

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 โครงสร้างสารเคลือบกระดาษ

2.1.1.1 สารสี (Pigment) เป็นสารเคมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใส่ในสารเคลือบผิวเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวหน้ากระดาษให้รับหมึกพิมพ์ได้ดี สมบัติพื้นฐานของสารสีต้องมีอนุภาคเล็ก มีประสิทธิภาพการกระเจิงแสงสูง สามารถปกปิดผิวหน้าของเส้นใยกระดาษได้ มีการกระจายตัวในสารยึดได้ดี ให้ความขาวสว่างสูง ควรเลือกใช้สารสีที่มีดัชนีหักเหต่างจากสารยึด เพื่อให้สารเคลือบนั้นมีสมบัติทึบแสง นอกจากนี้สารสีต้องทนการขีดผิวหน้าได้โดยเฉพาะการขีดผิวหน้าเพื่อความเงามันที่อุณหภูมิสูง โดยไม่ต้องมีสารยึดปริมาณมาก ดังนั้น จึงไม่มีสารสีชนิดใดชนิดหนึ่งที่สามารถให้สมบัติได้ครบตามที่ต้องการ ทำให้ต้องนำสารสีหลายชนิดมาผสมเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการทุกประการ โดยทั่วไปนิยมใช้สารสีไม่เกิน 2 ชนิด คือสารสีหลักและสารสีร่วม โดยต้องใช้ปริมาณสารสีหลักไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 และสารสีร่วมในปริมาณที่น้อยกว่า [1]

2.1.1.2 สารยึด (Binder) เป็นตัวเชื่อมหรือเป็นตัวกลางให้สารสี และสารเคมีอื่น ๆ กระจายตัวอยู่ในการเคลือบผิวเพื่อให้สารเคลือบนั้นสามารถยึดติดอยู่บนเส้นใยเซลลูโลส จึงทำหน้าที่คล้ายกาวช่วยยึดสารเคลือบและกระดาษเข้าด้วยกัน นอกจากนี้สารยึดยังทำหน้าที่ควบคุมความหนืด การไหล การปลดปล่อยน้ำ และเวลาเซตตัวของสารเคลือบผิว การใช้สารยึดในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถควบคุมและกำหนดสมบัติดังกล่าวได้ การใช้ปริมาณสารยึดน้อยไปทำให้สารเคลือบกระดาษมีผิวหน้าไม่เรียบและไม่แข็งแรง ส่วนการใช้ปริมาณสารยึดมากเกินไปจะทำให้สมบัติทางแสงและทางการพิมพ์เสียไป สารยึดที่ดีต้องมีความสามารถในการยึดสารสี และให้สารสีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารเคลือบ นอกจากนี้ยังต้องมีราคาถูก ไม่มีสี มีความเป็นพลาสติกดี เกิดเป็นแผ่นฟิล์มได้ง่าย สามารถปรับความหนืดได้ง่าย มีค่าคงตัวทั้งเวลา อุณหภูมิ และทนแรงเฉือนเวลาใช้งาน สารเคมีเคลือบผิวระบบน้ำหรือระบบคอลลอยด์ใช้สารยึดประเภทแป้ง โปรตีน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สารยึดเป็นสารพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เสมือนลวดรูนของแผ่นกระดาษ โดยทั่วไปพบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความสามารถในการลวดรูนได้ดีที่สุด และสามารถลดความเป็นรูนกระดาษได้ที่ปริมาณของสารยึดสูง [1]

2.1.1.3. สารยึดร่วม (Co-binder) เป็นสารช่วยประสานระหว่างสารยึดและสารเคมีอื่น ๆ มักใช้ในปริมาณน้อย เพื่อเสริมสมบัติบางประการเพิ่มเติมจากผลที่ได้จากสารยึดหลัก สารยึดร่วมที่นิยมใช้กันทั่วไปในการเคลือบผิวกระดาษคือ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสซึ่งช่วยในด้านการยึดติด การปรับความหนืดและสามารถดูดหรือเก็บน้ำได้ดี จึงทำให้สามารถใช้ในสูตรสารเคลือบที่มีปริมาณของแข็ง (Solid content) จำนวนมาก

2.1.1.4. สารเติมแต่ง (Additives) สารเติมแต่งในสารเคลือบมีหน้าที่ต่างกัน เช่น ปรับค่าความเป็นกรด-เบส เป็นสารหล่อลื่น ปรับความขาวสว่าง และช่วยการกระจายตัวของสารสี เป็นต้น ส่วนใหญ่สารเคลือบมีปริมาณสารเติมแต่งเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของของแข็งทั้งหมด ตัวอย่างของสารเติมแต่ง ได้แก่

2.1.1.4.1 สารช่วยกระจาย (Dispersant) ช่วยให้สารสีกระจายตัวในสารยึดได้ดีไม่จับตัวกันเป็นก้อน เป็นสารจำพวก โซเดียมพอลิอะคริเลต เตตระโซเดียมพอลิฟอสเฟต เป็นต้น

2.1.1.4.2 สารปรับความหนืด (Viscosity modifier) สารปรับความหนืดทำหน้าที่ลด หรือเพิ่มความหนืดของสารเคลือบผิว โดยพิจารณาจากความเร็วของเครื่องเคลือบผิว

2.1.1.4.3 สารหล่อลื่น (Lubricant) ใช้เพื่อปรับสมบัติการไหลของสารเคลือบและควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการทอน ช่วยในเรื่องของความเรียบและป้องกันการแตกหักของชั้นเคลือบผิวเมื่อแห้งอ รวมทั้งช่วยให้สภาพการเดินกระดาษคล่องตัวขึ้น ส่วนใหญ่เป็นสารพวกแคลเซียมสเตียเรต พอลิเอทิลีนอิมัลชัน เป็นต้น

2.1.1.4.4 สารกั้นน้ำ (Crosslinker or insolubilizer) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่สารจำพวก ยูเรียฟอมาลดีไฮด์เรซิน แอมโมเนียมเซอร์โคเนียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.1.1.4.5 สารช่วยป้องกันเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อรา (Biocide) เช่น อัลดีไฮด์

2.1.1.4.6 สารควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส (pH control)

2.1.1.4.7 สารเพิ่มความขาวสว่าง (Optical brighteners) ช่วยดูดกลืนแสงยูวีและเพิ่มความขาวสว่างของสารเคลือบผิว

2.1.1.4.8 สีย้อม (Dye) ใช้เพื่อให้สังเกตด้านเคลือบผิวได้ชัดเจน

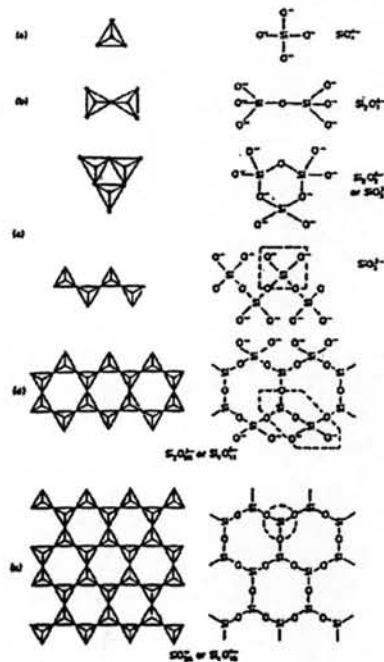
2.1.1.4.9 สารลดฟอง (Defoamer) ใช้เพื่อยับยั้งหรือป้องกันไม่ให้เกิดฟองในสารเคลือบขณะทอน

2.1.1.5 ตัวทำละลาย (Solvent) ในสารเคลือบกระดาศเพื่อการพิมพ์อิงค์เจ็ทมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของสารเคลือบ น้ำทำให้ส่วนประกอบของสารเคลือบรวมตัวเข้ากันได้ สารสีสามารถกระจายตัวได้ ทำให้เกิดการแห้งตัว ทำให้เกิดการถ่ายโอนของสี และสามารถเคลือบลงบนกระดาศได้ หากน้ำเกิดการระเหยจากชั้นของสารเคลือบจะทำให้เกิดชั้นของแข็ง สารยึดจะทำหน้าที่เชื่อมสารสีและกระดาศ สารเคลือบประกอบด้วยน้ำเพื่อสมบัติการไหล โดยปริมาณของของแข็งของสารเคลือบที่แห้งจะมีปริมาณถึงร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งหมายความว่าสารเคลือบจะมีน้ำน้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก [1]

## 2.1.2 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silica or Silicon Dioxide; $\text{SiO}_2$ )

### 2.1.2.1 โครงสร้างของซิลิกา

ซิลิกา เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน มีพื้นฐานทางโครงสร้างของซิลิกาและเกลือซิลิเกต ส่วนใหญ่เป็นการจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของออกซิเจนสี่อะตอมล้อมรอบซิลิกอนซึ่งเป็นอะตอมกลาง โดยโครงสร้างของซิลิกาจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ (Infinite three dimensional network) [2] ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมต่อของ  $\text{SiO}_4$  tetrahedral ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิเกต [2]

### 2.1.2.2 ลักษณะของซิลิกา

ซิลิกาเป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นของแข็งสีขาวไม่มีกลิ่นไม่มีรส มีความตึงจำเพาะระหว่าง 2.2 – 2.6 จุดหลอมเหลว 1710 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา) ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมาก ไม่ละลายในกรดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) แต่ละลายในด่างได้ ซิลิเกต (silicate) ดังสมการที่ 2.1



### 2.1.2.3 รูปแบบซิลิกา

มีรูปแบบได้หลากหลายทั้งที่เป็นผลึก (crystalline silica) และซิลิกาอสัณฐาน (amorphous or non-crystalline silica) สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction) [3]

2.1.2.3.1. ซิลิกาชนิดผลึก เป็นซิลิกาชนิดหนึ่งซึ่งมีได้หลายรูป เช่น ควอทซ์ คริสโตแบไลท์ ไตรไคไมท์ (tridymite) สามารถตรวจสอบได้จากการใช้เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน จะเห็นว่าจะเกิดการสะท้อนแบบไม่ต่อเนื่องขึ้นเนื่องจากระนาบภายในซึ่งเป็นลำดับของอะตอม

2.1.2.3.2. ซิลิกาชนิดอสัณฐาน เป็นซิลิกาที่สังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์จากสภาวะที่เป็นไอ สังเคราะห์โดยการตกตะกอนจากสารละลาย ซิลิกาชนิดอสัณฐานแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบตามชื่อกระบวนการเตรียม เช่น ซิลิกาเจล ซิลิกาชนิดตกตะกอน และฟุ้งซิลิกา (silica fume) เมื่อใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันตรวจสอบ จะพบว่าเกิดการกระเจิงแสงแบบต่อเนื่อง ซิลิกาอสัณฐานทุกชนิดสามารถเปลี่ยนไปเป็นซิลิกาชนิดผลึก ได้เมื่อใช้ความร้อนและอุณหภูมิที่สูงอย่างเหมาะสม

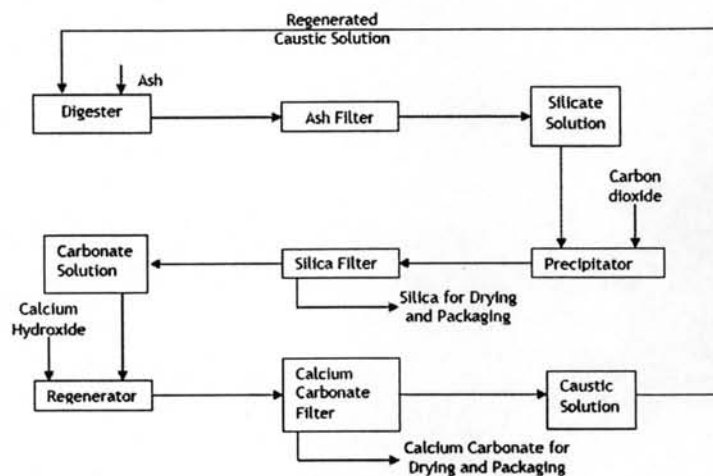
ก. ซิลิกาเจล แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ซิลิกาเจลชนิดความหนาแน่นปกติ (regular-density gel) ซึ่งเตรียมได้โดยการทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรด จะได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากและพื้นที่ผิวสูง (750-800 m<sup>2</sup>/g) ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.2-2.6 nm และปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.37-2.40 ml/g มีน้ำประมาณร้อยละ 6 น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ ดังนั้นจะดูดซับได้มาก ชนิดที่สองคือซิลิกาเจลชนิดความหนาแน่นปานกลาง มีพื้นที่ผิวดำ (300-350 m<sup>2</sup>/g) แต่มีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.9 -1.1 ml/g ค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนประมาณ 12-16 nm ขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า ซิลิกาเจลชนิดความหนาแน่นปกติ ด้วยเหตุผลที่ซิลิกาชนิดนี้มีขนาดรูพรุนใหญ่นั้นจึงดูดซับน้ำได้ดีที่ความชื้นสูง ชนิดสุดท้ายคือ

ซิลิกาเจลชนิดความหนาแน่นต่ำ เช่น aerogel มีพื้นที่ผิวต่ำ 100-200 m<sup>2</sup>/g มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 18-22 nm และปริมาตรรูพรุนประมาณ 1.4-2.0 ml/g

ข. ฟุ้งซิลิกาหรือไมโครซิลิกาหรือฟุ้งซิลิกาควบแน่น (condensed silica fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตโลหะซิลิกอน และเฟอโรซิลิกอนอัลลอยด์ เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ทซ์ ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน โดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO<sub>2</sub> ซึ่งต่อมากจะออกซิไดซ์ และกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (glassy phase) [4]

องค์ประกอบหลักทางเคมีของฟุ้งซิลิกา คือ SiO<sub>2</sub> ซึ่งควรจะอยู่ในภาพที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ฟุ้งซิลิกาที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO<sub>2</sub> สูงมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O และออกไซด์อื่น ๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO<sub>2</sub> ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป

ค. ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) ซิลิกาชนิดตกตะกอนเกิดจากการรวมตัวของซิลิกาขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ยังไม่เชื่อมโยงจนเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ระหว่างกระบวนการเตรียม ซิลิกาชนิดตกตะกอน เกิดได้ทั้งในสภาวะที่เป็นไอ (vapor phase) และโดยการตกตะกอนจากสารละลาย ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการเกิดซิลิกาชนิดตกตะกอน ภาพอ้างอิงจาก Precipitated Silica from Rice Husk Indian Institute of Science Bangalore

### 2.1.3 ดินขาว (Kaolin)

แร่ดินขาว (Kaolin minerals) แร่ดินขาวมีหลายอย่างแตกต่างกันไปตามโครงสร้างและสูตรทางเคมี สูตรเคมีพื้นฐานคือ  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$  การเรียกชื่อแร่ดินต่าง ๆ ในที่นี้ เรียกตาม Clay Minerals group Sub-Committee [5]

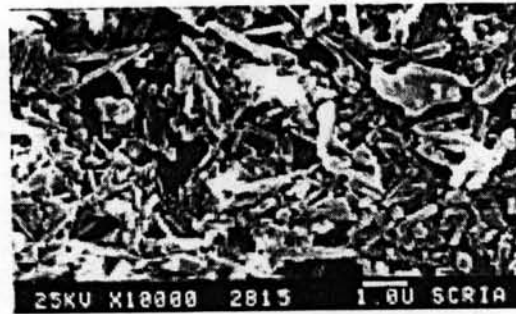
1. เคโอลิไนต์ (Kaolinite) เป็นแร่ดินที่พบมากที่สุด โครงสร้างของมันประกอบด้วย 1 ชั้น (layer) ใน 1 เซลล์ ซึ่งเกิดจากการจับตัวกันของแผ่นซิลิกาเตทราฮีดรัล (tetrahedral sheet) และ แผ่นออกตาฮีดรัล (octahedral sheet) โครงสร้างเป็น triclinic
2. ดิกไดต์ (Dickite) เป็นแร่ดินที่พบ โครงสร้างเป็นแบบสองชั้นในหนึ่งเซลล์ และมีโครงสร้างเป็น monoclinic
3. นาโคริต (Nacrite) เป็นแร่ดินที่หาได้ยาก โครงสร้างเป็นแบบหกชั้น ในหนึ่งเซลล์ และมีโครงสร้างเป็น orthorhombic
4. ฮาลลอยไซต์ (Halloysite) แร่ดินชนิดนี้ไม่เป็นแผ่นเหมือนแร่ดินที่กล่าวมาข้างต้น มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกเล็ก ๆ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น  $(\text{OH})_4\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$   $2\text{H}_2\text{O}$  จะเริ่มถูกขจัดออกไปซึ่งจะกลายเป็น meta-halloysite เพราะฉะนั้นโครงสร้างของฮาลลอยไซต์ ที่เป็น meta-halloysite มีโครงสร้างคล้ายเคโอลิไนต์ ชนิด 1:1[5] ตัวอย่างเช่น ดินขาวนิวซีแลนด์ ดังภาพที่ 2.3

2.1.3.1 โครงสร้างของดินขาว แบ่งออกได้ 3 กลุ่ม โดยถือเอาจำนวนแผ่นของซิลิกาเตทราฮีดรัล และแผ่นออกตาฮีดรัลเป็นเกณฑ์ [6]

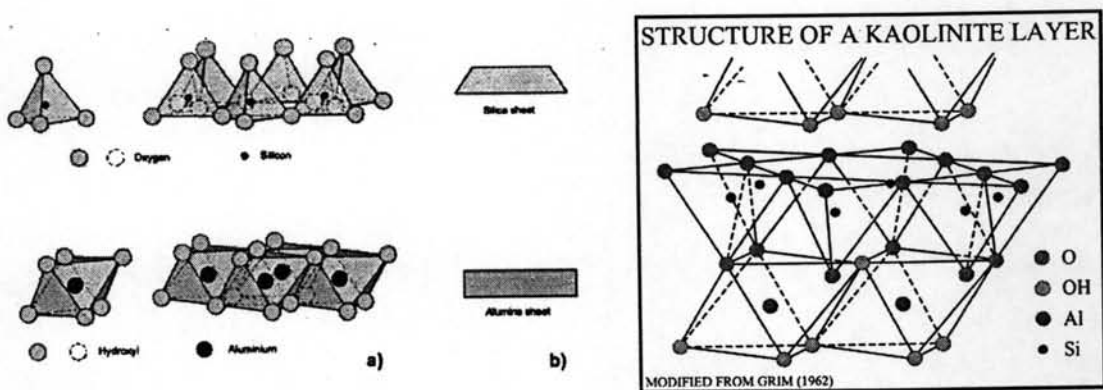
(1) กลุ่มแร่ชนิด 1:1 โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบขึ้นด้วยแผ่นซิลิกาเตทราฮีดรัล 1 แผ่น และแผ่นอลูมินาออกตาฮีดรัล 1 แผ่น ดังภาพที่ 2.4 แร่ที่สำคัญของกลุ่มนี้ ได้แก่ กลุ่มแร่เคโอลิไนท์ (kaolinite) [6]

(2) กลุ่มแร่ชนิด 2:1 โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ ประกอบขึ้นด้วยแผ่นซิลิกาเตทราฮีดรัล 2 แผ่น และแผ่นออกตาฮีดรัล 1 แผ่น ซึ่งเป็นแผ่นที่ถูกประกอบด้วยแผ่นซิลิกาด้านละ 1 แผ่น แร่ที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ แร่สมิคไทท์ (smectite) แร่ไมก้า (mica) ซึ่งรวมถึงแร่อิลไลท์ (Illite) และแร่เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) [6]

(3) กลุ่มแร่ชนิด 2:1:1 กลุ่มแร่นี้ได้แก่ แร่คลอไรต์ (chlorite) โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ คล้ายกับโครงสร้างของกลุ่มแร่ชนิด 2:1 แต่มีชั้นบรูไซต์ (brucite) ซึ่งเป็นแผ่นออกตาฮีดรัล ประทับอีก 1 ชั้น โดยมีสูตรทางเคมีเป็น  $(\text{MgFe})_6(\text{OH})_{12}$  [6]



ภาพที่ 2.3 รูปร่างของอนุภาคของดินขาวนิวซีแลนด์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า [7]



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของดินขาวนิวซีแลนด์ ชนิด 1:1 [6]

### 2.1.3.2 ผลของดินขาวต่อสมบัติของกระดาษเคลือบผิว

ความขาวสว่างของดินขาวมีผลกระทบต่อความขาวสว่างของกระดาษเคลือบผิวเพียงเล็กน้อย คือความขาวสว่างของดินขาวที่แตกต่างกันหนึ่งจุดจะส่งผลเพียง ร้อยละ 0.2 หรือน้อยกว่าในความขาวสว่างของกระดาษเคลือบผิว โครงสร้างของชั้นเคลือบผิวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมากต่อความขาวสว่าง เนื่องจากการกระเจิงแสงขึ้นอยู่กับความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารเคลือบ จึงเป็นความสำคัญที่ต้องมีช่องว่างที่เพียงพอระหว่างอนุภาคดินขาวในชั้นสารเคลือบ และการมีจำนวนของสารยึดติดมากเกินไปจะทำให้ความขาวสว่างลดลง

การจัดเรียงตัวและปริมาณช่องว่างของอนุภาคดินขาวมีอิทธิพลสูงต่อความทึบแสงของชั้นสารเคลือบและความขาวสว่าง ขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของขนาดอนุภาคและสัดส่วนระหว่างความหนาต่อความกว้างของอนุภาคเป็นสมบัติที่สำคัญซึ่งควบคุมความทึบแสง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรรูพรุนเป็นผลดีสำหรับความทึบแสง การที่สารยึดเข้าไป

แทนที่ในพื้นที่ว่างของอนุภาคทำให้ความทึบแสงลดลง ความมันเงาของกระดาษเคลือบผิวได้รับการยอมรับโดยทั่วไปแล้วว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดอนุภาคของดินขาว คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความมันเงาสูงกว่า ในบางกรณีการพิจารณาถึงความมันเงาก็จะขึ้นอยู่กับการบดอนุภาคให้ละเอียดหรือการจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออก การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคจะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้น้อยส่งผลให้ความมันเงาต่ำลง อนุภาคขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่สมบูรณ์ทำให้ค่าความมันเงาสูงที่สุด ระดับของสารยึดที่เพิ่มขึ้นทำให้ความมันเงาต่ำลง ความสามารถในการรับหมึกแตกต่างกันมากระหว่างสารเคลือบที่ใช้ดินขาวต่างชนิดกัน ความสามารถในการรับหมึกจะสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมผ่านได้ของชั้นสารเคลือบ ซึ่งจะได้รับอิทธิพลจากปริมาตรรูพรุน อนุภาคดินขาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (randomly oriented) จะให้การรับหมึกที่ดี การรับหมึกของสารเคลือบจะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากปริมาณของสารยึด

#### 2.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; $\text{CaCO}_3$ )

แคลเซียมคาร์บอเนต มีสูตรเคมี คือ  $\text{CaCO}_3$  ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide;  $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 56 และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide;  $\text{CO}_2$ ) ร้อยละ 44 ความถ่วงจำเพาะ 2.71 สลายตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส ลักษณะทางกายภาพ แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำ แต่ละลายน้ำได้เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำที่มี  $\text{CaCO}_3$  ละลายอยู่เรียกว่าน้ำกระด้าง และจะตกตะกอนเมื่อเสีย  $\text{CO}_2$  ออกไปเป็นต้น แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบที่มีลักษณะต่างกันหลายอย่าง แต่ละลักษณะจะมีชื่อเรียก โดยเฉพาะชื่อของแร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต เรียกว่า แร่แคลไซต์ (calcite) หรือแคลสปาร์ (calspar) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ผลึกของแคลไซต์ มีหลายชนิดทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น ด็อกทูลสปาร์ (dogtoothspar) ไอซ์แลนด์สปาร์ (Iceland spar) เนลเฮดสปาร์ (nailhead spar) และซาตินสปาร์ (satin spar) เป็นต้น [8]

##### 2.1.4.1 การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต

ลักษณะการเกิดของแคลเซียมคาร์บอเนต แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

###### 2.1.4.1.1 หินคาร์บอเนต (Carbonate rocks)

หินคาร์บอเนต หมายถึง หินธรรมชาติที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดเองตามธรรมชาติในรูปของแร่ประกอบหิน ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะของการเกิดได้ 3 ชนิด



### 1. หินตะกอนคาร์บอเนต (Sedimentary carbonate rocks)

การจำแนกชนิดของหินทางธรณีวิทยาของหินคาร์บอเนตขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดของแร่องค์ประกอบ ได้แก่

ก. หินปูน (Limestone) เป็นหินตะกอนซึ่งมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเกิดขึ้นในรูปของแคลไซต์ (calcite) หรือบางครั้งจะอยู่ในรูปของ ออราโกไนต์ (aragonite) ซึ่งทั้งสองชนิดมีสูตรทางเคมีเหมือนกัน แต่มีรูปผลึกต่างกัน โดโลไมต์ (Calcium Magnesium Carbonate;  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) เป็นแร่อีกชนิดหนึ่งที่พบมากในหินปูน โดโลไมต์ส่วนมากจะเกิดการแทนที่โดยปฏิกิริยาของแมกนีเซียมในรูปสารละลายที่หินปูนหรือโดโลไมต์หรือผสมกันระหว่างสองชนิดนี้รวมกับสิ่งเจือปนต่าง ๆ

ข. ชอล์ก (Chalk) เป็นหินปูนร่วนเนื้อละเอียดเกิดในน้ำตื้น ประกอบด้วยซากสัตว์ในทะเล

ค. มาร์ล (Marl) เป็นหินปูนเนื้อร่วนเกิดในทะเลสาบ ซึ่งได้แคลเซียมคาร์บอเนตจากลำธารหรือน้ำพุ

ง. ทราเวอร์ทีน (Travertine) เป็นหินปูนที่มีเนื้อหลายแบบ ขึ้นอยู่กับแต่ละแหล่งที่เกิด อาจมีลักษณะเนื้อแน่น เป็นเส้นใยแบบเป็นชั้น ๆ หรืออ่อนนุ่มและมีรูพรุนซึ่งเรียกกันว่า Calcareous tufa ซึ่งทราเวอร์ทีนส่วนใหญ่จะเกิดจากการตกผลึกอย่างรวดเร็วของแคลเซียมคาร์บอเนตรอบ ๆ น้ำพุร้อน

2. หินอัคนีคาร์บอเนต (Igneous carbonate rocks) เป็นลักษณะพิเศษของหินอัคนีที่มีคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบหลักแม้จะมีปริมาณน้อย แต่ในบริเวณที่ขาดแคลนหินคาร์บอเนตก็สามารถนำมาใช้ทดแทนได้เป็นอย่างดี

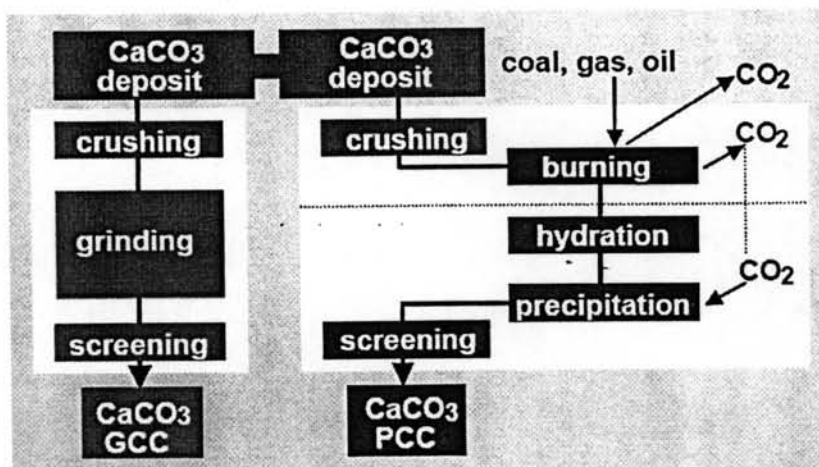
3. หินแปรคาร์บอเนต (Metamorphic carbonate rocks) เป็นหินปูน หรือโดโลไมต์ที่มีการจัดเรียงรูปผลึกใหม่ ที่รู้จักกันดีคือหินอ่อน (marble) ซึ่งเกิดจากความร้อนและความกดดันได้พิภพ

#### 2.1.4.1.2 แร่แคลไซต์ (Calcite)

แร่แคลไซต์ หรือแคลสปาร์ (Calspar) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ผลึกของแคลไซต์มีหลายชนิดทำให้มีชื่อเรียกต่างกัน เช่น ด็อกทูลสปาร์ ไอซแลนด์สปาร์ เนลเฮดสปาร์ และชาตินสปาร์ แร่แคลไซต์ปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่อาจมีสีอื่นได้ เช่น สีเทา แดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ถ้ามีสารอื่น ๆ ปะปน เช่น ไพไรต์ ทองแดง เป็นต้น มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{CaCO}_3$  เช่นเดียวกับหินปูน ส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ  $\text{CO}_2$  ร้อยละ 44 มีความถ่วงจำเพาะ 2.72 แร่แคลไซต์เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเกลือจะเกิดฟองฟู

### 2.1.4.1.3 หินปูนสังเคราะห์ (Precipitated calcium carbonate)

หินปูนสังเคราะห์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตขึ้นทั้งจากกรรมวิธีการผลิตโดยตรงหรือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตภัณฑ์อื่น ๆ แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์จะมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ขนาด 0.01 – 15 ไมครอน มีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า precipitated calcium carbonate (PCC) ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต [9]

### 2.1.4.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต

มี 2 วิธี คือ การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบดซึ่งเรียกว่า ground calcium carbonate (GCC) และการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาตกผลึกใหม่ เรียกว่า precipitated calcium carbonate (PCC) [8]

#### 2.1.4.2.1 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ

แคลเซียมคาร์บอเนตบด เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ เช่น หินปูน ที่มีความขาวและความบริสุทธิ์สูง หินอ่อนที่เกิดจากหินปูนแปรสภาพด้วยความร้อนและความดัน ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ หรือซอล์ และแร่แคลไซต์ เป็นต้น กรรมวิธีในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตมีหลายขั้นตอน การลดขนาดแร่ (size reduction) และการคัดขนาด (classification) ถือเป็นหัวใจสำคัญของการแต่งแร่ในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ ตามที่ตลาดต้องการ การผลิต GCC ในประเทศไทยส่วนใหญ่ ใช้แร่แคลไซต์ หินปูน หรือหินอ่อน เป็นวัตถุดิบ ซึ่งอาจได้จากการทำเหมืองเองหรือจากการรับซื้อวัตถุดิบ สมบัติของแร่วัตถุดิบที่กำหนดไว้ใน

เบื้องต้น คือต้องมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 95 และมีความขาว (brightness) มากกว่าร้อยละ 94

#### 2.1.4.2.2 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก

การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาตกผลึกใหม่ เรียกว่า precipitated calcium carbonate (PCC) เป็นผงขนาดเล็กที่เกิดจากการตกผลึก รูปร่างผลึกอาจแตกต่างกันตามวิธีการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะเป็นรูปเข็ม ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศ และไม่ละลายน้ำ

สมบัติที่ดีของ PCC คือ มีความขาวและความบริสุทธิ์สูงกว่า GCC เพราะมีการตกผลึกกำจัดสิ่งเจือปนออกไปแล้ว นอกจากนี้ PCC ยังมีสมบัติด้านกายภาพดีกว่า เนื่องจากโครงสร้างผลึกแข็งแรงกว่า โครงสร้างและรูปผลึกมีขนาดใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีน้ำหนักเบาและเข้ากับเส้นใยไม้ที่เป็นวัตถุดิบหลักในการทำกระดาษได้ดีกว่า GCC เพราะมีการควบคุมอุณหภูมิและความดันขณะตกผลึก สำหรับประเทศไทยการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่จะนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาโดยตรง เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ง่ายและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีสูงมาก

#### 2.1.4.3. รูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต

##### 2.1.4.3.1. แคลเซียมคาร์บอเนตชนิด GCC แบ่งออกได้ดังนี้

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดทรายไฟรด์กซ์ (dry product) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติโดยตรง มีลักษณะเป็นผงสีขาว ขนาด 1-147 ไมครอน ความขาว (brightness) มากกว่าร้อยละ 94 และมีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 98 ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี พลาสติก ยาง ผงซักฟอก ยาสีฟัน รวมทั้งใช้ในการผลิตปุ๋ย และอาหารสัตว์

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดโคทเตดไฟรด์กซ์ (coated product) เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติแบบทรายไฟรด์กซ์ อนุภาคขนาด 1-15 ไมครอน มาเคลือบผิวอนุภาค เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เช่น ช่วยให้ผิวอนุภาคเปียกได้ง่ายขึ้น (facilitate wetting cut) ช่วยให้อนุภาคมีการกระจายตัวดีขึ้น (dispersion) ช่วยให้อนุภาคมีการดูดซับน้ำมันลดลง (oil absorption) สารที่นำมาใช้เคลือบผิวมี 3 ชนิด ได้แก่ stearic acid, ซี้ผึ้ง และสารเคมี ผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเคลือบผิว นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมพีวีซี และอุตสาหกรรมยาง

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตคอมพาวด์ (calcium carbonate compound) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมอยู่ในรูปของแข็ง ระหว่าง

อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตบดจากธรรมชาติ (GCC) ขนาดประมาณ 20 – 45 ไมครอน ร้อยละ 17 -80 กับเม็ดพลาสติกร้อยละ 20 -25 จะได้ลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ความต้วงจำเพาะประมาณ 1.9-2.0 ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกขึ้นรูปต่าง ๆ เช่น นำไปทำถุงปุ๋ย กระสอบพลาสติก ถุงพลาสติกใส่ของ ฉนวนหุ้มสายไฟ ภาชนะ และท่อต่าง ๆ

แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปสเลอรีไพรดักซ์ (slurry product) หลังจากขั้นตอนการบดละเอียดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์อนุภาคของแร่จะมีขนาด 1-20 ไมครอน และจะเข้าสู่กระบวนการลอยแร่ (flotation) เพื่อลอยแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกไป ได้แก่ ซิลิกา และ เหล็กออกไซด์ วิธีนี้สามารถลดสิ่งเจือปนได้ถึงร้อยละ 50 เช่น แร่ก่อนที่เข้าสู่กรรมวิธีการลอยแร่ มีสัดส่วนแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ร้อยละ 96 และมีสิ่งเจือปนร้อยละ 4 เมื่อผ่านกรรมวิธีการลอยแร่ จะสามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกได้ร้อยละ 2 ทำให้สัดส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98 หลังจากนั้นจึงนำไปบดแบบเปียก ซึ่งสามารถบดได้ละเอียดถึง 0.3 ไมครอน และได้ในรูปของสเลอลี่ เนื่องจากการบดแบบแห้งด้วยบอลมิลล์มีข้อจำกัดคือ สามารถบดอนุภาคได้ขนาดเล็กสุดไม่เกิน 1 ไมครอน ซึ่งถ้าต้องการบดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะใช้พลังงานสูงมากไม่คุ้มค่าและไม่เหมาะสมต่อการลงทุน

แคลเซียมคาร์บอเนตแบบสเลอรีไพรดักซ์นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเนื่องจากตอบสนองความต้องการของโรงงานผลิตกระดาษด้านความสะอาดในการใช้งาน กล่าวคือสามารถใช้งานได้ทันที ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดแห้งอื่น ๆ ต้องเพิ่มขั้นตอนการทำให้เป็นสเลอลี่ ที่โรงงานกระดาษอีกครั้ง ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดนี้ มีการใส่สารเคมีเพื่อป้องกันการตกตะกอน (dispersing agent) ของแคลเซียมคาร์บอเนตในระหว่างการลำเลียงขนส่งไปยังโรงงานกระดาษ โดยชนิดของสารเคมีที่ใช้มักเป็นสารเคมีชนิดเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ

#### 2.1.4.3.2 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (PCC)

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน แบบสเลอรีไพรดักซ์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ประมาณ 0.3 – 1 ไมครอน ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (GCC) มาทำการตกผลึกใหม่ เพื่อให้แคลเซียมคาร์บอเนตมีคุณภาพสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ จึงติดตั้งอยู่ในโรงงานกระดาษโดยตรง เรียกว่า satellite plant อยู่ในรูป สเลอลี่

แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จาก satellite plant นี้ไม่ต้องใส่สารเคมีเพื่อป้องกันการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากอยู่ในรูปสเลอลี่ ที่มีความเข้มข้นของแข็งต่ำ ต่างจากสเลอลี่ของ GCC ที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูง นอกจากนี้การขนส่งแคลเซียมคาร์บอเนตแบบสเลอลี่ยังทำได้สะดวกเนื่องจาก satellite plant ติดตั้งอยู่ที่โรงงาน

กระดาษ สามารถต่อท่อส่งเข้ากระบวนการผลิตกระดาษได้โดยตรง ทำให้ลดเวลาในขั้นตอนการขนส่งลำเลียงได้ ทำให้สามารถป้องกันการตกตะกอนได้

จากสมบัติที่ดีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สามารถบดให้เป็นผงละเอียดได้ง่าย มีความเสถียรทางเคมีและไม่เป็นพิษ และสมบัติพิเศษอื่น ๆ โดยเฉพาะความขาวสูง และการดูดซับน้ำมันต่ำทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำไปใช้ในวงการอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง และอุตสาหกรรมสี เป็นต้น

#### 2.1.4.4 แคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมกระดาษ

ในเนื้อกระดาษประกอบไปด้วยโครงร่างตาข่ายของเส้นใยไม้และรูขนาดเล็กจำนวนมาก ที่ส่งผลต่อสมบัติที่สำคัญของกระดาษในด้านความทึบแสงที่เกิดจากการกระจายแสงระหว่างเส้นใยไม้และอากาศที่รูขนาดเล็ก ซึ่งขนาดของรูมักขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยไม้ที่นำมาใช้ผลิตกระดาษ โดยปกติในกระบวนการหรือกรรมวิธีผลิตกระดาษ มักจะได้เส้นใยกระดาษซึ่งมีขนาดของรูในเนื้อกระดาษที่ใหญ่เกินไปทำให้กระดาษไม่ทึบแสง จึงต้องมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการนำกระดาษไปใช้งาน ในอุตสาหกรรมกระดาษแคลเซียมคาร์บอเนตจะใช้เป็นตัวเติม (functional filler) ที่มีประโยชน์ในด้านช่วยปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ด้วย ในขณะที่แร่ตัวเติมอื่น ๆ จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณแต่เพียงอย่างเดียว (extender filler) และการเติมอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตลงในเยื่อกระดาษจะเป็นการช่วยทำให้ปริมาณการใช้เยื่อจากไม้ลดลง ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตกระดาษที่ลดลงด้วย แต่ถ้าใช้ตัวเติมมากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง อัตราการใช้แร่ตัวเติมที่เหมาะสมคือร้อยละ 18-20 โดยน้ำหนักของเยื่อกระดาษทั้งหมด และขนาดอนุภาคของตัวเติมในกระดาษที่เหมาะสมควรมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.3 - 2.5 ไมครอน

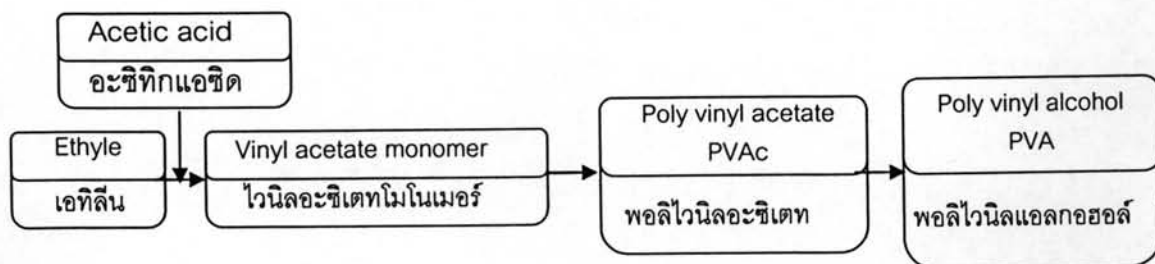
แคลเซียมคาร์บอเนตนอกจากจะใช้เป็นตัวเติมในกระดาษแล้ว ยังสามารถนำมาใช้เป็นตัวเคลือบทำให้ผิวกระดาษเรียบได้อีกด้วย ซึ่งจะทำให้กระดาษมีสมบัติด้านการดูดซับน้ำหมึก การพิมพ์พื้นที่บ การพิมพ์ฮาล์ฟโทน และการพิมพ์สีสี่สีขึ้น การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเคลือบมักจะนำไปผสมกับอนุภาคอื่น ๆ ได้แก่ แร่ไทเทเนียมไดออกไซด์ แร่ดินขาว อนุภาคพลาสติก โดยใช้สารจำพวกโปรตีน หรือแป้งที่ละลายได้ หรือกาบเป็นตัวผสมตัวเชื่อมซึ่งจะทำให้ส่วนผสมของสารเคลือบและกระดาษเข้ากันได้ดี แคลเซียมคาร์บอเนตใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและเส้นใยกระดาษ ประเภทต่าง ๆ เช่นกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษอาร์ตมัน และกระดาษที่ใช้ในสำนักงาน กระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษโรเนียว กระดาษสื่อสิ่งพิมพ์ทุกชนิด รวมทั้งกระดาษกล่องบรรจุภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

### 2.1.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol; PVA)

เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทโพลีโอะเลฟิน เป็นผงสีขาวจนถึงครีม ผลิตจากโพลีไวนิลอะซิเตท (poly vinyl acetate) ในภาวะกรดหรือเบส มีหลายเกรดตามความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับตัวกรีของโพลีเมอไรเซชัน และร้อยละของแอลกอฮอล์ไลซิสเป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีความใส มีขั้วเล็กน้อย สามารถยึดติดได้ดีกับพื้นผิววัสดุทั่วไป และสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิดละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ความทนต่อการฉีกขาดและโค้งงอดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นละลายในน้ำและเกิดเป็นสารที่มีพันธะคู่ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิดสี [10]

#### 2.1.5.1 สมบัติทางเคมีและกระบวนการผลิต

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งเม็ดเล็ก ๆ สีขาว ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำร้อน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผลิตขึ้นโดยมีพอลิไวนิลอะซิเตทเป็นสารตั้งต้นจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันผ่านอนุมูลอิสระของไวนิลอะซิเตท พอลิไวนิลอะซิเตทถูกไฮโดรไลซ์เป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผ่านปฏิกิริยา base-catalyzed saponification น้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกควบคุมผ่านลำดับขั้นของกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน และโดยทั่วไปจะผลิตออกมาในช่วงของความหนืดสารละลายร้อยละ 4 ความหนืดสามารถแบ่งออกได้เป็น ความหนืดต่ำมาก ความหนืดต่ำ ความหนืดปานกลาง และความหนืดสูง ระดับสำหรับไวนิลอะซิเตทที่ถูกเปลี่ยนเป็นไวนิลแอลกอฮอล์จะสัมพันธ์กับร้อยละของการไฮโดรไลซิส และถูกควบคุมผ่านปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชัน ร้อยละของการไฮโดรไลซิสจะแบ่งออกเป็น super hydrolyzed (การเปลี่ยนไวนิลอะซิเตทเป็นไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 93 ขึ้นไป) fully hydrolyzed (ร้อยละ 98.0-98.8) intermediate hydrolyzed (ร้อยละ 91.0-96.5) และ partially hydrolyzed (ร้อยละ 87.0-89.0) สำหรับสารเคลือบผิวกระดาษแข็งที่เจ็ด น้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะควบคุมกำลังในการยึดติดสำหรับสารสี และควบคุมการไหลของสารเคลือบ ร้อยละของการไฮโดรไลซิสก็มีส่วนในการควบคุมการยึดติดและการไหลแต่ส่งผลน้อยกว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีร้อยละการไฮโดรไลซิสต่างกัน กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แสดงในภาพที่ 2.6 [10]



ภาพที่ 2.6 กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวน์ลแอลกอฮอล์

ตารางที่ 2.1 ชนิดของพอลิไวน์ลแอลกอฮอล์ที่มีร้อยละการไฮโดรไลซิสต่างกัน [10]

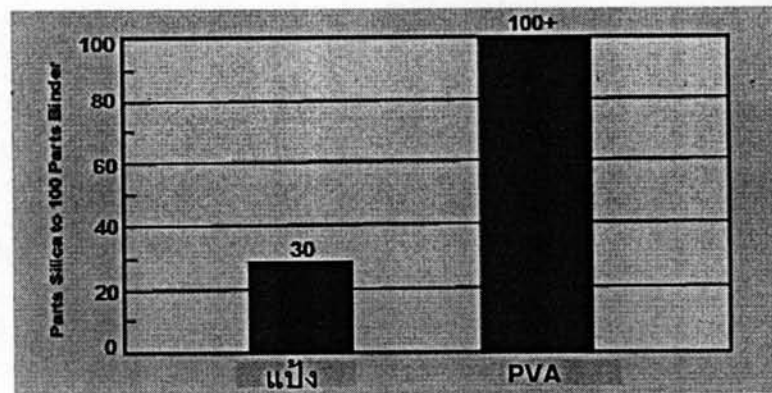
เกรด	ร้อยละการไฮโดรไลซิส %	ความหนืด cps <sup>1</sup>	pH <sup>2</sup>
<b>Super Hydrolyzed</b>			
Celvol 125	99.3+	28 – 32	5.5 – 7.5
Celvol 165	99.3+	62 – 72	5.5 – 7.5
<b>Fully Hydrolyzed</b>			
Celvol 103	98.0 – 98.8	3.5 – 4.5	5.0 – 7.0
Celvol 305	98.0 – 98.8	4.5 – 5.5	5.0 – 7.0
Celvol 107	98.0 – 98.8	5.5 – 6.6	5.0 – 7.0
Celvol 310	98.0 – 98.8	9.0 – 11.0	5.0 – 7.0
Celvol 325	98.0 – 98.8	28.0 – 32.0	5.0 – 7.0
Celvol 350	98.0 – 98.8	62.0 – 72.0	5.0 – 7.0
<b>Intermediate Hydrolyzed</b>			
Celvol 418	91.0 – 93.0	14.5 – 19.5	4.5 – 7.0
Celvol 425	95.5 – 96.5	27.0 – 31.0	4.5 – 6.5
<b>Partially Hydrolyzed</b>			
Celvol 502	87.0 – 89.0	3.0 – 3.7	4.5 – 6.5
Celvol 203	87.0 – 89.0	3.5 – 4.5	4.5 – 6.5
Celvol 205	87.0 – 89.0	5.2 – 6.2	4.5 – 6.5
Celvol 513	87.0 – 89.0	13.0 – 15.0	4.5 – 6.5
Celvol 523	87.0 – 89.0	23.0 – 27.0	4.5 – 6.0
Celvol 504	87.0 – 89.0	45.0 – 55.0	4.5 – 6.0

<sup>1</sup> สารละลายเข้มข้นร้อยละ 4 (ตัวทำละลายเป็นน้ำ) ที่ 20°C

<sup>2</sup> สารละลายเข้มข้นร้อยละ 4 (ตัวทำละลายเป็นน้ำ)

ชนิดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่แนะนำสำหรับสารเคลือบผิว อิงก์เจ็ตคือ ชนิด fully hydrolyzed ที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำและปานกลาง ซึ่งจะให้ความสามารถในการยึดติดที่ดี สำหรับซิลิกา และจะให้ค่าความดำที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แป้ง

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึดที่มีกำลังในการยึดติดสูง ขึ้นอยู่กับ น้ำหนักโมเลกุล การใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะลดระดับของการใช้สารยึดในสูตรสารเคลือบลงได้ โดยไม่เกิดปัญหาฝุ่นผงที่ผิวหน้า ดังภาพที่ 2.7 แสดงสัดส่วนของซิลิกาที่ใสสูงสุดก่อนจะเกิด ปัญหาฝุ่นผงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับแป้ง



ภาพที่ 2.7 สัดส่วนของซิลิกาที่ใสสูงสุดก่อนจะเกิดปัญหาฝุ่นผง [10]

#### 2.1.5.2 ผลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อความดำของงานพิมพ์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถให้ค่าความดำของสีดำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ ความดำของงานพิมพ์ที่สารเคลือบใช้แป้งเป็นสารยึด พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ชนิด fully hydrolyzed จะให้ค่าความดำที่ดี สำหรับสีดำเดี่ยว (monochrome black) และสีดำที่เกิดจากการผสม (composite black) ดังตารางที่ 2.2

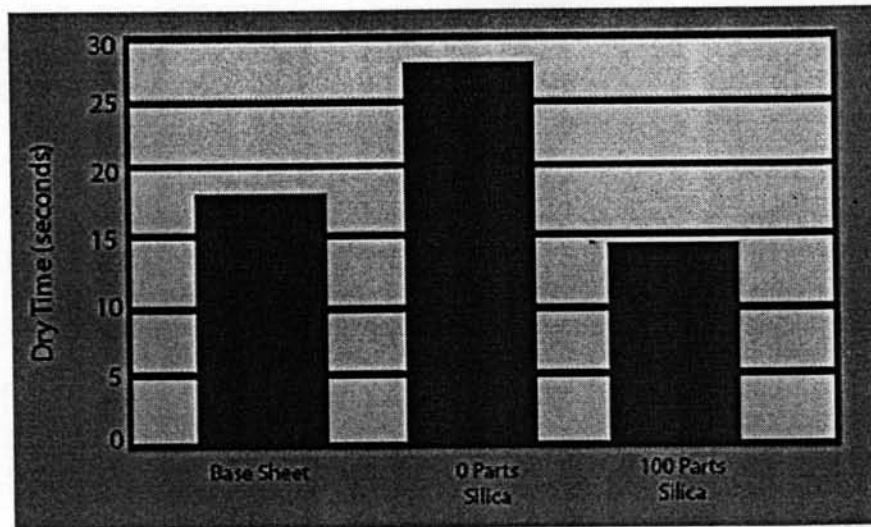
ตารางที่ 2.2 ค่าความดำของหมึกพิมพ์สีดำบนกระดาษเคลือบผิวที่ใช้สารยึดในสารเคลือบผิวเป็น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และแป้ง [10]

Treatment (น้ำหนักสารเคลือบ g/m <sup>2</sup> / ด้าน)	Optical Density		
	Hercules Sizing (second)	Monochrome Black	Composite Black
กระดาษฐาน	1	0.94	0.65
Celvol 107 (1.2)	5.5	1.04	0.81
Celvol 325 (2.7)	57.0	1.30	1.01
แป้ง (1.9)	2.0	0.98	0.74



### 2.1.5.3 ผลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อเวลาของการแห้งตัวสารเคลือบ

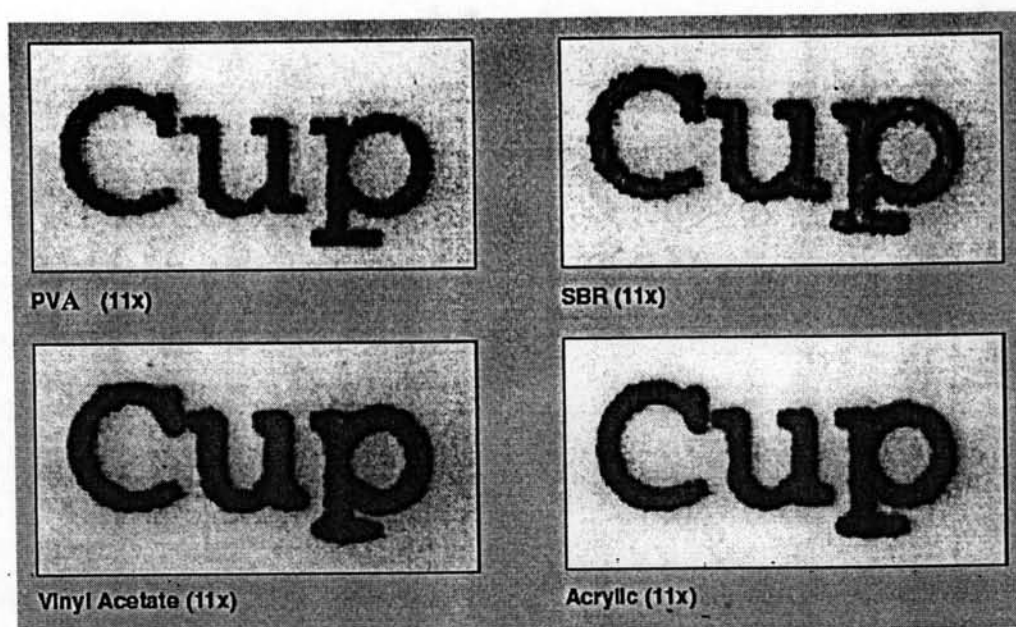
การเคลือบผิวโดยใช้เฉพาะพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยปราศจากการเติมซิลิกาเป็นสารสีทำให้เวลาในการแห้งตัวสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.8 แสดงการใช้ซิลิกา 100 ส่วนทำให้เวลาในการแห้งตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลดลงเมื่อเคลือบบนผิวหน้ากระดาษมีน้ำหนักสารเคลือบ  $2.0 - 2.5 \text{ g/m}^2$  ด้าน base sheet Hercules sizing 125 วินาที ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เวลาในการแห้งตัวของสารเคลือบผิวเมื่อมีซิลิกา 0 และ 100 ส่วน [10]

### 2.1.5.4 การใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับลาเท็กซ์

สารเคลือบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึดจะให้คุณภาพงานพิมพ์ที่ดีเนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะดูดซึมหมึกพิมพ์ฐานน้ำเข้าไปในชั้นสารเคลือบได้อย่างรวดเร็ว การดูดซึมหมึกได้อย่างรวดเร็วนี้ทำให้สามารถลดการเกิดเป็นรอยจ้ำของหมึก (mottle) และ การซึมเข้าหากันของหมึก (bleeding) ซึ่งเป็นปัญหาทางการพิมพ์ลงได้ สูตรของสารเคลือบที่ใช้ลาเท็กซ์เป็นสารยึด และใช้ซิลิกาเป็นสารสีจะให้งานพิมพ์ที่เกิดปัญหารอยจ้ำของหมึก และค่าความดำต่ำ ผลที่ไม่พึงปรารถนานี้มีสาเหตุจากสารลดแรงตึงผิวที่ใส่ไปเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับอนุภาคของลาเท็กซ์ จะไปรบกวนการเปียกผิวของหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ต ทำให้หมึกพิมพ์ไม่สามารถถูกดูดซึมไปยังชั้นสารเคลือบได้อย่างรวดเร็ว โดยภาพที่ 2.9 แสดงปัญหาการเกิดการแพร่กระจายของหมึก (wicking) สำหรับสารเคลือบที่ใช้สารยึดเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับลาเท็กซ์ ส่วนตารางที่ 2.3 แสดงค่าความดำของหมึกพิมพ์ของสีดำสีเดียว สีดำที่เกิดจากการผสมและสีฟ้าบนกระดาษเคลือบผิวที่ใช้ลาเท็กซ์เป็นสารยึด 3 ชนิด เปรียบเทียบกับการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึด



ภาพที่ 2.9 การเกิดการแพร่กระจายของหมึกพิมพ์สำหรับสารเคลือบที่ใช้สารยึดเป็นพอลิไวนิล แอลกอฮอล์เปรียบเทียบกับลาเท็กซ์ [10]

ตารางที่ 2.3 ความดำของหมึกพิมพ์ของสีดำเดี่ยว สีดำที่เกิดจากการผสม และสีฟ้าบนกระดาษเคลือบผิวสัดส่วนชิลิกาต่อสารยึด 100:30 โดยใช้ลาเท็กซ์กับการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึด [10]

	Base sheet	Celvol 523 PVA	Acrylic	Vinyl Acetate	SBR
Solution Solid	N/A	11.56	12.85	12.52	17.11
ความหนืด (cps)	N/A	112	310	215	267
น้ำหนักสารเคลือบ (g/m <sup>2</sup> /side)	N/A	6.64	8.64	7.09	8.01
Monochrome Black	0.96	1.32	0.88	0.88	0.79
Composite Black	0.64	0.92	0.62	0.61	0.74
Cyan	1.07	1.44	1.26	1.25	1.10
Composite Black Dot Area (mm <sup>2</sup> )	0.0238	0.0094	0.0150	0.0159	0.0267

### 2.1.5.5 ความหนืดและการไหล

ความหนืดของสารเคลือบที่ใช้ซิลิกาเป็นสารสีและใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึดจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกาเพียงเล็กน้อย โดยความหนืดจะขึ้นอยู่กับพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และหมู่ซิลิกอนของสารสี ร้อยละของของแข็งสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 30 ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสัดส่วนของสารสีต่อสารยึด พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ชนิดที่มีร้อยละการไฮโดรไลซิสสูง มีแนวโน้มจะให้ความหนืดสูงกว่าเมื่อสัดส่วนของสารสีต่อสารยึดเท่ากัน

### 2.1.5.6 กำลังการยึดติดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

แม้ว่าการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและเป็น partially hydrolyzed จะสามารถใช้เตรียมสารเคลือบที่ร้อยละของแข็งสูง ๆ ได้แต่มีความแข็งแรงต่อการยึดติดสารสีซิลิกาต่ำเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง ด้วยเหตุนี้หากใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์น้ำหนักโมเลกุลต่ำจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มากขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดฝุ่นของซิลิกาจากผิวหน้าแผ่นกระดาษ [10]

### 2.1.6 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy methyl cellulose; CMC)

สาร CMCผลิตได้จากปฏิกิริยา etherification ระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตท มีสูตรทางเคมี คือ  $[C_6H_7O_2(OH)_3(OCH_2COONa)]_n$

เมื่อ  $n$  คือ ระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP)

$x$  คือ ระดับความสามารถในการแทนที่ (degree of substitution; DS)

ระดับความสามารถในการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซีเมทิลมีค่าระหว่าง 0.3 -3.0 ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่คาร์บอกซีเมทิลที่เข้าไปแทนที่ โดยทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 0.6-0.9 สาร CMC ที่มีค่า DS ต่ำกว่า 0.3 จะไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายในด่าง สำหรับสาร CMC ที่มีค่า DS สูงกว่า 0.45 สามารถละลายน้ำได้ สาร CMC ที่นิยมใช้กันมากจะมีค่า DS เท่ากับ 0.7 ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของหมู่คาร์บอกซีเมทิล 7 หมู่ ที่เข้าไปแทนที่ 10 หน่วยของแอนไฮโดรเซลลูโลส สาร CMC มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่เป็นอันตราย ไม่ระคายเคืองผิวหนัง ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ละลายน้ำได้ดี ทั้งในน้ำร้อน และ น้ำเย็น ได้สารละลายที่มีความหนืด มีสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึด และเป็นสารคงสภาพ (stabilizer) ซึ่งจะช่วยในการกระจายอนุภาค [11]

### 2.1.6.1 สมบัติของซีเอ็มซี

#### 2.1.6.1.1 การละลาย

ซีเอ็มซีสามารถละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แต่จะละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่เข้ากับน้ำได้เช่น เอทานอล อะซีโตน ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของซีเอ็มซีได้แก่

- 1) ขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่จะทำให้ละลายได้ช้า การกระจายตัวในน้ำจะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือมีความละเอียดมากขึ้นจะช่วยประหยัดเวลาในการเตรียมสารละลาย
- 2) โครงสร้างทางเคมี ถ้ามีค่า DS สูงจะสามารถละลายได้เร็วและถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ อัตราการละลายจะเร็วกว่า

#### 2.1.6.1.2 ความหนืด

สารละลายซีเอ็มซีมีลักษณะใสและหนืด โดยมีพฤติกรรมการณ์ไหลเป็นแบบนอน-นิวโตเนียน คือค่าความหนืดจะเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนอัตราเฉือน (shear rate) ซึ่งค่าความหนืดของสารละลายที่วัดได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. ค่า DP (degree of polymerization) ของเซลลูโลสโดยปกติมีค่าประมาณ 5,000 ยิ่งเซลลูโลสมีค่า DP สูง ความหนืดของซีเอ็มซีจะยิ่งสูง
2. ความเข้มข้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นค่าความหนืดจะสูงขึ้น
3. อุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของสารละลายจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิจะไม่มีผลอย่างถาวรต่อลักษณะของสารละลาย แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่สารละลายเป็นเวลานานอาจทำลายโครงสร้างของซีเอ็มซี และทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงได้
4. ความเป็นกรด-เบส ของสารละลายซีเอ็มซีจะมีเสถียรภาพและมีความหนืดสูงที่สุดที่ pH ระหว่าง 7-9 ถ้า pH ต่ำกว่า 4 ซีเอ็มซีที่อยู่ในรูปของกรดอิสระซึ่งละลายน้ำได้น้อยจะมีมากขึ้นและทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้น แต่ที่ pH มากกว่า 10 พบว่าค่าความหนืดลดลงเล็กน้อย
5. การใช้ตัวทำละลายผสม เมื่อใช้ตัวทำละลายผสม เช่น กลีเซอรอล-น้ำ สำหรับการเตรียมสารละลายซีเอ็มซีที่มีค่า DS สูงพบว่าความหนืดของตัวทำ

ละลายจะมีผลต่อความหนืดของสารละลายด้วย เช่น สารละลายซีเอ็มซีที่ใช้ตัวทำละลายผสม กลิเซอรอล-น้ำ ในอัตราส่วน 60:40 จะมีความหนืดเป็น 10 เท่าของสารละลายซีเอ็มซีในน้ำ

#### 2.1.6.1.3 เสถียรภาพ (Stability)

แม้ว่าสารละลายซีเอ็มซีจะมีเสถียรภาพดีกว่ากาวชนิดอื่น ๆ ที่ละลายน้ำได้แต่สมบัติโดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนืดก็อาจถูกทำลายได้ เนื่องจากการย่อยสลายด้วยเซลล์จากจุลินทรีย์ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส และออกซิเจน เป็นต้น

#### 2.1.6.1.4 ความสามารถในการเกิดฟิล์ม

ซีเอ็มซีสามารถเกิดเป็นฟิล์มแข็งแรง และมีความทนทานต่อน้ำมัน โดยฟิล์มซีเอ็มซีจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมัน ไขมัน และตัวทำละลายอินทรีย์

#### 2.1.6.1.5 ความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต

จากการศึกษาทางด้านพิษวิทยาไม่พบว่าซีเอ็มซีเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์รวมทั้งมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน้อยที่สุด ตัวอย่างสมบัติของซีเอ็มซีที่มีการผลิตขึ้นเพื่อจำหน่ายสู่อุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของซีเอ็มซีสำหรับการประยุกต์ในงานต่าง ๆ (Thai Cellulose Products Ltd.)

Character Type	ร้อยละความบริสุทธิ์	DS	ช่วงความหนืด (mPa s)	ความเป็นกรด - เบส	ความชื้น (%max)
D	50 - 72	0.45 - 0.70	10 - 50	7 - 10	8
W	60 - 98	0.14 - 1.40	10 - 500	9 - 11	8
T	80 - 98	0.14 - 1.40	10 - 3000	6 - 8	8
F	99.5	0.45 - 1.40	10 - 4500	6 - 8	8
P	99.5	0.45 - 1.40	10 - 4500	6 - 8	8

หมายเหตุ D สำหรับอุตสาหกรรม ชักกรีต สารชักฟอก  
 W สำหรับอุตสาหกรรม การขูดเจาะน้ำมัน  
 T สำหรับอุตสาหกรรม สิ่งทอ สี เซรามิก กาว  
 F สำหรับอุตสาหกรรม อาหาร เครื่องดื่ม ไส้กรอก และผลิตภัณฑ์นม  
 P สำหรับอุตสาหกรรม ยา และเครื่องสำอาง

### 2.1.7 ผลของสารเคลือบต่อสมบัติของกระดาษเคลือบผิว

สมบัติเชิงแสงของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารสี ขึ้นกับสารเคลือบโดยตรง ซึ่งสารเคลือบที่มีสารสีเป็นส่วนประกอบนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงแสง เช่น ความขาวสว่างและความทึบแสง ช่วยในกระบวนการสุดท้ายในการปรับแต่งกระดาษเคลือบผิว และสภาพพิมพ์ได้ ขณะที่การเคลือบเงาช่วยปรับปรุงค่าความมันวาวและความเรียบ และสภาพพิมพ์ได้เกี่ยวข้องกับ การต้านทานการถอนผิว ความสามารถในการรับหมึก และการอ้อมหมึก ส่วนความสามารถในการหยุดตัวของกระดาษและความพรุนของอนุภาคสารสี ขึ้นกับวัตถุดิบที่เตรียมได้มากกว่าสมบัติของสารเคลือบ [5]

#### 2.1.7.1 สมบัติเชิงแสงของกระดาษเคลือบผิว

ก. ความขาวสว่างและความทึบแสง ขึ้นกับสมบัติของสารสีและสารยึดรวมถึงสภาวะในการเตรียมสารเคลือบ สมบัติของสารสีที่มีผลต่อสมบัติเชิงแสง ได้แก่ ความขาวสว่าง ธรรมชาติหักเห รูปร่างของอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ความถ่วงจำเพาะและการทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวของสารสี

ข. ความทึบแสงสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค รูปร่าง และค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันระหว่างสารสีและสารยึดที่สารสีกระจายตัวอยู่ สารสีที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าสารยึดมากจะให้ค่าความทึบแสงสูง

ค. รูปร่างอนุภาค ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารสี มีอิทธิพลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาค และต่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของสารสีในชั้นสารเคลือบผิว การจัดเรียงตัวของสารสีกับปริมาตรและขนาดของช่องว่างระหว่างอนุภาคเป็นปัจจัยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (scattering coefficient) และความทึบแสงของสารสี การจัดเรียงตัวและช่องว่างของอนุภาคที่เหมาะสมนั้นเกิดขึ้นได้ยาก การกระจายตัวของสารสีที่เหมาะสมทำได้โดยการใช้สารยึดให้น้อยลง ใช้ปริมาณของแข็งสูงและให้มีการเคลื่อนที่ของสารเคลือบอย่างช้า ๆ สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคในชั้นสารเคลือบ การทำปฏิกิริยาที่ผิวสารสีเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงและความหนาของ double layer รอบอนุภาคสารสี และมีผลต่อช่องว่างระหว่างอนุภาค โดยสารเคลือบที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคสารสีใหญ่ จะให้ความทึบแสงและสภาพพิมพ์ได้ดี การใช้สารสีหลายชนิดร่วมกันทำให้เกิดการปรับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เช่นเดียวกับสมบัติทางเคมีและรูปร่างของอนุภาค [5]

### 2.1.7.2 สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษเคลือบผิว

สารสีในสารเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมสภาพพิมพ์ได้ สารสีต้องเปียกผิวโดยหมึกพิมพ์ได้ง่าย และชั้นของสารสีต้องมีรูปพรุนเพียงพอในการดูดซึมหมึกพิมพ์ได้รวดเร็ว การเซ็ดตัวของหมึกพิมพ์อย่างรวดเร็วนั้นชั้นของสารเคลือบต้องไม่ดูดซึมหมึกมากเกินไป เพราะจะทำให้ความมันวาวของชั้นหมึกพิมพ์ลดลงแก้ไขโดยการใช้ปริมาณหมึกพิมพ์ให้มากขึ้น แต่อาจเกิดการทะลุหลังของหมึกพิมพ์ไปอีกด้านของกระดาษได้ ปัญหานี้แก้ได้โดยใช้สารสีที่เป็นดินขาว การเพิ่มความสามารถในการรับหมึก ทำได้โดยการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปในสารเคลือบทำให้เกิดโครงสร้างรูปพรุนมากขึ้น การเลือกสารสีและสารยึดที่เหมาะสมก็จะสามารถผลิตสารเคลือบที่เหมาะสมกับการพิมพ์ทุกระบบได้ [5]

### 2.1.8 วิธีการเคลือบผิวกระดาษ

เทคนิคการเคลือบ สามารถทำได้หลายแบบ เช่น เคลือบสารยึดติด (adhesives) สารเคลือบ (coating) และหมึกพิมพ์ แต่ละวิธีจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ [12]

- ความหนืดและค่ากระแสวิทยา (viscosity/rheology)
- ความหนาของชั้นฟิล์ม (Film thickness desired)
- รูปร่างของฐานที่ใช้เคลือบ (Shape of substrate)
- ราคา (Cost)
- ความสามารถในการนำไปใช้ได้หลากหลาย (Versatility of use)
- วิธีการเคลือบที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ดังภาพที่ 2.10 ได้แก่

#### ก. การเคลือบแบบกราวัวร์

วิธีการเคลือบด้วยเครื่องกราวัวร์ใช้กับสารเคลือบที่หนาไม่เกิน 0.2 มิล (mil) และใช้ได้ทั้งโรงงานหมึกพิมพ์ที่ให้ความแม่นยำ ประโยชน์หลักของการเคลือบด้วยกราวัวร์คือสามารถเพิ่มน้ำหนักสารเคลือบได้ขึ้นกับแรงดึงของกระดาษมันและความเร็วของมันกระดาษ

#### ข. การเคลือบแบบเฟล็กโซกราฟฟิก

การพิมพ์ด้วยเครื่องเฟล็กโซกราฟฟิกคล้ายกับการพิมพ์กราวัวร์ แต่ใช้กับเพลตยาง ความหนืดของหมึกพิมพ์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 35 – 200 cps

#### ค. แท่งขดลวด

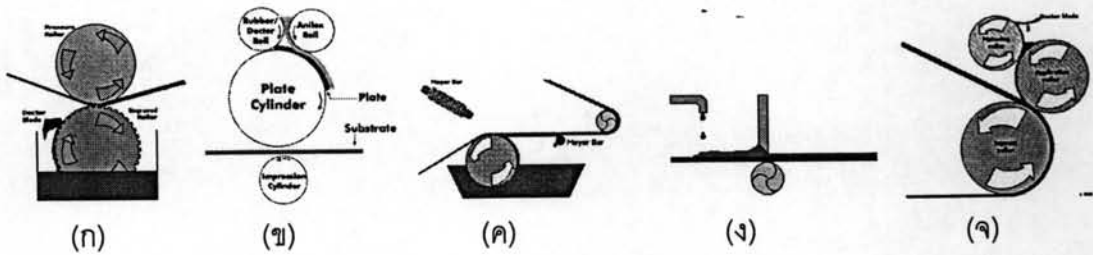
เป็นการใช้ขดลวดในการเคลือบที่ให้ความหนาของสารเคลือบ 0.2 – 0.8 มิล ใช้กับสารยึดติดหรือสารเคลือบที่มีความหนืด 200 – 1000 cps เป็นรูปแบบทำงานจึงเป็นที่นิยม

### ง. ไบมีดเหนื่อลูกกลิ้ง

เป็นการใช้ไบมีดวางอยู่เหนือโม ซึ่งใช้กับสารยึดที่มีความหนืดสูง หรือสารเคลือบที่มีน้ำหนักสารเคลือบสูง ใช้กับความหนืดประมาณ 10,000 – 100,000 cps และใช้กับสารเคลือบที่หนาประมาณ 0.5 – 2.0 มิล

#### จ. การเคลือบแบบลูกกลิ้งย้อนกลับ

เป็นการใช้กับงานที่ต้องการคุณภาพสูง รูปลอก หรืองานกราฟฟิก น้ำหนักสารเคลือบสามารถควบคุมได้ด้วยความเร็วของโมสัมพันธ์กับความเร็วของโมด้านหลัง ถ้าความเร็วสูงขึ้นน้ำหนักสารเคลือบจะเพิ่มมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักสารเคลือบประมาณ 0.0001 นิ้ว สามารถใช้กับความหนืดที่สูงมากกว่า 10,000 – 20,000 cps



ภาพที่ 2.10 วิธีการเคลือบ (ก) กราวัวร์ (ข) เฟลคโซกราฟี (ค) แท่งขดลวด (ง) ไบมีดเหนื่อลูกกลิ้ง (จ) ลูกกลิ้งแบบย้อนกลับ [23]

## 2.1.9 สมบัติทางกายภาพของกระดาษเคลือบผิว

### 2.1.9.1 ความขาวสว่าง (Brightness)

สารสีที่อยู่ในสารเคลือบมีผลต่อความขาวสว่างเพราะอนุภาคสารสีจะไปทำให้เกิดการกระเจิงของแสง การกระเจิงแสงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลที่เกิดจากการสะท้อน และการหักเหของแสงที่ตกกระทบสารเคลือบ เส้นใยเซลลูโลส และสารเติมแต่ง ความขาวสว่างของกระดาษวัดได้จากค่าการสะท้อนแสงโดยรวม (total reflectance of light) ที่ตกลงบนกระดาษ ในอุตสาหกรรมกระดาษจะวัดความขาวสว่างที่มุมแสงตกกระทบ  $45^{\circ}$  และมุมรับแสงสะท้อนที่  $0^{\circ}$  ทำมุมกับเส้นตั้งฉาก และค่าความขาวสว่างคือค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร ตามมาตรฐาน Tappi (T452 : Tappi Brightness) [5]



### 2.1.9.2 ความขาว (Whiteness)

ความขาวแตกต่างจากความขาวสว่าง คือค่าความขาว คือค่าการสะท้อนแสงทั้งหมดตลอดช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็น คือ 400-700 นาโนเมตร การใช้ค่าความขาวเพียงค่าเดียว เช่นดัชนีความขาว ในการเปรียบเทียบความขาวของวัตถุ จะมีความสะดวกกว่า การใช้ค่าการสะท้อนแสงตลอด 400-700 นาโนเมตร แต่วัตถุที่นำมาเปรียบเทียบโดยใช้ค่าดัชนีความขาวนั้น ควรมีความมันวาว ลักษณะของผิวหน้าและสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกัน และมีสีใกล้เคียงกับค่าความขาวเพราะการนำวัตถุที่มีสีอื่นมาแทนค่าดัชนีความขาวนั้นจะไม่มีมีความหมายใด ๆ ดัชนีความขาวที่ใช้กับกระดาษได้แก่ ดัชนีความขาวที่กำหนดโดย ASTM (E313-73) ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิด C มุมผู้สังเกตมาตรฐานที่ 2 องศา ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$WI E313 = 4Z - 3Y \quad (2.2)$$

โดยที่ Z และ Y คือ ค่า ไตรสติมูลัส ( $C/2^\circ$  มี  $X_n = 0.3101$  และ  $Y_n = 0.3162$ )

### 2.1.9.3 ความเรียบ (Smoothness)

สมบัติทางกายภาพอื่นที่มีผลต่องานพิมพ์ก็คือความเรียบของผิวหน้ากระดาษ ซึ่งเป็นลักษณะที่สัมพันธ์กับความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ กระดาษที่มีความเรียบมาก จะส่งผลให้งานพิมพ์มีความละเอียดสูง กระดาษชนิดมันวาวสูงจะมีความเรียบสูง แต่กระดาษที่มีความเรียบสูงไม่จำเป็นต้องมีความมันวาวสูง

### 2.1.10 การพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ต (ink jet printing)

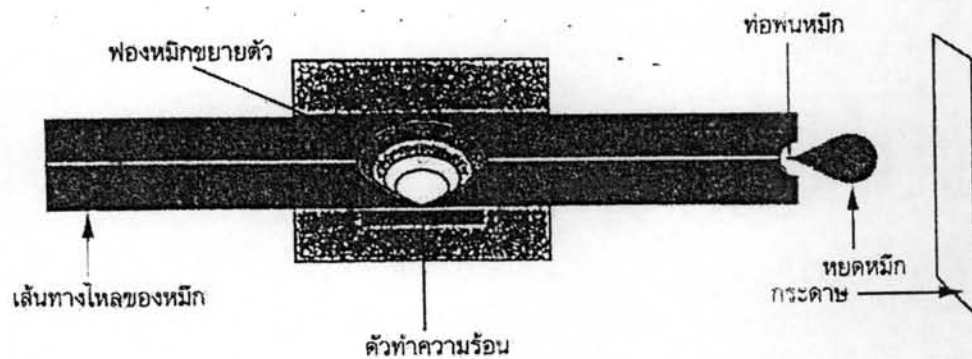
เครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ต เป็นเครื่องพิมพ์แบบพ่นหมึกที่มีการออกแบบโครงสร้างในปี ค.ศ.1970 โดยทีมงานวิจัยของแคนนอน เรียกว่า เทคโนโลยีการพ่นหมึกแบบบับเบิลเจ็ต ซึ่งจะใช้ท่อขนาดเล็กในการขับหมึกออกไป ผ่านหัวพิมพ์หรือพ่นหัวลงบนกระดาษ ปรากฏเป็นตัวอักษรและรูปภาพที่มีสีสันต่าง ๆ [13]

เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์แบบพ่นหมึกมีอยู่ 3 ประเภท [14] คือ

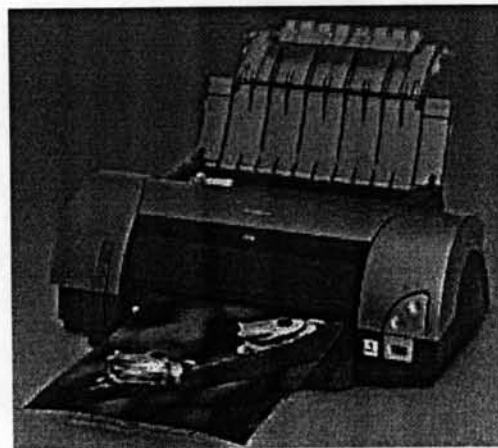
1. บับเบิลเจ็ต (bubble Jet)
2. อิงค์เจ็ต (ink jet)
3. เปียโซอิเล็กทริก (piezo - electric)

### 2.1.10.1 เทคโนโลยีการพ่นหมึกแบบบับเบิลเจ็ต

เป็นเทคโนโลยีของแคนนอน เมื่อส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังตัวทำความร้อน (resistive heater) ซึ่งไฟฟ้าจะกระตุ้นให้เกิดความร้อนประมาณ 300 – 400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้น้ำหมึกหลอมละลายและเดือดเป็นฟองในรูปของไอน้ำ แล้วน้ำหมึกเหล่านี้จะถูกดันออกมาจากหัวพ่นไปสัมผัสกับแผ่นกระดาษ หัวพิมพ์ของเครื่องพิมพ์จะประกอบไปด้วยท่อขนาดเล็กจำนวน 48 , 64 , 128 , 256 ท่อ ในแต่ละท่อจะมีตัวทำความร้อน ความถี่ ในการสร้างความร้อนเพื่อขับหมึกออกไปจะอยู่ที่ 3000 ครั้งต่อวินาที ดังภาพที่ 2.11 และตัวอย่างเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อแคนนอน i9950 ดังภาพที่ 2.12



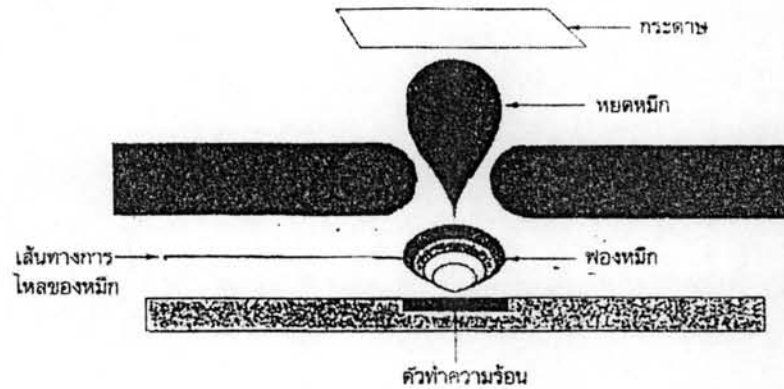
ภาพที่ 2.11 เทคนิคการพ่นหมึกแบบบับเบิลเจ็ต [13]



ภาพที่ 2.12 เครื่องพิมพ์แคนนอน i9950

### 2.1.10.2. เทคโนโลยีการพ่นหมึกแบบอิงก์เจ็ต

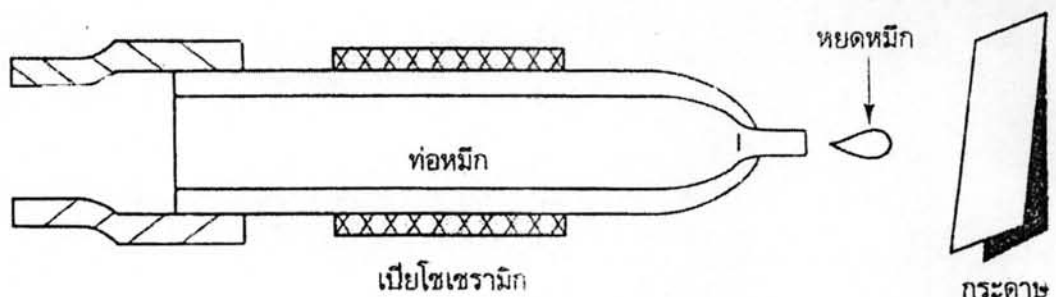
เป็นเทคโนโลยีของบริษัทฮิวเลตต์แพคการ์ด (HP) เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกส่งผ่านไปยังตัวทำความร้อน ประกอบด้วยน้ำหมึกถูกส่งผ่านไปยังบริเวณตัวทำความร้อน ทำให้น้ำหมึกเกิดการขยายตัวและมีแรงดันขับหมึกผ่านร่องออกไปสู่กระดาษ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 เทคนิคการพ่นหมึกแบบอิงก์เจ็ต [13]

### 2.1.10.3. เทคโนโลยีการพ่นหมึกแบบเปียโซอิเล็กทริก

เป็นการใช้วัสดุที่เป็นเซรามิกหรือคริสตอลที่สามารถเปลี่ยนขนาดตัวเองได้ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ในภาพที่ 2.14 จะเห็นว่าชั้นเซรามิกประกอบติดอยู่กับผนังท่อหมึก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซรามิกจะเกิดแรงกดทับท่อหมึกแล้วสร้างแรงดันผลหมึกออกไปสู่กระดาษ ความถี่ในการขับหมึกสูงถึง 5000 ครั้งต่อวินาที บริษัทที่ใช้เทคโนโลยีการพ่นหมึกแบบเปียโซอิเล็กทริกคือบริษัทเอปสัน (EPSON)



ภาพที่ 2.14 เทคนิคการพ่นหมึกแบบเปียโซอิเล็กทริก [13]

### 2.1.11 คุณภาพงานพิมพ์

การทดสอบสมบัติกระดาษก่อนพิมพ์และคุณภาพงานพิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของงานพิมพ์ที่ไม่ได้คุณภาพ และสามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้อง [5]

#### 2.1.11.1 ความดำของหมึกพิมพ์ (Ink density)

ค่าความดำของหมึกพิมพ์เป็นผลมาจากปรากฏการณ์เชิงแสง คือการสะท้อน การดูดกลืนและการหักเหของแสง การวัดค่าความดำคือ การวัดปริมาณของแสงที่สะท้อนจากงานพิมพ์ แล้วเปลี่ยนเป็นค่าความดำ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งปริมาณแสงที่สะท้อนดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การดูดกลืนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะวัดได้ค่าความดำมาก

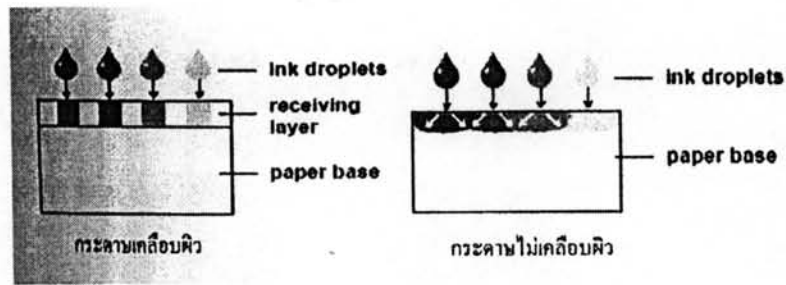
$$D = \log_{10} \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

โดยที่ R คือแฟกเตอร์การสะท้อนแสง

#### 2.1.11.2 การซึมเข้าหากันของหมึกพิมพ์ (Inter-color bleed)

คือการซึมเข้าหากันของสี เป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่มีผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ พบมากในหมึกอิงค์เจ็ทระบบความร้อนฐานน้ำที่มีความหนืด 1-5 เซนติพอยส์ บริเวณที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดที่สุดคือบริเวณสีดำบนพื้นสีเหลือง หรือบริเวณที่พิมพ์สีดำติดกับสีเหลือง ปรากฏการณ์นี้ขึ้นอยู่กับกระดาษที่ใช้พิมพ์มากที่สุดและสามารถแก้ไขหรือลดปัญหาลงได้โดยใช้กระดาษที่มีการเคลือบผิวพิเศษ หรือโดยใช้การพิมพ์ที่มีการทำให้หมึกแห้งก่อนพิมพ์สีถัดไป หรืออาจใช้หมึกพิมพ์ที่แห้งตัวเร็วภายใน 1 วินาที หรือน้อยกว่านั้น หรือแห้งตัวก่อนที่หมึกจะซึมเข้ามาผสมกัน การวัดการซึมเข้าหากันของหมึกพิมพ์ส่วนใหญ่จะทำการวัดเส้นสีดำบนพื้นเหลือง จากแบบทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ที่มีแพทเทิร์นของการทดสอบการซึมเข้าหากันของหมึกพิมพ์ ดังภาพที่ 2.15 หากความกว้างของเส้นที่พิมพ์มากกว่าความกว้างของเส้นต้นฉบับมาก ร้อยละของการซึมเข้าหากันของสีจะมีค่าสูง คำนวณดังสมการที่ 2.4

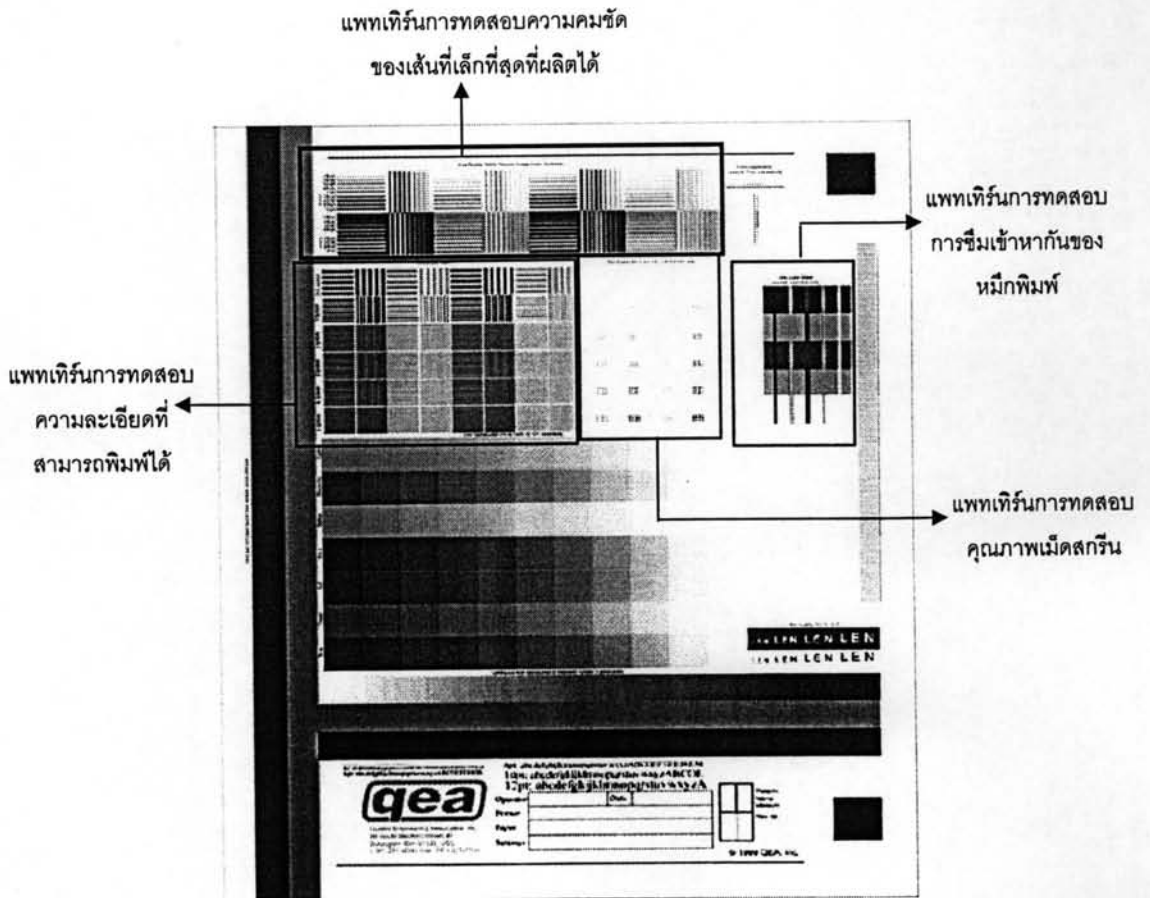
$$\% \text{ การซึมเข้าหากันของหมึก} = \left( \frac{\text{ขนาดของเส้นที่ผลิตได้} - \text{ขนาดของเส้นต้นฉบับ (1 มม.)}}{\text{ขนาดของเส้นต้นฉบับ (1 มม.)}} \right) \times 100 \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.15 การซึมเข้าหากันของหมึกพิมพ์บนกระดาษเคลือบผิวกับกระดาษไม่เคลือบผิว [15]

2.1.12 แบบทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ (Test target)

แบบทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ พิมพ์ QEA test target ดังภาพที่ 2.16 ลงบนกระดาษเคลือบผิว นำมาวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์ ให้ความคงที่ น่าเชื่อถือ มีประสิทธิภาพ ในแบบทดสอบประกอบด้วย บริเวณสำหรับพิมพ์เม็ดสกรีน เพื่อตรวจสอบคุณภาพเม็ดสกรีนบริเวณพื้นที่บของสีไซแอน สีมาเจนตา สีเหลือง สีดำ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน บริเวณความละเอียดที่สามารถพิมพ์ บริเวณทดสอบการพิมพ์เข้าหากันของหมึก บริเวณการผลิตน้ำหมึกสีเทา และบริเวณความคมชัดของตัวอักษร



ภาพที่ 2.16 QEA test target สำหรับวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์

### 2.1.13 การออกแบบของผสม (Mixture design)

สารเคลือบ คือของผสมที่มีความซับซ้อนประกอบด้วย สารสี สารยึด ตัวทำละลาย และสารเติมแต่ง การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของสารเคลือบ หากจะประเมินผลขององค์ประกอบต่าง ๆ นั้น จะใช้เวลานานและจะต้องใช้ตัวอย่างจำนวนมาก [16]

การออกแบบของผสมเป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตอบสนอง (Y) และตัวแปรอิสระ (X) อีกทั้งหาพื้นที่ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X สำหรับในการทดลองนี้จะหมายถึง ค่าความดำของสีดำ หรือค่าความขาว หรือร้อยละการซึมเข้าหากันของหมึกพิมพ์สีดำในสีเหลือง และกลุ่มของตัวแปรอิสระ (X) สำหรับในการทดลองนี้ หมายถึงสัดส่วนขององค์ประกอบสำคัญในสารเคลือบ ได้แก่ ซิลิกา ดินขาวนิวซีแลนด์ และแคลเซียมคาร์บอเนตบด ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบการทดลองมีด้วยกันอยู่หลายรูป ได้แก่ ลิเนียร์ (Linear) (สมการที่ 2.5), ควอดราติก(Quadratic) (สมการที่ 2.6), ฟูลคิวบิก (Full Cubic) (สมการที่ 2.7) และ สเปเชียล คิวบิก (Special Cubic) (สมการที่ 2.8)

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \quad (2.5)$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.6)$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j} \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i<j<k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2.7)$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2.8)$$

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นสมการลิเนียร์ ควอดราติกสำหรับของผสม 3 องค์ประกอบ รูปแบบของสมการ แสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (2.9)$$

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.10)$$

โดยสัมประสิทธิ์ร่วมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 – 2.16

$$\beta_1 = Y_1 \quad (2.11)$$

$$\beta_2 = Y_2 \quad (2.12)$$

$$\beta_3 = Y_3 \quad (2.13)$$

$$\beta_{12} = 4Y_{12} - 2(Y_1 + Y_2) \quad (2.14)$$

$$\beta_{13} = 4Y_{13} - 2(Y_1 + Y_3) \quad (2.15)$$

$$\beta_{23} = 4Y_{23} - 2(Y_2 + Y_3) \quad (2.16)$$

การออกแบบของผสม เป็นการใช้หลักสถิติในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบในของผสม นั้น ตัวอย่างเช่น  $X_1, X_2, \dots, X_p$  เป็นสัดส่วนต่าง ๆ ของ  $p$  องค์ประกอบในของผสม

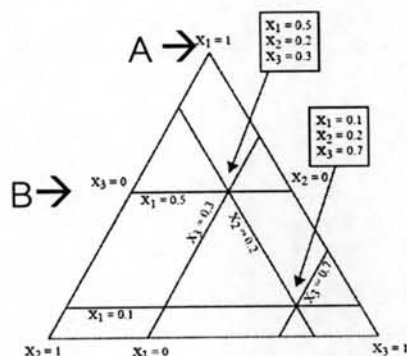
โดยที่

$$0 \leq X_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

และ

$$X_1 + X_2 + \dots + X_p = 1 \quad (\text{ตัวอย่างเช่น ร้อยละ 100})$$

ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ สำหรับ ของผสมที่มี 3 องค์ประกอบจึงสามารถแสดงได้ในรูปของไตรลิเนียร์โคออร์ดิเนตดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งเป็นปริภูมิของผสมแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 2.17 ไตรลิเนียร์โคออร์ดิเนต

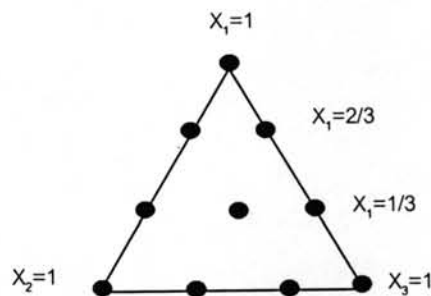
$X_1$  คือองค์ประกอบที่ 1  $X_2$  คือองค์ประกอบที่ 2  $X_3$  คือองค์ประกอบที่ 3 ที่แต่ละด้านของกราฟแสดงถึงของผสม 2 องค์ประกอบ ที่แสดงอยู่ที่จุดยอดของสามเหลี่ยมแทนองค์ประกอบหนึ่ง ๆ และเป็นจุดที่มีองค์ประกอบนั้นในสัดส่วนเท่ากับ 1 และองค์ประกอบที่เหลือเท่ากับ 0 เช่นที่จุด A มีสัดส่วนขององค์ประกอบ  $X_1, X_2$  และ  $X_3$  เป็น 1:0:0 ที่จุด B มีสัดส่วนองค์ประกอบ  $X_1, X_2$  และ  $X_3$  เป็น 0.5:0.5:0 เป็นต้น การออกแบบของผสมแบบซิมเพล็กซ์ (simplex design) ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลขององค์ประกอบในของผสมต่อสมบัติของของผสม

การออกแบบของผสมแบบซิมเพล็กซ์ สามารถแบ่งวิธีการออกแบบได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แลททิส และการออกแบบแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ (simplex centroid design)

การออกแบบซิมเพล็กซ์แลททิส มีรูปแบบของจุดโคออร์ดิเนตสำหรับ  $p$  องค์ประกอบ และ  $m$  ระดับ  $\{p,m\}$  ดังสมการที่ 2.17

$$X_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1 \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, p \quad (2.17)$$

สัดส่วนของของผสมที่เป็นไปได้ตามสมการที่ 2.10 จะนำมาใช้ในการผสมตัวอย่าง เช่น ถ้ามีองค์ประกอบ 3 องค์ประกอบ ( $p=3$ ) และระดับในการแบ่งสเกลเป็น 3 ( $m=3$ ) ดังนั้น  $X_i = 0, 1/3, 2/3, 1$  โดยที่  $i = 1, 2, 3$  และซิมเพล็กซ์แลททิสจะประกอบด้วยของผสม 10 ชุด ได้แก่  $(X_1, X_2, X_3) = (1,0,0); (0,1,0), (0,0,1), (2/3,1/3, 0), (2/3, 0, 1/3), (1/3, 2/3, 0), (1/3,0,2/3); (0,2/3,1/3), (0,1/3,2/3), (1/3, 1/3, 1/3)$  และสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 การออกแบบซิมเพล็กซ์แลททิสสำหรับ 3 องค์ประกอบ และ 3 ระดับสเกลจำนวนจุด  $N$  ที่ปรากฏบนสามเหลี่ยมคำนวณได้จาก  $N = (p+m-1)! / m!(p-1)!$

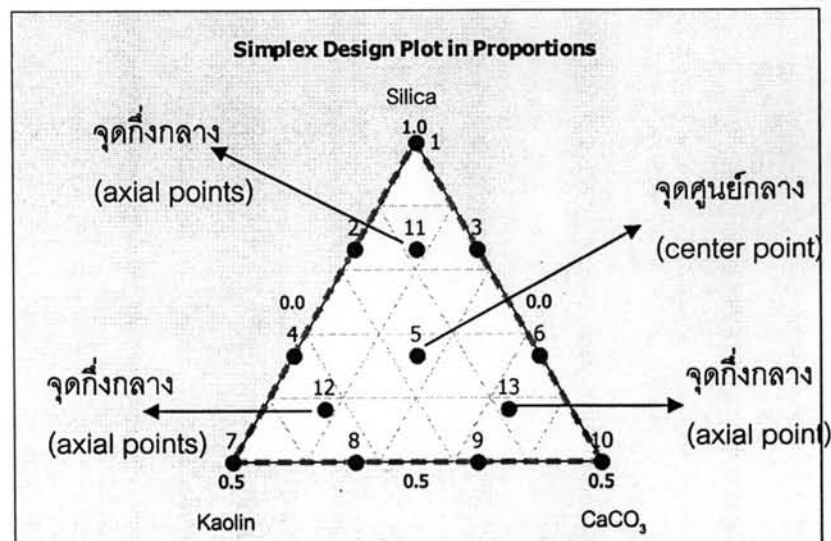
สำหรับงานวิจัยนี้ จะนำการออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แลททิส 3 ระดับที่รวมจุดศูนย์กลาง (center points) และจุดกึ่งกลาง (axial points) ระหว่างจุดที่มุมและจุดตรงกลางไว้ด้วย เพื่อให้ทำนายสมบัติสารเคลือบได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ 2 องค์ประกอบ มีสัดส่วนอยู่ระหว่าง 0 – 0.5 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.19 และสัดส่วนของผสมแสดงในตารางที่ 2.5



ตารางที่ 2.5 สัดส่วนของส่วนผสมที่มี 3 องค์ประกอบ และการออกแบบของผสมแบบซิมเพล็กซ์แลททิซ 3 ระดับรวมจุดศูนย์กลาง และจุดกึ่งกลาง

สูตรผสม	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Response
1	1	0	0	$Y_1$
2	2/3	1/3	0	$Y_{112}$
3	2/3	0	1/3	$Y_{113}$
4	1/3	2/3	0	$Y_{122}$
*5	1/3	1/3	1/3	$Y_{123}$
6	1/3	0	2/3	$Y_{133}$
7	0	1	0	$Y_2$
8	0	2/3	1/3	$Y_{223}$
9	0	1/3	2/3	$Y_{233}$
10	0	0	1	$Y_3$
**11	2/3	1/6	1/6	$Y_{1123}$
**12	1/6	2/3	1/6	$Y_{1223}$
**13	1/6	1/6	2/3	$Y_{1233}$

- \*จุดโคออร์ดิเนตตรงศูนย์กลาง
- \*\*จุดโคออร์ดิเนตกึ่งกลาง (axial point)
- สูตรผสมที่ 1, 7 และ 10 เป็นจุดมุม (vertex)



ภาพที่ 2.19 การออกแบบส่วนผสมแบบซิมเพล็กซ์แลททิซแบบ 3 ระดับ 3 องค์ประกอบรวมจุดศูนย์กลาง และจุดกึ่งกลาง

จากภาพที่ 2.19 แสดงการออกแบบส่วนผสมแบบซิมเพล็กซ์แลททิซแบบ 3 ระดับ 3 องค์ประกอบ จะเห็นว่าหมายเลขแต่ละจุดจะเป็นตัวแทนของสูตรผสมของสารเคลือบ สูตรที่ 1, 7 และ 10 จะเป็นจุดมุมของกราฟ เป็นส่วนผสมที่มีสารสีแต่ละชนิดเพียงอย่างเดียว จุดที่ 5 เป็นจุดกึ่งกลางของส่วนผสม และจุดที่ 11, 12 และ 13 เป็นจุดที่อยู่กึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางและจุดยอด จุดกึ่งกลางและที่อยู่กึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางและจุดมุมจะมีสารสีผสมกันทั้ง 3 ชนิด

ในการทดลองหาสูตรที่เหมาะสม หากสมบัติที่สนใจมีมากกว่า 1 ชนิด จำเป็นต้องหาสูตรที่เหมาะสมที่ให้สมบัติที่สนใจเหล่านั้นมีค่ายอมรับได้ ในการคำนวณหาค่าตัวแปรอิสระ ( $X_i$ ) จากแบบจำลอง 3 สมการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองของ ค่าความดำของหมึกพิมพ์สีดำ (ink density) ค่าร้อยละการซึมเข้าหากันของหมึกสีดำในสีเหลือง (inter-color bleeding) ความทึบแสง (opaque) และค่าความขาวของกระดาษ (whiteness) มาใช้สำหรับคำนวณหาสูตรที่เหมาะสมที่สุด ดังสมการที่ 2.18 – 2.21

$$\text{Whiteness } (Y_1) = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.18)$$

$$\text{Opaque } (Y_2) = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.19)$$

$$\text{Density } (Y_3) = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.20)$$

$$\text{Inter-color bleeding } (Y_4) = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.21)$$

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee และคณะ [17] พบว่าสารเคลือบกระดาษสำหรับระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ตที่เตรียมจาก สารสี 4 ชนิด ได้แก่ ฟลูมซิลิกา 2 ชนิด อะลูมินัมออกไซด์ และซิลิกาชนิดตกตะกอน โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นสารยึด นำมาผสมกันเพื่อเตรียมเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับการพิมพ์ระบบอิงก์เจ็ต ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารสี และพื้นที่ผิวของสารสี เมื่อนำมาผสมกัน จะได้สารเคลือบจำนวน 4 สูตร โดยเคลือบด้วยเครื่องที่ใช้ใบมีดในการปาด บนกระดาษด้วย น้ำหนักสารเคลือบต่างกัน คือ  $6 \pm 1 \text{ g/m}^2$ ,  $9 \pm 1 \text{ g/m}^2$ ,  $12 \pm 1 \text{ g/m}^2$  และ  $15 \pm 1 \text{ g/m}^2$  แล้วนำกระดาษที่เคลือบแล้วมาตรวจสอบสมบัติทางการมองเห็น สมบัติทางกายภาพ และคุณภาพทางการพิมพ์ของระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ต ได้แก่ ความมันวาว ความหยาบ ค่าการซึมผ่าน มุมสัมผัส ค่าความดำ และการกระจายตัวของรูพรุนของกระดาษเคลือบ จากการทดลองพบว่า ความมันวาวขึ้นกับชนิดของสารสี น้ำหนักสารเคลือบ และขนาดของอนุภาคสารสี ความเรียบมีความสัมพันธ์กับความมันวาว ดังนั้นหากต้องการกระดาษเคลือบที่มีความมันวาว และจำเป็นต้องใช้สารสีที่มีขนาดอนุภาคเล็ก เมื่อเพิ่มน้ำหนักสารเคลือบทำให้ความสามารถในการซึมผ่านมีค่าสูงขึ้นแต่ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของสารสีด้วย ด้านคุณภาพการพิมพ์พบว่าค่าความดำของหมึกขึ้นกับชนิดของสารสีและขนาดของการกระจายตัวของรูพรุนของกระดาษเคลือบ

Malla และคณะ [18] เน้นเพื่อดูผลกระทบของการผสมสารสี 3 ชนิดคือ ดีลามิเนตเคลย์ แคลซินเคลย์และทัลค์ ในสารเคลือบกระดาษเคลือบผิวน้ำหนักเบา (LWC) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงแสงและความสามารถในการพิมพ์ได้ของระบบโรโตกราฟัวร์ และการเกิดโครงสร้างรูพรุนของชั้นสารเคลือบ โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมเชิงสถิติในการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารสี ผลการทดลองพบว่าดีลามิเนตเคลย์ในสารเคลือบ เพิ่มความมันวาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง ส่วนแคลซินเคลย์มีส่วนช่วยปรับปรุง ความขาวสว่าง ความทึบแสง และสภาพพิมพ์ได้ในระบบการพิมพ์โรโตกราฟัวร์ แต่ไปลดความมันวาวของกระดาษลง ส่วนทัลค์ช่วยในการปรับปรุงสภาพการพิมพ์ได้ของระบบการพิมพ์โรโตกราฟัวร์ แต่ลดความมันวาว ความขาวสว่างและความทึบแสงลง จากรูปร่างของสารสีทั้ง 3 ชนิด พบว่าสารสีชนิดดีลามิเนตเคลย์และทัลค์ มีรูปร่างอนุภาคเป็นแผ่น แต่แคลซินเคลย์มีรูปร่างแบบเกาะเป็นกลุ่มเมื่อนำมาเคลือบบนกระดาษทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดและปริมาตรรูพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าถ้ามีปริมาณดีลามิเนตเคลย์สูงทำให้ปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้นแต่มีขนาดของรูพรุนเล็กลง ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณทัลค์สูงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ปริมาตรรูพรุนลดลง และถ้ามีแคลซินเคลย์สูงมีผลเพิ่มทั้งขนาดและปริมาตรรูพรุน ดังนั้นสารสีทั้ง 3 ชนิด มีผลต่อความเรียบ และการรับหมึกของชั้นเคลือบผิว โดย

ปริมาณสารสีที่เหมาะสมที่ระดับความมันวาวที่ 50 คือ ตีลามิเนตเคลย์ 60 – 80%, แคลซินเคลย์ 10-20% และทัลค์ 0-30% ทำให้มีสมบัติเชิงแสงที่ดีที่สุด

อนันต์ [19] ได้ทำการศึกษาการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาจากแก้วกลม ดินขาว นราธิวาส และสารยึดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารเคลือบกระดาษอิงก์เจ็ตโดยใช้การออกแบบ ส่วนผสมเชิงสถิติแบบซิมเพล็กซ์แลททิซเข้ามาช่วย ได้แบบจำลองแสดงผลของสมบัติต่าง ๆ ในสารเคลือบ เช่น ค่าความดำ ค่าความขาว และค่าร้อยละของการซึมเข้าหากันของหมึก แล้วใช้โปรแกรมมินิแทบคำนวณหาสูตรของสารเคลือบที่ดีที่สุดออกมา พบว่าซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากแก้วกลมนั้นเป็นซิลิกา อัดแน่นมีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง รูปร่างอนุภาคกลม อนุภาคมีขนาดเล็ก และดินขาวนราธิวาสมี รูปร่างแบนราบ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนต่ำ ทำให้ชั้นสารเคลือบไม่สามารถดูดซึมหมึกพิมพ์ได้ดี หมึกพิมพ์กองอยู่ที่ผิวหน้าของชั้นสารเคลือบและบางส่วนซึมไปตามสารยึดที่หุ้มพื้นผิวของอนุภาคดินขาว จึงทำให้มีค่าความดำสูง คุณภาพของเส้นและตัวอักษรไม่ดี และจากการที่หมึกไม่สามารถซึมลงสู่ผิวหน้าสารเคลือบได้อย่างรวดเร็ว ทำให้หมึกแผ่ออกที่ผิวหน้าของกระดาษ และซึมเข้าหากันจึงไม่ควรใช้ดินขาวเป็นสารสีเพียงชนิดเดียวในสารเคลือบ

Chapman [20] ทำการศึกษาสมบัติของซิลิกาสังเคราะห์อัดแน่น พบว่าซิลิกามีระบบรูพรุน 2 แบบคือ รูพรุนระหว่างอนุภาค และรูพรุนภายในอนุภาค แบบหลังนี้ทำให้ซิลิกามีความสามารถในการรับหมึกสูง ขณะที่รูพรุนระหว่างอนุภาคของซิลิกาทำหน้าที่ยอมให้ของเหลวไหลผ่านจากพื้นผิวสารเคลือบอย่างรวดเร็วและมีความสามารถในการรับหมึกได้ สูตรสารเคลือบโดยทั่วไปมีซิลิกาเจลที่มีปริมาตรรูพรุนสูงจึงใช้เวลาในการแห้งตัวสั้น สมบัติของซิลิกาสังเคราะห์อัดแน่นอีกประการหนึ่งคือ การแพร่ของหยดหมึกบนสารเคลือบ พบว่าขึ้นกับธรรมชาติทางเคมีของพลังงานผิว ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงผิวของหมึกพิมพ์และขึ้นกับปัจจัยอื่นที่สำคัญ เช่น ความหยาบและรูพรุนของสารเคลือบ นอกจากนี้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกาก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบของพื้นผิวด้วย สำหรับสารเคลือบที่มีรูพรุนสูง ทำให้หมึกพิมพ์ดูดซึมได้รวดเร็วเป็นผลให้สารสีของหมึกพิมพ์คงอยู่บริเวณผิวของสารเคลือบ การดูดซับตัวทำละลายของหมึกพิมพ์ ทำให้สารสีในหมึกพิมพ์ถูกแยกอยู่ในบริเวณใกล้ผิวสารเคลือบ ขนาดอนุภาคของซิลิกายังมีผลต่อการปรากฏสีพื้นทึบและความหยาบของพื้นผิวที่มีผลต่อความมันวาวภาพพิมพ์

Hladnik และ Muck [21] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ซิลิกาอสัณฐาน แคลเซียมคาร์บอเนต ชนิดตกตะกอน (precipitated calcium carbonate; PCC) เป็นสารสี และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นสารยึดในการผสมสารเคลือบผิวอิงก์เจ็ตที่ใช้ในการเคลือบผิวกระดาษไฮเอนด์อิงก์เจ็ต (ink jet) โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารสีทั้ง 2 ชนิด โดยปริมาณที่เหมาะสมของสารยึดเมื่อใช้ แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 100 จะอยู่ที่ร้อยละ 7- 15 และซิลิกาอยู่ที่ร้อยละ 30 -40 พบว่าผล ของน้ำหนักสารเคลือบต่อคุณภาพงานพิมพ์มีผลต่อซิลิการ้อยละ 100 และซิลิกากับแคลเซียม คาร์บอเนต แต่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนร้อยละ 100 เมื่อน้ำหนักสารเคลือบสูงขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ได้ไม่เท่าซิลิการ้อยละ 100

Malla และ Devisetti [22] ทำการทดลองโดยใช้ดินขาวที่มีอนุภาคเล็กขนาด 0.3 ไมโครเมตร เป็นสารสีร่วมกับซิลิกาในการผลิตกระดาษอิงก์เจ็ตชนิดด้าน พบว่าดินขาวสามารถ กระจายตัวได้ง่ายที่ร้อยละของแข็งสูง (ประมาณร้อยละ 60) ด้วยค่าความหนืดที่ดี เมื่อผสมดินขาว เข้ากับซิลิกาทำให้ผลิตสารเคลือบได้ที่ร้อยละของของแข็งสูงขึ้น และลดปริมาณสารยึดให้ต่ำลงทำ ให้ความพรุนของชั้นสารเคลือบสูง และหมึกพิมพ์แห้งตัวได้รวดเร็ว คุณภาพของเส้น ตัวอักษร และ การซึมเข้าหากันของหมึกที่ได้จากการพิมพ์ที่มีสารสีผสมดินขาวและซิลิกาในสารเคลือบให้ผล ไกล่เคียงกันกับการใช้ซิลิการ้อยละ 100 นอกจากนี้การใช้ดินขาวเป็นสารสีร่วมยังเป็นการลด ปริมาณการใช้ซิลิกาได้ถึงร้อยละ 50 ถึง 75