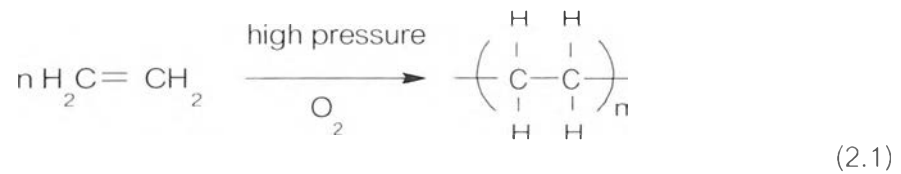


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ที่เตรียมโดยวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว (Addition polymerization) ของเอทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลอย่างง่าย ๆ คือ $-(CH_2)_n-$ ที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนทานต่อสารเคมีได้ดี ขึ้นรูปง่าย มีความเหนียว มีความยืดหยุ่น และมีให้เลือกหลายชนิดตามโครงสร้างทางเคมี ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน แสดงดังสมการต่อไปนี้



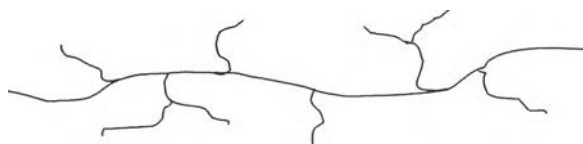
พอลิเอทิลีนแบ่งประเภทตามโครงสร้างของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดังนี้ [2-3]

(1) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นมากกว่า 0.94 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เตรียมได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชัน และสารประกอบออร์กาโนเมทัลลิก (Organometallic compound) ภายใต้อุณหภูมิและความดันต่ำ โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จะมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเส้น (Linear polymer) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ หรือเป็นสายเดี่ยวๆ คล้ายเส้นด้ายโดยไม่มีกิ่งแยกออกมาดังรูปที่ 2.1 โดยส่วนมากใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวด แฝงบรรจุยา ภาชนะบรรจุเครื่องสำอาง เครื่องใช้ในบ้านของเด็กเล่น รองเท้า เชือก แห อวน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง [2]

(2) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.910–0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การที่มีความหนาแน่นต่ำเนื่องจากมีกิ่งก้านสาขาในสายโซ่พอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.2 ทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่ไม่สามารถเข้ามาใกล้ชิดกันมากนัก แต่จะอยู่กันอย่างหลวมๆ จึงมีความเป็นผลึกต่ำกว่า และมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเตรียมได้จากการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัวเช่นกัน แต่จะใช้ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาประเภทที่ให้อนุมูลอิสระ (Free radical initiator) และใช้ความดันสูงกว่าการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ผลิตภัณฑ์ส่วนมากได้แก่ ถุงเย็น ถุงซิป ฟิล์มด้านการเกษตร เป็นฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ของใช้ในบ้าน ของเด็กเล่น สายน้ำเกลือ ขวดน้ำเกลือ ดอกไม้พลาสติก หลอดยาฉีด ฟันรองเท้า ฟิล์มห่อรูป (Shrink film) และวัสดุเคลือบผิว

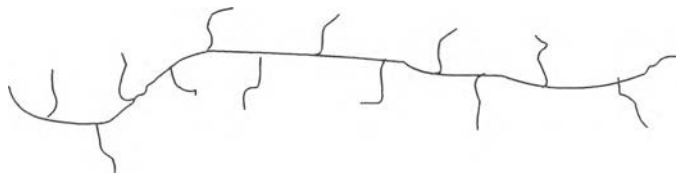


รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [2]

(3) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915–0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ได้จากการเตรียมพอลิเมอร์รวม (Copolymer) ระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับ 1-บิวทีน (1-butene) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler-Natta) มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวๆ และมีกิ่งสั้นๆ แยกออกจากสายโซ่หลักตลอดความยาวของโมเลกุล แต่จะไม่มีกิ่งก้านสาขากระจัดกระจาย จึงทำให้มีความหนาแน่นต่ำแต่มีคุณภาพสูง โดยโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นกิ่งสั้นๆ แยกออกจากสายโซ่หลักดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่จะนิยมกว่า ผลิตภัณฑ์ส่วนมากได้รับการแปรรูปเป็นฟิล์มถึง 65% เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมหีบห่อ เช่น ฟิล์มหด (Shrink film) ฟิล์มยืดรูป (Stretch film) ถุงบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักสูง ถุงบรรจุเสื้อผ้า ถุงบรรจุอาหารแช่แข็ง การแปรรูปนอกจากในรูปของฟิล์มแล้วก็ยังมีให้นำ LLDPE มาทำท่อน้ำ เคลือบสายไฟ และสายเคเบิล และของเด็กเล่น

(4) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Polyethylene, MDPE) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.926–0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สังเคราะห์

จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ มักใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำ ท่อส่งแก๊ส แก้ว อี ฐงพลาสติก ถังขยะ ข้อต่อท่อส่งแก๊ส ถังเก็บน้ำมัน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [2]

(5) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (*Very Low Density Polyethylene, VLDPE*) หรือเป็นที่รู้จักในอีกชื่อของ Ultra low density polyethylene (ULDPE) เป็นรูปแบบพิเศษของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยจะมีปริมาณโซ่กิ่งที่สั้นๆ จำนวนมาก ซึ่งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.86-0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเนื่องจากมีโซ่กิ่งสั้นๆ เป็นจำนวนมากทำให้มีความเป็นผลึกน้อย

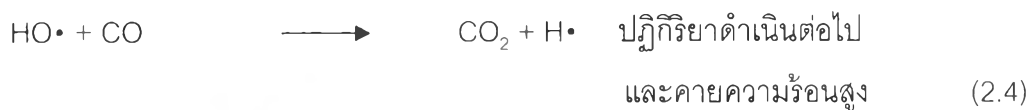
2.2 สารหน่วงไฟ (Flame retardant) [4]

สารหน่วงไฟ คือสารที่เติมลงไปในวัตถุหรือผลิตภัณฑ์เพื่อยับยั้งการเผาไหม้หรือลดอัตราการเผาไหม้ของวัตถุหรือผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยการเผาไหม้ของวัตถุแต่ละชนิดจะมีกระบวนการเผาไหม้ที่คล้ายกันจะแตกต่างกันเพียงสารที่ปลดปล่อยออกมา

2.2.1 การเผาไหม้

โดยปกติแล้วพอลิเมอร์จะสามารถลุกติดไฟแล้วเผาไหม้อย่างรวดเร็ว โดยในการเผาไหม้พอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน จะให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ ถ่าน (char) และสารไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ถ้าเป็นพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน และขนสัตว์ การเผาไหม้จะให้แก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ซึ่งมีพิษร้ายแรง และสำหรับพอลิเมอร์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ซึ่งทั้งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) และ ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ล้วนเป็นอันตรายต่อร่างกายทั้งสิ้น และยังสามารแพร่กระจายในอากาศได้อย่างรวดเร็ว โดยในกระบวนการที่เกิดการเผาไหม้จะเป็นดังนี้





H• และ HO• ที่เกิดขึ้นไม่เสถียร และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะดำเนินปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ ดังนั้นหากสามารถกำจัด H• และ HO• ได้ก็น่าจะส่งผลให้ปฏิกิริยาของกระบวนการเผาไหม้สิ้นสุดลง

2.2.2 ประเภทของสารหน่วงไฟ

สารหน่วงไฟโดยทั่วไป มีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อการใช้ในพอลิเมอร์และผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในโฟมพอลิเอทิลีน โดยสารหน่วงไฟที่ใช้ในโฟมจะสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

(1) สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบ โดยปกติสารหน่วงไฟประเภทที่มีฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบ จะประกอบด้วยธาตุหมู่ที่ 3, 5 และ 7 ในตารางธาตุ ได้แก่ โบรอน (B) อะลูมิเนียม (Al) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) พลวง (Sb) คลอรีน (Cl) และโบรมีน (Br) โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้ สารประกอบฮาโลเจนจะแตกสลายและเกิดฮาโลเจนเฮไลด์ โดยตัวไฮโดรเจนเฮไลด์นี้จะไปยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็นดังต่อไปนี้

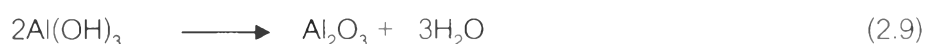


HX คือไฮโดรเจนเฮไลด์ ซึ่งไฮโดรเจนเฮไลด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับ H• และ HO• ดังนี้



จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นของฮาโลเจนจะมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงเป็นผลให้ปฏิกิริยาสิ้นสุดลง โดยฮาโลเจนที่นิยมใช้มีสี่ตัวด้วยกันคือ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ โบรมีนและคลอรีน แต่ที่นิยมใช้มากกว่าคือ โบรมีนซึ่งมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงสุด แต่ในกรณีที่มีความต้องการด้านความคงทนต่อแสง คลอรีนจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะสลายตัวได้เมื่อถูกแสง แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกค้างด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้จะให้ควันพิษที่เป็นอันตราย และเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ

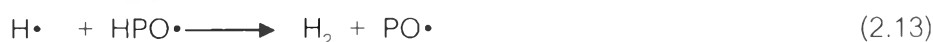
(2) สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์ สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้รับความนิยมเนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูกและไม่เป็นพิษ การใช้งานจะเป็นการเคลือบลงไปในสิ่งทอ หรือ ผสมในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนเพื่อใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟง่าย และช่วยป้องกันออกซิเจนไม่ให้เข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุ ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยทำให้เกิดถ่าน (char) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ ตัวอย่างของปฏิกิริยาของสารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์จะแสดงดังสมการที่ 2.9



สารหน่วงไฟที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ เช่น บอริก การทำงานของสารหน่วงไฟประเภทนี้จะดูดความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 130-200 และ 260-270 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นบอริกออกไซด์และจะไหลปกคลุมทั่วพื้นผิววัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยป้องกันเปลวไฟและการสัมผัสกับออกซิเจน ตัวอย่างของปฏิกิริยาของสารหน่วงไฟประเภทที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ จะแสดงดังสมการที่ 2.10



(3) สารหน่วงไฟที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟประเภทนี้มีสมบัติในการหน่วงไฟกับวัสดุที่มีปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน โดยมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ และธาตุ เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต และฟอสไฟต์ โดยสามารถหน่วงไฟได้ทั้งสถานะไอ (Vapor phase) และสถานะควบแน่น (Condensation phase) ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้จะเข้าทำปฏิกิริยาในสถานะไอแล้วแตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอิสระในรูปของ $\text{PO}\cdot$ แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ($\text{H}\cdot$ และ $\text{HO}\cdot$) ดังสมการข้างล่างนี้



ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ ฟอสเฟตเอสเทอร์ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลจะประกอบด้วยฟอสเฟตเป็นหลักแล้วจะเกิดพันธะกับหมู่อัลคิล หรือเอริล

สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันทั่วไปคือ ไอโซโพรพิลไตรเฟนิลฟอสเฟต (Isopropyl triphenyl phosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต (Alkyldiarylphosphate) ซึ่งมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟของพอลิไวนิลคลอไรด์

(4) สารหน่วงไฟที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไซยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิติน ยูเรีย ไชยานาไดเอไมด์ โดยสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนส์ (Intumescent) เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของฝ้า ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ

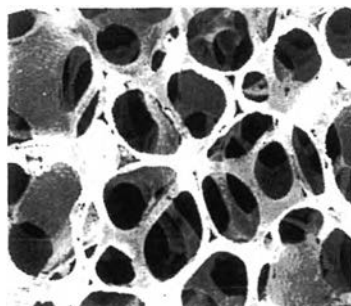
2.3 โฟม (Foam) [5]

โฟมพลาสติก หรือ เซลลูลาร์พลาสติก (Cellular plastics) หรือ โฟมพอลิเมอร์ (Polymeric foam) หมายถึงพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วยเฟส (Phase) ตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป คือ เฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (Solid polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (Blowing agent) และกระจายตัวในเฟสของพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (Void) เรียกว่าเซลล์ (Cell) สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็งอาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว หรือพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) นอกจากนี้อาจมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ ตัวเติม (Fillers) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก หรือโลหะ เป็นต้น หรือสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น โฟมพลาสติกอาจยืดหยุ่น (Flexible) หรือแข็ง (Rigid) ขึ้นกับอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ปริมาณผลึก (Degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (Degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ โฟมพลาสติกอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (Semi-flexible) หรือ กึ่งแข็ง (Semi-rigid) ก็ได้

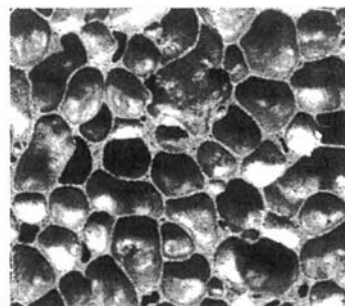
การแบ่งประเภทของโฟมอาจแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของโฟม ได้แก่ โฟมแข็ง (Rigid foam) โฟมกึ่งแข็ง (Semi-rigid foam) โฟมกึ่งยืดหยุ่น (Semi-flexible foam) และ โฟมยืดหยุ่น (flexible foam) บางกรณีอาจแบ่งตามโครงสร้างของเซลล์ (Cell structure) ได้แก่

(1) เซลล์เปิด (Open-cell type) ลักษณะเซลล์แบบนี้มีโครงสร้างที่เป็นโพรงแก๊สเล็กๆ กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก โดยไม่พบผนังหรือเยื่อบางๆ กั้นระหว่างโพรงแก๊สหรือเซลล์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4(1) ทำให้น้ำและอากาศสามารถไหลผ่านได้ โฟมที่มีส่วนประกอบของเซลล์ประเภทนี้ จะมีความยืดหยุ่นสูง เหมาะในการนำไปใช้ทำเบาะรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ที่นอน และวัสดุที่ใช้ดูดซับเสียง

(2) เซลล์ปิด (Close-cell type) ลักษณะเซลล์แบบนี้มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโพรงแก๊สเล็กๆ กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก โดยพบบนหรือเยื้องบางๆ กันระหว่างโพรงแก๊สหรือเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 2.4(2) ทำให้น้ำและอากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ แต่สามารถแพร่ผ่านได้ โฟมที่มีส่วนประกอบของเซลล์ปิดจะมีความเป็นฉนวนที่ดี



1) เซลล์เปิด [6]



2) เซลล์ปิด [7]

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเซลล์โฟม

2.3.1 กระบวนการเกิดโฟม (Foam Formation)

กระบวนการเกิดโฟมพื้นฐานประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble Formation or Initiation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว โดยวิธีการทำให้เกิดฟองแก๊สมีหลายวิธี เช่น

(1) การสลายตัวของสารฟูจจากการให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาทางเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

(2) การกวนเชิงกลในพอลิเมอร์เหลว หรือสารละลายพอลิเมอร์ หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์

(3) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในพอลิเมอร์ที่เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ ตัวอย่างของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) และเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) เป็นต้น

(4) การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (Hollow microspheres) ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งไมโครสเฟียร์อาจมีองค์ประกอบเป็นเม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติก (ต่างชนิดกับพอลิเมอร์ที่ใช้)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุคุณลักษณะของอนุภาคตัวเติม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (Surface tension)

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble Growth)

การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สผ่านเฟสของพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก โดยในระยะเริ่มแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์

ในขณะที่ฟองเกิดการขยายตัว สมบัติต่างๆ ของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองจะขึ้นกับสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟส ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู่ ความดันภายนอก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟู่ในเฟสของพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลที่มีผลต่อการขยายตัวของเซลล์ และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณเชื่อมต่อกันของเซลล์

ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรของฟอง (Bubble Stability)

หลักการพื้นฐานที่ทำให้เซลล์เกิดความเสถียรนั้น ได้แก่

- การลดอุณหภูมิของระบบให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการคงรูป วิธีการนี้นิยมใช้กับเทอร์โมพลาสติก
- การเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) จากปฏิกิริยาเคมี ความเสถียรของฟองด้วยวิธีการนี้มักเกิดกับเทอร์โมเซตพอลิเมอร์

2.3.2 สารฟู่ (Blowing agents)

โดยทั่วไปสารฟู่แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามกลไกหรือปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊สดังนี้

(1) สารฟู่เชิงกายภาพ (Physical blowing agents) สารฟู่ประเภทนี้ให้แก๊สออกมาโดยการเปลี่ยนสถานะทางกายภาพ (Physical state) ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจเป็นสารประกอบเคมีที่สามารถให้แก๊สโดยผ่านกระบวนการทางกายภาพ (เช่น การกลายเป็นไอ การดูดซับ) หรืออาจเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ (เช่น ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ และสารประกอบอีเทอร์ เป็นต้น)

(2) สารฟู่เชิงเคมี (Chemical blowing agents) สารฟู่ประเภทนี้จะให้แก๊สออกมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition) หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรืออันตรกิริยา (Interaction) ของสารประกอบเคมีตั้งแต่ 2 ชนิด โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมี เหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible) แต่มีบางกรณีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

สารฟู่สำหรับโฟมพอลิเอทิลีน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้สารฟู่เคมีหลายชนิดด้วยกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ชนิดและคุณสมบัติของสารฟูที่ใช้สำหรับพอลิเอทิลีน [8]

สารฟู	อุณหภูมิสลายตัว (องศาเซลเซียส)	ปริมาณแก๊สที่ให้ (มิลลิลิตรต่อกรัม)
Sodium bicarbonate/ NaHCO_3	100-140	125
N,N'-Dimethyl-N,N'- dinitrosoterephthalamide (DNDA) / $\text{C}_6\text{H}_4-(\text{CON}(\text{CH}_3)-\text{NO})_2$	118	200
4-4'-oxybisbenzenesulfonylhydrazide(OBSH)/ $\text{O}(\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2\text{NH}-\text{NH}_2)_2$	130-140	313
Azobisbutyronitrile (ABN)/ $(\text{CH}_3)_2(\text{CN})\text{CN}=\text{NC}(\text{CN})(\text{CH}_3)_2$	100	137
Azodicarbonamide(ADC)/ $\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{N}=\text{NCONH}_2$	190-240	270

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะสารฟูที่ใช้ในการทดลอง คือ สารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide) ซึ่งเป็นสารฟูเชิงเคมีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีน เนื่องจากให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สในปริมาณสูง สารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์เป็นของแข็งที่มีสีส้มจนถึงสีเหลืองอ่อนขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค มีความหนาแน่นประมาณ 1.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทั่วไปจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ใดๆ แต่จะละลายในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide) ที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิสลายตัวในอากาศประมาณ 190-240 องศาเซลเซียส

ปริมาณแก๊สที่ให้ออกมาประมาณ 270 มิลลิลิตร/กรัม และประกอบไปด้วย [9]

- แก๊สไนโตรเจน (N_2) ร้อยละ 65 โดยปริมาตร
- แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 32 โดยปริมาตร
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 3 โดยปริมาตร

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซจะมีความสูงมาก แต่สามารถทำให้อุณหภูมิตั้งกล่าวมีค่าต่ำลงได้ โดยวิธีที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมคือ การใช้สารเติมแต่ง (Additives) โดยสารเติมแต่งดังกล่าวเรียกว่าคิกเกอร์ (Kicker) ได้แก่ สารประกอบพอลิออกซอล สารประกอบยูเรีย สารประกอบอะมีน กรดอินทรีย์ เบสอินทรีย์ และสารประกอบโลหะ ผลของคิกเกอร์ต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ คือสารคิกเกอร์จะช่วยทำให้อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ลดลงเมื่อปริมาณการใช้สารคิกเกอร์เพิ่มมากขึ้น

นอกจากสารคิกเกอร์แล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่ออุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์ ได้แก่ ขนาดอนุภาคของสารประกอบอะโซไดคาร์โบนาไมด์และอัตราการให้ความร้อนขณะขึ้นรูปโฟม

2.3.3 สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents)

การเชื่อมขวางในกระบวนการผลิตโฟมพลาสติกสามารถทำได้โดยการใส่สารเชื่อมขวางหรือการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หรือการฉายรังสีพลังงานสูง ในกระบวนการขยายตัวของโฟมนั้นจำเป็นต้องมีการเชื่อมขวางพองที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อให้พองที่ขยายตัวเสถียร นอกจากนี้การเชื่อมขวางยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากความร้อนของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย โดยทั่วไปสารเชื่อมขวางที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีนได้แก่ สารประกอบไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide)

สารประกอบไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมขวางที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิเอทิลีนเนื่องจากอุณหภูมิสลายตัวมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนคือประมาณ 120 - 140 องศาเซลเซียส [9]

2.4 โฟมพอลิเอทิลีน (Polyethylene foam) [5, 9]

โฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีน เช่น มีความต้านทานต่อสารเคมีได้ดี ทำให้เหมาะสำหรับใช้บรรจุอาหาร โฟมชนิดนี้มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์ปิด และสามารถผลิตให้มีความนุ่มคล้ายพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำแบบยืดหยุ่น หรือมีความแข็งคล้ายโฟมพอลิสไตรีนแบบแข็งก็ได้ ตัวอย่างของโฟมพอลิเอทิลีนที่มีการใช้ทางอุตสาหกรรมมีดังนี้ โฟมพอลิเอทิลีนไม่มีการเชื่อมขวาง และชนิดเชื่อมขวาง

โดยความแตกต่างของโฟมพอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมขวางและไม่มีการเชื่อมขวางคือ โฟมที่ไม่มีการเชื่อมขวางโดยส่วนมากมักใช้สารฟลูออโรคาร์บอน Halogenated hydrocarbon gas โดยทำการผสมขณะพอลิเอทิลีนหลอมเหลว ที่ภาวะความดันสูงและควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นจะถูกอัดผ่านหัวได (Die) และสัมผัสกับความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดการขยายตัวของแก๊สก่อตัวเป็นเซลล์ ในขณะเดียวกันพอลิเอทิลีนเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวและแข็งตัว เกิดการกักแก๊สไว้ในแต่ละเซลล์ โดยระดับการขยายตัว ขนาดของเซลล์ และการจัดเรียงตัวของเซลล์สามารถควบคุมได้โดยการปรับอัตราการใช้หัวได อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป อุณหภูมิเย็นตัว อัตราส่วนระหว่างแก๊สกับของเหลว และการลดลงของความดัน ส่วนโฟมที่มีการเชื่อมขวางจะมีการเติมสารเชื่อมขวางลงไปเนื่องจากพอลิเอทิลีนมีจุดหลอมเหลวสูงและความหนืดของพอลิเมอร์เหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว ทำให้การผลิตโฟมพอลิเอทิลีนที่ใช้สารฟลูออโรคาร์บอนหรือสารฟลูออโรอินทรีย์เป็นองค์ประกอบทำได้ยาก เพราะจะเกิดการยุบตัวของโครงสร้างโฟมก่อนที่จะถูกทำให้เสถียร ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างโมเลกุลโฟมพอลิเอทิลีนก่อนทำให้เกิด

โครงสร้างโฟม ซึ่งการเชื่อมขวางจะทำให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ไหลลดลงอย่างช้าๆ เนื้อจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน และทำให้โฟมไม่เกิดการยุบตัวก่อนที่จะถูกทำให้เสถียร

การทำให้โฟมพอลิเอทิลีนเกิดการเชื่อมขวางมีอยู่ 2 วิธีคือ

- การใช้สารประกอบจำพวกเปอร์ออกไซด์ เช่น Dicumyl peroxide, Di-tertiary-butyl peroxide หรือสารประกอบเปอร์ออกไซด์อื่นๆ

- การฉายรังสี (Irradiation) โดยปกติจะใช้รังสีเอกซ์หรืออิเล็กตรอน

สมบัติที่แตกต่างกันของโฟมพอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางคือโฟมพอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมขวางจะมีขนาดเซลล์ที่เล็กและจัดตัวเป็นระเบียบมากกว่า นอกจากนี้โฟมที่มีการเชื่อมขวางจะมีความนุ่มกว่า

2.4.1 การใช้งาน

โฟมพอลิเอทิลีนมีการนำไปใช้ในงานหลายประเภท ซึ่งจะกล่าวพอสังเขปดังนี้

(1) *เครื่องรองรับน้ำหนักหรือกันกระแทก (Cushion Packaging)* โฟมที่นำมาใช้ในงานประเภทนี้ ควรมีสมบัติยืดหยุ่น (Flexible) ซึ่งจะให้สมบัติการดูดซับพลังงานที่ดัดขึ้นเป็นสมบัติสำคัญสำหรับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ควรทนแรงกระแทกได้ดี และสามารถบรรเทาแรงกระแทก (Shock) จากภายนอกได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น เบาะหรือที่นั่งในรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ พูกและหมอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้งานประเภทบรรจุภัณฑ์กันกระแทกเพื่อป้องกันสินค้าเสียหายระหว่างการขนส่ง

(2) *ฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation)* โฟมที่นำมาใช้งานประเภทนี้ควรเป็นโฟมที่มีความแข็งและมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ฉนวนกันความร้อนในตู้เย็น และใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น

(3) *ส่วนประกอบทางโครงสร้าง (Structural Component)* โฟมประเภทนี้นิยมนำมาใช้ทดแทนวัสดุจำพวกไม้ โลหะ หรือพลาสติก เนื่องจากมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียง และน้ำหนักเบา

(4) *การนำไปใช้งานด้านทะเล (Marine Application)* โฟมที่นำมาใช้งานประเภทนี้ต้องมีสมบัติทนต่อความชื้น โดยทั่วไปควรมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด มีความหนาแน่นต่ำ โดยที่สมบัติดังกล่าวจะทำให้โฟมลอยน้ำได้ ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเรือขนาดเล็กและขนาดใหญ่ หรือทำทุ่นลอยน้ำ เป็นต้น

(5) *การนำไปใช้งานประเภทอื่นๆ (Miscellaneous)* ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันผิวหน้าของสินค้า ฉนวนไฟฟ้า ปะเก็น (Gasketing) วัสดุกันรั่ว (Sealing) ส่วนประกอบในรถยนต์ ส่วนประกอบของถนน ส่วนประกอบของสะพาน เป็นต้น

2.5 ลิกนิน (Lignin)

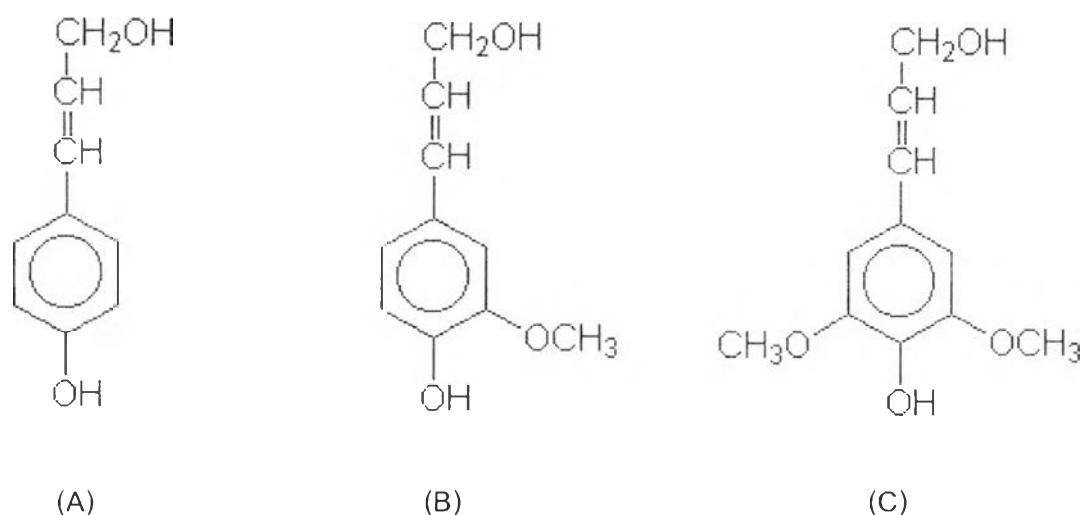
ลิกนินเป็นสารที่ทำหน้าที่เสมือนตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยเซลลูโลสในเนื้อไม้เพื่อให้เนื้อไม้แข็งแรง โดยลิกนินจะเชื่อมอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่แท้จริงของลิกนินปัจจุบันยังไม่มีใครทราบแน่นอน ทราบแต่เพียงเบื้องต้นว่าลิกนินมีโครงสร้างร่างแหแบบอสัณฐาน (Amorphous) และมีส่วนของวงแหวนอะโรมาติกอยู่ภายใน (Aromatic ring) คุณสมบัติโดยทั่วไปของลิกนินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น แหล่งที่มา ชนิดของเนื้อไม้ สภาพอากาศที่ไม้เติบโต และกรรมวิธีในการแยกลิกนินหรือสกัดลิกนินออกมา ส่วนชื่อเรียกของลิกนินจะเรียกตามวัตถุดิบที่มาของลิกนิน ยกตัวอย่างเช่น ลิกนินจากฟางข้าว (Wheat straw lignin) หรืออาจเรียกตามวิธีที่ใช้สกัดลิกนินออกมาเช่น ลิกนินที่ได้จากการแยกส่วนโดยวิธีทางเชิงกลเรียกว่า Milled wood lignin หรืออาจเรียกตามกรรมวิธีที่ผลิตเช่น ลิกนินที่ได้จากการสกัดจากน้ำของกระบวนการต้มเยื่อแบบอัลคาไลน์จะเรียกว่า อัลคาไลน์ลิกนิน (Alkaline lignin) เป็นต้น [9, 10]

ถึงอย่างไรก็ตามการศึกษาคุณสมบัติและการนำลิกนินมาใช้มีเป็นเวลานานแล้ว แต่เป็นการใช้ที่ไม่คุ้มค่าเนื่องจากต้นทุนในการผลิตเมื่อนำไปเทียบกับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดอื่นๆ แต่เนื่องจากปริมาณของน้ำมันมีการลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีค่าสูงขึ้นทำให้ลิกนินกลับมามีความสำคัญมากขึ้น

2.5.1 โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินธรรมชาติสามารถสกัดได้จากพืชชนิดต่างๆ ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายอนุพันธ์มารวมกันเป็นลักษณะโครงสร้างพอลิเมอร์แบบไม่มีผลึก โครงสร้างและคุณสมบัติโดยปกติของลิกนินนั้นจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดเท่านั้นและลิกนินจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือโครงสร้างเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะแวดล้อม ซึ่งทำให้การศึกษาโครงสร้างของลิกนินเป็นไปอย่างยากลำบาก ซึ่งในปัจจุบันทราบเพียงแค่โครงสร้างเบื้องต้นเท่านั้น โดยส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

Coumaryl alcohol (p-hydroxyphenyl), Coniferyl alcohol (Guaiacyl) และ Sinapyl alcohol (Syringyl) โดยส่วนประกอบดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยปฏิกิริยาเชื่อมขวางแบบ free radical กลายเป็นลิกนิน และจะมีการเรียงตัวกันเป็นร่างแหอย่างเป็นระเบียบ ตามระนาบของผนังเซลล์และเนื้อไม้ โดยลิกนินจะมีอัตราส่วนของมอนอเมอร์และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นพืชต้นเดียวกัน ดังนั้นโครงสร้างของลิกนินจึงแตกต่างกันออกไปโดยจะขึ้นกับแหล่งและส่วนของพืชที่ผลิต ดังนั้นจึงไม่สามารถเขียนโครงสร้างที่แน่นอนของลิกนินได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ (A) Coumaryl alcohol (p-hydroxyphenyl), (B) Coniferyl alcohol (Guaiacyl) และ (C) Sinapyl alcohol (Syringyl) [11]

2.5.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของลิกนิน

ลิกนินที่แยกได้จากการทดลอง และลิกนินในเชิงพาณิชย์เป็นของแข็งขนาดเล็กๆ โดยปกติเป็นผงสีน้ำตาล มีความหนาแน่น 1.3-1.4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และดัชนีการหักเห (Refractive index) 1.6 ไม่ละลายในน้ำและในสารละลายที่มีความเป็นกรด ลิกนินส่วนมากละลายในสารละลายเบส (Alkaline) บางชนิดละลายใน Oxygenated organic compound และในเอมีน (Amine) ลิกนินให้ความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion) ประมาณ 29.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [12]

2.5.3 แหล่งของลิกนิน

แหล่งของลิกนินมาจากต้นไม้และผลิตภัณฑ์จากไม้ เช่น เศษขี้เลื่อย เปลือกไม้จากโรงเลื่อยไม้ที่เหลือจากการทำการเกษตร เศษไม้จากกระบวนการผลิตกระดาษ น้ำเสียจากการผลิตกระดาษ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วผลิตภัณฑ์จากโรงงานกระดาษเป็นแหล่งที่พบลิกนินได้มาก ซึ่งโดยทั่วไปลิกนินที่อยู่ในเนื้อไม้จะไม่ละลายน้ำ แต่จะสามารถสกัดออกมาได้โดยวิธีทางกายภาพและทางเคมี โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างบ้างเล็กน้อย โดยปกติแล้วไม้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินอยู่น้อยกว่าไม้ที่มีอายุน้อย และปริมาณของลิกนินยังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศด้วย ยกตัวอย่างเช่น ไม้ที่อยู่ในสภาพอากาศร้อนจะมีปริมาณลิกนินแตกต่างจากไม้ที่อยู่ในอากาศหนาว

2.5.4 การแยกประเภทของลิกนิน

ลิกนินสามารถแยกประเภทออกได้หลายชนิด เช่น ชนิดของพืชที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ลักษณะของลิกนินที่ได้ วิธีการเตรียมลิกนิน ในการพิจารณาถ้าหากแบ่งลิกนินโดยใช้ชนิดของพืชที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น จะแบ่งได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ คือ

(1) ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน (*Softwood lignin*) ได้แก่ ลิกนินจากไม้จำพวกสนที่มีใบเขียวตลอดปีและมีลักษณะใบแคบ โดยไม้ชนิดนี้เมื่อนำไปทำเยื่อกระดาษจะได้เยื่อที่มีเส้นใยยาวซึ่งมีคุณสมบัติทำให้กระดาษมีความเหนียวและแข็งแรง

(2) ลิกนินจากไม้เนื้อแข็ง (*Hardwood lignin*) ได้แก่ ลิกนินจากไม้เบญจพรรณต่างๆ ที่ผลัดใบทุกปีและมีลักษณะใบกว้าง ไม้ชนิดนี้เมื่อนำไปผลิตเยื่อกระดาษประเภทเยื่อที่มีเส้นใยสั้นซึ่งมีคุณสมบัติทำให้กระดาษมีความทึบและหน้ากระดาษเรียบ

(3) ลิกนินจากหญ้าหรือพืชล้มลุก (*Grass or Annual plant*) เป็นไม้ยืนต้นซึ่งมีคุณภาพดี เช่น ปอ กก อ้อย หญ้าจรวงบ ต้นอ้อ และต้นแขม

การแยกประเภทตามวิธีการเตรียมทางเคมีจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

(1) ซัลไฟต์ลิกนิน (*Sulfite lignin*) หรือลิกโนซัลโฟเนต (*Lignosulfonate*) เป็นลิกนินที่สามารถผลิตขึ้นได้จากน้ำดำที่ได้จากกระบวนการทำเยื่อแบบซัลไฟต์

(2) อัลคาไลน์ลิกนิน (*Alkaline lignin*) เป็นลิกนินที่ผลิตจากน้ำดำที่เรียกว่า Soda black liquor และ Sulfate black liquor หรือ Kraft black liquor อัลคาไลน์ลิกนินโดยทั่วไปจะเป็นผงสีน้ำตาลและละลายในเบสและตัวทำละลายอินทรีย์

2.5.5 ประโยชน์ของลิกนิน

ในทางการค้า ลิกนินจะมีหลายชนิดซึ่งอยู่ในอยู่ในรูปแบบต่างๆ กัน แต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คล้ายๆ กัน เช่น ใช้ผสมกับดิน-ทราย ในอุตสาหกรรมการหล่อ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อการผลิต สีย้อมต่างๆ เม็ดสี ยาฆ่าวัชพืช และยาฆ่าแมลง ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในยางที่ต้องการให้มีน้ำหนักเบา ใช้ผลิตแทนนิน (Tannin) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการฟอกหนัง ใช้ในการกำจัดไขมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำ ใช้ในการกำจัดเกลือในน้ำที่ทำให้เกิดน้ำกระด้าง ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุนในแผ่นยิปซัม [13] นอกจากนี้ลิกนินยังใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีต่างๆ เช่น วานิลลิน (Vanillin) และสารประกอบฟีนอล (Phenol compound) [14] และในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำลิกนินมาใช้ประโยชน์อีกมากมาย เช่น มีการศึกษาการนำลิกนินมาใช้ในการลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al) ที่มีมากเกินไปในดินและน้ำ [15] นำมาใช้เป็นสารหน่วงไฟ (Flame retardant) และสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นต้น [16]

2.6 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ [17]

การผลิตเยื่อกระดาษเป็นการนำไม้มาย่อยสลาย แล้วแยกส่วนที่เป็นเส้นใยออกเพื่อผลิตเป็นกระดาษชนิดต่างๆ โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตส่วนมากมีส่วนผสมดังนี้

(1) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ได้แก่ สารประกอบพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 60-80 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ ในระหว่างการย่อยเยื่อ แป้งและน้ำตาลจะถูกละลายออกมาได้ สำหรับส่วนที่เป็นเซลลูโลสนั้นอาจถูกละลายออกมาได้บ้างในกระบวนการผลิต

(2) ลิกนิน (Lignin) มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-40 จะละลายออกมาจากเส้นใยในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย เช่น ละลายในสารละลายกรดซึ่งเป็นกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลไฟต์หรือละลายในด่างร้อนในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟตหรือกระบวนการคราฟท์

(3) สารประกอบอื่นๆ (Extraneous component) ในส่วนนี้มีอยู่ประมาณร้อยละ 2-10 ได้แก่ สารประกอบที่ละลายในน้ำได้เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ และสารอินทรีย์ เป็นต้น

กระบวนการผลิตเยื่อสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

(1) กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานกลเป็นหลัก โดยใช้เครื่องบดมาบดไม้ เส้นใยจากไม้จะหลุดออกมาและความร้อนจากการบดจะส่งผลให้ลิกนินอ่อนตัวและหลุดออกจากเนื้อไม้ แต่เยื่อไม้ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีคุณสมบัติที่ไม่ดีนักเนื่องจากเยื่อไม้ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งเจือปนเป็นจำนวนมาก ทำให้มีความทึบแสงสูง ซึ่งทำให้เยื่อไม้ชนิดนี้มีราคาถูก จึงนิยมใช้ทำกระดาษหนังสือพิมพ์ เป็นต้น

(2) กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi - Chemical Pulping) กระบวนการนี้จะมีการใช้กระบวนการทางเคมี และเชิงกลร่วมกัน ในส่วนของกระบวนการเชิงกลจะคล้ายกับกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล ส่วนในกระบวนการทางเคมีจะเริ่มขึ้นก่อนโดยเนื้อไม้ถูกสับเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นชิ้นไม้สับจะถูกต้มด้วยสารเคมีโดยสภาพกึ่งดิบกึ่งสุก แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อ คุณภาพของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อเชิงกลและเยื่อเคมี นิยมใช้ทำกระดาษลูกฟูก การผลิตเยื่อกระดาษแบบนี้มีหลายวิธีด้วยกัน แต่การใช้เคมีภัณฑ์ ซึ่งได้แก่

- กระบวนการกราวนด์วีวูดเคมี (Chemi-groundwood process) ใช้สำหรับไม้ใบกว้างโดยต้มท่อนไม้ด้วยน้ำยาซัลไฟต์ภายใต้ความดัน แล้วจึงบดไม้ด้วยเครื่องบดเยื่อ

- กระบวนการโซดาไฟ (Cold caustic soda) ต้มไม้ที่ตัดเป็นท่อนเล็กๆ ด้วยน้ำยาโซดาไฟ แล้วแยกเยื่อกระดาษออกโดยใช้เครื่องย่อย วิธีนี้ถูกกว่าการบดเยื่อกระดาษโดยตรงเพราะเยื่อกระดาษที่ต้มแล้วบดง่ายกว่า

- กระบวนการโซเดียมซัลไฟต์ (Neutral sulphite semichemical process) วิธีนี้ใช้น้ำยาโซเดียมซัลไฟต์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นน้ำยาต้ม

- กระบวนการซัลเฟต (Sulphate semichemical process หรือ Kraft semichemical process) น้ำยาต้มเยื่อกระดาษสำหรับวิธีนี้ใช้น้ำยาผสมของโซเดียมซัลไฟต์และโซดาไฟ กระบวนการนี้อาจนำไปใช้ดัดแปลงสำหรับโรงงานที่ทำเยื่อกระดาษเหนียวได้

(3) กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping) กระบวนการนี้จะให้เยื่อที่มีปริมาณลิกนินเจือปนอยู่น้อยมาก (ลิกนินจะถูกสกัดออกซึ่งจะอยู่รวมกับน้ำเสียที่ออกมา) จึงเหมาะสำหรับทำกระดาษคุณภาพดี และมีความเหนียว แต่ปริมาณเยื่อที่ได้จะมีปริมาณน้อยกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ตามสารเคมีที่ใช้ดังนี้

(a) กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite Process) กระบวนการนี้เหมาะสำหรับทำเยื่อจากพันธุ์ไม้เนื้อแข็งและพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า น้ำยาต้มเยื่อที่ใช้มีฤทธิ์เป็นกรด มักใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) และสารประกอบซัลไฟต์ เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อซัลไฟต์ มีสมบัติเป็นกรด เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ ใช้ได้กับไม้บางชนิดเท่านั้น แต่ข้อดีคือน้ำยาต้มเยื่อมีราคาถูก

(b) กระบวนการแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Process) กระบวนการนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 กระบวนการคือ

- กระบวนการโซดา (Soda process) เป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำละลายลิกนินในการต้มเยื่อ กระบวนการโซดาใช้สำหรับการทำเยื่อแบบง่าย ๆ เช่น ฟางข้าวและไม้เนื้อแข็งบางชนิดซึ่งบางครั้งอาจเติม Anthraquinone เพื่อลดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต เยื่อกระดาษที่ได้เมื่อนำไปฟอกขาวแล้วจะเหมาะสำหรับทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่ม

- กระบวนการแบบคราฟท์ (Kraft process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาต่อมาจากกระบวนการโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟต์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมี ความแข็งแรงกว่ากระบวนการแบบโซดา เยื่อที่ได้ชนิดไม่ฟอกสีใช้ทำถุงกระดาษ กระดาษห่อของ และกระดาษผิวกล่องชนิดฟอกขาว ใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือคุณภาพดี

เมื่อได้เยื่อกระดาษแล้ว ขั้นตอนต่อไปมีลำดับดังนี้

(1) การล้างเยื่อกระดาษให้สะอาด (Washing) และร่อนเอาเยื่อกระดาษหยาบออก (Screening) เยื่อกระดาษที่ได้จากกรรมวิธีต่างๆ ที่กล่าวมา ต้องนำเข้าเครื่องล้างเยื่อกระดาษเพื่อล้างน้ำยาเคมีออกให้หมด จะได้เยื่อกระดาษทั้งหยาบและละเอียดและมีสิ่งสกปรกปนอยู่ ฉะนั้นต้องนำเข้าเครื่องร่อนเพื่อร่อนเอาเยื่อกระดาษหยาบไปผ่านกรรมวิธีทำเยื่อกระดาษอีกครั้งหนึ่ง ส่วนเยื่อกระดาษละเอียดที่มีสิ่งสกปรกปนอยู่ จะนำเข้าสู่เครื่องทำความสะอาดเพื่อแยกเอาเยื่อ

กระดาษละเอียดไว้ และกำจัดสิ่งสกปรกออกให้หมด เพราะจะทำให้กระดาษมีตำหนิและคุณภาพไม่ดี

(2) ฟอกสีเยื่อกระดาษ (Bleaching) เยื่อกระดาษที่สะอาดและละเอียดจะนำไปฟอกให้ขาวด้วยน้ำยาคลอรีน เพื่อให้ได้กระดาษที่มีความมันวาวสูง ดังนั้นในการฟอกสีต้องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของเยื่อกระดาษ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอก และเวลา

(3) ผสมกับเยื่อกระดาษชนิดอื่นๆ (Mixing) ในกรณีที่ผลิตกระดาษจากชานอ้อย เนื่องจากเยื่อของชานอ้อยเป็นเยื่อเส้นใยสั้นและใยปานกลางจึงมีความแข็งแรงทนทานต่ำ ต้องผสมกับเยื่อที่มีเส้นใยยาว

(4) ตีหรือบดเยื่อกระดาษ (Beating) ในเครื่องตีเยื่อมีแผ่นเหล็กใบมีดเพื่อตีเยื่อให้ผสมกันและเส้นใยของตัวมีลักษณะอ่อนตัวลงไม่กระด้าง เมื่อนำไปผลิตกระดาษจะได้กระดาษที่มีความเหนียวและทนทาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของเยื่อกระดาษ จึงเป็นประโยชน์ในการย้อมสี ทำให้สีเกาะได้มากขึ้น

(5) เติมสารอื่นๆ (Paper additives) การเติมสารอื่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเยื่อกระดาษให้เหมาะสมในการนำเยื่อไปผลิตเป็นกระดาษ สารที่เติมลงไปได้แก่ ชันสน เพื่อทำให้กระดาษที่ผลิตออกมาไม่ดูดน้ำมากเกินไป สารส้ม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซึมและทำให้เยื่อกระดาษขาวขึ้น และแป้งมันสำปะหลัง เพื่อช่วยยึดเส้นใยให้ประสานกัน ทำให้กระดาษทนต่อการลบไม่ยุ่ยง่าย และช่วยทำให้เส้นใยสั้นๆ มาผสมผสานกันมากขึ้น

(6) เข้าเครื่องเดินแผ่น (Paper marching) เมื่อเยื่อกระดาษผ่านกระบวนการต่างๆ จนสามารถนำไปทำเป็นแผ่นกระดาษได้จึงส่งไปส่วนเดินแผ่น ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ส่วนตะแกรง (wire section) ส่วนที่ทำหน้าที่บีบอัด (press section) และส่วนที่ทำให้แห้ง (dryer section)

2.7 น้ำดำ (Black liquor) [17]

น้ำดำ คือ น้ำทิ้งจากกระบวนการทางเคมีของการต้มเยื่อกระดาษซึ่งมีสีดำ องค์ประกอบของน้ำดำจะเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเยื่อกระดาษ และกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ แต่โดยเฉลี่ยแล้วน้ำดำจากทุกกระบวนการทางเคมีในการต้มเยื่อจะมีสมบัติโดยทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.2 แต่ถ้าหากวิเคราะห์ถึงน้ำหนักแห้งของน้ำดำส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำดำ [18]

คุณสมบัติ หรือส่วนประกอบ	ปริมาณ
ความถ่วงจำเพาะ	1.097 ที่ 17.5 องศาเซลเซียส
สารอินทรีย์	
- ลิกนิน	12-20%
- อื่นๆ	3.55%
สารอนินทรีย์	
- โซเดียมไฮดรอกไซด์	2.44%
- โซเดียมคาร์บอเนต	2.76%
- อื่นๆ	2.77%

ในการผลิตเยื่อแบบกราฟท์ (แบบอัลคาไลน์) น้ำดำที่ได้ออกมาบางส่วนจะถูกส่งไปผสมกับน้ำยาที่ใช้ในการต้มเยื่อเพื่อให้ น้ำยาต้มเยื่อมีปริมาตรมากพอสำหรับการต้มเยื่อ น้ำดำส่วนที่เหลือจะถูกนำเข้ากระบวนการนำสารเคมีกลับคืน ซึ่งเริ่มต้นจากหน่วยทำระเหยเพื่อให้ น้ำดำมีความเข้มข้นมากขึ้น จากนั้นจึงป้อนน้ำดำเข้มข้นเข้าสู่หม้อน้ำนำสารกลับคืน สารอินทรีย์ในน้ำดำเข้มข้นจะติดไฟและให้พลังงานความร้อนออกมา สารเคมีหรือสารอนินทรีย์ที่เหลือจะละลายเป็นของเหลวไหลลงสู่ด้านล่างของหม้อน้ำนำสารกลับคืน ผสมกับของเหลวเจือจางในสารละลายกลายเป็นของเหลวสีเขียวย ซึ่งจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสิ่งเจือปนที่เป็นของแข็งออก แล้วส่งต่อไปยังหน่วยทำต่างเพื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาว กลายเป็นสารละลายกลับเข้าสู่การผลิตเยื่อต่อไป พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผา น้ำดำเข้มข้นในหม้อน้ำนำสารเคมีกลับคืน ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไอน้ำ และนำไปใช้ในหน่วยทำระเหย ต่อไป

ในปัจจุบันพบว่า มีหลายวิธีการที่สามารถแยก ลิกนินออกมาจากน้ำดำ โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้วิธีการละลาย ลิกนินแล้วกรองแยกสารตัวอื่นออก หรืออาจใช้วิธีการละลายสารตัวอื่นทิ้งไปก็ได้ แต่หลักใหญ่ๆ คือใช้คุณสมบัติและปฏิกิริยาของ ลิกนินที่ต่างจากสารตัวอื่นในการแยก งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอน ลิกนินมีหลายวิธี อย่างเช่นการตกตะกอน ลิกนินด้วยสารละลาย แอลกอฮอล์-เกลือแคลเซียม จากคุณสมบัติของ ลิกนินที่ละลายได้ไม่ดีในกรด จึงมีการปรับภาวะของน้ำดำให้อยู่ในช่วงความเป็นกรดโดยใช้กรดต่างๆ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดคาร์บอนิก ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน หากตกตะกอน ลิกนินด้วยเกลือแคลเซียมถึงแม้ว่าจะมีราคาถูก แต่ตะกอน ลิกนินที่ได้จะอยู่ใน

รูปคอลลอยด์ทำให้ยากต่อการกรองออกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ เช่นเดียวกับกรดคาร์บอนิกที่นอกจากตะกอนจะเกิดในรูปของคอลลอยด์แล้ว ยังสามารถปรับค่าความเป็นกรด-ด่างได้แค่ 8-9 ส่วนการตกตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้เกิดไอออนลบที่ไม่ต้องการในกระบวนการ และการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารเคมีที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก นอกจากนี้ยังสามารถแยกตะกอนลิกนินโดยการกรองได้ดีโดยลิกนินที่ได้ก็นำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางและนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของธาตุในน้ำดำ (น้ำหนักแห้ง) [19]

element	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน (C)	36.4
โซเดียม (Na)	18.6
ซัลเฟอร์ (S)	4.8
ไฮโดรเจน (H)	3.5
โพแทสเซียม (K)	2.02
คลอรีน (Cl)	0.24
ไนโตรเจน (N)	0.14
ออกซิเจน (O)	34.3

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Alexy P. และคณะ [20] ศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิโพรพิลีน ที่นำลิกนินมาใช้เป็นสารเติมแต่ง ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ (Compression molding) โดยทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานปกติ (ไม่มีการเติมสารอื่น) ชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) และชิ้นงานที่มีการเติมลิกนิน พบว่าชิ้นงานพอลิเอทิลีนที่มีการเติมสารเพิ่มความเสถียรและชิ้นงานที่มีการเติมลิกนินมีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกัน โดยมีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่าชิ้นงานปกติ เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปหลายครั้งค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก แต่ในส่วนของพอลิโพรพิลีนพบว่าค่าดัชนีการไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณลิกนินต่อค่าดัชนีการไหลพบว่า ค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สำหรับโพรพิลีนจะมีค่าไม่คงที่ ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอรัทั้งสองชนิดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของลิกนิน การทดสอบสมบัติความเสถียรทางแสงพบว่าเมื่อเติมลิกนินลงไปมีผลให้ชิ้นงานมีการสลายตัวช้าลงสรุปได้ว่าลิกนินช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางแสงให้แก่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

De Chirico A. และคณะ [16] ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของพอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ โดยในการทดลองใช้ลิกนินและสารผสมระหว่างลิกนินกับสารหน่วงไฟประเภทอื่นดังนี้ เมลามีนฟอสเฟต (Melamine phosphate) แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (Ammonium polyphosphate) โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (Monoammonium phosphate) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) โดยลิกนินที่ใช้ในการทดลองเป็นไฮโดรไลติกลิกนิน (Hydrolytic lignin) เติมน้ำร้อยละ 5, 10, 15, 20 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) พบว่าเมื่อให้แรงอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่า storage modulus มีค่าลดลง ผลที่ได้คือปริมาณลิกนินที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ให้ค่า storage modulus มากที่สุด จากนั้นทำการทดสอบสมบัติการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) โดยเปรียบเทียบระหว่างลิกนิน พอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมลิกนินและแอมโมเนียมฟอสเฟต พอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมลิกนิน และพอลิไพโรพิลีน พบว่าปริมาณของน้ำหนักที่เหลืออยู่สามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ ลิกนิน พอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมลิกนินและแอมโมเนียมฟอสเฟต พอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมลิกนิน และพอลิไพโรพิลีน ตามลำดับ โดยปริมาณของน้ำหนักที่เหลือแสดงถึงปริมาณของเถ้า ทดสอบระยะเวลาหน่วงไฟ ระยะเวลาในการเผาไหม้ ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อย ค่าความร้อนสูงสุดที่ปลดปล่อยออกมาด้วยเครื่อง Cone calorimeter โดยเปรียบเทียบระหว่างพอลิไพโรพิลีน และพอลิไพโรพิลีนที่มีการเติมสารต่างๆ ดังนี้ ลิกนิน ลิกนินกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ลิกนินกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ลิกนินกับเมลามีนฟอสเฟต ลิกนินกับแอมโมเนียมฟอสเฟต และลิกนินกับโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ลิกนินสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงไฟ แต่ในการใช้ลิกนินเพียงอย่างเดียว นั้น ความสามารถในการหน่วงไฟจะมีค่าน้อยกว่าการใช้ลิกนินร่วมกับสารหน่วงไฟอื่นๆ

Li J. และคณะ [21] ศึกษาสมบัติการสลายตัวของไดออกเซนลิกนินสกัดจาก manchurian ash นำไปผสมกับสารหน่วงไฟหลายชนิด เช่น แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate) แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphate) และกรดบอริก (boric acid) ในอัตราส่วนหัวส่วนต่อท้ายส่วนของลิกนิน และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA พบว่าภาวะที่มีไนโตรเจน ลิกนินที่สกัดจาก manchurian ash สามารถสร้างเถ้าได้ถึงร้อยละ 36 และผลจากการผสมสารหน่วงไฟหลายชนิดพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวมีค่าลดลง และปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตยังสามารถลดอัตราการสลายตัวของลิกนินได้อีกด้วย แอมโมเนียมฟอสเฟตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเถ้าได้ดีที่สุด ผลการทดลองจาก Fourier Transform Infrared (FTIR) พบว่าลิกนินเมื่อเกิดการสลายตัวจะสลายพันธะ C-O-C, C-O, -OH

และ C-H แล้วสร้างวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) และการเติมสารห่วงโซ่ไปมีผลต่อลักษณะการสลายตัวของลิกนิน โดยสารห่วงโซ่ที่มีผลอย่างมาก คือ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนพอสเฟต สาเหตุเนื่องจากสารห่วงโซ่ทั้งสองชนิดนี้เมื่อเกิดการสลายตัวจะทำให้เกิดกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) หรือกรดพอลิฟอสฟอริก (polyphosphoric acid) ซึ่งกรดทั้งสองตัวนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้พันธะ C-O เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นวงแหวนอะโรมาติก และผลการทดลองจาก X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) พบว่าการใส่สารห่วงโซ่ไปมีผลทำให้ค่า C1s (ปริมาณ C-C) เพิ่มขึ้นแสดงว่าเกิดการสร้างเก้าได้มากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวไปในทิศทางเดียวกับการที่สารห่วงโซ่ไปมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเก้าซึ่งไม่ติดไฟ แสดงว่าลิกนินและสารห่วงโซ่ไปเมื่อใช้ร่วมกันจะมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการห่วงโซ่ไปเพิ่มมากขึ้น

Li B. และคณะ [22] ศึกษาสมบัติการสลายตัวของลิกนินที่สกัดจากต้นสน โดยใช้การทดลองแบบเดียวกับงานวิจัยของ Li J. และคณะ [21] โดยผสมลิกนินที่สกัดจากต้นสนกับสารห่วงโซ่ชนิดอื่น เช่น กรดบอริก (boric acid) กัวนิลยูเรียพอสเฟต (guanyl urea phosphate) แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนพอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphate) และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต (ammonium polyphosphate) พบว่าลิกนินทำให้เกิดเก้าซึ่งสามารถห่วงโซ่ไปได้ โดยจะมีประสิทธิภาพในการห่วงโซ่ไปเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในภาวะไนโตรเจน ส่วนเมื่ออยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนจะให้ผลน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนจำเป็นในการสร้างเก้า ซึ่งมีส่วนในการเพิ่มความสามารถในการห่วงโซ่ไป โดยในการผสมกับสารห่วงโซ่ไปชนิดอื่นไม่ได้ส่งผลมากนักเนื่องจากลิกนินที่สกัดได้มีความสามารถในการสร้างเก้าสูง เมื่อนำสารห่วงโซ่ไปแต่ละสูตรมาเปรียบเทียบกันแล้ว สารห่วงโซ่ไปที่มีลิกนินผสมกับ ammonium polyphosphate มีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการห่วงโซ่ไปมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้ลิกนินจาก manchurian ash ผลที่ได้คือลิกนินจากต้นสนให้ผลที่ดีกว่าเนื่องจากลิกนินจากต้นสนมีปริมาณของ C-C แบบร่างแหมากกว่า ซึ่งมีผลให้เกิดการสร้างของเก้าได้ดีกว่า

Pichainarong W. [23] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกลิกนินออกจากรำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส โดยการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริก 2 ขั้นตอน ขั้นแรก ตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6 เพื่อกำจัดสารที่เกิดจากการย่อยสลายในขั้นต้น แล้วทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 5, 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ เพื่อตกตะกอนลิกนิน นำน้ำดำที่ผ่านการตกตะกอนมาวิเคราะห์ค่า Chemical Oxygen Demand (COD) และสี ส่วนตะกอนลิกนิน นำมาวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโดย Gel Permeation Chromatography (GPC), Nuclear Magnetic Resonance (^{13}C -NMR) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) พบว่าการตกตะกอนของลิกนินในน้ำดำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง

ลดลง แต่ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 1, 2 และ 3 พบว่าปริมาณการตกตะกอนของลิกนินใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 จึงเหมาะแก่การตกตะกอนลิกนินในน้ำดำ โดยสามารถแยก ลิกนินได้ร้อยละ 93.51 ตะกอนลิกนินที่แยกได้มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 1,348-1,540

Pongsai S. [24] ทำการสกัดลิกนินออกจากน้ำดำ โดยการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริก โดยทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็น 3 แล้วทิ้งให้น้ำดำตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นจึงนำไปกรอง แล้วล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดสิ่งตกค้าง โดยลิกนินที่ได้ถูกนำมาทำปฏิกิริยาแบบซัลโฟเนชัน โดยใช้ภาวะการเกิดแบบเมทิลเลชันที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งสมบัติของ ลิกโนซัลโฟเนตที่เตรียมได้มีสมบัติใกล้เคียงกันกับสมบัติของลิกโนซัลโฟเนตทางการค้า