

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติเป็นยางไม้ที่ได้จากการกรีดต้นไม้ใหญ่ที่เรียกว่า ต้นยางพารา มีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* และมีถิ่นฐานเดิมอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ ในปัจจุบันนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมถุงมือยาง อุตสาหกรรมยางรถยนต์ เป็นต้น ทั้งในรูปของน้ำยางสด น้ำยางข้นจากการรักษาสภาพ และยางดิบประเภทต่างๆ

##### 2.1.1 สมบัติทั่วไปของน้ำยางธรรมชาติ [3]

เมื่อกรีดยางผ่านเปลือกของต้นยาง จะมีน้ำยางซึมออกมาเป็นของเหลวสีขาวขุ่น คล้ายน้ำมันหรือครีม กลิ่นหอมเล็กน้อย มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 6.5 ถึง 7.0 ความหนืดและส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางจะเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาลกรีด เป็นต้น เมื่อนำน้ำยางที่กรีดได้ไปตรวจสอบจะพบว่ามือนุภาคขนาดต่างๆ กันแขวนลอย (Dispersion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร และมีประจุเป็นลบซึ่งผลกักันตลอดเวลา จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีปัจจัยต่างๆ มารบกวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับส่วนของสารที่เป็นตัวกลางนั้น โดยทั่วไปเรียกว่า เซรัม (Serum)

น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (Colloid) ชนิดไฮโดรโซล (Hydrosol) หรือสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย แต่มีลักษณะพิเศษกว่าไฮโดรโซลทั่วไป คือ น้ำยางมีลักษณะกึ่งชอบน้ำ (Hydrophilic) คือ ลักษณะที่เป็นสารละลายได้ง่ายเมื่อน้ำเป็นตัวทำละลาย และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือ ลักษณะที่ไม่ยอมรวมกับน้ำ แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นกว่า นอกจากนี้ น้ำยางยังประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ สารพวกโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น องค์ประกอบของน้ำยางจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [3]

องค์ประกอบของน้ำยาง	ปริมาณ (%โดยน้ำหนัก)
ส่วนที่เป็นเนื้อยาง	35
ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง	
-ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม	55
-ส่วนที่เป็นลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่นๆ	10

### ส่วนที่เป็นเนื้อยาง

เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนได้จากหน่วยไอโซพรีน (Isoprene) มาเชื่อมต่อกันแขนงลอยอยู่ในเซรัม อนุภาคยางมีทั้งทรงกลมและรีคล้ายลูกแพร์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02-0.03 ไมครอน โมเลกุลมีขนาดใหญ่ไม่ละลายน้ำ และเมื่ออยู่ในสภาพน้ำยางสดผิวรอบอนุภาคจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารจำพวกไขมันและโปรตีน นอกจากนี้ยังมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียม และทองแดง ปนอยู่ในส่วนของยางประมาณ 0.05% โดยน้ำหนัก

### ส่วนที่ไม่ใช่ยาง

ส่วนที่เป็นน้ำหรือที่เรียกว่าเซรัมของยาง มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้

- คาร์โบไฮเดรต เป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล สารเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นกรดไขมันได้โดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน

- โปรตีนและกรดอะมิโนที่สำคัญ ได้แก่ แอลฟาไกลูโบลิน และฮีวิน ซึ่งแอลฟาไกลูโบลินพบมากในน้ำยางสดมีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายของเกลือ กรดและด่าง สำหรับฮีวินมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10,000 และสามารถละลายน้ำได้ สารพวกโปรตีนประมาณครึ่งหนึ่งละลายอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำ อีกหนึ่งในสี่ถูกดูดซับอยู่รอบๆ ผิววนอกของอนุภาคยางและที่เหลือปะปนอยู่ในส่วนของลูทอยด์

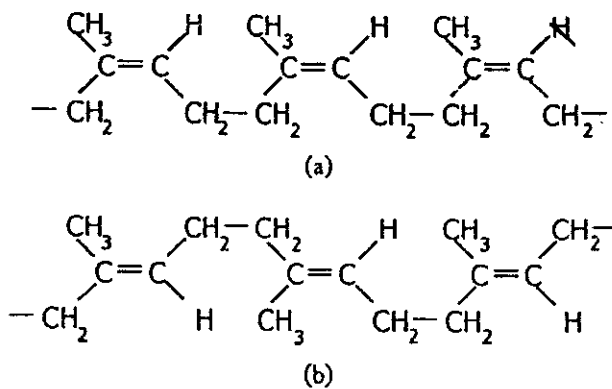
- ลูทอยด์ (Lutoid) หรือวิสคอยด์ (Viscoid) ในน้ำยางมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมมีเยื่อหุ้มห่ออยู่ภายในเยื่อประกอบด้วยสารละลายพวกกรด กรดเกลือแร่ โปรตีน น้ำตาล และโพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenoloxidase) มีผลต่อความหนืดและความเสถียรของน้ำยางสดลูทอยด์มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาออกสโมติกได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางมีผลทำให้ลูทอยด์เกิดการบวมตัวและแตกออกซึ่งเป็นผลให้ของเหลวภายในลูทอยด์ออกมาอยู่ในส่วนของเซรัม ทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะมีสารพวกลูทอยด์แล้วยังมีสารอีกประเภทหนึ่ง เรียกว่า อนุภาค

เฟรย์-วิสลิง (Frey wysling) ซึ่งมีลักษณะกลม สีเหลืองเข้ม และมีอนุภาคใหญ่กว่าอนุภาคยาง มีสารคาโรทีนอยด์ (Carotinoid) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสีเหลือง น้ายางชั้นที่ได้จากการหมุนเหวี่ยงโดยการเติมแอมโมเนียจะไม่พบอนุภาคเฟรย์-วิสลิงอยู่ด้วย อาจเป็นเพราะอนุภาคเหล่านี้ถูกแยกออกจากยางและละลายอยู่ในส่วนของเซรัม

### 2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีชื่อทางเคมีว่า โพลีไอโซพรีน (Polyisoprene) ซึ่งได้จากหน่วยของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง แต่ละหน่วยไอโซพรีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม มีสูตรเคมี คือ  $(C_5H_8)_n$

การเชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลนั้นอาจเชื่อมได้ 2 แบบ คือ แบบซิส (cis-form) และแบบทรานส์ (trans-form) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง ดังนี้



(a) cis-1,4 Polyisoprene

(b) trans-1,4 Polyisoprene

ภาพประกอบที่ 1 แสดงโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ [4]

ยางพาราประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเกือบทั้งหมด (ประมาณ 97%) เป็น cis-1,4 ดังนั้นชื่อทางเคมีที่แท้จริงของยางพารา คือ cis-1,4 Polyisoprene สำหรับยางกัตตาเปอร์ชา (Gutta-percha) หรือยางบาลาด้า (Balata) มีโครงสร้างเป็น trans-1,4 Polyisoprene ยางกัตตาเปอร์ชามีปลุกอยู่ในประเทศมาเลเซีย ส่วนยางบาลาด้ามีปลุกอยู่ตามชายฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้และประเทศอินโดเนเซีย ในทางการค้าไม้ค้อยมีความสำคัญมีการใช้งานน้อยซึ่งแต่เดิมใช้ทำสายเคเบิลได้นำ ในปัจจุบันใช้หุ้มลูกกอล์ฟและทำกาวยพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางแข็งตัวเร็วมากในอากาศ [3]

### 2.1.3 การรักษาสภาพน้ำยางธรรมชาติ [5]

น้ำยางสด (Field latex) ที่ได้จากต้น เมื่อทิ้งไว้ส่วนที่เป็นน้ำจะค่อยๆ ระบายไปทำให้ น้ำยางข้นขึ้น หรือถ้า น้ำยางถูกรบกวนจนทำให้ สารที่ห่อหุ้มเม็ดยางแตกออก เม็ดยางจะจับตัวเป็นก้อนเล็กๆ ที่เรียกว่า เม็ดพริก และถ้าแตกออกมากก็จะจับตัวเป็นก้อนใหญ่ นอกจากนี้ถ้าใส่กรดลงไปจะช่วยให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนเร็วขึ้น เพราะฉะนั้นถ้าไม่เติมสารเคมีเพื่อป้องกันการจับตัวของเม็ดยางแล้ว น้ำยางสดจะคงสภาพอยู่ได้ไม่เกิน 3 ชั่วโมง ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการจับตัว คือ ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในน้ำยาง อุณหภูมิ และสมบัติความคงตัวของน้ำยางแต่ละพันธุ์ ซึ่งสัมพันธ์กับธาตุโลหะที่มีอยู่ในน้ำยางและฤทธิ์ของกรดที่เกิดจากการกรีดต้นยาง เมื่อน้ำยางเสียดสภาพ จะเกิดการแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อกับส่วนที่เป็นเซรุ่ม ซึ่งภายหลังจะเกิดการบูดเน่าและมีกลิ่นเหม็น เพราะฉะนั้นสิ่งสำคัญที่ควรกระทำ คือ ภายหลังจากที่ได้ น้ำยางจากการกรีดมาแล้วภายใน 2-3 ชั่วโมง ต้องรีบเติมสารรักษาสภาพน้ำยางลงในน้ำยางเพื่อควบคุมการเกิดกรดไขมันทำให้น้ำยางคงสภาพเป็นของเหลวอยู่เสมอ สารเคมีที่ใช้รักษาสภาพน้ำยางมีหลายชนิด ได้แก่ แอมโมเนีย ฟอสเฟต คอสติค โซดา โซเดียมไบซัลไฟต์ ฟอรัมาลดีไฮด์กับบอเรต และออกซาเรต เป็นต้น การใช้แอมโมเนียมีข้อดี คือ สามารถเติมในน้ำยางได้ง่าย และไล่ออกจากน้ำยางได้ง่ายเช่นกัน

การเก็บรักษาสภาพน้ำยาง มี 2 ประการ คือ

1. เก็บรักษาในระยะสั้น (Short-term preservation) วัตถุประสงค์ คือ เพื่อรักษาสภาพน้ำยางให้คงเป็นของเหลวในช่วง 2-3 วัน ก่อนที่จะนำไปทำยางแห้งชนิดต่างๆ หรือก่อนที่จะทำเป็นน้ำยางข้น สารที่ใช้ เรียกว่า สารป้องกันน้ำยางจับตัว (Anticoagulant)

2. เก็บรักษาในระยะยาว (Long-term preservation) ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อคงสภาพน้ำยางให้อยู่ในสภาพของน้ำยางข้น ในช่วงที่เก็บอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปหรือรอการส่งน้ำยางข้นไปจำหน่ายต่างประเทศ ซึ่งควรเก็บไว้ได้อย่างน้อย 1 เดือน สารเคมีที่ใช้รักษาสภาพน้ำยางข้นให้เป็นของเหลวอยู่ได้นานๆ เรียกว่า สารรักษาสภาพน้ำยาง (Preservatives) สำหรับน้ำยางข้นที่ใช้แอมโมเนียเพียงอย่างเดียวเพื่อรักษาสภาพน้ำยางจะต้องใช้ปริมาณแอมโมเนียสูงถึง 0.7% โดยน้ำหนัก น้ำยางชนิดนี้ เรียกว่า HA latex (High Ammonia latex) ส่วนน้ำยางที่ใช้แอมโมเนียเล็กน้อยประมาณ 0.2% โดยน้ำหนัก รวมกับสารช่วยอื่นๆ เรียกว่า LA latex (Low Ammonia latex) ตัวอย่างชนิดของน้ำยางและระบบการรักษาสภาพน้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธีการปั่นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของน้ำยางและระบบการรักษาสภาพน้ำยางชั้นที่ผลิตโดยวิธีการปั่น [5]

ชนิดของน้ำยาง	ระบบการรักษาสภาพน้ำยางชั้น
HA	0.7% โดยน้ำหนักของแอมโมเนีย
LA-SPP	0.2% โดยน้ำหนักของแอมโมเนีย + 0.2% โดยน้ำหนักของโซเดียมเพนตะคลอโรฟีเนต
LA-BA	0.2% โดยน้ำหนักของแอมโมเนีย + 0.2% โดยน้ำหนักของกรดบอริก + 0.05% โดยน้ำหนักของกรดลอริก
LA-ZDC	0.2% โดยน้ำหนักของแอมโมเนีย + 0.1% โดยน้ำหนักของซิงค์ไดเอทิลไดไซโอคาร์บาร์เมต + 0.05% โดยน้ำหนักของกรดลอริก
LA-TZ	0.2% โดยน้ำหนักของแอมโมเนีย + 0.013% โดยน้ำหนักของเตตระเมทิลไซยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) + 0.13% โดยน้ำหนักของซิงค์ออกไซด์ + 0.05% โดยน้ำหนักของกรดลอริก

หมายเหตุ สารเคมีที่เติมคิด โดยสัดส่วนน้ำหนัก/น้ำหนักยางทั้งหมด

#### 2.1.4 น้ำยางชั้น (Concentrated latex)

น้ำยางสดจากต้นยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางต่ำ ดังนั้นจึงมีการผลิตน้ำยางชั้นเพื่อแยกส่วนที่ไม่ใช่ยางออกไป ทำให้มีเนื้อยางเพิ่มสูงขึ้นและง่ายต่อการเก็บรักษา

น้ำยางชั้น หมายถึง น้ำยางที่ผ่านการกำจัดน้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% โดยน้ำหนัก ซึ่งจากเดิมมีเนื้อยางแห้งอยู่เพียง 30-40% โดยน้ำหนัก ปัจจุบันความต้องการน้ำยางชั้นเพิ่มมากขึ้น จึงได้ปรับปรุงวิธีการผลิตน้ำยางชั้นให้มีสมบัติที่ดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำยางชั้นเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (Dipping) แบบหล่อ (Casting) แบบพ่น (Spraying) และแบบใช้แม่แบบ (Molding) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางชั้น ได้แก่ ถุงมือ ลูกโป่ง และกาว เป็นต้น

การผลิตน้ำยางชั้นแบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ

1. วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming)
2. วิธีการปั่นโดยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuging machine)
3. วิธีทำให้น้ำระเหย (Evaporation)
4. วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecantation)

#### 2.1.4.1 วิธีทำให้เกิดครีม (Creaming)

เป็นวิธีเก่าแก่ที่สุดในการผลิตน้ำยางข้น โดยทำให้ส่วนที่เป็นยางลอยตัวแยกออกจากน้ำหรือใช้สารที่ทำให้เกิดครีม (Creaming agent) เติมลงในน้ำยางสดที่ผสมแอมโมเนีย (เพื่อป้องกันไม่ให้ยางจับตัวเป็นก้อน) สารพวกนี้ได้แก่ โซเดียมอัลกิเนตหรือแอมโมเนียมอัลกิเนต (Sodium alginate or ammonium alginate) แล้วกวนให้เข้ากับยางตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10-12 วัน ส่วนที่เป็นยางจะลอยขึ้นมารวมกันอยู่ทางตอนบนของส่วนที่เป็นน้ำ ดังนั้นน้ำยางจะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างเป็นน้ำซึ่งมีส่วนที่เป็นยางเพียงเล็กน้อย ส่วนชั้นบนเป็นครีมซึ่งมีปริมาณเนื้อยางสูงประกอบด้วยปริมาณของแข็ง (Total Solid Content, TSC) ประมาณ 61.5% โดยน้ำหนัก (ซึ่งมีเนื้อยางแห้งอยู่ประมาณ 60% โดยน้ำหนัก) น้ำที่อยู่ตอนล่างสามารถระบายออกโดยเหลือน้ำยางตอนบนไว้ หลังจากนั้นให้เติมแอมโมเนียลงไปอีกครั้งเพื่อรักษาสภาพน้ำยางข้นแต่วิธีนี้ไม่นิยมทำกัน เพราะยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา

#### 2.1.4.2 วิธีการปั่นโดยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuging machine)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากในปัจจุบัน น้ำยางข้นที่ได้สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้แทบทุกชนิด เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ใช้ เรียกว่า Latex separator หรือ Latex concentrator เป็นการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกยางที่มากกว่า (ความถ่วงจำเพาะ 0.92) ออกจากของเหลวที่หนักกว่า (ความถ่วงจำเพาะ 1.02) โดยน้ำยางสดที่ใส่แอมโมเนียมาแล้วจะไหลผ่านท่อเข้าไปในถ้วยปั่นแยกและถูกเหวี่ยงโดยการหมุนด้วยความเร็ว 7,000-8,000 รอบต่อนาที โดยวิธีนี้สารจะถูกแยกออกเป็น 2 ทาง ทางหนึ่งเป็นน้ำยางข้นจะถูกเหวี่ยงขึ้นข้างบน และไหลออกตามช่องทางตอนบนของเครื่องที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 61.5% โดยน้ำหนัก (เป็นเนื้อยางแห้ง 60% โดยน้ำหนัก) ส่วนอีกทางหนึ่งอยู่ด้านล่างเป็นน้ำยางที่มีเนื้อยางแห้งปนอยู่เพียง 3-5% โดยน้ำหนัก เรียกว่า หางน้ำยาง (Skim latex)

การผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการปั่นเป็นวิธีที่นิยมและทำกันเป็นการค้ามากที่สุด ส่วนวิธีอื่นๆ จำกัดการใช้ เพราะเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก สิ้นเปลืองเวลา จึงไม่ค่อยนิยมทำเป็นการค้า

#### 2.1.4.3 วิธีทำให้น้ำระเหย (Evaporation)

น้ำยางข้นจากวิธีนี้ มีสมบัติแตกต่างจากวิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง วิธีทำเป็นเพียงการระเหยเอาน้ำออกจากน้ำยางสดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงต้องเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัวและไม่ระเหิดไป ได้แก่ สารจำพวกสบู่ และป้องกันไม่ให้น้ำยางที่บริเวณผิวหน้าหรือบริเวณที่มีการระเหยน้ำเกิดการจับตัว การผลิตทำโดยการกรองน้ำยางตามปกติพร้อมทั้งเติมสารที่ทำให้คงตัวลงไป เช่น สบู่โปแตสเซียมจากน้ำมันมะพร้าว (Potassium coconut oil soap) ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักหลังจาก

นั่นทำให้น้ำระเหยด้วยความร้อน โดยผ่านน้ำร้อนเข้าไปในถัง 2 ชั้น ที่มีน้ำยางอยู่ภายใน ขณะที่ถังบรรจุน้ำยางหมุนไปรอบๆ นั้นอากาศภายในถังจะถูกดูดออกไปพร้อมกับพาน้ำที่ระเหยออกจากน้ำยางออกไปให้เร็วที่สุด วิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งรวมทั้งหมด 70-75% โดยน้ำหนัก น้ำยางชั้นที่ได้มีความคงตัวสูงมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการผสมกับสารที่มีความหนืดสูง เช่น การทำกาว ซีเมนต์ราดถนน เป็นต้น

#### 2.1.4.4 วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecentration)

น้ำยางสดเป็นของเหลวที่มีอนุภาคของยางแขวนลอยอยู่ในของเหลวที่เป็นตัวกลาง การเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องตามประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ เนื่องจากอนุภาคของยางมีประจุลบจึงวิ่งเข้าหาขั้วบวกตลอดเวลา

วิธีการแยกน้ำยางด้วยไฟฟ้านี้ทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในน้ำยาง ทำให้เกิดความต่างศักย์ภายในเซลล์อนุภาคของยางจะวิ่งเข้าหาจากซึ่งเป็นขั้วบวกที่อยู่ใกล้ที่สุด ทำให้อนุภาคยางอยู่รวมตัวกันหนาแน่นจนเกิดเป็นน้ำยางชั้นขึ้น นอกจากนี้อนุภาคยางสามารถลอยตัวขึ้นสู่ข้างบน ซึ่งสามารถช้อนเอาน้ำยางชั้นส่วนนี้ออกจากถังได้ วิธีนี้จะได้น้ำยางชั้นที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 62-63% โดยน้ำหนัก และเนื้อยางแห้ง 60% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจึงเก็บรักษาโดยการเติมแอมโมเนีย 0.7% โดยน้ำหนักลงในน้ำยาง

#### 2.1.5 การเตรียมสารเพื่อใช้ในน้ำยาง

สารจำเป็นต่างๆ ที่จะต้องผสมลงในน้ำยางเพื่อการผลิตวัตถุสำเร็จรูปต่างๆ นั้น จำเป็นต้องทำให้อยู่ในสถานะของเหลวเสียก่อน เช่น ทำเป็นสารละลาย คิสเพิสชันหรืออิมัลชัน (Aqueous solutions, dispersion or emulsions) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารนั้นๆ ว่าเป็นพวกของแข็งที่ละลายน้ำได้หรือไม่ หรือเป็นของเหลวที่ไม่ละลายในน้ำ โดยยกเว้นกรณีพิเศษสำหรับสารเพิ่มบางชนิดที่สามารถผสมในสถานะของแข็งลงในน้ำยางที่จะทำเป็นยางฟองน้ำ และการเติมพวกพลาสติกไซเซอร์ชนิดเอสเตอร์ลงในน้ำยางโพลีไอโซพรีน [3]

หลักการสำคัญในการพิจารณาเติมสารละลายคิสเพิสชัน และอิมัลชันลงในน้ำยางมีดังนี้คือ

##### 1. ขนาดของอนุภาคสารที่กระจายในคิสเพิสชันและขนาดของของเหลวใน

อิมัลชันจะต้องเล็กพอๆ กับขนาดของอนุภาคในน้ำยางที่ใช้ อย่างไรก็ตามหลักการพิจารณาข้อนี้ขึ้นอยู่กับ การแปรรูปน้ำยางเป็นผลผลิตที่ต้องการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อะไร เช่น การผลิตยางฟองน้ำ ยางใช้อนุภาคสารที่มีขนาดใหญ่กว่ากรณีการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทจุ่มแบบพิมพ์ได้

2. ระบบความคงตัวของดิสเพิซชัน และอิมัลชันควรเหมือนกับระบบความคงตัวของน้ำยางที่ใช้ มิฉะนั้นแล้วอาจเกิดปัญหาปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลน้ำยางจับตัวได้

3. ควรปรับระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายดิสเพิซชัน และอิมัลชันให้เท่ากับระดับความเป็นกรด-ด่างของน้ำยางที่ใช้

### 2.1.5.1 การเตรียมสารละลาย

#### 1. สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่ละลายน้ำได้

ในการเตรียมสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่ละลายน้ำได้ มักเกิดปัญหาเกี่ยวกับสารนี้ละลายน้ำได้ไม่ดี และการละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เช่น ไพเพอริดีเนียม เพนตะเมทิลีน ไดไทโอคาบาเมต นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เช่น พวกโซเดียมเมอเคพโทเบนซ์ไทอาโซล ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังกล่าวนี้แล้วสารละลายจะมีลักษณะขุ่นและตกตะกอน อีกทั้งยังทำให้ความว่องไวของสารนี้ลดลงด้วย

#### 2. ไฮโดรคอลลอยด์

ใช้ในงานน้ำยางเพื่อปรับความหนืดหรือรักษาความคงตัวของน้ำยาง หรือส่งเสริมลักษณะครีม เป็นต้น การเตรียมสารละลายจากไฮโดรคอลลอยด์ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีสถานะการละลายสม่ำเสมอคตินั้นมีความยุ่งยากมาก



### 2.1.5.2 การเตรียมคิสเพิซัน

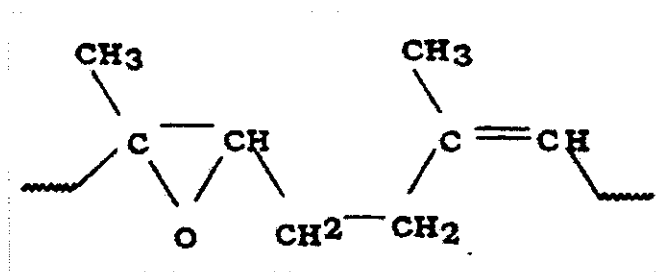
โดยทั่วๆ ไปวิธีการเตรียมคิสเพิซันสำหรับใช้งานน้ำยาง ชั้นแรกคือการผสมสารผงกับน้ำและใส่ตัวการทำให้เกิดคิสเพิซัน และตัวการทำให้เกิดความคงตัวปริมาณเล็กน้อย จากนั้นจึงบดของผสมนี้ด้วยเครื่องบด เพื่อให้บดขยอยอนุภาคของสาร

เครื่องมือที่ใช้บดขยอยอนุภาคของสารแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่บดขยอยสารอนุภาคเล็กละเอียดที่เกาะกันอยู่ แต่จะไม่บดขยอยสารอนุภาคขนาดใหญ่ เครื่องประเภทนี้เรียกว่า คอลลอยด์มิล (Colloid mills) ใช้เตรียมคิสเพิซันของสารพวกซิงค์ออกไซด์
2. ประเภทที่บดขยอยสารอนุภาคขนาดใหญ่ หรืออนุภาคที่เกาะกันแน่น เครื่องประเภทนี้ได้แก่ บอลและเพบเบิลมิล อุลตราโซนิกมิล และแอทริชันมิล (Ball and Pebble mills Ultrasonic mills and Attrition mills) ใช้เตรียมคิสเพิซันของสารพวกซัลเฟอร์ สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น

### 2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR)

น้ำยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำมัน (Hydrophobicity) แต่ในการผลิตกาวซึ่งใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ทำให้สารเคมีที่ใช้น้ำยางพาราผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงต้องแก้ไขข้อด้อยนี้ด้วยการดัดแปลง โมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีลักษณะชอบน้ำมากขึ้น โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีสภาพขั้วใน โมเลกุลจากการทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เพื่อให้ได้เป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ น้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จะสามารถผสมกับสารเคมีได้เข้ากันดีขึ้น และวงแหวนอีพอกไซด์สามารถเกิดอัตรกิริยากับหมู่ไฮดร็อกซิลใน โมเลกุลของไม้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างกาวกับไม้



ภาพประกอบที่ 2 แสดงโครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

### 2.2.1 ลักษณะทางเคมีของปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน [7]

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เตรียมโดยการดัดแปลงโมเลกุลยางธรรมชาติจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

#### สถานะสารละลาย (Solution state)

โดยใช้กรดเปอร์เบนโซอิก (Perbenzoic acid) กรดเปอร์พธาลิก (Perphthalic acid) หรือสารละลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกรดอะซิติกที่มีกรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก เป็นสารเร่งปฏิกิริยา

#### สถานะน้ำยาง (Latex state)

โดยทั่วไปนิยมใช้เปอร์แอซิดเป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปอร์แอซิดที่ใช้ คือ กรดเปอร์อะซิติก และกรดเปอร์ฟอร์มิก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เปอร์แอซิดจะให้ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ค่อนข้างสูงภายใต้สภาวะของการทำปฏิกิริยาและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในสถานะน้ำยางนี้จะมีความสะดวก ปลอดภัยจากตัวทำละลาย ประหยัดและเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจากการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ค่อนข้างน้อย จึงนิยมใช้วิธีการนี้มากกว่า

การใช้สารอีพอกไซด์แต่ละชนิดในปฏิกิริยาออกซิเดชัน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3 [8] โดยวิธีการใช้สารอีพอกไซด์ที่นิยมมีดังนี้ คือ

#### 1. ใช้เปอร์ออกไซด์และไฮโดรเปอร์ออกไซด์

เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ใช้เป็นสารอีพอกไซด์พวกพอลิไอโซพรีน ในกรณีของพอลิบิวตะไดอินใช้ *t*-butylhydroperoxide เป็นสารอีพอกไซด์ แต่สารพวกเปอร์แอซิดเป็นสารอีพอกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าพวกเปอร์ออกไซด์

#### 2. ใช้เปอร์แอซิดโดยตรง

เปอร์แอซิดเป็นสารอีพอกไซด์สำหรับยางไดอิน ในสถานะสารละลายและสถานะน้ำยาง เช่น กรดเปอร์เบนโซอิกเป็นสารอีพอกไซด์ของพอลิไอโซพรีนและพอลิบิวตะไดอิน

#### 3. ใช้เปอร์แอซิดโดยที่เตรียม In situ

3.1 กรดอะซิติกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นกรดเปอร์อะซิติกที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิค่าจะใช้สารเร่งปฏิกิริยา เช่น *p*-toluenesulfonic acid

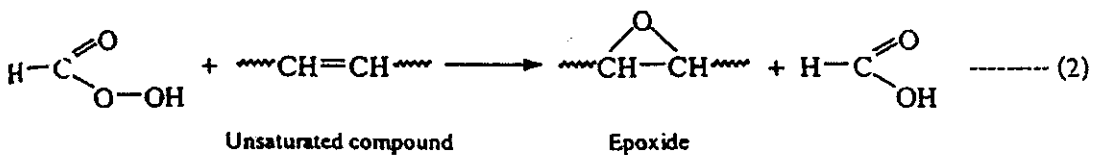
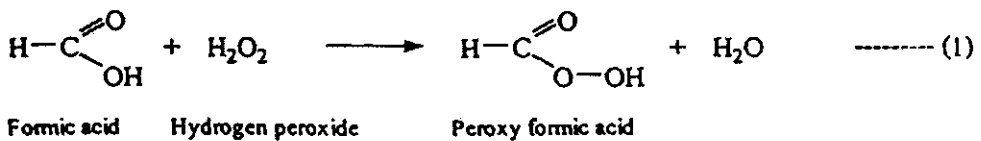
3.2 กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารอีพอกไซด์พวกพอลิไดอินอีลาสโตเมอร์ สำหรับการอีพอกไซด์ยางธรรมชาติในกรณีใช้สารเร่งปฏิกิริยา 1 phr ของ 2,5-di-*t*-phenylhydro quinine ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล

#### 3.3 กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ second acid เช่น กรดซัลฟูริก

ตารางที่ 3 แสดงการใช้สารอีพอกไซด์แต่ละชนิดในปฏิกิริยาออกซิเดชัน [8]

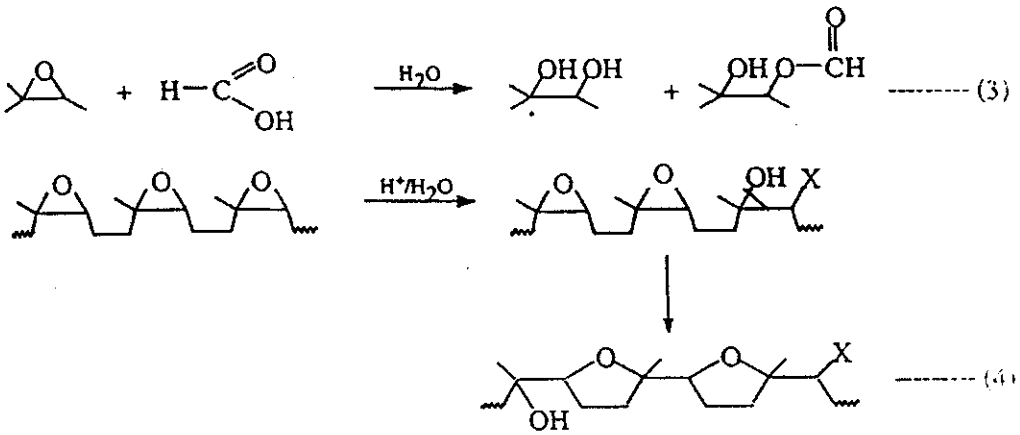
สารอีพอกไซด์	อีลาสโตเมอร์	สภาวะของปฏิกิริยา
- Benzoyl peroxide	Polyisoprene	สารละลาย
- Perbenzoic acid	Polybutadiene, natural rubber	สารละลาย
- Hydrogen peroxide + acetic acid	Polybutadiene, natural rubber	สารละลาย
- Hydrogen peroxide + formic acid	Polybutadiene, natural rubber,	สารละลาย และ latex
- Hydrogen peroxide + formic acid	EPDM,SBR	
+ a second acid	SBR, natural rubber	สารละลาย และ latex

โดยทั่วไปปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติจะใช้กรดเปอร์อะซิติก หรือ กรดเปอร์ฟอร์มิก ซึ่งอาจจะเตรียมเปอร์เอซิดก่อน หรืออาจจะใช้แบบการเกิดเปอร์เอซิดในขณะที่ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (in-situ) ก็ได้ การเกิดเปอร์เอซิดในขณะที่ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน แสดงถึงภาพประกอบที่ 3 อัตราส่วนโดยโมลของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2-0.5 [9]



ภาพประกอบที่ 3 แสดงปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันโดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [9]

ในกรณีการใช้กรดอะซิติกจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เช่น กรดซัลฟูริก หรือกรดซัลโฟนิก เพื่อช่วยให้เกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ในลักษณะเดียวกับปฏิกิริยาที่ (1) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันดังปฏิกิริยาที่ (2) ในภาพประกอบที่ 3 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จะต้องควบคุมสภาวะของปฏิกิริยาอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 แบบ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4 คือ แบบแรกเป็นการแตกของหมู่อีพอกไซด์อย่างง่าย ซึ่งจะได้ไกลคอล (Glycol) และไฮดร็อกซีเอสเทอร์ (Hydroxyester) ดังปฏิกิริยาที่ (3) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ติดกันเมื่อเกิดการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์จะได้ไซคลิกอีเธอร์ (Cyclic ether) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก แสดงดังปฏิกิริยาที่ (4) ในภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 แสดงปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ [9]

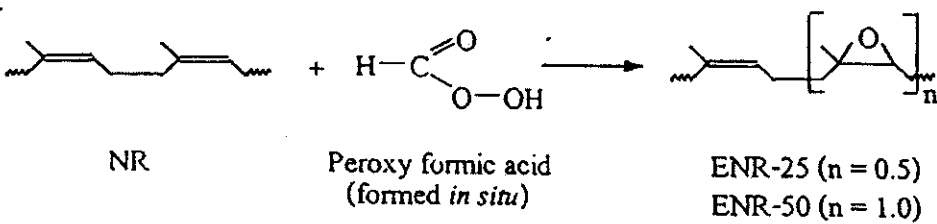
### 2.2.2 การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้วิธีการเกิดกรดเปอร์ฟอร์มิกในขณะทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Hydrogen peroxide / formic acid in-situ) แสดงดังปฏิกิริยาในภาพประกอบที่ 5 โดยควบคุมสภาวะในการเตรียมอย่างระมัดระวัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์ น้ำยางธรรมชาติที่จะนำมาใช้จะต้องนำมาทำให้มีความเสถียรต่อกรดเสียก่อน โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส นำน้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้มาปรับสภาพให้เป็นกลาง หลังจากนั้นทำให้จับตัวด้วยความร้อนล้างด้วยน้ำ แล้วอบแห้งด้วยอากาศร้อน

การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [10] โดยการทำปฏิกิริยาของน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงกับกรดเปอร์ฟอร์มิก ใช้สบู่นิโคตอนไอออนิกเป็นสารเพิ่มความเสถียรของน้ำยาง

ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลของยางมีค่าสูง และเวลาที่น้ำยางเสียสภาพค่อนข้างนาน และค่าความหนืดมูนนี้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์

ในปัจจุบันมีการผลิตยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในการค้า 2 ชนิด คือ ENR-25 และ ENR-50 ซึ่งมีปริมาณหมู่อีพอกไซด์เท่ากับ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล ตัวอย่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่จำหน่ายในทางการค้า เช่น Epoxyrene 25 และ Epoxyrene 50 ของบริษัท Kumpulan Guthrie Berhad ประเทศมาเลเซีย [7]



ภาพประกอบที่ 5 แสดงปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน โดยการใช้กรดเปอร์ฟอร์มิก [7]

ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา [7] ค่าความหนืดมูนนี้ อุณหภูมิคล้ายแก้ว ความเค้นเหนือนและความหนืดเหนือนของยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการรีเอกตีฟเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับแป้งมันสำปะหลัง พบว่าค่าความหนืดมูนนี้ ความเค้นเหนือนและความหนืดเหนือนของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับแป้งมันสำปะหลัง-เจลลาดีโนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ความต้านทานต่อการดึงสูงขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ 50 phr หลังจากนั้นความต้านทานต่อการดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

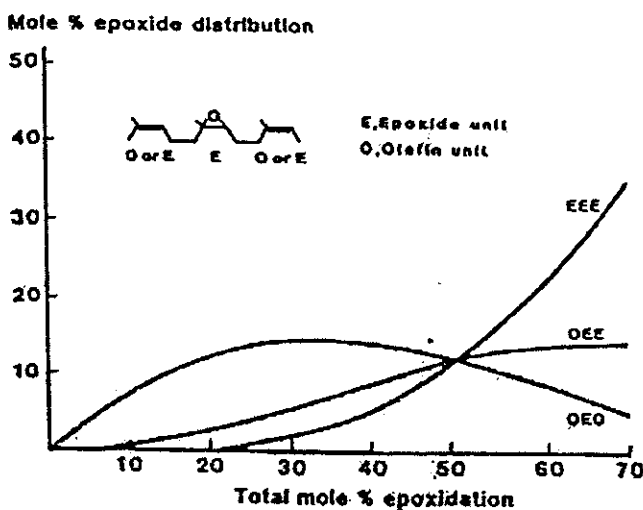
### 2.2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [7]

#### สเตอริโอเคมี (Stereochemistry)

ยางธรรมชาติมีลักษณะของโครงสร้าง โมเลกุลเป็นแบบซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันด้วยกรดเปอร์ออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาเคมีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสเตอริโอเคมีของโมเลกุล ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ได้จะยังคงมีลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบซิส-1,4 (cis-1,4-configuration) ทั้งหมด

### การกระจายของหมู่อีพอกไซด์ (Epoxide distribution)

การกระจายตัวของหมู่อีพอกไซด์ตลอดความยาวของโซ่โมเลกุลจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นอย่างมาก ถ้าให้เกิดอีพอกซิเดชันตรงตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาตินั้นเกิดแบบสุ่ม (Random) และไม่มีการควบคุม พบว่าเปอร์เซ็นต์โมลทั้งหมดของตำแหน่งต่างๆ ของหมู่อีพอกไซด์ที่ระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังตัวอย่างในภาพประกอบที่ 6 พบว่าเมื่อระดับการเกิดอีพอกซิเดชันเพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของหน่วยอีพอกไซด์ (Epoxide unit, E) และหน่วยโอลิฟิน (Olefin unit, O) แบบ O-E-O จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โมล จากนั้นการจัดตัวแบบ O-E-O จะลดลง การจัดตัวแบบ O-E-E จะเริ่มเกิดเมื่อระดับของการเกิดอีพอกซิเดชันประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งการจัดตัวแบบนี้เพิ่มตามระดับของการเกิดอีพอกซิเดชัน และที่ระดับการเกิดอีพอกซิเดชันสูงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะมีการจัดตัวแบบ E-E-E เกิดขึ้น ด้วย ซึ่งการจัดตัวแบบนี้เพิ่มขึ้นอย่างมากและมากกว่าการจัดตัวแบบอื่นๆ เมื่อระดับการเกิดอีพอกซิเดชันสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งนอกจากการคำนวณแล้วยังสามารถตรวจวัดลำดับการจัดตัวของหน่วยอีพอกไซด์ (Epoxide unit, E) และหน่วยโอลิฟินของการเกิดอีพอกซิเดชัน ในยาง ENR-25 และ ENR-50 ได้ โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกนีติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ( $^{13}\text{C}$  NMR) และ  $^1\text{H}$ -NMR พบว่าจะเป็นไปตามผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีรายละเอียดในการคำนวณตามหัวข้อ 2.5



ภาพประกอบที่ 6 แสดงการคำนวณการจัดเรียงหมู่อีพอกไซด์แบบสุ่มของยางธรรมชาติ-อีพอกไซด์ [11]

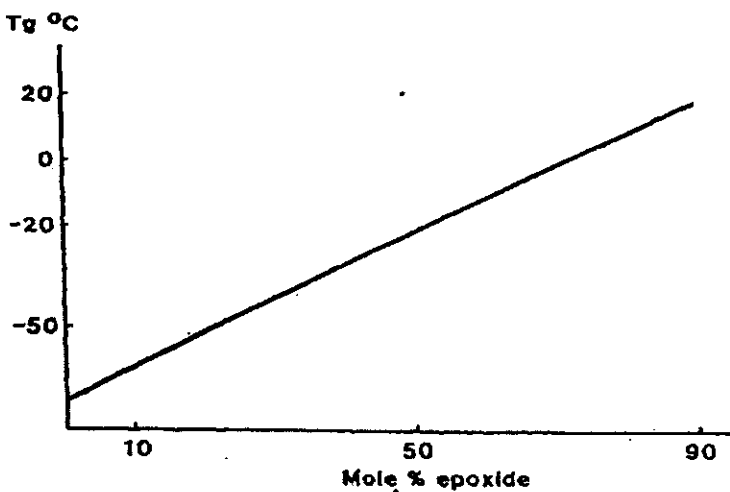
## 2.2.4 สมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [7]

### ความหนืดมูนีและความสามารถในการละลาย

ENR-25 และ ENR-50 มีค่าความหนืดมูนีอยู่ในช่วง 75-90 หน่วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดก่อน (Premasticate) ที่จะนำไปผสมกับสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีสภาพความเป็นขี้ผึ้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ สำหรับความสามารถในการละลายของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะขึ้นอยู่กับระดับของการเกิดอีพอกซิเดชัน และชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถละลายได้ง่ายขึ้นหากมีการบดขย้างก่อน ตัวทำละลายที่เหมาะสม ได้แก่ โทลูอีน คลอโรฟอร์มและเตตราไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF)

### ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg)

การเกิดหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์โมลบนโมเลกุลยางธรรมชาติจะทำให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส [12] ดังแสดงในภาพประกอบที่ 7 ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -47 องศาเซลเซียส และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -22 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ [9]

### ความทนทานต่อน้ำมัน

สภาพความเป็นขี้ผึ้งของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ความต้านทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายเปลี่ยนแปลงไป ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีระดับการอีพอกซิเดชันสูงจะเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารไฮโดรคาร์บอน

แต่ความทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขี้จะลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4 ยาง ENR-50 จะทนทานต่อ ASTM Oil ได้ใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรล์ปานกลาง (Medium NBR, 34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอะคริโลไนไตรล์) และจะทนทานกว่ายางคลอโรพรีน (CR) จึงสามารถใช้ ENR-50 แทนพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านความทนทานต่อน้ำมัน แต่ ENR-50 จะไม่ทนทานไปกว่ายางไนไตรล์ในกรณีของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบ (Alcohol-containing fuels)

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางในของเหลวชนิดต่างๆ [9]

Properties	NR	ENR-25	ENR-50	NBR	CR
70h/100°C in					
ASTM No.1 oil	97	11	-5	-4	2.5
ASTM No.2 oil	145	71	13	7	33
ASTM No.3 oil	209	126	36	18	59
70h/23°C in					
ASTM ref. Fuel B	178	127	59	38	-
Ethanol	-0.45	15	28	16	-
Methyl ethyl ketone	-36	51	98	178	-

### ความทนทานต่อโอโซนและการซึมของอากาศ

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถทนทานต่อโอโซน และการซึมของอากาศได้ใกล้เคียงกับยางบิวไทล์ เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณลดน้อยลง และมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทนที่พันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

### 2.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ (Analysis of Epoxide Level)

การวิเคราะห์ปริมาณหมู่อีพอกไซด์มีหลายวิธีดังรายละเอียดด้านล่าง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี

(Nuclur Magnetic Resonance, NMR analysis)

ตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบต้องเตรียมในรูปของสารละลายเข้มข้นประมาณ 5% โดย

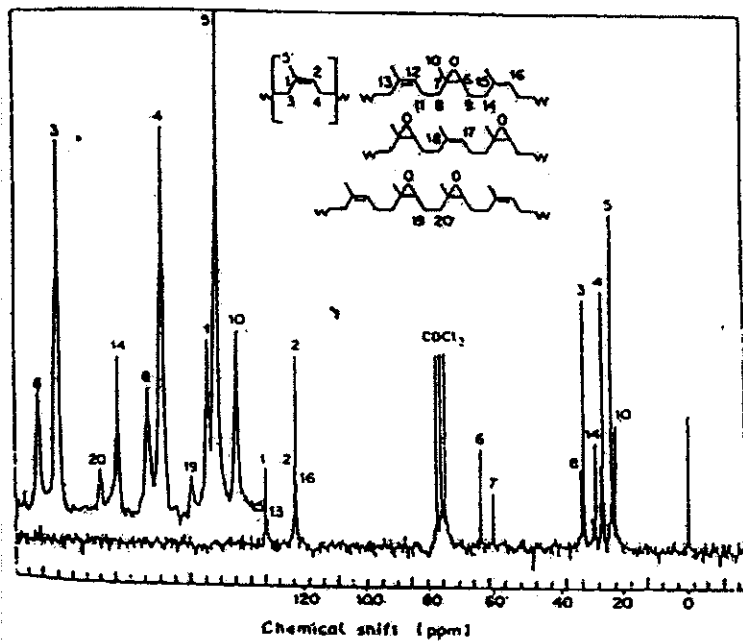


น้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้คลอโรฟอร์มเดอเทอเรต (Deuterated chloroform) ในหลอดทดลองขนาด 5 มิลลิลิตร และใช้เตตระเมทิลซิลาน (Tetramethyl silane, TMS) เป็นสารมาตรฐาน มีการวิเคราะห์ได้ 2 วิธี คือ  $^{13}\text{C-NMR}$  และ  $^1\text{H-NMR}$  spectrum โดยทำที่อุณหภูมิห้อง [13] ตัวอย่างการวัด  $^{13}\text{C-NMR}$  spectrum ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะแสดงการเลื่อน (Chemical shift) ของคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่ (Olefinic carbon) และคาร์บอนของหมู่อีพอกไซด์ (Epoxy ring carbon) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 8

จะเห็นว่าเรโซแนนซ์ของคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่ ปรากฏจุดยอดที่ประมาณ 124.4, 125.0 และ 125.7 ppm และคาร์บอนของหมู่อีพอกไซด์ปรากฏจุดยอดที่ประมาณ 64.5 ppm ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้จุดยอด จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 (เจริญ นาคะสรณ์ และคณะ 2544)

$$\% \text{ Mole epoxide} = \frac{A_{64.5}}{A_{64.5} + A_{124.4, 125.0, 125.7}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่  $A_{64.5}$ ,  $A_{124.4}$ ,  $A_{125.0}$  และ  $A_{125.7}$  เป็นพื้นที่ใต้จุดยอดที่ตำแหน่ง 64.5, 124.4, 125.0 และ 125.7 ppm ตามลำดับ

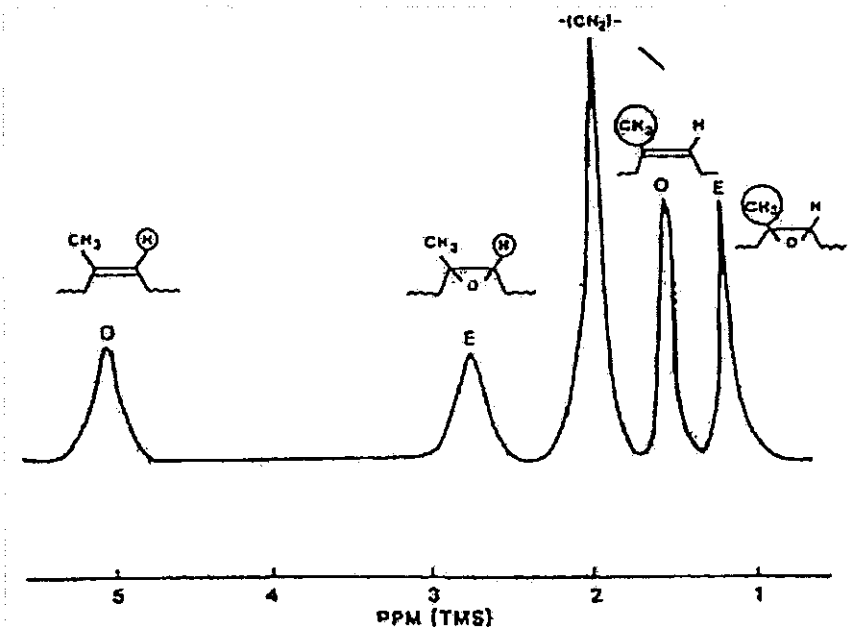


ภาพประกอบที่ 8 แสดง  $^{13}\text{C-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์โมล [14]

ตัวอย่างการวัด  $^1\text{H-NMR}$  spectrum ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ในภาพประกอบที่ 9 แสดงการเลื่อนของโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนที่เกิดพันธะคู่ที่ประมาณ 5.14 ppm และโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนของหมู่อีพอกไซด์ที่ประมาณ 2.70 ppm ซึ่งสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้จุดยอด โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 [13]

$$\% \text{ Mole epoxide} = \frac{A_{2.70}}{A_{2.70} + A_{5.14}} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่  $A_{2.70}$  และ  $A_{5.14}$  เป็นพื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง 2.70 และ 5.14 ppm



ภาพประกอบที่ 9 แสดง  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โมล [12]

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy)

เตรียมยางตัวอย่างให้อยู่ในรูปของสารละลาย โดยใช้คาร์บอนเตตระคลอไรด์

( $\text{CCl}_4$ ) เป็นตัวทำละลาย แล้วนำไปเคลือบบนแผ่นคลิกโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) จากนั้นนำไปอบ

เพื่อไล่ตัวทำละลายออกไป วิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยทั่วไป

อินฟราเรดสเปกตรัมของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จะปรากฏตำแหน่งของแถบการดูดกลืนของหมู่

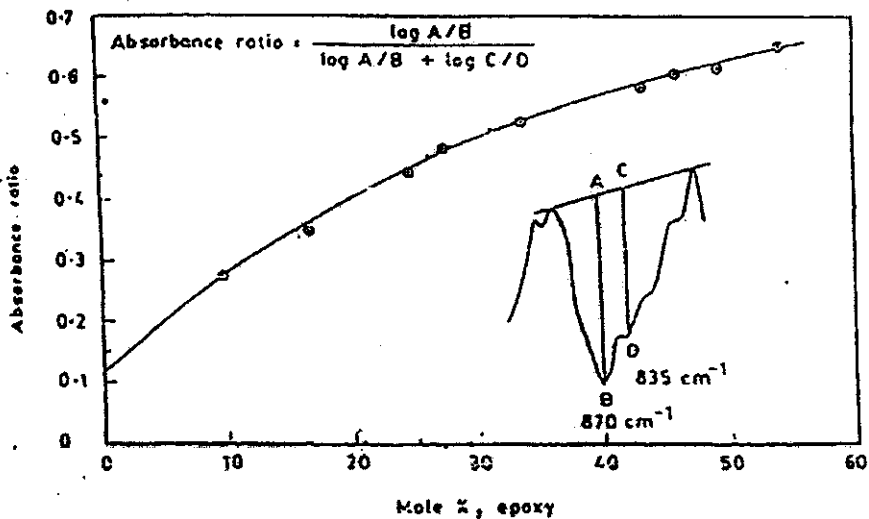
อีพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $870$  และ  $1240\text{ cm}^{-1}$  นอกเหนือจากแถบการดูดกลืนแสงปกติของยางธรรมชาติ และอาจปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่อื่นๆ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนของหมู่อีพอกไซด์ เช่น แถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3600-3200\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟูเริน (furan group) ตำแหน่งเลขคลื่น  $1065\text{ cm}^{-1}$  และหมู่อีเทอร์ (ether group) ตำแหน่งเลขคลื่น  $1800-1650\text{ cm}^{-1}$  [11]

คำนวณค่าอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio) ของแถบดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $870\text{ cm}^{-1}$  (cis-epoxy) ต่อแถบดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $835\text{ cm}^{-1}$  (cis-double bond) คำนวณค่าอัตราส่วนการดูดกลืน จากสมการที่ 3 ดังนี้

$$\text{Absorbance ratio} = \frac{a_{870}}{a_{870} + a_{835}} \quad (3)$$

โดย  $a_{870}$  และ  $a_{835}$  เป็นการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $870$  และ  $835\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

นำค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่พล็อตระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ กับอัตราส่วนการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $870/835\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในภาพประกอบที่ 10



ภาพประกอบที่ 10 แสดงกราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอีพอกไซด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR [11]

## 2.2.6 การใช้งานของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีคุณสมบัติต่างๆ ตามที่กล่าวมา จึงสามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมต่อไปนี้ได้

1. ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้า โดยทำหน้าที่เป็นกาวหรือสารยึดติด
2. ใช้ในอุตสาหกรรมการทำสี ทำให้เกิดการยึดติดดี
3. ใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ทำให้ทนทานต่อการซึมของอากาศดี
4. ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างยางและพลาสติก เช่น พีวีซี

## 2.3 วัสดุกาวและการยึดเกาะ

กาว คือ วัสดุที่ใช้เชื่อมติดกับวัสดุต่างชนิด และมีความต้านทานการแยกออกจากกัน [15] กาวส่วนใหญ่เป็นสารพอลิเมอร์อินทรีย์ เช่น โปรตีน (Collagen จาก กระดูกและหนังสัตว์) เรซิน สารยืดหยุ่น (Elastomer) พลาสติก ซึ่งเมื่อเวลาใช้นั้นจะต้องทำให้เหลวในลักษณะของการหลอมเหลว การละลาย การทำให้เป็นอิมัลชัน หรือการทำให้เป็นพอลิเมอร์จากของเหลวโมเลกุลเล็ก ในหลายกรณีกาวมักจะประกอบไปด้วยสารพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลัก และส่วนผสมอื่นที่ทำให้ได้คุณสมบัติของกาวที่เหมาะสมจะใช้ในแต่ละงาน

### 2.3.1 ความสำคัญของกาว

การเติบโตทางอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากข้อดีหลายๆ อย่างของกาวในการยึดเกาะระหว่างวัสดุ [16] ดังต่อไปนี้

1. สำหรับฟิล์มบาง ไฟเบอร์และอนุภาคขนาดเล็ก ไม่สามารถรวมตัวกันได้ดีโดยวิธีการอื่นๆ นอกจากการยึดเกาะด้วยกาว เช่น
  - การเคลือบเฟอร์นิเจอร์
  - การทำฉนวนไฟฟ้าจากใยแก้ว และการทำวัสดุคอมโพสิตจากไฟเบอร์กลาส
  - วัสดุเสริมแรงในล้อรถยนต์
  - กระดาษเคลือบ (Clay-coated paper) สำหรับงานพิมพ์
  - การยึดเกาะของวัสดุประเภท Nonwoven fabric
2. การกระจายของความเค้นครอบคลุมทั่วพื้นที่ มีน้ำหนักเบา และแข็งแรงกว่าการยึดจับทางเมคานิกส์ เช่น ปีก หางและลำตัวของเครื่องบิน โครงสร้างทำมาจากการวางซ้อนทับกันของแผ่นกระดานแบบรวงผึ้ง (Honeycomb) ซึ่งถูกยึดเกาะโดยผิวหน้าบางๆ ของอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม เป็นการช่วยลดความล้าที่จะก่อให้เกิดการแตกหักได้

3. ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก และการทรงตัวของวัสดุประเภทรับแรงได้เพียงทิศทางเดียวสามารถปรับปรุงได้โดยการยึดเกาะแบบขวาง
4. แนวกาว (Glue line) เป็นฉนวนทางไฟฟ้า นำมาประยุกต์ใช้ในคาปาซิเตอร์ แผ่นปรินและมอเตอร์
5. แนวกาว (Glue line) ป้องกันความชื้น สามารถใช้ในการบรรจุภัณฑ์
6. สามารถเชื่อมติดวัสดุคนละประเภทได้ เช่น กระจกกับอลูมิเนียม เหล็กกับทองแดง ซึ่งวัสดุทั้งสองมีประสิทธิภาพการกระจายความร้อนแตกต่างกัน
7. ท้ายสุดเป็นกุญแจที่สำคัญในการพิจารณา คือ การยึดเกาะที่รวดเร็วและประหยัดกว่า เมื่อเทียบกับอีกหลายวิธีการ เช่น การทอ การเชื่อมประสาน และการยึดจับด้วยน็อต สกรู หรือตะปู เป็นต้น

### 2.3.2 การจำแนกประเภทของกาว

สามารถจำแนกประเภทจากหลักเกณฑ์ต่างๆ ได้หลายวิธี เช่น ส่วนประกอบทางเคมี ราคา ประเภทของวัสดุที่ยึดเกาะ และที่สำคัญ คือ ตามกระบวนการแข็งตัวของกาว

การเคลือบกาวลงบนพื้นผิววัสดุ กาวควรจะอยู่ในสถานะของเหลวที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำเมื่อเกิดการยึดเกาะจะหนืดขึ้นหรือเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง นั่นคือหลังจากการประกบติดกันของวัสดุจะเกิดกลไกที่ทำให้กาวเปลี่ยนสภาพแข็งหรือมีความหนืดสูงขึ้น กาวที่จำแนกตามลักษณะนี้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท [5] ดังนี้

#### Hot melt adhesive

ใช้งานโดยการให้ความร้อนจนเกิดการหลอมละลาย กาวประเภทนี้ทำมาจากพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น กาว EVA ซึ่งใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ การเชื่อมติดหนังสือ

#### Reactive adhesive

กาวที่เกิดการแข็งตัวโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยกาวที่อยู่ในสถานะของสารละลายบนผิววัสดุจะเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ทำให้กาวมีพันธะที่แข็งแรงมากขึ้น กลุ่มของเทอร์โมเซตทั้งหมดจัดอยู่ในกาวประเภทนี้ เช่น กาวไซยาโนอะไครเลต (Cyanoacrylate)

#### Pressure sensitive adhesive

กาวชนิดนี้ความหนืดจะไม่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการเปียกผิวของกาวน้อย ทำให้ในการใช้งานการลอกออกจะไม่มีส่วนประกอบใดๆ ของกาวเหลือบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งการใช้งานของกาวประเภทนี้จะอยู่ในรูปของเทปกาว

### Solvent based adhesive

การใช้ตัวทำละลาย เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นของไหลที่มีความหนืดต่ำลง และสามารถนำมาใช้เป็นกาวได้ ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้มี 2 ประเภท คือ น้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ กาวประเภทนี้ เช่น กาวนีโอพรีน ใช้ทาโฟมหุ้มท่อแอร์ รวมทั้งกาวลาเท็กซ์

### 2.3.3 กาวจากยางธรรมชาติ

กาวจากยางธรรมชาติแบ่งออกเป็น 2 จำพวก คือ กาวน้ำยาง (Latex adhesives) และกาวสารละลาย (Solution adhesives) กาวน้ำยางทำมาจากน้ำยางธรรมชาติ โดยการเติมสารประเภทสารรักษาสภาพ (Stabilizers) สารช่วยเพิ่มการเปียกผิว (Wetting agent) และสารอื่นๆ ส่วนกาวสารละลายทำมาจากยางดิบที่ได้มาจากการแข็งตัวของน้ำยาง นำมาละลายในสารละลายอินทรีย์ ยางดิบที่เลือกใช้แบ่งออกเป็นหลายเกรดซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนผสมของสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในโตรเจน และสารระเหย

น้ำยางธรรมชาติที่นำมาทำเป็นกาวได้มาจากต้นยางพาราที่นำมาทำเป็นยางชั้น มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 60-70% โดยน้ำหนัก

#### 2.3.3.1 กาวน้ำยาง

กาวชนิดนี้ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายที่เป็นพิษและไวไฟ ทำให้มีราคาถูก มีช่วงความหนืดกว้าง ตลอดทั้งทนทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดีกว่ากาวสารละลาย ปริมาณของแข็งในส่วนผสมน้อยทำให้ใช้งานได้ง่าย การประยุกต์ใช้งานบนผิววัสดุทำได้โดยการใช้แปรงทา ถัดโดยสเปรย์ ปาด โดยมิด หรือลูกกลิ้ง อย่างไรก็ตามกาวน้ำยางมีข้อเสียอยู่บ้างในเรื่องเกี่ยวกับการหดตัว ทำให้สิ่งของ เช่น ผ้า หรือกระดาษเป็นรอยยับ คุณสมบัติด้านไฟฟ้าของฟิล์มยางเมื่อแห้งแล้วไม่ได้อัศจรรย์แห่งซ้ารวมทั้งการเกิดความแข็งแรงของการยึดเกาะก็ซ้าด้วย กาวน้ำยางเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการติดหรือยึดเกาะวัสดุประเภทผิวหน้ามีรูพรุนและเปียกผิวได้ง่าย ฟิล์มที่แห้งแล้วไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำหรือค่า และแม้แต่ว่าตัวทำละลายก็อาจล้างฟิล์มนี้ได้ยาก เพราะเนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่สูงของน้ำยาง ถ้าเปรียบเทียบการยึดเกาะแล้วกาวสารละลายจะให้การยึดเกาะที่ดีกว่า แต่สามารถพัฒนาการยึดเกาะกาวน้ำยางโดยให้อยู่ในระบบของการวัลคาไนซ์ได้

ตัวอย่างของกาวประเภทนี้ คือ กาวฉีกของจดหมาย กาวติดผนัง กาวใช้งานทั่วไป กาวติดพรม และกาวติดแถบล้อรถยนต์ ซึ่งตัวอย่างสูตรกาวฉีกของจดหมายแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างสูตรกาวน้ำยางประเภทกาวฉีกของจดหมาย [17]

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (กรัม)
น้ำยางธรรมชาติ (60 % โดยน้ำหนัก) รักษาโดยแอมโมเนีย	100
สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (10 % โดยน้ำหนัก)	0.2
ดิสเพิซชั่นของซิงค์ไดเอทิลไดไรโอคาร์บามต (ZDC 50% โดยน้ำหนัก)	0.5
น้ำ	ตามต้องการ

สำหรับกลไกการยึดเกาะของกาวฉีกของจดหมาย อาศัยความสามารถของน้ำยางธรรมชาติที่เมื่อแห้งเป็นฟิล์มแล้วจะมีสมบัติการเหนียวติดกันเอง (Self-adherent) ขณะถูกกดแน่นเข้าหากัน และจะไม่ติดกับผิวของสิ่งอื่นๆ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะฟิล์มแห้งของน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างพิเศษที่มีสารพวกโปรตีน และสารบางอย่างห่อหุ้มป้องกันอนุภาคแต่ละอนุภาคของยาง เมื่อมีการกดหรือบีบฟิล์มที่แห้งนี้ จะทำให้สารที่ห่อหุ้มอนุภาคยางเสีรูปร่างไปแต่พลังงานการยึดหยุ่นยังคงเดิมอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อกดหรือบีบผิวหน้าที่ยึดติดกันเข้าด้วยกันไว้ครู่หนึ่งอนุภาคยางก็จะเกิดการสัมผัสกันขึ้นจนทำให้เกิดการเชื่อมติดกันของโมเลกุลยาง ส่วนแอมโมเนียในน้ำยางเป็นสารที่ไม่ต้องการจะระเหยออกไปเมื่อฟิล์มของกาวแห้ง (สาร ZDC ในสูตร ทำหน้าที่ป้องกัน เชื้อรา ช่วยป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับยางที่ไม่ได้วัลคาไนซ์)

การผลิตกาวจากน้ำยางเพื่อใช้ในงานทั่วไป [18] พบว่าการใส่โซเดียมโพลีอะคริเลต ปริมาณ 50 ส่วน ต่อน้ำยาง 167 ส่วน กาวจากน้ำยางที่ได้จะให้สมบัติความเหนียวในการติดระหว่างผ้ากับผ้าดีที่สุดในที่สุด รองลงไป คือ การติดระหว่างกระดาษหนา 100 แกรมกับกระดาษหนา 100 แกรม และกระดาษบาง 70 แกรมกับกระดาษบาง 70 แกรม ตามลำดับ

### 2.3.3.2 กาวสารละลาย

กาวชนิดนี้เป็นพิษและไวไฟ เพราะใช้สารละลายอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในการละลายยางดิบ สารละลายที่ใช้ เช่น โทลูอีน (Toluene) แนพธา (Naphtha) หรือไตรคลอโรอีเทน (Trichloroethane) สารละลายที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการแห้ง และความไวไฟ โดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งาน กาวสารละลายที่นำไปใช้งานควรมีปริมาณของแข็งอยู่ประมาณ 10-25% โดยน้ำหนัก การใช้งานสามารถทำได้โดยการฉีดด้วยสเปรย์ ปาดด้วยมีด และลูกกลิ้ง ข้อดีของกาวชนิดนี้คือ แห้งเร็วที่อุณหภูมิห้องหรือในเตาอบ ความเหนียวและกาวยึดเกาะสามารถปรับปรุงได้ โดย

การเลือกใช้อย่างคืบที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แล้ว [19] ตัวอย่างของสูตรกาวประเภทนี้ แสดงดังตารางที่ 6

กาวสารละลายผลิตจากยางแห้ง โดยใช้เบนซินเป็นตัวละลาย และใส่ฟีนอลิกเรซิน 40 phr [20] กาวนี้ให้สมบัติความเหนียวในการติดระหว่างผ้ากับผ้าดีที่สุด รองลงไป คือ ติดระหว่างกระดาษแข็งเทาขาวกับกระดาษแข็งเทาขาว

จากที่กล่าวมา กาวสารละลายที่ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย จะมีความเป็นพิษ และติดไฟได้ง่าย ดังนั้นการเลือกใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในการผลิตกาวประเภทนี้ จึงน่าจะช่วยขจัดปัญหาด้านนี้ได้ แต่เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกาวจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำมัน (Hydrophobicity) แต่ในการผลิตกาวซึ่งใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ทำให้สารเคมีที่ใช้กับน้ำยางพาราผสมเข้ากันได้ไม่ดี จึงต้องแก้ไขข้อด้อยนี้ด้วยการดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติให้มีลักษณะชอบน้ำมากขึ้นโดยการเตรียมเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซค์ เพื่อให้ น้ำยางกับสารเคมีสามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และวงแหวนอีพอกไซค์สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดร็อกซิลในโมเลกุลของไม้ ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างกาวกับไม้

ตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างสูตรกาวสารละลาย [19]

สารเคมี	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
ยางคืบ	10
ซิงค์ออกไซด์	1
แอนติออกซิแดนต์	0.1
ซัลเฟอร์	0.1
สารละลาย	80

### 2.3.4 กลไกการยึดติดของกาวกับไม้ [21]

ความแข็งแรงของกาวเกิดจากกลไกการยึดติดของกาวกับไม้ ซึ่งมาจากเหตุผล

3 ประการ คือ

#### 1. การเกิดพันธะเคมีของกาวกับไม้

แรงที่เกิดขึ้นจากพันธะเคมีระหว่างกาวกับไม้นี้ มีค่าสูงกว่าแรงจากกลไกอื่นๆ ที่ทำ

ให้เกิดการยึดติด กลไกนี้เป็นแรงที่เกิดจากพันธะโควาเลนต์เป็นส่วนใหญ่



2. การยืดตัวระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากการดึงดูดและการดูดแนบ

แรงที่ได้จากกลไกนี้เป็นแรงวานเดอร์วาลส์และแรงที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากพันธะโควาเลนต์ตั้งแต่ 1.5 ถึง 15 เท่า

3. การยืดคืดแบบเมคานิกส์ และการแทรกของกาวเข้าไปในช่องว่างของผนังเซลล์ กลไกนี้เกิดจากสายกาวเข้าไปแทรกในรูเล็กๆ ในผนังเซลล์หรือโมเลกุลของกาวเข้าไปแทรกในส่วนออสติออนของเซลล์ โลส แรงที่เกิดจากการยืดคืดแบบนี้ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัว การซึมซาบ การเป็ยอกและขนาดของโมเลกุลของกาวเอง

แรงยืดระหว่างกาวกับไม้ ส่วนหนึ่งมาจากการดูดซับและการซึมซาบของสารทั้งสอง ขบวนการดูดซับและซึมซาบขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล และสมบัติเคมีของสารทั้งสอง ชนิด โดยใช้การเป็ยอกและการกระจายตัวเป็นหลักในการพิจารณา การดูดซับและการซึมซาบระหว่างกาวกับไม้จะช่วยในการแพร่ของกาว พฤติกรรมทั้งสองเกิดขึ้นระหว่างของเหลวที่มีความเข้มข้นสูง คือ กาว กับของแข็ง คือ ไม้ การเป็ยอกของผิวไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่จะกำหนดการดูดซับและการซึมซาบ เมื่อหากวบนผิวไม้การแพร่ของกาวจะเกิดดังนี้

น้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของกาวจะนำพอลิเมอร์ (เนื้อกาวและสารเติม) เคลื่อนที่ไปตามรูขนาดเล็กๆ ของเซลล์ เช่น ช่องเซลล์ (Cell lumen) หลุมผนังเซลล์ต่างๆ (Pits) และรูเล็กๆ ในส่วนออสติออนของผนังเซลล์ เป็นต้น ช่องเซลล์และหลุมผนังเซลล์มีขนาดใหญ่กว่าพอลิเมอร์ของกาว ดังนั้นกาวจึงเคลื่อนที่ผ่านส่วนทั้งสองไปตามส่วนต่างๆ ของไม้ได้ รูเล็กๆ ในส่วนออสติออนบนผนังเซลล์ในบางครั้งมีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ของกาว รูในส่วนนี้อาจยอมให้น้ำผ่านไปได้แต่ไม่ยอมให้พอลิเมอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าผ่าน ดังนั้นในส่วนนี้จึงเหมือนตะแกรงที่แยกน้ำออกจากพอลิเมอร์ของกาว การแพร่ของกาวดังกล่าวจะมีผลต่อการยืดคืดของกาวแบบเมคานิกส์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่จะนำมาอธิบายแรงยืดระหว่างกาวกับไม้

### 2.3.5 การทดสอบกาว

การทดสอบกาวสามารถแบ่งได้ 2 อย่าง คือ การทดสอบกาวเหลวหรือกาวก่อนที่จะแข็งตัว และการทดสอบกาวที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของกาว คือ ปริมาณเนื้อกาว ความหนืด ความหนาแน่น โดยอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก. 521-2527) และคุณสมบัติความเป็นกรด-ด่าง โดยอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวโพลีไวนิลอะซิเตดอิมัลชัน (มอก. 181-2530) เหตุที่ใช้ 2 มาตรฐานในการทดสอบเนื่องจากสมบัติความเป็นกรด-ด่าง ไม่ถูกกำหนดโดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกาวยาง (มอก. 521-2527) แต่ความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญในการผลิตกาวและมีผลต่อผู้บริโภค ผู้วิจัยจึงนำมอก. 181-2530 มาใช้เป็นมาตรฐานควบคุม

1. การทดสอบกาวเหลวหรือกาวก่อนที่จะแข็งตัว เป็นการทดสอบเนื้อกาว ซึ่งมีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ [22, 23] ดังนี้

#### ปริมาณเนื้อกาว

##### วิธีทดสอบ

ชั่งตัวอย่างที่กวนดีแล้วประมาณ 5 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม ใส่ในภาชนะแบนและปากกว้าง นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ ทำให้เย็นในแคลิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก

##### วิธีคำนวณ

$$\text{เนื้อกาว (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (4)$$

#### ความหนืด

##### วิธีทดสอบ

กวนตัวอย่างในเครื่องควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิ  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียส แล้วทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดอาร์วี บรูคฟิลด์ (RV Brookfield viscometer) โดยเลือกแกนและความเร็วที่เหมาะสม ให้ทดสอบ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

##### วิธีคำนวณ

$$\text{ค่าความหนืด} = \text{ค่าที่อ่านได้บนหน้าปัทม์} \times \text{factor ในคู่มือ} \quad (5)$$

#### ความหนาแน่น

##### วิธีทดสอบ

ชั่งพิกโนมิเตอร์ที่มีความจุระหว่าง 50 ถึง 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม เทตัวอย่างที่กวนจนเข้าที่แล้วลงในพิกโนมิเตอร์จนเต็มแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (ควรระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้นในเนื้อกาว)

##### วิธีคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{M_1 - M_2}{V} \quad (6)$$

เมื่อ  $M_1$  คือ น้ำหนักของพิกโนมิเตอร์และตัวอย่าง (กรัม)

$M_2$  คือ น้ำหนักของพิกโนมิเตอร์ (กรัม)

$V$  คือ ความจุของพิกโนมิเตอร์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

#### ความเป็นกรด-ด่าง

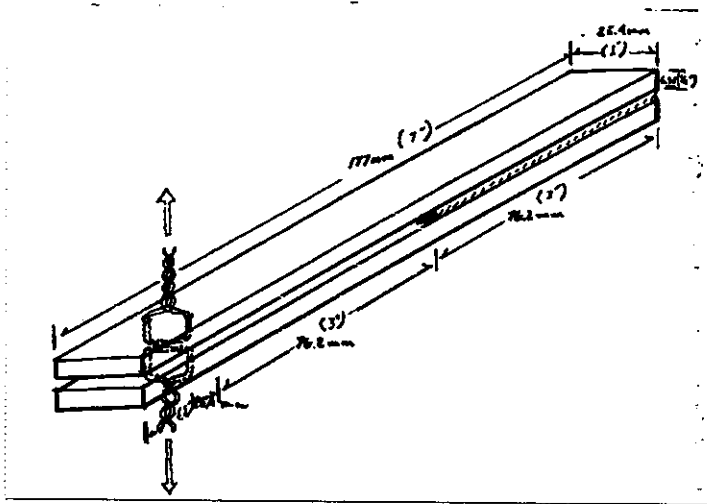
ทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ที่ประกอบด้วยกลาสส์อิเล็กโทรด

2. การทดสอบกาวที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์เพื่อประเมินแรงยึดของกาว การทดสอบหาแรงยึดของกาว ทำได้จากตัวอย่างที่ผ่านสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นปกติตามแต่ละมาตรฐาน โดยปกติแล้วผลจากการทดสอบความแข็งแรงของกาวติดไม้จะมีค่าไม่ถึงครึ่งหนึ่งของแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลในกาว แรงที่หายไปนี้อาจเกิดจากความเปียกที่ไม่สมบูรณ์ของกาวกับผิวหน้าไม้ ความเค้นภายในของแรงยึดติดระหว่างกาวกับไม้ และความเค้นอื่นๆ ที่ไม่สามารถวัดได้ ซึ่งมีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

### ความต้านแรงลอก [24]

#### เครื่องมือและขั้นตอนทดสอบ

- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 และน้ำหนักที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 30 กิโลนิวตัน
- ไม้ยางที่ปราศจากตำหนิที่เกิดจากยาง ไม้และรอยฉีกแตกของเนื้อ ไม้ขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 177.3 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร โดยส่วนปลายของชิ้นทดสอบต้องเจาะรูใส่ส่วยึดไว้ เพื่อใช้พันกับที่ยึดของเครื่องทดสอบ (ดังภาพประกอบที่ 11)



ภาพประกอบที่ 11 แสดงขนาดและลักษณะชิ้นทดสอบความต้านแรงลอก [24]

#### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ทากาวให้ทั่วผิวหน้าชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชิ้น ประมาณ 150 กรัมต่อตารางเมตร ประกอบชิ้นทดสอบทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นแนวยาว 3 นิ้วของความยาวของชิ้นทดสอบ หลังจากทากาวแล้วให้ประกอบแผ่นทดสอบเข้าด้วยกันทันที แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 5$  หรือตามที่ผู้ผลิตกาวกำหนดไว้

### วิธีทดสอบ

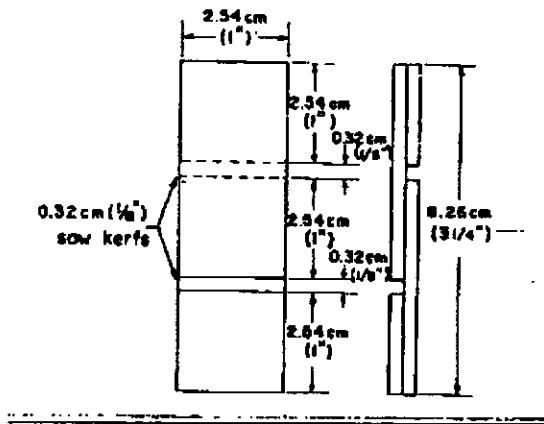
นำลวดที่ติดอยู่กับชิ้นทดสอบพันเข้ากับที่ยึดของชิ้นทดสอบ ใช้แรงดึงโดยที่อัตราการแยกของปากจับเท่ากับ 12.7 มิลลิเมตรต่อนาที อ่านค่าแรงเฉลี่ยที่ 50.8 มิลลิเมตร หรือ ทุกระยะห่าง 5 มิลลิเมตร อย่างน้อย 7 จุดบนชิ้นทดสอบ แล้วหาค่าเฉลี่ยของแรงเป็นกิโลนิวตันต่อความกว้าง 25 มิลลิเมตร ให้ทดสอบชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย

### ความต้านแรงเฉือน [25]

#### เครื่องมือและชิ้นทดสอบ

- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ที่มีอัตราการเพิ่มแรงกดบนชิ้นทดสอบอยู่ระหว่าง 4535 ถึง 7560 กรัมต่อวินาที

- ไม้ยางที่ปราศจากตำหนิที่เกิดจากยางไม้และรอยฉีกแตกของเนื้อไม้ขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร ยาว 8.26 เซนติเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร (ดังภาพประกอบที่ 12)



ภาพประกอบที่ 12 แสดงขนาดและลักษณะชิ้นทดสอบความต้านแรงเฉือน [25]

#### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ตากาวให้ทั่วผิวหน้าชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชิ้น ประมาณ 150 กรัมต่อตารางเมตร ประกอบชิ้นทดสอบทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยปรับรอยต่อให้มีช่วงที่ต่อกันยาว  $25 \pm 0.25$  มิลลิเมตร ใช้ น้ำหนักกดทับไว้จนครบ 24 ชั่วโมง จึงเอาน้ำหนักออก แล้วปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 6 วัน ที่อุณหภูมิ  $23 \pm 1$  องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 2$

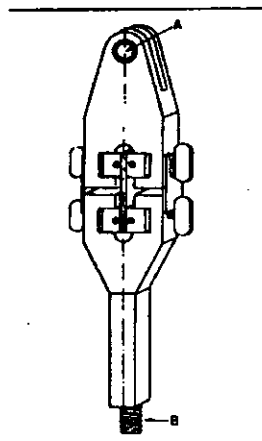
### วิธีทดสอบ

#### - ไม่ได้แช่น้ำ

จับส่วนปลายของชิ้นทดสอบให้แน่นด้วยปากจับในลักษณะที่ผิวதாகาวของชิ้นทดสอบอยู่ทิศทางเดียวกันกับแรงดึง (ดังภาพประกอบที่ 13) ใช้แรงดึงที่อัตรา 4535 ถึง 7560 กรัม ต่อวินาที แล้วอ่านค่าแรงดึงสูงสุดเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้วของพื้นที่แรงเฉือน ให้ทดสอบชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย

#### - ภายหลังการแช่น้ำ

จุ่มชิ้นทดสอบให้มิดในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-24 ชั่วโมง ระหว่างการทดสอบต้องให้น้ำท่วมทั่วผิวหน้าและขอบของชิ้นทดสอบทุกชิ้น แล้วนำชิ้นทดสอบไปทำการทดสอบทันทีตามวิธีที่ไม่ได้แช่น้ำ ให้ทดสอบชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ยของแรง



ภาพประกอบที่ 13 แสดงปากจับชิ้นทดสอบความต้านแรงเฉือน [25]

### การหาความแข็งแรงของรอยต่อแบบนิ้วมือประสาน

เครื่องมือ : เครื่องทดสอบกำลังไม้ (Universal testing machine)

- การดึงขนานเส้น (Tension parallel to grain) [26]

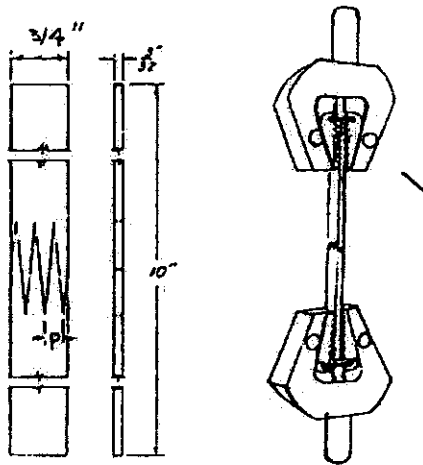
### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ใช้ไม้ขนาดกว้าง 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ยาว 254 มิลลิเมตร (10 นิ้ว) และหนา 2.4 มิลลิเมตร (3/32 นิ้ว) เป็นชิ้นไม้ทดสอบ โดยมีความลาดเอียง 1: 10 ยาว 15 มิลลิเมตร มุมแหลมปลายพื้น 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบแนวตั้ง ก่อนการประกอบชิ้นไม้ทดสอบต้องทำความสะอาดผิวให้ปราศจากฝุ่น ทากาวที่เคียวให้สม่ำเสมอ (ประมาณ 150 กรัมต่อตารางเมตร)

แล้วประกอบโดยใช้แม่แรงอัด (Bar clamps) อัดให้บาร์แนบสนิทใช้ฉากจับวัดให้ไม้ทั้ง 2 ชั้น ได้ฉากต่อกัน อัดทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง เพื่อให้กาบแข็งตัวและทิ้งไว้ในบรรยากาศอย่างน้อย 7 วัน

### วิธีทดสอบ

ใช้เครื่องยึดชิ้นทดสอบจับชิ้นทดสอบให้อยู่ในลักษณะที่ผิวทากาวของชิ้นทดสอบ อยู่ทิศทางเดียวกับแรงดึง ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการทดสอบในการดึง คือ 0.50 นิ้วต่อนาที เพิ่มแรงดึงจนชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชั้นแยกออกจากกัน แล้วบันทึกค่าแรงที่ทำให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน ให้ทดสอบชิ้นทดสอบ 10 ชิ้น เพื่อหาค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึงขนานเส้นสูงสุด (Maximum tensile strength,  $S_t$ ) ดังสมการที่ 7



ภาพประกอบที่ 14 แสดงขนาดของชิ้นทดสอบและการทดสอบการดึงขนานเส้น [26]

$$S_t = \frac{P}{A} \quad (7)$$

เมื่อ  $S_t$  คือ ความแข็งแรงในการรับแรงดึงขนานเส้น (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

$P$  คือ น้ำหนักกระทำสูงสุด (นิวตัน)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึงขนานเส้น (ตารางมิลลิเมตร)

- การดัดสถิตย์ (Static bending) [27]

การเตรียมชิ้นทดสอบ

ใช้ไม้ขนาดกว้าง 45 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร และหนา 45 มิลลิเมตร

เป็นชิ้นไม้ทดสอบ โดยมีความลาดเอียง 1: 10 ยาว 15 มิลลิเมตร มุมแหลมปลายพื้น 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะการต่อแบบแนวตั้ง ก่อนการประกอบชิ้นไม้ทดสอบต้องทำความสะอาดผิวให้ปราศจากฝุ่น ทากาวที่ผิวให้สม่ำเสมอ (ประมาณ 150 กรัมต่อตารางเมตร) แล้วประกอบโดยใช้แม่แรงอัด (bar clamps) อัดให้บาร์แนบสนิทใช้ฉากจับวัดให้ไม้ทั้ง 2 ชิ้น ได้ฉากต่อกัน อัดทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง เพื่อให้กาวแข็งตัวและทิ้งไว้ในบรรยากาศอย่างน้อย 7 วัน

### วิธีทดสอบ

1. นำอุปกรณ์จับยึดชิ้นไม้ทดสอบวางบนแท่นเครื่องทดสอบกำลังไม้ และยึดติดหัวกดชิ้นไม้ทดสอบแบบกระจายหัวกดเป็น 2 หัวเข้ากับหัวกดของเครื่อง แล้วนำชิ้นไม้ทดสอบที่ประกอบเสร็จแล้วมายึดติดกับอุปกรณ์จับยึดไม้ทดสอบให้แน่นและได้ฉาก

2. ใช้หัวกดกดชิ้นไม้ทดสอบที่ตำแหน่ง 1/3 ของชิ้นทดสอบ โดยใช้อัตราเร็วในการกด (Crosshead speed) ที่ 0.9 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งอัตราเร็วที่ใช้ในการกดกำหนดโดยช่วงเวลาในการทดสอบการกดที่ระดับแรงกดสูงสุดประมาณ 10 นาที หรือต้องไม่น้อยกว่า 6 นาที และไม่เกิน 20 นาที

3. ทำการจับเวลาในการทดสอบ และจดค่าความแข็งแรงของข้อต่อเป็นช่วงๆ ทุกๆ ค่าแรง 40 นิวตัน หรือประมาณ 4 กิโลกรัม แล้วทำการบันทึกค่าแรงจนถึงแรงกดสูงสุดที่ข้อต่อรับได้ ให้ทดสอบชิ้นทดสอบ 10 ชิ้น เพื่อหาค่าความแข็งแรงของข้อต่อจากค่ามอดุลัสแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) ดังสมการ

$$MOR = \frac{PL}{bd^2} \quad (8)$$

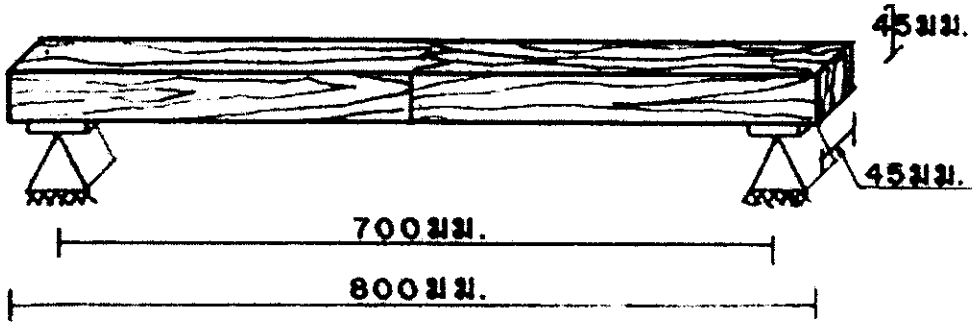
เมื่อ MOR คือ ความแข็งแรง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

P คือ น้ำหนักกระทำสูงสุด (นิวตัน)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ span (มิลลิเมตร)

b คือ ความกว้างของชิ้นไม้ทดสอบ (มิลลิเมตร)

d คือ ความลึกของชิ้นไม้ทดสอบ (มิลลิเมตร)



ภาพประกอบที่ 15 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบและตำแหน่งที่ใช้ทดสอบการคัดสตีคซ์ [27]

## 2.4 ชนิดของข้อต่อไม้ที่ใช้ในเฟอร์นิเจอร์

ข้อต่อที่ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์มีหลายชนิดสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของงาน [28] ซึ่งข้อต่องานเฟอร์นิเจอร์แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

### 2.4.1 การเข้ากรอบโครง (Framing joints)

เป็นข้อต่อที่ใช้สำหรับงานที่เป็นกรอบ โครงของโครงสร้างเครื่องเรือนต่างๆ เช่น โครงสร้างเก้าอี้ ประตู ตู้ เป็นต้น ซึ่งการเข้ากรอบโครงมีข้อต่อที่ใช้ทำงานอยู่หลายชนิด ดังนี้

- ข้อต่อปลาย (Butt joints) เป็นการเข้าไม้ด้วยการนำปลายไม้แผ่นหนึ่งชนเข้ากับหน้าไม้ หรือขอบ ไม้ อีกแผ่นหนึ่ง การต่อวิธีนี้มีความแข็งแรงน้อยจึงอาจเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยการใช้การยึดเหนี่ยวของกาว หรือตะปู

- ข้อต่อบังใบ (Rabbit joints) เป็นการเข้าไม้โดยการนำปลายไม้หรือหัวไม้ ฟังลงไปในเรื่อง หรือหัวไม้ อีกแผ่นหนึ่งซึ่งบังใบเอาไว้ เพื่อเพิ่มพื้นที่ยึดเหนี่ยวของกาวให้มากขึ้น จึงทำให้แข็งแรงมากกว่าการต่อชน

- ข้อต่อแบบเกย (Lap joints) เป็นการประกอบไม้สองตัววางกัน โดยบากไม้ลงไปครึ่งหนึ่งของความหนาของไม้ทั้งสอง วางเกยทับกันให้สนิทแล้วนำไม้ทั้งสองอัดเข้าด้วยกัน หรือจะเพิ่มความแข็งแรงด้วยการยึดด้วยกาว หรือตะปู

### 2.4.2 การต่อไม้ให้กว้าง (Widening joints)

เป็นข้อต่อที่ใช้กับการนำไม้ที่แคบมาต่อทางด้านข้างให้มีความกว้างเพิ่มขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้ไม้หน้ากว้างมาทำเพราะมีราคาแพง งานที่พบเห็น เช่น พื้น โตะ



### 2.4.3 การต่อแบบยาว (Longthening joints)

เป็นการต่อไม้ให้มีความยาวเพิ่มขึ้น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องเรือน และงานโครงสร้างตกแต่งภายใน การต่อไม้แบบยาวจะพบมากในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไม้ขนาดเล็กและสั้นที่เหลือจากการแปรรูป โดยการใช้ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบบพื้นปลา (Finger joints) ซึ่งเป็นการต่อไม้ที่มีการตัดปลายไม้ที่จะนำมาต่อกันเป็นลักษณะของเคียวประสานคล้ายนิ้วมือ ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

- ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบบพื้นปลาด้านความหนา (Horizontal finger joints)
- ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบบพื้นปลาด้านความกว้าง (Vertical finger joints)
- ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบบพื้นปลาแบบเอียง (Inclined finger joints)

ข้อต่อเคียวประสานนิ้วแบบพื้นปลา (Finger joints) นิยมนำมาใช้เป็นข้อต่อไม้สำหรับงานเฟอร์นิเจอร์ จึงต้องมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของข้อต่อเคียวประสานนิ้ว [29]

## 2.5 สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers)

การยึดติด (Tack) เป็นความสามารถในการต้านทานการแยกของวัสดุสองชนิด หลังจากที่เกิดการสัมผัสกันภายใต้ความดันต่างๆ [30] สารเพิ่มการยึดติดเป็นวัสดุที่ใส่ลงไป ในอีลาสโตเมอร์เพื่อปรับปรุงการยึดติด สารเคมีที่ใช้เพิ่มการยึดติดส่วนมากจะเป็นสารประกอบประเภทเรซิน [31] ซึ่งเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางที่ทำหน้าที่สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) สารวัลคาไนซ์ (Curing agents) สารเสริมแรงหรือเสริมคุณสมบัติ (Reinforcing agents) โดยการใช้งานส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มการยึดติด จากตารางที่ 7 เป็นหน้าที่หลัก 3 ประการของเรซินกลุ่มต่างๆ โดยที่กลุ่มใหญ่ที่สุดที่ใช้งานในอุตสาหกรรมยาง คือ เรซินชนิดฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde resins) เนื่องจากมีราคาถูกกว่าชนิดอื่นๆ

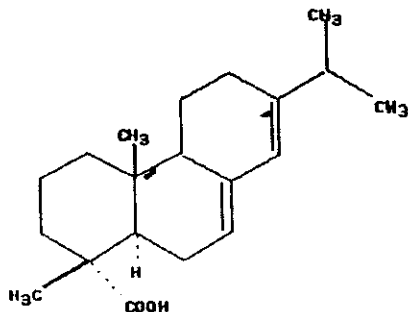
ตารางที่ 7 แสดงชนิดของเรซิน [31]

Curing resins	Reinforcing resins	Tackifying resins
- Phenol-formaldehyde resole type	- Phenol-formaldehyde novolak type	- Phenol-formaldehyde novolak type
	- High styrene resins	- Hydrocarbon
	- Methylene donois	- Rosin derivatives
	- Resorcinol	- Phenol-acetylene condensation
	- Resorcinol-formaldehyde	- Terpene derivatives
	- Poly-butadiene resins	- Coumarone Indene
	- Styrene-acrylonitrile	- Tall oil derivatives
	- Poly-vinyl-chloride resins	

โดยทั่วไปสารเพิ่มการยึดติดมีอยู่หลายประเภท ดังนี้

### 2.5.1 อนุพันธ์ของโรซิน (Rosin derivatives)

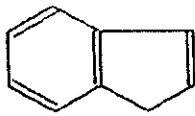
เป็นสารเคมีผสมของกรด Abietic acid ดังโครงสร้างในภาพประกอบที่ 16 และกรดอื่นๆที่เกี่ยวข้อง มักจะเกิดจากการทำปฏิกิริยา Esterified ของสาร Polyhydric alcohol หลังจากนั้นทำปฏิกิริยา Hydrogenated, Dimerized หรือ Disproportionated เพื่อปรับปรุงสมบัติด้าน Ageing และความเสถียรต่อความร้อน (Heat stability)



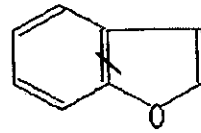
ภาพประกอบที่ 16 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ Abietic acid [32]

### 2.5.2 เรซินชนิดคูมาโรน-อินเดน (Coumarone-indene resins)

ซึ่งประกอบด้วยสารพวก Indene, Styrene, Methyl styrene, Methyl indene และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยมีโครงสร้างของ Indene และ Coumarone ดังโครงสร้างในภาพประกอบที่ 17 ซึ่งสารชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์จากถ่านหินที่ได้จาก Coal coke oven light oils มีฤทธิ์เป็นกรดทำให้การวัลคาไนซ์ยางเกิดได้ช้า เคยใช้เป็นสารทำให้นิ่ม (Softeners) สารเคมีชนิดนี้ทำให้ยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมมีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ เช่น ยางเอสปีอาร์ เป็นต้น มีความแข็งแรงมากขึ้น และเมื่อผสมสารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และเคลย์ เป็นต้น เมื่อผสมลงไปในยางเอสปีอาร์ และผสม Coumarone indene resin ปริมาณ 15-25 phr [33] พบว่าทำให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น และทำให้ความต้านทานต่อการหักงอดีขึ้น โดยเชื่อว่าสารเคมีชนิดนี้ช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น



Indene



Coumarone

ภาพประกอบที่ 17 แสดงโครงสร้างเคมีของ Indene และ Coumarone [32]

### 2.5.3 เรซินจากปิโตรเลียมชนิดออลิฟาติก (Aliphatic petroleum resins)

ผลิตจากสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่ได้จาก Cracking crude oil โดยเรซินที่ได้มีทั้งส่วนที่เป็นอะโรมาติกน้อยจนถึงมากหรือเป็นอะลิฟาติก พวกที่เป็นอะลิฟาติกจะมีไอโซพรีนปนอยู่ด้วย ส่วนเซมิอะโรมาติกจะมีไซโคลเพนตะไดอินอยู่เป็นส่วนใหญ่ อะลิฟาติกส่วนใหญ่ใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด [33] ทั้งนี้เพราะมีบางส่วนในอะลิฟาติกที่ไม่ละลายเข้ากันกับยาง ทำให้มีผลทางการเหนียวติดของยาง

### 2.5.4 โอลิโกเมอร์ชนิดเทอร์พีน (Terpene oligomers)

เป็นชนิด  $\alpha$ - หรือ  $\beta$ -pinene ที่ได้จากต้นสน โดยที่สารเพิ่มการยึดติดชนิดนี้มีองค์ประกอบเป็น Rosin, Terpene, Terpene-phenolic, Tall oil derivatives, Pine tars, Gum rosin และ Wood rosin resins สารเคมีกลุ่มนี้สามารถเพิ่มการยึดติดได้ไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับแหล่งของต้นสนอย่างไรก็ตามได้มีการทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นเพื่อให้มีความสม่ำเสมอ สำหรับการใช้งานมักจะใช้ร่วมกับเรซินฟอร์มัลดีไฮด์ชนิด โนวาแลค เพื่อให้การยึดติดทั้งตอนเริ่มต้นและในระยะเวลายาว

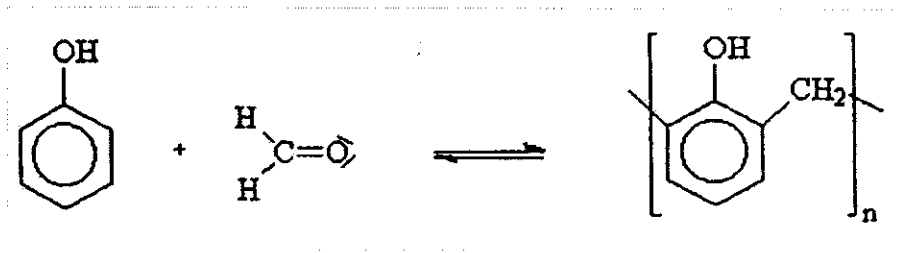
ขณะใช้งานดีขึ้น [30] การผสมสารเพิ่มการยึดติดชนิด Wood rosin ในรูปอิมัลชันลงไปใต้น้ำยางธรรมชาติเพื่อทำกาว [34] สามารถผสมได้ถึง 80 phr โดยที่ไม่ทำให้น้ำยางเสียสภาพ ปริมาณ Wood rosin ที่เหมาะสมใช้ไม่ควรเกิน 30 phr เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีของความต้านแรงเฉือนและความต้านแรงลอก การใช้ Chlorinated alkyl phosphate oil 1-3 % โดยน้ำหนัก ทำให้ระยะเวลาการเซตตัวจะอยู่ในช่วง 30-35 นาที กาวที่ได้สามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Wood rosin ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 40-70 นาที นอกจากนั้นกาวที่เตรียมได้มีความทนทานต่อน้ำสูงมากกว่า 60 วัน และสามารถเก็บไว้ได้นานมากกว่า 4 เดือน

การใส่สารเติมแต่ง ได้แก่ โรซิน ซิลิกาและเขม่าดำ ในกาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [5] มีผลทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึงลอกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 36%) ยกเว้น ซิลิกาเกรด AEROSIL200 ที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลอกเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า ส่วนกรณีของกาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบว่าสารเติมแต่งมีผลต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงลอกเพียงเล็กน้อย และการทดสอบการใช้งานที่เก็บไว้ที่สภาวะต่างๆ ในช่วง 12 สัปดาห์ พบว่าความต้านทานแรงดึงลอกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงสัปดาห์แรก ลักษณะความเสียหายจากการดึงลอกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงจาก cohesive failure คือ มีกาวเหลือติดอยู่ที่ผิวชั้นทดสอบ เป็น adhesive failure คือ ไม่มีกาวติดที่ผิวชั้นทดสอบ ไม่ว่าจะเก็บชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิเท่าไรก็ตาม

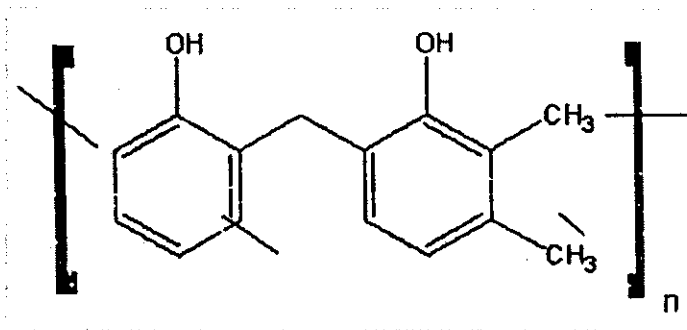
#### 2.5.5 เรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Pheno;-formaldehyde resins)

เป็นเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมาเป็นระยะเวลานาน โดยใช้เป็นสารเพิ่มการยึดติด สารเสริมแรงหรือเสริมคุณสมบัติ สารวัลคาไนซ์ ในกรณีที่ใช้สารเคมีกลุ่มนี้เพื่อเพิ่มการยึดติด จะใช้ในการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนการใช้เพื่อเพิ่มหรือเสริมสมบัตินั้น พบว่าสารเคมีชนิดนี้ให้สมบัติด้านความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็ง ในกรณีที่ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์นั้นจะใช้ในการวัลคาไนซ์ยางเบลดเคอร์ชนิดที่ทำจากยางบิวไทล์ (Butyl tire-curing bladders) ถุงลมนิรภัย (Air bags) และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทนทานต่อความร้อนสูง

ในกรณีที่ใช้เป็นสารยึดติดนั้นจะเป็นชนิด Novolak resin ที่มีความแตกต่างกัน โดยทั่วไปมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ดังภาพประกอบที่ 18 โดยทั่วไปจะมีการปรับปรุงด้วยอัลคิล (Alkyl-modified phenol-formaldehyde resins) ซึ่งเป็นหมู่ออกทิล (Octyl group) หรือเทอร์เทียรีบิวทิล (t-butyl group) ดังภาพประกอบที่ 19 โดยทั่วไปเรซินชนิดนี้ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและอุณหภูมิจุดอ่อนตัวสูงจะให้การเกาะติด (Tack) ที่ดี โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง



ภาพประกอบที่ 18 แสดงปฏิกิริยาการเกิดเรซินชนิด Novolak [32]

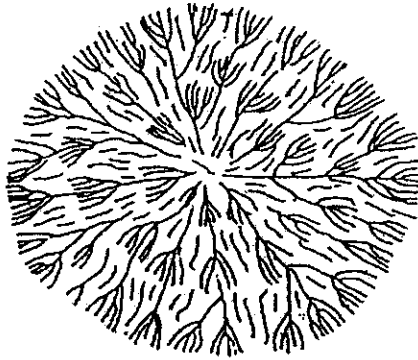


ภาพประกอบที่ 19 แสดงโครงสร้างของเรซินฟีนอลิกชนิด Novolak ที่ปรับปรุงด้วยหมู่อัลคิล [32]

สารเพิ่มแรงยึดติดโดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500-2,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีจุดอ่อนตัว (Ring และ Ball softening point) ตั้งแต่ 50-150 องศาเซลเซียส สารเคมีชนิดนี้มีข้อจำกัดทางด้านความเข้ากันได้กับอีลาสโตเมอร์ โดยที่มีความเข้ากันได้ต่ำกว่าสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizers) แต่มีความเข้ากันได้มากกว่าสารตัวเติม หน้าที่ของสารเพิ่มการยึดติดเมื่อใช้ปริมาณระหว่าง 1-10 phr จะทำให้เพิ่มค่าการยึดติดเริ่มต้น (Initial tack) และป้องกันการเสื่อมหรือการลดลงของการยึดติด สารเพิ่มการยึดติดจะต้องมีความเข้ากันได้กับยางในกรณีของฟีนอลิกที่ผ่านการปรับปรุง (Modified phenolic) ด้วย Para-alkyl group ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้กับยางไม่มีขั้ว (Nonpolar elastomers) นอกจากนี้เมื่อหมู่อัลคิลเป็นชนิด t-octyl ประสิทธิภาพการทำหน้าที่เพิ่มการยึดติดจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อสารเพิ่มการยึดติดมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,000

### 2.5.6 แป้ง (Flour)

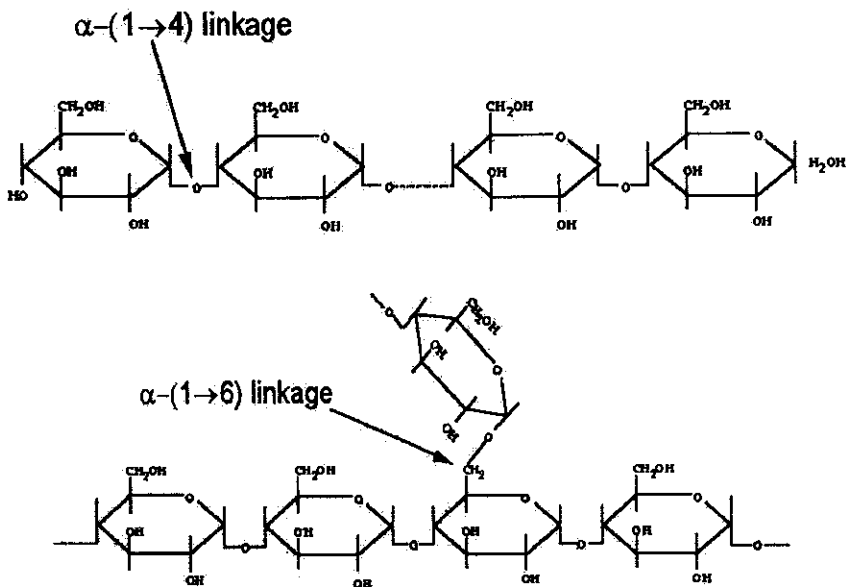
แป้ง หมายถึง สารประกอบของอะไมเลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) รวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ แต่ถ้านับเฉพาะสารประกอบของอะไมเลส และอะไมโลเพกติน จะใช้แทนด้วยคำว่า สตาร์ช (Starch) โครงสร้างของกรานูลของแป้งหรือเม็ดแป้ง (Starch granule) [35] แสดงในภาพประกอบที่ 20 จะเห็นได้ว่าส่วนที่เป็นโครงหลักของกรานูลจะเป็นอะไมโลเพกติน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเกลียวคู่ (Double helices) รวมกันได้เกลียวขนาดใหญ่ (Superhelical structure) ที่มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ผลึก (Crystalline polymer) โครงสร้างที่มีระเบียบที่สามารถบรรจุพอลิเมอร์สายโซ่สั้นกว่าไว้ภายในได้ และการที่โครงสร้างเป็นเกลียวเมื่อโครงสร้างมีสารไอออนบวก (Cation) เข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้เกิดการละลายน้ำได้ดีขึ้น โดยผลของ Polyelectrolyte effects จะทำให้ความหนืด (Viscosity) ลดลงด้วยการจัดเรียงตัวในกรานูลของแป้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline regions) มากและน้อย รวมทั้งส่วนที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous regions) ของสายโซ่บริเวณที่พัวพัน หรือมีกิ่งสาขาซับซ้อน ซึ่งเป็นบริเวณที่โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น น้ำสามารถเข้าไปละลายได้ โครงสร้างของอะไมเลสทั่วไปเป็นชนิดสายโซ่ตรง (Linear) ของน้ำตาลกลูโคส 1,000-6,000 หน่วย เกาะกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 ที่อาจมีกิ่งสาขาสั้นๆ เล็กน้อยได้ด้วย (กิ่งสาขา 1 จุดต่อ 1,000 หน่วยน้ำตาลกลูโคส) และมีการเชื่อมต่อกับอะไมโลเพกตินด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 แสดงดังภาพประกอบที่ 21



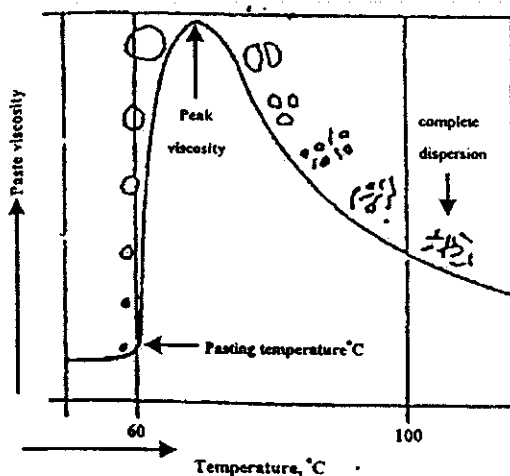
ภาพประกอบที่ 20 แสดงแบบจำลองโครงสร้างกรานูลของแป้ง [35]

ลักษณะจำเพาะที่สำคัญของแป้ง ได้แก่ การเกิดเจล (Gelatinization) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแป้งไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดเจลของแป้ง (Gelatinization temperature) สาเหตุที่แป้งไม่สามารถละลายในน้ำเย็น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากที่มีอยู่ภายในกรานูล การเปลี่ยนแปลงของกรานูลในน้ำเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22

เมื่อให้ความร้อนกรานูลจะเริ่มบวมอย่างไม่ผันกลับ (Irreversible swelling) เกิดขึ้นได้ในส่วนของ  
 อัดพื้นฐานและบวมขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออก และโมเลกุลของน้ำแทรกตัวได้  
 (Hydration) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างที่เป็นระเบียบถูกรบกวน ณ จุดนี้เองที่  
 กรานูลเกิดการสูญเสียโพลาไรเซชัน (Loss of the polarization cross) หรือมีการสูญเสียสมบัติ  
 Birefringence เมื่อผ่านลำแสงโพลาไรซ์และความเป็นผลึกลดลง เพราะเกิดการจัดเรียงตัวของ  
 อะไมโลเพกตินคลายตัวออกการละลายจึงเกิดได้ดีและแป้งจะเหนียวขึ้น ซึ่งคำว่า Gelatinization จะ  
 ใช้กับปรากฏการณ์เช่นนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดดังกล่าวกรานูลจะเกิดการแตกออก เมื่อให้ความร้อน  
 ต่อไปโมเลกุลอะไมโลสอิสระจะหลุดออกมาได้ทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้น และ  
 เนื่องจากกรานูลของแป้งมีขนาดไม่เท่ากันกรานูลที่เล็กกว่าจะเริ่มเกิดเจลที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้น  
 การเกิดเจลของแป้งจึงไม่สามารถบอกอุณหภูมิที่แน่นอนได้บอกได้เพียงช่วงอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมินี้  
 ขึ้นกับชนิดของแป้ง ขนาดกรานูลและปริมาณอะไมโลเพกติน เช่น แป้งมันฝรั่งจะมีขนาด กรานูล  
 ใหญ่ ปริมาณอะไมโลเพกตินสูงจึงมีอุณหภูมิการเกิดเจลต่ำ ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่มีขนาด กรานูลเล็ก  
 ที่สุดจะมีช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสูงที่สุด นอกจากนี้หลังจากเกิดเจลแล้วเมื่อให้อุณหภูมิลดต่ำลงมาจะ  
 เกิดการผันกลับเรียกว่ารีโทรกราเดชัน (Retrogradation) กล่าวคือ โมเลกุลอะไมโลสจะเรียงตัวชิด  
 กันแน่นมากขึ้นจนทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแยกออก และอะไมโลสรวมตัวได้เป็นแผ่นฟิล์มของแป้ง



ภาพประกอบที่ 21 แสดงสูตร โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส (บน) ซึ่งเชื่อมต่อดัวยพันธะ  $\alpha$ -1,4  
 และอะไมโลเพกติน (ล่าง) ที่เชื่อมต่อกับอะไมโลส (บน) ด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6



ภาพประกอบที่ 22 แสดงการบวม การแตกตัว และการกระจายตัวของกรานูลแป้งขณะเกิดเจล [35]

การใช้แป้งข้าวเหนียวเติมลงไปในกาวน้ำอย่างที 30 phr [36] เมื่อทดลองนำไปติดระหว่างกระดาษขาวกับกระดาษขาว และกระดาษน้ำตาลกับกระดาษน้ำตาลให้สมบัติแรงดึงกาวสูงสุด ช่วยในการเหนียวติดดี แต่เมื่อทดลองนำไปติดระหว่างผ้ากับผ้าจะต้องใช้แป้งข้าวเหนียวเติมลงไปในกาวน้ำอย่างที 50 phr จึงจะให้ผลดี สารช่วยเสริมแรงกาวน้ำอย่างทีให้ผลดีรองจากแป้งข้าวเหนียว คือ แป้งข้าวโพด ผสมที 30 phr และถึงแม้จะเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารเสริมแรงกาวน้ำอย่างทีไม่ได้ให้ผลที่ดีขึ้น และกาวน้ำอย่างทีเติมสารเสริมแรงกาวน้ำอย่างนี้สามารถเก็บไว้ได้นานประมาณ 5 เดือน โดยที่ไม่ทำให้สมบัติแรงดึงกาวเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเริ่มเดือนที่ 6 กาวน้ำอย่างทีเกิดการเสื่อมสภาพสมบัติแรงดึงกาวจะลดลง สำหรับแป้งสาทิจะเป็นสารเสริมแรงกาวน้ำอย่างทีเมื่อเติมลงไปนในกาวน้ำแล้วจะทำให้กาวน้ำอย่างทีเกิดการเสียสภาพ ซึ่งเกิดการจับเป็นก้อนและมีสมบัติช่วยเสริมแรงกาวน้ำอย่างทีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

กล่าวโดยสรุป งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารเพิ่มการยึดติดตามขอบเขตงานวิจัยคือ แป้งข้าวเหนียวเจลาตินไนซ์และคิวมาโรนอิมัลชัน ที่มีต่อกาวยาง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของกาวที่เตรียมได้ในรูปของกาวเหลวหรือกาวก่อนที่จะแข็งตัว เป็นการทดสอบเนื้อกาว ได้แก่ การหาปริมาณเนื้อกาว ความหนืด ความหนาแน่น และความเป็นกรด-ด่าง และการทดสอบกาวที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์ เพื่อทดสอบแรงยึดติดของกาวกับไม้ยางพารา ได้แก่ การทดสอบความต้านแรงลอก (Cleavage peel strength) ความต้านแรงเฉือน (Shear strength) การดึงขนานเสี้ยน (Tension parallel to grain) และการคดสถิตย์ (Static bending) และทำการศึกษาเพิ่มเติมนอกขอบเขตงานวิจัยโดยใช้ Petroleum resin, Terpene phenolic resin, และ ชัน (Dammar) เป็นส่วนผสมร่วม



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการออกสูตรจากน้ำยางธรรมชาติ

ในปี พ.ศ. 2541 วราภรณ์ ขจรไชยกูล และคณะ [20] ทำการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตกาวยางจากยางแห้งเพื่อใช้งานทั่วไป โดยทดลองบดผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ตามสูตรพื้นฐานและใส่สารเพิ่มความเหนียวซึ่งสารเพิ่มความเหนียวที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ฟีนอลิครีซินและโซเดียมโพลีอะคริเลท โดยแปรปริมาณของสารเพิ่มความเหนียวคือ 10, 20, 30 และ 40 ส่วนในยาง 100 ส่วน แล้วนำไปละลายในตัวทำละลายได้แก่ เบนซีน โทลูอีน และเซลล์โซล ในปริมาณ 600 และ 800 มิลลิลิตร นำกาวยางที่ได้ไปทดลองติดระหว่างกระดาษ 70 แกรมกับกระดาษ 70 แกรม กระดาษแข็งเทา-ขาว กับกระดาษแข็งเทา-ขาว และระหว่างผ้ากับผ้า พบว่าสูตรกาวยางจากยางแห้งเพื่อใช้งานทั่วไปที่เหมาะสมคือ สูตรพื้นฐานที่มีการใส่สารเพิ่มความเหนียวฟีนอลิครีซิน 40 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน แล้วนำไปละลายในตัวทำละลายเบนซีนปริมาณ 600 มิลลิลิตร กาวยางจากยางแห้งที่ได้จะให้สมบัติความเหนียวในการติดระหว่างผ้ากับผ้าดีที่สุด รองลงไปที่กระดาษเทา-ขาวกับกระดาษเทา-ขาว

วราภรณ์ ขจรไชยกูล และคณะ [18] ทำการศึกษาหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตกาวยางจากน้ำยางเพื่อใช้งานทั่วไป โดยทดลองผสมน้ำยางธรรมชาติกับสารเคมีต่างๆ ตามสูตรพื้นฐาน บ่มให้น้ำยางผสมสารเคมีเกิดการคงรูปบางส่วนแล้วใส่สารเพิ่มความเหนียวโซเดียมโพลีอะคริเลทในปริมาณต่างๆ คือ 20, 30, 40 และ 50 ส่วน ต่อน้ำยาง 167 ส่วน นำกาวยางจากน้ำยางธรรมชาติที่ได้ไปทดลองติดระหว่างกระดาษบาง 70 แกรมกับกระดาษบาง 70 แกรม กระดาษหนา 100 แกรมกับกระดาษหนา 100 แกรม และระหว่างผ้าขาวกับผ้าขาวทดสอบสมบัติแรงดึงกาวเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐานที่ยังไม่ได้ใส่สารเพิ่มความเหนียว และเปรียบเทียบกับกาวลาเท็กซ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด พบว่าสูตรกาวยางจากน้ำยางเพื่อใช้งานทั่วไปที่เหมาะสมคือ สูตรพื้นฐานที่มีการใส่สารเพิ่มความเหนียวโซเดียมโพลีอะคริเลทปริมาณ 50 ส่วนต่อน้ำยาง 167 ส่วน กาวยางที่ได้จะให้สมบัติความเหนียวในการติดระหว่างผ้ากับผ้าดีที่สุด รองลงไปที่ การติดระหว่างกระดาษหนา 100 แกรมกับกระดาษหนา 100 แกรม และกระดาษบาง 70 แกรมกับกระดาษบาง 70 แกรม ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2537 วราภรณ์ ขจรไชยกูล และวิภา เสวตกนิษฐ์ [36] ทำการศึกษาการนำสารอื่นมาผสมในน้ำยางในการทำกาวจากน้ำยางเพิ่มเสริมความแข็งแรงให้แก่กาวจากน้ำยางและช่วยลดข้อเสียของกาวจากน้ำยางที่จะทำให้สิ่งของหดตัว และเกิดความแข็งแรงในการยึดติดซ้ำด้วยซึ่งสารที่นำมาทดลองใช้ได้แก่ แป้งมัน แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเหนียว และแป้งสาลี โดยเติมลงในสูตรกาวน้ำยางพื้นฐาน ซึ่งได้เจือจางปริมาณของแข็งทั้งหมด 50% และแปรปริมาณของแป้งทั้ง 4 ชนิดที่เติมลงในกาวน้ำยางคือ 30, 50, 70 และ 90 ส่วนในยาง 100 ส่วน (phr) ทดสอบแรงดึงกาว

โดยทดสอบติดกาวน้ำยางทุกสูตรระหว่างผ้ากับผ้า กระดาษขาวกับกระดาษขาว และกระดาษน้ำตาลกับกระดาษน้ำตาล เมื่อกาวน้ำยางมีอายุ 7 วัน, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เดือน และเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคือ กาวน้ำยางที่ไม่ได้เติมสารที่ไม่ได้เติมสารเสริมแรงกาวน้ำยาง ผลการทดลองพบว่า แป้งข้าวเหนียวที่เติมลงไปในการกาวน้ำยางที่ระดับความเข้มข้น 30 ส่วนในยาง 100 ส่วน เมื่อทดลองนำไปติดระหว่างกระดาษขาวกับกระดาษขาว และกระดาษน้ำตาลกับกระดาษน้ำตาล ดีที่สุดคือให้สมบัติแรงดึงกาวสูงสุดและช่วยให้การเหนียวติดดี แต่เมื่อทดลองนำไปติดระหว่างผ้ากับผ้า จะต้องใช้แป้งข้าวเหนียวเติมลงไปในการกาวน้ำยางที่ระดับความเข้มข้น 50 phr จึงจะให้ผลดีสารช่วยเสริมแรงกาวน้ำยางที่ให้ผลดีรองจากแป้งข้าวเหนียวคือ แป้งข้าวโพดที่ระดับความเข้มข้น 30 phr และถึงแม้จะเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารเสริมแรงกาวน้ำยางก็ไม่ได้ให้ผลที่ดีขึ้น และกาวน้ำยางที่เติมสารเสริมแรงกาวน้ำยางนี้สามารถเก็บไว้ได้นานประมาณ 5 เดือน โดยที่ไม่ให้สมบัติแรงดึงกาวเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเริ่มเดือนที่ 6 กาวน้ำยางจะเกิดการเสื่อมสภาพ สมบัติแรงดึงกาวจะตกลงสำหรับแป้งสาลี จะเป็นสารเสริมแรงกาวน้ำยางที่เมื่อเติมลงไปในการกาวน้ำยางแล้ว จะทำให้กาวน้ำยางเกิดการเสื่อมสภาพ เกิดการจับเป็นก้อนและมีสมบัติช่วยเสริมแรงกาวน้ำยางเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สรุปได้ว่าสารเติมแป้งมัน แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเหนียว ในปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นสารเติมที่ช่วยเสริมแรงให้กับกาวน้ำยางได้ดีแต่อาจเสื่อมสภาพเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานกว่า 6 เดือน แต่แป้งสาลีช่วยเสริมแรงกาวน้ำยางเพียงเล็กน้อยและทำให้กาวน้ำยางเกิดการเสื่อมสภาพด้วย

การศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซค์ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ

ในปี พ.ศ. 2544 วัชรินทร์ สายน้ำใส [7] การศึกษารีเอกทีฟเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซค์ กับแป้งมันสำปะหลังเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซค์จากการทำปฏิกิริยาน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูงกับกรดฟอร์มิค โดยใช้สบูชนิดไม่มีประจุเป็นสารเพิ่มความเสถียรของน้ำยางพบว่าปริมาณหมู่อีพอกไซค์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางธรรมชาติอีพอกไซค์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติและมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซค์ นอกจากนี้พบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซค์มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบของไหลชิวโคพลาสติก มีค่าความหนืดมูนี ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซค์บน โมเลกุลของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซค์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบปกติมีระยะเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซค์และความต้านทานต่อการดึงสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อีพอกไซค์จนถึงประมาณ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นความต้านทานต่อการดึงมีค่าลดลงอย่างมาก มีค่าความหนืดมูนี ความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์เบลนด์ของยางธรรมชาติอีพอกไซค์กับแป้งมันสำปะหลังเจลลาตินไนซ์ปริมาณ 0, 10, 30, 50 และ 75 phr เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลัง และมีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลชิวโคพลาสติกเช่นเดียวกับคอมปาวด์ของพอลิ-

เมอร์เบลนด์ที่วัลคาโนซด้วยกัมมะถันระบบปกติมีระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้สั้นลงแต่ระยะเวลาการวัลคาโนซยาวขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ความต้านทานต่อการดึงสูงขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ 50 phr หลังจากนั้นความต้านทานต่อการดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนค่ามอดูลัสและความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการยึดจนขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

การศึกษาเกี่ยวกับข้อต่อไม้ยางพาราในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือ

ในปี พ.ศ. 2542 วรรณกรรม และจรัส [37] สรุปว่ากาวอีพ็อกซีโพลีเมอร์ริค ไอโซไซยานาต (EPI) ที่ทดสอบเป็นกาวที่มีความทนทานต่อสภาวะบ่มน้ำเค็มรุนแรงได้พอสมควร โดยมีไม้ยางพารา ไม้เรดเอลเดอร์ ไม้สัก และไม้บีช ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่ออยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน DIN EN 204 ประเภทความทนทาน ชั้น D4 ซึ่งสูงกว่ากาว PVAc ที่มีประเภทความทนทานเพียงชั้น D2 เท่านั้น ส่วนคุณภาพของการยึดเหนี่ยวของกาวกับไม้นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของกาวที่ใช้ต่างแหล่งและต่างชนิดกันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของพื้นผิวหน้าของไม้แต่ละชนิดด้วย ดังเช่นผลของการติดกาว EPI กับไม้ประดู่ ไม้โอ๊ก และ ไม้สนลาว ที่ให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อแยกน้อยกว่าชนิดอื่น

ในปี ค.ศ. 2005 Ismail Aydin และ Gursel Colakoglu [38] ได้ทำการศึกษาการบำบัดก่อนทำการทดลองด้วยสารเคมีเพื่อนำไปใช้กับพื้นผิวที่เป็นไม้เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางเพื่อจะปรับปรุงความสามารถในการเชื่อมพันธะ ความทนทานต่อน้ำและความว่องไวในการเกิดพันธะระหว่างกาวกับไม้ นอกเหนือจากวิธีการทางเคมี วิธีการเตรียมตัวอย่างทางกายภาพบางอย่าง เช่น การขัดกระดาษทราย การไสด้วยกบไสไม้สามารถลดปัญหาที่เกี่ยวกับการยึดเกาะและเป็นการปรับปรุงการเชื่อมพันธะกันระหว่างไม้กับกาว ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ไม้อัดที่ได้มาจากต้นบีชที่ผ่านการอบด้วยไอน้ำ ลักษณะกลมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรเป็นวัตถุดิบ จากนั้นนำไม้มาอบทั้งวิธี air-drying และ oven-drying หลังจากการอบแล้วพื้นผิวของไม้บางส่วนจะถูกนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 และ 180 กริต ชั้นทั้งสามของไม้อัดทั้งที่ขัดและไม่ขัดด้วยกระดาษทราย โดยมีการยึดติดด้วยกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์และฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเพื่อศึกษาถึงผลของการขัดด้วยกระดาษทรายต่อลักษณะทางกายภาพของมัน และยังได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ความหยาบของพื้นผิวและความเปียกของการยึดติดของกาว ความเปียกของไม้อัด สามารถศึกษาได้โดยการวัดมุมสัมผัสตามวิธี sessile drop ซึ่งคุณสมบัติของไม้อัดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ศึกษาหลังผ่านกระบวนการขัดด้วยกระดาษทราย ค่าความแข็งแรงของแรงเฉือนและแรงคดโค้งของไม้อัดที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วและไม่ขัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของกาวและวิธีการอบไม้อัด

ในปี ค.ศ. 2004 Wolfgang Gindl และคณะ [39] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใส่เรซินเข้าไปเซลล์ของ ไม้ซึ่งอาจจะเพิ่มความคงทนของการยึดติดของพันธะของกาวในงานวิจัยนี้จะศึกษาการ

แพร่ของสารประกอบเรซินเข้าไปในผนังเซลล์ซึ่งแบ่งเป็นสองระบบ คือระบบฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ (PF) และพอลิเมอริก เมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (pMDI) ตามลำดับ การหาค่าการแพร่สามารถสังเกตได้จากแถบดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตของเรซินทั้งสองชนิด ซึ่งผลของการแพร่ของเรซินเข้าไปในผนังเซลล์ที่อุณหภูมิห้องสามารถประเมินได้จาก nanoindentation ซึ่งจะแสดงปริมาณ เรซินชนิดระบบฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ ที่แพร่เข้าไปในผนังเซลล์แต่ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบพอลิเมอริก เมทิลีน ไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต จากการตรวจสอบสารยึดติดทั้งสองพบว่าผนังเซลล์ที่มีพื้นผิวที่ติดกันแล้วจะถูกทำลายในระหว่างการไต ส่วนการแพร่ของสารประกอบเรซินเข้าไปในผนังเซลล์ที่ไม่ถูกทำลายค่าโมดูลัสจะไม่เปลี่ยนแปลงจะเพิ่มค่าความแข็งของผนังเซลล์ กับกาว ซึ่งผนังเซลล์ถูกทำลายเนื่องจากการ ไตส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าโมดูลัสลดลง สรุปได้ว่าเพื่อจะให้ได้การเชื่อมพันธะที่ดีดังนั้นจึงจำเป็นต้องตากาวในโครงสร้างของไม้ให้ลึกเพียงพอเพื่อจะได้ไม้ทำลายผนังเซลล์