

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

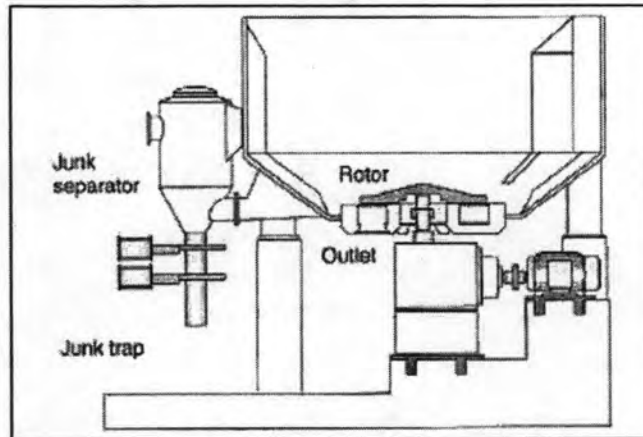
2.1.1 ขบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ (Deinking Process)

การนำกระดาษที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษหรือการรีไซเคิลกระดาษใหม่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ มากมาย รวมทั้งการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาแล้ว เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษที่สามารถนำไปผลิตกระดาษที่มีคุณภาพสูงได้ การกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากเยื่อกระดาษประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ประมาณ 9 ขั้นตอน ได้แก่

2.1.1.1 การตีเยื่อหรือการตีกระจายเยื่อ (Pulping or Repulping)

เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมน้ำเยื่อ (Pulp stock) โดยมีการใช้เครื่องตีเยื่อ (Pulper) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-1 เพื่อให้เส้นใยกระจายตัวแยกออกจากกัน ทำให้อนุภาคของหมึกพิมพ์หลุดจากเส้นใย และสามารถควบคุมให้มีขนาดที่เหมาะสมในการถูกแยกออกจากเส้นใยในขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปการเติมสารเคมีในกระบวนการกำจัดหมึกออกส่วนมากจะทำในขั้นตอนนี้ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นต้น เพื่อช่วยในการกระจายเยื่อและฟอกเยื่อให้ขาว โดยปกติแล้วค่าความเข้มข้น (Consistency) ของเยื่อที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 4 - 6 % อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้ค่าความเข้มข้นของเยื่อที่สูงขึ้น คือประมาณ 12 % เป็นอย่างน้อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกหมึกให้สูงขึ้น นอกจากนี้การแช่กระดาษในน้ำเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะนำไปกำจัดหมึกออก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดหมึกออกให้สูงขึ้น เนื่องจากทำให้การตีกระจายเยื่อง่ายขึ้น

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายเยื่อ ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ อุณหภูมิที่ใช้ เวลาที่ใช้ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ ปฏิกริยาและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งการเลือกใช้ตัวแปรต่างๆ ก็ยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ใช้ กระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในขั้นตอนสุดท้ายเป็นสำคัญ



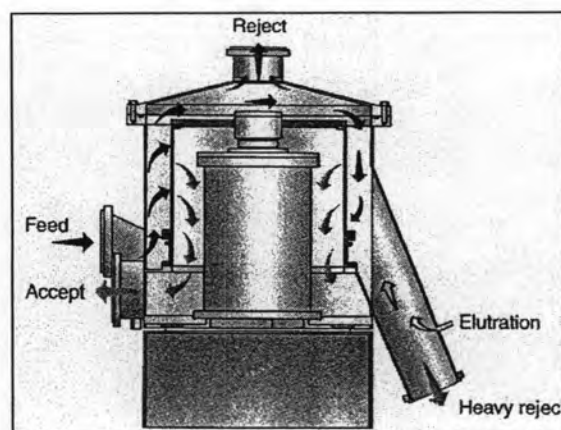
รูปที่ 2-1 เครื่องตีเยื่อ [1]

2.1.1.2 การล้างเยื่อ (Pre-washing)

เป็นขั้นตอนที่กำจัดน้ำออกจากเยื่อ หลังจากผ่านขั้นตอนการตีกระจายเยื่อแล้ว เพื่อให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อเพิ่มสูงขึ้นและเพื่อเวียนนำน้ำที่ขจัดออกมาแล้วกลับไปใช้ใหม่

2.1.1.3 การกรองเยื่อ (Screening)

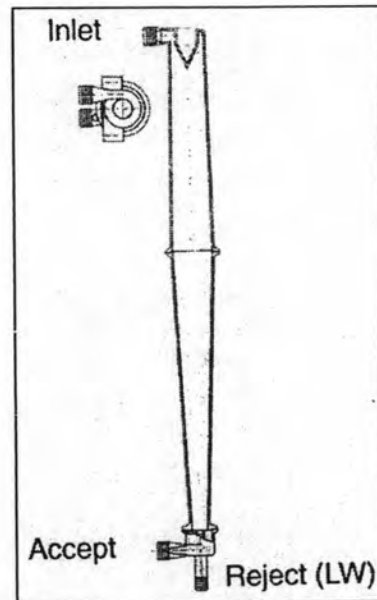
เป็นการใช้สกรีนทั้งแบบหยาบและละเอียด (รูปที่ 2-2) ในการขจัดสิ่งแปลกปลอมขนาดใหญ่ เช่น ลวดเย็บกระดาษ คลิปหนีบกระดาษ รวมถึงสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ซึ่งอาจทำความเสียหายให้กับเครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2-2 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบสกรีน [1]

2.1.1.4 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning

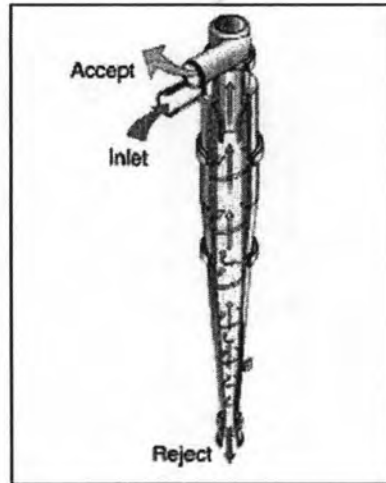
เป็นการใช้เครื่อง Centrifugal reverse cleaner รูปที่ 2-3 ในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการใช้สกรีนไม่สามารถกำจัดได้ โดยสิ่งแปลกปลอมนั้นจะมีค่าถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ต่ำกว่า 1 หรือมีความหนาแน่น (Density) น้อยกว่าเส้นใย



รูปที่ 2-3 เครื่องทำความสะอาดเยื่อแบบ Centrifugal reverse cleaner [1]

2.1.1.5 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward Cleaning

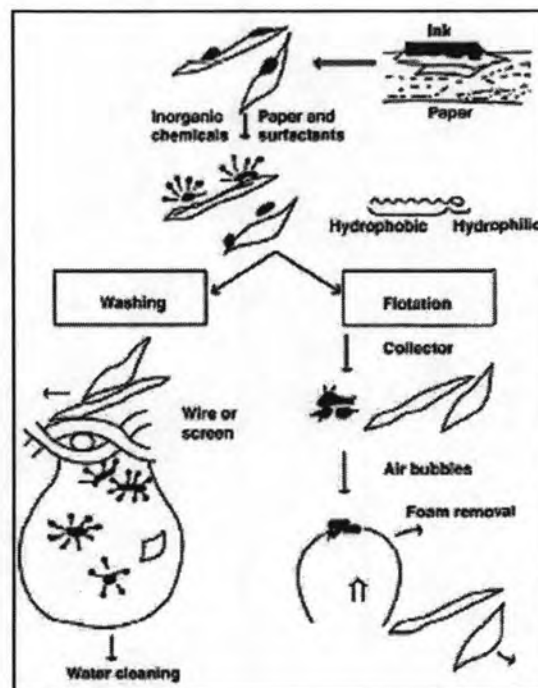
เป็นการใช้เครื่อง Centrifugal forward cleaner รูปที่ 2-4 ในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมขนาดเล็ก ซึ่งการใช้สกรีนไม่สามารถกำจัดได้ โดยสิ่งแปลกปลอมนั้นจะมีค่าถ่วงจำเพาะมากกว่า 1 หรือมีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย ซึ่งการใช้สกรีนไม่สามารถกำจัดได้



รูปที่ 2-4 เครื่องทำความสะอาดเยื่อ Centrifugal forward Cleaner [1]

2.1.1.6 การกำจัดหมึกพิมพ์ (Deinking)

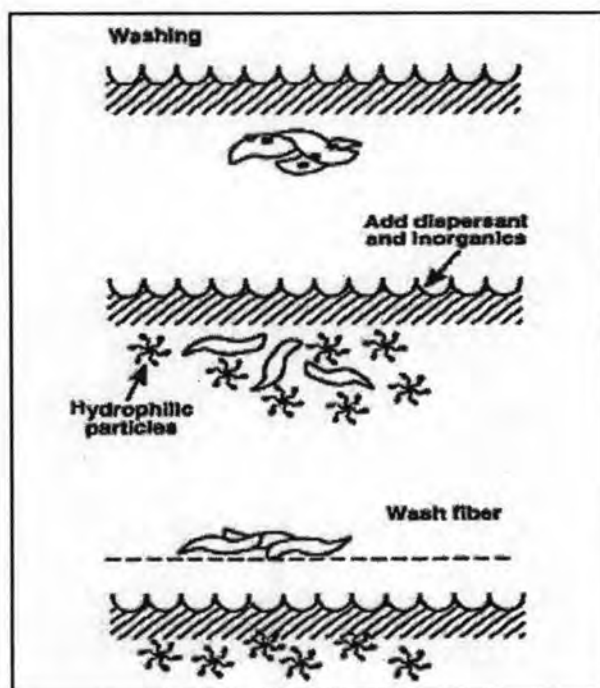
เป็นขั้นตอนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย (รูปที่ 2-5) เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพ มีค่าความขาวสว่างสูง ก่อนที่จะนำเยื่อกลับมาใช้ใหม่ โดยทั่วไปแล้วการกำจัดหมึกออกจากกระดาษจะแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การล้างและการลอยฟองอากาศ



รูปที่ 2-5 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้างและวิธีการลอยฟองอากาศ [1]

2.1.1.6.1 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง (Washing or wash deinking)

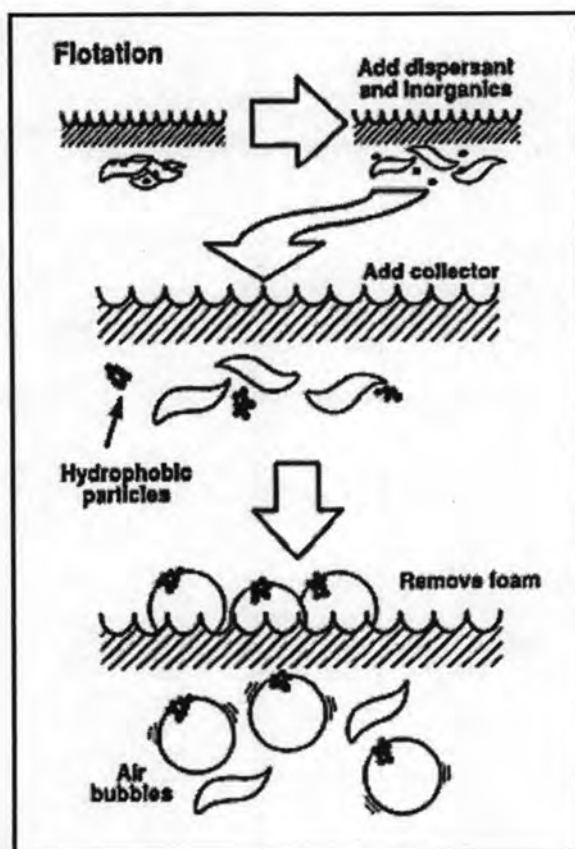
วิธีการนี้ใช้น้ำเป็นตัวพาอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกไป (รูปที่ 2-6) เหมาะสำหรับอนุภาคของหมึกพิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ถ้าอนุภาคยังมีขนาดเล็กลง ก็ยังสามารถถูกล้างออกได้มาก วิธีการล้างหมึกพิมพ์เป็นการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยโดยอาศัยแรงไฮดรอลิก (Hydraulic) แยกอนุภาคหมึกพิมพ์ที่แขวนลอยอยู่กับเส้นใยบนตะแกรงให้หลุดรอดไปกับน้ำ และทำให้หมึกพิมพ์อยู่ในสภาพที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยการใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จำพวกสารช่วยกระจาย (Dispersant) ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยด้วยวิธีนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการตีเยื่อหลังจากปรับภาวะความเป็นกรด-เบสให้เหมาะสม เพื่อช่วยกระจายหมึกพิมพ์และป้องกันไม่ให้หมึกพิมพ์กลับไปติดที่เส้นใยอีกครั้ง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการกำจัดหมึกพิมพ์ด้วยวิธีนี้คือ การใช้น้ำในปริมาณมากและผลผลิตที่ได้ของเยื่อต่ำ ตัวอย่างของหมึกพิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับการแยกหมึกออกด้วยวิธีนี้ได้แก่ หมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทฐานน้ำ และหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2-6 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง [2]

2.1.1.6.2. การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ (Flotation deinking)

การลอยฟองอากาศเป็นขั้นตอนการแยกหมึกพิมพ์ออกที่เหมาะสมสำหรับหมึกพิมพ์ที่มีอนุภาคประมาณ 10-100 ไมโครเมตร โดยในขั้นตอนของการตีเยื่อหลังจากที่ใส่สารเคมีที่ปรับภาวะความเป็นกรด-เบสของระบบแล้ว จะใส่สารลดแรงตึงผิวที่เรียกว่า Collector เพื่อเป็นการปรับระบบให้มีสภาพไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และทำให้อนุภาคของหมึกเกาะกลุ่มรวมเป็นอนุภาคใหญ่ (Agglomeration) หลังจากการตีเยื่อแล้วจะนำเอาเยื่อที่ได้มาเจือจางให้มีค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม คือประมาณ 0.8-1.0% ก่อนที่จะนำมาใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศที่เรียกว่า Flotation cell โดยเครื่องนี้จะผลิตฟองอากาศออกมา อนุภาคของหมึกที่มีขนาดใหญ่จะเกาะติดกับฟองอากาศลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่อง และจะถูกกำจัดหมึกออกไปในที่สุด (รูปที่ 2-7) การกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศนี้จะใช้น้ำในปริมาณที่น้อยกว่า และให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษที่ได้สูงกว่าการกำจัดหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการล้าง



รูปที่ 2-7 การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ [2]

2.1.1.7 การกระจายหมึก (Dispersion)

การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีนี้ไม่ได้เป็นการกำจัดหมึกออกอย่างแท้จริง แต่เป็นขั้นตอนที่ทำให้อนุภาคหมึกมีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ จนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าโดยที่ปริมาณของหมึกยังมีค่าเท่าเดิม ทำให้ค่าความขาวสว่างโดยรวมของเยื่อมีค่าลดลงแต่ไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของหมึกได้ด้วยตาเปล่า วิธีการกระจายหมึกนี้เหมาะกับหมึกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เช่น หมึกยูวี และหมึกโทนเนอร์ เป็นต้น

2.1.1.8 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

เยื่อที่ผ่านการกำจัดหมึกออกแล้ว ส่วนมากจะถูกนำไปผ่านการฟอกเยื่อเพื่อเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการฟอกขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อเป็นสำคัญ

2.1.1.9 การเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water recirculation)

เป็นขั้นตอนที่นำน้ำที่ผ่านการใช้งานในกระบวนการกำจัดหมึกออกมาปรับสมบัติต่างๆ เช่น ค่า pH เพื่อให้มีค่าที่เหมาะสม ก่อนจะเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการกำจัดหมึกออกอีกครั้ง

2.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออก (Deinking chemicals)

สารเคมีที่เลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่จะนำมารีไซเคิล ชนิดของหมึกพิมพ์ ระบบที่ใช้ในการพิมพ์ ขั้นตอนของการกำจัดหมึกออก และคุณภาพของเยื่อรีไซเคิลที่ต้องการ โดยส่วนของหมึกพิมพ์ที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับนั้น คือส่วนที่เป็นสารยึด (Binder) ไม่ใช่ส่วนที่เป็นสารสี (Pigment) [3]

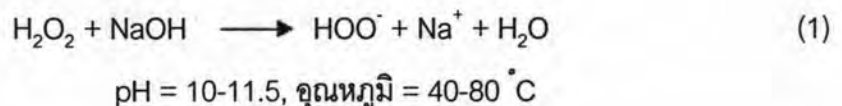
2.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

ใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อ หรือ การฟอกเยื่อ เพื่อปรับสภาพในขั้นตอนการกระจายเยื่อให้อยู่ในภาวะที่เป็นเบส โดยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 9.5-11 เพื่อทำให้เส้นใยรับน้ำ มีความยืดหยุ่นและพองตัว เส้นใยเกิดการเสียดสีกันทำให้หมึกหลุดออกมาจากเส้นใยได้ง่ายขึ้น รวมถึงป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกพิมพ์จนมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่เหมาะสมที่

จะกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง นอกจากนี้ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ยังไปช่วยเพิ่มปริมาณของ Perohydroxyl ion (OOH^-) ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยา (Active bleaching agent) ในการฟอกเยื่อแบบที่ใช้ Hydrogen peroxide เป็นสารฟอกเยื่อ (Bleaching agent) อย่างไรก็ตามการใส่ไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ลงไปในกระดาษที่ทำมาจากเยื่อไม้บดจะทำให้เยื่อสุดท้ายที่ได้จากการรีไซเคิลมีสีเหลืองและคล้ำ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Alkali Darkening" หรือความหมองคล้ำด้วยด่าง

2.2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2)

จะใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อหรือการฟอกเยื่อ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารฟอกเยื่อซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินทำให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการทำละลายอัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) ซึ่งเป็นสารยึดที่พบมากในหมึกออฟเซต รวมถึงทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิด OOH^- ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาในการฟอกเยื่อ ตามสมการที่ 1 [4]



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นสลายตัวได้ง่าย ในสถานะที่มีโลหะหนักจำพวกแมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น สถานะที่มีเอ็นไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งสถานะที่มีค่า pH และอุณหภูมิสูง การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถป้องกันได้โดยการใส่สารที่เรียกว่า "Stabilizing agent" เช่น ซีเลติง (Chelating agents) และโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) โดยที่สาร Stabilizing agent นี้จะไม่ได้ไปทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงสภาพ แต่จะไปทำให้สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการคงสภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.2.3 สารจับโลหะหนัก (Chelating agents หรือ Chelants)

จะใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก โดยจะจับโลหะหนักไว้ก่อนที่โลหะหนักจะไปเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ชนิดของสารจับโลหะหนักที่นิยมใช้กันในกระบวนการกำจัดหมึกออก ได้แก่ DTPA (Diethylenetriaminepentacetic acid) และ EDTA (Ethylenediaminetetracetic acid) โดย

DTPA ซึ่งมีโครงสร้าง 5 แขน จับโลหะหนักได้ดีและแข็งแกร่งกว่า EDTA ที่มีโครงสร้าง 4 แขน การจับโลหะหนักจะเรียงลำดับจากง่ายไปยากดังต่อไปนี้ : $Ni^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Al^{3+}$

2.2.4 โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate; Na_2SiO_3)

จะใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อหรือการฟอกเยื่อ เพื่อไปจับกับโลหะโดยเกิดเป็นคอลลอยด์กับโลหะ และยังช่วยในการกำจัดหมึกออกโดยทำให้หมึกกระจายตัวมากขึ้น รวมถึงป้องกันปัญหาอนุภาคของหมึกย้อนกลับมาเกาะติดที่เส้นใย โซเดียมซิลิเกตเป็นสารเคมีที่ใช้ได้ดีกับเยื่อไม้บดเพราะทำให้เกิดความเหลืองน้อย และยังทำหน้าที่เป็น pH buffer อีกด้วย

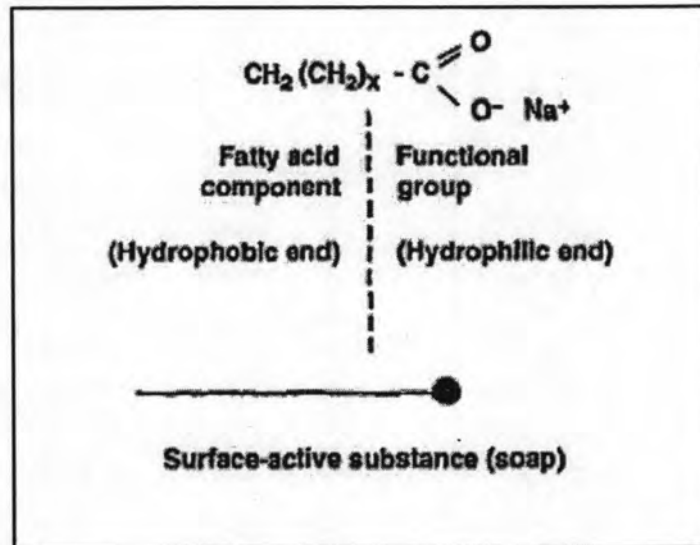
2.2.5 สารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerating chemicals)

จะใส่ในขั้นตอนของการตีเยื่อ การกรองเยื่อ หรือการทำความสะอาดเยื่อ โดยสารทำให้เกิดการเกาะกลุ่ม เป็นสารเคมีที่ใช้สำหรับหมึกพวกโทเนอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีโครงสร้างของรูปร่างเป็นแบบแผ่นแบน ซึ่งหมึกเหล่านี้ถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปที่จะนำมาขจัดออกโดยวิธีการล้างหรือการลอยฟองอากาศ ดังนั้นจึงพยายามทำให้ขนาดของหมึกใหญ่ขึ้นโดยการใส่สารเคมีนี้มาทำให้หมึกรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เพื่อถูกกำจัดออกโดยวิธีการกรองเยื่อและการทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning ต่อไป

2.2.6 สารลดแรงตึงผิว (Surfactants)

จะใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อ การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ ทั่วไปแล้วสารลดแรงตึงผิวเป็นคำรวมที่ใช้ครอบคลุมตั้งแต่ Dispersants, Collectors, Wetting agents, และ Displectors เป็นต้น สารลดแรงตึงผิว (รูปที่ 2-8) จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic part) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic part) โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จะประกอบด้วย C และ H ซึ่งเป็นได้ทั้งเส้นตรง หรือเป็นกิ่ง รวมถึงเป็นแบบอิมิตัวและแบบไม่อิมิตัว ในขณะที่ส่วนที่ชอบน้ำ ทำให้เกิดการแบ่งประเภทของสารลดแรงตึงผิวออกเป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีขั้ว (Non-ionic surfactants) และสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้ว (Ionic surfactants) โดยสารลดแรงตึงผิวแบบมีขั้ว สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น ประจุบวก (Cationic) ประจุลบ (Anionic) และ มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ด้วยกัน (Amphoteric) ในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษนั้นโดยทั่วไปแล้วนิยมใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไม่

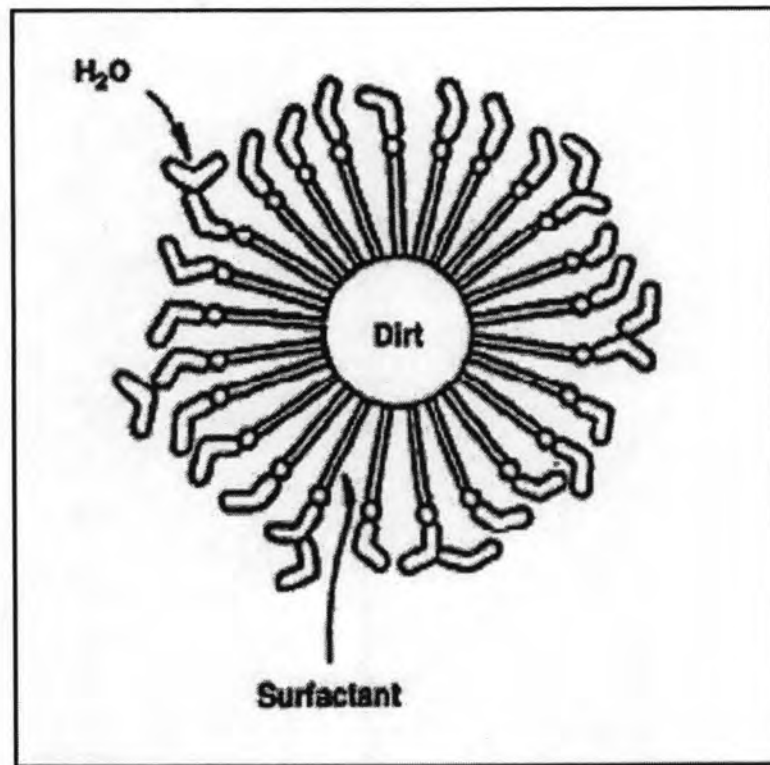
มีซั้วมากกว่า เนื่องจากสามารถทำงานได้ดี เป็นอิสระจากค่า pH และความกระด้างของน้ำ (Water hardness) ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้อยู่ที่ร้อยละ 0.2 - 2.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้และวิธีการกำจัดหมึกออกเป็นสำคัญ



รูปที่ 2-8 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [2]

2.2.7 Dispersants

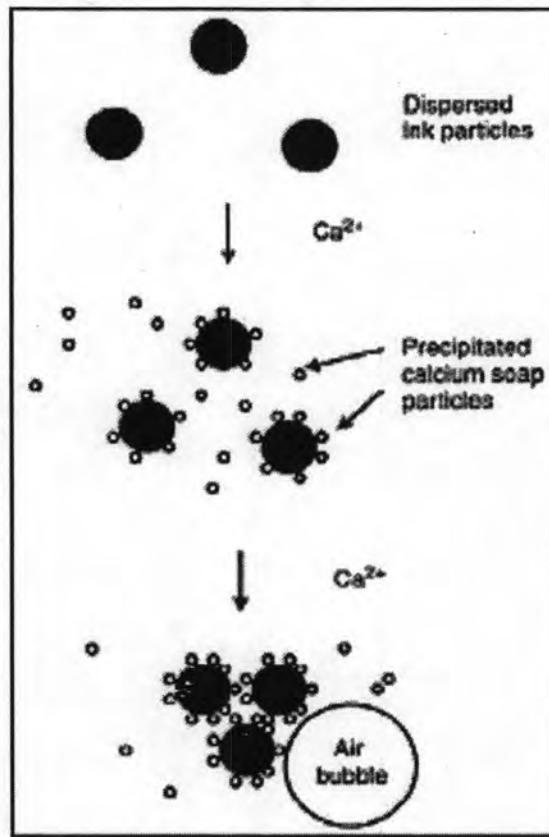
เป็นสารที่ใส่ในขั้นตอนการตีเยื่อหรือการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้าง เพื่อช่วยในการกำจัดหมึกด้วยวิธีการล้าง โดยไปช่วยทำให้หมึกกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ (ไม่มาเกาะกลุ่มกัน) และทำให้มีสมบัติชอบน้ำด้วยการฟอร์มตัวเป็น "Micelle" (รูปที่ 2-9) โดยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปแล้วส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะหันเข้าหาน้ำ ในขณะที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ จะหันเข้าหาหมึกหรือคราบสกปรก



รูปที่ 2-9 ลักษณะของ Micelle [4]

2.2.8 Collectors

เป็นสารเคมีที่ใส่ในขั้นตอนการตีเหื่อหรือการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ เพื่อช่วยในกระบวนการกำจัดหมึกออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ โดยอนุภาคของหมึกพิมพ์จะสัมผัสกับ Collector และเริ่มเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จากนั้นกลุ่มของอนุภาคหมึกจะไปสัมผัสกับฟองอากาศต่อ (รูปที่ 2-10) และถูกกำจัดหมึกออกไปตรงบริเวณผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ นอกจากนี้ Collector ยังช่วยปรับแรงตึงผิวของฟองอากาศให้มีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถพาอนุภาคของหมึกลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป



รูปที่ 2-10 การทำงานของ Collector [1]

2.2.9 Displectors

ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดหมึกออกแบบลูกผสม คือ สามารถใช้ได้กับการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการล้างและการลอยฟองอากาศ ซึ่งจะให้แรงยึดเกาะต่อฟองอากาศได้ดีในกรณีของการลอยฟองอากาศ และในขณะเดียวกันก็มีความชอบน้ำมากพอที่จะไม่ทำให้อนุภาคของหมึกกลับมาติดกับเส้นใยอีก รวมทั้งทนต่อสภาพน้ำกระด้างและไม่ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกรัน (Scaling) Displector เป็นสารสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นของเหลว และมักจะมิกลุ่ม Alkoxylated fatty acid derivatives อยู่ด้วย

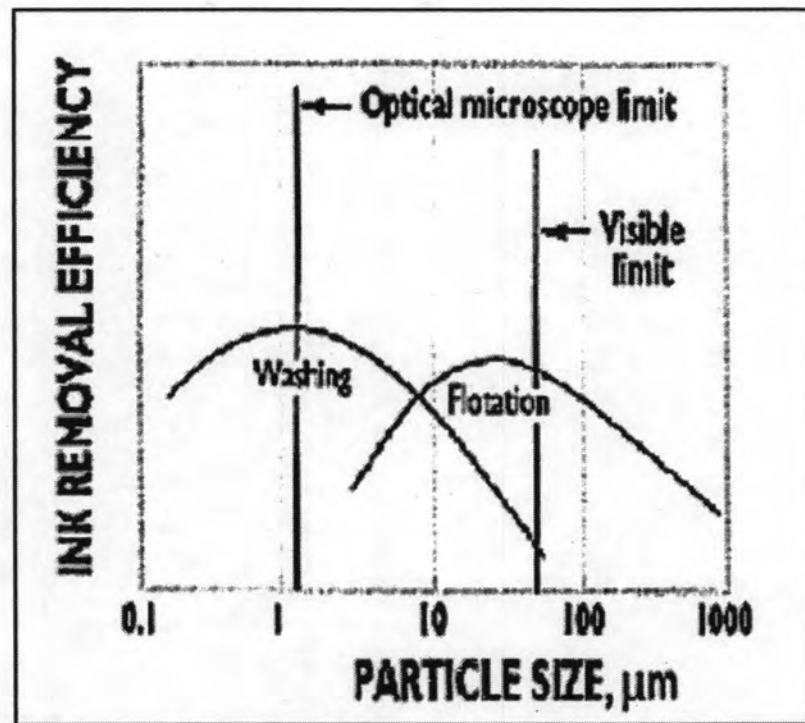
2.3. การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึก (Ink redeposition)

การย้อนกลับไปติดที่เส้นใยของหมึกมีผลทำให้คุณภาพของเยื่อที่ได้มีค่าลดลง กล่าวคือ มีค่าความขาวสว่างลดลงและปริมาณหมึกที่เหลืออยู่เพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ Ben และคณะ [5] ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรในขั้นตอนการตีเยื่อที่มีผลต่อการย้อนกลับของ

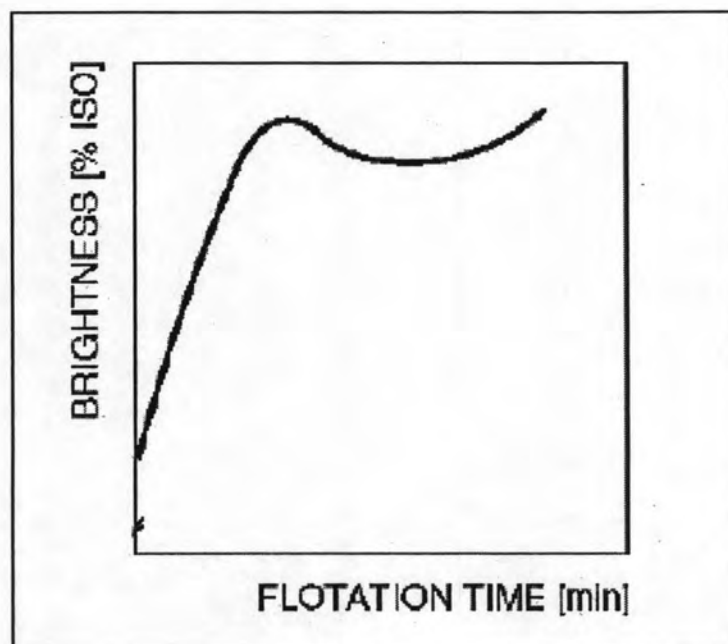
หมึกไปติดที่เส้นใย ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แก่ ความเข้มข้นของเยื่อ ความเร็วในการตีเยื่อ เวลาในการตีเยื่อ เวลาในการเก็บเยื่อ และพลังงานที่ใช้ในการตีเยื่อ (Specific energy) ในการทดลองนี้ ใช้เยื่อเชิงกลและหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี รวมถึงมีการใช้สารเคมีในขั้นตอนการตีเยื่อ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ DTPA และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยหลังจากการตีเยื่อ จะแบ่งเยื่อส่วนหนึ่งไปผ่านกระบวนการล้างแบบ Hyperwashing (การล้างเยื่อด้วยน้ำหลายๆ รอบ จนกระทั่งน้ำที่ออกมาจากเยื่อใส) เพื่อหาปริมาณหมึกที่ยังเหลือค้างอยู่ทั้งบริเวณผิวหน้าและในเส้นใย ซึ่งการล้างแบบ Hyperwashing จะสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการติดของอนุภาคหมึกและการย้อนกลับไปที่ติดที่เส้นใยของหมึกได้อย่างแท้จริง โดยหากปริมาณหมึกที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการล้างมีค่าสูง แสดงว่าเกิดการย้อนกลับไปที่ติดที่เส้นใยของหมึกสูงและจำนวนหมึกที่ติดอยู่มีมาก ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีและใช้เวลาในการตีเยื่อมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณหมึกที่เหลืออยู่มีค่าสูงขึ้น รวมทั้งถ้ามีการใช้ความเข้มข้นของเยื่อสูง ความเร็วในการตีเยื่อสูง จะยิ่งทำให้เกิดปัญหาการย้อนกลับของหมึกไปฝังตัวอยู่ในเส้นใยมากขึ้น กล่าวคือ ส่งผลทำให้อนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กลงมากจนกระทั่งมีโอกาสย้อนกลับไปที่ติดที่เส้นใย ซึ่งที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยจะมีหมึกเกาะอยู่น้อย โดยส่วนใหญ่หมึกมักจะฝังตัวอยู่ในบริเวณผิวที่ขรุขระของช่องว่างตรงกลางของเส้นใย(Lumen) มากกว่า

2.4 การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีลอยฟองอากาศ (Flotation deinking)

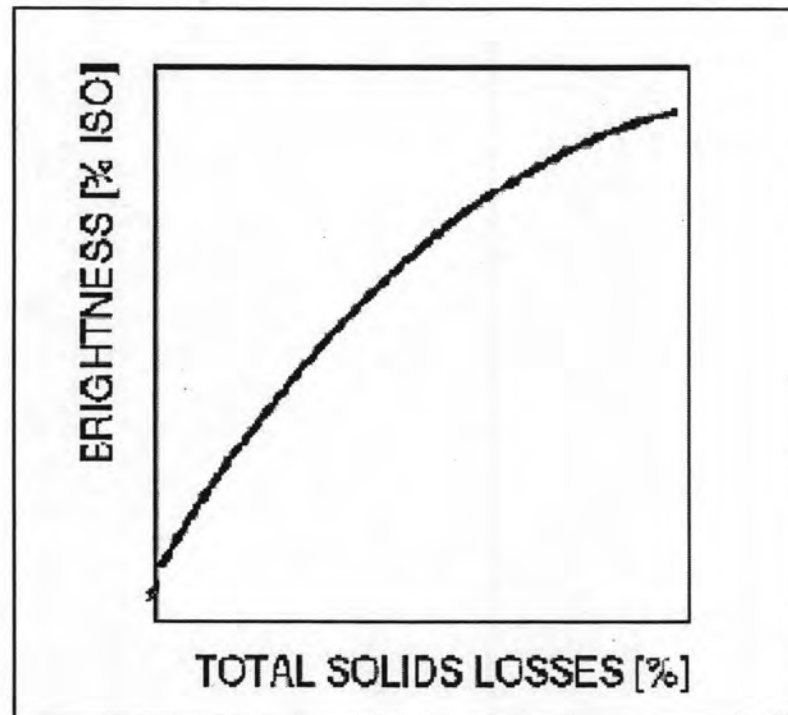
การกำจัดหมึกออกด้วยวิธีนี้ เกิดขึ้นโดยการทำให้อนุภาคของหมึกไปเกาะติดกับฟองอากาศและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดหมึกต่อไป โดยในกระบวนการจะใส่สารลดแรงตึงผิวเข้าไปเพื่อให้หมึกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ และมาเกาะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ขนาดอนุภาคของหมึกที่เหมาะสมในการลอยฟองอากาศ คือ 10-100 ไมโครเมตร (รูปที่ 2-11) ปริมาณผลผลิตและค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ได้หลังจากการกำจัดหมึกออก มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการลอยฟองอากาศ ดังปรากฏในรูปที่ 2-12 และ 2-13 กล่าวคือ ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการลอยฟองอากาศนานขึ้น หากแต่ปริมาณผลผลิตที่ได้จะมีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 2-11 อิทธิพลของขนาดอนุภาคหมึกที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดหมึกออก
ด้วยวิธีการล้างและวิธีลอยฟองอากาศ [6]



รูปที่ 2-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างของเยื่อและเวลาที่ใช้ในการลอยฟองอากาศ [6]



รูปที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างของเยื่อและปริมาณผลผลิตที่ได้ [6]

2.4.1 เคมีของการลอยฟองอากาศ (Flotation chemistry)

เครื่องลอยฟองอากาศ เป็นหัวใจของการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำการกำจัดหมึกออกอย่างแท้จริง การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ

1. การแยกอนุภาคของหมึกออกจากเส้นใย (เกิดขึ้นในขั้นตอนการตีเยื่อ)
2. การรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกโดยใช้สารเคมี (เกิดขึ้นในขั้นตอนการตีเยื่อหรือการลอยฟองอากาศ)
3. การที่กลุ่มก้อนของอนุภาคหมึกไปเกาะติดอยู่กับฟองอากาศ ก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศเพื่อถูกกำจัดต่อไป

การกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อ

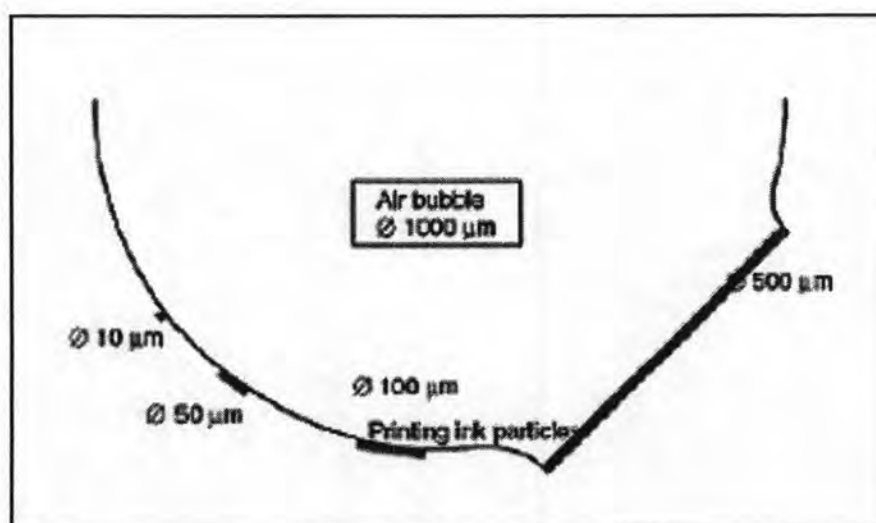
1. อนุภาคของหมึกต้องมีการชนกับฟองอากาศ
2. การชนกันจะต้องทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำที่อยู่ระหว่างผิวหน้าที่อยู่ระหว่างหมึกกับฟองอากาศหมดไป
3. อนุภาคของหมึกกับฟองอากาศจะต้องไม่ผลัดกัน

4. อนุภาคของหมึกจะต้องมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อที่จะได้ยึดติดกับ ฟองอากาศได้

5. การที่ฟองอากาศและอนุภาคของหมึกที่เกาะติดอยู่จะลอยสู่ผิวหน้า ของเครื่องลอยฟองอากาศได้นั้น ฟองอากาศต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะสามารถเอาชนะแรงที่ กระทำต่อมัน อันได้แก่ แรงดึงดูดของโลก (Gravity force) และแรงเหนียว (Viscous drag) ซึ่ง พยายามแยกอนุภาคของหมึกและฟองอากาศออกจากกัน

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดหมึกออกโดยวิธีลอยฟองอากาศ

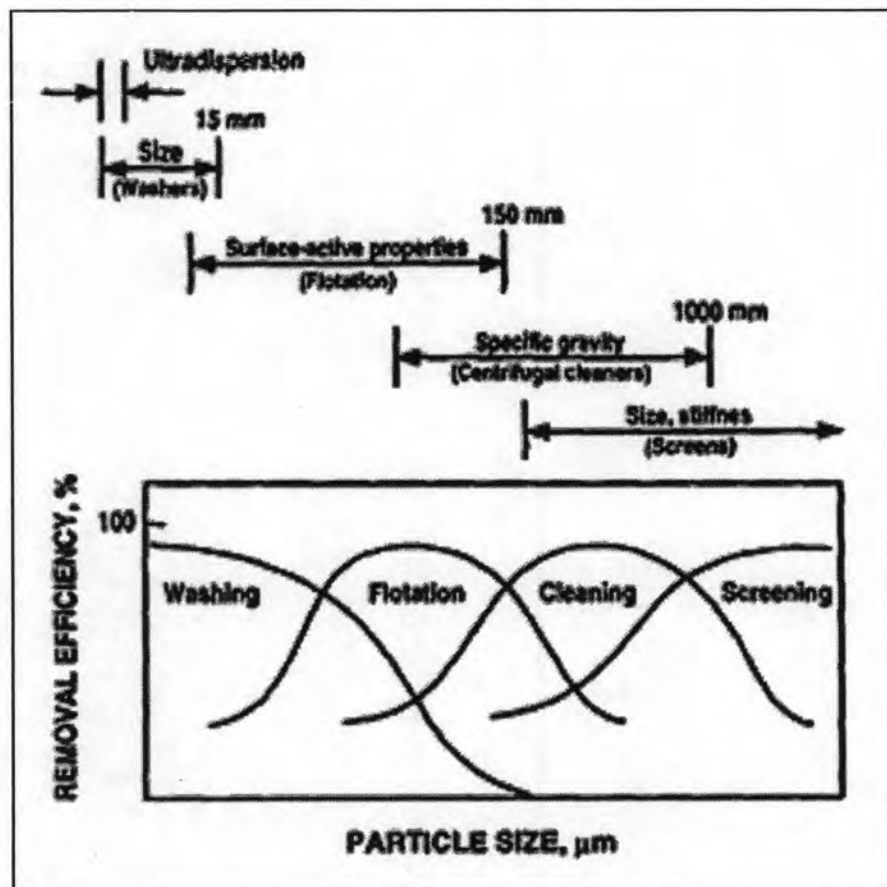
การยึดติดกันของฟองอากาศกับอนุภาคหมึกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณ ขนาด รวมทั้งรูปร่างของอนุภาคหมึกและฟองอากาศ ซึ่งทั้งหมดต้องมีความสัมพันธ์ กัน ถ้ามีจำนวนของอนุภาคหมึกและฟองอากาศมาก โอกาสที่จะเกิดการชนกันก็จะยิ่งมีมากขึ้น โดย ที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะสามารถยึดติดกับอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กได้ดี ในขณะที่ฟองอากาศ ขนาดใหญ่จะสามารถยึดติดกับอนุภาคของหมึกทั้งที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้ (รูปที่ 2-14) อย่างไรก็ตามในระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดใหญ่ จะทำให้มีพื้นที่ผิวในการชนกับอนุภาคหมึกน้อย กว่าในระบบที่ใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก ดังนั้นในการกำจัดหมึกออกถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพใน การกำจัดอนุภาคหมึกที่มีขนาดเล็กออกไปก็จะต้องใช้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก [6] เพื่อเพิ่มพื้นที่ ผิวในการชนกันระหว่างฟองอากาศและอนุภาคของหมึก



รูปที่ 2-14 การยึดติดระหว่างอนุภาคหมึกและฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. [6]

2.4.2.1 ความสำคัญของขนาดอนุภาค

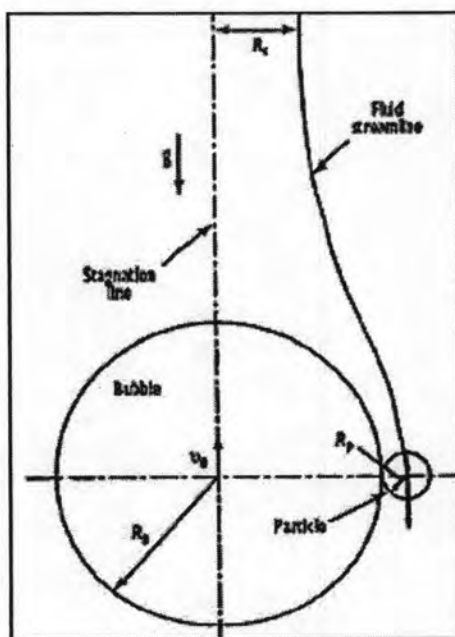
ขนาดของอนุภาคหมึกที่เหมาะสมกับการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศจะอยู่ในช่วงประมาณ 10-100 ไมโครเมตร (รูปที่ 2-15) ถ้าอนุภาคของหมึกมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ สภาพปั่นป่วน (Turbulence) ที่สูงภายในเครื่องลอยฟองอากาศจะไปทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาจากฟองอากาศ ก่อนที่จะลอยขึ้นไปสู่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศ แต่ถ้าอนุภาคของหมึกมีขนาดเล็กเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของฟองอากาศ ความน่าจะเป็นในการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึกและฟองอากาศจะลดน้อยลง เนื่องจากอนุภาคของหมึกมีแนวโน้มที่จะไหลไปตามแนว Streamlines (รูปที่ 2-16) ที่อยู่รอบฟองอากาศมากกว่าที่จะไปชนกับฟองอากาศโดยตรง [7]



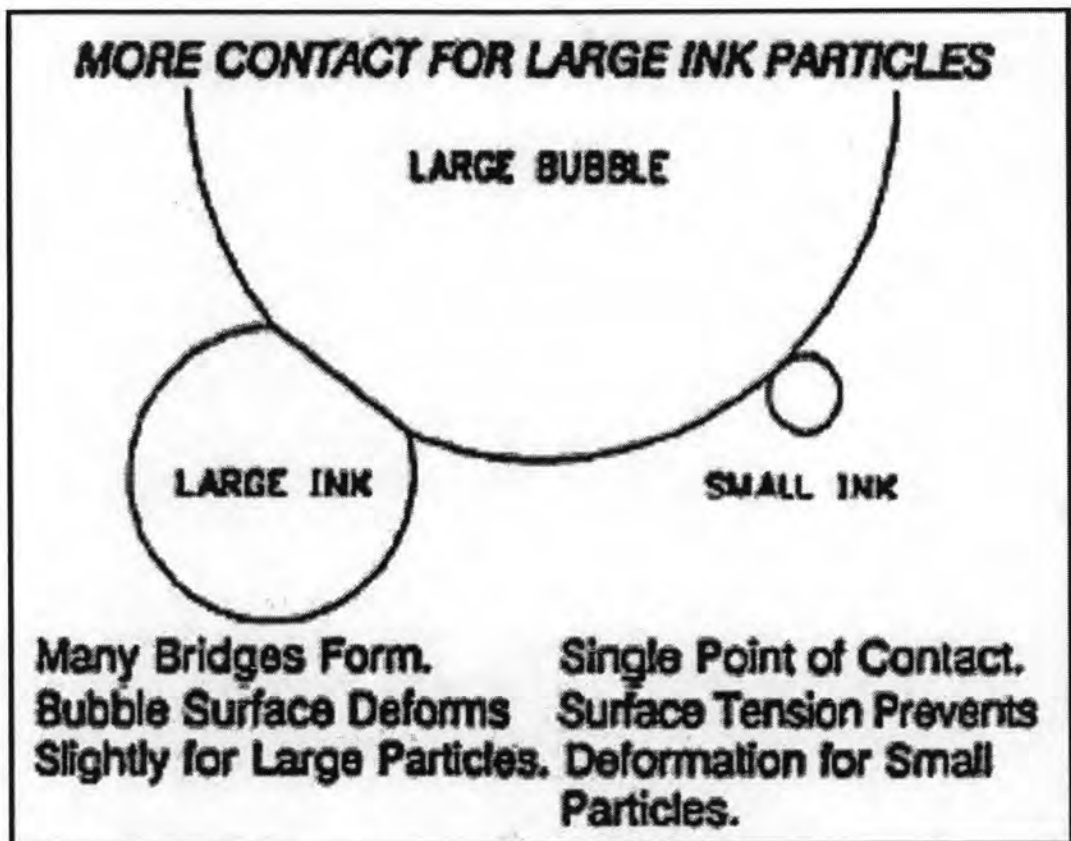
รูปที่ 2-15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคของหมึกพิมพ์และวิธีการกำจัดหมึกพิมพ์ [2]

2.4.2.2 ความสำคัญของขนาดของฟองอากาศ

การควบคุมขนาดของฟองอากาศให้เหมาะสม เป็นหัวใจของเครื่องลอยฟองอากาศ โดยฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.3 มม. จะมีแรงพยุงตัว (Bouyancy) มากพอที่จะสามารถดันตัวเองผ่านเครือข่ายเส้นใย (Fiber network) ขึ้นไปสู่ผิวหน้าเครื่องลอยฟองอากาศได้ รวมทั้งสามารถยึดติดกับอนุภาคหมีกที่มีขนาดใหญ่ได้ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอนุภาคของหมีกได้มาก (รูปที่ 2-17) ส่วนฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 มม. จะมีแนวโน้มที่เกาะติดกับเส้นใย ทำให้เส้นใยถูกกำจัดหมีกออกไปที่ผิวหน้าของเครื่องลอยฟองอากาศด้วย ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตที่ได้ลดลง นอกจากนี้ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กเกินไปจะถูกกักตัวด้วยเครือข่ายเส้นใยและมีโอกาสที่จะลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่อง Flotation cell ได้น้อย เนื่องจากแรงพยุงตัวน้อย อย่างไรก็ตามหากฟองอากาศนั้นสามารถผ่านเครือข่ายเส้นใยลอยขึ้นมาได้ ฟองอากาศนั้นก็พาเอาเส้นใยและเส้นใยสั้นๆ (Fines) ลอยขึ้นมาด้วย ตามทฤษฎีแล้วขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมคือ ขนาดของฟองอากาศ : ขนาดของอนุภาคหมีก เท่ากับ 5:1 [8]



รูปที่ 2-16 การไหลของอนุภาคของหมีกตามแนว Streamlines [7]



รูปที่ 2-17 อิทธิพลของขนาดฟองอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกพิมพ์ออก [9]

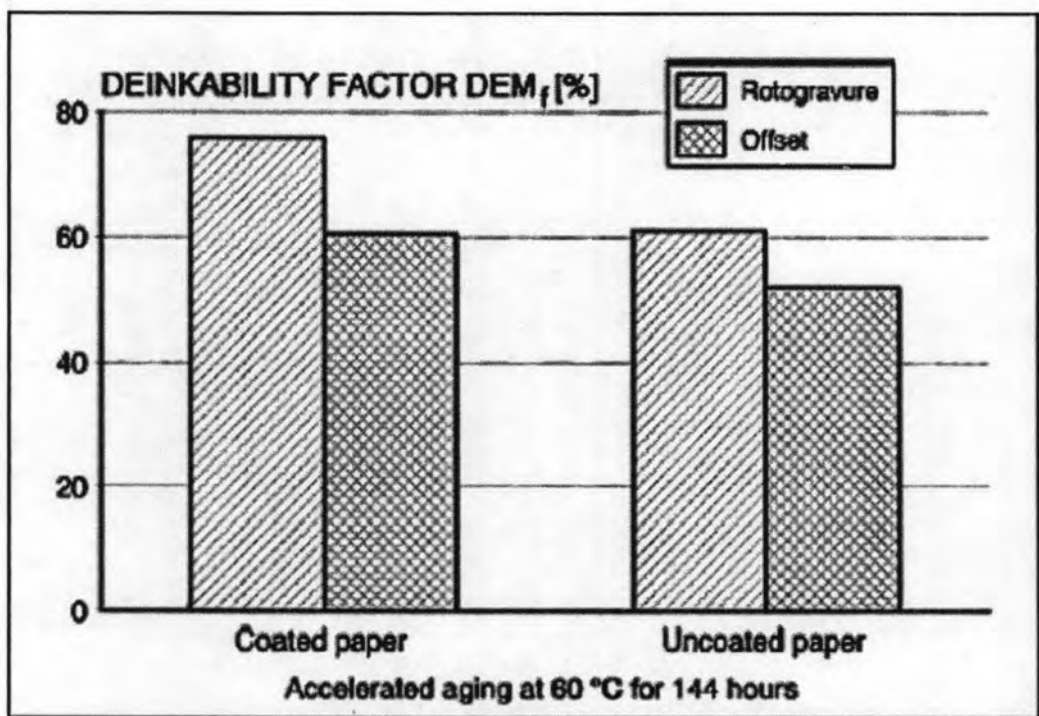
2.4.2.3 ความสำคัญของการผสม (Mixing)

การที่ฟองอากาศกับอนุภาคหมึกจะมาเกาะติดกันได้นั้นขึ้นอยู่กับ การผสมเป็นสำคัญ การผสมทำให้อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคของหมึกกับฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความเร็วและความแรงของการผสมที่ใช้ต้องเหมาะสม เพราะหากเร็วหรือแรงเกินไปจะทำให้ฟองอากาศกับอนุภาคของหมึกแยกจากกันได้ และจะทำให้ฟองอากาศแตกรวมไปถึงอนุภาคหมึกที่เกาะติดกันอยู่เกิดการกระจายตัวได้

2.5. ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก (Deinkability)

กระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น ชนิดของกระดาษ ชนิดของหมึกพิมพ์ และกระบวนการในการพิมพ์ ซึ่งกระดาษบางประเภทสามารถกำจัดหมึกออกได้ง่าย ในขณะที่บางประเภทจะมีปัญหามากในการกำจัดหมึกออก การกำจัดหมึกพิมพ์ออกมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ สมบัติของหมึกพิมพ์และสภาพ

ผิวหน้าของกระดาษ กล่าวคือ หมึกแต่ละชนิดมีการแห้งตัวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ความสามารถในการกำจัดหมึกออกจึงต่างกัน (ตารางที่ 2-1) นอกจากนี้การพิมพ์บนสภาพผิวหน้าของกระดาษที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดหมึกออกไม่เหมือนกัน อาทิเช่น หมึกที่พิมพ์บนกระดาษเคลือบผิวจะสามารถดึงออกได้ง่ายกว่าหมึกที่พิมพ์บนกระดาษที่ไม่มีการเคลือบผิว (รูปที่ 2-18)



รูปที่ 2-18 ความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกของกระดาษเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว [6]

ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก กลไกการแห้งตัว และกระบวนการในการพิมพ์ [10]

ระบบการพิมพ์	กลไกการแห้งตัว	ความสามารถในการกำจัดหมึกออก
- ออฟเซตสำหรับพิมพ์หนังสือพิมพ์ - เลตเตอร์เพรส - ออฟเซตป้อนแผ่น, ออฟเซตแห้งตัวด้วยความร้อน	การดูดซึม และออกซิเดชัน การดูดซึม และออกซิเดชัน การดูดซึม, การระเหย และออกซิเดชัน	กำจัดหมึกออกได้ดีถ้าไม่มีการเก็บกระดาษหลังจากการเก็บกระดาษ การหลุดออกของหมึกไม่ดีทำให้เกิดป็นหมึก และจุดหมึก
กราวัวร์	การระเหย	กำจัดหมึกออกดี แต่มีแนวโน้มที่เยื่อจะมีสี ซึ่งเกิดจากสีย้อม
เฟล็กโซกราฟี	การระเหย	สำหรับหมึกฐานน้ำ การกำจัดหมึกออกไม่ดี ถ้าค่า pH ในระบบเป็นเบส
เครื่องพิมพ์เลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร (UV และ IR)	แห้งตัวด้วยการฉายรังสี	หมึกโทนเนอร์หลุดออกยากและเกิดจุดหมึกมาก

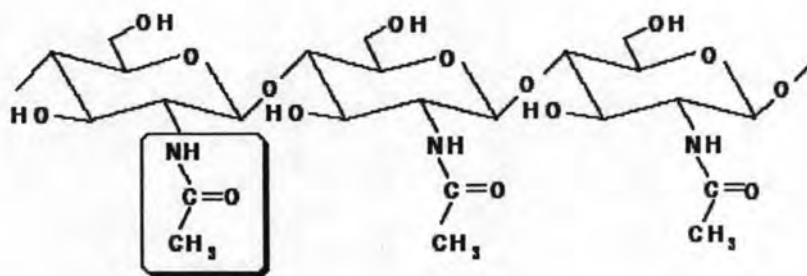
2.6 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan)

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พบมากในส่วนประกอบที่เป็นเปลือกแข็งของสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู หอย และปลาหมึก เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในเปลือกแข็งของสัตว์พวกแมลง และตามผนังเซลล์ของพืช เห็ด รา และสาหร่ายบางชนิด

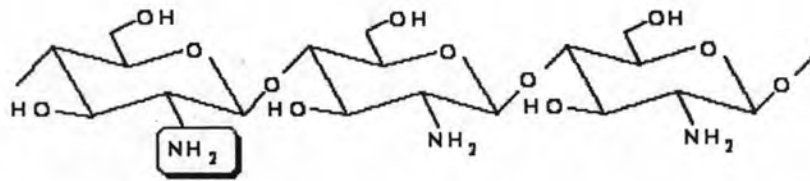
ไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetyl-glucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 มีหมู่ Acetylated amino (NH-CO-CH_3) แทนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปเป็น $(\text{C}_8\text{H}_{13}\text{NO}_5)_n$ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 [11] เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่าไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังแสดงในรูปที่ 2-19 ซึ่งทำให้ไคตินไม่ละลายในสารละลายต่างๆไปโดยง่าย การให้ประโยชน์จาก

ไคตินจึงไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้นคือการเตรียมเป็นไคโตซาน

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่อะเซทิลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่เอมิโนอิสระ ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองดังแสดงในรูป 2-19 โดยทั่วไปถ้าหมู่อะเซทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 เรียกว่า ไคโตซาน แต่ถ้าหมู่อะเซทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 เรียกว่า Fully deacetylated chitosan [12] ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และไคโตซานประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่อะเซทิลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีปริมาณไนโตรเจนไม่แน่นอน และอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89-8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซาน เห็นได้ว่าไคโตซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่เอมิโนและอาจพิจารณาได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (Cationic polymer) สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ของไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับสารจำพวกอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls โปรตีน และกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) รวมถึงไอออนโลหะ เนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดี ไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็นสารก่อกำจัดจับก้อน (Coagulant) ได้ดี นอกจากนั้นไคโตซานยังมีสมบัติการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก และสารละลายกรดอะซิติก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคโตซานมีสูงกว่าไคติน



รูปที่ 2-19 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [12]



รูปที่ 2-20 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [12]

2.6.1 กระบวนการเตรียมไคโตซาน

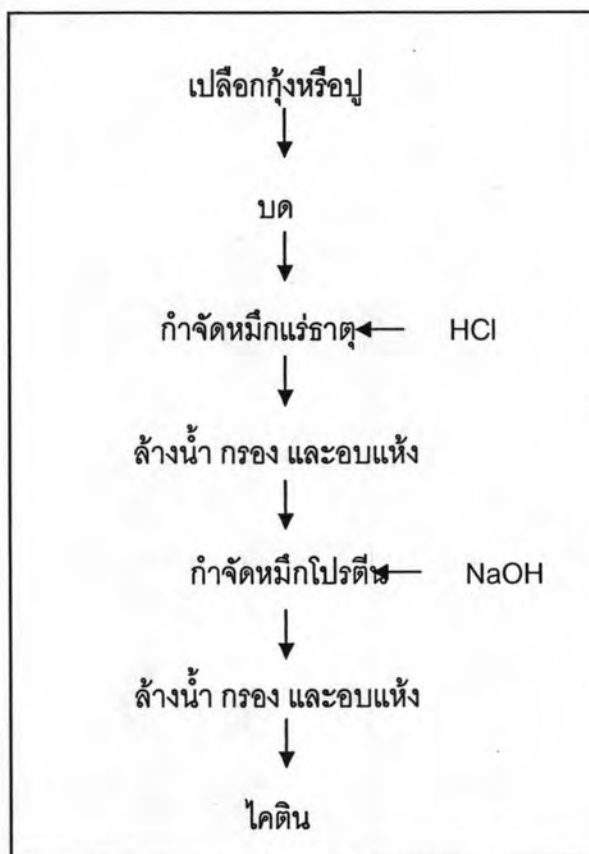
กระบวนการเตรียมไคโตซานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการเตรียมไคตินและขั้นตอนการเตรียมไคโตซาน

2.6.1.1 ขั้นตอนการเตรียมไคติน

การเตรียมไคตินขึ้นกับวัตถุดิบและสารประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น โดยส่วนใหญ่ผลิตจากเปลือกกุ้งและเปลือกปูที่เป็นของเหลือทิ้ง ซึ่งองค์ประกอบของวัตถุดิบเหล่านี้ ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนและแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้มีพวกกรงควัตถุต่างๆ โปรตีนสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดไนตริก การเตรียมไคตินแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ดังรูปที่ 2-21

2.6.1.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อแยกไคติน เริ่มจากการนำวัตถุดิบ ได้แก่ เปลือกกุ้ง กระจดองปู มาล้างน้ำ นำเปลือกที่ล้างสะอาดแล้วไปต้มและล้างด้วย Antioxidant solution แล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อสามารถเก็บได้ที่อุณหภูมิห้องและเพื่อสะดวกต่อการขนส่ง หลังจากนั้นอาจมีการลดขนาด โดยการบดละเอียด เป็นต้น



รูปที่ 2-21 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคติน [13]

2.6.1.1.2 การกำจัดแร่ธาตุ

ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ เป็นการใช้น้ำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเป็นตัวละลายแร่ธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดซัลฟูรัส (H_2SO_4) ในการกำจัดแร่ธาตุสำหรับกระบวนการเตรียมไคตินในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ ลดปฏิกิริยาการสูญเสียสภาพธรรมชาติของไคตินเนื่องจากกรดซัลฟูรัสเป็นกรดอ่อน ตลอดจนได้ผลพลอยได้เป็นสารเคมีอื่น เช่น แคลเซียมซัลไฟต์ ($CaSO_3$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งสามารถนำไปขายได้

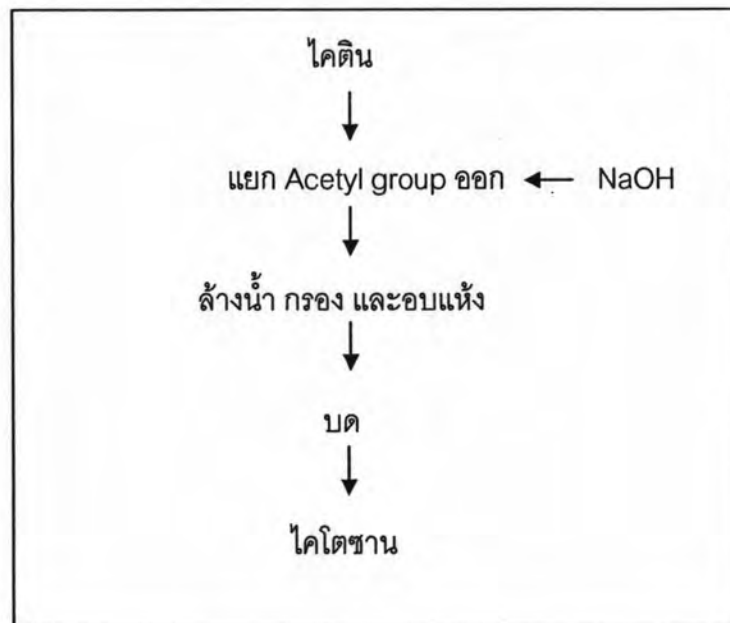
2.6.1.1.3 การกำจัดโปรตีน

ขั้นตอนในการกำจัดโปรตีนนั้น ส่วนมากนิยมใช้น้ำสารละลายที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโปรตีน คือ 11.5 นอกจากนี้ยังพบว่า การลดขนาดของวัตถุดิบมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดโปรตีน นอกจาก

การใช้สารละลายต่างในการกำจัดโปรตีนแล้ว ยังมีการใช้เอนไซม์ในการกำจัดโปรตีนด้วย ซึ่งจะทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานลดลง

2.6.1.2 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซาน

การเตรียมไคโตซานมีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียว คือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ในไคตินด้วยสารละลายต่างร้อน แสดงได้ดังรูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคโตซาน [13]

2.6.2 สมบัติของไคตินและไคโตซาน

2.6.2.1 การละลาย

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะกึ่งผลึก (Semi-crystalline) เนื่องจากมีโครงสร้างที่จับกันโดยพันธะไฮโดรเจน ด้วยสมบัติทางกายภาพนี้ทำให้ไคตินยากต่อการละลายในกรดเจือจางหรือด่างเจือจางและตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) อื่นๆ ภายใต้สภาวะปกติ ความยากในการละลายของไคตินในตัวทำละลายต่างๆ มีผลจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่

กันหนาแน่น มีพันธะเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน (หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่เอซีเทมิโด) [13]

ไคโตซานไม่ละลายในน้ำ ด่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มี pH น้อยกว่า 6 โดยการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2-2 กรดอะซีติกและกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายไคโตซานได้เช่นกันแต่ภายใต้การกวนสารที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น

2.6.2.2. ความหนืดของสารละลายไคโตซาน (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ค่า pH และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อความหนืดต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซีติกเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น

2.6.2.3 สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte properties)

ไคโตซานเป็นสายพอลิเมอร์ของ Anhydroglucosamine และเป็นสายพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยที่สภาวะเป็นกรดมีค่า pH เท่ากับ 6.5 ไคโตซานในสารละลายมีประจุเป็นบวก (Positive charge) เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ จึงมีความหนาแน่นของประจุบวกสูง ซึ่งในอุตสาหกรรมปัจจุบัน พวกรโกลอยด์ (Hydrocolloids) โมเลกุลสูง หรือพวกรโกลอยด์ (Polysaccharide) ส่วนใหญ่จะไม่มีประจุหรือมีประจุเป็นลบ (Polyanionic) แต่ไคโตซานเป็นหนึ่งในพวกรโกลอยด์ที่มีประจุบวก (Cationic polyelectrolyte) จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้ได้มากกว่า ประจุบวกของไคโตซานสามารถจับกับผิวของจุลินทรีย์ได้อย่างแน่นหนา ทำให้เกิดความเป็นกลาง ซึ่งการจับของไคโตซานกับเซลล์สิ่งมีชีวิตเป็นสมบัติที่สำคัญมากในการนำไคโตซานไปใช้ในด้านการแพทย์ [15]

ตารางที่ 2-2 การละลายของไคโตซานในสารละลายกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ [14]

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	1	5	10	50	>50
Formic acid	+	+	+	+	+
Acetic acid	+	+	+	+	
Lactic acid	+	+	+		
Citric acid	+	+	+		
Tartaric acid	+	+	+		
Malic acid	+	+	+		
Oxalic acid	+	+	+		
Hydrochloric acid	+				
Adipic acid	+				
Nitric acid	+				
Malonic acid	+				
Propionic acid	+				
Pyruvic acid	+				
Succinic acid	+				

หมายเหตุ : + หมายถึงละลายได้

2.6.2.4 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ความยาวของสายโซ่โมเลกุล มีความสำคัญในการพิจารณาสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ทั่วไปมีขนาดใหญ่แต่ไม่จำเป็นต้องมีความยาวเท่ากัน การนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล ซึ่งมีผลต่อกลไกการทำงาน และสมบัติทางเคมี เมื่อใช้ไคโตซานในการผลิตฟิล์ม การผลิตเมมเบรนและเส้นใยต่างๆ น้ำหนักโมเลกุลสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของไคตินคือ 1.03×10^6 ถึง 2.5×10^6 ดอลตัน และน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลไคติน (Carboxymethyl chitin) มีค่าประมาณ 1.33×10^6 ดอลตัน [12] โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย

โดยน้ำหนักของ Fully deacetylation chitosan ที่สกัดได้จากกุ้งมีค่าประมาณ $440,000 \pm 50,000$ กรัม/โมล และของปูมีค่าประมาณ 500,000-850,000 กรัม/โมล [16]

2.6.2.5 ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of Deacetylation)

การใช้ประโยชน์จากไคโตซานมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของไคโตซาน ดังนั้นจึงมีการวัดระดับอะเซทิลของไคโตซานเพื่อพิจารณาถึงการใช้งาน ซึ่งการวิเคราะห์มีหลายวิธี ได้แก่ Infrared spectroscopy (IR), Circular dichroism (CD), Elemental analysis (EA), Titration และ First derivation ultraviolet spectroscopy ลักษณะของ IR ยากในการวิเคราะห์ และผลที่ได้มีแนวโน้มที่คาดเคลื่อน การศึกษาแบบ CD มีข้อจำกัดในการละลายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์พวกที่ไม่ละลาย และพวก Highly acetylated polymeric compound ได้ วิธี Titration มีความยุ่งยาก และใช้เวลานาน ในขณะที่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย EA ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะถ้ามีการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ข้างเคียง แต่วิธีนี้ใช้ในการหาไคโตซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์รวมของ Glucosamine/N-acetylglucosamine ส่วนการตรวจสอบพวกกลุ่มอะมิโนอิสระโดยการใช้ Fluorescence มีการตอบสนองเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคซามีน (Glucosamine) แบบไม่เป็นเส้นตรง และการวัดตัวอย่างอาจมีการเจือจางขึ้นอยู่กับค่าที่ต้องการวัด [17]

2.6.3 การประยุกต์ใช้ไคตินและไคโตซาน (Application of chitin and chitosan)

การนำไคตินและไคโตซานไปใช้งานนั้นมีอย่างแพร่หลายตั้งแต่ในระดับอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และทางการแพทย์ เป็นต้น ดังปรากฏในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 การประยุกต์ใช้ไคตินและไคโตซาน [18]

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
การบำบัดน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - การกำจัดโลหะหนัก - ตัวสร้างตะกอน/ตกตะกอน: โพรตีน สี และกรดอะมิโน - ใช้เป็นตัวกรอง (Filtration)
อุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> - เคลือบหน้ากระดาษเพิ่มความแข็งแรง และทำให้เยื่อกระดาษรวมตัว และเกิดฟิล์มที่ด้านน้ำ - เคลือบเส้นใยผ้าเพื่อเพิ่มการต้านทานน้ำ
ด้านการแพทย์และเภสัช	<ul style="list-style-type: none"> - ผ้าพันแผล (Bandage) - ป้องกันเส้นเลือดอุดตัน ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอลในเลือด - ผลิตเมมเบรน (Membrane) - ใช้ด้านทันตกรรม/ยับยั้งการเกิดหินปูน - รักษาผิวหนังไหม้/ทำผิวหนังเทียม (Artificial skin) - ตกตะกอนยา
เครื่องสำอาง	<ul style="list-style-type: none"> - แป้งแต่งหน้า (Make-up powder) - ผลิตภัณฑ์เคลือบเงาเล็บ (Nail polish) - เพิ่มความชุ่มชื้น (Moisturizer) เป็นส่วนผสมโลชั่นอาบน้ำ (Bath lotion) - ยาสีฟัน - เพิ่มโฟม (Foam enhancing)
การเกษตร	<ul style="list-style-type: none"> - เคลือบเมล็ดพันธุ์พืช - ไฮโดรพอนิกส์หรือปุ๋ย (Hydroponic/Fertilizer) - Controlled agrochemical release
อาหาร	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวขจัดสีขี้อม ของแข็ง และกรด (Removal of dyes, solid, Acids) - เป็นสารกันเน่าเสีย (Preservatives) - เพิ่มความคงทนของสี (Color stabilization) - ส่วนผสมในอาหารสัตว์ (Animal feed additive)

ตารางที่ 2-3 การประยุกต์ใช้ไคตินและไคโตซาน (ต่อ)

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
เมมเบรน	<ul style="list-style-type: none"> - ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) - ควบคุมการซึมผ่าน (Permeability control) - แยกตัวทำละลาย (Solvent separation)

2.6.4 หลักการทำงานของไคโตซาน

ไคโตซานทำงานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน ตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น จนมีขนาดใหญ่พอที่จะตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนก็จะทำงานคล้ายกับตัวสร้างตะกอนคือจะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา โดยไคโตซานจะทำหน้าที่ได้ดีทั้งสองแบบ เนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน ลีัย้อม กรดไขมัน อีลลระ คอเลสเตอรอล (ในร่างกายน) เข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้ว จะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซาน ทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า พันธะเชิงซ้อนขึ้นมา และจากการทดลองพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซานจะสามารถจับกับโลหะหนักในน้ำได้ดีกว่าหมู่อะมิโนของไคติน [19]

2.7 หมึกพิมพ์โทนเนอร์ (Toner)

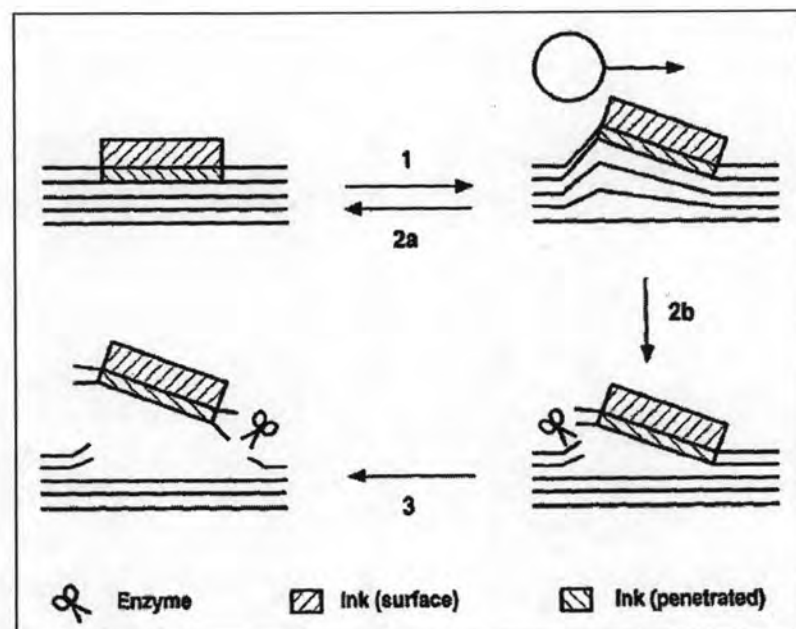
หมึกโทนเนอร์แห้ง หรือหมึกผงแห้ง ประกอบไปด้วยสารสี (Pigment) และเรซิน (Resin) ยึดติด นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น สารเติมแต่งควบคุมประจุ (Charge control additive) ซึ่งควบคุมระดับของประจุที่ก่อให้เกิดเป็นภาพ สารเติมแต่งเพื่อให้โทนเนอร์แห้งไหลได้ดีขึ้น สารเติมแต่งสมบัติแม่เหล็ก ซึ่ฝังหรือสารหล่อลื่น เพื่อปรับปรุงการปล่อยโทนเนอร์หรือหมึกผงจากลูกไม้อลูมิเนียม ส่วนของเรซินนั้นได้แก่ Styrene-acrylate copolymer และ Styrene-butadiene copolymer รวมถึง Polyester ซึ่งสารเรซินเหล่านี้มีสมบัติเป็นพวงเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยมีขนาดตั้งแต่ 8-20 ไมครอน และมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ 55-70 องศาเซลเซียส เรซินจะทำหน้าที่ยึดเกาะผงหมึกโทนเนอร์ให้ติดกับแผ่นกระดาษหลังจากที่กระดาษผ่านความร้อน หมึกโทนเนอร์จะมีรูปร่างเป็นแผ่นแบนและมี

การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ที่กว้างทำให้ถูกกำจัดได้ยากในกระบวนการกำจัดหมึกพิมพ์ออก [20]

2.8 การกำจัดหมึกออกจากเส้นใยของโตนเนอร์โดยการใช้เอนไซม์

ปัจจุบันการใช้เอนไซม์มาช่วยในการกำจัดหมึกออกเป็นที่นิยมกันมากขึ้น เนื่องจากเอนไซม์เป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการผลิตทางชีวภาพจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ยังทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมได้ เอนไซม์ที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดหมึกออกได้แก่ Cellulase, Hemicellulase และ Amylase เป็นต้น กลไกการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึกออกที่เป็นไปได้ คือ เมื่อเส้นใยถูกเปิดผิวหน้าด้วยแรงกลจากเครื่องตีเยื่อแล้ว เอนไซม์สามารถเข้าไปตัดสายเซลลูโลส (Cellulose) หรือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) รวมถึงการไปตัดสายไซของแป้งที่ใช้เคลือบผิวหน้ากระดาษ ทำให้อนุภาคหมึกสามารถหลุดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น [21]

ในปี 1994 Zeyer และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึกออก และได้เสนอแบบจำลองการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่อเส้นใยดังปรากฏในรูปที่ 2-23



รูปที่ 2-23 แบบจำลองการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ [21]

ในเบื้องต้นเส้นใยจะถูกปิดกั้นโดยชั้นของหมึกพิมพ์ ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ แต่เมื่อมีแรงเสียดทานที่เกิดมาจากการตีเยื่อหรือการผสมเยื่อทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ เพราะในระหว่างการตีเยื่อนั้นรูปแบบการยึดติดของหมึกบนเส้นใยบิดเบี้ยวไป จึงไปช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น เอนไซม์จึงสามารถตัดสายโซ่เซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ และเมื่อเส้นใยถูกตัด อนุภาคของหมึกที่อยู่บนผิวหน้าของเส้นใยก็สามารถหลุดออกมาได้และถูกกำจัดออกจากระบบต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดหมึกโทนเนอร์มีดังนี้คือ [22]

1. สมบัติทางกายภาพของโทนเนอร์ เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น เป็นต้น
2. สมบัติทางผิวหน้าของโทนเนอร์ เช่น สภาพการชอบหรือไม่ชอบน้ำ สภาพการเปียกผิว ประจุที่ผิวหน้า เป็นต้น
3. สมบัติของเยื่อและคุณภาพของน้ำ เช่น ค่า pH อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเยื่อ ชนิดของเยื่อ และความกระด้างของน้ำ เป็นต้น
4. ลักษณะของฟองอากาศ ได้แก่ ขนาด ความคงสภาพ เป็นต้น
5. ลักษณะของเครื่องลอยฟองอากาศ เช่น ขนาด ความแรงของแรงกลที่ใช้ ระบบการทำฟองอากาศในตัวเครื่อง เป็นต้น

2.9 เกณฑ์การประเมินคุณภาพของเยื่อกระดาษ

2.9.1 ค่าสภาพระบายได้ (Freeness)

เป็นค่าการทดสอบสมบัติในการให้น้ำไหลผ่านได้ของเยื่อ ค่าสภาพระบายได้ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือ Canadian standard freeness (มาตรฐาน TAPPI T-227) [23] ซึ่งเดิมมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการควบคุมการบดเยื่อไม้บดเท่านั้น โดยเยื่อที่มีขนาดเส้นใยสั้นจะให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำกว่าเยื่อที่มีขนาดเส้นใยยาวในปริมาณที่เท่ากัน ผลของค่าสภาพระบายได้จะรายงานเป็นค่ามิลลิลิตร (ml)

2.9.2 การทำแผ่นทดสอบ (Handsheet)

ในการทดลองจะมีการนำน้ำเยื่อที่ได้ทั้งก่อนและหลังกำจัดหมึกออกไปทำเป็นแผ่นทดสอบตามมาตรฐาน ISO-5269/2 [24] โดยแผ่นทดสอบมีน้ำหนัก 60 กรัม/ตารางเมตร จากนั้นนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางกายภาพต่อไป

2.9.3 ค่าปริมาณผลผลิตที่ได้ (Yield)

เป็นปริมาณผลผลิตที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดหมึกออกแล้ว คำนวณได้จากปริมาณน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ และปริมาณน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดหมึกออกมาจากเครื่องลอยฟองอากาศ โดยใช้สมการที่ 2

$$\%Yield = \frac{feed - reject}{feed} \times 100 \quad (2)$$

โดย feed = น้ำหนักของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ใส่ในเครื่องลอยฟองอากาศ

reject = น้ำหนักของน้ำเยื่อที่ถูกกำจัดหมึกออกมาจากเครื่องลอยฟองอากาศ

2.9.4 ความขาวสว่าง (Brightness)

ความขาวสว่างในอุตสาหกรรมกระดาษ คือ การวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน (475 นาโนเมตร) [25] เปรียบเทียบกับแผ่นกระจายแสงที่ให้การสะท้อนแสงอย่างสมบูรณ์ (Perfect reflecting diffuser) ตามมาตรฐาน ISO 2469-1977 ความขาวสว่างเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับการกระเจิงแสง (Light scattering) ของเยื่อกระดาษเท่านั้น ดังนั้นค่าความขาวสว่างจึงเป็นค่าที่มีประโยชน์เฉพาะในการระบุสมบัติการฟอกเยื่อ หรือสมบัติในการกำจัดหมึกออกเท่านั้น การวัดค่าความขาวสว่างยังขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะเชิงเรขาคณิตของระบบแสง (Optical geometry) เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดค่าความขาวสว่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ Technidyne, Elrepho, G.E., Photovolt เป็นต้น

ส่วนสาเหตุที่เลือกใช้ช่วงแสงสีน้ำเงินในการวัดค่าความขาวสว่างนั้น เป็นเพราะตามนุษย์และทางด้านจิตวิทยานั้นชอบน้ำเงินมากกว่าสีอื่น เมื่อสิ่งของเริ่มเก่ามักมีสีเหลืองปนในสีเดิม ดังนั้นสีน้ำเงินที่เป็นคู่สีตรงข้ามของสีเหลืองที่แสดงถึงความใหม่จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยทั่วไปแล้วกระดาษที่ไม่ได้ฟอก (Unbleached paper) จะมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาล และการ

ฟอกกระดาษก็คือการเพิ่มสีน้ำเงินให้กับกระดาษนั่นเอง อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บรักษากระดาษเป็นเวลานาน จะเกิดการเสื่อมสภาพของความขาวสว่างของเยื่อ (Brightness reversion) โดยอาจเกิดจากปัจจัยในตัวเยื่อเองและปัจจัยด้านกายภาพภายนอก เช่น ความชื้นและความร้อน เป็นต้น

2.9.5 ค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (Effective Residual Ink Concentration, ERIC)

เป็นการวัดค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ (ตามมาตรฐาน TAPPI T 567 pm-97) [26] โดยการใช้ทฤษฎี Kubelka-Munk [26] ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการวัดค่าการสะท้อนแสงในช่วงอินฟราเรด (IR) ที่ความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึกจะมากกว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆ

ในการวัดค่าการสะท้อนแสงของแผ่นทดสอบ จะทำการวัดค่า R_∞ และ R_0 โดย

R_∞ คือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษแผ่นที่ทดสอบเมื่อรองด้านหลังด้วยกระดาษชนิดเดียวกันหลาย ๆ แผ่น

R_0 คือ ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษแผ่นที่ทดสอบเมื่อรองด้านหลังด้วยวัสดุสีดำ

เมื่อได้ค่าการสะท้อนแสงของกระดาษมาแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงโดยใช้สมการที่ 3

$$s = \left[\frac{1000}{\left(w \left(\frac{1}{R_\infty - R_0} \right) \right)} \right] \ln \left[\frac{(1 - R_0 R_\infty)}{\left(1 - \frac{R_\infty}{R_0} \right)} \right] \quad (3)$$

โดย w คือน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (กรัม/ m^2)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงออกมา จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยใช้สมการที่ 4

$$k = s \left[\frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \right] \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณหมึกที่เหลืออยู่ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 5

$$ERIC = \left(\frac{k_{sheet}}{k_{ink}} \right) 10^6 \quad (5)$$

โดย k_{sheet} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเยื่อหรือกระดาษที่มีหมึกรวมอยู่ด้วย

k_{ink} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึก

2.9.6 ดรรชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile index)

คือ ค่าแรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึงโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ โดยใช้สมการที่ 6

$$Tensile\ index = \frac{Tensile\ strength}{Basis\ weight} \quad (6)$$

โดยค่า Tensile index มีหน่วยเป็น Nm/g

2.9.7 ดรรชนีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear index)

คือ การวัดแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวเริ่มต้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่นำมาใช้ทดสอบ โดยใช้สมการที่ 7

$$Tear\ index = \frac{Tear\ strength}{Basis\ weight} \quad (7)$$

โดยค่า Tear index มีหน่วยเป็น mN m²/g

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen และทีมงานวิจัย [28] ได้ศึกษาการกำจัดสาหร่ายทะเล (Algae) ออกจากน้ำด้วยวิธีการลอยฟองอากาศ จากการศึกษาพบว่า การใส่โคโคซานเข้าไปในระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Collector ได้ดีขึ้น เพราะทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของสาหร่ายทะเลมากขึ้น จึงถูกกำจัดออกด้วยวิธีการลอยฟองอากาศในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยปฏิริยาระหว่างประจุของ Collector และผิวหน้าของสาหร่ายทะเลเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการลอยฟองอากาศ และปัจจัยหลักที่สำคัญในการลอยฟองอากาศ ได้แก่ ความแข็งแรงของประจุ อัตราการไหลของฟองอากาศ และค่าความเป็นต่างของระบบ เป็นต้น

Geng และ Li [29] ได้ศึกษาถึงการใช้เอนไซม์ในการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ด้วยโทนเนอร์จากเครื่องถ่ายเอกสาร โดยเลือกใช้เอนไซม์ Endoglucanase 2 ชนิด คือ Cell B และ Cell E จากการทดลองพบว่าการใช้เอนไซม์ช่วยในการกำจัดหมึกพิมพ์ออก ส่งผลให้ปริมาณของหมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ในกระดาษ (Dirt count) กับพื้นที่หมึกพิมพ์ที่เหลืออยู่ในกระดาษ (Residual Ink area) มีค่าน้อยกว่าการที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ และให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าการที่ไม่ได้ใช้เอนไซม์ในระบบ

Zeyer และคณะ [21] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึกออกและได้เสนอข้อคิดเห็นเกี่ยวกับแบบจำลองการเข้าทำปฏิริยาของเอนไซม์ต่อเส้นใย ดังนี้คือ ในตอนแรกเส้นใยจะถูกปิดกั้นด้วยชั้นของหมึกพิมพ์ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าทำปฏิริยากับเส้นใยได้ แต่เมื่อนำเส้นใยไปผ่านกระบวนการตีเยื่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะไปทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปตัดพันธะของเส้นใยได้ เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการตีกระจายเยื่อนั้นทำให้รูปแบบการยึดติดของหมึกบนเส้นใยบิดเบี้ยวไป จึงไปช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น เอนไซม์สามารถตัดสายโซ่ของเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ และเมื่อเส้นใยถูกตัด อนุภาคของหมึกที่อยู่บนผิวหน้าของเส้นใยก็สามารถหลุดออกมาได้ง่าย และถูกกำจัดหมึกออกจากระบบต่อไป

Zollner และ Schroeder [30] ได้ศึกษากระบวนการกำจัดหมึกออกจากกระดาษที่ใช้ในสำนักงานซึ่งพิมพ์ด้วยระบบเลเซอร์และเครื่องถ่ายเอกสาร โดยเลือกใช้เอนไซม์ α -Amylase ในการศึกษา ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาที่เอนไซม์ใช้ทำปฏิริยามีผลต่อผลการกำจัดหมึกออกโดยวิธีการลอยฟองอากาศ กล่าวคือ เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิริยาของเอนไซม์นานขึ้น ทำให้หมึกหลุดออกจากเส้นใยได้ดีขึ้น และเมื่อมีการใช้ปริมาณ

เอนไซม์ที่มากขึ้น ทำให้การกำจัดหมึกออกมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเอนไซม์ α -Amylase ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเส้นใยโดยตรง แต่เอนไซม์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งซึ่งใช้เป็นสารกันซึมที่ผิวหน้าของกระดาษ ทำให้หมึกพิมพ์ที่ติดอยู่บนผิวหน้าของกระดาษหลุดออกได้ง่ายมากขึ้น

Prasad และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เอนไซม์ช่วยในการกำจัดหมึกออกจากกระดาษหนังสือพิมพ์ที่พิมพ์ด้วยระบบออฟเซต โดยใช้ส่วนผสมของเซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส ที่สภาวะ pH เท่ากับ 5.5 จากการทดลองพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เอนไซม์ เอนไซม์ที่เติมลงไปจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยเล็กๆ ได้ดีกว่า ส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยเล็กๆ นั้นลดน้อยลง เมื่อพื้นที่ผิวของเส้นใยทั้งระบบลดน้อยลงจึงทำให้มีค่าการระบายน้ำที่สูงขึ้น เพราะความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงนั่นเอง ส่วนสมบัติด้านความแข็งแรงของเยื่อที่ผลิตได้พบว่าการใช้เอนไซม์ทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเส้นใยขนาดสั้นซึ่งมีพื้นที่ผิวมากถูกเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาไปเกือบหมด และคงเหลือปริมาณของเส้นใยขนาดยาวอยู่มาก จึงทำให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความขาวสว่างนั้นพบว่าการใช้เอนไซม์มีผลทำให้ค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้มีการใช้เอนไซม์

Pranee [32] ได้ศึกษาโคโคซานในการเป็นสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ จากการศึกษพบว่า การใช้โคโคซานในปริมาณร้อยละ 0.25-1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้งสามารถเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษได้ดี โดยเฉพาะสภาวะการผลิตที่เป็นกรดและกลาง ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการใช้โคโคซานเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษนั้น ได้แก่ ปริมาณโคโคซานที่ใช้และสภาวะความเป็นกรด-เบสในการผลิตกระดาษ

Welt และ Dinus [33] ได้สรุปความเป็นไปได้ของการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการกำจัดหมึกออกไว้คร่าวๆ ดังนี้

1. เอนไซม์อาจไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยแตกออกจนหมึกที่ผิวหน้าของเส้นใยสามารถหลุดออกมาได้
2. เอนไซม์อาจเข้าไปทำให้ผิวหน้าของเส้นใยเปลี่ยนเป็นสารตัวอื่นที่มีความแข็งแรงของพันธะต่ำลงด้วยวิธีการ Depolymerizaion ส่งผลให้หมึกสามารถหลุดออกมาได้ง่ายโดยการตีเยื่อ
3. เอนไซม์อาจเข้าไปลดความแข็งแรงของพันธะโดยการเอาเส้นใยเล็กๆ ที่บริเวณผิวหน้าของกระดาษออก จึงทำให้อนุภาคของหมึกหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น

4. เอนไซม์เฮมิเซลลูเลสอาจเข้าไปทำให้ลิกนิน (Lignin) ที่ผิวหน้าของเส้นใยหลุดออกมาพร้อมกับอนุภาคของหมึก โดยการทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นโครงสร้างซับซ้อนระหว่างลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต (Lignin carbohydrate complex) จึงทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น

5. มีความเป็นไปได้ที่เอนไซม์จะเข้าไปลอกเส้นใยย่อยๆ (Fibrils) จากผิวหน้าของเส้นใย จนทำให้หมึกหลุดออกมาพร้อมกับเส้นใยย่อยเหล่านี้

6. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการตีเยื่ออาจเข้าไปทำลายสายโซ่ของเซลลูโลสให้ผิดรูปไปที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใย ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำงานได้ง่ายขึ้น ลักษณะเดียวกับข้อเสนอแนะของ Zeyer และคณะ