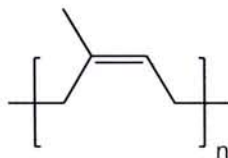


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยาง (Rubber) เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ซึ่งทางเคมีจัดเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ (Polymer) มีสมบัติพิเศษประการหนึ่งที่เป็นเอกลักษณ์คือ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง จากสมบัติดังกล่าวทำให้ยางถูกใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอดีตก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 วัตถุดิบยางที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์มีเพียงยางที่ได้มาจากต้นพืชในสกุล 'Hevea Brasiliensis' ซึ่งมีศูนย์กลางการปลูก และซื้อขายอยู่ที่เมืองท่าบณังแม่น้ำอะเมซอน เมืองพารา ประเทศบราซิล [7] โดยน้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นยาง 35% และส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65% ซึ่งในส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65% จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นน้ำ 55% และส่วนที่เป็นสารอื่น 10% น้ำยางธรรมชาติมีความหนาแน่นประมาณ 0.98 g/cm^3 มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.0 น้ำยางธรรมชาติที่ได้จะมีองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลสภาพดินฟ้าอากาศ ชนิดของดิน สภาพแวดล้อมของแปลงปลูกยาง พันธุ์ของยาง อายุของต้นยาง การกรีด ความยาวของรอยกรีด ความถี่ของการกรีด และช่วงเวลาของการกรีดยาง เป็นต้น และถ้านำน้ำยางไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% จะเรียกน้ำยางนั้นว่าน้ำยางข้น (Concentrated latex) และการเติมแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน [8, 9] โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดังแสดงในภาพ 1



ภาพ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมียางธรรมชาติ [10]

1. สมบัติของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกันมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรงมีความทนต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง มีความต้านทานต่อการขูดถูสูง ทั้งยังมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก และจากการที่ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีนเฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากตัวยางดิบไม่มีขั้ว และไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมแต่จะทนต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังทนต่อกรด และด่างอ่อน แต่จะไม่ทนต่อกรดและด่างเข้มข้น ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไม่ทนต่อโอโซน อุณหภูมิการใช้งาน ตั้งแต่ -55 - 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บไว้นานๆ จะทำให้ยางสูญเสียความยืดหยุ่นลง จากสมบัติที่ดีของยางจึงนักวิจัยมากมายได้ศึกษาการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น และสามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีสามารถทำได้ทั้งในรูปของน้ำยางและยางแห้ง [10, 11] เช่น การเพิ่มหมู่ที่มีขั้ว เช่น หมู่อีพอกไซด์ลงบนโครงสร้างของยางธรรมชาติ เพื่อให้ยางมีความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น [12] หรือการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีโดยการตัดสายโซ่โมเลกุล (Degradation) เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านสารเคลือบผิวและสารยึดติด [7] หรือการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อให้ยางมีคุณสมบัติคล้ายพลาสติก ทนทานต่อออกซิเจนและโอโซนมากยิ่งขึ้น [13] เป็นต้น

2. ยางธรรมชาติดัดแปรและการประยุกต์ใช้งาน

ในปัจจุบันพบว่ามีนักวิจัยมากมายได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุง และพัฒนาการใช้งานของยางธรรมชาติให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น การดัดแปรยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการนำไปทำปฏิกิริยาต่อ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถเพิ่มขอบเขตการใช้งานของยางธรรมชาติมากขึ้น [14] ตัวอย่างการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่สำคัญ ได้แก่

2.1 ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR)

ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์เป็นยางธรรมชาติที่ได้จากการเติมหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide) เข้าไปในโมเลกุลตรงตำแหน่งพันธะคู่ ผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยมีระดับของการเกิดหมู่อีพอกไซด์ 10-50% ENR สามารถเตรียมได้ทั้งในรูปของน้ำยาง และยางแห้ง โดยในรูปของน้ำยางจะเป็นที่นิยมในการเตรียมมากกว่า ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการนำน้ำยางธรรมชาติ (Latex) มาทำปฏิกิริยาร่วมกับกรดฟอร์มิก (HCOOH) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [15] สำหรับ ENR ที่เตรียมได้จะมีขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป

โดยยางเกรดที่มีระดับของหมู่ไอพอกไซด์สูงถึง 50% จะมีความมีขั้วสูงเทียบเท่ากับยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR) ที่มีปริมาณอะไครโลไนไตรล์ปานกลาง และการมีทั้งหมู่ไอพอกไซด์ และพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลทำให้ ENR ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจากส่วนของพันธะคู่สามารถเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ด้วยซัลเฟอร์หรือเพอร์ออกไซด์ ในขณะที่หมู่ไอพอกไซด์ก็สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่นได้ เช่น กรดไดเบสิก และพอลิเอมีน เป็นต้น [16]

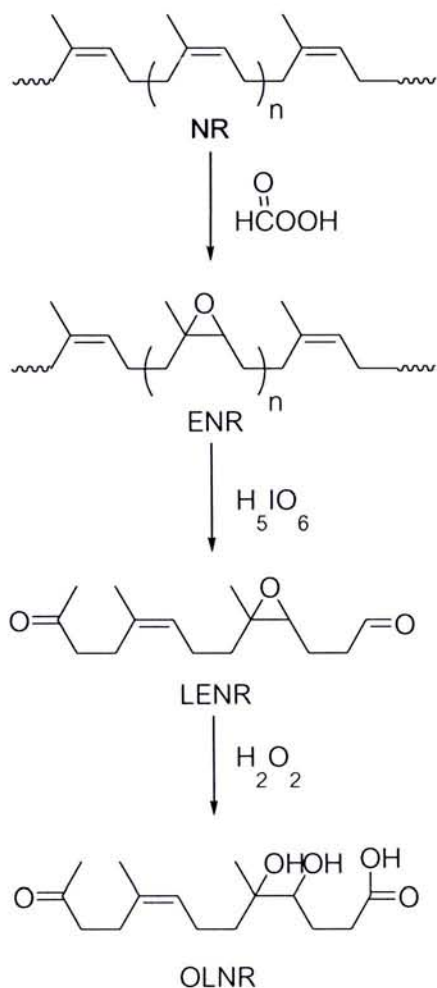
นอกจากการใช้ประโยชน์ยางไอพอกไซด์ในรูปแบบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ยังมีนักวิจัยบางส่วนได้เพิ่มขอบเขตการใช้งานโดยการเตรียมเป็นยางธรรมชาติไอพอกไซด์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Liquid Epoxidized Natural Rubber, LENR) ในปี ค.ศ. 2004 P. Phinyocheep, et al. [15] เตรียม LENR โดยการทำปฏิกิริยาใน 2 ขั้นตอนคือปฏิกิริยาไอพอกไซด์ระหว่างน้ำยางธรรมชาติร่วมกับกรดเพอร์ฟอร์มิก เกิดเป็น ENR ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำยาง (Latex) จากนั้นนำ ENR มาทำปฏิกิริยาการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยกรดเพอร์ไอโอดิก (H_5IO_6) ที่อุณหภูมิ $30^{\circ}C$ เกิดเป็น LENR ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณ H_5IO_6 และระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ ENR ลดลงมากขึ้น และส่งผลทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่งปลายที่เกิดจากการขาดของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นด้วย แต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ

2.2 ยางธรรมชาติดัดแปรพอลิออล (OLNR)

การดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลสามารถกระทำได้ทั้งให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนสายโซ่โมเลกุลหรืออยู่เฉพาะที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านของสายโซ่โมเลกุล โดยในปี พ.ศ. 2550 ขวยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์ และคณะ [17] ได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ตำแหน่งปลายโดยใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โดยเริ่มจากการเตรียมยางธรรมชาติเหลวไอพอกไซด์ (LENR) ซึ่งเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติไอพอกไซด์ (ENR) ในสภาวะน้ำยางโดยใช้กรดเพอร์ไอโอดิกที่อุณหภูมิ $30^{\circ}C$ อินฟราเรดสเปกตรัมของยางเหลวที่สังเคราะห์ได้ปรากฏสัญญาณของหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1719 cm^{-1} โดยปริมาณหมู่คาร์บอนิลคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงยูวีของ 2,4-ไดไนโตรฟีนีลไฮดราซีน ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ LENR ที่ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณกรดเพอร์ไอโอดิกเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค ^1H-NMR ยืนยันการปรากฏของสัญญาณของหมู่ไอพอกไซด์ในยางธรรมชาติเหลวโดยตรวจพบปริมาณใกล้เคียงกับ ENR เริ่มต้น

จากนั้นนำ LENR ไปทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 70°C อินฟราเรดสเปกตรัมปรากฏสัญญาณการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 3442 และ 1715 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลของกรดคาร์บอกซิลิกตามลำดับ โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของหมู่ฟังก์ชันอัลดีไฮด์ไปเป็นกรดคาร์บอกซิลิก วิเคราะห์ปริมาณกรดในยางธรรมชาติเหลวที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่ตำแหน่งปลาย (CLNR) โดยการไทรเดรตร่วมกับเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในสารละลายโทลูอีน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดคาร์บอกซิลิกเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งปริมาณหมู่ไฮดรอกไซด์เริ่มต้นและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากจะพบการเปลี่ยนไปของหมู่ฟังก์ชันอัลดีไฮด์เป็นหมู่กรดคาร์บอกซิลิกแล้วยังพบการเปิดวงของหมู่ไฮดรอกไซด์เป็นหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2008 P. Phinyocheep and C. W. Phetphaisit [18] ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวพอลิออกอลในสภาวะน้ำยางโดยปฏิกิริยาการเปิดวงของยางธรรมชาติเหลวไฮดรอกไซด์ด้วย H_2O_2 ได้ยางธรรมชาติเหลวที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากอยู่บนโครงสร้างของยางธรรมชาติปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวพอลิออกอลดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 ปฏิบัติการเตรียมยางธรรมชาติเหลวพอลิออล [18]

ในปี ค.ศ. (2003) W. Klinklai, et al. [19] ได้ศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ (Deproteinized Natural rubber, DPNR) จากปฏิกิริยาใน 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกเตรียมยางธรรมชาติให้มีหมู่ไฮดรอกไซด์โดยใช้กรดเพอร์อะซิดิก และทำการตัดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยใช้แอมโมเนียเพอร์ซัลเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8)$ /โพรพาแนล จากการทดลองพบว่า NR และ DPNR เกิดหมู่ไฮดรอกไซด์ และเกิดการลดน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน และเมื่อเตรียมยางธรรมชาติให้มีหมู่ไฮดรอกไซด์แตกต่างกัน เกิดเป็น ENR และ DPENR ที่มีปริมาณหมู่ไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 10-40 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำยางดังกล่าวมาทำปฏิกิริยาการลดน้ำหนักโมเลกุลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65°C พบว่ายางเหลวที่เตรียมได้จาก ENR ให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ($\bar{M}_n$) ลดลงจาก $\bar{M}_n$ ของ DPNR เท่ากับ 210,000 เป็น 10,000-50,000 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า

ยางเหลวที่เตรียมจากยางอีพอกไซด์ทั้งสองชนิด ยังคงมีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในสายโซ่โมเลกุล โดยมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จากยางอีพอกไซด์เริ่มต้น จากเทคนิค ^1H NMR Spectroscopy พบสัญญาณของอัลดีไฮด์และคีโตนที่ตำแหน่งปลายของสายโซ่โมเลกุลของยางเหลว

พอลิเอสเตอร์ (Polyester)

พอลิเอสเตอร์ คือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเตอร์อยู่ในสายโซ่โมเลกุล สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างกรดพอลิคาร์บอกซิลิก (Polycarboxylic acid) และพอลิไฮดริกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohols) ซึ่งกรดที่ใช้ต้องมีหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) อย่างน้อย 2 หมู่ และแอลกอฮอล์ที่ใช้ต้องมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) อย่างน้อย 2 หมู่เช่นกัน [20] ในการแบ่งประเภทของพอลิเอสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

พอลิเอสเตอร์ชนิดอิ่มตัว (Saturated Polyester) คือ พอลิเอสเตอร์ที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester) คือ พอลิเอสเตอร์ที่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง และสามารถเกิดการเชื่อมโยงจนได้โครงสร้างเป็นแบบร่างแห เช่น พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPR)

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET)

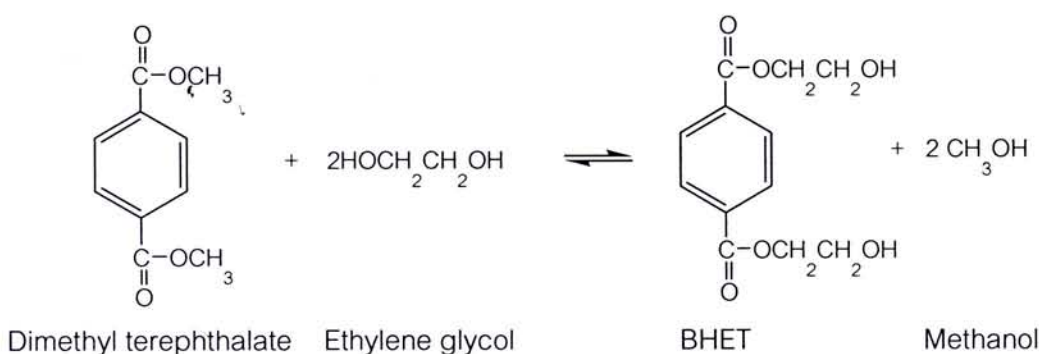
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตหรือ เพ็ต เป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในประเภทพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดอิ่มตัวเชิงเส้นตรง (Linear saturated Polyester) มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) การสังเคราะห์เพ็ตครั้งแรกเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1941 อยู่ในลักษณะของเส้นใยโดย Whimfield และ Dickson ซึ่งพบว่าเพ็ตมีสมบัติเป็นผลึกขนาดเล็ก และมีน้ำหนักโมเลกุลพอเหมาะที่จะทำการดึงเพื่อให้ได้เส้นใยที่แข็งแรง และมีความยืดหยุ่น ต่อมาได้มีการนำเพ็ตมาใช้งานบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีสมบัติเด่นในด้านความใส ทนต่อแรงกระแทก และสามารถกักเก็บก๊าซได้ดี รวมทั้งมีน้ำหนักเบา จึงนิยมนำมาใช้ทำขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำดื่ม และขวดน้ำมันพืช เป็นต้น

1.1 การสังเคราะห์เพ็ต

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เพ็ตเป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเตอร์ (Ester interchange) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล และไดเมทิลเทเรฟทาเลต ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์

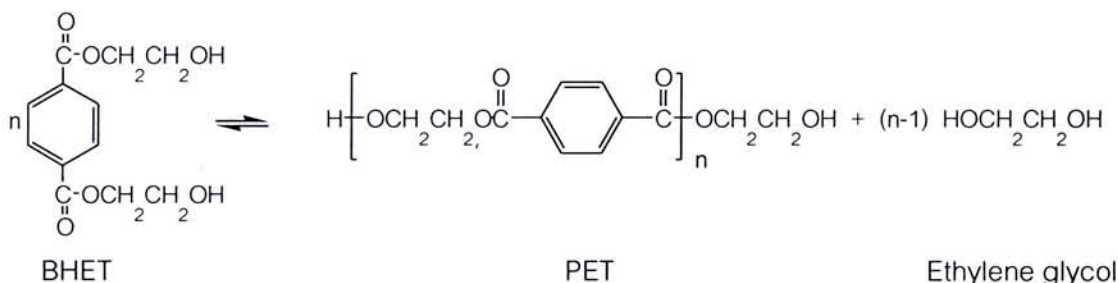
ผสมไดเมทิลเทเรฟทาเลต (DMT) กับเอทิลีนไกลคอล (EG) ในอัตราส่วน 1:2.1 ถึง 2.2 โดยโมล ให้ความร้อนกับของผสมที่อุณหภูมิ 150-210°C และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ผลพลอยได้จากปฏิกิริยา คือ เมทานอล (Methanol) ซึ่งจะถูกกลั่นออกไปอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวา ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ bis(2-hydroxyethyl) terephthalate: BHET นอกจากนี้ยังอาจเกิดไดเมอร์ (dimer) ไตรเมอร์ (trimers) และโอลิโกเมอร์ (oligomers) ปฏิกิริยาแสดงได้ดังภาพ 3



ภาพ 3 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนเอสเทอร์

ขั้นที่ 2 เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 270-285°C แก่ BHET ที่ได้จากขั้นที่ 1 เพื่อให้ได้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ จึงต้องมีการกำจัดเอทิลีนไกลคอลส่วนเกินออกจากปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาแสดงได้ดังภาพ 4



ภาพ 4 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ BHET

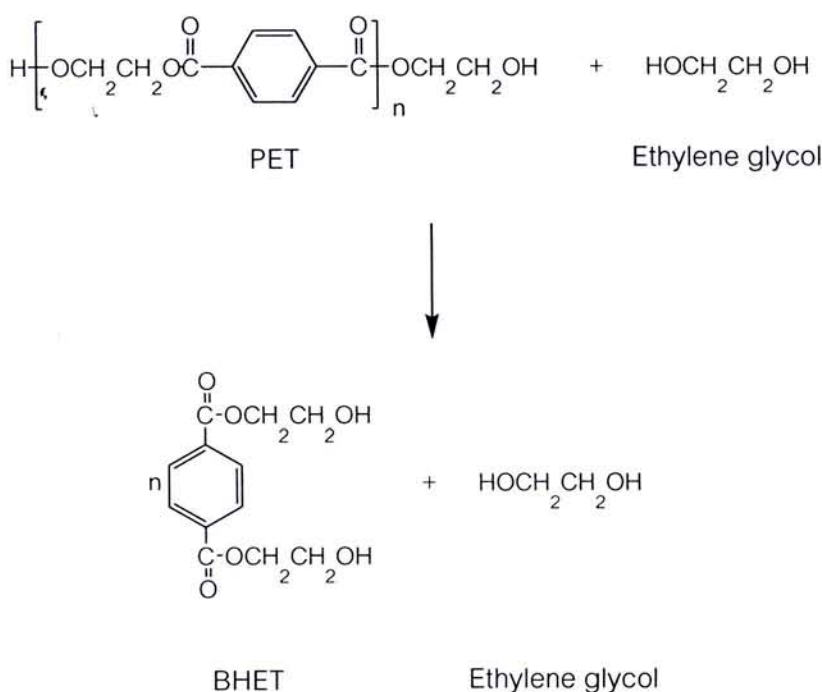


1.2.4 กระบวนการแอมโมโนไลซิส (Ammonolysis process)

เป็นกระบวนการที่ใช้แอมโมเนีย (Anhydrous ammonia) ใน
เอทิลีนไกลคอล (EG) ในการย่อยเพื่อผลิตวัณท์ที่ได้เป็นสารประกอบเอไมด์ (Amide) ของกรด
เทเรฟทาลิก (Terephthalic acid)

1.2.5 กระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis process)

เป็นการสลายเปิดด้วยไกลคอล ซึ่งไกลคอลที่นิยมใช้คือ เอทิลีนไกลคอล
(EG) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ bis(2-hydroxyethyl)Terephthalate : BHET ดังภาพ 6



ภาพ 6 กระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis process)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายเปิดด้วยไกลคอล (Glycol) หรือพอลิออล (Polyol) สามารถนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับแอนไฮไดรด์ (Anhydride) หรือกรดไดคาร์บอกซิลิก (Dicarboxylic acid) เพื่อสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin) ซึ่งกระบวนการไกลโคไลซิสนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเปิด เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถสลายเปิดโดยไม่ต้องใช้ความดัน และไม่ใช้อุณหภูมิสูง ไม่มีสารก่อให้เกิดการก่อกรรอนในระบบ และให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปสังเคราะห์สารชนิดอื่นได้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดวิจัย 2555
วันที่.....
เลขทะเบียน..... 249065
เลขเรียกหนังสือ.....

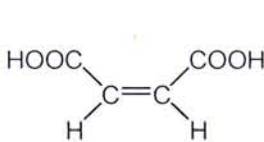
2. พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPR)

พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวเป็นของผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวกับมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเรซินเหลว ใส สีเหลืองอ่อน และมีองศาของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ต่ำ คือ มีค่าประมาณ 8-10 (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000-2,000)

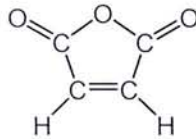
2.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งแต่ละตัวมีหน้าที่ในการควบคุมสมบัติพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวดังนี้

2.1.1 กรดคาร์บอกซิลิกชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated carboxylic acid)

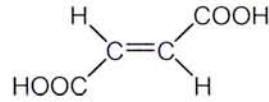
เป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาของพอลิเอสเทอร์เรซินโดยจะมีผลต่อความแข็งแรง อัตราเร็วของการแข็งตัว ความร้อนที่เกิดขณะเรซินแข็งตัว การทนต่อสารเคมี และสมบัติทางกายภาพ กรดคาร์บอกซิลิกชนิดไม่อิ่มตัวที่นิยมใช้คือ กรดมาเลอิก (Maleic acid) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรืกรดฟูมาริก (Fumaric acid) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดง



Maleic acid



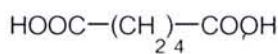
Maleic anhydride



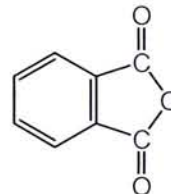
Fumaric acid

2.1.2 กรดคาร์บอกซิลิกชนิดอิ่มตัว (Saturated carboxylic acid)

เป็นตัวควบคุมความนิ่ม และความยืดหยุ่น ช่วยให้พอลิเอสเทอร์เรซินละลายในมอนอเมอร์ดีขึ้น กรดคาร์บอกซิลิกชนิดอิ่มตัวที่นิยมใช้ คือ กรดฟทาสิก (Phthalic acid) ในรูปของฟทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) หรือกรดอะดิปิก (Adipic acid) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังแสดง



Adipic acid



Phthalic anhydride

2.1.3 ไกลคอล (Glycol) [21, 22]

เป็นตัวควบคุมสมบัติต่างๆ ของพอลิเอสเตอร์เรซิน ในด้านความเหนียว ความยืดหยุ่น การทนต่อสารเคมี และการทนต่อความร้อน ซึ่งไกลคอลแต่ละชนิดให้สมบัติของพอลิเอสเตอร์เรซินต่างกัน โดยไกลคอลที่นิยมใช้คือ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol, PG) ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) และบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) นอกจากนี้ยังพบว่า bis(2-hydroxyethyl) Terephthalate: BHET ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายเพ็ต สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินแทนไกลคอลได้ด้วย

2.1.4 มอนอเมอร์ (Monomer)

เป็นตัวทำละลายของพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว ที่มีความหนืดสูงในช่วงก่อนการแข็งตัว และเมื่อได้รับความร้อน หรือภายหลังจากการเติมสารช่วยให้แข็งตัว (Curing agent) ลงไปแล้ว มอนอเมอร์จะเป็นตัวการทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัวเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแห (Network)

มอนอเมอร์ที่นิยมใช้คือ สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer) เนื่องจากมีราคาถูก เป็นตัวทำละลายที่ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอสเตอร์เรซินขณะแข็งตัวได้ดีมอนอเมอร์อื่นๆ ได้แก่ ไวนิลโทลูอีนมอนอเมอร์ (Vinyl toluene monomer) เมทิลเมทาไครเลต มอนอเมอร์ (Methyl methacrylate monomer)

2.1.5 สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor)

เป็นตัวป้องกันการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเรซิน ทำให้เก็บเรซินไว้ได้นานโดยไม่แข็งตัว และเป็นตัวช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเรซินแข็งตัว สารยับยั้งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกควิโนน (Quinone) เช่น เบนโซควิโนน (Benzoquinone) หรือไฮโดรควิโนน (Hydroquinone)

2.1.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

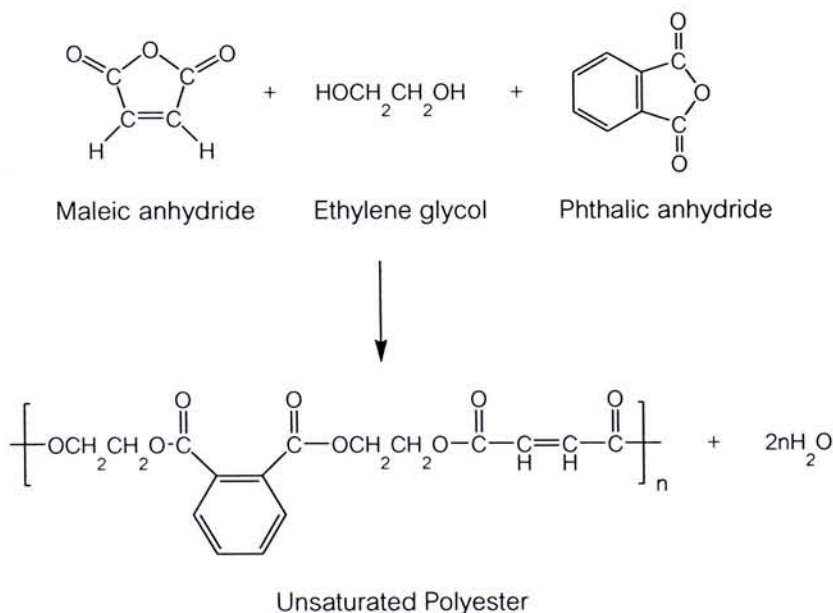
เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้เรซินแข็งตัว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เป็นสารจำพวกเพอร์ออกไซด์ (Peroxide) เช่น เมทิลเอทิลคีโตนเพอร์ออกไซด์ (Methyl Ethyl Ketone Peroxide, MEKPO) หรือเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide, BPO)

2.1.7 ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Promoter or Accelerator)

เป็นตัวช่วยทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้องซึ่งตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีความจำเพาะเจาะจงในการใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยานิยมใช้เป็นสารจำพวกเกลือของโลหะ เช่น โคบอลต์ออกโตเอต (Cobalt octoate) โคบอลแนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) หรือสารจำพวกเอมีน เช่น ไดเมทิลอะนิลีน (Dimethyl aniline)

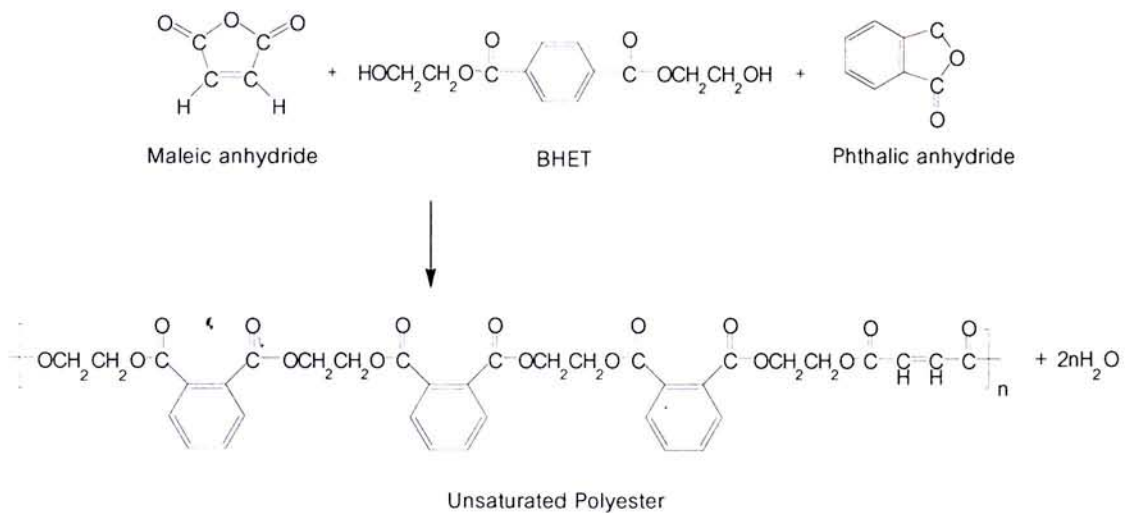
2.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไกลคอล (Glycol) กับกรดผสมระหว่างกรดอิ่มตัว (Saturated acid) และกรดไม่อิ่มตัว (Unsaturated acid) โดยมีน้ำเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวแสดงได้ดังภาพ 7 และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวที่มีความหนืดสูงจะถูกนำไปละลายในไวนิลมอนอเมอร์ เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัวเมื่อละลายอยู่ในมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัวพันธะที่ไม่อิ่มตัวบางส่วนของพอลิเอสเตอร์จะทำปฏิกิริยากับพันธะที่ไม่อิ่มตัวของมอนอเมอร์ และสำหรับพันธะที่ไม่อิ่มตัวที่เหลือจะทำปฏิกิริยาขณะที่เรซินเกิดการแข็งตัว



ภาพ 7 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว

ในการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจาก bis(2-hydroxyethyl) Terephthalate: BHET ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายเพ็ต มีวิธีการสังเคราะห์ที่คล้ายกันกับใช้ไกลคอลสังเคราะห์ แต่แตกต่างกันที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นซึ่งแสดงได้ดังภาพ 8



ภาพ 8 การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัวจาก bis(2-hydroxyethyl) Terephthalate: BHET

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยเพ็ต

ปี พ.ศ. 2548 ยิ่งรัก พรายอินทร์ และวนิดา ธรรมบัวชา [5] ศึกษาการนำขวดน้ำดื่มพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปพอลิเอสเตอร์พอลิออลโดยทำการย่อยขวดน้ำดื่มเพ็ตที่ใช้แล้วด้วยไดออลและตัวทำปฏิกิริยาผสมระหว่างไดออลและไตรออล โดยไดออลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามี 2 ชนิด คือ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) และ เอทิลีนไกลคอล (EG) ในขณะที่ตัวทำปฏิกิริยาผสมระหว่างไดออลกับไตรออลที่ใช้คือ DEG ผสมกับไตรเมทิลออลโพรเพน (TMP) และ EG ผสมกับ TMP ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพลิโกเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งปลาย ซึ่งนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะดิปิก (AA) โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันพบว่าได้ผลิตภัณฑ์เพ็ตที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลาย จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนต 2 ชนิด คือ 4,4'-เมทิลีนบิสฟีนิลไอโซไซยาเนต (4,4'-Methylenebis (phenylisocyanate); MDI) และ 1,6-ไดไอโซไซยาเนตเฮกเซน (1,6-Diisocyanatohexane; HDI) ในอัตราส่วน $NCO:COOH = 0.95:1$ ได้เป็นผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการทดสอบสมบัติทางด้านความร้อนเพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ด้วยเทคนิค DSC และ

ตรวจสอพบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่ได้จากไดไอโซไซยาเนตกับผลิตภัณฑ์พอลิเอไมด์ที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายชนิดสายโซ่ตรง (PET:EG:AA, PET:DEG:AA) ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพอลิเมอร์แข็ง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากไดไอโซไซยาเนตกับผลิตภัณฑ์พอลิเอไมด์ที่มีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกที่ตำแหน่งปลายชนิดโครงร่างตาข่าย (PET:EG:TMP:AA, PET:DEG:TMP:AA) จะมีลักษณะเป็นโฟม

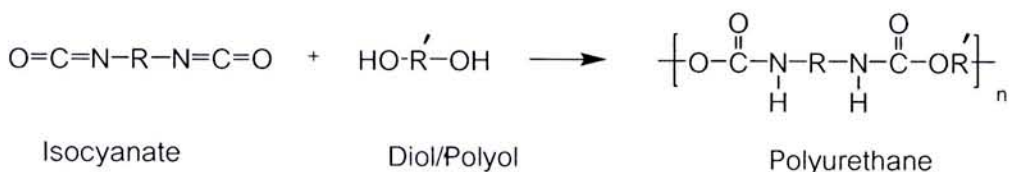
ปี พ.ศ. 2554 เพลินพิศ บุชาธรรม และคณะ [23] ศึกษาการนำ PET กลับมาใช้ใหม่ในรูปของผลิตภัณฑ์สีอุตสาหกรรมโดยการย่อย PET ด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยใช้ไตรเมทิลอลกอฮอล์ (TMP) เอธิลีนไกลคอล (EG) และเพนตะอริททอล (PL) ในสัดส่วนต่างๆ กันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยจะนำมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดไขมัน กรดไอโซพาทาลิก เพื่อเตรียมเรซินซึ่งผลิตภัณฑ์เรซินที่เตรียมได้นี้แบ่งเป็น 2 ชนิด คือเรซินชนิดที่นำไปทำสีชนิดใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก และเรซินชนิดที่นำไปทำสีชนิดใช้สารอินทรีย์เป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียวจากการศึกษาพบว่าสีที่เตรียมจากการย่อยสลายขวด PET ใช้แล้ว โดยใช้สัดส่วน PET:EG:PL เท่ากับ 1.0:0.5:0.5 ให้สมบัติดีที่สุดและใกล้เคียงกับสีทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีแม้ว่าจะมีค่าความเงาต่ำกว่าแต่ก็อยู่ในระดับมาตรฐานเดียวกันคือเป็นสีประเภทกึ่งเงาอย่างไรก็ตามค่าการยึดเกาะของอัลคิเดเรซินที่เตรียมได้มีการหลุดลอกที่รอยกรีดบริเวณจุดตัดเล็กน้อย โดยที่อัลคิเดเรซินทั่วไปไม่ปรากฏ ในขณะที่ความทนต่อแรงกระแทกพบว่ามีความต่ำกว่าอัลคิเดเรซินทั่วไปเล็กน้อยคือ 1.15 kg-m เป็น 1.25 kg-m ตามลำดับ ทั้งนี้สีที่เตรียมจากขวด PET ใช้แล้วพบว่าทนต่อการดัดโค้งด้วยกระบอที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ได้ดีไม่แตกร้าวและยังทนต่อน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี

ปี ค.ศ. 2005 G. P. Karayannidis, et al. [4] ศึกษาการนำ PET มาทำเป็นอัลคิเดเรซินโดยนำ PET มาย่อยกับไดเอทิลีน ไกลคอล ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยใช้กระบวนการไกลโคไลซิสให้ผลิตภัณฑ์เป็นโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่หลากหลาย จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาต่อกับมาลิก แอนไฮไดรด์ (MA) พาทาลิก แอนไฮไดรด์ (PA) และโพรพิลีน ไกลคอล (PG) ในอัตราส่วน 0.54 mol/mol เพื่อเตรียมเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว นำพอลิเอสเทอร์เรซินที่ได้มาทำปฏิกิริยากับสไตรีนมอนอเมอร์ โดยใช้ benzoyl peroxide/amine เป็นตัวริเริ่มในระบบ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง ผลิตภัณฑ์เรซินที่ได้สามารถตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลได้จากอัตราส่วนโดยโมลเริ่มต้นของ DEG/PET โดยใช้เทคนิค GPC จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile strength and elongation at the break point) ของเรซินที่ผลิตขึ้นเปรียบเทียบกับเรซินทางการค้า พบว่าให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างกัน

ปี ค.ศ. 2005 G. Colomines, et al. [24] ได้ศึกษาการย่อย PET โดยใช้ผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์ด้วยปฏิกิริยาไกลโคไลซิส โดยผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์ที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ซึ่งการเตรียมผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์ที่มี adipic acid เป็นส่วนประกอบสามารถเตรียมได้โดยใช้ปฏิกิริยา esterification และผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์ที่มี dimethyl isophthalate เป็นส่วนประกอบสามารถเตรียมได้โดยใช้ปฏิกิริยา transesterification ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยา คือ dimethyl isophthalate : neopentyl glycol เท่ากับ 0.258 : 0.720 โดยโมล หรือ dimethyl isophthalate : tetraethylene glycol เท่ากับ 0.130 : 0.360 โดยโมล และ adipic acid : neopentyl glycol เท่ากับ 0.257 : 0.720 โดยโมล หรือ adipic acid : tetraethylene glycol เท่ากับ 0.128 : 0.360 โดยผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์เหล่านี้ถูกนำมาใช้ย่อยเพ็ดโดยกระบวนการไกลโคไลซิส โดยใช้ zinc acetate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 240 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค ^1H NMR, size exclusion chromatography (SEC) และ matrix assisted laser desorption/ionisation time of flight mass spectrometry (MALDI-TOF MS) จากการทดลองพบว่าสามารถยืนยันขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไกลโคไลซิสจากปฏิกิริยา transesterification นอกจากนี้เทคนิค MALDI-TOF สามารถยืนยันโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ copolymers ที่เกิดจากการรวมตัวของ PET และผลิตภัณฑ์โพลิโกลิเอสเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ของ terephthalic acid และ free diol ที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ oligoester และแสดงให้เห็นโครงสร้างของ glycolysates ที่แตกต่างกัน

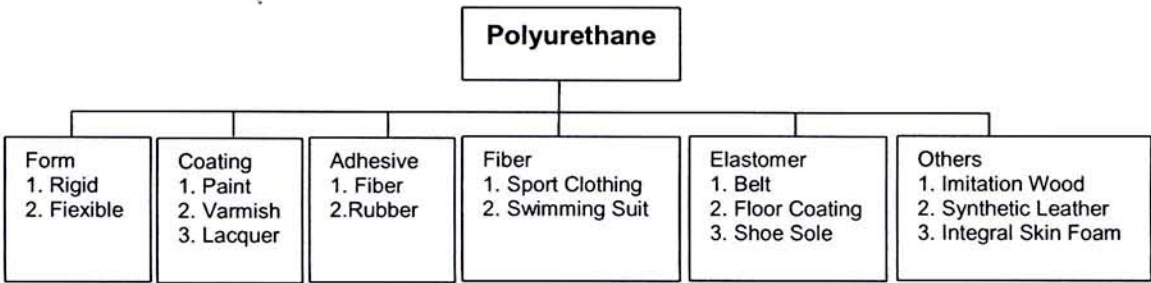
พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน [25] เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของพอลิแอลกอฮอล์กับหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) ในโมเลกุลของไดไอโซไซยาเนต เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบยูรีเทน ซึ่งมีโครงสร้างที่แข็งแรงดังแสดงในภาพ 9



ภาพ 9 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของมวลสารโดยมีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 6 kg/m^3 ไปจนถึง $1,220\text{ kg/m}^3$ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโฟมที่มีความยืดหยุ่นสูงไปจนถึงพลาสติกที่มีความแข็งแรงทนทาน เมื่อจัดแบ่งประเภทของพอลิยูรีเทนตามความหนาแน่นของขึ้นงานแล้วสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทคือ Solid polyurethane, Micro cellular foams, High density foams และ Low density foams ซึ่งแต่ละชนิดยังสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้เป็นไปตามต้องการได้ จากสมบัติของพอลิยูรีเทนนี้ทำให้มีการใช้พอลิยูรีเทนไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย โดยจะมีการนำไปใช้ใน 5 กลุ่มหลัก คือ โฟม เส้นใย กาว อิลาสโตเมอร์ และสารเคลือบผิว ดังแสดงในภาพ 10 ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ในแต่ละกลุ่มจะมีการเตรียมโครงสร้างเคมีแตกต่างกันออกไป



ภาพ 10 ผลิตภัณฑ์จากพอลิยูรีเทน [25]

1. ชนิดของพอลิยูรีเทนสำหรับเคลือบผิววัสดุ

พอลิยูรีเทนสำหรับเคลือบผิววัสดุ [26, 27] แบ่งได้ตามปริมาณของพอลิไอโซไซยาเนตเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะได้พอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทน และพอลิไอโซไซยาเนต ซึ่งได้มีการจำแนกชนิดของพอลิยูรีเทนออกเป็น 2 ประเภท จากทั้งหมด 5 ชนิดดังนี้

ประเภทที่ 1 ส่วนผสมเดี่ยว หรือ One-Component หรือ One-Package แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

ชนิดที่ 1 Oil-modified Urethane

ได้จากปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนต กับกลีเซอรไรด์ (Glyceride) ในน้ำมันพืช ไม่มีหมู่ $-NCO$ อิสระเหลืออยู่และแห้งได้โดยผสมสารเร่งแห้ง

ชนิดที่ 2 Moisture-Cured Urethane

ได้จากปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนต กับพอลิออล โดยเกิดเป็น Prepolymer ซึ่งเป็น Intermediate Polymer ที่มีโมเลกุลขนาดกลางขึ้นมาก่อน พวกนี้จะมีหมู่ $-OH$

หรือ -NCO ที่ทำปฏิกิริยาต่อไปได้ จะเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลให้ใหญ่ขึ้นโดยทำปฏิกิริยากับน้ำที่เป็นความชื้นในอากาศ

ชนิดที่ 3 Blocked Urethane หรือ Heat-Curried Urethane

พอลิเมอร์พวกนี้จะมีหมู่ -NCO ที่ว่องไวต้องลดความว่องไวโดยการเติม blocking agent เช่น ฟีนอล จะได้สารประกอบที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่หากให้ความร้อนที่ 150-200°C จะกลับว่องไวเกิดปฏิกิริยากับพอลิออลต่อไปจึงทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ประเภทที่ 2 ส่วนผสมคู่ หรือ Two-component หรือ Two-Package แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ชนิดที่ 4 Catalyst Urethane

ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนผสมแรกเป็นพรีพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยาเนตที่ตำแหน่งปลาย ที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ ถ้ามีสารตัวเร่งเพียงเล็กน้อย สารตัวเร่งหรือสารกระตุ้นนี้จะช่วยเชื่อมโยงโมเลกุล ได้แก่ พอลิออล หรือพอลิเอมีน ปฏิกิริยาจะเกิดเมื่อผสมทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน ข้อจำกัดของยูรีเทนนี้ คือ มีระยะเวลาคงสภาพ หลังผสมค่อนข้างสั้น

ชนิดที่ 5 Polyisocyanate Urethane

ประกอบด้วยสองส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นพรีพอลิเมอร์พวกพอลิไอโซไซยาเนต และส่วนที่สอง คือ เรซิน (Resin) ที่มีหมู่พอลิออลที่ว่องไว ปฏิกิริยาเกิดได้หลังผสมโดยมี หรือไม่มีสารตัวเร่งร่วมด้วย และมีข้อจำกัด คือ มีระยะเวลาคงสภาพหลังผสมค่อนข้างสั้น

2. การสลายตัวของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนชนิดเคลือบผิววัสดุ จะเกิดจากการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิยูรีเทนแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างของยูรีเทน เช่น

2.1 พอลิยูรีเทนที่เกิดจาก Tertiary Alcohol สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำเพียง 50°C

2.2 พอลิยูรีเทนที่เกิดจาก Primary Alcohol และ Secndary Alcohol สลายตัวที่ 150-200°C อย่างช้าๆ

2.3 พอลิยูรีเทนที่เกิดจากฟีนอล สลายตัวที่อุณหภูมิ 200°C

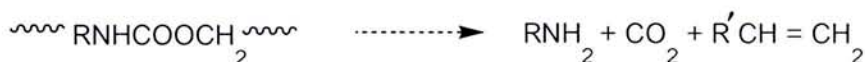
นอกจากโครงสร้างแล้ว สภาพแวดล้อม เช่น สารตัวเร่ง สารเคมี อื่นๆ ฯลฯ ก็มีผลต่อความเสถียรของยูรีเทนด้วย

การสลายตัวของพอลิยูรีเทน คือการสลายตัวเป็นสารประกอบต่างๆ ดังนี้

1. สลายเป็นไอโซไซยาเนต และแอลกอฮอล์



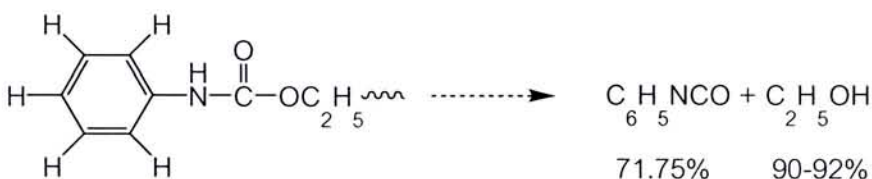
2. สลายเป็น Primary Amine และโอลิฟิน (Olefin)



3. สลายเป็น Secondary Amine



4. พอลิยูรีเทนที่เกิดจากฟีนอล สลายตัวเป็นฟีนิล ไอโซไซยาเนต และฟีนอล



3. ไอโซไซยาเนต (Isocyanate)

การผลิตพอลิยูรีเทนในปัจจุบัน นิยมใช้พอลิไอโซไซยาเนต โดยเฉพาะอย่างยิ่งไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีวิธีเตรียมสารนี้หลายวิธีด้วยกัน ไอโซไซยาเนตมีกลุ่ม $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ที่ไม่อิมตัว จึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทั้งกับสารเคมีตัวอื่นๆ และกับตัวเอง สารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตได้ดีที่สุด คือ แอลกอฮอล์ เกิดปฏิกิริยาดังแสดง



และเรียงลำดับอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้ว่า Primary Alcohol > Secondary Alcohol > Tertiary Alcohol

การทำปฏิกิริยากับฟีนอล โดยที่ฟีนอลมีความเป็นกรดมากกว่า Aliphatic Alcohol จึงทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตได้ช้ากว่าแอลกอฮอล์ และจะช้ามากที่อุณหภูมิ 50-75°C การเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นทำได้โดยใช้ตัวเร่ง เช่น อลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ Tertiary Alcohol ดังแสดง



การทำปฏิกิริยากับน้ำ น้ำปริมาณเล็กน้อยทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดง



ปฏิกิริยานี้เร่งอัตราเร็วได้โดยการเติมตัวเร่ง เช่น Tertiary Amine สารประกอบโลหะบางชนิด และเบสต่างๆ

การทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก จะเกิดได้บ้างเล็กน้อย แต่อาจเร่งปฏิกิริยาได้โดยใช้ Tertiary Amine เบสต่างๆ และสารประกอบโลหะบางชนิดปฏิกิริยาดังแสดง



สำหรับไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ที่นิยมใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนมีอยู่ 2 ชนิด คือ โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI) และเมทิลไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate, MDI) โดย TDI มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 5-15°C เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิปกติจะเป็นของเหลว TDI มีการใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตโฟมชนิดยืดหยุ่นจำพวกเบาะรถยนต์ ที่นอน ฟองน้ำเทียม เป็นต้น สำหรับ MDI จะใช้ในกระบวนการผลิตโฟมชนิดแข็งที่ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อน เช่น โฟมในตู้เย็น ห้องเย็น เป็นต้น บางครั้งมีการนำเอาไอโซไซยาเนตทั้งสองชนิดผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โฟมที่มีสมบัติตามต้องการ ไอโซไซยาเนตเมื่อทำปฏิกิริยากับพอลิออลจะคายความร้อนออกมาพร้อมกับเกิดพันธะทางเคมีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำ MDI และ TDI ไปใช้เพื่อผลิตสารเคลือบผิว กาว และอีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทน (Elastomer polyurethane)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิยูรีเทน

ในปี พ.ศ. 2540 เอก อัครกานัญจนสุภา [26] ศึกษาการเตรียมอีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทนด้วยสารเชื่อมขวางที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นใหม่ คือ Bis-(3-N,N'-diallylamin-2-propanol) diphenylolpropane (BDPD) และ N,N,N',N'-tetrakis-(3-allyloxy-2-propanol) ethylenediamine (TAPE) สารเชื่อมขวางที่เตรียมได้นี้มีหมู่พันธะคู่อยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง และมีหมู่ไฮดรอกซีเป็นหมู่แทนที่ในโมเลกุล ทำให้ได้อีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างแบบร่างแห โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ อีพอกซีเรซิน ไดเอิลลิเอมีน เอทิลลีนไดเอมีน และเอิลลิไกลซิดิลอีเทอร์ นอกจากนี้ยังได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโครงสร้างร่างแหของอีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทน และพอลิสไตรีน โดยใช้กระบวนการเตรียมแบบวันชอต ความเข้ากันได้ของวัสดุภาคในอีลาสโตเมอร์สามารถสังเกตได้จากความใสของชิ้นงาน และสามารถดูได้จากเครื่องสแกนนิ่ง อิเล็กตรอน ไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) และเมื่อทำการวัดสมบัติเชิงกลของอีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทน และพอลิเมอร์ผสมโครงสร้างร่างแหของอีลาสโตเมอร์พอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน ได้แก่ ความทนแรงดึง เปอร์เซ็นต์การหดตัว ณ จุดขาด และความแข็ง พบว่าชิ้นงานที่ได้มีค่าทนต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 2.60 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าอยู่ในช่วง 77.3 ถึง 170.7 เปอร์เซ็นต์ ความแข็ง (Shore A) มีค่าอยู่ในช่วง 3.8 ถึง 62.4 ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยมวลและปริมาณของสไตรีน

ในปี พ.ศ. 2533 ศิริลักษณ์ นิรัฐจรรยา [27] ศึกษาการเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยของเหลวที่ได้ (Cashew Nut Shell Liquid, NSL) มีลักษณะเหนียวข้นสีน้ำตาลเข้มละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์แทบทุกชนิด ซึ่งของเหลวดังกล่าวประกอบด้วย กรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) ร้อยละ 82 คาร์ดอล (Cardol) ร้อยละ 13.8 2-เมทิลคาร์ดอล ร้อยละ 2.6 และอนาคาร์ดอล ร้อยละ 1.6 เมื่อได้รับความร้อน กรดอนาคาร์ดิกจะเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอล ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของฟีนอล จากนั้นทำวารีนิซพอลิยูรีเทน โดยการทำปฏิกิริยากับโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene Diisocyanate, TDI) โดยมีกลีเซอรอล และสารเร่งแห้ง ซึ่งเป็นสารประกอบแอฟิเนตของ CO Mn Ca Pb และ Zn ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น โดยจะเกิดปฏิกิริยาการเติม (Polyaddition) ได้ผลิตภัณฑ์คือพอลิยูรีเทน ที่เป็นวารีนิซสำหรับเคลือบผิววัสดุ จากผลการทดลองพบว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่ให้ และไม่ให้ความร้อน โดยปฏิกิริยาที่ไม่ได้ความร้อนจะเกิดพอลิยูรีเทนที่เร็วกว่าโดยใช้เวลาแห้ง 29 ชั่วโมง เมื่อใช้ส่วนผสมน้ำมัน CNSL กลีเซอรอล และโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต ในอัตราส่วน 50:15:15 และใช้สารเร่งแห้งเป็นสารละลายผสมของ 10% โคบอล แอฟิเนต 0.06 ซม.³ 12% แมงกานีส แอฟิเนต 0.04 ซม.³ 32% เลดแอฟิเนต 12% ซิงค์แอฟิเนต 0.02 ซม.³ และ 10% แคลเซียมแอฟิเนต 0.02 ซม.³



ในปี ค.ศ. 2004 G. Maier, et al. [28] ได้ศึกษาการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของสารประกอบบล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่าง Hydroxyl-Terminated Liquid Natural Rubber (HTNR) และ α,ω -Diisocyanato Telechelics สารประกอบนี้จะมีลักษณะเป็น nonpolar soft segments คือ HTNR และส่วน polar hard segments คือ α,ω -Diisocyanato Telechelics ซึ่งสังเคราะห์โดยใช้เทคนิค "criss-cross"-cycloaddition โดยใช้ Isophorone diisocyanate และ 4-methoxy benzaldazine ที่อุณหภูมิ 80°C ในสารละลาย 1,2-dichloroethane และมี Dibutyltin dilaurate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารประกอบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้ถูกยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค ^1H NMR FT-IR และ UV-vis สเปกโทรสโกปี พบว่าสารประกอบดังกล่าวเกิดการ coupling ในส่วนของ segments และตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลโดยเทคนิค GPC พบว่าสารประกอบโคพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 19,000–41,000 จากนั้นสารประกอบบล็อกโคพอลิเมอร์ทำให้คงรูปโดยใช้ความร้อนที่ 160°C และศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยใช้เทคนิค DSC พบการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ -40°C ซึ่งเป็น T_g ของ NR และการเปลี่ยนแปลงที่ 50°C ซึ่งอาจเป็นส่วนของสารประกอบบล็อกโคพอลิเมอร์ และส่วนที่เด่นชัดที่สุดคือที่ 180°C เป็นสัญญาณการคายความร้อนของ NR สำหรับสมบัติ stress-strain พบว่ามีลักษณะคล้ายยางยืดมีค่าการยืด ณ จุดขาดถึง 200% จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการละลาย พบว่าสารประกอบบล็อกโคพอลิเมอร์สามารถละลายและบวมในสารละลายที่ไม่มีขั้ว เนื่องจาก α,ω -Diisocyanato Telechelics มีส่วนของ hydrophilic ร่วมกับ nonpolar ซึ่งเป็นส่วนของยางธรรมชาติ

สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ และช่วยให้ผิวของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความทนทานต่ออากาศ น้ำและสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความแข็งแรงขึ้นทนทานต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น และอายุการใช้งานมากขึ้นเพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงามความสวยงามของวัสดุหลังจากการเคลือบผิวออกมาจากสี ความเงา ลวดลายตกแต่งหรือความสว่าง [29] ซึ่งในปัจจุบันสารเคลือบผิวแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. สี (Paint) หมายถึงสารที่มีส่วนผสมของผงสี (Pigment) สารยึด (Binder) หรือสิ่งนำสี (Vehicle) ตัวทำละลาย (Solvent) สารเติมแต่ง (Additives)
2. วาร์นิช (Varnish) คือสารเคลือบผิวที่ประกอบไปด้วยสารยึดเพียงอย่างเดียว
3. แล็กเกอร์ (Lacquer) คือสารละลายซึ่งได้จากการนำเรซิน หรือสารยึดมาละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เช่นสารกันซึม (Sealers) สารกันซึมใช้เคลือบผิวหน้าวัสดุที่มีรูพรุนสูงหรือใช้

เคลือบวัสดุที่ปล่อยสารบางประเภทออกมาซึ่งจะมีผลทำให้ฟิล์มของสีเสียหายได้ตัวอย่างของวัสดุที่มีรพุนสูงได้แก่ ไยหิน (Asbestos) พลาสติก และไม้อัดซึ่งไม้มักปล่อยเรซินบางประเภทไหลซึมออกมาจากตาไม้ (Knot) ทำให้ฟิล์มของสีที่เคลือบอยู่นิ่มและเกิดการเปลี่ยนสีซึ่งแก้ไขได้โดยใช้สารกันซึมเคลือบที่ผิวหน้าวัสดุก่อนสารกันซึมที่ใช้นี้มักเป็นสารละลายของเซลแลกในเมทิลเลเตดสปีริต และเรียกกันว่า 'knotting'

สารเคลือบผิวมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการใช้งานของสารเคลือบผิวนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับวัสดุที่เราต้องการเคลือบเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม และสารเคมีต่างๆ ได้ดี ซึ่งมีการใช้งานดังต่อไปนี้

1. สีรองพื้น (Primers) สำหรับไม้

สีรองพื้น (Primers) สำหรับไม้ แบ่งเป็น 4 ชนิด

1.1 สีรองพื้นตะกั่วเป็นที่ยอมรับในสมัยแรก เรียกกันว่า 'Pink primer' ทำจากของผสมระหว่างน้ำมันตะกั่วแดง และตะกั่วขาว แต่เนื่องจากเป็นพิษจึงมีการใช้น้อยลง

1.2 สีรองพื้นไร้ตะกั่ว (Leadless Primer) มักทำจากน้ำมันวารินิซ พอลิยูทีรีน หรืออัลคิเดเรซินและนำมาผสมกับผงสีที่ไม่เป็นพิษ

1.3 สีรองพื้นจากอะลูมิเนียม (Aluminium Primer) โดยมีข้อดี คือป้องกันความชื้นได้ดีเนื่องจากผลอะลูมิเนียมมีรูปร่างของอนุภาคเป็นแผ่นเล็กและยังช่วยเสริมแรงให้กับฟิล์มอีกด้วย

1.4 สีรองพื้นอิมัลชัน (Emulsion Primer) เป็นการนำสีอิมัลชันที่ทำจากอะคริลิกเรซินมาใช้ทำเป็นสีรองพื้นสำหรับไม้ มีข้อดีคือไม่เป็นพิษ ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่น และยึดกับผิวของไม้ได้ดี

สำหรับพื้นผิวที่มีสภาพเป็นต่าง และมีรพุนสีรองพื้นที่ใช้กับวัสดุประเภทนี้ต้องทนต่างและสามารถอุดพื้นผิวส่วนที่เป็นรพุนได้ คือทำหน้าที่เป็นทั้งสารกันซึมและสีรองพื้นซึ่งการทำหน้าที่เป็นสารกันซึมที่ดีต้องมีสารยึดที่ดีซึ่งได้จากน้ำมันวารินิซหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารยึดได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน ยางคลอริเนเตด ไวนิลอิมัลชันและสไตรีน-บิวตะไดอีนโคพอลิเมอร์ เป็นต้น

2. สีรองพื้น สำหรับเหล็กและเหล็กกล้า

โลหะเหล็กเกิดการกัดกร่อนได้ เมื่อสัมผัสกับน้ำออกซิเจน แก๊สออกซิเจนหรือด่างที่มีอยู่ในบรรยากาศการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้เมื่อจุ่มหรือแช่ในของเหลวเป็นเวลานานๆ เมื่อเกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมจะใช้งานไม่ได้ จึงต้องมีการเคลือบผิวก่อนใช้งานการเคลือบผิวดังกล่าวด้วยสังกะสี ดีบุก และแคดเมียมจะให้ผลดีเนื่องจากความชื้นและออกซิเจนไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปได้สีรองพื้นสำหรับเหล็ก เช่น บลาสต์ไพรเมอร์ วอชไพรเมอร์ ซิงกรีซไพรเมอร์

3. สตอปเปอร์ และ ฟิลเลอร์ (Stoppers and Fillers)

สตอปเปอร์เป็นสารที่ใช้อุดรอยแตก หลุม และรอยเว้าลึกๆ โดยการใช้เกรียงปาดไปบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการอุดมีลักษณะเป็นสารข้นและเหนียว และต้องไม่หดตัวเมื่อแห้ง การเตรียมสตอปเปอร์สามารถทำได้โดยการนำเรซินชนิด short-oil มาผสมกับผงสีด้วยลูกบดหรือลูกกลิ้ง ฟิลเลอร์หมายถึง สีที่ใช้อุดรูเล็กๆ โดยใช้แปรง หรือโดยการพ่นเพื่อให้พื้นผิวที่จะเคลือบเรียบสม่ำเสมอ ฟิลเลอร์จะให้ฟิล์มที่แข็งแรงและสามารถดูหรือขัดออกเพื่อให้ผิวเรียบได้ง่าย นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้ยังมีความยืดหยุ่นจึงเป็นการช่วยเสริมการยึดเกาะของสีชั้นถัดไปมีองค์ประกอบเหมือนกับสตอปเปอร์แต่ต่างกันตรงที่ฟิลเลอร์จะมีปริมาณของตัวกลางหรือสารยึดมากกว่าและมีผงน้อยกว่า

4. สีชั้นล่าง (Undercoats)

เป็นสีที่ใช้เคลือบบนผิวหลังจากการรองพื้นหรืออุดรูมาแล้วหรือใช้เคลือบหลังจากการเตรียมพื้นที่ผิวที่เคลือบมาก่อนแล้วและก่อนการเคลือบชั้นสุดท้ายสีชั้นล่างควรมีความสามารถในการปิดบังผิวหน้าดีมีสีเดียวกับชั้นสุดท้ายและเข้ากันได้กับสีชั้นอื่น

5. สีทับหน้า (Topcoats or Finishing coats)

5.1 สีทับหน้าเพื่อการตกแต่ง เช่น สีทับหน้าจากอัลคิเดเรซิน สีทับหน้าชนิดกึ่งเงา

5.2 สีทับหน้าสำหรับวัสดุโครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น สะพานท่อส่งน้ำมัน จะต้องสัมผัสกับบรรยากาศภายนอกต่างๆ กันเช่น น้ำทะเล หรือบรรยากาศบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมตลอดเวลา ดังนั้น สีทับหน้าต้องมีความทนทานต่อมลภาวะสูง เช่น สีเมชันรีสีทับหน้าจากยางคลอริเนเตด

5.3 สีทับหน้าสำหรับงานอุตสาหกรรม

6. สีอิมัลชัน (Emulsion Paints)

สีอิมัลชัน (Emulsion Paints) หมายถึงสีที่มีสิ่งนำสีเป็นอิมัลชันของสารยึดกับน้ำ อาจเรียกอิมัลชันว่า สีลาเท็กซ์ (Latex paint) หรือสีน้ำพลาสติก (Plastic paint)

สมบัติของสีอิมัลชัน

6.1 สามารถทำเงาหรือเหลวได้

6.2 ทาได้ง่ายเนื่องจากมีอนุภาคเล็ก

6.3 แห้งเร็ว เกิดเป็นฟิล์มที่ไม่หลุดง่าย

6.4 ทาได้เรียบโดยง่ายแม้ในผิวที่มีรูพรุน

6.5 ทนแดดได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สไตรีน-บิวตะไดอีนลาเท็กซ์ และอะครีกลาเท็กซ์

7. น้ำมัน (Oils)

ถูกนำมาใช้เป็นสารยึดในอุตสาหกรรมเคลือบผิวน้ำมันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวได้มาจาก 2 แหล่งใหญ่ คือ น้ำมันพืช และน้ำมันจากทะเล น้ำมันเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) โดยน้ำมันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว ได้แก่

7.1 น้ำมันลินสีด (Linseed Oil) สกัดจากเมล็ดต้นแฟล็กซ์ (Flax) ต้นไม้ที่เอาเส้นใยมาทำผ้าลินินคุณสมบัติของน้ำมันลินสีด จะทำให้สีลื่นระบายได้ง่ายเมื่อแห้งแล้วจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวภาพทำให้ภาพสีน้ำมันมีลักษณะมันเงา และทนทานมากขึ้น และยังเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้มากที่สุด เพราะหาซื้อได้ง่าย ราคาถูกแต่ถ้าผ่านระยะเวลายาวนาน ลินสีดจะค่อยๆ เปลี่ยนสภาพจากเคลือบใส กลายเป็นสีเหลืองและสีน้ำตาลไหม้ในที่สุด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจจะใช้ระยะเวลาหลายสิบปีขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำมันลินสีด

7.2 น้ำมันทัง (Tung Oil) ฟิล์มที่ได้จากน้ำมันทังจะแห้งเร็วกว่าฟิล์มจากน้ำมันลินสีด แต่ฟิล์มที่ได้มีลักษณะย่น

7.3 น้ำมันโออิทิซิกา (Oiticica Oil) แห้งแบบเดียวกับน้ำมันทังได้ฟิล์มลักษณะย่น และมีคุณภาพด้อยกว่าฟิล์มที่ได้จากน้ำมันทังน้ำมันละหุ่งที่ถูกขจัดน้ำออก (Dehydrated Castor Oil, DCO) มักแห้งตัวเป็นฟิล์มย่นแต่ไม่มากเท่าน้ำมันทัง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการเกิดเป็นฟิล์มย่นนี้ได้โดยการเลือกใช้สารเร่งแห้งให้เหมาะสม

7.4 น้ำมันทอลล์ (Tall oil) นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอัลคิเดเรซินเป็นส่วนใหญ่นอกจากนี้นำมาใช้ทำสีเข้มๆ และหมึกพิมพ์น้ำมันปลา (Fish Oil) เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวแต่จะมีกลิ่นคาวเพราะมีโปรตีนจากเนื้อปลาน้ำมันข้น (Bodied Oil) การใช้มักนำมาผ่านกระบวนการบางอย่าง เพื่อสมบัติดีขึ้นเสียก่อนแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้คือ

7.4.1 สเตนดออยล์ (Stand Oil) มักใช้เคลือบป้องกันไม้และโลหะ เนื่องจากมีสมบัติการไหลและทนน้ำดีและให้ฟิล์มที่มีความเงา

7.4.2 น้ำมันเป่าอากาศ (Blown Oil)

7.4.3 น้ำมันต้ม (Boiled Oil) ไม่ใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวแต่ใช้เป็นเอกซ์เทนเดอร์สำหรับยาง

8. เรซินธรรมชาติ (Natural Resins)

เป็นของเหลวที่ปลดปล่อยออกมาจากเปลือกไม้หรือต้นหรือสัตว์เป็นสารพอลิเมอร์หรือสารที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ แบ่งเป็น 3 ชนิด คือซากดึกดำบรรพ์ (Fossil) ซากกึ่งดึกดำบรรพ์ (Semi-fossil) และเรซินใหม่ (Recent resins) ชันสน (Rosin or Colophony) นับว่าเป็นวัตถุติดที่

สำคัญตัวหนึ่งในอุตสาหกรรมเคลือบผิวเรซินธรรมชาติอื่นๆ ซึ่งสามารถแบ่งเรซินออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่

- 8.1 อำพัน (Amber) เป็นดีกดำบรรพ์ มีความแข็งและเสถียร
- 8.2 แดมมาร์ (Dammar) จัดเป็นเรซินใหม่ที่อ่อนนุ่ม มักใช้ผสมในไตรเซลลูโลสแลกเกอร์
- 8.3 แมสติก (Mastic) ใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์
- 8.4 แซนดาแรก (Sandarac) ใช้ทำวาร์นิชสำหรับภาพเขียนเนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงและสุกใส

9. เรซินสังเคราะห์ (Synthesis Resins) อัลคิเดเรซิน (Alkyd Resins) เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมากที่สุด เนื่องจากมีสมบัติดังนี้

- 9.1 มีสมบัติในการทำให้เปียก
- 9.2 ราคาถูก
- 9.3 คงทนดีมาก
- 9.4 อ่อนตัว ไม่เปราะ
- 9.5 รักษาความเงาของฟิล์มได้ดี
- 9.6 ทนต่อความร้อนและตัวทำละลายองค์ประกอบของอัลคิเดเรซินเป็นโพลีเอสเตอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างโพลีไฮดริกแอลกอฮอล์กับกรดไดหรือโพลีเบสิก
- 9.7 ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resins) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดแรกที่เกิดขึ้นในทางการค้า มีสมบัติเป็นฉนวนยอดเยี่ยมทนต่อความร้อน ความชื้น เคมีภัณฑ์ต่างๆ และทนการกัดกร่อนได้อย่างดีอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resins) เป็นเรซินที่ใช้ประโยชน์ได้มากในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

- 9.7.1 ทนทานเคมีภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อด่างทั้งหลาย
- 9.7.2 ยึดกับผิวหน้าต่างๆ ได้ดี
- 9.7.3 มีความแข็งแรง และอ่อนตัวไม่เปราะ

ข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิวมีสาเหตุดังนี้

1. การเตรียมพื้นผิววัสดุที่ต้องการเคลือบยังไม่ดีพอ เช่น พื้นผิวไม่สะอาดหรือแห้งไม่สนิท ใช้เทคนิคหรือกรรมวิธีการเคลือบไม่ถูกต้อง ทำการเคลือบภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิต่ำเกินไป ความชื้นสูงเกินไป เคลือบผิวหนา หรือบางเกินไป เลือกใช้สารเคลือบผิวที่ไม่เหมาะสมกับพื้นผิววัสดุ หรือเลือกใช้วัตถุดิบที่ไม่เหมาะสมกับชนิดของสารเคลือบผิว

ลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดกับสารเคลือบผิว

การเป็นฝ้า: ลักษณะฝ้าคล้ายหมอกเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มของสีเคลือบ ทำให้เกิดการตกตะกอน ทำให้ความเงาลดลงกำจัดได้โดยใช้ผ้าเปียกเช็ดและป้องกันการเกิดฝ้าโดยใช้แคลเซียมแนฟทีเนตลงในสารเคลือบผิว

ความดำน (Blushing): ลักษณะที่บดบังแสงของฟิล์มแล็กเกอร์ที่กำลังแห้งเกิดจากการตกตะกอนส่วนที่เป็นของแข็งของผลิตภัณฑ์ ความดำมี 2 แบบ คือความดำเนื่องจากความชื้นสาเหตุมาจากความชื้นสูง และความดำเนื่องจากกัมสาเหตุมาจากใช้สารละลายไม่ถูกต้อง

การพอง (Blistering): เป็นการพองของฟิล์มสีที่แห้งแล้ว การพองจะเกิดกับสีสำหรับการตกแต่งที่ทำมาจาก Epoxy ester และ Alkyd resin

2. ความดำแปร่ง คือ ความดำทึบของสีต่อขนแปรงเมื่อทาสีด้วยแปรงความดำแปร่งมีสาเหตุจากความหนืดของสีสูงเกินไปแก้ไขโดยการเติมทินเนอร์จะช่วยลดความหนืดรอยแปร่ง

3. การย้อย คือ ฟิล์มสารเคลือบผิวไหลลงมาระหว่างทำการเคลือบ และเกิดการแข็งตัวทำให้ผิวไม่สม่ำเสมอ การเกิดรอยย่นเนื่องมาจากผิวฟิล์มแห้งไม่สม่ำเสมอมีสาเหตุมาจากสารเคลือบผิวมีสารเร่งแห้งมากเกินไป หรือเคลือบหนาไป โดยพบกับฟิล์มของสีขาวที่ตั้งทิ้งไว้นานๆ ซึ่งการเหลืองจะเกิดเร็วยิ่งขึ้นถ้าบรรยากาศมีแอมโมเนียอยู่

งานวิจัยเกี่ยวกับสารเคลือบผิว

ปี พ.ศ. 2552 สุพรรณิ ชันทะเสน [6] ศึกษาปฏิกิริยารีดอกซ์โพลีเมอไรเซชันระหว่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งปลาย (OHTPDMS) และยางธรรมชาติเหลววิพอกซิไดซ์ (LENR) เกิดเป็นยางธรรมชาติเหลว-กราฟ-พอลิไซลอกเซน (PDMS-g-LENR) จากนั้นทำการประยุกต์ใช้ PDMS-g-LENR เป็นสารเคลือบผิวโดยนำไปทำปฏิกิริยาร่วมกับไดไอโซไซยาเนต (1,6-Diisocyanatohexane, HDI) นำไปเคลือบผิวลงบนแผ่นเหล็กและดีบุกและนำไปทดสอบสารเคลือบผิวตามมาตรฐานสารเคลือบผิวสำหรับอุตสาหกรรมรถยนต์ จากผลการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงฟิสิกส์ของสารเคลือบผิว เช่น ความแข็ง การยึดติด การทนแรงกระแทก การโค้งงอ และความต้านทานต่อสารเคมีเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยาเนตของ HDI เพิ่มขึ้น และสารเคลือบผิวที่เตรียมจาก PDMS-g-LENR ผสมร่วมกับไอโซไซยาเนตในอัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลต่อหมู่ไอโซไซยาเนตเท่ากับ 1:0.75 พบว่าให้ค่าการทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่ดีที่สุดโดยมีค่าผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวสำหรับรถยนต์ทุกข้อ ยกเว้นเพียงการทดสอบด้านความแข็ง

ปี ค.ศ. 2009 A. Torlakoglu, et al. [30] ศึกษาการนำขวด PET มาทำเป็นอัลคิไดอะมิโนเรซิน สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิว โดยการทำปฏิกิริยาไกลโคไลซิส PET ด้วยโพรพิลีน ไกลคอล (PG) ในอัตราส่วน 1:2 มีซิงค์อะซิเตทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับพาทาริก แอนไฮไดรด์ (PA) กลีเซอริน (G) น้ำมันมะพร้าว (COFA) ได้เป็น Oil alkyd resins ที่มีความเป็นกรดสูง (30–40 mgKOH/g นำอัลคิไดอะเรซินที่ได้มาผสมกับ 30%, 40% และ 50% ของยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (UF) เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (MF) และ ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์/เมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (อัตราส่วน 1/1 โดยน้ำหนัก) จากนั้นให้ความร้อนที่ 140°C ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ระยะเวลาแห้ง ความแข็ง ความต้านทานการเสียดสี การยึดติด การบวมน้ำ ความต้านทานสภาวะกรดและด่างอ่อน ระยะเวลาการเกิดเจล และการย่อยสลายด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจาก PET ดัดแปร และ MF ให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดีกว่าชิ้นงานที่เตรียมจาก PET ดัดแปรและ UF โดยเฉพาะค่าความแข็ง ระยะเวลาการเกิดเจล และการย่อยสลายด้วยความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารผสมของ UF และ MF ให้อัลคิไดอะมิโนเรซินที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่ำกว่าการใช้เฉพาะ MF แต่สูงกว่าการใช้เฉพาะ UF

ในปี พ.ศ. 2545 นฤมล เครื่องอาจนกุล และคณะ [31] ศึกษาการเตรียมอัลคิไดอะเรซินที่ดัดแปรจากน้ำมันที่สกัดจากพืชให้น้ำมัน 4 ชนิด คือ เมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดดอกทานตะวัน เมล็ดถั่วลิสงและรำข้าว นำน้ำมันพืชที่สกัดได้ไปทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพเพื่อหาค่าไอโอดีน ค่าสะพอนิฟิเคชัน ค่าความเป็นกรด และชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช ซึ่งกระทำโดยใช้โครมาโทกราฟีแบบชั้นบาง เปรียบเทียบกับสารละลายกรดไขมันมาตรฐาน จะพบองค์ประกอบหลักของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืชทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดไลโนเลอิก และกรดไลโนเลนิก และเมื่อนำน้ำมันที่สกัดได้ไปเตรียมอัลคิไดอะเรซินโดยใช้ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) ระหว่างน้ำมันที่สกัดได้ กลีเซอรอล และพาทาลิก แอนไฮไดรด์ (PA) โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งการเกิดปฏิกิริยา พบว่าอัลคิไดอะเรซินดัดแปรที่เตรียมจากน้ำมันรำข้าวผสมน้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันรำข้าวผสมน้ำมันทานตะวันอัตราส่วนผสมร้อยละ 75:25 โดยน้ำหนัก และน้ำมันถั่วลิสงผสมน้ำมันถั่วลิสงผสมน้ำมันทานตะวันอัตราส่วนผสมร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก สามารถผ่านการทดสอบสมบัติการแห้งตัวตามมาตรฐาน ASTM D1640-95 และ ASTM D5895-96 และมีความทนทานต่อสารละลายในสภาวะเป็นกลางได้ดีกว่าสารละลายในสภาวะกรดและสภาวะเบส

ในปี พ.ศ. 2552 ธีรสุดา ประเสริฐ และคณะ [32] ได้ศึกษาการพัฒนาสารเคลือบกันสนิมได้ห้องรถยนต์จากยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้สมบัติตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 775-2531 โดยศึกษาการใช้สารเคมีในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดกับผิวโลหะของยางธรรมชาติ และศึกษาระยะเวลาการวัลคาไนซ์โดยสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์สีเคลือบที่อุณหภูมิห้อง ตลอดจนการป้องกันการเกิดสนิมภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ซึ่งยางธรรมชาติที่เลือกใช้คือยางแผ่นรมควันชั้น 3 และมีการใช้คิวเมอโรนซินปริมาณ 10 phr เพื่อช่วยให้สีเคลือบมีความสามารถในการยึดติดกับผิวโลหะได้ดีขึ้นโดยพบว่าระยะเวลาการวัลคาไนซ์โดยสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์สีเคลือบจากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และการต้านทานต่อตัวทำละลายคือ 5 วัน ได้ผลิตภัณฑ์สีเคลือบยางธรรมชาติ ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 775-2531 และมีความสามารถในการติดประสานกับโลหะที่ดี โดยพบว่าระบบการวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์สีเคลือบมากที่สุดเมื่อกำมะถัน 2.0 phr ร่วมกับ MBS 1.25 phr และ TMTD 0.5 phr และสำหรับการทดสอบการต้านทานสนิมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันคือ ที่สภาวะอากาศปกติ เช่น ในน้ำ และแช่ในน้ำเกลือพบว่าสีเคลือบจากยางธรรมชาติพบร่องรอยสนิมบนโลหะที่เคลือบยางธรรมชาติในสภาวะอากาศปกติ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเติมสารตัวเติมเพื่อต้านทานการกัดกร่อน ทางเคมีไฟฟ้าและสเปย์น้ำเกลือ พบว่า เมื่อใช้ ZnO 10 phr และ ZnS 15 phr จะให้ชิ้นงานที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่ปริมาณของของสารตัวเติมเหล่านี้ไม่มีผลต่อความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน และในการทดสอบเปรียบเทียบกับสีเคลือบโลหะทางการค้า โคลทาร์ อีพ็อกซี 82 พบว่าสีเคลือบจากยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการใช้งานที่ต่ำกว่าสีเคลือบทางการค้า แต่จะมีสมบัติความต้านทานต่อการหักงอที่ดีกว่าสีเคลือบทางการค้า

กาวติดประสานไม้

กาว หมายถึง สารที่ใช้สำหรับยึดเหนี่ยวผิวหน้าของวัสดุสองชิ้นให้สามารถยึดติดกันได้ โดยความแข็งแรงของวัสดุที่เชื่อมยึดกันมีเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ ตามต้องการเช่น กระดาษ ไม้ ผ้า แผ่นยาง แก้ว พลาสติก หรือโลหะ เป็นต้น [33]

สำหรับผลิตภัณฑ์จากไม้เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ต้องใช้กาวในการยึดติดเช่น เครื่องเรือนไม้ ทั้งประเภทเครื่องเรือนจากไม้จริง (Solid wood) และจากไม้ประกอบ (Wood composites) โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม้ประกอบ เช่น แผ่นขึ้นไม้อัดแผ่นใยไม้อัด แผ่นไม้อัด แผ่นไม้บางประสาน และไม้ประสานซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้กาวมากที่สุด

ในอดีตเริ่มใช้กาที่ทำจากโคลน มูลสัตว์แล้วพัฒนาเป็นกาจากเล็บเท้าสัตว์ เขา กระดุก สัตว์ กระดุกปลา กาจากพืชพวกแป้งกาหนัง กาเลือด กาวนม แม้แต่พวกยาง (Resin) จากธรรมชาติ เช่น ยางสน (Resin) ยางไม้ (Gum) และแซลแล็ค โดยนำมาละลายในแอลกอฮอล์แล้วใช้เป็นกาหรือทำเป็นแล็คเกอร์ตกแต่งผิว ป้องกันผิวแต่ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุตั้งที่กล่าวมาน้อยลงจนเกือบไม่มีการใช้แล้วเพราะมีการผลิตกาสังเคราะห์ขึ้นซึ่งกาสังเคราะห์แรกๆ เกิดจากการพัฒนาของกาฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ จนในปัจจุบันเกิดการพัฒนากาขึ้นมามากมายสำหรับงานไม้ทุกๆ การใช้งาน

กาสังเคราะห์ที่ใช้ในงานไม้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. กาเรซินชนิดแข็งตัวเมื่อร้อน (Thermo-setting resins)

เป็นกาที่ได้รับความร้อนจะแปรสภาพเป็นแผ่นแข็งที่ไม่สามารถหลอมละลายได้อีกหรือเป็นกาเรซินที่แข็งตัวโดยการทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างสามมิติกลายเป็นของแข็งในเวลาเดียวกันกับเกิดการยึดติดกับไม้ กาชนิดนี้แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

1.1 กาเรซินชนิดที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับยูเรียเมลามีน ฟีนอลหรือสารอื่น

1.1.1 กายูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (UF, Urea Formaldehyde)

เป็นกาชนิดแรกที่ได้รับการพัฒนาและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางซึ่งมีการใช้กันมาร่วม 60 ปี กายูเรียฟอร์มัลดีไฮด์มีการจำหน่ายกันทั้งในสภาพของเหลว และเป็นผิวนิยมใช้ในการผลิตแผ่นไม้อัด แผ่นปาร์ติเกิล แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiber Board, MDF) แผ่นไม้ระแนงและการปิดผิวไม้บางบนงานเครื่องเรือนแต่มีข้อควรระวังคือเป็นกาทนทานต่อความชื้นแต่ไม่ต้านทานน้ำ

1.1.2 กาเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (MF, Melamine Formaldehyde)

เป็นกาที่คล้ายคลึงกับกา UF มีการนำมาใช้หลังกา UF ประมาณ 20 ปี กา UF และ MF จะมีลักษณะเป็นกาใส มักนิยมใช้ในการผลิตแผ่นพาร์ติเคิลบอร์ด (Particle Board, PB) มีสมบัติพิเศษโดยเฉพาะการต้านทานต่อความชื้นฝน และอากาศร้อน ของแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) กาเมลามีนยังมีการใช้ในการต่อไม้ที่ต้องการใช้ชิ้นงานในสภาพที่เปียกชื้นด้วย

1.1.3 กาฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (PF, Phenol Formaldehyde)

เป็นกายึดติดในผลิตภัณฑ์ไม้สำหรับใช้ในส่วน ไม้อัด (Particle Board) ไม้เนื้อแข็งไม้อัด (Hardwood Plywood Paneling) และแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) เฟอริไนเจอร์ และแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง มีส่วนผสมของเรซิน ผสมใน

อัตราส่วนที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ไม้ประเภทอื่นที่ใช้ส่วนผสมของ UF และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า ผลิตภัณฑ์จากไม้ที่ใช้ PF ปลอ่ยสารฟอร์มัลดีไฮด์มากที่สุด

1.1.4 กาวฟีนอล-เรซอซินอล ฟอรั้มัลดีไฮด์ (P-RF, Phenol-Resorcinol Formaldehyde)

P-RF resins ผลิตโดยการเติม resorcinol ผสมในกาว resole ที่ระยะสุดท้ายของการสังเคราะห์ เป็นกาวสีน้ำตาลเข้มใช้ในการผลิตคานไม้ประสาน (Laminated beams) มีข้อดี 2 ข้อ คือ มีความต้านทานน้ำและมีความไวในการทำปฏิกิริยาซึ่งหมายความว่าสามารถใช้เป็นกาวที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งบางครั้งต่ำถึง 5°C ได้โดยใช้ Paraformaldehyde เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) รอยต่อไม้จะแข็งตัวที่อุณหภูมิได้ถึง 70°C และมีมักนิยมใช้ผสมไม้ผสมในกาวเพื่อปรับปรุงสมบัติการอุดช่องว่างไม้ในการติดไม้แปรรูป

1.2 กาวชนิดที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาแทนนินกับฟีนอลหรือฟอรั้มัลดีไฮด์

สารแทนนินเป็นสารฟีนอลประเภทหนึ่งตามธรรมชาติเกิดที่เนื้อไม้และเปลือกไม้ในปริมาณมากโดยเฉพาะในเปลือกไม้โอ๊ก และวอตเติล การใช้งานกาวแทนนินยังไม่แพร่หลายนัก แต่ก็มีมีการนำไปใช้ในบางประเทศเพื่อผลิตแผ่นพาร์ติเคิลบอร์ด (Particle Board, PB) และแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) ซึ่งจะทำให้มีความต้านทานความชื้นได้ดี

1.3 กาวเรซินชนิดไอโซไซยาเนต (Isocyanate Resins)

แม้ว่าจะถูกใช้เป็น Casting resins และตัวกลางของสี (Paint media) ตั้งแต่ราวปี ค.ศ.1950 แต่ทางด้านงานไม้กลับมีการใช้กันน้อยหรือไม่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้เลย จนถึงปี ค.ศ.1975 ปัจจุบันถูกใช้ในการผลิตแผ่นพาร์ติเคิลบอร์ด (Particle Board, PB) แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) และแผ่นไม้อัดเรียงชั้น (Oriented Strand Board, OSB) เมื่อต้องการชิ้นงานที่มีความทนทานสูง โดยมันจะเกิดการยึดเหนี่ยวทางเคมีกับลิกนินและเซลลูโลสในไม้ กาวชนิดนี้มีราคาสูงแต่เมื่อเทียบปริมาณการใช้ในการผลิต PB แล้วพบว่าใช้ในปริมาณที่ต่ำและถูกพิสูจน์ว่าคุ้มค่าเนื่องจากการยึดเหนี่ยวแบบธรรมชาตินี้จะช่วยลดการใช้ไม้วัตถุดิบได้ถึง 15% โดยจะให้ความแข็งแรงทางกลที่ระดับเดียวกันกับการใช้กาวชนิดอื่นๆ

1.4 กาวเรซินอีพอกซี (Epoxy Resins)

อีพอกซี เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Bisphenol-A กับ Epichlorhydrin ได้เป็นเรซิน (Resin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กัน จึงมีสมบัติต่างกันไปสารหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นสารเร่งแข็ง (สารทำให้แข็งตัว) แต่ที่ใช้กันมากแพร่หลายในขณะนี้คือ Polyamides อีพอกซีเรซินจะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แรงดันอัดข้อต่อไม้เล็กน้อยกาวอีพอกซีมีสมบัติในการอุด

ช่องว่างได้ดี โดยหากใช้ในงานไม้จะใช้ Epoxy ที่เป็นของเหลวมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่ใส่ตัวทำละลายอื่นซึ่งจะแข็งตัวโดยปฏิกิริยาแบบเติม (Addition reaction)

2. กาวเรซินชนิดอ่อนตัวเมื่อร้อน (Thermo-plastic resins)

กาวเรซินชนิดอ่อนตัวเมื่อร้อน (Thermo-plastic resins) หรือร้อนเหลว (Hot-melts) โดยต้องให้ความร้อนขณะใช้งาน และจะกลายเป็นสารยึดติดเมื่อเย็นได้แก่ กาวเรซินพอลิไวนิลอะซิเตต (PVAc resin) ซึ่ง PVAc นี้โดยปกติให้อยู่ในรูปอิมัลชันแม้ว่าจะแข็งตัวโดยการให้ความร้อนบ้าง แต่ก็ยังคงอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงๆ กาวชนิดนี้สามารถถูกปรับปรุงให้มีความหนืดสูงหรือต่ำ แข็งหรืออ่อนหยุ่นได้ (Rigidify or Flexibility) และย้อมสีหรือใส่รงควัตถุเพื่อให้เกิดสีอะไรก็ได้ เป็นกาวที่มี 2 แบบที่ใช้ในงานไม้คือ

2.1 ,แบบโฮโมพอลิเมอร์ซึ่งจะอ่อนตัวทันทีเมื่อได้รับความร้อน

2.2 แบบโคพอลิเมอร์ ซึ่งจะมีการใช้สารเร่ง (Catalyst) เพื่อการยึดเหนี่ยวทำให้มีความต้านทานน้ำและความร้อนดีขึ้น

สำหรับแบ่งขาวโพลหรือแบ่งชนิดอื่นสามารถเติมลงไปผสมเพื่อเพิ่มความหนืดและป้องกันให้กาวเฝือกออกจากข้อต่อหรือผ่านทะลุช่องว่าง (Pores) ของไม้บางออกมา อาจมีการเติมสารจำพวกแร่ธาตุ (Mineral fillers) แต่ต้องระมัดระวังอย่าให้โดนหรือใช้กับวัสดุที่มีฤทธิ์เป็นด่างเพราะจะลดการแข็งตัวของกาว การผสมเกลือโลหะ (Metallic salts) เช่น โครเมียมหรืออลูมิเนียมไนเตรท จะช่วยปรับปรุงให้การต้านทานน้ำดีขึ้นแต่ก็ทำให้อายุการใช้งานของกาว (Pot life) สั้นลง การเติมกาวยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea Formaldehyde, UF) และ กาวเมลามีน-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde, MF) และไอโซไซยานาเตเรซิน ก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติของกาวได้ กาว PVAc ใช้กันแพร่หลายสำหรับการติดไม้บาง การติดกระดาษ และการติด PVC foils กับแผ่นพาร์ติเคิลบอร์ด (Particle Board, PB) ฮาร์ดบอร์ด (Hardboard) และ (Medium Density Fiber Board, MDF) และการประกอบตู้โต๊ะ เป็นต้น

3. กาวระบบร้อนเหลว (Hot-Melt Systems)

กาวระบบร้อนเหลว (Hot-Melt Systems) แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

3.1 กาวร้อนเหลวชนิด EVA (EVA Hot-Melts)

กาวเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate, EVA) เป็นส่วนผสมของ EVA resin ซึ่งเป็นตัวหลักในการทำให้เกิดการยึดติด (Adhesion) และการแตะติด (Tack) นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมของซีฟิ่งเล็กน้อยเพื่อควบคุมระยะเวลาการเปิดและอัตราเร่งการแข็งตัว และยังมี Anti-oxidant เพื่อใช้ลดแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในหม้อต้มกาวที่ร้อน กาวร้อนเหลว EVA นี้ นิยมใช้กันมากถึง 80% ในการติดแถบขอบของแผ่นไม้ และก็มีการใช้กันบ้างในการ

ประกอบติดไม้โดยเฉพาะในการใช้ระบบการเคลือบ ร่วมกับกาว PVAc ในระบบนี้การร้อนเหลวจะใช้เพื่อ ยึดข้อต่อหรือส่วนที่ต้องการเชื่อมยึด ในขณะที่กาว PVAc แข็งตัวและเป็นแรงยึดเหนี่ยวหลัก

3.2 กาวพอลิเอไมด์ (Polyamide Resins)

มีการใช้ในปริมาณน้อยส่วนใหญ่สำหรับการติดขอบที่ต้องการความต้านทานสูง ต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นกาวชนิดนี้คล้ายในลอน และเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันพอลิเมอร์ที่เป็น กรดไขมัน (Fatty acid polymers) กับ ไดอะมีน (Diamine) กาวชนิดนี้นิยมใช้งานน้อย เนื่องจากมีความยากลำบากในการนำมาใช้งานเนื่องจากจุดหลอมเหลวจะสูงมากและง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันซึ่งจะทำให้สมบัติการยึดติดเสียไปดังนั้นในบางครั้งจึงมีการใช้เครื่องทาการที่ปิดอยู่ใน ก๊าซไนโตรเจน กาวพอลิเอไมด์มีการใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับการติดขอบ แต่จะไม่ แพร่หลายในที่อื่น เนื่องจากมีราคาแพงกว่ากาวเอทิลีนไวน์ลอะซิเตท (Ethylene vinyl acetate) และ พอลิยูรีเทน หลายเท่าตัว

3.3 กาวพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefines)

มีการใช้กันไม่แพร่หลายนักในอุตสาหกรรมไม้เนื่องจากสมบัติการยึดติดที่ยังไม่ เด่นชัด แต่สำหรับการติดแถบขอบแล้ว กาวพอลิโอเลฟินส์อยู่ในระดับปานกลางของการต้านทาน ความร้อนระหว่างการใช้กาวเอทิลีนไวน์ลอะซิเตทและกาวพอลิเอไมด์และยังมีราคาที่พอรับได้ กาว นี้เป็นส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนพอลิเอทิลีนและเรซินอื่นคล้ายกับยางธรรมชาติ เพื่อทำให้เกิดการ แตะติด (Tack) มีลักษณะการหลอมเหลวที่ดีกว่ากาวพอลิเอไมด์มีความแข็งแรงการยึดเหนี่ยวที่ดี และมีพิภพของการหลอมเหลวแคบกว่าซึ่งจะช่วยให้การแข็งตัวเร็วขึ้นแต่สมบัติการเป็นกาวด้อย กว่าเมื่อใช้กับพื้นผิวที่ราบเรียบอย่างเช่น PVC

3.4 กาวเรซินพอลิยูรีเทน (Polyurethane Resins)

กาวเรซินร้อนเหลวพอลิยูรีเทน (Polyurethane hot melt resins) ที่ใช้ในการติด แถบขอบจะมีลักษณะการใช้งานและผลิตภัณฑ์คล้ายกับกาวร้อนเหลวเดิมแต่จะทำปฏิกิริยากับ ความชื้นในอากาศและวัสดุที่ต้องการติดเกิดเป็นแนวกาวที่มีสมบัติคล้ายกับการเกิดจากกาวชนิด แข็งตัวเมื่อร้อน (Thermo-setting resins) กาวเรซินพอลิยูรีเทนทำจากการทำปฏิกิริยาไดโอล (Diol) กับไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหที่มีหมว่องไวสูงที่จะทำ ปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลต่อไป

การใช้งานจะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่ากาวเอทิลีนไวน์ลอะซิเตทคือประมาณ 100-140°C โดยต้องป้องกันความชื้นในการเก็บและระหว่างการใช้ซึ่งอาจจะต้องให้อุปกรณ์ระบบปิดที่มี ก๊าซไนโตรเจนการใช้กาวนี้จะใช้เฉพาะที่ต้องการใช้งานที่มีการยึดเหนี่ยวสูง เช่นเมื่อต้องการติดกาว

ตรงรอยแตกของประตูกันไฟ มีราคาสูงประมาณมากกว่า 6 เท่าของกาวเอทิลีนไวนิลอะซิเตทแต่ก็คุ้มค่าหากใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูง ในบางกรณีใช้ติดแถบขอบโดยไม่ใช้ Nitrogen blanket โดยเครื่องจ่ายกาวจะร้อนเหลวบนผิวที่จะติดกาว ทันทีที่แผ่นถูกทาแล้วด้านหน้าของเครื่องจ่ายกาวจะปิดโดยมีแผ่นเลื่อนมาปิดเพื่อป้องกันกาวจากการสัมผัสกับอากาศหรือความชื้น

นอกจากนี้ยังมีกาวอีกประเภทหนึ่ง ที่เรียกว่ากาวติดสัมผัส (Contact adhesives) เป็นกาวที่ประกอบด้วยสารละลายของยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ซึ่งจะแปรสภาพเกิดการยึดติด เมื่อระเหยสารทำละลาย (Solvent) เป็นกาวที่มีการใช้น้อยในงานไม้แต่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานตกแต่งหุ้มเบาะเครื่องเรือน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกาวติดประสานไม้

ปี พ.ศ. 2552 อรพินท์ นัคราจารย์ [34] ศึกษาการทำกาวพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ จากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติเหลวดัดแปรพอลิออล (OLNR) กับ ไอโซไซยาเนต (HDI และ MDI) โดยพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นกาวในการยึดติดระหว่างชิ้นไม้ ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลของ OLNR ต่อหมู่ไอโซไซยาเนต ชนิดของไดไอโซไซยาเนต ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลของ OLNR ชนิดและปริมาณสารขยายสายโซ่ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่ไอโซไซยาเนตที่เพิ่มขึ้น โดยไอโซไซยาเนตชนิดอะโรมาติก (HDI) ให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงกว่าไอโซไซยาเนตชนิดอะโรมาติก (MDI) แต่การเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลของ OLNR จาก 20% เป็น 50% พบว่าความต้านทานต่อแรงเฉือนมีค่าลดลง ในขณะที่เติมสารขยายสายโซ่ชนิดน้ำมันดัดแปรพอลิออล พบว่าทำให้ความต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดคือ 5.54 MPa เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำมันพืชดัดแปรต่อหมู่ไฮดรอกซิลของ OLNR ต่อหมู่ไอโซไซยาเนตของ HDI เท่ากับ 0.4:0.6:2.0

ปี ค.ศ. 2011 X. Kong, et al. [35] ศึกษาสมบัติกาวพอลิยูรีเทนสำหรับติดไม้ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันคาโนลา พอลิออล กับ ไอโซไซยาเนต (MDI) โดยน้ำมันคาโนลาเป็นสารชีวภาพ ที่มี functional groups เป็น primary และ secondary alcohol ตามลำดับ ทั้งยังใช้ต้นทุนการในการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูง ศึกษาอัตราส่วนของ NCO/OH และสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ระยะเวลาการเกิดเจล การทนต่อแรงดึงจากผลการทดลอง พบว่าอัตราส่วนของ NCO:OH เท่ากับ 1.5:1.0 ให้สมบัติการทนต่อแรงดึงดีที่สุดคือ 5.7 MPa นอกจากนี้ยังพบว่าความทนต่อสภาวะน้ำเย็น กรดและด่าง สามารถทนได้ดีเทียบเท่ากับกาว PU ทางการค้า ในขณะที่สามารถทนต่อน้ำร้อนได้ดีกว่า

ปี ค.ศ. 2003 K.P. Somani, et al. [36] ศึกษาการเตรียมกาวพอลิยูรีเทนสำหรับติดไม้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (อะโรมาติกและอะลิฟาติก) และพอลิเอสเทอร์ พอลิเอสเตอร์ พอลิเอสเตอร์นั้นได้เตรียมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันละหุ่ง และไดเอสเตอร์ (ไกลคอล) ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือเอทิลีน ไกลคอล (Polyol A) ไดเอทิลีน ไกลคอล (Polyol B) และไตรเอทิลีน ไกลคอล (Polyol C) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ และ Pus ด้วยเทคนิค FTIR สเปกโทรสโกปี ศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของ NCO/OH และลักษณะของสายโซ่ของไกลคอลแต่ละชนิด และผลของความต้านทานต่อสารเคมี ซึ่งได้แก่ น้ำเย็น น้ำร้อน กรด และเบส จากผลการทดลองพบว่ากาวพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไดไอโซไซยาเนตชนิดอะโรมาติกจะมีความแข็งแรงกว่าชนิดอะลิฟาติก โดยการที่ทำจาก polyol A ที่อัตราส่วน NCO:OH 1:1.3 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงที่สุดคือ $96.9 \text{ N/m}^2 \times 10^5$ และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ polyol A ทำให้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่ได้สามารถทนต่อความต้านทานของสารเคมีได้ดีกว่าการใช้ polyol B และ polyol C ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2552 ตะวัน โบว์พัฒนากุล และอรสา ภัทรไพบลุย์ชัย [37] ศึกษาผลของกาวพอลิยูรีเทนต่อสมบัติการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์และหนังสังเคราะห์ (PVC และ PU) โดยเตรียมกาวพอลิยูรีเทนจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์เฮลวอกซีไดซ์ (OLENR) โดยแปรสัดส่วนโมลระหว่างยาง OLENR กับไดไอโซไซยาเนต ชนิด 4,4'-เมทิลีนบิส (ฟีนิลไอโซไซยาเนต, pMDI) ที่สัดส่วนต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาสมบัติการยึดติดระหว่างยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์ชนิด PVC และชนิด PU โดยการทดสอบแบบลอก (Peel test) ด้วยมุม 180 องศา พบว่าการใช้กาวพอลิยูรีเทนที่สัดส่วนโมลระหว่างยาง OLENR กับไดไอโซไซยาเนต 1.5:1 ร่วมกับการปรับผิวหน้าของยางวัลคาไนซ์ พบว่าหนังสังเคราะห์ชนิด PVC จะให้สมบัติการยึดติดที่ดีที่สุด และให้การยึดติดกับหนังชนิด PU ที่สูงกว่ากาวพอลิยูรีเทนทางการค้า และผลของการปรับผิวหน้ายางวัลคาไนซ์ด้วยสารละลายกรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริกในเอทิลอะซิเตต พบว่าให้ค่าความต้านทานในการยึดติดที่ใกล้เคียงกับสารรองพื้นทางการค้า (Dongsung primer) ที่ความเข้มข้นเดียวกัน

ในปี ค.ศ. (2010) D. Mishra and V. K. Sinha [38] ได้ศึกษาการทำกาวยูรีเทนชนิด Eco-economical ใช้สำหรับงานไม้ โดยใช้ polyols ที่ได้จาก cellulosic เหลือใช้ โดยเตรียมจากการย่อยกระดาษที่เหลือใช้ด้วยกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยเอทิลีน ไกลคอลที่อุณหภูมิ 145-150°C เวลา 2.5 ชั่วโมง ได้สารผสมชนิด glycoside จากนั้นนำ glycoside มาทำปฏิกิริยาน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว ที่อุณหภูมิ 220-250°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ polyols ที่มีสมบัติกายภาพและทางเคมีที่

แตกต่างกัน จากนั้นถูกนำมาใช้เพื่อเตรียมเป็นกาวยูรีเทนสองส่วนสำหรับติดไม้ โดยทำปฏิกิริยากับ ไอโซไซยานาตชนิด TDI จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยเทคนิค FTIR สเปกโทรสโกปี และ TGA และสมบัติการยึดติดของกาวยูรีเทนเทียบกับกาวที่มีขายตามท้องตลาด โดยใช้กาวยูรีเทนใน อัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่ากาวยูรีเทนอัตราส่วน NCO:OH เท่ากับ 1:1.2 ที่ เวลา 5 วัน ให้สมบัติการยึดเกาะและทนต่อความต้านทานต่อสารเคมีได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับกาว ทวการค้าชนิด FevicolTM และ AralditeTM

ในปี พ.ศ. 2552 สุกฤทธิรา รัตนวิไล และคณะ [39] ได้ศึกษาการพัฒนาการสำหรับใช้ในงานติดไม้ยางพาราจากน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) โดยเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์จาก น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) 20% โดยน้ำหนัก และทำ ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ 50°C โดยใช้กรดฟอर्मิกเป็นสารอีพอกซิไดซ์พบว่าปริมาณหมู่ อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ของยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ จากนั้นนำ ENR มาผสมกับสารเพิ่มการยึดติด 2 ชนิด คือ แป้งข้าวเหนียวเจลาตินไนซ์ และคิว มาโรนอิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่ากาวยางที่มีส่วนผสมคิวมาโรน อิมัลชันชนิดเดียว มีค่าความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่ากาวยางที่ผสมแป้งข้าวเหนียวเจลาตินไนซ์ และกาวยางที่ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวเจลาตินไนซ์กับคิวมาโรนอิมัลชัน และมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณคิวมาโรนอิมัลชันที่ใช้ สำหรับกาวยางที่ผสมคิวมาโรนอิมัลชันปริมาณ 8 phr เป็นสูตรกาวที่ ดีที่สุด มีค่าความต้านแรงเฉือน แรงดึงขานานเสี้ยนสูงสุด และค่ามอดุลัสแตกร้าวเท่ากับ 5×10^6 N/m², 28.40×10^6 N/m² และ 20.21×10^6 N/m² ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังน้อยกว่ากาว TOA และกาว UF