอบ



ภาพที่ 4-21 ค่าความดำพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

2) คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) ที่ขนาด 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตรของแผ่นทดสอบ

ทำการวัดพื้นที่ของจุดที่พิมพ์ได้ที่ขนาดต่าง ๆ เทียบกับพื้นที่ของจุดต้นฉบับ และคำนวณค่าความแตกต่างผ่านภาพถ่ายดิจิทัลจากกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image processing) ดังแสดงในภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 โปรแกรมวิเคราะห์คุณภาพจุดที่พิมพ์ได้

เมื่อได้พื้นที่ของจุดที่สั่งพิมพ์และพื้นที่จุดที่พิมพ์ได้ จะสามารถคำนวณได้ตามสมการ (4) และรายงานผลความแตกต่างได้ดังตารางที่ 4-10 แสดงถึงค่าความแตกต่างของพื้นที่น้อยจะหมายถึงขนาดของจุดที่พิมพ์ได้มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกับขนาดจุดต้นฉบับที่สั่งพิมพ์ โดยจุดที่พิมพ์ได้นั้นพบว่ามีการขยายตัวในลักษณะเดียวกัน (ขยายตัวจากการซีมของหมึกบนผิวหน้าของกระดาษทดสอบในทุกทิศทาง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าร้อยละความแตกต่างพื้นที่ของจุดต้นฉบับที่มีขนาดเล็กจะมากกว่าจุดต้นฉบับขนาดใหญ่

ตารางที่ 4-10 คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) ของแผ่นทดสอบ

ภาวะ	0.3 mm		0.4 mm		0.5 mm	
	Top side (%)	Bottom side (%)	Top side (%)	Bottom side (%)	Top side (%)	Bottom side (%)
Blank	68.15±15.74	66.84± 8.35	38.58± 8.35	42.89± 8.35	32.90± 6.73	34.64± 6.69
100:0	51.75±13.31	52.19±11.01	29.76± 7.14	36.43±11.01	27.64± 5.19	31.82± 6.05
75:25	46.99±14.55	49.54± 9.88	35.85± 7.24	26.56± 9.88	32.11± 5.18	23.71± 6.79
50:50	50.02±13.36	50.43±13.51	28.53± 8.97	27.19±13.51	28.07± 6.10	28.47±12.48
25:75	47.49±12.13	52.78±11.20	32.76±11.10	26.27±11.2	28.44± 6.61	23.91±10.09
0:100	54.09±15.09	45.63±13.70	27.08±11.02	40.30±13.7	26.54± 6.66	34.55±10.15
Comm	32.07± 8.28	32.07± 8.28	17.51± 8.28	17.51± 8.28	16.08± 7.61	16.08± 7.61

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าขนาดของจุดที่พิมพ์ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับต้นฉบับที่สั่งพิมพ์ มีค่าความต่างของขนาดจุดน้อย (มีการแผ่ของหยดหมึกพิมพ์น้อยลง) กว่าภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งคุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกับภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยกระดาษทดสอบที่ผลิตได้จากภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งนั้นให้ค่าคุณภาพของจุดไม่ดีเท่าไรนัก เนื่องจากกระดาษทดสอบไม่ได้มีการใส่สารกันซึมภายในเนื้อกระดาษ และเคลือบสารกันซึมที่ผิวหน้าเพื่อปรับสมบัติการรับหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทซึ่งเป็นหมึกพิมพ์ฐานน้ำ ทำให้หมึกซึมและแผ่ออกด้านข้างได้มากกว่ากระดาษทางการค้า เนื่องจากกระดาษทางการค้ามีการเคลือบสารกันซึมที่ผิวหน้า (Surface sizing)

3) คุณภาพตัวอักษร (Text quality) ของแผ่นทดสอบ

โดยพิจารณาจากขนาดตัวอักษรเล็กที่สุดที่สามารถอ่านได้ของตัวอักษรทั้งแบบมีเชิงและตัวอักษรแบบไม่มีเชิงดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่าในทุกภาวะมีขนาดตัวอักษรที่เล็กที่สุดที่ยังสามารถอ่านได้เท่ากันที่ 4 พอยต์สำหรับตัวอักษรแบบมีเชิงและ 6 พอยต์สำหรับตัวอักษรแบบไม่มีเชิงทั้งสองแบบ ในทุกภาวะของแผ่นทดสอบ

ตารางที่ 4-11 คุณภาพตัวอักษร (Text quality) ของแผ่นทดสอบ

ภาวะ	Serif		San serif positive		San serif negative	
	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side	Top side	Bottom side
Blank	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
100:0	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
75:25	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
50:50	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
25:75	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
0:100	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.
Comm	4 Pt.	4 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.	6 Pt.

เมื่อพิจารณาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ในด้านต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง สามารถสรุปสมบัติได้ดังตารางที่ 4-12 พบว่าการเติมตัวเติมร่วมกันระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมนั้นส่งผลให้สมบัติของกระดาษที่เพิ่มขึ้นได้แก่ ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่ามีสมบัติในด้านความหนาแน่นปรากฏ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าความด้าที่พื้นที่บดที่ลดลง

ตารางที่ 4-12 สมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะต่าง ๆ เทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง

Paper properties	PCC:NCC Ratio				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
Whiteness	++	N/A	N/A	N/A	+
Brightness	+	N/A	N/A	N/A	+
Opacity	+	N/A	N/A	N/A	++
CIELAB Value	++	N/A	N/A	N/A	+
Density	-	-	-	-	-
Smoothness	-	-	+	+	++
Air resistance	+	-	-	-	+
Tensile/Tear	-	-	-	-	-
Print density	-	-	-	-	-
Dot quality	+	+	+	+	+
Text quality	0	0	0	0	0

หมายเหตุ N/A หมายถึงไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากเครื่องวัดชำรุด

โดย ค่าบวก (+) หมายถึง สมบัติของกระดาษที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง
 ค่าลบ (-) หมายถึง สมบัติของกระดาษที่ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง
 ค่าศูนย์ (0) หมายถึง ไม่มีความแตกต่างเมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเปรียบเทียบการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน โดยศึกษาการเพิ่มการกักเก็บของตัวเติมทั้งสองชนิดด้วยการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัว และแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้าง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในการปรับปรุงสมบัติกระดาษสามารถสรุปได้ ดังนี้

สามารถใช้แคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างในการเพิ่มปริมาณการกักเก็บของตัวเติมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตภายในกระดาษได้ โดยสามารถวิเคราะห์ปริมาณการเติมสารเพิ่มการตกค้างที่เหมาะสมได้ด้วยปริมาณแก้วและค่าศักย์ซีต้าภายในระบบ พบว่าร้อยละปริมาณการเติมสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง สามารถเพิ่มปริมาณการกักเก็บได้สูงสุดและมีค่าศักย์ซีต้าภายในประจุที่สมดุล แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในสารแขวนลอยของแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งสองชนิดก่อนเติมลงในน้ำเยื่อนั้นพบว่าโซเดียมพอลิอะคริเลตเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ค่าศักย์ซีต้าภายในระบบมีแนวโน้มเป็นค่าลบมากขึ้น อนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้น อนุภาคมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อนุภาคไม่สามารถยึดเกาะบนผิวของเส้นใยได้ จึงสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างพันธะของเส้นใยและตะแกรงขณะขึ้นแผ่นทดสอบ ตัวเติมภายในกระดาษจึงมีปริมาณลดลง และเมื่อพิจารณาถึงสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้ สมบัติทางทัศนศาสตร์ ความเรียบ ความแข็งแรงของผิวหน้า ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ พบว่าการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวนั้นไม่ส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ

นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นทดสอบที่ผลิตจากการเติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นช่วยเพิ่มสมบัติทางทัศนศาสตร์ได้ดี ทั้งในด้านความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่าการเติมตัวเติมในการผลิตกระดาษนั้นจะทำให้สมบัติในด้านความหนาแน่นปรากฏ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าความดำที่พื้นทึบที่ลดลงเนื่องจากตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตช่วยดูดซับหมึกพิมพ์อิงก์เจ็ตซึ่งเป็นหมึกพิมพ์ฐานน้ำล้างจากผิวหน้ากระดาษ เมื่อเทียบกับภาวะที่ไม่เติมสารเติมแต่งใด ๆ และในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 100 นั้นพบว่าสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้นั้นยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะสมบัติในด้านความเรียบ พบว่ากระดาษที่ผลิตได้มีฝุ่นผงของอนุภาคตัวเติมกองอยู่บนผิวหน้า มีลักษณะหยาบ เนื่องจากนาโน

แคลเซียมคาร์บอเนต มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีพื้นที่ผิวมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน จึงทำให้เกาะรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ได้ง่าย รวมถึงมีน้ำหนักเบาจึงทำให้อนุภาคของตัวเติมอาจลอยอยู่ด้านบนของผิวหน้าเยื่อขณะทำการระบายน้ำออกในการผลิตกระดาษ เมื่อระบายน้ำออกจนหมด อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงกองอยู่บนผิวหน้าของกระดาษเป็นจำนวนมาก

ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการกระจายสารแขวนลอยแคลเซียมคาร์บอเนตให้กระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เพื่อลดการเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่
- 2) ควรทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้กับภาวะที่เตรียมเข้าร่วมกับสารเพิ่มการตกค้าง โดยไม่เติมตัวเติม
- 3) อาจทำการวิจัยต่อถึงปริมาณเติมตัวที่เหมาะสม เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการกักเก็บอนุภาคตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ร้อยละ 30 ของกระดาษทดสอบ พบว่าระหว่างทำการทดสอบ มีปริมาณตัวเติมเกินพอดี สังเกตได้จากอนุภาคที่หลุดออกมาจากผิวหน้ากระดาษทดสอบ รวมถึงมีลักษณะผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอ
- 4) อาจทดลองใช้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในด้านอื่นเพิ่มเติม เช่น การเคลือบผิวกระดาษ

รายการอ้างอิง

- [1] Krogerus, B. Fillers and pigments. In Gullichsen, J., et al., (eds.) Papermaking Chemistry, pp. 117-147, Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- [2] El-Sherbiny, S., El-Sheikh, S., and Barhoum, A. Preparation and modification of nano calcium carbonate filler from waste marble dust and commercial limestone for papermaking wet end application. Powder Technology 279, 2015: 290-300.
- [3] Shen, J., Song, Z., Qian, X., Yang, F., and Kong, F. Nanofillers for papermaking wet end applications. BioResources 5 (3), 2010: 1328-1331.
- [4] Kumar, P., Negi, Y.S., and Singh, S.P. Filler loading in the lumen or/and cell wall of fibers—A literature review. BioResources 6 (3), 2011: 3526-3546.
- [5] Middleton, S., Desmeules, J., and Scallan, A. Lumen loading with calcium carbonate fillers. Journal of pulp and paper science 29 (7), 2003: 241-246.
- [6] สำนักงานราชบัณฑิตยสภา. พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.royin.go.th/dictionary/index.php> [20 มิถุนายน 2561]
- [7] ชุมพล คุณวาสี. เอกสารประกอบการสอนวิชาความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อไม้กับน้ำ (Wood Water Relations) ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [8] แพรวพรรณศิริ มีพงษ์. ผลของไฟน์ต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษจากเยื่อโซดาเยื่อคาลิปต์ส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [9] กุณทีนี สุวรรณกิจ และ สมพร ชัยอารีย์กิจ. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ (Pulp and Paper Technology) ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [10] Sjöström, E. The Structure of Wood. Wood Chemistry Fundamentals and Applications, pp. 1-20, California, USA: Academic Press, Inc., 1993.
- [11] Won, J.-M., Cho, B.-U., and Lee, Y.-K. Effects of PCC loading at thick stock on the paper properties. Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry 44 (4), 2012: 62-68.

- [12] Ming, H., Lee, Y.K., and Won, J.M. Effect of the modification of PCC with NCC on the paper properties. Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry 47 (4), 2015: 136-143.
- [13] Norell, M., Johansson, K., and Persson, M. Retention and drainage. In Gullichsen, J., et al., (eds.) Papermaking Chemistry, pp. 43-76, Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- [14] ISO 186:2002(E): Paper and board — Sampling to determine average quality. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.
- [15] T 400 sp-11: Sampling and accepting a single lot of paper, paperboard, containerboard, or related product. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2011.
- [16] ISO 187:1990(E): Paper, board and pulps — Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1990.
- [17] T 402 sp-08: Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2008.
- [18] กุณทีนี สุวรรณกิจ. เอกสารประกอบการสอนวิชาสมบัติของกระดาษ (Paper Properties), หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2558.
- [19] Levlin, J.-E. General physical properties of paper and board. In Gullichsen, J., et al., (eds.) Pulp and Paper Testing, pp. 138-160, Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- [20] พิวิศ สุขณียุทธ. ผลของการเติมเยื่อเวียนทำใหม่ต่อสภาพพิมพ์ได้ของกระดาษในกระบวนการพิมพ์ต่าง ๆ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [21] Vaarasalo, J. Optical properties of paper. In Gullichsen, J., et al., (eds.) Pulp and Paper Testing, pp. 163-180, Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- [22] ISO 287:2009(E): Paper and board — Determination of moisture content of a lot — Oven-drying method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [23] T 412 om-11: Moisture in pulp, paper and paperboard. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2011.

- [24] ISO 536:1995(E): Paper and board — Determination of grammage. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
- [25] T 410 om-08: Grammage of paper and paperboard (weight per unit area). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2008.
- [26] ISO 534:2005(E): Paper and board — Determination of thickness, density and specific volume. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
- [27] T 411 om-10: Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2010.
- [28] T 413 om-11: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 900°C. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2011.
- [29] T 211 om-02: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2002.
- [30] ISO 1924-3:2005(E): Paper and board — Determination of tensile properties Part 3: Constant rate of elongation method (100 mm/min). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
- [31] T 494 om-06: Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2006.
- [32] ISO 1974:1990(E): Paper — Determination of tearing resistance (Elmendorf method). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1990.
- [33] T 414 om-04: Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2004.
- [34] ISO 3783:2006(E): Paper and board — Determination of resistance to picking — Accelerated speed method using the IGT-type tester (electric model). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
- [35] T 459 om-08: Surface strength of paper (wax pick test). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2008.

- [36] ISO 5627:1995(E): Paper and board — Determination of smoothness (Bekk method). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
- [37] T 479 cm-09: Smoothness of paper (Bekk method). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2009.
- [38] ISO 5636-5:2003(E): Paper and board — Determination of air permeance and air resistance (medium range) — Part 5 : Gurley method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [39] T 460 om-11: Air resistance of paper (Gurley method). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2011.
- [40] ISO 11475:2004(E): Paper and board — Determination of CIE whiteness, D65/10° (outdoor daylight). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2004.
- [41] T 560 om-10: CIE whiteness and tint of paper and paperboard (d/0 geometry, C/2 illuminant /observer). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2010.
- [42] ISO 2470-1:2009(E): Paper, board and pulps — Measurement of diffuse blue reflectance factor — Indoor daylight conditions (ISO brightness). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [43] T 525 om-06: Diffuse brightness of paper, paperboard and pulp (d/0). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2006.
- [44] ISO 2471:2008(E): Paper and board — Determination of opacity (paper backing) — Diffuse reflectance method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.
- [45] T 519 om-11: Diffuse opacity of paper (d/0 paper backing). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2011.
- [46] Wyszecki, G. and Stiles, W.S. Concepts and Methods, Quantitive Data and Formulae,. Color science, New York: A Wiley-Interscience Publication 2000.
- [47] ISO 5631-2:2008(E): Paper and board — Determination of colour by diffuse reflectance — Part 2: Outdoor daylight conditions (D65/10°) International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.

- [48] ผกามาศ ผจญแก้ว. หน่วยที่ 12 การพิมพ์ระบบพ่นหมึก. ใน. เอกสารการสอนชุดวิชา กระบวนการพิมพ์พื้นลึก การพิมพ์พื้นฉลุฉายผ้า และการพิมพ์ไร่แรงกด หน่วยที่ 8-15, หน้า 278-352. นนทบุรี: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2542.
- [49] Kipphan, H. Printing Technologies without a Printing Plate (NIP Technologies): Ink Jet. Handbook of print media, pp. 711-730, New York: Springer Science & Business Media, 2001.
- [50] ภัทรนรี ปานมา และ มนต์นภา ลักษณ์พรวงค์. การปรับสภาพวัตถุพลอยได้จากอุตสาหกรรม การผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพื่อทดแทนสารเติมเต็มในกระดาษพิมพ์เขียน. หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะ วิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [51] Rasteiro, M.G., and others. Correlation between flocculation and adsorption of cationic polyacrylamides on precipitated calcium carbonate. Chemical Engineering Research and Design 95, 2015: 298-306.
- [52] T 200 sp-10: Laboratory beating of pulp (Valley beater method). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2010.
- [53] T 227 om-09: Freeness of pulp (Canadian standard method). Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2009.
- [54] T 205 sp-06: Forming handsheets for physical tests of pulp. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2006.
- [55] T 220 sp-10: Physical testing of pulp handsheets. Technical Association of Pulp and Paper Industry (TAPPI), Georgia, USA, 2010.
- [56] Li, X.-G., Lv, Y., Ma, B.-G., Wang, W.-Q., and Jian, S.-W. Decomposition kinetic characteristics of calcium carbonate containing organic acids by TGA. Arabian Journal of Chemistry 10, 2017: S2534-S2538.
- [57] Ketola, H. and Andersson, T. Dry-strength additives. In Gullichsen, J., et al., (eds.) Papermaking Chemistry, pp. 278-281, Helsinki: Fapet Oy, 1999.
- [58] Eriksson, R., Merta, J., and Rosenholm, J.B. The calcite/water interface II. Effect of added lattice ions on the charge properties and adsorption of sodium polyacrylate. Journal of colloid and interface science 326 (2), 2008: 396-402.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก. การคำนวณการเตรียมน้ำเยื่อและปริมาณสารเคมีที่ใช้

1. การคำนวณปริมาณเยื่อที่ใช้ในการบดเยื่อ

สุ่มตัวอย่างแผ่นเยื่อจากเยื่อไม้สั้น (Hardwood pulp) และเยื่อไม้ยาว (Softwood pulp) เพื่อหาค่าความชื้น ประมาณ 0.50 กรัม ก่อนนำไปใส่ความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรด ในเครื่อง Moisture determination balance ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยวัดเยื่อแยกชนิดกัน และทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นเตรียมเยื่อโดยชั่งให้มีค่าน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 360 กรัม เนื่องจากในการบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-10 [52] กำหนดให้ใช้น้ำหนักเยื่อแห้งจำนวน 360 กรัม ในน้ำปริมาตร 23 ลิตร (ประมาณเทียบเท่ากับน้ำหนัก 23,000 กรัม เมื่อความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นค่าความเข้มข้นของน้ำเยื่อ (% Consistency) ในเครื่องบดเยื่อ (Valley beater) จะมีค่าเท่ากับร้อยละ $(360 / 23,000) \times 100 = 1.57$

ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณเยื่อแห้ง 360 กรัม (โดยกำหนดให้เยื่อมีความชื้นที่ร้อยละ 10)

- เยื่อมีความชื้นที่ร้อยละ 10 (10% Moisture content) หมายความว่าเยื่อเปียกที่เมื่อชั่งน้ำหนัก 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่จำนวน 90 กรัม อีก 10 กรัมเป็นน้ำหนักของน้ำ
- ดังนั้นถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ $(100 / 90) \times 360 = 400$ กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 10 มาจำนวน 400 กรัม จึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัม ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าในเยื่อเปียกที่ชั่งมา 400 กรัม จะมีน้ำอยู่ในเยื่อแล้วปริมาณหนึ่งซึ่งคิดเป็นจำนวน $400 - 360 = 40$ กรัม ดังนั้นเติมน้ำลงไปเพิ่มได้อีกจำนวน 22,960 กรัม เพื่อให้มีปริมาตรน้ำรวมทั้งหมดเป็น 23,000 กรัม จึงจะทำให้เยื่อที่เตรียมสำหรับการบดเยื่อนั้นมีความเข้มข้นร้อยละ 1.57 ตามมาตรฐานในการทดสอบ

2. การคำนวณปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการทดสอบหาค่าสภาพระบายได้ (Freeness)

ในการคำนวณปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการทดสอบหาค่าสภาพระบายได้ จะใช้วิธีการคำนวณค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-09 [53] เมื่อเยื่อมีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1,000 มิลลิลิตร ทั้งนี้สามารถที่จะตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อ ซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.57 ที่ได้จากการบดเยื่อ ดังนั้นในการคำนวณปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อแล้วปรับความเข้มข้นให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.57

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการทดสอบหาค่าสภาพระบายได้ คือ 1,000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3 \times 1,000 = 1.57 \times V_2$$

$$V_2 = (0.3 \times 1,000) / 1.57$$

$$V_2 = 191 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นจะต้องตวงน้ำเยื่อจากเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.57 มา 191 มิลลิลิตร แล้วมาเทใส่กระบอกลดขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นเทน้ำใส่จนกระทั่งได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่าสภาพระบายได้

3. การคำนวณปริมาณเยื่อแห้งสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet)

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 205 sp-02 [54] ที่น้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร โดยในการเตรียมเยื่อแห้งสำหรับขึ้นแผ่นทดสอบนั้นจะต้องทำการคำนวณเพื่อเทียบสัดส่วนน้ำหนักกับแผ่นทดสอบที่น้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งมีน้ำหนักแห้ง 1.2 กรัม ดังนั้นถ้าต้องการผลิตแผ่นทดสอบที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 80 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องคำนวณปริมาณเยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $(80 \times 1.2) / 60 = 1.60$ กรัม

โดยใน 1 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ (Batch) จะผลิตแผ่นทดสอบจำนวน 10 แผ่น เพื่อให้เพียงพอต่อการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษ ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้งทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $1.60 \times 10 = 16$ กรัม โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวเท่ากับ 70:30 กระจายในน้ำด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator) ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ก่อนเจือจางให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ก่อนขึ้นแผ่นทดสอบ โดยการเติมน้ำเพิ่มจนได้น้ำหนักน้ำเยื่อรวม $(16 \times 100) / 0.3 = 5,333.33$ กรัม ซึ่งมีวิธีการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) ดังนี้

- 1) ตวงน้ำเยื่อมาประมาณ 400 กรัม เทลงไปในเครื่องขึ้นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI และเติมน้ำให้ครบ 7 ลิตร (การขึ้นแผ่นต้องชั่งที่คนขึ้นลง 5 ครั้งภายในเวลา 6 ± 1 วินาที) รอปประมาณ 5 ± 1 วินาที ให้น้ำนิ่งแล้วเปิดประตูน้ำ เอาแผ่นซับ (Blotting paper) มาวางประกบประมาณ 2 แผ่น กอนำแผ่นเหล็ก (Couch plate) มาวางตรงกลาง และใช้แท่นน้ำหนัก (Couch roll) กลิ้งไปกลับจำนวน 5 ครั้งในเวลา 10 ± 2 วินาที โดยนำแผ่นทดสอบมารีดและนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C ก่อนชั่งน้ำหนัก จะต้องได้น้ำหนักแห้ง 1.6 กรัม (กระดาษ 80 กรัมต่อตารางเมตร) ถ้าไม่ได้ก็ต้องคำนวณและปรับปริมาตรการตวงน้ำเยื่อให้ได้น้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 1.6 กรัม
- 2) เมื่อได้น้ำหนักแผ่นทดสอบแห้งที่คงที่แล้ว ขึ้นแผ่นต่อเนื่องให้หมดแล้วนำกระดาษซับมารองสองแผ่นก่อนวางแผ่นเหล็ก (Dry plate) มาวางประกบตรงแผ่นทดสอบ จากนั้นวางกระดาษซับทับอีกสองแผ่น ทำแบบนี้จรรครบทุกแผ่นโดยวางซ้อนทับกันและนำมาอัดด้วยเครื่อง Sheet press เป็นเวลา 5 นาที (ความดัน 345 kPa) พอครบกำหนดเวลา ก็นำมาเปลี่ยนกระดาษซับและอัดต่ออีก 2 นาที กอนำมาตากให้แห้งข้ามคืน (Overnight) ด้วยตะแกรงตากเยื่อ กอนำไปอบที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ในส่วนอบร้อนของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ RAPID-KÖTHEN เพื่อให้ใกล้เคียงกับการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรม

4. การเตรียมสารแขวนลอยจากการกระจายตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนต

ในการเตรียมสารแขวนลอยจากการกระจายตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ จะเตรียมในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเยื่อแห้งซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเป็นปริมาณการเติมที่ให้อัตราการกักเก็บประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรม โดยปริมาณเยื่อแห้งที่ใช้ในการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) ที่ผ่านมาจะทราบได้ว่าใน 1 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ (Batch) จะมีเยื่อแห้งประมาณ 16 กรัม ดังนั้นปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ต้องการเท่ากับ $(50 / 100) \times 16 = 8$ กรัม

ดังนั้นในการเตรียมสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะเตรียมได้โดยการชั่งตัวเต็มแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 8 กรัม เติมน้ำจนได้น้ำหนัก $(8 \times 100) \times 2 = 400$ กรัม จากนั้นนำไปกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) ก่อนเติมลงในน้ำเยื่อในขั้นตอนการขึ้นแผ่นทดสอบ

5. การเตรียมและการคำนวณสารเพิ่มการตกค้าง

ในการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างในงานวิจัยนี้ จะเติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากการคำนวณปริมาณเยื่อแห้งสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ (Handsheet) ที่ผ่านมาจะทราบได้ว่าใน 1 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ (Batch) จะมีปริมาณเยื่อแห้งประมาณ 16 กรัม ดังนั้นปริมาณ CPAM ที่ต้องการเท่ากับ $(1.1 / 100) \times 16 = 0.176$ กรัม

โดยในงานวิจัยนี้ใช้สารเพิ่มการตกค้าง Fennopol K 4230 T ประเภท Cationic Polyacrylamide (CPAM) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมีร่า (ประเทศไทย) จำกัด มานั้นจะมีลักษณะอยู่ในสภาพของแข็ง ซึ่งมีปริมาณของแข็ง (Dry content) ที่ร้อยละ 91 จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาปริมาณ CPAM ที่ต้องชั่งมาใช้งานจริงว่าเท่ากับเท่าไร ซึ่งในกรณีนี้จะต้องชั่ง CPAM มาเท่ากับ $(100 / 91) \times 0.176 = 0.193$ กรัม โดยเตรียมสารละลาย CPAM ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ด้วยการเติมน้ำเจือจางให้ได้ปริมาณสุดท้ายเท่ากับ $(100 / 0.1) \times 0.176 = 176$ กรัม กวนต่อเนื่องประมาณ 30 นาที ด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) จากนั้นพักทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้พอลิเมอร์คลายตัว ก่อนนำไปเติมในกระบวนการผลิตกระดาษ

6. การเตรียมและการคำนวณปริมาณสารช่วยกระจายตัว

ในการเติมสารช่วยกระจายตัวลงในสารแขวนลอยที่ได้จากการกระจายตัวแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนี้จะเติมที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0.0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ของน้ำหนักตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยในส่วนนี้จะทำการยกตัวอย่างการคำนวณเพื่อเติมสารช่วยกระจายตัวในปริมาณร้อยละ 1.0 ของน้ำหนักอนุภาคตัวเติมจากการคำนวณปริมาณการเติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเยื่อแห้งที่ผ่านมาจะทราบได้ว่าใน 1 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ (Batch) จะมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 8 กรัม ดังนั้นปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ต้องการเท่ากับ $(1.0 / 100) \times 8 = 0.08$ กรัม

ในงานวิจัยนี้ใช้สารช่วยกระจายตัวโซเดียมพอลิอะคริเลต (Sodium polyacrylate, NaPA) หรือชื่อทางการค้า Dispex® AA 4140 (pH = 8, Viscosity = 400 mPa·s, Solid content = 43%, Active content = 40%) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด ซึ่งอยู่ในสภาพของสารละลาย ดังนั้นถ้าสารช่วยกระจายตัวมีปริมาณแอกทิฟที่ร้อยละ 40 จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาปริมาณสารช่วยกระจายตัวในสภาพของสารละลายว่ามีปริมาณสารช่วยกระจายตัวเท่ากับเท่าไร ในกรณีที่สารช่วยกระจายตัวมีปริมาณแอกทิฟร้อยละ 40 จะต้องใช้สารช่วยกระจายตัวในสภาพของสารละลายจำนวนเท่ากับ $(100 / 40) \times 0.08 = 0.2$ กรัม และเพื่อความสะดวกในการเตรียมสารช่วยกระจายตัวจะเตรียมพร้อมกันสำหรับ 5 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ (Batch) ดังนั้นจะต้องใช้สารช่วยกระจายตัวในสภาพของสารละลาย $0.2 \times 5 = 1.0$ กรัม

ในการเตรียมสารช่วยกระจายตัวจะเตรียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 จะสามารถเก็บไว้ใช้ได้ โดยการแช่เก็บไว้ในตู้เย็น ซึ่งจะสามารถใช้ได้ประมาณ 2 - 3 วัน โดยในแต่ละครั้งที่มีการแบ่งออกมาใช้จะต้องเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ร้อยละ 0.1 ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดผลคลาดเคลื่อนจากการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง วิธีการเตรียมสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 นั้น จะสามารถเตรียมได้โดยการใช้สารช่วยกระจายตัวในสภาพของสารละลายที่ปริมาณ 1.0 กรัม ซึ่งสารละลายนี้จะมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับ $(40 / 100) \times 1.0 = 0.40$ กรัม ดังนั้นปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่ 0.40 กรัมสามารถเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ร้อยละ 1 โดยการเติมน้ำให้ได้ปริมาณสุดท้ายเท่ากับ $(100 / 1) \times 0.40 = 40$ กรัม

ในการแบ่งสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ออกมาใช้ จะแบ่งใช้สารช่วยกระจายตัวปริมาณ 8 กรัม ต่อ 1 ชุดการผลิตแผ่นทดสอบ ซึ่งในสารละลายนี้จะมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่ 0.08 กรัม โดยเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ร้อยละ 0.1 ด้วยการเติมน้ำให้ได้ปริมาณสุดท้ายเท่ากับ $(100 / 0.1) \times 0.08 = 80$ กรัม

ข. สมบัติเบื้องต้นของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัย

1. พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดอนุภาค

1.1. พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน



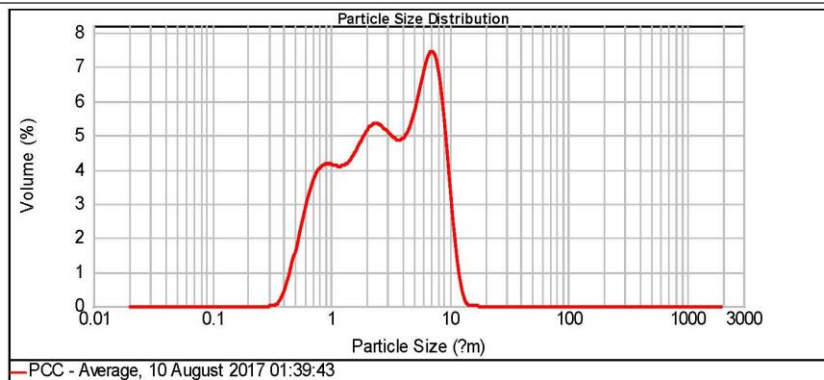
MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name: PCC - Average	SOP Name:	Measured: 10 August 2017 01:39:43	
Sample Source & type:	Measured by: User	Analysed: 10 August 2017 01:39:44	
Sample bulk lot ref:	Result Source: Averaged		
Particle Name: CaCO ₃	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.500	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 11.28 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 3.552 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0037 %Vol	Span : 2.541	Uniformity: 0.813	Result units: Volume
Specific Surface Area: 3.21 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 1.869 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 3.849 um	

d(0.1): 0.773 um d(0.5): 2.930 um d(0.9): 8.218 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	3.70	11.482	0.72	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	3.76	13.183	0.07	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	3.99	15.136	0.00	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	4.34	17.378	0.00	181.970	0.00	1805.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	4.66	19.953	0.00	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	4.82	22.909	0.00	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	4.78	26.303	0.00	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	4.58	30.200	0.00	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	4.58	34.674	0.00	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.01	3.802	4.40	39.811	0.00	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.25	4.365	4.45	45.709	0.00	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.82	5.012	4.82	52.481	0.00	549.541	0.00	5754.389	0.00
0.052	0.00	0.550	1.61	5.754	5.51	60.256	0.00	630.957	0.00	6606.834	0.00
0.060	0.00	0.631	2.47	6.607	6.32	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	3.17	7.586	6.74	79.433	0.00	831.784	0.00	8709.638	0.00
0.079	0.00	0.832	3.60	8.710	6.17	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	3.75	10.000	4.47	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	3.74	11.482	2.29	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

1.2. พื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดของอนุภาคของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



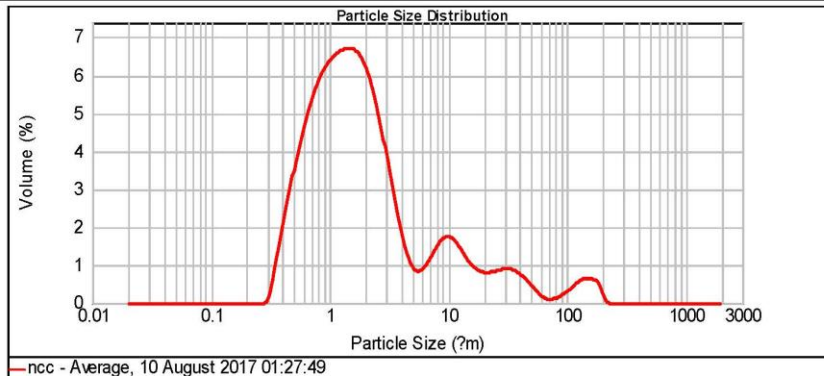
MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name: ncc - Average	SOP Name:	Measured: 10 August 2017 01:27:49	
Sample Source & type:	Measured by: User	Analysed: 10 August 2017 01:27:50	
Sample bulk lot ref:	Result Source: Averaged		
Particle Name: CaCO3	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.500	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 12.69 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 4.221 %	Result Emulation: Off
Concentration: 0.0033 %Vol	Span : 8.839	Uniformity: 4.58	Result units: Volume
Specific Surface Area: 4.68 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 1.283 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 8.237 um	

d(0.1): 0.586 um d(0.5): 1.598 um d(0.9): 14.712 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	5.97	11.482	1.36	120.226	0.55	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	6.05	13.183	1.08	138.038	0.80	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	6.05	15.136	0.86	158.489	0.55	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	5.91	17.378	0.75	181.970	0.29	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	5.58	19.953	0.73	209.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	5.01	22.909	0.76	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	4.22	26.303	0.80	275.423	0.00	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	3.29	30.200	0.81	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.03	3.311	2.35	34.674	0.75	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	1.81	3.802	1.55	39.811	0.62	416.969	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	2.51	4.365	1.00	45.709	0.44	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	3.34	5.012	0.77	52.481	0.28	549.541	0.00	5754.389	0.00
0.052	0.00	0.550	4.09	5.754	0.83	60.256	0.12	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	4.71	6.607	1.09	69.183	0.09	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	5.21	7.586	1.39	79.433	0.14	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	5.57	8.710	1.57	91.201	0.26	954.983	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	5.57	10.000	1.55	104.713	0.41	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	5.91	11.482	1.55	120.226	0.41	1258.925	0.00		

Operator notes:

3. สมบัติทางทัศนศาสตร์

3.1 สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน

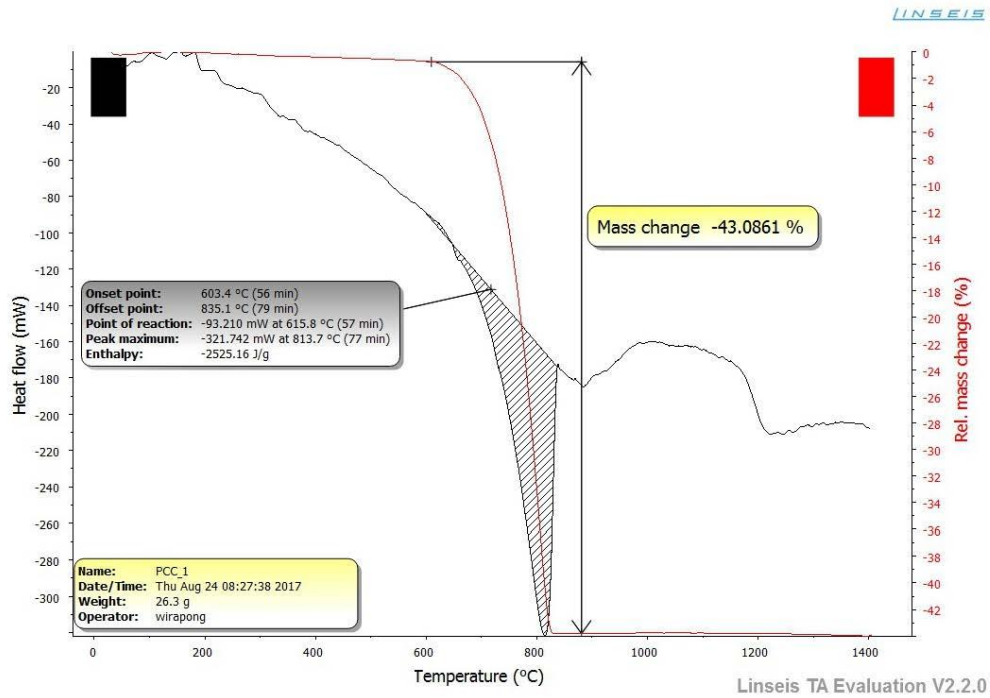
Properties	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Whiteness	88.09	88.19	88.13	88.27	88.10	88.16	0.075
Brightness	91.86	91.90	91.89	91.95	91.85	91.89	0.039
L*	97.42	97.43	97.43	97.45	97.41	97.43	0.015
a*	0.04	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.012
b*	1.22	1.2	1.21	1.19	1.21	1.21	0.011

3.2 สมบัติทางทัศนศาสตร์ของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต

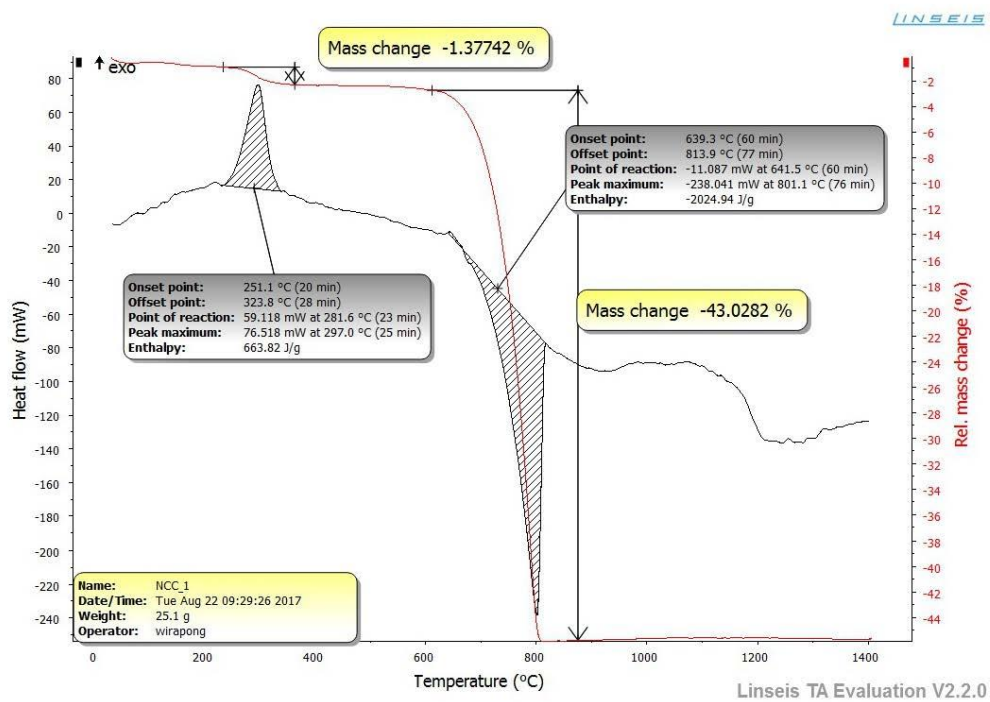
Properties	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Whiteness	88.68	88.84	88.93	88.84	89.08	88.87	0.146
Brightness	92.17	92.25	92.3	92.29	92.57	92.32	0.151
L*	97.49	97.51	97.52	97.53	97.63	97.54	0.055
a*	0.15	0.16	0.15	0.15	0.14	0.15	0.007
b*	1.12	1.10	1.08	1.10	1.06	1.09	0.023

4. การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1 การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน



4.2 การสูญเสียน้ำหนักและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต



ค. สมบัติด้านต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้

1. ผลจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ (CPAM) ที่ปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักระเหยแห้ง

1.1 ค่าศักย์ซีต้าของน้ำเยื่อในภาวะที่ไม่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (Pulp)

% CPAM	Zeta potential (mV)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	-102.1	-102.9	-102.6	-100.6	-101.4	-101.9	0.931
0.1	-73.8	-73.6	-74.1	-74.7	-74.0	-74.0	0.416
0.2	-64.8	-65.4	-65.3	-64.2	-65.5	-65.0	0.541
0.3	-59.8	-60.1	-60.4	-60.2	-60.9	-60.3	0.409
0.4	-55.4	-56.2	-55.9	-56.9	-56.2	-56.1	0.545
0.5	-53.2	-54.6	-54.5	-52.3	-53.6	-53.6	0.956
0.6	-51.6	-51.3	-51.9	-52.1	-51.4	-51.7	0.336
0.7	-48.0	-47.6	-47.7	-48.1	-48.2	-47.9	0.259
0.8	-45.3	-46.2	-45.6	-45.9	-45.7	-45.7	0.336
0.9	-42.8	-43.2	-43.5	-43.8	-43.0	-43.3	0.397
1.0	-39.9	-40.2	-41.0	-40.9	-40.7	-40.5	0.472
1.1	-38.2	-38.6	-38.5	-38.3	-38.8	-38.5	0.239
1.2	-36.1	-36.3	-37.1	-36.5	-37.2	-36.6	0.488
1.3	-34.3	-35.1	-34.9	-35.3	-35.0	-34.9	0.377
1.4	-33.6	-33.0	-33.7	-33.8	-34.0	-33.6	0.377

1.2 ค่าศักย์ซีต้าของน้ำเยื่อในภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

% CPAM	Zeta potential (mV)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	-80.2	-76.5	-78.6	-78.8	-79.3	-78.7	1.37
0.1	-53.4	-54.0	-54.5	-53.0	-54.8	-53.9	0.75
0.2	-39.5	-40.4	-40.3	-39.3	-39.9	-39.9	0.48
0.3	-29.1	-29.0	-28.9	-28.3	-29.2	-28.9	0.35
0.4	-20.2	-20.3	-21.0	-19.8	-21.2	-20.5	0.58
0.5	-14.2	-14.5	-14.6	-13.5	-15.1	-14.4	0.59
0.6	-10.1	-10.5	-11.3	-9.8	-12.1	-10.8	0.94
0.7	-7.4	-7.8	-8.3	-6.8	-9.2	-7.9	0.91
0.8	-4.3	-4.4	-5.1	-3.3	-5.4	-4.5	0.82
0.9	-3.4	-3.8	-4.2	-2.6	-4.4	-3.7	0.72
1.0	-1.0	-1.6	-1.6	-0.1	-1.6	-1.2	0.66
1.1	-1.4	-1.5	-2.3	-2.2	-1.8	-1.8	0.40
1.2	-0.7	-1.6	-2.1	-3.0	-2.2	-1.9	0.85
1.3	1.5	1.3	0.5	2.8	-1.4	0.9	1.55
1.4	3.2	2.3	1.4	-0.5	0.9	1.5	1.40

1.3 ค่าศักย์ซีต้าของน้ำเยื่อในภาวะที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

% CPAM	Zeta potential (mV)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	-94.9	-94.5	-94.4	-94.7	-94.0	-94.5	0.339
0.1	-77.7	-77.9	-77.8	-79.3	-78.1	-78.2	0.654
0.2	-65.4	-65.5	-65.3	-64.8	-65.1	-65.2	0.277
0.3	-54.1	-54.4	-54.2	-53.8	-54.4	-54.2	0.249
0.4	-44.1	-44.0	-44.1	-43.4	-44.7	-44.1	0.462
0.5	-36.5	-36.4	-36.8	-37.1	-38.0	-37.0	0.643
0.6	-35.0	-34.9	-35.3	-35.4	-35.3	-35.2	0.217
0.7	-26.0	-26.1	-25.9	-25.4	-26.4	-26.0	0.365
0.8	-18.0	-18.1	-17.9	-17.4	-18.2	-17.9	0.311
0.9	-12.6	-12.2	-12.4	-11.9	-12.8	-12.4	0.349
1.0	-6.7	-7.2	-6.9	-6.6	-7.3	-6.9	0.305
1.1	-3.2	-3.5	-3.3	-2.2	-2.7	-3.0	0.526
1.2	-0.3	-0.6	-0.4	0.3	-0.5	-0.3	0.354
1.3	1.6	1.4	0.8	2.0	0.3	1.2	0.672
1.4	2.5	2.3	1.8	2.8	2.1	2.3	0.381

1.4 ปริมาณเถ้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

% CPAM	Ash retention (%)				
	1	2	3	Avg	S.D.
0.0	18.3	17.8	19.1	18.4	0.668
0.2	24.4	24.8	24.7	24.7	0.220
0.4	24.8	24.9	24.8	24.9	0.048
0.6	26.3	27.0	27.5	26.9	0.585
0.8	26.9	26.7	26.9	26.9	0.096
1.0	27.5	28.0	28.0	27.8	0.289
1.2	27.8	27.7	28.0	27.8	0.167
1.4	29.3	28.8	29.0	29.1	0.255
1.6	26.9	26.5	26.8	26.8	0.220

1.5 ปริมาณเถ้าจากการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์เป็นสารเพิ่มการตกค้างที่ปริมาณต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

% CPAM	Ash retention (%)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	16.9	16.4	16.7	16.8	16.8	16.7	0.210
0.2	24.9	25.2	24.8	25.1	24.8	25.0	0.192
0.4	28.6	28.7	28.2	27.3	27.4	28.1	0.649
0.6	28.6	28.3	28.4	28.6	28.5	28.5	0.131
0.8	30.6	31.5	31.7	31.5	31.6	31.4	0.448
1.0	31.5	31.3	31.3	31.5	31.3	31.4	0.117
1.2	32.3	32.0	31.5	32.4	31.5	31.9	0.425
1.4	31.6	32.2	32.1	31.8	33.1	32.2	0.582
1.6	31.1	30.7	31.5	30.8	30.9	31.0	0.312

2. ผลจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) ที่ปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ในปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2.1 ค่าศักย์ซีต้าของน้ำเยื่อในภาวะที่เติมตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

% NaPA	Zeta potential (mV)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	-1.4	-1.5	-2.3	-2.2	-1.8	-1.8	0.404
0.5	-12.9	-13.0	-13.1	-13.8	-13.5	-13.3	0.378
1.0	-39.3	-39.3	-39.4	-38.9	-38.3	-39.0	0.456
1.5	-56.2	-56.5	-56.2	-57.2	-56.8	-56.6	0.427
2.0	-60.1	-60.0	-60.3	-60.4	-60.5	-60.3	0.207
2.5	-66.5	-66.4	-66.7	-65.5	-67.1	-66.4	0.590

2.2 ค่าศักย์ซีต้าของน้ำเยื่อในภาวะที่เติมตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

% NaPA	Zeta potential (mV)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	-2.2	-3.2	-3.5	-3.3	-2.7	-3.0	0.526
0.5	-29.1	-28.9	-29.3	-28.7	-28.9	-29.0	0.228
1.0	-25.0	-25.3	-24.9	-25.3	-24.4	-25.0	0.370
1.5	-47.9	-47.0	-47.4	-48.1	-47.8	-47.6	0.439
2.0	-53.3	-53.5	-52.9	-53.2	-53.4	-53.3	0.230
2.5	-60.6	-59.8	-60.1	-60.0	-60.2	-60.1	0.297

2.3 ปริมาณเถ้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของ น้ำหนักตัวเติมร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

% CPAM	Ash retention (%)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	26.9	27.2	27.0	27.3	26.8	27.1	0.180
0.5	26.3	26.1	25.9	25.0	24.2	25.5	0.879
1.0	25.2	23.2	25.2	23.8	25.2	24.5	0.977
1.5	23.5	24.0	23.8	24.6	22.3	23.6	0.839
2.0	22.3	24.5	23.9	24.0	24.2	23.8	0.874

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับปริมาณการกักเก็บตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Ash retention
Mean	1	24.897
Variance	0.625	2.022057
Observations	5	5
df	4	4
F	0.309091	
P(F<=f) one-tail	0.14092	
F Critical one-tail	0.156538	

2.4 ปริมาณเถ้าจากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของ น้ำหนักตัวเติมร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

% CPAM	Ash retention (%)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	30.0	30.0	29.7	29.9	30.2	30.0	0.178
0.5	30.2	30.0	29.6	29.8	29.5	29.8	0.313
1.0	30.5	30.7	30.5	30.5	30.4	30.5	0.114
1.5	28.5	28.5	28.7	28.7	28.9	28.7	0.159
2.0	27.1	27.5	27.4	27.4	27.4	27.4	0.154

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับปริมาณการกักเก็บตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Ash retention
Mean	1	29.26
Variance	0.625	1.571217
Observations	5	5
df	4	4
F	0.397781	
P(F<=f) one-tail	0.196864	
F Critical one-tail	0.156538	

2.5 สมบัติทางทัศนศาสตร์ (ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

ด้าน Top side

% NaPA	Whiteness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	70.93	70.62	70.52	70.31	70.65	70.61	0.225
0.5	71.07	71.34	71.14	70.91	71.08	71.11	0.155
1.0	71.65	72.2	72.01	71.71	72.01	71.92	0.230
1.5	70.49	70.33	70.62	70.73	70.56	70.55	0.149
2.0	71.26	71.52	71.38	71.55	71.77	71.50	0.192

% NaPA	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	83.59	83.48	83.5	83.35	83.43	83.47	0.089
0.5	83.54	83.69	83.59	83.48	83.55	83.57	0.078
1.0	83.78	84.09	84.02	83.96	83.83	83.94	0.129
1.5	83.40	83.33	83.5	83.49	83.43	83.43	0.070
2.0	83.60	83.75	83.69	83.72	83.77	83.71	0.067

% NaPA	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	91.07	92.39	92.52	90.48	90.00	91.29	1.128
0.5	91.44	92.26	92.17	91.53	92.17	91.91	0.395
1.0	89.97	91.13	91.08	91.43	91.57	91.04	0.630
1.5	90.51	90.16	91.51	90.61	90.78	90.71	0.499
2.0	90.66	90.99	90.7	90.81	91.15	90.86	0.206

ด้าน Bottom side

% NaPA	Whiteness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	70.48	71.05	70.26	70.15	70.32	70.45	0.355
0.5	70.42	70.41	70.42	70.22	70.24	70.34	0.103
1.0	71.50	71.53	71.59	71.26	71.18	71.41	0.180
1.5	69.89	69.21	70.03	70.01	69.61	69.75	0.345
2.0	71.20	71.33	70.96	70.87	71.17	71.11	0.187

% NaPA	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	83.21	83.52	83.14	83.24	83.37	83.30	0.150
0.5	83.21	83.22	83.22	83.14	83.11	83.18	0.051
1.0	83.73	83.73	83.74	83.54	83.58	83.66	0.096
1.5	83.03	82.93	82.76	83.12	83.10	82.99	0.148
2.0	83.47	83.52	83.46	83.34	83.42	83.44	0.067

% NaPA	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	91.13	92.67	92.48	89.49	90.44	91.24	1.351
0.5	92.12	92.20	92.16	91.50	92.05	92.01	0.288
1.0	91.45	91.00	91.16	90.21	91.46	91.06	0.512
1.5	90.60	91.25	90.85	90.29	90.61	90.72	0.357
2.0	90.82	91.11	90.77	91.08	90.62	90.88	0.210

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความขาว (Whiteness) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Whiteness
Mean	1	70.6124
Variance	0.625	0.431395
Observations	5	5
df	4	4
F	1.448789	
P(F<=f) one-tail	0.364087	
F Critical one-tail	6.388233	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความขาวสว่าง (Brightness) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Brightness
Mean	1	83.314
Variance	0.625	0.06586
Observations	5	5
df	4	4
F	9.489827	
P(F<=f) one-tail	0.025531	
F Critical one-tail	6.388233	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความทึบแสง (Opacity) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Opacity
Mean	1	91.1808
Variance	0.625	0.250773
Observations	5	5
df	4	4
F	2.492292	
P(F<=f) one-tail	0.199023	
F Critical one-tail	6.388233	

2.6 สมบัติทางทัศนศาสตร์ (ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักตัวเติมร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเชื้อแห้งในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

ด้าน Top side

% NaPA	Whiteness (%)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	63.73	67.08	67.44	67.44	67.27	66.59	1.607
0.5	67.07	66.66	67.28	66.90	67.05	66.99	0.230
1.0	69.36	69.14	69.28	68.33	69.26	69.07	0.423
1.5	70.24	70.11	70.74	70.65	70.57	70.46	0.273
2.0	66.43	66.74	66.79	67.29	67.67	66.98	0.492

% NaPA	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	79.90	81.23	81.37	81.33	81.20	81.01	0.622
0.5	81.19	81.07	81.31	81.12	81.23	81.18	0.094
1.0	82.23	82.22	82.25	81.89	82.20	82.16	0.151
1.5	82.90	82.87	83.10	82.88	82.92	82.93	0.095
2.0	80.47	81.62	81.61	81.87	81.98	81.51	0.603

% NaPA	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	95.18	92.9	92.97	93.02	92.88	93.39	1.002
0.5	92.52	92.55	92.25	91.89	92.26	92.29	0.266
1.0	91.64	91.84	91.42	91.27	91.63	91.56	0.220
1.5	91.48	91.11	90.83	91.33	90.51	91.05	0.390
2.0	91.57	91.47	91.47	91.59	91.46	91.51	0.063

ด้าน Bottom side

% NaPA	Whiteness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	66.43	66.43	66.05	66.38	66.44	66.35	0.167
0.5	66.42	66.54	65.89	66.14	66.45	66.29	0.268
1.0	68.22	68.80	69.24	68.58	69.34	68.84	0.465
1.5	70.58	71.27	70.20	69.90	70.14	70.42	0.535
2.0	66.98	68.76	66.62	67.95	67.92	67.65	0.852

% NaPA	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	80.81	80.84	80.71	79.92	80.77	80.61	0.389
0.5	80.83	80.88	80.60	80.73	80.66	80.74	0.116
1.0	81.68	81.88	82.07	81.78	81.91	81.86	0.146
1.5	82.84	83.26	82.7	82.62	82.73	82.83	0.253
2.0	81.59	82.15	82.12	82.04	81.07	81.79	0.463

% NaPA	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	93.08	92.89	92.68	93.05	92.65	92.87	0.201
0.5	91.62	92.15	92.55	92.10	93.06	92.30	0.540
1.0	91.30	91.48	91.60	91.40	90.51	91.26	0.432
1.5	91.12	91.45	90.86	91.20	91.40	91.21	0.237
2.0	91.60	92.68	91.69	91.59	91.53	91.82	0.485

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความขาว (Whiteness) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Whiteness
Mean	1	67.9068
Variance	0.625	3.073541
Observations	5	5
df	4	4
F	0.203349	
P(F<=f) one-tail	0.076017	
F Critical one-tail	0.156538	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความ
ขาวสว่าง (Brightness) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับ
ความเข้มข้นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Brightness
Mean	1	81.5676
Variance	0.625	0.833671
Observations	5	5
df	4	4
F	0.749696	
P(F<=f) one-tail	0.39344	
F Critical one-tail	0.156538	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความทึบ
แสง (Opacity) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความ
เข้มข้นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Opacity
Mean	1	91.8896
Variance	0.625	0.499425
Observations	5	5
df	4	4
F	1.25144	
P(F<=f) one-tail	0.416589	
F Critical one-tail	6.388233	

2.7 ค่าสี (CIELAB Value) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

ด้าน Top side

% NaPA	L*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	95.33	95.33	95.35	95.29	95.29	95.32	0.027
0.5	95.29	95.34	95.30	95.27	95.29	95.30	0.026
1.0	95.33	95.42	95.40	95.38	95.35	95.38	0.036
1.5	95.30	95.28	95.34	95.31	95.30	95.31	0.022
2.0	95.28	95.33	95.31	95.30	95.30	95.30	0.018

% NaPA	a*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	0.08	0.10	0.08	0.05	0.10	0.08	0.020
0.5	0.12	0.12	0.11	0.09	0.11	0.11	0.012
1.0	0.07	0.05	0.06	0.09	0.07	0.07	0.015
1.5	0.08	0.07	0.04	0.05	0.05	0.06	0.016
2.0	0.07	0.05	0.05	0.04	0.08	0.06	0.016

% NaPA	b*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	3.87	3.93	3.97	3.98	3.90	3.93	0.046
0.5	3.81	3.78	3.80	3.84	3.81	3.81	0.022
1.0	3.70	3.63	3.67	3.65	3.70	3.67	0.031
1.5	3.94	3.97	3.94	3.90	3.93	3.94	0.025
2.0	3.77	3.73	3.75	3.71	3.66	3.72	0.042

ด้าน Bottom side

% NaPA	L*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	95.18	95.28	95.17	95.25	95.30	95.24	0.059
0.5	95.20	95.20	95.20	95.18	95.16	95.19	0.018
1.0	95.32	95.32	95.32	95.25	95.29	95.30	0.031
1.5	95.17	95.16	95.11	95.19	95.18	95.16	0.031
2.0	95.20	95.23	95.25	95.19	95.19	95.21	0.027

% NaPA	a*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	0.06	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.016
0.5	0.10	0.10	0.12	0.11	0.11	0.11	0.008
1.0	0.07	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.010
1.5	0.04	0.07	0.10	0.08	0.08	0.07	0.022
2.0	0.05	0.05	0.07	0.06	0.03	0.05	0.015

% NaPA	b*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	3.88	3.81	3.93	3.99	3.98	3.92	0.075
0.5	3.90	3.91	3.91	3.94	3.92	3.92	0.015
1.0	3.73	3.73	3.71	3.75	3.79	3.74	0.030
1.5	4.00	4.06	4.12	3.99	3.98	4.03	0.059
2.0	3.74	3.72	3.81	3.80	3.73	3.76	0.042

2.8 ค่าสี (CIELAB Value) ของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการเติมโซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณต่าง ๆ ของน้ำหนักรวมตัวเติมร่วมกับการเติมแคตไอออนิกพอลิอะคริลาไมด์ที่ปริมาณร้อยละ 1.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC)

ด้าน Top side

% NaPA	L*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	94.23	94.52	94.55	94.53	94.48	94.46	0.132
0.5	94.51	94.50	94.54	94.48	94.53	94.51	0.024
1.0	94.77	94.80	94.79	94.73	94.77	94.77	0.027
1.5	95.03	95.03	95.07	94.94	94.98	95.01	0.050
2.0	94.62	94.82	94.81	94.89	94.9	94.81	0.113

% NaPA	a*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	0.24	0.23	0.26	0.27	0.31	0.26	0.031
0.5	0.29	0.28	0.27	0.30	0.28	0.28	0.011
1.0	0.20	0.19	0.21	0.17	0.21	0.20	0.017
1.5	0.12	0.14	0.11	0.18	0.12	0.13	0.028
2.0	0.25	0.18	0.26	0.23	0.23	0.23	0.031

% NaPA	b*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	4.84	4.26	4.20	4.19	4.20	4.34	0.282
0.5	4.26	4.34	4.23	4.28	4.28	4.28	0.040
1.0	3.90	3.96	3.93	4.10	3.92	3.96	0.080
1.5	3.85	3.88	3.76	3.71	3.75	3.79	0.072
2.0	5.08	4.51	4.49	4.42	4.34	4.57	0.294

ด้าน Bottom side

% NaPA	L*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	94.36	94.39	94.36	94.23	94.34	94.34	0.062
0.5	94.38	94.39	94.33	94.37	94.40	94.37	0.027
1.0	94.61	94.64	94.68	94.61	94.57	94.62	0.041
1.5	94.94	95.07	94.91	94.91	94.94	94.95	0.067
2.0	94.77	94.83	94.71	94.62	94.61	94.71	0.095

% NaPA	a*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	0.25	0.21	0.22	0.25	0.33	0.25	0.047
0.5	0.25	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26	0.007
1.0	0.18	0.16	0.16	0.15	0.18	0.17	0.013
1.5	0.16	0.10	0.11	0.14	0.11	0.12	0.025
2.0	0.24	0.31	0.20	0.24	0.26	0.25	0.040

% NaPA	b*					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	4.32	4.33	4.40	4.81	4.30	4.43	0.215
0.5	4.33	4.31	4.42	4.39	4.51	4.39	0.079
1.0	4.06	3.95	3.88	3.98	3.80	3.93	0.099
1.5	3.72	3.65	3.79	3.86	3.82	3.77	0.083
2.0	4.42	4.07	4.55	4.60	4.57	4.44	0.219

2.9 ความเรียบ และความแข็งแรงของผิวหน้าแผ่นทดสอบในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด ตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

ด้าน Top side

% NaPA	Smoothness (sec)					Avg	S.D.
	1	2	3	4	5		
0.0	10.2	8.3	9.2	10.2	9.2	9.4	0.801
0.5	8.5	7.9	9.2	8.3	9.0	8.6	0.526
1.0	8.8	8.5	8.5	8.8	9.2	8.8	0.288
1.5	9.0	8.1	9.2	9.0	9.5	9.0	0.522
2.0	7.4	7.2	8.5	7.2	8.8	7.8	0.769

% NaPA	Wax pick (CWSN)		
	1	2	3
0.0	7A	7A	7A
0.5	7A	7A	7A
1.0	7A	7A	7A
1.5	7A	7A	7A
2.0	7A	7A	7A

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความเรียบ (Smoothness) ด้านบนของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Smoothness (Top)
Mean	1	8.446667
Variance	0.625	0.685387
Observations	5	6
df	4	5
F	0.911894	
P(F<=f) one-tail	0.477728	
F Critical one-tail	0.159845	

ด้าน Bottom side

% NaPA	Smoothness (sec)						Avg	S.D.
	1	2	3	4	5			
0.0	39.4	37.2	45.2	41.0	46.4	41.8	3.882	
0.5	41.5	42.7	42.4	43.8	44.1	42.9	1.061	
1.0	46.1	42.9	43.6	43.9	51.9	45.7	3.677	
1.5	46.4	46.8	49.4	51.5	44.7	47.8	2.684	
2.0	42.9	41.3	43.1	42.4	46.6	43.3	1.993	

% NaPA	Wax pick (CWSN)		
	1	2	3
0.0	7A	7A	6A
0.5	7A	7A	7A
1.0	7A	7A	7A
1.5	7A	7A	7A
2.0	7A	7A	7A

2.10 ความเรียบ และความแข็งแรงของผิวหน้าแผ่นทดสอบในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

ด้าน Top side

% NaPA	Smoothness (sec)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.000
0.5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.000
1.0	0.9	1.1	0.9	0.9	1.1	1.0	0.110
1.5	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	1.0	0.110
2.0	2.5	2.0	2.3	2.0	2.5	2.3	0.251

% NaPA	Wax pick (CWSN)		
	1	2	3
0.0	2A	2A	2A
0.5	2A	2A	2A
1.0	2A	2A	2A
1.5	2A	2A	2A
2.0	2A	2A	2A

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ F-test ระหว่างระดับการเติมสารช่วยกระจายตัวกับค่าความเรียบ (Smoothness) ด้านบนของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 95

F-Test Two-Sample for Variances	% Dispersant	Smoothness (Top)
Mean	1	1.284
Variance	0.625	0.30128
Observations	5	5
df	4	4
F	2.074482	
P(F<=f) one-tail	0.248558	
F Critical one-tail	6.388233	

ด้าน Bottom side

% NaPA	Smoothness (sec)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	55.9	51.2	52.6	49.8	53.1	52.5	2.286
0.5	44.5	49.8	49.2	55.4	60.0	51.8	6.005
1.0	32.2	32.4	32.9	36.6	37.3	34.3	2.463
1.5	35.9	34.1	32.9	35.9	32.4	34.2	1.636
2.0	49.1	51.0	52.6	54.0	49.2	51.2	2.136

% NaPA	Wax pick (CWSN)		
	1	2	3
0.0	7A	7A	7A
0.5	7A	7A	7A
1.0	7A	7A	7A
1.5	7A	7A	7A
2.0	7A	7A	7A

2.11 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตในภาวะที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

% NaPA	Tensile index (Nm/g)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	26.7	27.3	26.7	26.8	28.5	27.2	0.79
0.5	32.0	32.7	28.7	32.8	32.8	31.8	1.78
1.0	27.8	28.2	30.3	29.8	30.0	29.2	1.15
1.5	31.8	30.7	32.3	30.7	31.0	31.3	0.75
2.0	33.2	30.7	28.7	32.5	32.7	31.5	1.86

2.12 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตในภาวะที่เติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NCC) เมื่อเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (NaPA) เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ระดับต่าง ๆ

% NaPA	Tensile index (Nm/g)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
0.0	25.5	23.7	24.5	23.8	23.9	24.3	0.75
0.5	23.0	26.3	27.2	23.7	27.5	25.5	2.07
1.0	26.3	24.2	25.2	26.3	28.3	26.1	1.56
1.5	31.3	30.7	29.8	26.5	31.2	29.9	1.99
2.0	30.8	31.3	32.0	32.0	28.7	31.0	1.38

3. ผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร่วมกับนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติและสภาพพิมพ์ได้ของแผ่นทดสอบ

3.1 สมบัติทางทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบ

ด้าน Top side

Conditions	Whiteness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	61.37	61.23	61.17	61.44	61.30	61.30	0.11
100:0	70.93	70.62	70.52	70.31	70.65	70.61	0.22
0:100	63.73	67.08	67.44	67.44	67.27	66.59	1.61

Conditions	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	78.03	77.90	77.93	78.03	77.89	77.96	0.07
100:0	83.59	83.48	83.50	83.35	83.43	83.47	0.09
0:100	79.90	81.23	81.37	81.33	81.20	81.01	0.62

Conditions	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	86.07	86.39	86.67	86.20	86.32	86.33	0.23
100:0	91.07	92.39	92.52	90.48	90.00	91.29	1.13
0:100	95.18	92.90	92.97	93.02	92.88	93.39	1.00

Conditions	L*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	93.39	92.34	93.37	93.38	93.32	93.16	0.46
100:0	95.33	95.33	95.35	95.29	95.29	95.32	0.03
0:100	94.23	94.52	94.55	94.53	94.48	94.46	0.13

Conditions	a*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	0.10	0.09	0.08	0.09	0.07	0.09	0.01
100:0	0.08	0.10	0.08	0.05	0.10	0.08	0.02
0:100	0.24	0.23	0.26	0.27	0.31	0.26	0.03

Conditions	b*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	4.89	4.89	4.92	4.87	4.86	4.89	0.02
100:0	3.87	3.93	3.97	3.98	3.90	3.93	0.05
0:100	4.84	4.26	4.20	4.19	4.20	4.34	0.28

ด้าน Bottom side

Conditions	Whiteness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	59.25	59.13	59.01	59.63	59.57	59.32	0.27
100:0	70.48	71.05	70.26	70.15	70.32	70.45	0.35
0:100	66.43	66.43	66.05	66.38	66.44	66.35	0.17

Conditions	Brightness (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	76.76	76.70	76.70	76.82	76.96	76.79	0.11
100:0	83.21	83.52	83.14	83.24	83.37	83.30	0.15
0:100	80.81	80.84	80.71	79.92	80.77	80.61	0.39

Conditions	Opacity (%)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	86.16	86.22	86.25	86.37	86.10	86.22	0.10
100:0	91.13	92.67	92.48	89.49	90.44	91.24	1.35
0:100	93.08	92.89	92.68	93.05	92.65	92.87	0.20

Conditions	L*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	92.93	92.91	92.92	92.90	93.00	92.93	0.04
100:0	95.18	95.28	95.17	95.25	95.30	95.24	0.06
0:100	94.36	94.39	94.36	94.23	94.34	94.34	0.06

Conditions	a*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	0.08	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.02
100:0	0.06	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.02
0:100	0.25	0.21	0.22	0.25	0.33	0.25	0.05

Conditions	b*						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	5.10	5.11	5.15	5.00	5.07	5.09	0.06
100:0	3.88	3.81	3.93	3.99	3.98	3.92	0.07
0:100	4.32	4.33	4.40	4.81	4.30	4.43	0.21

3.2 น้ำหนักและความหนาของแผ่นทดสอบ

Blank	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)					Avg	S.D.
			1	2	3	4	5		
1	1.63	81.5	114	118	116	117	114	115.8	1.79
2	1.65	82.5	118	119	119	117	117	118	1.00
3	1.64	82	114	115	116	114	114	114.6	0.89
4	1.64	82	115	114	114	116	116	115	1.00
5	1.62	81	116	115	115	116	116	115.6	0.55

100:0	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)					Avg	S.D.
			1	2	3	4	5		
1	1.59	79.5	119	117	118	118	116	117.6	1.14
2	1.61	80.5	115	114	113	114	114	114	0.71
3	1.63	81.5	118	118	115	117	119	117.4	1.52
4	1.63	81.5	117	114	116	116	115	115.6	1.14
5	1.66	83	115	116	116	119	117	116.6	1.52

75:25	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)					Avg	S.D.
			1	2	3	4	5		
1	1.63	81.5	122	122	124	123	122	122.6	0.89
2	1.61	80.5	121	124	122	123	122	122.4	1.14
3	1.61	80.5	120	122	122	120	122	121.2	1.10
4	1.62	81	118	122	122	120	119	120.2	1.79
5	1.64	82	116	118	118	117	116	117	1.00

50:50	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)						
			1	2	3	4	5	Avg	S.D.
1	1.6	80	122	122	122	124	122	122.4	0.89
2	1.6	80	123	122	118	122	120	121	2.00
3	1.61	80.5	118	118	121	120	120	119.4	1.34
4	1.61	80.5	121	121	119	120	120	120.2	0.84
5	1.63	81.5	122	120	120	120	119	120.2	1.10

25:75	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)						
			1	2	3	4	5	Avg	S.D.
1	1.61	80.5	119	120	120	120	121	120	0.71
2	1.64	82	118	116	119	119	119	118.2	1.30
3	1.66	83	122	121	124	122	122	122.2	1.10
4	1.62	81	120	120	119	122	118	119.8	1.48
5	1.62	81	118	119	120	120	119	119.2	0.84

0:100	Weight (g)	GSM	Thickness (μm)						
			1	2	3	4	5	Avg	S.D.
1	1.61	80.5	121	121	122	124	122	122	1.22
2	1.65	82.5	122	125	124	125	126	124.4	1.52
3	1.64	82	123	120	121	120	124	121.6	1.82
4	1.64	82	119	121	121	120	122	120.6	1.14
5	1.67	83.5	118	122	121	121	119	120.2	1.64

3.3 ความเรียบของแผ่นทดสอบ

Conditions	Smoothness (sec) / TOP SIDE						
	1	2	3	4	5	Avg	SD
Blank	6.90	7.40	6.70	7.60	7.20	7.16	0.36
100:0	10.20	8.30	9.20	10.20	9.20	9.42	0.80
75:25	5.50	5.10	5.50	5.50	5.40	5.40	0.17
50:50	4.20	4.80	4.40	4.60	4.60	4.52	0.23
25:75	3.20	3.20	3.40	3.10	3.40	3.26	0.13
0:100	1.10	1.00	1.10	1.10	1.10	1.08	0.04
Comm	40.60	41.30	39.70	39.90	41.10	40.52	0.71

Conditions	Smoothness (sec) / BOTTOM SIDE						
	1	2	3	4	5	Avg	SD
Blank	80.30	81.40	82.10	83.70	80.70	81.64	1.34
100:0	39.80	47.20	45.20	41.00	46.40	43.92	3.32
75:25	50.60	53.60	52.70	50.50	52.50	51.98	1.37
50:50	51.80	51.00	53.10	49.50	53.70	51.82	1.68
25:75	49.70	50.10	51.10	50.90	49.20	50.20	0.80
0:100	52.50	51.20	52.60	49.80	53.10	51.84	1.34
Comm	35.30	33.90	33.80	32.80	33.10	33.78	0.97

3.4 ความต้านอากาศของแผ่นทดสอบ

Conditions	Air resistance (sec)						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	65.61	65.38	66.84	67.43	66.23	66.30	0.85
100:0	19.53	19.67	19.46	20.22	19.74	19.72	0.30
75:25	19.35	19.19	19.26	20.13	19.35	19.46	0.38
50:50	22.96	22.18	22.23	22.40	22.34	22.42	0.31
25:75	23.85	23.61	23.11	23.17	23.49	23.45	0.31
0:100	43.77	44.17	43.84	43.44	43.96	43.84	0.27
Comm	10.95	11.54	11.36	11.18	12.13	11.43	0.45

3.5 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบ

Conditions	Tensile Index						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	49.67	50.25	48.67	50.67	49.50	49.75	0.76
100:0	26.67	27.33	26.67	26.75	28.50	27.18	0.79
75:25	26.17	26.33	26.33	26.00	26.08	26.18	0.15
50:50	27.17	27.00	27.00	27.17	27.33	27.13	0.14
25:75	28.67	28.83	28.50	28.50	28.42	28.58	0.17
0:100	25.50	23.67	24.50	23.83	23.92	24.28	0.75
Comm (MD)	46.33	47.17	46.83	46.83	47.00	46.83	0.31
Comm (CD)	21.83	23.17	23.00	22.83	22.83	22.73	0.52

3.6 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบ

Conditions	Tear Index						
	1	2	3	4	5	Avg	S.D.
Blank	8.38	8.46	8.47	8.47	8.48	8.45	0.04
100:0	6.52	6.53	6.58	6.51	6.52	6.53	0.03
75:25	5.83	5.79	5.81	5.78	5.85	5.81	0.03
50:50	6.09	6.12	6.01	6.17	6.16	6.11	0.07
25:75	6.30	6.23	6.33	6.16	6.37	6.28	0.08
0:100	5.49	5.55	5.63	5.61	5.58	5.57	0.05
Comm (MD)	4.85	5.07	5.10	5.02	5.04	5.02	0.10
Comm (CD)	5.58	5.58	5.59	5.65	5.62	5.61	0.03

3.7 ผลการควบคุมคุณภาพการพิมพ์ในการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ต (Inkjet printing)

1) ความดำที่พื้นที่ของแผ่นทดสอบ

Conditions	Solid density / TOP SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	1.56	1.58	1.56	1.57	0.01
Blank	1.56	1.57	1.56	1.56	0.01
100:0	1.43	1.43	1.43	1.43	0.00
75:25	1.47	1.46	1.46	1.46	0.01
50:50	1.48	1.47	1.48	1.48	0.01
25:75	1.47	1.46	1.47	1.47	0.01
0:100	1.34	1.33	1.35	1.34	0.01

Conditions	Solid density / BOTTOM SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	1.56	1.58	1.56	1.57	0.01
Blank	1.62	1.60	1.61	1.61	0.01
100:0	1.44	1.42	1.43	1.43	0.01
75:25	1.45	1.44	1.46	1.45	0.01
50:50	1.46	1.48	1.48	1.47	0.01
25:75	1.44	1.44	1.45	1.44	0.01
0:100	1.32	1.32	1.31	1.32	0.01

2) คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ (Dot quality) ที่ขนาด 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิเมตรของแผ่นทดสอบ

คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ที่ขนาด 0.3 มิลลิเมตร

Dot size 0.3 mm	Dot gain (%) / TOP SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	130.61	123.34	142.25	132.07	14.27
Blank	165.27	168.90	170.30	168.15	15.74
100:0	160.76	145.66	148.82	151.75	13.31
75:25	145.01	147.06	148.90	146.99	14.55
50:50	150.42	144.84	154.81	150.02	13.36
25:75	149.51	144.09	148.86	147.49	12.13
0:100	155.02	152.82	154.44	154.09	15.09

Dot size 0.3 mm	Dot gain (%) / BOTTOM SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	130.61	123.34	142.25	132.07	14.27
Blank	154.93	166.12	179.48	166.84	18.27
100:0	142.98	152.00	161.59	152.19	13.91
75:25	150.34	145.52	152.75	149.54	16.53
50:50	147.44	159.65	144.21	150.43	22.31
25:75	150.35	156.52	151.49	152.78	26.02
0:100	145.35	146.06	145.47	145.63	11.50

คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ที่ขนาด 0.4 มิลลิเมตร

Dot size 0.4 mm	Dot gain (%) / TOP SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	121.90	109.23	121.39	117.51	8.28
Blank	133.41	135.76	146.58	138.58	8.35
100:0	127.76	130.01	131.52	129.76	7.14
75:25	138.28	137.34	131.94	135.85	7.24
50:50	131.93	127.64	126.02	128.53	8.97
25:75	125.63	144.93	127.72	132.76	11.10
0:100	127.95	119.99	133.29	127.08	11.02

Dot size 0.4 mm	Dot gain (%) / BOTTOM SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	121.90	109.23	121.39	117.51	8.28
Blank	136.16	142.69	149.83	142.89	8.35
100:0	146.27	131.27	131.77	136.43	11.01
75:25	131.85	123.47	124.36	126.56	9.88
50:50	130.74	125.42	125.42	127.19	13.51
25:75	129.72	126.53	122.56	126.27	11.20
0:100	150.39	146.12	126.09	140.30	13.70

คุณภาพของจุดที่พิมพ์ได้ที่ขนาด 0.5 มิลลิเมตร

Dot size 0.5 mm	Dot gain (%) / TOP SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	119.02	109.68	119.55	116.08	7.61
Blank	130.10	130.94	137.66	132.90	6.73
100:0	130.83	126.91	125.19	127.64	5.19
75:25	131.68	130.38	134.26	132.11	5.18
50:50	131.22	123.27	129.72	128.07	6.10
25:75	126.80	134.46	124.06	128.44	6.61
0:100	124.75	122.55	132.33	126.54	6.66

Dot size 0.5 mm	Dot gain (%) / BOTTOM SIDE				
	1	2	3	Avg	S.D.
Comm	119.02	109.68	119.55	116.08	7.61
Blank	130.41	133.60	139.90	134.64	6.69
100:0	135.34	131.26	128.86	131.82	6.05
75:25	123.59	121.81	125.75	123.71	6.79
50:50	127.00	123.64	134.77	128.47	12.48
25:75	125.29	124.28	122.16	123.91	10.09
0:100	142.46	138.54	122.66	134.55	10.15



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมนต์นภา ลัภนพรวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2558 และเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีเยื่อ และกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง "Retention Enhancement of Precipitated Calcium Carbonate and Nano Calcium Carbonate in Paper using Polyacrylate and Polyacrylamide" ในการประชุมทางวิชาการ The 126th International Society for Engineers and Researchers International Conference (ISER) ระหว่างวันที่ 5-6 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

Publication List:

1. Lapnornwong, M., Buggakupta, W., and Suvarnakich, K. Retention Enhancement of Precipitated Calcium Carbonate and Nano Calcium Carbonate in Paper using Polyacrylate and Polyacrylamide. in Barbakadze, S., et al. (eds.), ISER 126th INTERNATIONAL CONFERENCE, pp. 46-50, 5th-6th May 2018. Bangkok, Thailand: IIER, 2018.