

## บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางซีล (Seal rubber)

ยางซีลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ป้องกันการรั่วซึม สามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม เช่น ซีลยางที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น และซีลยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น [5]

โดยทั่วไปซีลยางแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. Static Seals ซีลชนิดนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นผิวหน้าของสิ่งที่ไม่เคลื่อนไหว เช่น ประเก็นฝาสูบของรถยนต์หรือยางโอริง (O-ring rubber) เป็นต้น
2. Axial Mechanical Seals ซีลชนิดนี้ผิวด้านหน้าของซีลสัมผัสต่อรูระหว่างโรตอร์คิมของชิ้นส่วนที่ถูกสัมผัส มีชิ้นส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ และชิ้นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ โดยชุดซีลถูกกดอัด ด้วยแรงของสปริงที่อยู่ภายใน
3. Dynamic Radial Seal นำไปใช้งานที่เพลลาเป็นตัวเคลื่อนที่ ลักษณะของซีลสามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับเพลลา และทำหน้าที่เก็บกักสารหล่อลื่นหรือน้ำมันต่างๆ ขณะเคลื่อนที่ได้

#### 2.1.2 วัสดุยางทนน้ำมัน

##### 2.1.2.1 ยางอะคริลิก (Acrylic Rubber or Polyacrylate Rubber; ACM)

ยางอะคริลิกเป็นยางสังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนเมอร์ของอะคริลิก เอสเตอร์ (Acrylic ester) และโมโนเมอร์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของรูป (Cure site monomer) มีหลายเกรดขึ้นกับชนิดของอะคริลิกที่ใช้ในการสังเคราะห์ ยางมีสมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน โอโซน ความร้อน และทนต่อน้ำมันได้ดี ยกเว้นสารเคมีต่างๆ และน้ำมันเชื้อเพลิง ยางชนิดนี้นิยมใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภท ยางโอริง ประเก็นท่อน้ำมัน เป็นต้น [6]

### 2.1.2.2 ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber; CR)

ยางคลอโรพรีนเป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากโมโนเมอร์ของคลอโรพรีน โดยโมเลกุลของยางคลอโรพรีนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้ เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ มีค่าความทนต่อแรงดึงที่สูง ความทนต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขูดถูสูง ยางคลอโรพรีนมีสมบัติทนต่อน้ำมันได้ปานกลางถึงดี และทนต่อความร้อน แสงแดด และโอโซนได้ค่อนข้างดี และยังมีสมบัติการหน่วงไฟ จึงนิยมนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานภายนอกอาคาร เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางรองคอกสะพาน ยางปลอกสายเคเบิล เป็นต้น [6]

### 2.1.2.3 ยางอีพิกลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin; CO, ECO หรือ GECO)

ยางอีพิกลอโรไฮดรินเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีสายโซ่หลักเป็นโพลีเอเธอร์ และมีหมู่คลอโรเมทิลเป็นกิ่งก้าน แบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลัก คือ

1. โอลิโพลิเมอร์ของอีพิกลอโรไฮดริน (CO) ได้จากการทำปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแหวนของอีพิกลอโรไฮดริน
2. โคลิโพลิเมอร์ของอีพิกลอโรไฮดรินและเอทิลีนออกไซด์ (ECO) ได้จากการนำเอทิลีนออกไซด์ไปโพลิเมอไรเซชันร่วมกับอีพิกลอโรไฮดริน
3. เทอร์โพลิเมอร์ระหว่างอีพิกลอโรไฮดริน เอทิลีนออกไซด์ และโมโนเมอร์ชนิดที่ไม่อิ่มตัว (GECO/ETER) ได้จากการเติมโมโนเมอร์ชนิดที่สาม เช่น โพรพิลีน สไตรีน เป็นต้น ลงไปเพื่อให้ยางชนิดนี้สามารถขูดรูปได้โดยใช้ระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์

ยางอีพิกลอโรไฮดรินมีสมบัติเด่นหลายประการ คือ ทนต่อน้ำมันและน้ำมันเชื้อเพลิง ทนต่อความร้อน และโอโซนได้ดี มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซ และน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำ ทนทานต่อการคิดไฟ และมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดี แต่ยางชนิดนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ และยางสามารถอ่อนตัว (Reversion) ได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ยางชนิดนี้มีราคาค่อนข้างแพง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางชนิดนี้ ได้แก่ ซีล ปะเก็น ท่อน้ำมัน ปลอกหุ้มสายเคเบิล เป็นต้น [6]

### 2.1.2.4 ยางซิลิโคน (Silicone Rubber; Q)

ยางซิลิโคนเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งในแกนสายโซ่หลักของโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นโพลีไซลอกเซน (Polysiloxane) ยางซิลิโคนมีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่หมู่ R ที่เกาะอยู่บนสายโซ่หลักเกรดที่นิยมใช้กันมาก

คือ พอลิเมอร์ของไดเมทิลไซลอกเซน (หมู่ R คือ CH<sub>3</sub>) หรือที่มีชื่อย่อว่า MQ สมบัติโดยทั่วไปมีค่าความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขูด และความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงกลุ่มของซิลิกาเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล แต่ยางซิลิโคนทนต่อสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำได้ดี เนื่องจากยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน เช่น การผลิตชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน รถยนต์ ยางโอริง หน้ากากออกซิเจน งานทางการแพทย์ และเกษตรกรรม เป็นต้น [6]

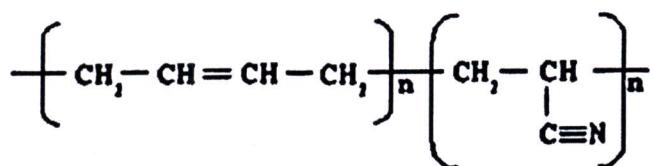
#### 2.1.2.5 ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon Rubber)

ยางฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีราคาแพง ทนทานต่ออุณหภูมิสูง จึงใช้ผลิตอุปกรณ์ของยานอวกาศหรือเครื่องอุปกรณ์ทางทหาร ใช้ผลิตวัสดุสารเคมีของฟลูออโรพอลิเมอร์เป็น ผลมาจากปริมาณของฟลูออรีนซึ่งทั่วไปมีฟลูออรีนอยู่ในช่วง 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ และมีความทนทานต่อสารเคมีโดยเฉพาะพวกไฮโดรคาร์บอนทุกประเภท น้ำมัน กรดอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อความร้อนได้สูงกว่า 250 องศาเซลเซียส และมีความต้านทานต่อการถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน โอโซน และแสงอัลตราไวโอเล็ต ยางประเภทนี้ มักนิยมใช้ในงานทำซีลกันรั่วสำหรับเครื่องยนต์ เช่น ซีล เพลาข้อเหวี่ยงและประเก็น ทำฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าทนความร้อน [6]

#### 2.1.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางอะคริโลไนไตรด์บิวตะไดอิน

ยางอะคริโลไนไตรด์บิวตะไดอิน (Acrylonitrile Butadiene Rubber; NBR) หรือเรียกว่า ยางเอ็นบีอาร์ เป็นยางที่มีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันได้ดี ที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส [7]

##### 2.1.3.1 โครงสร้างของยางอะคริโลไนไตรด์บิวตะไดอิน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์ [7]

ยางเอ็นบีอาร์เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรด์ (Acrylonitrile monomer) และบิวตะไดอิน (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรด์ประมาณ 18-51% จากรูปที่ 2.1 แสดง

โครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์ ที่ประกอบด้วยส่วนของอะคริโลไนไตรด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันของ -CN อยู่ ทำให้โมเลกุลของยางมีความเป็นขั้วสูง (Polarity) ในขณะที่ส่วนของบิวตะไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุล เป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น และเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาทางรูปได้ด้วย กำมะถันเช่นเดียวกับยางธรรมชาติได้

### 2.1.3.2 สมบัติของยางเอ็นบีอาร์

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging properties) ของยางเอ็นบีอาร์มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ อันเนื่องมาจากความร้อนค่อนข้างสูงแต่ต่ำกว่ายางไฮโดรเจนเนตอะคริโลไนไตรด์บิวตะไดอิน หรือ ยางเอชเอ็นบีอาร์ โดยทั่วไปความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากความร้อนขึ้นอยู่กับสูตรการ ผสมสารเคมียาง แม้ว่ายางเอ็นบีอาร์สามารถทนต่อความร้อนได้ดี แต่ไม่ทนต่อ โอโซน และสภาพ อากาศ เช่นเดียวกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ จึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น p-Phenylene diamine เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของยาง

ความทนทานต่อน้ำมัน และสารเคมี (Oil and Chemical resistance) เนื่องจาก ยางเอ็นบีอาร์เป็นยางที่มี ขั้วค่อนข้างสูง จึงทนต่อน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำ และตัวทำละลายไม่มีขั้วอื่นๆ แต่ยาง ไม่ทนต่อกรดแก่ และของเหลวที่มีขั้ว เช่น คีโตน (Ketone) เอสเทอร์ (Ether) ตัวทำละลายที่มีคลอรีน (Chlorinated solvent) เป็นองค์ประกอบ และตัวทำละลายที่มีวงแหวนไฮโดรคาร์บอน (Highly aromatic solvent) เช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) และ ไซลีน (Xylene) เป็นต้น ทั้งนี้ ระดับความทนต่อน้ำมัน และสารเคมีของยางเอ็นบีอาร์ นอกจากขึ้นอยู่กับปริมาณของอะคริโลไน ไตรด์ที่มีอยู่ในโมเลกุล และยังขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมียางด้วย โดยเฉพาะปริมาณสารตัวเติมที่มี อยู่ในโมเลกุล และปริมาณของสารทำให้ยางนั้น ที่มีผลต่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะข้าม ส่งผลต่อความสามารถในการทนทานต่อน้ำมัน [7]

อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) ของยางเอ็นบีอาร์มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ประมาณ -40 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับปริมาณอะคริโลไนไตรด์) ถึง 100 องศาเซลเซียส สำหรับยางที่ใช้งานที่ อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องถึง 120 องศาเซลเซียส สำหรับยางที่ไม่ได้ถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงอย่าง ต่อเนื่อง โดยทั่วไป เมื่อปริมาณของอะคริโลไนไตรด์สูงขึ้นทำให้ยางเอ็นบีอาร์ทนทานต่อน้ำมัน และ สารเคมี นอกจากนี้ ปริมาณอะคริโลไนไตรด์ยังส่งผลต่อค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature:  $T_g$ ) อีกด้วย กล่าวคือค่า  $T_g$  สูงขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรด์ที่เพิ่มขึ้น โดยทั่วไป ค่า  $T_g$  ของยางเอ็นบีอาร์อยู่ระหว่าง -35 ถึง 0 องศาเซลเซียส

## 2.1.4 สารเติมแต่งสำหรับยาง

สารเติมแต่ง หมายถึง สารตัวเติมอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง ตัวอย่างเช่น ผงเขม่าดำ ผงซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และโซนาเคลย์ซิลิกา เป็นต้น [8] ซึ่งเติมเข้าไปในยาง โดยมีวัตถุประสงค์คือ

- เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง โดยทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมอดูลัสสูงขึ้น ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขีดถู อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม เช่น ผงเขม่าดำ ผงซิลิกา เป็นต้น
- เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยต้องมีราคาถูกกว่ายาง เช่น  $\text{CaCO}_3$
- เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น ทำให้ง่ายที่ผ่านการอัดรีดมีผิวเรียบหรือช่วยควบคุมความหนาในการทำแผ่นยาง
- เพื่อช่วยลดการพองตัวหรือบวมตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่อเพิ่มหรือยืดอายุการใช้งานของยาง เช่น สามารถทนอุณหภูมิได้สูงขึ้น และป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องผ่านเข้าไปในยางได้

สารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางมี 3 ลักษณะ ดังนี้

1. สารตัวเติมลักษณะเป็นอนุภาค (Particles filler) ได้แก่ ผงเขม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และโซนาเคลย์
2. สารตัวเติมลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) ได้แก่ ใยฝ้าย และใยไม้ เป็นต้น สารตัวเติมชนิดนี้ใส่ในยางเพื่อป้องกันการหดตัว สามารถแผ่ออกเพื่อรักษารูปร่าง เช่น พื้นรองเท้า
3. สารตัวเติมเรซิน (Resinous filler) ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟินอลฟออร์มาลดีไฮด์เรซิน

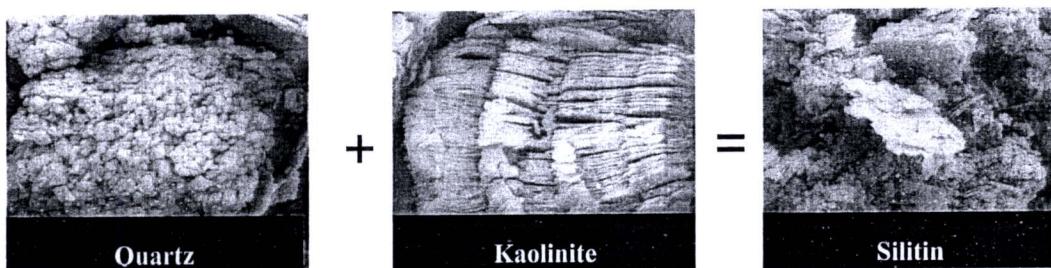
สารตัวเติมลักษณะอนุภาค แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เมื่อใส่เข้าไปในยางแล้ว ทำให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขีดถู ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น สารเหล่านี้คือ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เป็นต้น ส่วนใหญ่อนุภาคมีขนาดเล็ก ประมาณ 18-60 nm
2. สารตัวเติมไม่เสริมแรง (Inert filler) สารเหล่านี้มีราคาถูก อนุภาคมีขนาดใหญ่ตั้งแต่ 0.1  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โซนาเคลย์ แบโรต์ และทัลคัม เป็นต้น สารบางตัวมีอนุภาคขนาดปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต จัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing filler)

สารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เนื่องจากมีความสามารถในการเสริมแรงได้ แต่ถ้าใช้สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไปจนเมทริกซ์ของยางไม่สามารถยึดสารตัวเติมเข้าด้วยกันทำให้ยางมีความแข็งแรงกระด้างและเปราะทำให้สูญเสียความแข็งแรง นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมส่งผลต่อสมบัติของยาง โดที่อนุภาคมีขนาดเล็กทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของอนุภาคเป็นส่วนกลับของพื้นที่ผิว ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กมีหน้าสัมผัสระหว่างยางกับสารตัวเติมได้มากกว่าจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อแน่นมีช่องว่างหรือความพรุนตัวต่ำ

#### 2.1.4.1 ซิลิติน (Silitin)

ซิลิตินมีซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นส่วนประกอบหลักที่อยู่ในรูปของแร่ Quartz และ Kaolinite ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยผ่านกระบวนการตามธรรมชาติ และมีความบริสุทธิ์สูง มีโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกับพรีซิพิตเตดซิลิกา ปรากฏในชั้นหินอัคนี หินตะกอน และหินทราย เหมาะสำหรับการผลิตแก้ว หล่อโลหะ ใช้เป็นผงขัด หรือสารฟิลเลอร์ เมื่อนำมาใช้ในงานด้านยาง เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ ยางเอ็นบีอาร์ ยางอีพีดีเอ็ม ยางเอชเอ็นบีอาร์ เป็นต้น โดยนำมาขึ้นรูปด้วยระบบซัลเฟอร์ ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะการกลับคืนตัวได้ดี เมื่อได้รับแรงกดอัด มอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถู เป็นต้น [9]

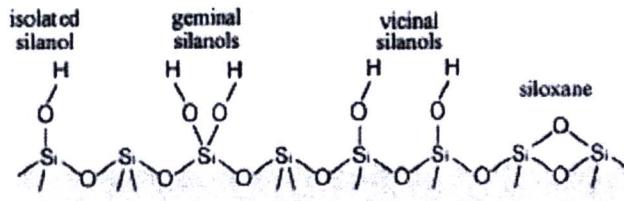


รูปที่ 2.2 ลักษณะของซิลิติน [9]

#### 2.1.4.2 พรีซิพิตเตดซิลิกา (Precipitated silica)

พรีซิพิตเตดซิลิกาหรือซิลิกาแบบตกตะกอน เป็นสารตัวเติมที่มีสีอ่อน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจาก

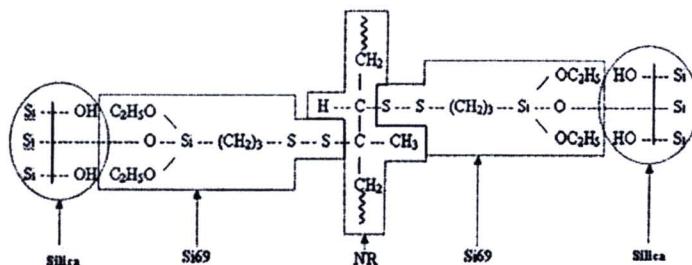
ไม่สามารถใช้ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้ โดยทั่วไปพื้นผิวของซิลิกานั้นมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จึงทำให้มีค่าพลังงานพื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขั้ว (Polar) สูง ทำให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคซิลิกา กับอนุภาคซิลิกา (Filler-filler interaction) ด้วยพันธะไฮโดรเจน [10] โดยซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีบนผิวของซิลิกา [11]

อย่างไรก็ตาม อนุภาคปฐมภูมิของซิลิกามักไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่สามารถเกิดการแอกกรีเกตเข้าเป็นกลุ่มก้อนเช่นเดียวกับอนุภาคปฐมภูมิของผงเขม่าดำ เกิดเป็น โครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างปฐมภูมินี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม ทั้งนี้เนื่องจากเกิดจากแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง (พันธะโควาเลนต์) นอกจากนี้ แอ็กกรีเกตของซิลิกา สามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ และเรียกกลุ่มก้อนขนาดใหญ่นี้ว่า แอ็กโกเมอเรต (Agglomerate) เมื่อเปรียบเทียบกับผงเขม่าดำแล้ว โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกามีความแข็งแรงสูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ที่พบในกรณีของผงเขม่าดำ นอกจากนี้ พื้นผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถเสริมประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง โดยซิลิกาที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็ก ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีการเสริมแรงที่ดี สำหรับอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซิลิกา สารคู่ควบไฮดรอกซิล และยางแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) ของสารคู่ควบไฮดรอกซิล เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) บนพื้นผิวของซิลิกา และเกิดการเชื่อมโยงระหว่างอะตอมคาร์บอนของยางธรรมชาติกับซิลเฟอรอะตอมของสารคู่ควบไฮดรอกซิล (C-S linkages) [12]





รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวซิลิกา สารคู่ควบไซเลนและยาง [12]

### 2.1.4.3 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสีเทาหรือน้ำตาล โดยทั่วไปมีรูปร่างส่วนใหญ่ลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมดังแสดงในรูปที่ 2.5 บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน เถ้าลอยถ่านหิน (Coal ash component) มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา และมีโลหะออกไซด์เป็นส่วนประกอบทางเคมี ดังนั้นเมื่อละลายน้ำโลหะแต่ละชนิดแสดงผลในการเป็นกรด-ด่างไม่เหมือนกัน [13] ซึ่งส่วนประกอบของเถ้าลอยมี 2 กลุ่มใหญ่ คือ ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด (Acidic Oxide) ได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{TiO}_2$  พบได้ทั่วไปในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ ประมาณ 3000-4000 องศาเซลเซียส ส่วนอีกกลุ่มคือ ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง (Basic Oxide) ได้แก่  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  พบในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้มีค่าต่างกันในเชิงปริมาณขึ้นกับแหล่งที่มาของเถ้าลอย ชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้เผา ซึ่งเถ้าลอยแต่ละแหล่งในประเทศไทยมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยมีส่วนประกอบของเถ้าลอยดังแสดงในตารางที่ 2.2

ลักษณะของผงเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ

- เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash หรือ Dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหิน กระบวนการผลิตไฟฟ้า ถ้าถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควันโดยอาศัยเครื่องจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic precipitators) แล้วถูกรวบรวมไว้ในที่เก็บ (Hopper)

- ถ่านหนัก (Bottom ash หรือ Wet ash) เป็นถ่านที่ได้จากการปะทะของอนุภาคถ่านในบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอสามารถหลอมถ่านที่ปะทะกันรวมเป็นเม็ดหรือก้อนตักสู้กันเตา บางส่วนของอนุภาคถ่านไปปะทะกับผนังเตา และหลอมติดกันทำให้อนุภาคถ่านสะสมรวมตัวเป็นก้อนใหญ่ เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวก็หลุดตกลงสู่กันเตาเรียกถ่านส่วนนี้ว่า สแลก (Slag)



(a)

(b)

(c)

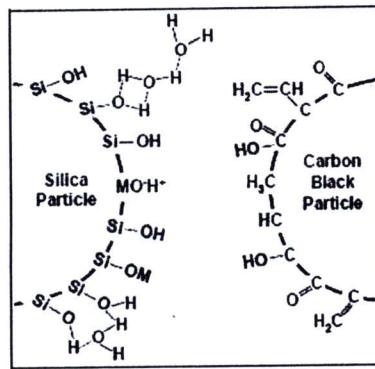
รูปที่ 2.5 รูปร่างลักษณะของถ่านลอย (a) ถ่านลอยลักษณะกลม (b) ถ่านลอยลักษณะที่มีรูพรุน (c) ถ่านลอยที่มีลักษณะไม่แน่นอน [11]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านลอย [13]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO <sub>2</sub> )	30.0-50.0
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15.0-25.0
เหล็กออกไซด์ (Iron oxide; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10.0-20.0
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO)	10.0-25.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO)	0-3.0
โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide; Na <sub>2</sub> O)	0-3.0
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide; K <sub>2</sub> O)	0-3.0
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide; SO <sub>2</sub> )	0-3.0
สารประกอบอื่นๆ	0-3.0

#### 2.1.4.4 เหมำดำ (Carbon black)

ผงเหมำดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีบทบาทสำคัญต่อการผลิตผลิตภัณฑ์อย่างมากที่สุด ซึ่งผงเหมำดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ ร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็น ไฮโดรเจน และออกซิเจนที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ และมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อย ซึ่งกำมะถันนี้เป็นสาเหตุให้ pH ของเหมำดำต่างกัน โดยความเป็นกรดเป็นด่างของเหมำดำส่งผลต่อการสึกตัวของยาง เช่น เหมำดำที่มี pH เป็นด่างจะสึกในน้ำได้เร็วกว่าเหมำดำที่มีความเป็นกรด [3] การจัดเรียงโครงสร้างของเหมำดำมีความสำคัญต่อการแปรรูป โดยเหมำดำนั้นสามารถอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า แอกริเกต (Aggregates) ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (Primary filler structure) ซึ่งโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิจึงมีความแข็งแรงสูงไม่สามารถถูกทำลายด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม แต่ผงเหมำดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมไม่ได้อยู่ในรูปของแอกริเกต โดยอยู่ในรูปของแอกริเกตเมอเรียล เนื่องจากแอกริเกตแต่ละก้อนมีแรงดึงดูดต่อกัน ซึ่งการรวมกลุ่มกันของแอกริเกตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างสารตัวเติมทุติยภูมิ (Secondary filler structure) โครงสร้างสารตัวเติมทุติยภูมินี้ไม่แข็งแรง สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกล และจากอนุภาคปฐมภูมิจึงมีรูปร่างเป็นทรงกลมจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งปริมาตรช่องว่างนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับโครงสร้างของสารตัวเติม ถ้าเหมำดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายยาว แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ซึ่งหมายถึงอนุภาคปฐมภูมิของเหมำดำมาเกาะกันอย่างหลวม เกิดรูพรุนหรือช่องว่างมาก และถ้าอนุภาคปฐมภูมิเกาะกันอย่างหนาแน่น แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ มีรูพรุนหรือช่องว่างน้อย โดยเหมำดำที่มีโครงสร้างสูงใส่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเหมำดำที่มีโครงสร้างต่ำ นอกจากนี้ลักษณะผิวการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในเหมำดำสามารถส่งผลต่อการเสริมแรง ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะส่งผลให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบทำการเกาะติดกับยางจึงไม่ดี ประสิทธิภาพการเสริมแรงของผงเหมำดำในยางต่ำ แต่ถ้าคาร์บอนอะตอมมีไฮโดรเจนมาเกาะประสิทธิภาพการเสริมแรงของผงเหมำดำในยางสูงขึ้น



รูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของซิลิกาและผงเขม่าดำ [14]

ลักษณะทางเคมีบนพื้นผิวของผงเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกัน เพราะปริมาณของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวมีความแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ส่งผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (Surface activity) และอัตราเร็วของการคงรูปยาง การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในผงเขม่าดำ ส่งผลให้ยางมีเวลาที่ยางสามารถไหลได้ในขณะทำการผลิต (Scorch time) ที่ยาวนาน มีอัตราเร็วในการคงรูป และค่ามอดุลัสต่ำลง

### 2.1.5 สารคู่ควบไซเลน

การเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาและลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม วิธีที่นิยมใช้ คือ การใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะหรือทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม (Filler) [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยสารคู่ควบเปรียบเสมือนสะพานที่เชื่อมต่อระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับเฟสทั้งสอง สารคู่ควบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chromium complexes) เซอร์โคเนียมอะลูมินาต (Zirconium aluminates) ไททานาต (Titanates) และไซเลน (Silanes) เป็นต้น

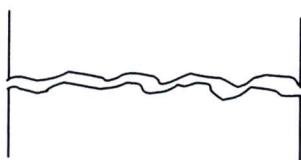


ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับยางด้วยพันธะเคมี เมื่ออันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกามีค่าสูงขึ้นส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

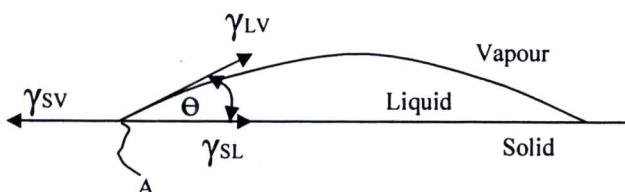
## 2.1.6 กลไกการยึดเกาะระหว่างยางกับสารเติมแต่ง

ในวัสดุยางผสม เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่ระหว่างเฟสได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะระหว่างเฟสของวัสดุยางผสมมี 5 กลไก [16] ดังนี้

1. การดูดซับและการเปียก (Adsorption and wetting) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ ทำให้เกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิด อยู่ใกล้ชิดกันมากถึงระดับไมครอน หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส มีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถสัมผัสกันได้ดังรูปที่ 2.9 ในกรณีของเหลวบนผิวของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกเกิดมากหรือน้อยแสดงได้โดยใช้ “มุมสัมผัส” (Contact angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีค่ามุมสัมผัสน้อย ในทางตรงข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มีค่ามุมสัมผัสมาก

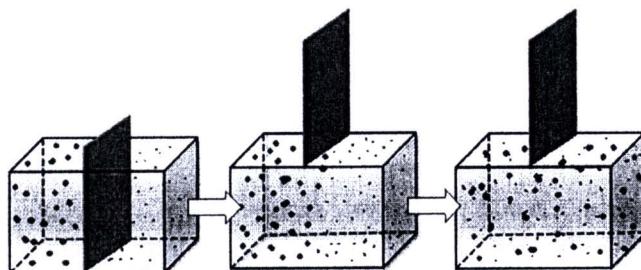


รูปที่ 2.9 การยึดติดระหว่างพื้นผิวขรุขระของของแข็งสองชนิด [17]



รูปที่ 2.10 มุมสัมผัส ( $\theta$ ) และแรงตึงผิว ( $\gamma$ ) ของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สัญลักษณ์ SV, และ LV แทนของแข็ง-ก๊าซ, ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ [17]

2. การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) การยัดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่เข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ความแข็งแรงของการยัดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุลว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิด และจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการพันกัน เนื่องจากความสามารถในการแพร่ และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้น การยัดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลายสัมผัสที่พื้นผิวหรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกสารเสริมสภาพพลาสติกทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยัดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นใยที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์ แต่ไม่เกิดในคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เป็นต้น

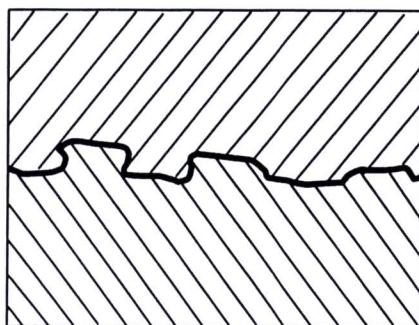


รูปที่ 2.11 การแพร่ของสารเข้าหากัน [18]

3. แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) แรงดึงดูดเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวก และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส และพันธะไอออนิก แสดงดังรูปที่ 2.12 ความแข็งแรงของกลไกการยัดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุแรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ไม่ใช่แรงยัดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยัดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยัดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่นการยัดเกาะของสารก่อกวนประเภทไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวกมีการยึดติดที่ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว เป็นต้น



5. การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) การยึดเกาะเชิงกลเกิดในขบวนการขึ้นรูปคอมโพสิตเรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องรู และช่องว่างบนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ เป็นเหตุให้เมทริกซ์ถูกล็อกแข็งติดอยู่กับพื้นผิวของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเรซิน รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของเรซินในการเปียก และแทรกตัวในพื้นผิวของเส้นใย เช่น ความหนืดของเรซิน พื้นผิวเส้นใยที่เรียบสามารถมีการยึดเกาะได้น้อย



รูปที่ 2.14 กลไกการยึดเกาะแบบการยึดเกาะเชิงกล [17]

### 2.1.7 สารเคมีที่ใช้ในยาง

สารเคมีที่ใช้ในยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆที่ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่สามารถนำไปใช้งานได้ยกเว้นสารเคมีทำปฏิกิริยากับยางก่อนซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound) ส่วนยางที่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanised rubber) [20]

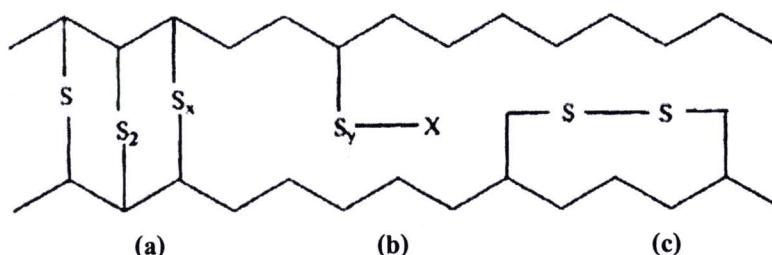
#### 2.1.7.1 การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

การวัลคาไนซ์ยางเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงยางซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นยางที่สามารถรักษารูปทรงไว้ได้ทั้งในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์

ที่สำคัญสำหรับยางธรรมชาติ ดังนี้ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์อื่นๆ ใช้สารวัลคาไนซ์แตกต่างกัน ตามชนิดของยาง การวัลคาไนซ์ยางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสำคัญ ดังนี้ [21, 22]

- ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากเชิงเส้นเป็นแบบร่างแห ทำให้ยางเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกเป็นสภาพอีลาสติกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น
- ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด
- ทำให้มีสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านแรงดึงสูงสุด ความต้านทานการฉีกฉีก และความต้านทานแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น
- ทำให้มีความต้านทานต่อความร้อน แสง เพิ่มขึ้น และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (Sulphur) ได้ต้องเป็นยางที่มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น ยางธรรมชาติ ยางบิวตะไดอิน ยางเอสปีอาร์ ยางบิวทิว ยางเอ็นบีอาร์ เป็นต้น ส่วนในกรณียางที่ไม่มีพันธะคู่ไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ เช่น ยางอีพีเอ็ม ยางซิลิโคน เป็นต้น สมบัติต่างๆ ของยางที่สุกด้วยกำมะถันนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมโยง (Type of crosslink) และจำนวนของการเชื่อมโยง (Degree of crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ชนิดของการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (a) การเชื่อมโยงกำมะถันแบบโมนอซัลฟิดิก ไดซัลฟิดิก และพอลิซัลฟิดิก (b) การเชื่อมโยงกำมะถันแบบเพนแดนท์ (Pendant sulphur) (c) การเชื่อมโยงกำมะถันภายในโซ่โพลิเมอร์ของยาง [23]

กำมะถันสามารถละลายในยางขึ้นอยู่กับชนิดของยาง สำหรับยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ละลายได้ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่ยางบิวตะไดอิน และยางเอ็นบีอาร์ละลายได้ยาก การผสมกำมะถันกับยางที่อุณหภูมิสูงช่วยให้กำมะถันละลายได้มากขึ้น แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันส่วนเกินตกผลึกออกมา ผลึกนี้อาจอยู่ในเนื้อยางหรือแพร่ออกมาที่ผิวของยาง เรียกว่า การเกิดฝ้า (Blooming) การเกิดฝ้ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันที่มากเกินไป และความสามารถในการแพร่ของกำมะถันมาที่ผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของยาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับส่วนผสมอื่นๆ เช่น สารเร่งวัลคาไนซ์ เป็นต้น การตกผลึกของ

กำมะถันที่ผิวของยางทำให้เนื้อยางไม่ติดกัน เพราะมีฝ้าของกำมะถันมาเกาะไว้ ดังนั้น เพื่อลดการตกผลึกที่ผิวของยางซึ่งยังไม่ได้วัลคาไนซ์อาจทำได้อีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวของยาง คือการใช้กำมะถันไม่ละลาย แทนกำมะถันธรรมดา เนื่องจาก กำมะถันไม่ละลายสามารถเกิดนิวเคลียสเพื่อไม่ให้กำมะถันธรรมดาเกาะรอบๆ ซึ่งช่วยลดการเกิดฝ้าที่ผิวยางได้

#### 2.1.7.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการบ่มสุก

สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Activator) มีหน้าที่เพื่อกระตุ้น และปรับประสิทธิภาพของสารตัวเร่งระบบการวัลคาไนซ์ โดยทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้กำมะถันเชื่อมโยงกับยางเร็วขึ้น มีผลทำให้อัตราการทำให้อสุก (Rate of curing) สูงขึ้น และช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพของยางด้วย นอกจากนี้ ยังช่วยไม่ให้เกิดสารประกอบยางติดลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง และช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง

#### 2.1.7.3 ซิงค์ออกไซด์

โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคเล็กสามารถลดปริมาณการใช้ที่ 1 phr ยางที่ได้มีมอดุลัสสูง และมีลักษณะโปร่งใส สามารถรักษารูปร่างได้ดีขณะทำการบ่มในแม่พิมพ์แบบเปิด (Open cure) ถ้าซิงค์ออกไซด์เกิน 1 phr ไม่ละลายในยาง และทำให้ยางขุ่นขาว แต่ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์มากกว่า 5 phr ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้น [4] เหมาะกับการทำชิ้นส่วนยางที่มีความหนาแน่น โดยเฉพาะกับการบ่มแบบใช้อากาศร้อน

#### 2.1.7.4 กรดสเตียริก หรือกรดไขมัน

กรดไขมันก็เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง สำหรับสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์บางชนิดโดยเฉพาะพวกไทอะโซล (Thiazole) กรดไขมัน (Stearic acid) ที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมระหว่างกรดออลิฟาติกอิ่มตัว มีคาร์บอน 12-18 อะตอม ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุล ดังนั้น ถ้าโมเลกุลมีขนาดสั้น เช่น กรดคาโปอิก (Caproic acid) ซึ่งมีคาร์บอน 6 อะตอม ส่งผลในการกระตุ้นน้อยมาก แต่ถ้าโมเลกุลยาวขึ้นผลของการกระตุ้นเพิ่มขึ้นมาก เช่น กรดบิเฮนิก (Behenic acid) มีคาร์บอน 20 อะตอม มีความสามารถมากกว่ากรดสเตียริก เป็นต้น ปริมาณการใช้กรดไขมันขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้ ถ้ายางมีไขมันอยู่แล้วอาจใช้ปริมาณที่ลดลง ยางธรรมชาติมีกรดไขมันเล็กน้อยในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีในยางธรรมชาติมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับ

วิธีการเตรียมยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติแต่ละก้อนอาจมีปริมาณกรดไขมันไม่เท่ากันจึงใส่กรดสเตียริก ประมาณ 1-4 phr เพื่อแก้ปัญหาการบวมสุกที่แตกต่างกัน

### 2.1.7.5 สารเร่งปฏิกิริยาลวดลายไนซ์

สารเร่งปฏิกิริยาลวดลายไนซ์ (Accelerator) เป็นสารที่ใส่เข้าไปเพื่อลดเวลาการสุกของยาง โดยไปเพิ่มอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ลดลง รวมทั้งปริมาณกำมะถันที่ใช้ก็ลดลงด้วยเพื่อลดการสูญเสียและการซึมออกมาที่ผิวของกำมะถัน

สารเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ดังนี้

- เมอร์แคปโตเบนโซไทโซล และ ไคเบนโซไทซิด ไดซัลไฟด์

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ใช้ได้กับยางทุกประเภททำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปปานกลางและยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้จึงนิยมใช้กับยางธรรมชาติในกรณีที่ต้องการให้ยางที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีเมื่อยางได้รับการคงรูปมากเกินไป สาร 2-mercaptobenzothiazole; MBT ทำให้ยางเริ่มเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า Dibenzothiazyl disulfide; MBTS เพราะ MBTS ต้องแตกตัวด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อนจึงสามารถเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้ ด้วยเหตุนี้ MBTS จึงทำให้ยางมีความปลอดภัยในการขึ้นรูปที่สูงกว่า แต่ยางมีอัตราการคงรูปที่ต่ำกว่า MBT โดยภาพรวมทั้ง MBT และ MBTS เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่การใช้สารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะที่ต่ำ ดังนั้น จึงนิยมใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้เป็นสารตัวเร่งปฐมภูมิร่วมกับการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิในกลุ่มอื่นๆ เช่น กัวนิดีน ไดไทโอคาร์บาเมต หรือไทยูเรม เป็นต้น

- เทตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ และ เทตระเมทิลไทยูเรมโมโนซัลไฟด์

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูเรมเกิดจากการนำโมเลกุลของไดไทโอคาร์บาเมต 2 โมเลกุลมาต่อกันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ไดเมอร์ไรเซชัน (Dimerization) ตัวอย่างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide; TMTD) และ เทตระเมทิลไทยูเรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram monosulfide; TMTM) เนื่องจากสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้แตกตัวให้สารพวกไดไทโอคาร์บาเมตก่อนไปเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้ ดังนั้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูเรมจึงมีระยะเวลาไหลตัวที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ยังจัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปที่สูงมาก สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้นิยมใช้ในการคงรูปยางทุกระบบ ทั้งระบบธรรมดา

ระบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ด้วยความระมัดระวังเนื่องจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของรูป สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ปล่อยเอมีนทุติยภูมิออกมาซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไนโตรโซเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้ โดย TMTM ปล่อยเอมีนทุติยภูมิออกมาน้อยกว่า TMTD

#### 2.1.7.6 สารที่ทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers)

สารที่ทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers) มีหน้าที่ในการปรับความหนืดของยางให้ลดลง ทำให้ยางไหลได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ประหยัดพลังงานในระหว่างกระบวนการผลิต ช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตและสมบัติความเหนียวติดกันของยางคอมพาวด์ช่วยลดสัดส่วนของยางลง เพราะการใช้สารทำให้ยางนิ่มช่วยให้สามารถเติมสารตัวเติมลงไป ปริมาณที่สูงขึ้นได้ ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น ทำให้ยางคงรูปมีสมบัติบางประการดีขึ้น เช่น ช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ยางมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำลง และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้น เป็นต้น [3] การเลือกใช้ชนิดของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ ความต้านทานต่อการตกสี และราคา โดยทั่วไปถ้าสารทำให้ยางนิ่มไม่สามารถเข้ากับยางได้ซึมออกมาพื้นผิวอย่างช้าๆ ทำให้ยางมีลักษณะเหนียว สมบัติเชิงกล และทางกายภาพอื่นๆ ก็ลดลง ส่วนประสิทธิภาพของสารทำให้ยางนิ่มขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของสารเหล่านี้รวมถึงชนิดของยางด้วย สำหรับยางที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูงทำให้ยางนิ่มชนิดที่มีจุดเดือดสูง เพื่อลดการระเหยของสารทำให้ยางนิ่ม

สารทำให้ยางนิ่มสามารถจำแนกตามลักษณะหน้าที่ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารทำให้ยางนิ่มปฐมภูมิ (Primary plasticizers) และสารทำให้ยางนิ่มทุติยภูมิ (Secondary plasticizers) สารทำให้ยางนิ่มปฐมภูมิ คือสารที่สามารถละลายในยางได้ จึงทำให้ยางบวม (Swell) ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวแบบบราวเนียน (Brownian motion) คือเป็นการเคลื่อนไหวที่เกิดจากพลังงานความร้อนของโมเลกุลได้ดียิ่งขึ้น ยางคอมพาวด์จึงไหลได้ดี และมีความหนืดลดลงอย่างมาก ยางคงรูปที่ได้มีความแข็งแรงลดลง และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปสารทำให้ยางนิ่มที่ไม่มีขั้วทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางนิ่มปฐมภูมิในยางที่ไม่มีขั้ว ในทำนองเดียวกัน สารทำให้ยางนิ่มชนิดที่มีขั้วเท่านั้นจึงทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางนิ่มปฐมภูมิในยางที่มีขั้วได้ ส่วนสารทำให้ยางนิ่มทุติยภูมิ คือสารที่ไม่สามารถละลายในยางได้ (หรือละลายได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น) สารทำให้ยางนิ่มในกลุ่มนี้จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นสารหล่อลื่นระหว่างสายโซ่โมเลกุลเพื่อปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) โดยไม่มีผลกระทบต่อความหนืดของยางมากนัก อย่างไรก็ตาม การแบ่งชนิดของสาร

ทำให้ยางนึ้ด้วยหลักการข้างต้นก่อนข้างจับซ้อน และไม่สามารถแบ่งแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน เพราะสารทำให้ยางนึ้ส่วนใหญ่ทำหน้าที่อยู่ระหว่างแบบปฐมภูมิและแบบทุติยภูมิ

นอกจากองค์ประกอบหลักต่างๆ ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติให้กับวัสดุยางผสมแล้ว ยังอาจมีการใช้สารชนิดอื่นๆ ช่วยในกระบวนการผลิต [3, 21] ดังนี้

- สารทำให้ยางเหนียวติดกัน ยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติความเหนียวติดกันต่ำกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางชนิด ที่ต้องการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันก่อนการคงรูป จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีที่ทำให้ยางเหนียวติดกัน (Tackifier) บางชนิดที่ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นและทำให้สามารถนำยางส่วนต่างๆ มาประกอบกันได้ง่ายขึ้น เช่น การใช้ไซลอลฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน (Xylon-formaldehyde resin) ในยางเอ็นปีอาร์และยางคลอโรพรีน เป็นต้น สารกลุ่มนี้นอกจากทำให้ยางคอมพาวด์เหนียวมากขึ้นแล้วยังสามารถทำให้ยางมีความหนืดลดลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง จึงทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางนึ้ได้ด้วย เช่น การใช้คูมาโรนเรซินและอินดีนเรซินเป็นสารทำให้ยางเหนียวติดกันและสารทำให้ยางนึ้ ทั้งในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เป็นต้น
- เพปไทเซอร์ (Peptizers) เป็นสารที่ใช้เติมเข้าไปในช่วงแรกของกระบวนการผสมเพื่อช่วยเพิ่มให้กระบวนการย่อยหรือการตัดโมเลกุลของยางในขั้นตอนการบดยาง (Mastication) ให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สารกลุ่มนี้สามารถช่วยระยะเวลาในการบดยาง ส่งผลให้ประหยัดพลังงานในกระบวนการผสม ตัวอย่างของเพปไทเซอร์เกรดการค้า ได้แก่ Zinc-2-benzamidothiophenol; Pepton 65, Zinc thiobenzoate; Robac TBZ เป็นต้น
- สี (Pigments) เป็นองค์ประกอบที่เติมลงไปในการผลิต เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสีสันสวยงามตามความต้องการของผู้ผลิต สีที่ดีควรมีสมบัติดังนี้ ไม่ละลายในยางเพื่อป้องกันการบลูม (Blooming effect) ไม่ควรมีสารประกอบของทองแดงหรือแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ เพราะสารเหล่านี้ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าปกติ สามารถกระจายตัวในยางได้ง่ายและสีที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับความเป็นกรดด่างของยาง สามารถทนต่อความร้อนได้ดีและไม่ร่วงไวต่อสารทำให้ยางคงรูปหรือสารเคมีอื่นๆ ที่มีอยู่ในยางตัวอย่างเช่น การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $TiO_2$ ) ส่งผลให้สีขาวกับผลิตภัณฑ์ยาง เหล็กออกไซด์ (Iron oxide;  $Fe_2O_3$ ) ให้สีโทนแดง น้ำตาล และเหลือง และเมอร์คิวริกซัลไฟด์ (Mercuric sulfide;  $HgS$ ) ให้สีแดงสด เป็นต้น
- สารป้องกันการติดไฟ (Flame retardants) มีหน้าที่หน่วงหรือทำให้การติดไฟลดลง สำหรับการยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber) ยางคลอโรซัลโฟเนต พอลิเอทิลีน (Chlorosulfonated polyethylene) และยางฟลูออโร (Fluoro rubber) ซึ่งเป็นยางที่

มีสมบัติไม่ติดไฟหรือสามารถดับไฟได้เองเมื่อเกิดเปลวไฟขึ้น เนื่องจากยางเหล่านี้เมื่อสัมผัสกับเปลวไฟ มีการปลดปล่อยก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (เช่น HCl หรือ HF) ออกมา ซึ่งก๊าซเหล่านี้สามารถไล่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่บริเวณเปลวไฟ ส่งผลให้เปลวไฟสามารถดับเองได้ ดังนั้นยางชนิดดังกล่าวจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการติดไฟ แต่สำหรับในยางชนิดอื่นๆ ที่สามารถติดไฟได้ เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสบิอาร์ ยางบิวทาไดอิน ยางอีพิตีเอ็ม เป็นต้น ยางเหล่านี้จำเป็นต้องใช้สารป้องกันการติดไฟเพื่อนำไปใช้งานในลักษณะดังกล่าว โดยสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการติดไฟ คือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide;  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide;  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) เป็นต้น

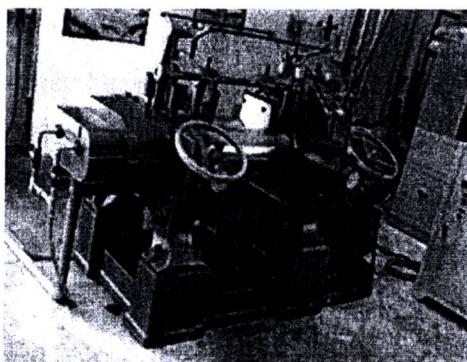
- สารเปลี่ยนกลิ่น (De-reodorants) ยางดิบบางชนิดมีกลิ่นเฉพาะตัว โดยเฉพาะยางธรรมชาติที่มีกลิ่นฉุนรุนแรงอันเกิดจากการบดเน่าขององค์ประกอบที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ โปรตีน ไขมัน น้ำตาล เป็นต้น การลดกลิ่นอาจทำได้โดยการเก็บยางคอมพาวด์ไว้ได้นาน หรือทำการอบยางคงรูปต่อด้วยไอน้ำ อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวไม่สามารถกำจัดกลิ่นยางให้หมดได้ การเติมสารเปลี่ยนกลิ่น เช่น น้ำหอม เป็นต้น สามารถช่วยกลบกลิ่นของยางและทำให้ยางมีกลิ่นตามต้องการ

### 2.1.8 การผสมและกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การบดยางให้หยาบ (Mastication) การผสมยางกับสารเคมี (Mixing) และการทำให้ยางคงรูป (Vulcanization) และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Forming) ซึ่งเป็นการทำให้ยางเกิดรูปร่างและคงรูปในเวลาเดียวกันด้วยความร้อน โดยทำให้ได้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic material) อันเนื่องมาจากโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงหรือยึดกันด้วยพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุล เรียกว่า Crosslinking ยางที่คงรูปแล้วนี้ เมื่อถูกปล่อยให้เป็นอิสระจากแรงที่มากระทำ สามารถคืนสู่สภาพเดิม ดังนั้น การทำให้ยางคงรูปจึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและลดการเสียรูปของยางเมื่อปล่อยยางให้เป็นอิสระจากแรงที่มากระทำ หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มความพยายามในการรักษารูปร่างแรกเริ่มไว้ (Elasticity) และลดความพยายามรักษารูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำ (Plasticity) ซึ่งอาจเป็นรูปร่างที่เกิดจากการยืดออกหรือถูกกดก็ได้ การทำให้ยางคงรูปเป็นขั้นตอนต่อจากการทดสอบสมบัติยางคอมพาวด์ ซึ่งการทำให้ยางมีรูปร่างตามความต้องการนั้นมีหลายวิธี ดังนี้ การขึ้นรูปโดยเครื่องคาเลนเดอร์ (Calendering) การใช้เป่าพิมพ์ (Molding) การอัดรีด (Extruding) เป็นต้น [24]

### 2.1.8.1 การบดขย้างให้ نرم

การบดขย้างให้ نرمหรือให้ยางมีความหนืดลดลง เรียกขั้นตอนนี้ว่า มาสติกเคชัน (Mastication) ซึ่งยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ที่ยังไม่วัลคาไนซ์มีพฤติกรรมเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ระหว่างผสมยางสังเคราะห์ขณะเริ่มบดความหนืดของยางไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนในกรณียางธรรมชาติต้องบดให้สายโซโพลิเมอร์แตกสั้นลง ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีความหนืดลดลง โดยในขั้นตอนการผลิตยางคอมพาวด์ต้องผสมสารเคมี สารเสริมแรงหรือ สารช่วยผสมอื่นๆ ดังนั้น จำเป็นต้องบดขย้างให้ نرمลงก่อน โดยยางคอมพาวด์ที่ได้ต้องไม่วัลคาไนซ์ ซึ่งโดยทั่วไปในการบดผสมยางกับสารเคมีนั้นมักนิยมใช้เครื่องผสมอยู่สองชนิด คือ เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และเครื่องบดผสมระบบปิดหรือเครื่องบดผสมภายใน (Internal mixer) [25]



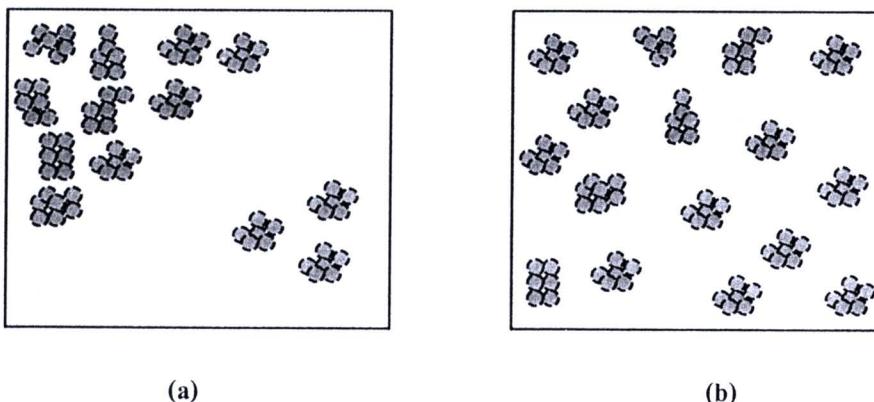
รูปที่ 2.16 เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) [4]

### 2.1.8.2 การผสมยางกับสารเคมี

การผสมยางกับสารเคมีสามารถผสมในเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่หรือ เครื่องบดผสมระบบปิด ในขณะที่ยางมีความหนืดลดน้อยลงสามารถผสมสารเคมีหรือสารเสริมแรงเข้าไปในเนื้อยางได้ ซึ่งในเครื่องผสมระบบเปิดสามารถมองเห็นในขณะบดผสมในเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ โดยทำการกรีดยางแล้วพับทำให้ยางกับสารเคมีเข้ากันได้ดีด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ซึ่งแรงเฉือนขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (Nip) ส่วนในเครื่องผสมระบบปิด แรงเฉือนขึ้นอยู่กับการออกแบบของโรเตอร์และผนังของห้องผสม [8] องค์ประกอบของการผสมเคมียางมีหลากหลายชนิดเช่น กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น สามารถละลายเข้าไปในยางได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงในระหว่างการผสม แต่องค์ประกอบบางชนิดไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยางหรือละลายเข้าไปในเนื้อยางค่อนข้างยาก เช่น สารตัวเติมผงเขม่าดำ ซิลิกา และถ่านลอย เนื่องจากยางและสารตัวเติมอยู่ใน

สภาวะของแข็ง โดยเฉพาะผงเขม่าดำและซิลิกา ซึ่งมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยาก อีกทั้งรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ในกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยกลุ่มก้อนขนาดเล็กหลายๆก้อนมาเกาะกันด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van Der Waal's) หรือพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ดังนั้น การผสมที่ทำให้สารตัวเติมแตกตัวและกระจายตัวได้ดีมีกลไก [25] ดังนี้

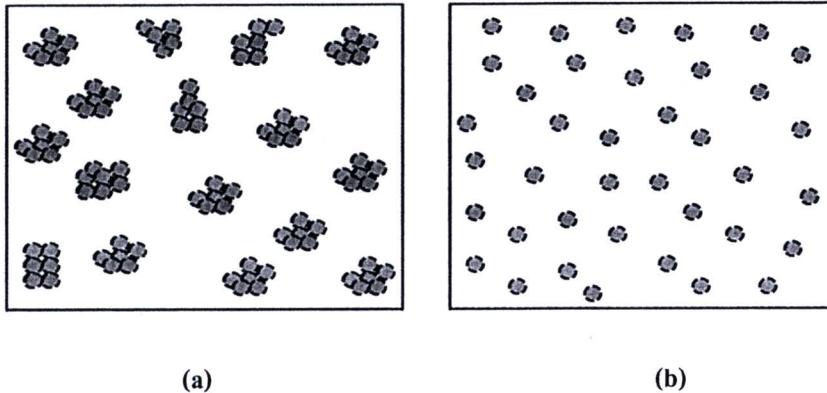
- การกระจายตัวของสารตัวเติม เมื่อเทียบกับสารตัวเติมเข้าร่วมกัน แรงเฉือนที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ที่ถูกโอบล้อมโดยยางเริ่มเกิดการกระจายตัวในเนื้อยาง กระบวนการกระจายตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของการผสม ซึ่งการกระจายตัวของสารตัวเติมได้ดี และไม่ดี ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a) และ 2.17 (b) ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกระจายตัวของสารตัวเติมขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของยางในห้องผสม ยางที่มีความหนืดต่ำมีความสามารถในการไหลได้ดีการกระจายตัวเกิดขึ้นได้ง่าย



รูปที่ 2.17 แบบจำลองแสดงลักษณะการผสม (a) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางที่ไม่ดี (b) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางที่ดี [25]

- การแตกตัวของสารตัวเติม คือ กระบวนการที่ทำให้สารตัวเติมซึ่งกันเป็นก้อนใหญ่ที่ถูกโอบล้อมด้วยยางแตกออกมีขนาดเล็กลงด้วยแรงเฉือนที่เกิดจากเครื่องผสม โดยรูปที่ 2.18 (a) แสดงสารตัวเติมไม่มีการแตกตัว แต่กระจายตัวในยางได้ดี ซึ่งการแตกตัวของสารตัวเติมมักเกิดพร้อมกับการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 2.18 (b) ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการแตกตัวของสารตัวเติม คือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม นอกจากนี้เวลาการผสมต้องเพียงพอสำหรับทำให้สารตัวเติมแตกตัวเป็นก้อนเล็กๆ อย่างไรก็ตาม ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่นานเกินไป เพราะนอกจากสิ้นเปลืองเวลาและพลังงานในการผสม ทำให้เกิดผลเสียต่อสมบัติ

เชิงกลของยางเมื่อยางได้รับแรงเหวี่ยงมากๆ น้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง อีกทั้งยางได้รับอุณหภูมิ การผสมสูง ส่งผลให้ยางเสื่อมสภาพ



รูปที่ 2.18 แบบแสดงลักษณะการผสม (a) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางที่ดีแต่การแตกตัวไม่ดี (b) การกระจายตัวและการแตกตัวของสารตัวเติมในยางที่ดี [25]

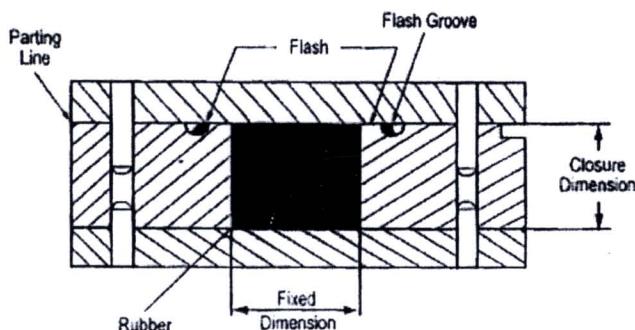
นอกจากนี้ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม คือ

1. ชนิดของสารตัวเติม (Filler type) เช่น ซิลิกาที่มีความเป็นขั้วสูงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ สูงกว่าเขม่าดำ เป็นต้น
2. ปริมาณสารตัวเติมที่มีอยู่ในยาง (Filler content) การเติมสารตัวเติมลงไปปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ระยะห่างระหว่างกลุ่มก้อนของสารตัวเติมที่ลดลง ดังนั้นค่าอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมจึงสูงขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่มีอยู่ในยาง
3. พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สารตัวเติมที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันสูงกว่าสารตัวเติมที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ
4. ระดับของการแตกตัว (Degree of filler dispersion) หากสารตัวเติมในยางคอมพาวด์มีระดับการแตกตัวสูงทำให้กลุ่มก้อนของสารตัวเติมอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมด้วยกันเองมีค่าลดลง

### 2.1.8.3 การคงรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์

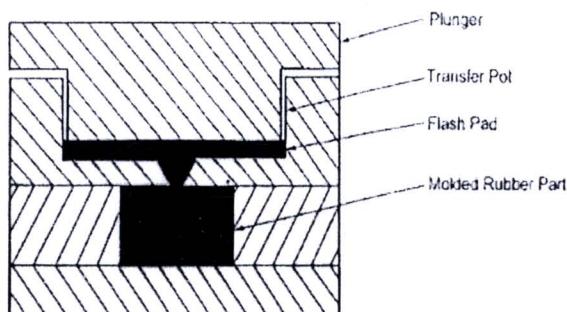
กระบวนการอัดยางคอมพาวด์เข้าไปในแม่พิมพ์ เป็นการทำให้ยางเกิดรูปร่าง และคงรูปในเวลาเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด ตามหลักที่ว่า ไปแล้วการขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์ทุกชนิดมีหลักการคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่วิธีการไหลของยางเข้าไปในแม่พิมพ์เท่านั้น ซึ่งสามารถจำแนก

ได้เป็น แม่พิมพ์แบบอัด (Compression) แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (Transfer) และแม่พิมพ์แบบฉีด (Injection) [25] ดังแสดงในรูปที่ 2.19-2.20



รูปที่ 2.19 แม่พิมพ์แบบอัดที่บรรจุเนื้อยาง [26]

รูปที่ 2.19 แสดงแม่พิมพ์แบบอัดที่บรรจุเนื้อยางประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ ช่องว่างสำหรับใส่เนื้อยาง (Mold cavity) แผ่นประกบด้านบน (Top plate) แผ่นประกบด้านล่าง (Bottom plate) แกนสลักแม่พิมพ์ (Dowel pin) ร่องระบายเนื้อยางล้น (Flash groove) และช่องสำหรับเปิดแม่พิมพ์ (Slot) ซึ่งแม่พิมพ์แบบอัดเป็นกรรมวิธีการผลิตแบบที่ง่ายและธรรมดาที่สุด ใช้กันอย่างกว้างขวางกับการแปรรูปยาง โดยนำยางซึ่งผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วมาทำให้มีรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์



รูปที่ 2.20 แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดที่บรรจุเนื้อยาง (Transfer molding) [17]

รูปที่ 2.20 แสดงแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดที่บรรจุเนื้อยาง ซึ่งแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดมีลักษณะคล้ายคลึงกับแม่พิมพ์แบบอัด มีส่วนประกอบหลักที่เพิ่มขึ้น คือ เครื่องอัดเนื้อยางเข้าแม่พิมพ์ (Plunger) ช่องใส่ยางก่อนอัดเข้าแม่พิมพ์ (Transfer pot) และรูไหลเข้าแม่พิมพ์ (Sprue) ถึงแม้ว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดมีราคาแพงกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา แต่แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดสามารถใช้เวลาอัดยางให้คงรูปสั้น

การแผ่กระจายความร้อนภายในแม่พิมพ์ดีกว่า เพราะมีแรงอัดสูงในการอัดยางให้ไหลเข้าช่องว่างของแม่พิมพ์ และสามารถใช้กับเครื่องอัดระบบเครื่องกล (Mechanical press) ได้

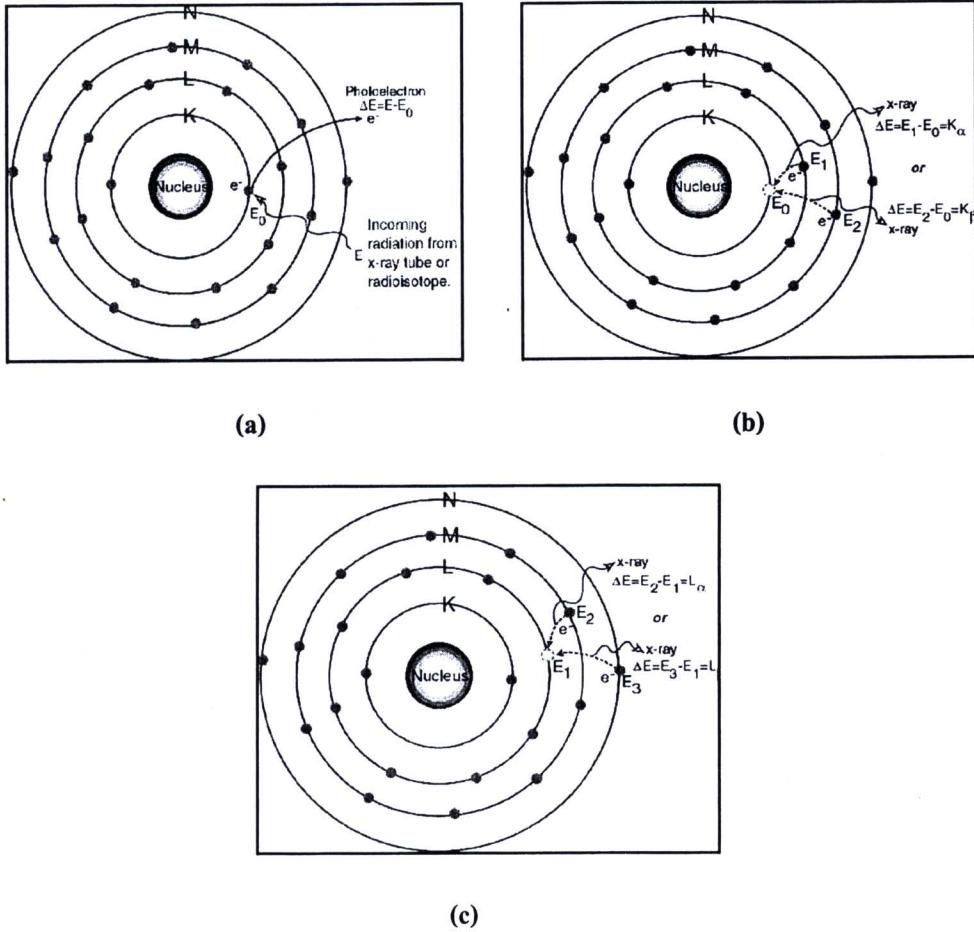
## 2.1.9 การพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวเติม

### 2.1.9.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry; XRF [27]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

#### - หลักการและวิธีการวิเคราะห์

เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (a) ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมไม่เสถียร อะตอมสามารถกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่าง ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (b) และ 2.21 (c) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมามีค่าแตกต่างกัน ขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้น เทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ และธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ ดังนี้ H He Li Be B C N O F Ne Na

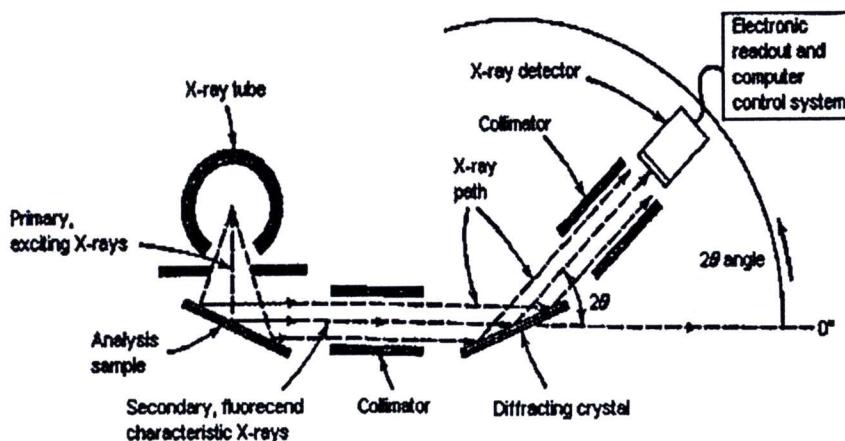


รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการเกิดรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่าง (a) อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอม (b) การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (c) การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ [27]

การคำนวณหาความยาวคลื่น (Wavelength) ของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยสมการ Bragg's law ดังแสดงในสมการที่ 2.1

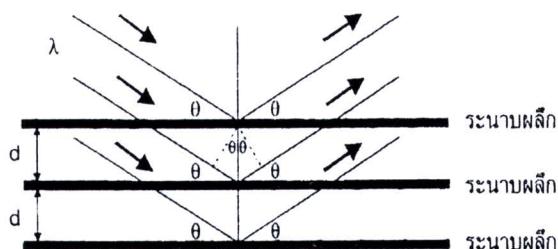
$$2d \sin \theta = n \lambda \tag{2.1}$$

โดยที่  $d$  = ระยะห่างระนาบของรังสีเอกซ์     $n$  = อันดับการเลี้ยวเบน  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่น     $\theta$  = มุมตกกระทบ



รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบหลักในเครื่อง XRF [27]

รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกส่งผ่าน Collimator ในรูปลำรังสีขนานไปยัง Diffracting crystal มีระยะห่างระหว่างระนาบผลึก เช่น คอวทซ์ ลิเทียม-ฟลูออไรด์ ไมกา เป็นต้น โดย Diffracting crystal ทำให้รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ (X-ray detector) โดยปกติ Diffracting crystal ทำมุม  $\theta$  กับระนาบรังสีขนานจาก Collimator และ ทำมุม  $2\theta$  กับเครื่องตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในระนาบผลึก [27]

### 2.1.9.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy; IR)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่นำแสงอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจเอกลักษณ์หาสูตรโครงสร้างหรือหาปริมาณของสาร โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงความถี่ที่มีค่าเฉพาะแตกต่างกันแล้ว ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกบันทึกเป็นสเปกตรัม ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด โดยชนิดของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท [28] คือ

### 1. Dispersive infrared spectrophotometer

ส่วนใหญ่เป็นชนิด Double beams คือ ให้ลำแสงหนึ่งผ่านสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ และอีกลำแสงหนึ่งผ่าน Reference (อาจเป็นอากาศ หรือตัวทำละลายที่ใช้เตรียมสารตัวอย่าง) สารตัวอย่างดูดกลืนแสงส่วนหนึ่งไว้ จากนั้นแสงที่เหลือที่ผ่านออกมาถูกส่งเข้า Monochromator ทำหน้าที่จัดลำดับจำนวนคลื่นของแสงที่ผ่านออกมาเป็นช่วง แล้วส่งเข้าสู่ Detector ซึ่งตรวจวัดแสงที่ผ่านออกมาแต่ละช่วงความถี่ โดยหักลบแสงที่ผ่านจากสารตัวอย่างและ Reference แล้วบันทึกด้วยเครื่อง Recorder ออกมาเป็นสเปกตรัม

### 2. เครื่อง Fourier Transform IR Spectrometer; FTIR

FTIR ได้เข้ามาแทนที่เครื่องมือแบบกระจายแสง เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความไวสูง ช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากเป็นการวัดที่เรียกว่า Time domain สามารถวัดการดูดกลืนทุกความถี่พร้อมกัน

วิธีเตรียมตัวอย่างเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากสารชนิดเดียวกันหากเตรียมด้วยวิธีต่างกันอาจทำให้ลักษณะหรือตำแหน่งของพีคเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการรายงานผลต้องระบุวิธีเตรียมตัวอย่างทุกครั้งก่อนนำสารตัวอย่างไปตรวจวัด ต้องเลือกวิธีเตรียมเซลล์ (Cell) หรือตัวกลางที่เหมาะสมไม่ดูดกลืนแสงในช่วงเดียวกับสารที่ต้องการศึกษา วิธีการเตรียมตัวอย่างดังนี้

- ซึ่งานตัวอย่างที่เป็นแก๊ส ทำได้โดยอัดแก๊สลงในเซลล์แก้ว ที่ทำจาก NaCl หรือ NaBr
- ซึ่งานตัวอย่างที่เป็นของเหลว ตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธีนี้เรียกว่า Neat liquid เตรียมได้โดยหยดตัวอย่างซึ่งเป็นของเหลวลงบนแผ่นเซลล์ที่ทำด้วย NaCl หรือ KBr สารละลายที่เป็นของเหลวเหนียวมากไม่เหมาะที่วัดแสง ต้องทำการละลายในตัวทำละลายแล้วใส่ในเซลล์สำหรับใส่ของเหลว ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ นอกจากไม่ดูดกลืนแสงในความถี่เดียวกับตัวอย่าง นอกจากนี้ ต้องแห้งและใสไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างและเซลล์ที่ใส่ตัวอย่าง ไม่เหมาะกับตัวทำละลายที่เป็นน้ำกับเซลล์ที่เป็นเกลือละลายน้ำ เช่น NaCl หรือ KCl
- ซึ่งานตัวอย่างที่เป็นของแข็งตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธีนี้เรียกว่า Mull เตรียมได้โดยบดสารตัวอย่าง 2-5 มิลลิกรัม เข้ากับ Mulling หรือของเหลวเหนียวชนิดอื่นที่ไม่ดูดกลืนแสงในความถี่เดียวกับตัวอย่าง ประมาณ 1-2 หยด บดให้เนียนเป็น Emulsion แล้วนำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยวิธี Neat sample การบดซึ่งานตัวอย่างสำคัญมาก หากผลึกที่ตกค้างทำให้เกิด Light scattering res disc โดยนำสารตัวอย่าง 0.5-1.0 มิลลิกรัม บดให้เข้ากับผง KBr หรือ KCl ชนิดที่ผลิตขึ้นมาสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR แล้วอัดเป็นแผ่น ต้องระวังเรื่องความชื้น เนื่องจากผงเกลือสามารถดูดความชื้นได้ดี

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ด้านคุณภาพ ดังนี้

- การหาสูตร โครงสร้างของสาร (Structure elucidation)

ข้อมูลที่ได้จากอินฟราเรดสเปกตรัมมีข้อจำกัดในการหาโครงสร้างของสาร โดยบอกได้เพียง หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโมเลกุลจากส่วนของ Group frequency region โดยทั่วไปใช้ข้อมูลจากอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นส่วนสนับสนุน และขยายผลด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) และ Mass spectrometry (MS) เป็นต้น

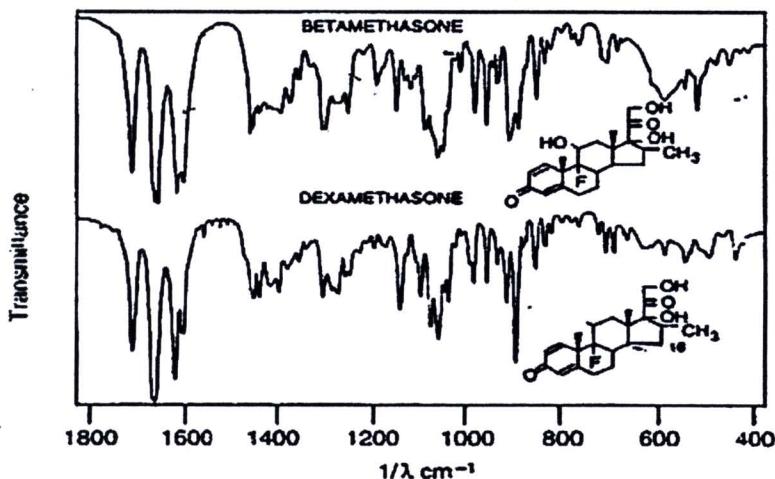
- การพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยวิธีอินฟราเรดเป็นวิธีที่ดี กล่าวได้ว่าถ้าอินฟราเรดสเปกตรัมของสารสองตัวเหมือนกันทุกประการมาตรวจวัดด้วยเครื่องมือเดียวกัน การเตรียมแบบเดียวกัน สภาพแวดล้อมเหมือนกัน โดยเปรียบเทียบพีกต่อพีก สารทั้งสองตัวเป็นสารเดียวกัน โดยส่วนความถี่ของหมู่อะตอม (Group frequency region) ของอินฟราเรดสเปกตรัมเป็นส่วนที่บอกหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในโมเลกุล สิ่งที่ใช้ในการพิจารณา คือ ส่วน Fingerprint เป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละสารตัวอย่างเช่นเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของ Betamethasone และ Dexamethasone ดังแสดงในรูปที่ 2.24 มีลักษณะความคล้ายคลึงกันมาก แต่เมื่อดูจากส่วน Fingerprint มีความแตกต่าง ซึ่งสามารถบอกได้ว่าสารทั้งสองตัวต่างชนิดกัน ยกเว้นสารสองตัวเป็น Enantiomer ซึ่งเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีไม่สามารถแยกความแตกต่างของสารที่เป็น Enantiomer ได้

นอกจากนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ Beer-Lambert's Law ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างในสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการดูดซับ Absorbance ของสารละลายดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$A = \epsilon bc \quad (2.2)$$

โดยที่  $A = \text{Absorbance}$ ,  $\epsilon = \text{Constant}$   
 $b = \text{Part length}$ ,  $c = \text{Concentration}$



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของ Betamethasone และ Dexamethasone [28]

เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ สามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และไม่ทำลายตัวอย่างทดสอบ เทคนิคนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่นการวิเคราะห์ด้านพอลิเมอร์และปิโตรเคมี

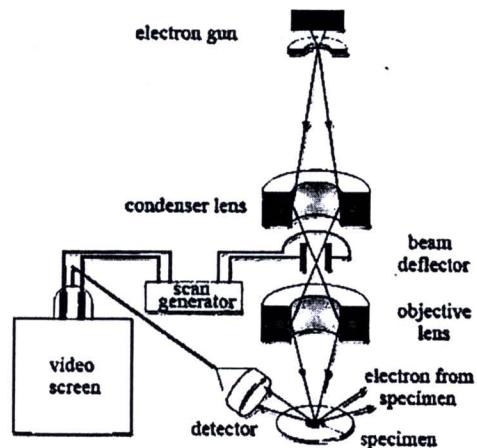
### 2.1.9.3 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) [29]

Scanning Electron Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายได้สูงถึง 10 นาโนเมตร การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM เป็นภาพลักษณะ 3 มิติ เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อ และเซลล์หน้าตัดของโลหะ และวัสดุ เป็นต้น

#### - หลักการและวิธีการวิเคราะห์

กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน เพื่อป้อนให้กับระบบถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่หรือขนาดเล็กได้ตามต้องการ และสามารถปรับความคมชัดโดยการปรับขนาดของลำอิเล็กตรอน หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

ลงไปบนผิวชิ้นงาน หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น โดยที่สัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิบันทึกแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปสร้างเป็นภาพบนจอแสดงผลต่อไป ซึ่งสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอแสดงผล



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM [29]

## 2.1.10 สมบัติของยาง

### 2.1.10.1 พลาสติกซีดี (Plasticity)

พลาสติกซีดีเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการไหล หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคิบหรือยางคอมพาวด์ ส่วนใหญ่นิยมใช้ค่าพลาสติกซีดีเป็นตัวบ่งชี้ความยากง่ายของกระบวนการผลิตเครื่องมือที่ใช้วัดค่าพลาสติกซีดีของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง คือ แบบหมุน (Rotation) และแบบกด (Compression) [25]

- แบบหมุน เครื่องมือที่ใช้วัดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางเรียกโดยทั่วไป เครื่องมูนีวิสโคมิเตอร์ (Mooney Viscometer) ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือแสดงในรูปของความหนืด ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางที่วัดได้ คือ ถ้ายางมีความหนืดสูงทำให้มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำและในทางตรงกันข้ามยางที่มีความหนืดต่ำก็ทำให้มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง ยางที่มีความหนืดต่ำจึงไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตโดยง่าย

ตัวอย่างสัญลักษณ์โดยทั่วไปที่ใช้ในการแสดงผลการทดสอบค่าความหนืดมูนิ 40-ML 1+4 (100°C) ซึ่งมีความหมาย ดังนี้

40	หมายถึง ค่าความหนืดที่วัดได้ในหน่วยมูนิ
M	เทคนิค Mooney
L	หมายถึง โรเตอร์ขนาดใหญ่ (Large) และถ้าเป็นโรเตอร์ขนาดเล็ก ใช้ S แทน (Small)
1	หมายถึง ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ยางก่อนการทดสอบ
4	หมายถึง ระยะเวลาที่อ่านค่าความหนืด

อุณหภูมิของการทดสอบ 100 องศาเซลเซียส

- แบบกด การวัดค่าพลาสติกซิตีด้วยเทคนิคแบบกดสามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว แต่เนื่องจาก อัตราเฉือนที่เกิดขึ้นในการทดสอบมีค่าต่ำ ทำให้ค่าพลาสติกซิตีที่วัดได้เหมาะสำหรับการใช้งานในเชิงเปรียบเทียบเท่านั้น ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ทำนายความสามารถในการไหลของยางในระหว่างกระบวนการผลิต เครื่องมือที่ใช้วัดค่าพลาสติกซิตีแบบกด เรียกว่า เครื่องพลาสติกอมิเตอร์ แบบแผ่นคู่ขนาน (Parallel plate plastomer)

#### 2.1.10.2 ความแข็ง (Hardness)

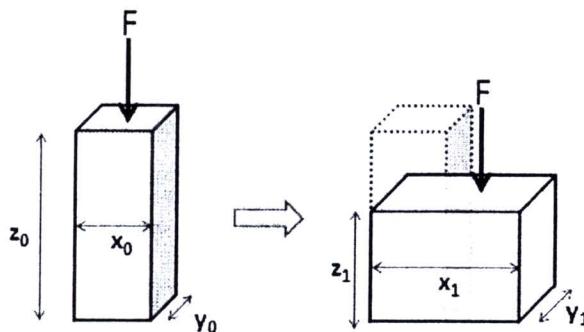
ความแข็งเป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยทั่วไป การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี ได้แก่ การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) การทดสอบความแข็งแบบบาร์คอลล (Barcol hardness test) และการทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness test) [30] ความแข็งของยาง หมายถึง ความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวง (Penetration) ของตัวกด (Indenter) ที่มีขนาดเฉพาะ และภายใต้แรงกดที่กำหนด โดยหน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วย คือ IRHD (International Rubber Hardness Degree) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นใช้ลูกกลมแข็ง (Rigid ball) แทนตัวกด และแรงกดมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์ เรียกว่า เครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) โดยออกแบบให้ใช้ในการทดสอบความแข็งกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติก และวัสดุประกอบ (Composite) แบบที่นิยมใช้ทดสอบกันมากมีอยู่ 2 แบบ คือแบบชอร์ เอ (Shore A) และแบบชอร์ดี (Shore D)

- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอ (Shore A) ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่อ่อนมากๆ จนถึงยางที่มีความแข็งค่อนข้างสูง (90 ชอร์เอ) เช่น ยาง หนังสือหรือวัสดุกลุ่มอีลาสโตเมอร์ที่อ่อนนุ่ม
- เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดี (Shore D) ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางหรือพลาสติกที่แข็งมากๆ (มากกว่า 90 ชอร์เอ)

เครื่องคูโรมิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกัน คือ สปริงส่งน้ำหนักไปยังหัวกดซึ่งกดลงบนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ ความต้านทานต่อการเกิดรอยของพื้นผิวชิ้นทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัด [25]

### 2.1.10.3 สมบัติแรงกด

ในสภาวะการใช้งานจริงผลิตภัณฑ์บางส่วนใหญ่มักได้รับแรงกดมากกว่าแรงดึง โดยเฉพาะการใช้งานยางในเชิงวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสะพาน ยางรองฐานตึก ยางลดการสั่นสะเทือน เป็นต้น ซึ่งการใช้งานดังกล่าว เกิดการยุบตัวในแนวตั้ง (แนวแกน Z) และถ้าหากยางได้รับการกดภายใต้พื้นผิวที่ลื่นมากๆ (Fully lubricated surfaces) ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน นั่นคือยางทั่วทั้งก้อนมีอิสระเต็มที่ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแรงภายนอกที่เข้ามากระทำ ส่งผลให้เกิดยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y ดังนั้นในการกดยางในแนวแกน Z จึงเปรียบเสมือนกับการออกแรงดึงยางทั้งแนวแกน X และ Y พร้อมกันด้วยแรงที่เท่ากัน [25] ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของก้อนยางเมื่อได้รับแรงกด [25]

#### 2.1.10.4 ความเสียดทาน (Friction) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

ความเสียดทานและการสึกหรอเป็นสิ่งที่สัมพันธ์กัน เนื่องจากการสึกหรอเกิดจากกระบวนการสูญเสียเนื้อวัสดุในระหว่างการเกิดความเสียดทานหรือการขัดถู ถ้าไม่มีความเสียดทานเกิดขึ้น การสึกหรอไม่สามารถเกิดขึ้นได้ สมบัติความต้านทานการสึกหรอหรือความต้านทานต่อการขัดถูเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อต้องนำยางไปใช้งานในเชิงพลวัต (Dynamic applications) กล่าวคือ ในระหว่างการใช้งานยางได้รับแรงกระทำจากภายนอกแบบเป็นรอบๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ยางล้อรถ ซิลยาง เป็นต้น ความเสียดทานที่สูงอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะทำให้ความร้อนที่ผิวสัมผัสสูงส่งผลให้ยางเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว [25]

#### 2.1.10.5 สมบัติวิสโคอิลาสติก

ยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกโดยมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลได้คล้ายของเหลวหนืด (Viscous liquid) และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) โดยในสภาพที่ยางยังไม่คงรูปสามารถไหลได้ โดยแสดงถึงยางมีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นของเหลวหนืดในสัดส่วนค่อนข้างสูง ในขณะที่สัดส่วนในส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อยางได้รับการคงรูปเกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของโมเลกุลยางทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและยางไม่สามารถไหลได้ กล่าวคือยางคงรูปมีส่วนประกอบของส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง และมีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นของเหลวหนืดในสัดส่วนลดลง ซึ่งทำให้ทราบว่า การคงรูปยางไม่สามารถทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหายไปจากเนื้อยางได้หมด ดังนั้น ยางจึงไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้ ยางคงรูปที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นระยะเวลาอันยาวนานและเมื่อแรงกระทำจากภายนอกหมดไป ยางกลับคืนสู่รูปร่างที่ใกล้เคียงเดิมเท่านั้นมีบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรเนื่องจากองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่เหลืออยู่ [25]

การเสีรูปร่างถาวร หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังการปล่อยแรงจากภายนอกที่มากระทำเช่น ถ้ายางถูกกดภายใต้สภาวะที่กำหนด การลดลงของความหนาหลังจากที่ได้รับการกดเมื่อเทียบกับความหนาดั้งเดิมเรียกว่า การเสีรูปร่างหลังการกดอัด (Compression set)

### 2.1.10.6 ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) และความร้อนสะสม (Heat buildup)

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและปล่อยให้กลับสู่สภาพตั้งต้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในรูปความร้อน ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปต่อหนึ่งรอบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส โดยเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมในยางหรือทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้นขณะใช้งานเมื่อมีการระบายความร้อนได้ช้า ส่งผลทำให้อัตราการเกิดความร้อนสูงกว่าอัตราการระบายความร้อน ซึ่งพบได้ในผลิตภัณฑ์ยางที่มีความหนาและขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น [25]

### 2.1.10.7 สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต

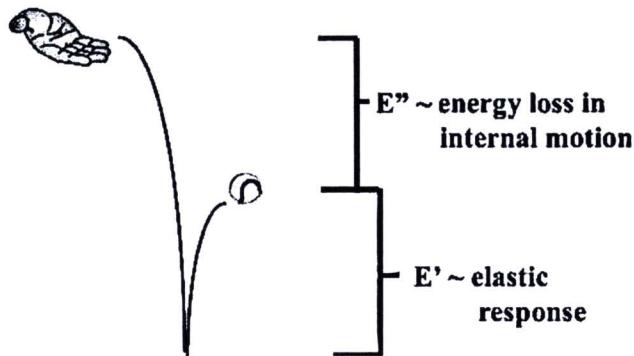
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์

การตรวจสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของยาง หมายถึง สมบัติของยางเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียดที่ไม่คงที่มากกระทำ วัสดุต่างๆ มักถูกใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงกระทำแบบต่างๆ เช่น แรงกด แรงดึง แรงฉีก แรงกระแทก แรงเฉือน ในบางกรณีแรงกระทำต่อวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลวัต ที่มีลักษณะเป็นวงจรถือเป็นคาบโดยมีการกดและปล่อยสลับกัน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางมีค่าไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลาเป็นรอบๆ (Cycle) ตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องรับแรงแบบนี้ ได้แก่ ซิลยางที่รับการกดอัด ยางรองน้ำหนัก ยางกันกระแทก เป็นต้น [25]

สมบัติเชิงกลพลวัตสามารถทดสอบได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Servo-Hydraulic Tester สามารถวัดค่าของยางที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับของความถี่ (Frequency sweep) และระดับของความเครียด (Strain sweep) และสามารถวัดสมบัติเชิงกลพลวัตของยางที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (Temperature sweep) เรียกเครื่องมือชิ้นหลังนี้ว่า เครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) หรืออาจเรียกว่า เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) มีหลักการและวิธีการทดสอบเหมือนกัน แตกต่างกันตามชื่อบริษัทผู้ผลิต เช่น (Reometric scientific, DMTA) หรือ (Perkin elmer, DMA)

การศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลแบบพลวัตมีความสำคัญสำหรับผู้ผลิตในการตรวจสอบพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการทำนายอายุการใช้งาน หรือการบ่งบอกถึงความเหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์นั้นไปใช้งาน ผลจากการศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตทำให้ทราบถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน ตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ และลักษณะของการตอบสนองต่อแรงกระทำที่มีความถี่ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลตัวอย่าง นอกจากนี้ ทำการจำลองสภาวะที่คล้ายกับการใช้งานจริงมาทำการทดสอบพอลิเมอร์ ศึกษาความสามารถในการเก็บ

พลังงานเอาไว้ (Storage modulus หรือ Stiffness) แสดงถึงความแข็งแรงของส่วนที่ยืดหยุ่น (Elastic) และความสามารถในการกระจายแรงที่มากระทำหรือเปลี่ยนแรงที่มากระทำให้เป็นความร้อน (Loss modulus หรือ Energy dissipation) เป็นค่าความแรงของส่วนที่ไหลได้ (Viscous) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ภายใต้แรงที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำต่อวัสดุด้วยความถี่คงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา [31]



รูปที่ 2.27 แบบจำลองการกระดอนของบอลแสดงสมบัติวิสโคอีลาสติก [32]

ในการวิเคราะห์สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตแสดงค่ามอดุลัสเชิงซ้อน (Complex Modulus) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

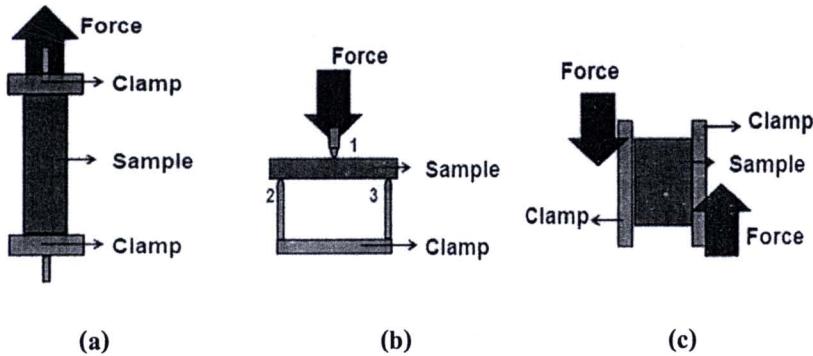
$$E^* = E' + iE'' \quad (2.3)$$

โดยที่

- $E^*$  = มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)
- $E'$  = มอดุลัสจริง (Storage modulus)
- $iE''$  = มอดุลัสจินตภาพ (Loss modulus)

อัตราส่วนระหว่าง  $E''$  กับ  $E'$  เรียกว่า  $\tan \delta$  หรือ Loss factor หรือเรียกว่า Damping ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนการสูญเสียสัมพัทธ์ของพลังงานในรูปความร้อนเป็นผลมาจากการมีสมบัติแบบวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์ ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตมีหลายประเภท เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ เส้นใย เป็นต้น โดยที่ชิ้นงานตัวอย่างต้องมีขนาดและรูปร่างที่วัดค่าได้แน่นอน เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือชิ้นทรงกลม การวิเคราะห์สามารถเตรียมตัวอย่างได้หลายแบบ ทำให้มีวิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างหลายแบบ เช่น ถ้าชิ้นงานเป็นฟิล์มบางหรือเส้นใยให้แรงแบบดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (a) เป็นแบบจำลองแสดงการให้แรง 3 แบบ

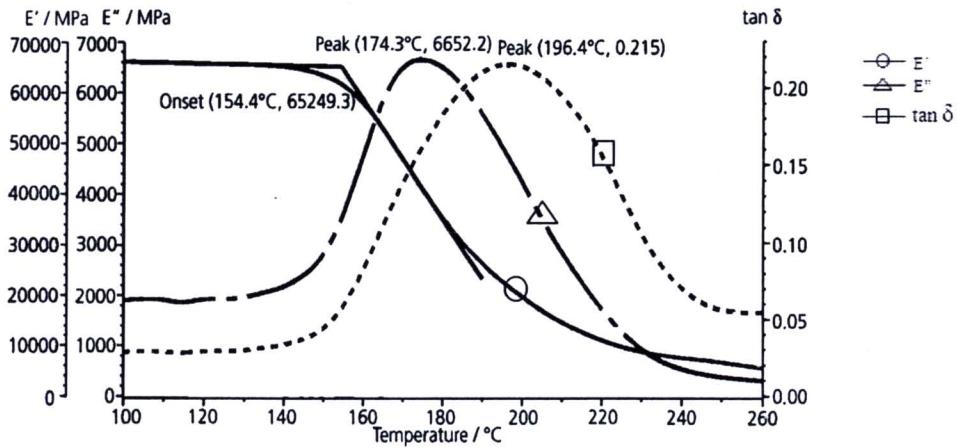
โดยให้แรงกระทำต่อชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกยึดด้วย Clamp ถ้าตัวอย่างมีความแข็งแรงพอสมควรเตรียมเป็นแท่งที่มีความยาวเท่ากับหัววัดคดงแบบ 3 จุด สามารถให้แรงแบบคดงดังแสดงในรูปที่ 2.28 (b) แต่ถ้าชิ้นงานไม่แข็งแรงมากหรือมีลักษณะที่มีความหนืดมาก เช่น ยาง สามารถให้แรงแบบเฉือนดังแสดงในรูปที่ 2.28 (c)



รูปที่ 2.28 แบบจำลองการให้แรงกระทำต่อชิ้นงาน (a) แบบคดง (b) แบบคดง และ (c) แบบเฉือน [32]

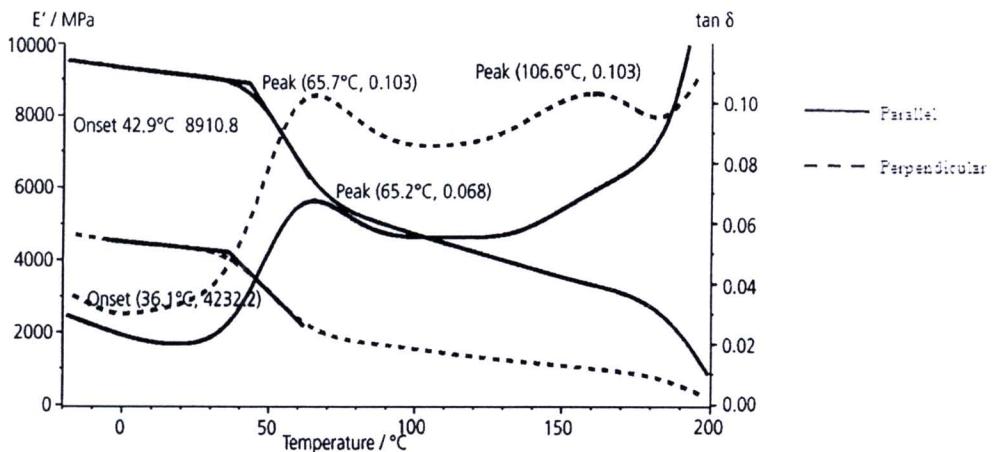
เครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) สามารถแสดงผลออกมาในรูปของกราฟ โดยมีค่าโมดูลัสการสะสม (Storage modulus) ค่าโมดูลัสการสูญเสีย (Loss modulus) ค่าแทนเจนต์สูญเสีย ( $\tan \delta$ ) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) ดังตัวอย่างผลวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29-2.30

- ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง DMTA



รูปที่ 2.29 ค่า Storage modulus, Loss modulus และค่า Tan  $\delta$  ของ Epoxy resin ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน [33]

จากรูปที่ 2.29 ทดสอบ Epoxy resin ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ด้วยโหมด 3-Point Bending ความถี่ 1 ครั้งต่อวินาที มีค่า Storage modulus ของชิ้นงาน เท่ากับ 65249.3 MPa มีค่า Loss modulus เท่ากับ 6652.2 MPa และ พีคสูงสุดของ Tan  $\delta$  อยู่ที่ อุณหภูมิ 196.4 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิแสดงถึงค่า Glass transition temperature ( $T_g$ ) ของชิ้นงาน [33]



รูปที่ 2.30 ค่า Storage modulus และค่า Tan  $\delta$  ของ Polybutylene terephthalate; PBT ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วที่ปริมาณ 30% [33]

จากรูปที่ 2.30 ทำการทดสอบ Polybutylene terephthalate; PBT ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว 30% ด้วย โหมด 3-Point Bending ความถี่ 1 ครั้งต่อวินาที พบว่า เส้นใยแก้วที่มีการจัดเรียงตัวแบบขนานเสริมแรงใน PBT มีค่ามีค่า Storage modulus ของชิ้นงานสูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบตั้งฉาก และมีค่า Tan  $\delta$  ต่ำกว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วแบบตั้งฉาก แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวแบบขนานของเส้นใยเสริมแรงใน PBT ส่งผลให้ชิ้นงานเมื่อได้แรงกระทำในลักษณะที่เป็นคาบ คือ มีการให้แรงกดและปล่อยสลับกัน มีการเสียรูปได้ยากกว่า [33]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N. Sombatsompop และคณะ [1] ศึกษาการคงรูป สมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อน้ำมันของยางเอ็นบีอาร์ที่มีการเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณ 60 phr และพรีซิพิเตตซิลิกา และซิลิกาในถ้ำลอยที่ปริมาณต่างกัน พบว่า การเติมผงเขม่าดำร่วมกับพรีซิพิเตตซิลิกา ทำให้เวลาไหลก่อนสุก และเวลาในการคงรูปลดลง แต่การเติมผงเขม่าดำร่วมกับซิลิกาในถ้ำลอยทำให้เวลาในการคงรูปเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเกิดแรงกระทำระหว่างส่วนที่มีขั้วในยางเอ็นบีอาร์ และโลหะออกไซด์ในถ้ำลอยจึงหน่วงการคงรูปของยางจากสมบัติเชิงกล พบว่า ความต้านทานการดึงของยางเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงเขม่าดำและพรีซิพิเตตซิลิกา และในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส โดยการเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำส่งผลมากกว่าพรีซิพิเตตซิลิกา และซิลิกาในถ้ำลอย และภายหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมัน พบว่า ค่าความต้านทานการดึง ค่าความต้านทานการฉีกขาด และระยะยืดที่จุดขาดลดลง การเติมพรีซิพิเตตซิลิกาเสริมแรงให้กับของผสมยางเอ็นบีอาร์ได้ดีกว่าซิลิกาในถ้ำลอย การเติมผงเขม่าดำและซิลิกาทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น

C. Kantala และคณะ [2] ศึกษาผลของพรีซิพิเตตซิลิกาและซิลิกาในถ้ำลอยที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน และการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมัน โดยมีการเติมและไม่เติมยางคลอโรพรีน หรือยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ซึ่งเป็นสารช่วยประสาน พบว่า การเติมพรีซิพิเตตซิลิกาทำให้เวลาการไหลตัวของยางก่อนบ่มสุก และเวลาคงรูปลดลง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา ทำให้ความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาศสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมพรีซิพิเตตซิลิกาทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าซิลิกาในถ้ำลอย โดยสามารถใช้พรีซิพิเตตซิลิกาเป็นสารเสริมแรงให้กับยางผสม ในขณะที่ซิลิกาในถ้ำลอยทำหน้าที่เป็นกึ่งสารเสริมแรง และ/หรือสารเพิ่มเนื้อ และการเติมยางคลอโรพรีนหรือยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยสารช่วยประสานยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ มีประสิทธิภาพมากกว่าสารช่วยประสานยางคลอโรพรีน และภายหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ภายหลังบ่มเร่งในน้ำมันสมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง

D.A. Skelhorn และ คณะ [34] ศึกษาชนิดของสารตัวเติมกลุ่มทรายซิลิกาเกาหลี PoleStar 200R Silitin N85 Silitin Z86 และ Silikolloid ในยางอีพียีเอ็มโดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) พบว่า ยางอีพียีเอ็มที่เติมสารตัวเติม PoleStar 200R มีสมบัติการไหล การบ่มสุก และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิด Silitin N85 Silitin Z86 และ Silikolloid เมื่อทำการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่า PoleStar 200R มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิด Silitin N85 Silitin Z86 และ Silikolloid อีกทั้ง PoleStar 200R ในยางอีพียีเอ็มเกิด Shark skin ได้น้อยกว่าสารตัวเติมสารตัวเติมชนิด Silitin N85 Silitin Z86 และ Silikolloid

H. Oggermuller [35] ศึกษาปรับปรุงสมบัติด้านการผสมของยางเอสปีอาร์คอมปาวด์โดยเติมซิลิกาที่เกิดจากการรวมกันของแร่ Quartz และ Kaolinite เป็นสารตัวเติม พบว่า ซิลิกาที่เกิดจากการรวมกันของแร่ Quartz และ Kaolinite สามารถทำให้ยางผสมง่ายขึ้นแต่ทำให้ค่าความต้านทานการดึงยืด และค่าความต้านทานการฉีกขาด ลดลงเมื่อเทียบกับพรีซิพิตเตดซิลิกา อย่างไรก็ตาม ซิลิกาที่เกิดจากการรวมกันของแร่ Quartz และ Kaolinite โดยที่ Silitin Z86 สามารถปรับปรุงสมบัติการคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดได้ มีค่าความหนืดมูนิต่ำ และมีเวลาการไหลตัวของยางมากขึ้น

K. Abdul และคณะ [36] ศึกษาผลของสารตัวเติมผงเขม่าดำ และซิลิกา ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต และการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันของยางผสม 2 ชนิดระหว่างยางอะคริลิกกับยางฟลูออโรคาร์บอนและยางผสม 3 ชนิด ระหว่างยางอะคริลิก ยางฟลูออโรคาร์บอน และพอลิอะคริเลท โดยพบว่า การเติมสารตัวเติมผงเขม่าดำ และซิลิกา ทำให้ Tensile strength และ Tear strength สูงขึ้น สำหรับ Elongation at break ลดลง สมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อนในน้ำมันของยางผสมที่เติมผงเขม่าดำดีกว่าการเติมซิลิกา สำหรับยางผสม 2 ชนิด และยางผสม 3 ชนิด ที่มีการเติมสารตัวเติมสามารถทนต่อการบวมตัวใน Methyl Ethyl Ketone ได้ดี และเมื่อปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Storage modulus เพิ่มขึ้นในทุกอุณหภูมิการทดสอบ

S. Thongsang และคณะ [37] ศึกษาเปรียบเทียบผลการเติมผงเถ้าลอย และพรีซิพิตเตดซิลิกาที่มีต่อค่าความหนืด การบ่มสุก และสมบัติวิสโคอิลาสติกของยางธรรมชาติ โดยพบว่า การเติมผงเถ้าลอยลงในยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าความหนืดของยางต่ำกว่าการเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของผงเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ และทำการทดสอบ DMTA ที่อุณหภูมิต่ำ สารตัวเติมทั้งสองชนิดที่ปริมาณการเติม 30 และ 60 phr ไม่ส่งผลต่อค่า Storage modulus และ Loss modulus

J.-M. Degrange และคณะ [38] ศึกษาวิสโคอีลาสติกของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม โดยการตรวจสอบค่า  $T_g$  ของยางเอ็นบีอาร์ด้วยเทคนิค DMA พบว่า ยางเอ็นบีอาร์ที่มีปริมาณผงเขม่าดำมากกว่า มีค่า Storage modulus มากกว่า อีกทั้งมีค่า  $\tan \delta$  ต่ำกว่า และจากพีคของ  $\tan \delta$  แสดงถึงค่า  $T_g$  นั่นคือ พีคของ  $\tan \delta$  ของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงเขม่าดำมากกว่ามีค่า Shift ไปทางขวา แสดงถึงค่า  $T_g$  ที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของพฤติกรรมทางไดรโบลอจิสต์คูดยางเอ็นบีอาร์ โดยยางเอ็นบีอาร์ที่มีค่า  $T_g$  สูง ทนการสึกหรอได้ดีกว่า นอกจากนี้ยางเอ็นบีอาร์ที่มี  $T_g$  ต่ำ ส่งผลให้เกิดร่องลึกจากการสึกหรอได้มากกว่า

V.G. Geethamma และคณะ [39] ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลพลวัตของวัสดุยางธรรมชาติถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว พบว่า พีค  $\tan \delta$  และ Loss modulus ของวัสดุยางธรรมชาติที่ไม่เสริมแรงอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลาง ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส สำหรับ พีค  $\tan \delta$  และ Loss modulus ของวัสดุยางธรรมชาติที่เสริมแรง แตกต่างจากการไม่เสริมแรง นอกจากนี้ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า  $\tan \delta$  และ Loss modulus ลดลง ขณะที่ ค่า Storage modulus เพิ่มขึ้นทั้งในวัสดุยางธรรมชาติที่เสริมแรงและไม่มีการเสริมแรง ส่วน ค่า  $\tan \delta$  และ Loss modulus ลดลง ที่มีการเติมด้วยเส้นใยมะพร้าว แสดงถึงยางมีการสูญเสียความร้อนได้น้อย

P. Phewphong และคณะ [40] ศึกษากระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของพรีซิพิตเซชันในยางคลอไลน์เต็ดพอลิเอทรีนผสมกับยางธรรมชาติโดยพิจารณาจากค่า Damping จากเทคนิค DMTA เข้าสู่ศรคำนวณหาปริมาณการกระจายตัว พบว่า การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของพรีซิพิตเซชันปริมาณมากกระจายตัวอยู่ในเฟสของยางคลอไลน์เต็ดพอลิเอทรีน ซึ่งเป็นเฟสหลักเกิดอันตรกิริยากันระหว่างหมู่ไซเลนอลกับคลอรีนอะตอม และเมื่อปริมาณของซีลีมากมากขึ้นก็ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางคลอไลน์เต็ดพอลิเอทรีนกับซีลีมากมากขึ้น นำไปสู่การเกาะกลุ่มของซีลีกาในเฟสยางคลอไลน์เต็ดพอลิเอทรีน และทำการลดการเกาะกลุ่มเป็นก้อนด้วยการปรับปรุงผิวด้วย 3-Thiocyanatopropyl Triethoxy Silane (Si-264) ตรวจสอบด้วยเทคนิค DMTA พบว่าการเกาะกลุ่มเป็นก้อนลดน้อยลง

S. Thongsang และคณะ [41] ศึกษาผลของการปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH และ Si69 ที่มีต่อยางธรรมชาติและถั่วลอซ โดยใช้ซีลีกาในถั่วลอซเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติที่ปริมาณ 30 และ 60 phr พบว่า ลักษณะการคงรูป และสมบัติเชิงกลของของผสมยางธรรมชาติและถั่วลอซดีขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงผิวของอนุภาคถั่วลอซด้วย Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si69) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ปริมาณต่างๆ เนื่องจาก Si69 ไปเชื่อมระหว่างยางธรรมชาติและถั่วลอซ โดยสร้างพันธะ C-S กับยางธรรมชาติและสร้างพันธะ Siloxane กับถั่วลอซ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของของผสม โดยสมบัติ

เชิงกลของของผสมดีขึ้นเมื่อใช้ Si69 ที่ความเข้มข้นต่ำร้อยละ 2.0–4.0 (โดยน้ำหนักของซิลิกาในถ้ำลอย) แต่แย่งที่ความเข้มข้นสูงๆ ร้อยละ 6.0–8.0 (โดยน้ำหนักของซิลิกาในถ้ำลอย) เนื่องจากที่ความเข้มข้น Si69 สูง เกิดการลดลงของปริมาณการเชื่อมขวาง และเกิดการรวมตัวกันเองของ Si69 เกิดเป็น Polysiloxane Si69 แทรกอยู่ระหว่างผิวหน้าของของผสม โดยสร้างพันธะของซิลเฟอร์ โดยการใส่ Si69 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลเสริมกันต่อสมบัติของของผสม

A. Mostafa และคณะ [42] ศึกษาผลของการเติมผงเขม่าดำในยางเอสีปาร์และยางเอ็นปีอาร์ที่มีต่อสมบัติความต้านทานการดึงยึด ความต้านทานการกดอัด ความแข็ง และความต้านทานการขัดสี โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผงเขม่าดำที่ 0 20 30 40 50 และ 70 phr พบว่า ยางเอสีปาร์และยางเอ็นปีอาร์ที่มีการเติมผงเขม่าดำมีค่าความแข็งแรงสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่ากรณีที่ไม่เติม และเมื่อปริมาณผงเขม่าดำมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้น แต่ระยะยืดที่จุดแตกหักลดลง และที่ปริมาณผงเขม่าดำเท่ากัน ยางเอ็นปีอาร์มีค่ามอดูลัสสูงกว่ายางเอสีปาร์ แต่มีระยะยืดที่จุดแตกหักน้อยกว่า และนอกจากนี้ การใส่ผงเขม่าดำทำให้ค่าความต้านทานต่อการกดอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงเขม่าดำ ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น และเพิ่มตามปริมาณผงเขม่าดำ โดยยางเอ็นปีอาร์มีค่าความแข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับยางเอสีปาร์ และค่าความต้านทานการขัดถูของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเขม่าดำที่ปริมาณ 50 phr จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดลง

J-T Kim และคณะ [43] ศึกษาคุณลักษณะของยางเอ็นปีอาร์ ที่มีการเติมสารตัวเติมประเภทซิลิเกต C18-MMT โดยใช้สารคู่ควบไซเลนเป็นสารช่วยประสาน พบว่า ยางคอมปาวด์เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนส่งผลทำให้แรงบิดของเครื่องผสมสูงมาก เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างหมู่ OH บนผิวของ C18-MMT กับพันธะคูที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาในระบบ ซึ่งการเติมสารคู่ควบทำให้การแตกตัวของ C18-MMT ดีขึ้น และสามารถเกิดพันธะเชื่อมกันระหว่างยางเอ็นปีอาร์กับ C18-MMT ดีขึ้น โดยตรวจสอบจาก FTIR แสดงถึงการเกิดพันธะ Si-O-Si และพันธะ S-C เมื่อเติมสารคู่ควบไม่เกิน 5 phr ทำให้ค่าความแข็งแรง ความทนต่อแรงดึง และความเสถียรต่อความร้อนดีขึ้น

N. Suzuki และคณะ [44] ศึกษาผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างยางเอ็นปีอาร์ ที่มีปริมาณหมู่อะคริไลน์ไครต์กับสารตัวเติมซิลิกาที่ส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างเคมี และสมบัติทางกลจากการทดสอบ FT-IR พบว่า เกิดอันตรกิริยาดัวยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไนไครต์กับหมู่ไซเลนอลบนผิวของซิลิกา และเมื่อปริมาณพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อะคริไลน์ไครต์ ส่งผลให้ลดการเกิดการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) ของซิลิกา ซึ่งตรวจสอบจากการทดสอบ Bound rubber

พบว่า ขนาดการเกาะกลุ่มของซิลิกามีขนาดเล็กลง สำหรับการทดสอบสมบัติพลวัตทางความร้อน แสดงให้เห็นการเกาะกลุ่มของซิลิกาทำให้อุณหภูมิเชิงกลลดลง

Choi, S.-S. และคณะ [45] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ และปริมาณอะคริโลไนไตรต์ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัวของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมซิลิกา ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ยางเอ็นบีอาร์มีส่วนการบวมตัวจากน้ำมากกว่าที่อุณหภูมิห้อง และพบว่า ปริมาณซิลิกามีผลต่อการบวมตัวในน้ำของยางเอ็นบีอาร์ โดยในการทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน พบว่า ชิ้นงานที่ปริมาณซิลิกามากมีส่วนการบวมตัวมากกว่าที่ปริมาณซิลิกาน้อย และเมื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการบวมตัว เช่น Crosslink density และปริมาณซิลิกา พบว่า ส่วนการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอะคริโลไนไตรต์ลดลง

Sae-oui และคณะ [46] ได้ศึกษาการใช้สารคู่ควบไซเลน 2 ชนิดคือ Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si-69) และ 3-Thiocyanatopropyl triethoxy silane (Si-264) เพื่อปรับปรุงผิวของซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ พบว่า Si-264 สามารถเพิ่มระดับการเสริมแรง (Degree of reinforcement) ได้มากกว่า Si-69 โดยสารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 ชนิด สามารถช่วยปรับปรุงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น