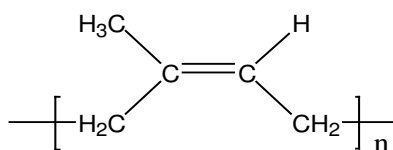


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่ไม้เมซอนในทวีปอเมริกาใต้ (พรพรรณ, 2540) น้ำยางสดที่กรีดยึดจากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้งประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่าน้ำยางข้น การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน การนำน้ำยางสดมาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3-7 วันจะได้ยางแห้งที่เรียกว่ายางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้วอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน เพราะต้องผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นซึ่งขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 5L ซึ่งมีสีจางมากจำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเหลืองปนสูงและมีสีเข้มก็อาจใช้ยางแผ่นหรือเศษยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพง และต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน (เสาวนีย์, 2543) ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล ( $M_w$ ) สูงเฉลี่ยประมาณ  $1.6 \times 10^6 - 2.3 \times 10^6$  (Roberts, 1988) มีชื่อทางเคมี cis-1,4-Polyisoprene กล่าวคือมี Isoprene ( $C_5H_8$ ) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1,000-20,000 และมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ 20 °C (Fred, 1988)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (Maurice, 1973)

เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous polymer) แต่ในบางสถานะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติจะสามารถเกิดผลึกได้เนื่องจากการยืดตัวทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือ ยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกแรงกระทำ และสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็วเมื่อพ้นจากแรงกระทำ ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชื่อมโยงด้านการเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคือ ยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน กรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน เรียกกระบวนการนี้ว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เป็นกระบวนการที่ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3-Dimension network) หรือที่เรียกว่าการเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง ยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วเรียกว่ายางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

### 2.1.1 การจัดเตรียยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ผลิตในประเทศไทยทั้งยางแท่งและยางแผ่นมีวัตถุดิบและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน ซึ่งวัตถุดิบและวิธีการเตรียมอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่ต้องมีการจัดเตรียยางประเภทต่างๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาเลือกนำไปใช้งาน (เสาวนีย์, 2543)

2.1.1.1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet) เรียกย่อว่า RSS เป็นยางที่ทำมาจากน้ำยางโดยตรง ทำให้แห้งโดยวิธีการรมควันเพื่อป้องกันเชื้อรา ไม่มีมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพยางที่แน่นอนเหมือนยางแท่ง การจัดชั้นยางแผ่นรมควันตามหนังสือ The green book ได้กำหนดการแบ่งชั้นยางแผ่นรมควันโดยใช้สายตาได้ 6 ชั้น ดังนี้

i. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (RSS 1X) ยางชนิดนี้ต้องเป็นยางแผ่นใสที่มีคุณภาพดีและมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น สะอาดและแห้งสนิท ไม่มีรอยตำหนิ จุดดำหรือรอยเปื้อน ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่น ไม่มีราสนิมหรือราแดงบนผิวของยางแผ่น ยางแผ่นต้องไม่รมควันมากเกินไปจนมีสีคล้ำ และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง สำหรับแผ่นยางที่ใช้ห่อตรงผิวนอกของก้อนยางอาจมีฟองเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อยได้

ii. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (RSS 1) แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นเจือปนบนแผ่นยาง ไม่มีสนิมหรือราขึ้นบนยาง แผ่นยางอาจรมควันไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้ แต่สีต้องไม่คล้ำจนเกินไป และไม่เหนียวตรงจุดใดจุดหนึ่ง บนผิวของยางแผ่นที่ใช้ห่อก้อนยางหรือตรงผิวของก้อนยางที่ติดอยู่กับยางที่ใช้ห่ออาจมีราแห้งปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อย มีฟองอากาศเล็กๆ ขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่เล็กน้อย

iii. ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS 2) แผ่นยางต้องแห้งและสะอาด ไม่มีตำหนิจากรอยเปื้อนหรือฟอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นเจือปน บนผิวของยางแผ่นที่ใช้ห่อ หรือตรงผิวของยางก้อน ยางแผ่นรมควันอาจมีฟองอากาศ มีราสนิม หรือราแห้งขึ้นปะปนเล็กน้อยได้ แต่ต้องมีปริมาณไม่เกินกว่า 5% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ สีของยางแผ่นรมควันอาจไม่สม่ำเสมอ

iv. ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (RSS 3) แผ่นยางต้องแห้ง สีอาจไม่ใส มีฟองอากาศเล็กๆ มีเศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้นยางที่กริดปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยได้แต่ต้องไม่มีรอยฟอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกขณะห่ออย่างก้อน บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิมหรือราแดงและราแห้งขึ้นเล็กน้อยได้ แต่ต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 10% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ ไม่มีจุลกรมควัน ไม่แห้งหรือจุดเหนียวบนยางแผ่น ยางอาจมีสีคล้ำบ้างแต่ต้องมีสีไม่ทึบจนดำ

v. ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (RSS 4) ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศ เศษผงสิ่งสกปรกหรือเปลือกไม้ขนาดกลางปะปน มีรอยเปื้อนจางๆ เหนียวเล็กน้อย บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นรมควันอาจมีราสนิม หรือราแดงและราแห้งปะปนอยู่เล็กน้อยปริมาณมากกว่า 20% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ แผ่นยางต้องไม่มีจุดเหนียวหรือจุลกรมควันไม่แห้ง ไม่มีตำหนิจากรอยฟอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นปน ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้แต่สีไม่ทึบจนดำแบบถูกไฟไหม้

vi. ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (RSS 5) ยางแผ่นต้องแห้ง มีฟองอากาศและผงเปลือกไม้ขนาดค่อนข้างใหญ่ มีรอยฟองเล็กๆ รอยเปื้อน สีคล้ำ เหนียวและเหนอะหนะเล็กน้อยได้ บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นรมควันอาจมีราสนิม หรือราแดงและราแห้งปะปนอยู่เล็กน้อยปริมาณมากกว่า 30% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ แผ่นยางต้องไม่ฟองมากและไม่เหนียวจนเกินไป ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ยางแผ่นอาจมีสีคล้ำได้แต่สีไม่ทึบจนดำ

2.1.1.2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet) เรียกย่อว่า ADS เป็นยางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ทดแทนยางเครพขาว มีการควบคุมการผลิตแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน ทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน จะใช้อากาศร้อนหรืออากาศธรรมดาแทน ยางแผ่นผึ่งแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

i. ยางแผ่นผึ่งแห้งที่ทำให้แห้งโดยวิธีการผึ่งลม (Air dried sheet) ยางชนิดนี้สามารถผลิตขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความชื้นของสี เพียงแต่เป็นยางที่ทำให้แห้งโดยการไม่รมควันเท่านั้น โดยทั่วไปอาจไม่แห้งสนิทและมีสีค่อนข้างคล้ำ

ii. ยางแผ่นไม่รมควันที่มีชื่อทางการค้าว่า Pale amber unsmoked sheet (PAUS) ยางแผ่นชนิดนี้จำเป็นต้องควบคุมการผลิตทุกขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และอบให้แห้งด้วยอากาศร้อนเพื่อให้ได้ยางที่แห้งสนิทและมีสีสวย

2.1.1.3 ยางเครพ (Crepe rubber) เป็นยางที่ผลิตขึ้นโดยใช้วัตถุดิบจากน้ำยางธรรมชาติหรือยางซึ่งจับตัวเป็นก้อน เช่น ยางก้นถ้วย ยางติดเปลือกไม้ เป็นต้น ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางเป็นยางเครพที่มีคุณภาพดี ได้แก่ เครพขาว (White crepe) หรือยางเครพสีจาง (Pale crepe) ส่วนยางเครพที่ผลิตจากก้อนยางจับตัว เป็นยางเครพที่มีคุณภาพต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ การจัดประเภทของยางเครพมี 4 ประเภทดังนี้

i. ยางเครพขาวและเครพสีจาง (White and pale crepe) ยางเครพชนิดนี้ผลิตจากน้ำยาง ยางแผ่นที่ผลิตได้จะต้องสะอาดและแห้ง มีสีขาวหรือจางอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีสิ่งสกปรกเจือปน

ii. ยางเครพสีน้ำตาล (Brown crepe) ยางเครพชนิดนี้ผลิตจากก้อนยางจับตัวในถ้วยรองรับน้ำยาง เป็นเศษยางคุณภาพ ห้ามใช้เศษยางที่ตกอยู่ตามพื้นหรือเศษยางแผ่นรมควัน

iii. ยางเครพคอมโป (Compo crepe) ยางชนิดนี้ทำมาจากยางก้อนจับตัว ยางเส้นตามรอยกรีด เศษยางตัดทิ้งจากยางแผ่นรมควัน ยางก้อนเปียก การทำยางชนิดนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องบดล้างยางก่อนเข้าเครื่องเครพรีดยางเป็นแผ่น ห้ามใช้เศษยางที่ตกอยู่ตามพื้น

iv. ยางเครพสีน้ำตาลชนิดบาง วัตถุดิบที่ใช้เป็นยางก้อนเปียก ยางแผ่นดิบ ยางก้อนจับตัว หากใช้ยางติดเปลือกไม้ต้องล้างทำความสะอาดเปลือกไม้ออกให้หมด ห้ามใช้เศษยางที่ตกตามพื้น

2.1.1.4 ยางแท่ง (Block rubber) ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติที่ผลิตโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐาน มีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้อย่างชัดเจน

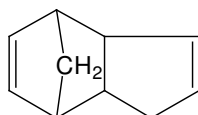
2.1.1.5 ยางแท่งความหนืดคงที่ (Constant viscosity rubber) ยางธรรมชาติเมื่อตั้งทิ้งไว้ ความหนืดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องเสียพลังงานในการแปรรูปมากขึ้นกว่าเดิม ปฏิกิริยาการ

การเพิ่มความหนืดของยางเรียกว่า Storage hardening ยางที่เตรียมให้มีความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า ยาง CV เป็นยางที่เตรียมโดยการนำน้ำยางมาใส่สารเคมีที่ใช้ควบคุมความหนืดของยาง สารเคมีที่ใช้ควบคุมความหนืดของยาง เช่น กลุ่ม Monofunctionaldehydic condensing reagents ได้แก่ Hydroxylamine hydrochloride, Hydroxylamine neutralsulphate และ Semicarbazide hydrochloride เป็นต้น จากนั้นนำไปจับตัวให้เป็นก้อน แล้วทำออกมาในรูปของยางแท่ง

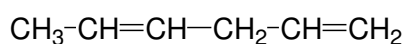
2.1.1.6 ยางสกิน (Skim rubber) ยางสกิน คือ ยางธรรมชาติที่เป็นผลพลอยได้จากการทำน้ำยางข้น ทำโดยการนำน้ำยางสดมาเซนตริฟิวจ์ แยกน้ำและอนุภาคเม็ดยางออกไปจากกัน อนุภาคเม็ดยางส่วนใหญ่ซึ่งเบากว่าน้ำ จะแยกออกไปเป็นน้ำยางข้น มีเนื้อยางอยู่ประมาณ 60-63 % ที่เหลือเป็นน้ำ ส่วนทางด้านน้ำจะมีอนุภาคเม็ดยางขนาดเล็กๆ ปนออกมาด้วย น้ำส่วนนี้จะมีเนื้อยางอยู่ประมาณ 3-6 % เรียกน้ำยางนี้ว่า น้ำยางสกิน (Skim latex) ซึ่งเมื่อนำกรดใส่ลงไปใต้น้ำยางสกินจะทำให้ยางแยกตัวออกมา นำยางดังกล่าวมารีดแผ่น ทำให้แห้ง ได้ยางที่เรียกว่า ยางสกิน

### 2.1.2 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Maurice, 1973)

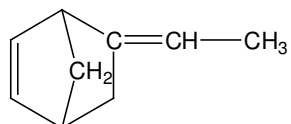
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) เป็นเทอร์โพลีเมอร์ของเอทิลีน โพรพิลีน และพวกไดอีนมอนอเมอร์เป็นยางสังเคราะห์ชนิดที่มีพันธะคู่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ ยาง EPDM มีหลายเกรดแต่ละเกรดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเอธิลีนและโพรพิลีนรวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอธิลีนอยู่ในช่วง 45-85 % mol และปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11 % mol ชนิดของไดอีนที่ใช้อย่างกว้างขวางมี 3 ชนิด คือ Dicyclopentadiene (DCPD), Ethylidene norbornene (ENB) และ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) โดยชนิดที่ใช่มากที่สุด คือ ENB เพราะจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของรูปด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanization) สูตรโครงสร้างทางเคมีของไดอีนมอนอเมอร์ ชนิด DCPD, ENB และ 1,4 HD แสดงในรูปที่ 2.2 ถึง 2.4 และเมื่อไดอีนมอนอเมอร์เหล่านี้รวมกับเอทิลีนโพรพิลีน จะได้สูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 ถึง 2.7



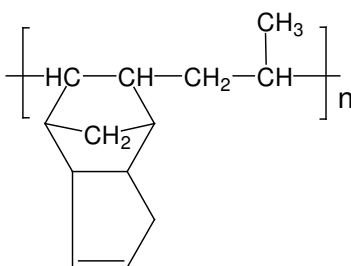
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของ Dicyclopentadiene (DCPD) (Maurice, 1973)



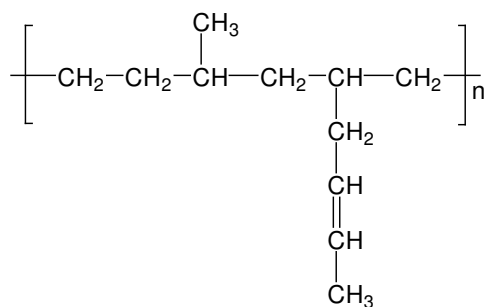
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) (Maurice, 1973)



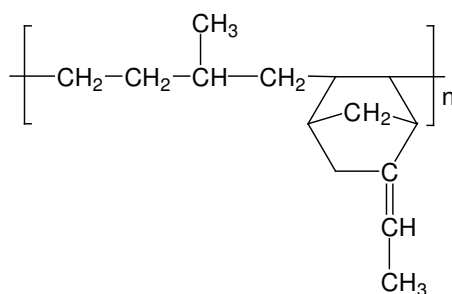
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของ Ethylidene norbornene (ENB) (Maurice, 1973)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเอทิลีน โพรพิลีนเมื่อรวมกับ Dicyclopentadiene (DCPD) (กฤษณา และ  
พรรษา, 2526)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเอทิลีน โพรพิลีนเมื่อรวมกับ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) (กฤษณา และ  
พรรษา, 2526)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเอทิลีน โพรพิลีนเมื่อรวมกับ Ethylidene norbornene (ENB) (กฤษณา และพรรษา, 2526)

จากลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่ายาง EPDM เป็นยางไม่มีขั้วดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว และเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโมเลกุลเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน ขางชนิดนี้จึงไม่เกิดผลึก ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยสารเสริมแรงเข้าช่วย อย่างไรก็ตามในยาง EPDM ที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงจะมีสมบัติเกิดผลึกได้บ้าง จึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงสูงในสภาพยังไม่คงรูป (High green strength) สามารถที่จะเติมน้ำมันและสารตัวเติมได้มากซึ่งเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ เพราะในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ (200 phr) แต่ข้อเสียของยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูง คือ การบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ยากและสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดี เพราะการเกิดผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้นจึงทนต่อการเสื่อมเนื่องจากสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมี กรด และด่างได้ดีอีกด้วย ขางชนิดนี้ส่วนมากจึงนิยมใช้ในการผลิตยางชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น แก้มยางรถยนต์ ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ ขางขอบหน้าต่างรถยนต์ เป็นต้น ยาง EPDM ยังถูกใช้ในการผลิตท่อของเครื่องซักผ้า ฉนวนหุ้มสายเคเบิล และใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความทนต่อแรงกระแทก เป็นต้น

### 2.1.3 กระบวนการแปรรูปยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) (กฤษณา และพรรษา 2526)

โดยทั่วไปแล้วยาง EPDM ไม่สามารถที่จะบดให้โมเลกุลของยางแตกได้ง่ายๆ โดยเครื่องผสมยาง 2 ลูกกลิ้ง ดังนั้นต้องผสมสารเคมีที่ทำให้ยางอ่อนตัว หรือใช้น้ำมันเป็นตัวช่วย หรือเลือกยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และต้องทำที่อุณหภูมิ 20 °C สำหรับการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดจะต้องใส่สารตัวเติมกับน้ำมันก่อนแล้วจึงใส่ยางลงไปบดผสมพร้อมกับสารเคมีตัวอื่นๆ แต่ระวังอย่าให้อุณหภูมิสูงเกิน 120 °C เพราะจะทำให้ยางสุกก่อนกำหนด (Scorch) สำหรับการแปรรูปด้วยเครื่องรีดยาง 3 ลูกกลิ้ง (Calender) จะต้องให้ลูกกลิ้ง 2 ลูกแรก มีอุณหภูมิระหว่าง 60-100 °C และ

ลูกกึ่งตัวสุดท้ายจะต้องเย็น สำหรับการแปรรูปโดยใช้เครื่องอัดยางผ่านได (Extruder) จะต้องปรับอุณหภูมิของเครื่องแต่ละส่วนดังนี้

ส่วนที่เรียกว่าสกรู (Screw) ต้องปรับให้เย็น

ส่วนที่ป้อนยาง (Feed) ต้องปรับให้เย็น

ส่วนที่เรียกว่ากระบอก (Barrel) ปรับอุณหภูมิให้ได้ 60-68 °C

ส่วนที่เรียกว่าหัวได (Die) ปรับอุณหภูมิให้ได้ 88-121 °C

## 2.2 ยางผสม (Tinker and Jones, 1998)

การทำยางผสม (Rubber blends) เป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการแก้ข้อด้อยของยางเดี่ยว โดยจุดประสงค์ที่คาดหวังไว้ คือ ยางผสมที่ได้สามารถคงสมบัติเด่นของแต่ละชนิดไว้ได้ หรืออย่างน้อยก็มีสมบัติต่างๆ อยู่ระหว่างสมบัติของยางเดี่ยว ในบางกรณีอาจมีสมบัติเหนือกว่ายางเดี่ยวทั้งสองชนิด สมบัติของยางผสมจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานเป็นสำคัญ การควบคุมให้ได้โครงสร้างพื้นฐานที่ต้องการนี้เป็นหัวใจสำคัญของการทำยางผสมซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น โครงสร้างทางเคมีของยางตั้งต้น สมบัติหยุ่นหนืด (Viscoelastic property) แรงตึงผิวสัมผัส (Interfacial tension) สัดส่วนโดยปริมาตร สัดส่วนความหนืด เป็นต้น สมบัติของยางผสมจะมีแนวโน้มเป็นไปตามสมบัติของยางที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องในโครงสร้างของยางผสมนั้น กล่าวคือเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของยางทั้งสองเท่ากัน ยางที่มีความหนืดน้อยกว่าจะจัดตัวเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Co-continuous phase) ในโครงสร้างพื้นฐานวิทยา (Sperling, 1981)

ยางธรรมชาติจะมีข้อเด่นหลายด้าน แต่ยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ในงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด โอโซน ความร้อนสูง และสัมผัสกับน้ำมัน ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติเช่นเดียวกับสมบัติเด่นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ สมบัติเด่นและสมบัติด้อยของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 สมบัติเด่นและสมบัติด้อยของยางชนิดต่างๆ (กฤษฎา, 2548)

ยาง	สมบัติเด่น	สมบัติด้อย
Natural rubber (NR)	ทนต่อแรงดึง มีความยืดหยุ่น ความร้อนสะสมต่ำ เหนียวติดกัน	ไม่ทนต่อความร้อน ออกซิเจน โอโซน และน้ำมัน
Styrene butadiene rubber (SBR)	ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อการสึกหรอ หักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดี	ไม่ทนต่อความร้อน ออกซิเจน โอโซน และน้ำมัน
Nitrile rubber (NBR)	ทนน้ำมัน หักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดี	ไม่ทนต่อโอโซน ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ และ ตัวทำละลายที่มีความเป็นอะโรมาติกสูง
Chloroprene (CR)	ทนต่อเปลวไฟ กรด-ด่าง สภาพอากาศ โอโซน เหนียวติดกัน และทนน้ำมัน	ไม่ทนต่อ ตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ตัวทำละลายอะโรมาติก และ ฟอสเฟตเอสเทอร์
Isobutylene-isoprene rubber (IIR)	ทนต่อการซึมผ่านของก๊าซ ความร้อน ออกซิเจน โอโซน	เสียรูปลหลังการกดอัดสูง ความยืดหยุ่นต่ำ และการกระเด็นตัวต่ำ
Ethylene propylene diene rubber (EPDM)	ทนต่อความร้อน ออกซิเจน โอโซน	ไม่ทนต่อน้ำมัน การซึมผ่านของก๊าซสูง

ตัวอย่างการเลือกยางคู่ที่เหมาะสมมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ เช่น  
 ผสม EPDM กับ NR เพื่อปรับปรุงความทนต่อโอโซนของ NR  
 ผสม BR กับ NR เพื่อปรับปรุงความทนต่อการสึกหรอของ NR  
 ผสม NBR กับ SBR เพื่อปรับปรุงความทนน้ำมันของ SBR  
 ผสม NR กับ SBR เพื่อปรับปรุงสมบัติการเหนียวติด (Tack) ของ SBR

## 2.2.1 ความเข้ากันของยางผสมและขนาดของวิภาค (กฤษฎา, 2548)

### 2.2.1.1 โครงสร้างของยางแต่ละชนิด

ยางที่มีความเป็นขั้วต่างกันมากจะผสมเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ยางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน เช่น NR ผสมเข้ากับ BR ได้ดีกว่า CR และยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะผสมเข้ากันได้ไม่ดีเท่าที่ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ค่าความเป็นขั้วของยางอาจวัดโดยค่า Solubility parameter ( $\delta$ ) ซึ่งอาจใช้ทำนายว่ายาง 2 ชนิดจะเข้ากันได้หรือไม่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่า Solubility parameter ( $\delta$ ) ของยางที่ผสมเข้ากันไม่ได้ (กฤษญา, 2548)

ยาง	$T_g$ °C	Solubility parameter ( $\delta$ )
NR	-68.5	8.25
Medium High Nitrile NBR	-30	9.55
50/50 NR/NBR	-67.5 -28	$\Delta(\delta) = 1.3$
Neoprene GNA	-43	9.26
50/50 NR/ Neoprene	-65 -44	$\Delta(\delta) = 1.01$

ตารางที่ 2.3 ค่า Solubility parameter ( $\delta$ ) ของยางที่ผสมเข้ากันได้ (กฤษญา, 2548)

ยาง	$T_g$ °C	Solubility parameter ( $\delta$ )
NR	-68.5	8.25
Solprene 1204	-57	8.25
50/50 NR/ Solprene 1204	-63.5	$\Delta(\delta) = 0.00$
Diene 55 NF	-95	8.17
SBR 1712	-50	8.13
58/42 Diene 55 NF / SBR 1712	-78	$\Delta(\delta) = 0.04$

#### 2.2.1.2 วิธีการผสมและสภาวะที่ใช้ในการผสม (กฤษญา, 2548)

i. ยางที่ผสมในรูปของลาเทกซ์ หรือในรูปของสารละลาย ความเข้ากันของยาง และขนาดของวัฏภาคขึ้นอยู่กับ ความหนืดของยาง อุณหภูมิของการผสม และเวลาในการผสม ถ้า ยางมีความหนืดใกล้เคียงกันจะผสมเข้ากันได้ดี การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการผสมจะทำให้ยาง ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

ii. การผสมในรูปของยางแห้งโดยใช้เครื่องผสม 2 ลูก กลิ้ง และเครื่องผสมแบบปิด ความเข้ากันของยางและขนาดของวัฏภาคขึ้นอยู่กับ แรงบิด ความหนืดของยาง อุณหภูมิของการผสม และเวลาในการผสม ถ้าแรงบิดสูงวัฏภาคจะมีขนาดเล็กลง ส่วนยางที่มีความหนืดใกล้เคียงกันจะผสมเข้ากันได้ดี ยางที่มีความหนืดต่ำมักจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง การเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการผสมจะทำให้ยางผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

2.2.1.3 การใช้สารช่วยผสม การใช้สารช่วยผสมจะช่วยให้ยางผสมเข้ากันได้ดีขึ้นทำให้ขนาดวัฏภาคลดลง

2.2.1.4 การเกิด Co-crosslinking ระหว่างการวัลคาไนซ์ ในระหว่างการวัลคาไนซ์ยางผสมอาจเกิดการเชื่อมโยงระหว่างยางต่างชนิดกัน (Co-crosslinking) ส่งผลให้ยางผสมสามารถเข้ากันได้มากขึ้น

## 2.2.2 สมบัติของยางผสม (กฤษฎา, 2548)

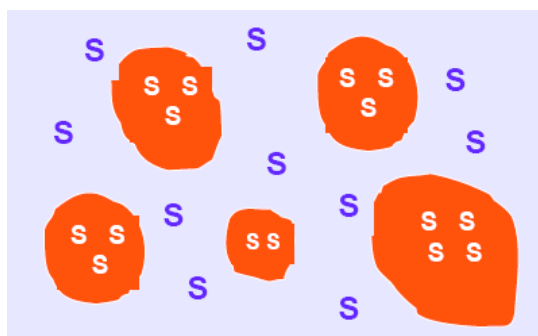
2.2.2.1 ยางที่ผสมเข้ากันได้ดี สมบัติที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักของยางที่ผสม เช่น ยางผสม SBR/BR

2.2.2.2 ยางที่ผสมเข้ากันไม่ได้ สมบัติหลักจะกำหนดโดยยางที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องโดยสมบัติจะลดหลั่นลงไปตามปริมาณที่ผสมอยู่ เช่น ยางผสม NR/NBR ถ้ายาง NBR เป็นวัฏภาคต่อเนื่องยางผสมที่ได้จะทนน้ำมัน แต่ถ้ายาง NR เป็นวัฏภาคต่อเนื่องยางผสมที่ได้จะไม่ทนน้ำมัน

## 2.2.3 ปัญหาของยางผสม และวิธีการแก้ปัญหา (กฤษฎา, 2548)

### 2.2.3.1 ปัญหาเรื่องการวัลคาไนซ์

i. สารวัลคาไนซ์ กำมะถัน ขอบยางแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน เมื่อผสมสารวัลคาไนซ์เข้าไปในยาง สารวัลคาไนซ์จะกระจายตัวในวัฏภาคยางแต่ละชนิดต่างกัน และยางต่างชนิดกันในวัฏภาคยางจะมีความไวต่อปฏิกิริยาไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความไม่สมดุลในการวัลคาไนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความไม่สมดุลของชนิดและปริมาณของพันธะเชื่อมโยง (กฤษฎา, 2548)

ii. สารเคมีสามารถเคลื่อนย้ายข้ามภูมิภาคขงที่ต่างกันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอาจเกิดการเคลื่อนย้ายของสารวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์อย่างผสม จึงทำให้การควบคุมสมดุลของสารวัลคาไนซ์ในยางผสมยากขึ้น

2.2.3.2 ปัญหาเรื่องการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางแต่ละภูมิภาค การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางแต่ละภูมิภาคอาจไม่เท่ากัน หรือไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากยางแต่ละชนิดชอบสารตัวเติม (เขม่าดำ ซิลิกา) ไม่เท่ากัน

## 2.2.4 แนวทางการแก้ไขปัญหที่เกิดจากยางผสม (กฤษฎา, 2548)

### 2.2.4.1 ปัญหาในเรื่องของการวัลคาไนซ์ แก้ไขได้โดย

i. ปรับอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ยางในภูมิภาคต่างๆ เช่น ปรับชนิดของสารเร่งใช้ตัวเร่งมากกว่า 1 ชนิดร่วมกัน ใช้สารหน่วงปฏิกิริยาและตัดแปรยางเชิงเคมีเพื่อเพิ่มความไวปฏิกิริยาของยาง

ii. ปัญหาเรื่องการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางแก้ไขได้โดยปรับวิธีการผสมยางกับสารตัวเติม วิธีการผสมยางกับสารตัวเติมแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 วิธีการผสมเขม่าดำปริมาณ 20 phr ในสัดส่วนยาง NR/BR 50 เปอร์เซนต์ (กฤษฎา, 2548)

วิธีการผสม	เปอร์เซ็นต์เขม่าดำกระจาย ในยางบิวทาไดอิน
1. ผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินก่อนแล้วค่อยใส่เขม่าดำ	75
2. ผสมในรูปของมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำในยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน	59
3. ใช้มาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำในยางธรรมชาติผสมกับยางบิวทาไดอิน	40
4. ผสมยางบิวทาไดอินกับมาสเตอร์แบทช์ของเขม่าดำในยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 155 °C เป็นเวลา 10 min	18

## 2.3 สารเคมีสำหรับยาง (พรพรรณ, 2528)

สารเคมีสำหรับยาง (Additives for rubber) คือ สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วเรียกว่ายางไม่คงรูป (Green compound) ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จะต้องผ่านกระบวนการทำให้ยางคงรูปก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ กระบวนการทำให้ยางคงรูปเรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน

### 2.3.1 สารเคมีที่ใช้ผสมในยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์ยางมีดังนี้

2.3.1.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent หรือ Curing agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางตรงตำแหน่งที่วงไวต่อปฏิกิริยา สารที่ทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ ระบบที่ใช้กำมะถัน และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ใช้ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนิโอพรีน

i. ระบบยางคงรูปโดยใช้กำมะถัน (Sulphur vulcanization system) เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูง เช่น ยางธรรมชาติ หรือยาง SBR การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ

ii. ระบบยางคงรูปโดยใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization system) ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้เกือบทุกชนิด โดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ Acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน

2.3.1.2 สารเร่ง (Accelerator) เป็นสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ให้เกิดเร็ว ปานกลาง หรือช้า เช่น ไธยูเรม ซัลฟิनाไมด์ ไธอาโซล และ กัวนิดิน เป็นต้น

2.3.1.2 สารกระตุ้น (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้นเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นโดยทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก และสังกะสีออกไซด์

2.3.1.3 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent) เป็นสารที่ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้นได้แก่

i. สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) ได้แก่

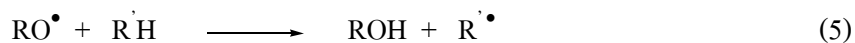
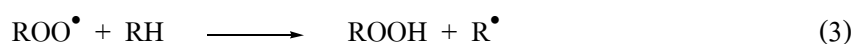
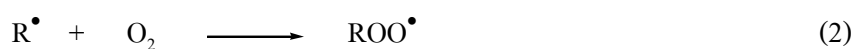
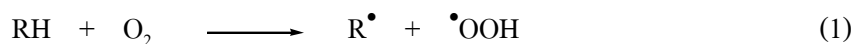
ia. สารกลุ่ม Amine Antioxidants เช่น N-(1,3-Dimethyl butyl)-N'-phenyl-*p*-phenylenediamine (6PPD), N-Isopropyl-N'-phenyl-*p*-phenylenediamine (IPPD), poly-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ), 6-Ethoxy-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydro quinoline (ETMDQ) เป็นต้น

ib. สารกลุ่ม Phenolic Antioxidants เช่น 2,5-Di-*tert*-amylhydroquinone (DAHQ), 2,6-Di-*tert*-butyl-*p*-cresol (DTBMP), 2,5-Di-*tert*-butyl-hydroquinone (DBHQ), 4,4'-Butylidene-bis(3-methyl-6-*tert*-butylphenol (BBMTBP), 2,2'-Methylene-bis(4-methyl-6-*tert*-butyl phenol) (AO 2246), 4,4'-Thio-bis(6-*tert*-butyl-*m*-cresol) (TBMTBP), Styrenated phenol (SP) เป็นต้น

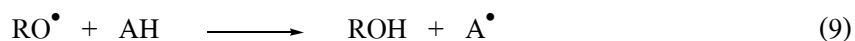
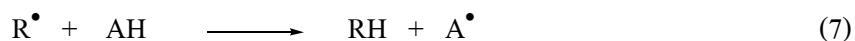
ii. สารต้านทานปฏิกิริยาไอโซน (Antiozonant) ได้แก่ Paraffin wax และ *p*-phenylene diamine เป็นต้น

#### กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง (พงษ์ธร, 2548)

ยางคงรูปที่มีพันธะคู่หลงเหลืออยู่ในโมเลกุล สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ (Free Radical) ผลิตภัณฑ์ชนิดแรกที่เกิดในระหว่างการเกิดออกซิเดชัน คือ ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ซึ่งจะแตกตัวต่อไปให้อนุมูลอิสระที่พร้อมที่จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป ดังในสมการที่ 1 ถึง 6

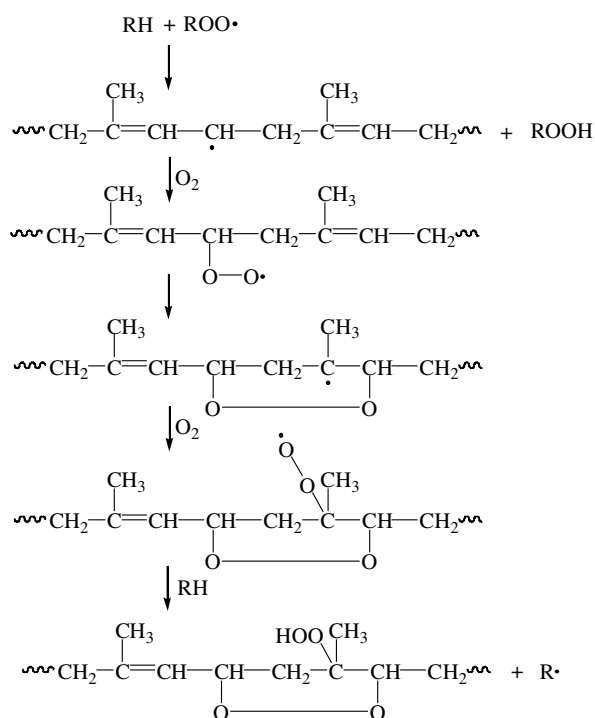


การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ดังกล่าว สามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันยางเสื่อมลงไปเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น หรือเพื่อทำให้ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกตัวออกไปเป็นส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อการเสื่อมสภาพของยางดังแสดงในสมการที่ 7 ถึง 9 ( $\text{A}^\bullet$  เป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เป็นอันตรายต่อยาง)



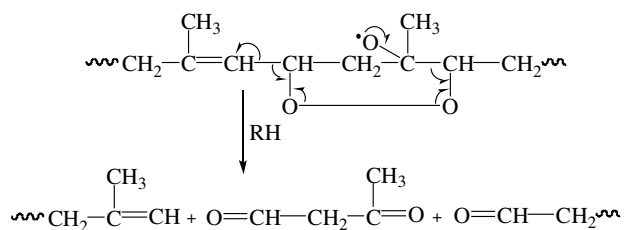
อนุมูลมีนับเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนไม่เพียงเกิดขึ้นที่ผิวยางเท่านั้น แต่ยังเกิดขึ้นได้ทั่วทั้งก้อนยาง โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนอาจทำให้ยางอ่อนลง เพราะโมเลกุลของยางถูกตัดขาดหรืออาจทำให้ยางแข็งขึ้น เพราะเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้นก็ได้ การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นแบบใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ตัวอย่าง เช่น (Natural rubber, NR), (Isoprene rubber, IR) และ (Butyl rubber IIR) จะอ่อนลงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในทางตรงกันข้ามยางคงรูปของ (Styrene butadiene rubber, SBR), (Acrylonitrile, NBR), (Chloroprene rubber, CR) และ (Ethylene propylene diene terpolymer, EPDM) จะแข็งและเปราะมากขึ้นเมื่อถูกออกซิไดซ์เนื่องจากเกิดปฏิกิริยา Cyclization ส่วนยางที่ไม่มีพันธะคู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล เช่น ยาง (Chlorosulfonated polyethylene, CSM), (Acrylate rubber, ACM), (Epichlorohydrin homopolymer, CO), (Epichlorohydrin-ethylene oxide copolymer, ECO), (Ethylene propylene monomer, EPM), (Generic code for silicone rubber, Q) และ (Fluoro rubber, FKM) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้น้อยมากยางเหล่านี้จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนสูง

กระบวนการออกซิเดชันของยางธรรมชาติ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ (Free Radical) ดังรูปที่ 2.9 วงแหวนของไดเปอร์ออกไซด์ (Cyclic diperoxide) เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถแตกตัวต่อไปให้อนุมูลอิสระที่พร้อมที่จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไปได้ (โสภา, 2545)



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการออกซิเดชันของยางธรรมชาติ (Bevilacqua, 1957)

จากรูปที่ 2.9 อนุมูลของอัลคอกซี (Alkoxy radical) จะเกิดการแตกตัวเป็น บิวเทน-2-โอิน-4-อัล (Butan-2-one-4-al) ซึ่งเกิดมากกว่า เลวูลินัลดีไฮด์ (Levulinlaldehyde) และ อนุมูลไวไนล (Vinyl radical) ซึ่งอาจถูกออกซิไดซ์ต่อได้หมู่ปลายเป็นเมทิลคีโตน (Methyl ketone end group) ดังรูปที่ 2.10 (โสภา, 2545)

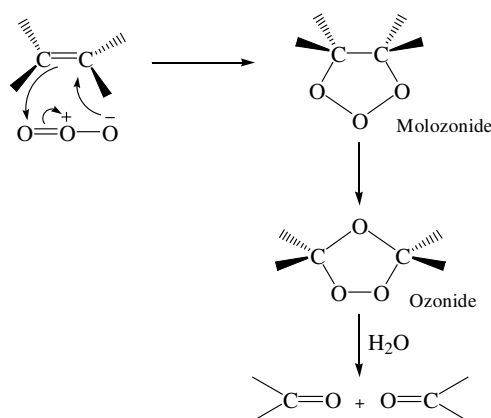


รูปที่ 2.10 กลไกปฏิกิริยา Chain scission (Bolland and Hughes, 1949)



เมื่อนำยางไปยึดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง พบว่าเกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยางไว้ การเกิดรอยแตกนี้เกิดจากโอโซนทำปฏิกิริยากับยาง ยางประเภทที่ไม่อิมิตัวจะเกิดการแตกของยางเนื่องจากโอโซนมากกว่ายางประเภทอิมิตัว ปรากฏการณ์การเกิดรอยแตกนี้เกิดจากการที่ยางเกิดสารโอโซนไนด์ (Ozonide) ที่ยึดไม่ได้ทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผิวทำให้เกิดผิวยางใหม่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อไปได้อีก (พรพรรณ, 2528)

โอโซนทำปฏิกิริยากับแอนคินเกิดเป็นโมโลโซนไนด์ (Molozonide) ซึ่งไม่เสถียรจะจัดตัวใหม่เป็นโอโซนไนด์ (Ozonide) ซึ่งเมื่อรีดิวซ์ต่อด้วยน้ำจะได้ อัลดีไฮด์และคีโตน ดังรูปที่ 11



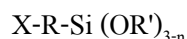
รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาโอโซนโกลิซิส (Ozonolysis) (ชัชานาถ, 2532)

#### 2.3.1.4 สารตัวเติม (Filler) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

i. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพ (Non-reinforcing filler) เติมลงไปในการเพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และดินขาว เป็นต้น

ii. สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) เติมลงไปในการเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เชมดำ และซิลิกา เป็นต้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารอินทรีย์ทำให้การยึดเกาะกับยางซึ่งเป็นสารอินทรีย์ได้ไม่ดีเท่ากับการยึดเกาะระหว่างยางกับเชมดำ ดังนั้นถ้าจะใช้สารตัวเติมชนิดซิลิกาให้มีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยยึดเกาะระหว่างยางกับซิลิกา (Silane Coupling Agents)

Silane Coupling Agents เป็นสารประกอบที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ซึ่งแต่ละหมู่จะอยู่ด้านปลายของโครงสร้าง (Bifunctional organosilanes) อธิบายได้ดังโครงสร้างต่อไปนี้



เมื่อ

X = เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความแข็งแรงของพันธะโควาเลนต์ เมื่อยึดเกาะกับยาง ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันในกลุ่มนี้ ได้แก่ Polysulphides, Disulphides, Amino, Mercapto, Vinyl, Epoxy และ Methacryl เป็นต้น

OR' = เป็นสารกลุ่มที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ และเกิดพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงมาก เมื่อไปจับกับหมู่ (-OH) ที่ผิวของซิลิกาสารกลุ่มนี้ ได้แก่  $-\text{OCH}_3$ ,  $-\text{OC}_2\text{H}_5$  และ  $-\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3$

R = สารกลุ่ม Methylene

n = 0, 1 หรือ 2

การที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ที่อยู่ด้านปลายแต่ละด้านในโครงสร้างของสารช่วยยึดชนิดไซเลน เพื่อจุดประสงค์ต้องการให้เพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างยางและสารตัวเติมแต่ละชนิด เช่น ซิลิกา แคลเซียมซิลิเกต อะลูมิเนียมซิลิเกต ทัลคัม ไมกา และดินขาว เป็นต้น สารตัวเติมเหล่านี้จะมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่บนพื้นผิว ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกซี (-OR') ในโครงสร้างของสารช่วยยึดชนิดไซเลนเกิดเป็นพันธะไซลอกเซน (O-Si-O) ที่เสถียร สารช่วยยึดชนิดไซเลนมีมากมายหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.5 ดังนั้นจะต้องเลือกให้เหมาะกับชนิดของยาง ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และระบบการวัลคาไนซ์ เนื่องจากสารเคมีต่างๆ ที่เติมเข้าไปในยางจะไปแข่งขันกันเกิดปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกซีในโครงสร้างของสารช่วยยึดชนิดไซเลน ทำให้มีหมู่อัลคอกซีบางส่วนเท่านั้นที่ไปจับกับผิวของซิลิกา และอีกบางส่วนจะไปจับกับสารเคมีชนิดอื่นๆ (Ansarifar *et al.*, 2003)

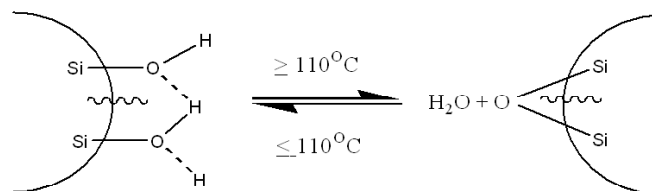
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างชนิดของ Silane coupling agents ที่มีขายในทางการค้า (Weng, *et al.* 2000)

Class	Commercial Names	Abbreviations
<b>Polysulfide Class</b> 1.) Bis-[3-(triethoxysilyl) propyl ] – tetrasulfide	Degussa Si-69, UC Silane A1289, Witco A1289, Uniroyal/ Witco RC2, Behn Meyer Couplink 89, Hung Pai HP 669	TESPT
	SRT TESPT	TESPT-50G
2.) Bis-[3-(triethoxysilyl) propyl ] – disulfide	Degussa VP Si-75, Witco 1589, Hung Pai HP 1589	TESPD
<b>Mercapto Class</b> 3-mercaptopropyltriethoxysilane	UC A1891, Hung Pai HP 1891	MPTES
<b>Amino Class</b> 1.) 3-aminopropyltriethoxysilane	UC A1100, Witco A1100	APTES
2.) N-2-(aminoethyl)-3-amino Propyltrimethoxysilane	UC A1120, Witco A1120	AEAPTMS
<b>Chloro Class</b>	Degussa Si 230	-
<b>Vinyl Class</b> 1.) Vinyltrimethoxysilane	UC A171, Witco A171	-
2.) Vinyl-tris(2-methoxyethoxy) silane	UC A172, Degussa Si-225, Witco A172	-
<b>Methacrylate Class</b> 3-methacryloxypropyltrimethoxy silane	UC A174, Witco A174	-
<b>Epoxy Class</b> 1.) 2-(3,4-epoxycyclohexy)-ethyl Trimethoxysilane	UC A186, Witco A186	-
2.) 3-glycidoxy – propyltriethoxysilane	UC A187, Witco A187	-
<b>Isocyanato Class</b> 3-isocyanatopropyltriethoxysilane	UC A1310, Witco A1310	-
<b>Thiocyanato Class</b> 3-cyanatopropyltriethoxysilane	Degussa Si 264, Hung Pai HP 264	TCPTES

ตารางที่ 2.6 คำแนะนำในการเลือกใช้ชนิดของพอลิเมอร์และกลุ่มของไซเลน ให้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Organo functional groups (X) (Weng, *et al.* 2000)

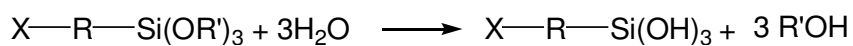
Polymers	Reactivity Of X	Silanes Recommended
1. Unsaturated Polymers. E.g. NR, BR, SBR, NBR, EPDM, etc	Free Radical/ Ionic	Polysulfides, Mercapto, Thiocynato, Amino.
2. Halogenated Polymers. E.g. CR, CPE, CSPE	Ionic	Chloro or Mercapto
3. PU's	Condensation	Epoxy, Isocyanato
4. Unsaturated Polymers	Free Radical	Vinyl, Methacrylate, Epoxy

ซิลิกาสามารถดูดความชื้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $110^{\circ}\text{C}$  และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า  $110^{\circ}\text{C}$  จะเป็นการไล่ความชื้นที่อยู่ในซิลิกา เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันของไซลอกเซน (Si-O-Si) ในโครงสร้างของซิลิกา ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $110^{\circ}\text{C}$  ความชื้นในบรรยากาศจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของไซลอกเซน เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันไซลานอล (Si-OH) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

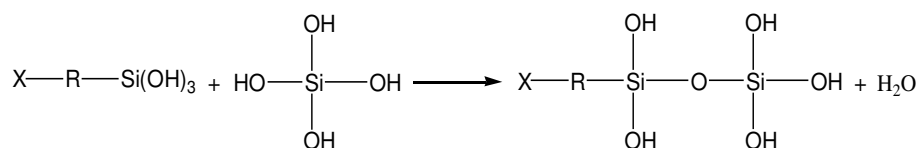


รูปที่ 2.12 สมการการผันกลับของซิลิกา (Weng, *et al.* 2000)

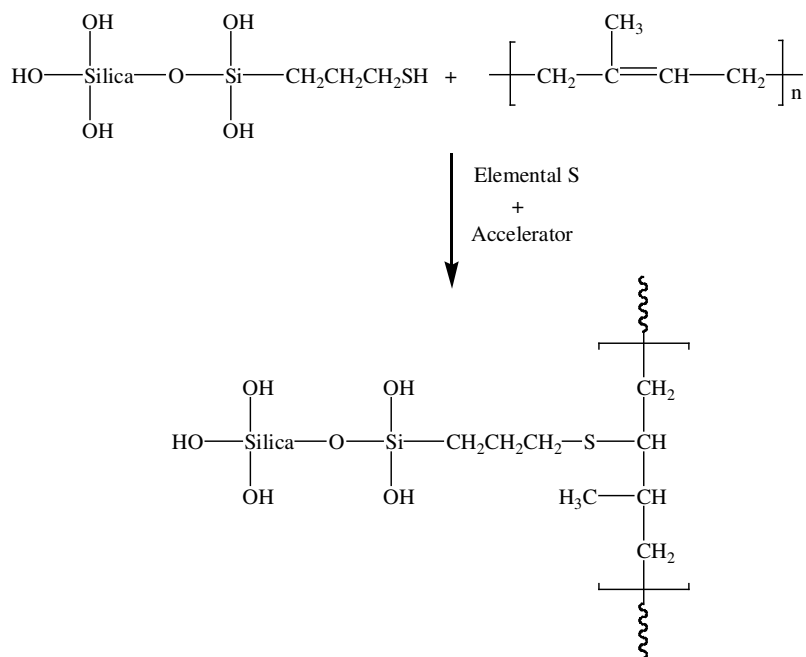
หมู่ฟังก์ชัน (-OR') ในโครงสร้างของสารช่วยยึดชนิดไซเลน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะได้หมู่ฟังก์ชัน (-OH) และปลดปล่อยอัลกอฮอล์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาออกมา ดังรูปที่ 2.13 และเมื่อเติมซิลิกาจะเกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่เสถียรดังรูปที่ 2.14 ปฏิกิริยานี้จะดำเนินที่อุณหภูมิ  $\geq 100^{\circ}\text{C}$  เกิดการควบแน่นปล่อยน้ำออกมา จากนั้นนำไปผสมกับยางใส่สารเคมีต่างๆ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16



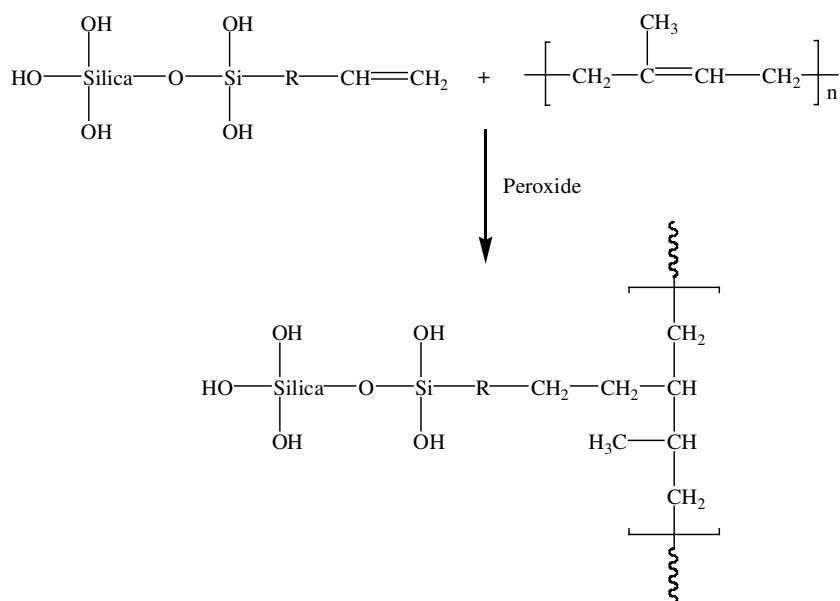
รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารช่วยยึดชนิดไซเลน (Weng, *et al.* 2000)



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยยึดชนิดไซเลนกับซิลิกา (Weng, *et al.* 2000)



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาระหว่างสารช่วยยึดชนิดไซเลนกับซิลิกา และยางโดยใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ (Weng, *et al.* 2000)



**รูปที่ 2.16** ปฏิกริยาระหว่างสารช่วยยึดชนิดไซเลนกับซิลิกา และยางโดยใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสาร  
 วัลคาไนซ์ (Weng, *et al.* 2000)

### 2.3.1.5 สารช่วยแปรรูปยาง (Plasticizers) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ (อรอุษา, 2546)

i สารทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (Chemical plasticizer) เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางนิ่ม และลดเวลาของการบดขย้างลง การใช้งานมักใช้กับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ สารเคมีประเภทนี้มักใส่ลงไปในช่วงเมื่อเริ่มต้นการบดผสมในเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง และปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้นๆ ก่อนที่จะใส่สารอื่นลงไป สารชนิดนี้ได้แก่ Sulphonic acid, Xylyl mercaptan

ii สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticizer) เป็นสารเคมีที่ใส่เข้าไปแล้วจะทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticizer) เป็นสารเคมีที่ใส่เข้าไปแล้วจะทำให้ยางนิ่ม โดยทางกายภาพ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลงแปรรูปได้ง่ายขึ้น ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันเอสเทอร์

### 2.3.1.6 สารพิเศษอื่นๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น ที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในช่วงเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วง (Retarder) เป็นต้น

## 2.4 การเคลือบยางลงบนผ้าใบ

ผ้าใบที่ใช้ในการติดประสานกับยางมีมากมายหลายชนิด แต่ชนิดที่ใช้มากที่สุดใ้ในอุตสาหกรรมเคลือบยางลงบนผ้าใบ คือ ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และผ้าฝ้าย ส่วนผ้าใบไนลอนมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบยางลงบนผ้าใบมากถึงร้อยละ 90 (Conner, 2003)

### 2.4.1 ผ้าฝ้าย (Cotton) (วีระศักดิ์, 2542)

ฝ้ายเป็นเส้นใยพืชที่มีความสำคัญ และมีการใช้งานกว้างขวางมากที่สุดโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม สามารถใช้งานได้หลากหลายอาจใช้เป็นฝ้าย 100% หรือฝ้ายผสมกับเส้นใยอื่นๆ ได้แทบทุกชนิด ในประวัติศาสตร์ที่ผ่านมามนุษย์ได้รู้จักใช้ประโยชน์จากฝ้ายมานานกว่า 5,000 ปี มีการเพาะปลูกฝ้ายเกือบทั่วทุกแห่งในโลกยกเว้นบางประเทศที่มีอากาศหนาว เนื่องจากฝ้ายจะไม่เจริญเติบโตในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 21 °C ฝ้ายเป็นไม้พุ่มมีความสูงประมาณ 3-6 ฟุต ให้เส้นใยจากเมล็ด หรือปุยฝ้าย เส้นใยที่นำไปปั่นเป็นเส้นด้ายต้องมีความยาวเหมาะสม คือ ไม่สั้นจนเกินไป โดยเฉพาะบริเวณที่ติดปลายเมล็ดจะค่อนข้างสั้นมาก เรียกกันว่า Cotton linter นำไปเป็นวัสดุดิบในการผลิตเส้นใยประดิษฐ์ประเภทเซลลูโลส เช่น เรยอน ด้วยความที่ฝ้ายสามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ของโลก ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งพันธุ์ฝ้าย สภาพภูมิอากาศ ทั้งอาหารในดิน ตลอดจนศัตรูพืช ดังนั้นฝ้ายจึงมีหลายชนิด โดยคุณภาพของเส้นใยฝ้ายขึ้นกับความยาว ความยาวของเส้นใย ความละเอียดตลอดจนความแข็งแรง โดยปกติเส้นใยที่ยาวมากยังมีความละเอียดสูงและแข็งแรงมาก การแบ่งชนิดของเส้นใยฝ้ายส่วนมากมักเรียกตามชื่อของประเทศที่ปลูก หรือตามภูมิศาสตร์ถึงแม้ว่าฝ้ายในโลกนี้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่เรียกว่า Upland ก็ตาม แต่ก็ยังมีการเรียกให้ละเอียดขึ้นอีกถึงประเทศที่ผลิต เช่น บราซิล แชอีย์ กรีซ ปากีสถาน รัสเซีย ซีเรีย ตุรกี อุกันดา เป็นต้น ชนิดที่รู้จักกันมากในสหรัฐอเมริกาก็คือ ชนิด Upland, American pima, Egyptian และ Asiatic

#### 2.4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

i. ลักษณะภายนอกฝ้ายจากธรรมชาติมีลักษณะคล้ายหลอดแบนบิดข้วนกันเป็นเกลียว พื้นที่หน้าตัดเป็นเมล็ดถั่วตรงกลางเป็นรูซึ่งเกิดจากท่อส่งน้ำตามแกนกลางของเส้นใยนั่นเอง ผิวของเส้นใยไม่เรียบ และทึบแสง

ii. ความยาวเส้นใย เส้นใยแต่ละเส้นมีความยาวอยู่ในช่วง 1/8-2 1/2 inch (3-63 mm) โดยทั่วไปฝ้ายยาวมีความแข็งแรงดีกว่าฝ้ายสั้น

iii. สี ปกติฝ้ายมีสีขาวบางชนิดอาจพบเป็นสีครีม หรือสีน้ำตาล

iv. ความมัน โดยธรรมชาติฝ้ายมีความมันน้อย ยกเว้นกรณีที่ผ่านมาการทำเมอร์ซีไรซ์แล้วความมันจะดีขึ้น

v. ความแข็งแรง ฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงปานกลาง ความทนแรงดึง ณ จุดขาด มีค่าประมาณ 3.0-5.0 gpd เมื่อเปียกน้ำฝ้ายมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 10-20% ฝ้ายที่ผ่านกระบวนการทำเมอร์ซีไรซ์แล้วความแข็งแรงจะสูง โดยทั่วไปความแข็งแรงของฝ้ายแปรโดยตรงไปตามความยาวของเส้นใย เมื่อนำมาตีเกลียวเป็นด้ายเส้นใยยาวจะมีจุดสัมผัสและเกาะกันของเส้นใยมากกว่าเส้นใยสั้นทำให้เกิดแรงเสียดทานได้มากกว่า ส่งผลให้การทนต่อแรงดึงสูงขึ้น

vi. การยืดตัว เป็นเส้นใยที่มีการยืดตัวดีกว่าลินิน แต่ต่ำกว่าไหม และขนสัตว์ เกลียวฝ้ายที่เกิดตามธรรมชาติทำให้มีการยืดตัวที่ดีและนำมาปั่นเป็นด้ายได้ง่าย สามารถยืดตัวได้ประมาณ 3-7%

vii. การคืนตัวจากแรงอัด ฝ้ายมีความสามารถในการคืนตัวภายหลังที่ถูกกดทับได้ต่ำเกิดการยับได้ง่ายในปัจจุบันมีการตกแต่งสำเร็จหลายวิธีที่จะช่วยให้ปัญหา ของการยับลดลง ในลักษณะที่เรียกกันว่า Wrinkle-free

viii. การดูดซับความชื้น ที่ภาวะมาตรฐานอุณหภูมิ 70 21 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 65% ฝ้ายมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้สูงถึง 7-10% และความแข็งแรงของฝ้ายสูงขึ้นเมื่อเปียก

viii. ความร้อน ฝ้ายทนต่อความร้อนได้ดี อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดอาจสูงถึง 204-218 °C ในระยะเวลาสั้นๆ ฝ้ายเริ่มไหม้และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่อุณหภูมิ 246 °C และถ้าสูงกว่านั้น อาจถูกทำลายได้ สามารถซักได้ด้วยน้ำร้อนระดับ 100 °C และอบแห้งที่ 71-93 °C

#### 2.4.1.2 สมบัติทางเคมี

i. กรด กรดอินทรีย์เช่น กรดน้ำส้มไม่เป็นอันตรายต่อฝ้าย แต่ถ้าเป็นกรดประเภทกรดกำมะถัน หรือกรดไฮโดรคลอริกจะละลายฝ้ายเป็นยางเหนียว และถ้าถูกกรดไนตริกทำปฏิกิริยาได้เซลลูโลสไนเตรตมีสมบัติเป็นวัตถุระเบิด

ii. ด่าง ฝ้ายทนต่อสารละลายด่างได้ดี แม้ด่างแก่ที่ใช้เป็นสบู่ในการซักล้างก็ไม่ มีผลต่อสมบัติของฝ้าย นอกจากนั้นแล้วด่างที่เป็นสารเคมีหลักในการทำเมอร์ซีไรซ์กลับทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย

iii. สารละลายอินทรีย์ ฝ้ายสามารถซักแห้งได้เนื่องจากมีความทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ดีมาก

iv. สารซักฟอก สารซักฟอกทั่วไปที่มีขายในตลาดชนิดที่ไม่แ่ก่มากนักสามารถใช้ซักฟอกฝ้ายได้แต่ต้องระวังเรื่องของความเข้มข้นและระยะเวลาประกอบกับภายหลังการซักฟอก



แล้วควรทำการล้างน้ำสะอาดออกให้หมด สารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ที่แก่ เช่น โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมไฮโปคลอไรด์ มีผลทำให้ฝ้ายเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นสภาพที่เรียกว่าออกซิเซลลูโลส (Oxycellulose) ที่มีสมบัติอ่อนแอกว่าฝ้ายปกติ ขาดง่ายเมื่อเปียก และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

v. รา และแมลง ปกติฝ้ายเกิดราได้ง่าย เนื่องจากแป้งที่ตกค้างมาจากการลงแป้งทำให้เป็นปัจจัยต่อการเจริญเติบโตของรา ปัญหานี้แก้ได้โดยการตกแต่งสำเร็จผ้าฝ้ายภายหลังสำหรับแมลงก็เช่นเดียวกันปัญหาสืบเนื่องจากแป้งที่ตกค้างจากฝ้ายมากกว่าสืบเนื่องจากเส้นใยฝ้ายเอง

vi. แสง ฝ้ายถูกแสงแดดทำให้เกิดการออกซิไดส์เป็นออกซิเซลลูโลสเปลี่ยนเป็นเหลืองและเสื่อมคุณภาพลงดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานของฝ้ายไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรง

vii. การย้อมสี สามารถรับสีย้อมได้หลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ และสีแวท

#### 2.4.1.3 การใช้งานของฝ้าย

ด้วยสมบัติที่ดีเด่นของฝ้ายทั้งความแข็งแรงทนทาน ความสามารถในการดูดซึมความชื้นการใช้งานหลากหลายสามารถปั่นเป็นด้ายได้แทบทุกระดับของความละเอียด ทอเป็นผ้าได้ทุกโครงสร้าง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากผ้าฝ้าย 100% ที่ไม่สามารถใช้อย่างอื่นทดแทนได้ เช่น กางเกงยีน ผ้าปลอกหมอน ผ้าคลุมเตียง เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วฝ้ายยังสามารถใช้ผสมร่วมกับเส้นใยชนิดอื่นๆ ได้ทั้งเส้นใยธรรมชาติ และใยสังเคราะห์ด้วย ที่รู้จักกว้างขวางมากก็คือการใช้ร่วมกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์

#### 2.4.2 ฝ้ายไนลอน (วีระศักดิ์, 2542)

ไนลอนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกที่มนุษย์ค้นพบมาอย่างบังเอิญ โดย บริษัทดุปองท์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dr. Wallace H. Carothers และทีมงานให้ความสนใจกับงานวิจัยพื้นฐาน เพื่อสร้างความเข้าใจถึงโครงสร้างโมเลกุลที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เรียกว่า พอลิเมอร์ เหมือนที่เกิดในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย หรือไหม ในปี 2471 (ค.ศ. 1928) ผู้ช่วยของ Dr. Carothers ได้ค้นพบพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะชั้นเหลวสามารถยืดดึงออกเป็นเส้นยาว และเมื่อให้เย็นตัวลงก็ยังสามารถยืดให้ยาวขึ้นได้อีก นับเป็นจุดเริ่มต้นแห่งการสนใจทางการศึกษาพอลิเอสเตอร์ แต่ปรากฏว่าเส้นใยที่ได้ออกมาไม่ประสบปัญหามากมายในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการ จนในที่สุดได้หันเหความสนใจไปพัฒนาสังเคราะห์พอลิเอไมด์ (Polyamides) แทน ในปี 2478 (ค.ศ. 1935) ก็ได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาของ Hexamethylene diamine และ Adipic acid ได้พอลิเมอร์ที่เรียกว่า 6,6 ซึ่งมาจากจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล ต่อมาจึงได้มีการเผยแพร่ออกสู่สาธารณะในปี

2481 (ค.ศ. 1938) โดยเรียกพอลิเมอร์ที่ได้ว่า ไนลอน ซึ่งเป็นชื่อตระกูล นับเป็นความสำเร็จอย่างสูงสุดในวงการสิ่งทอ ไนลอน 6,6 ที่ได้มีสมบัติเด่นต่างจากเส้นใยธรรมชาติ หรือเส้นใยประดิษฐ์ ที่มีก่อนหน้านี้ด้วยการที่มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการขูดถูที่ดี การยืดตัวสูง และสามารถทำจีบถาวรได้ด้วยความร้อน มีความทนทาน ชักได้ด้วยเครื่อง จนในเวลานี้ไนลอนกลายเป็นเส้นใยมหัศจรรย์ที่เหมาะสมกับงานหลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปทำเป็นถุงน่อง เชือกลากเรือในทะเล ผ้าใบยางรถยนต์ ไปจนถึงเครื่องนุ่งห่ม

#### 2.4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

i. ลักษณะภายนอก ดูจากกล้องจุลทรรศน์เส้นใยไนลอนโดยทั่วไปพื้นที่ภาคตัด ขวางเป็นทรงกลม ผิวเรียบคล้ายแท่งแก้วยาว ความยาวตลอดเส้นใยมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ ทั้งเส้นใยยาว และเส้นใยสั้น ตามความต้องการการใช้

ii. สี โดยทั่วไปเส้นใยไนลอนจากการผลิตมีสีขาว และความมันค่อนข้างสูงแต่ในกระบวนการผลิตมีการควบคุมระดับความมันตามความต้องการของลูกค้าในทุกระดับ

iii. ความแข็งแรง ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง ความทนแรงดึง ณ จุดขาด ของเส้นใยมีค่า 3.0-6.0 gpd สำหรับที่ใช้ทำเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม และความทนแรงดึง ณ จุดขาด ที่มีค่า 6.0-9.5 gpd สำหรับชนิดความแข็งแรงสูงใช้ในการทำเข็มขัดนิรภัย ผ้าใบยางรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังทนทานต่อการขูดถูได้ดีและสภาพยืดหยุ่นสูงมาก การคืนตัวจากแรงอัด ดีมากไม่มีปัญหาด้านการยับ การใช้งานของไนลอนจึงเป็นไปอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานด้านอุตสาหกรรม เช่น ทำเป็นเดือ้นท์ ใยของเรือใบ และแท็งก์เก็บน้ำ เป็นต้น

iv. ความสามารถในการดูดซึมความชื้น มีการดูดซึมความชื้นต่ำ ความสามารถในการดูดซึมความชื้นประมาณ 4.0-4.5% ทำให้เป็นจุดอ่อนที่สวมใส่ไม่สบาย และเป็นปัญหาในระยะเริ่มแรกของการใช้ผ้าไนลอนด้วยผิวที่เรียบ และเส้นใยเหยียดยาวการเกาะตัวกันระหว่างเส้นใยชิดกันมากในโครงสร้างของด้าย ทำให้เส้นด้ายแน่นและการระบายไม่ดีความนิ่มของไนลอนจึงลดลงระดับหนึ่ง ต่อมาได้มีการแก้ปัญหาด้วยการพัฒนาเส้นใยให้มีโครงสร้างฟูขึ้นในรูปของเส้นด้ายเทกซ์เจอร์ นอกจากนั้นก็ยังมีการบวนการตกแต่งสำเร็จเข้ามาช่วยเสริมเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซึมความชื้นให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในบรรดาไนลอนทั้งหมดไนลอน 4 และไนลอน 8 มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดีคล้ายฝ้าย แต่ในขณะเดียวกันก็มีปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานจึงไม่ได้เป็นที่รู้จักในวงการเส้นใยสิ่งทอ

v. การทนต่อความร้อน ไนลอนเมื่อได้รับความร้อนสูงจะหลอมตัวคล้ายแอซิเตด ข้อควรระวัง คือ ไนลอน 6 มีจุดหลอมเหลวที่ 216 °C ซึ่งต่ำกว่าไนลอน 6,6 ซึ่งหลอมเหลวที่ 250 °C อุณหภูมิที่เหมาะสมในการรีดผ้าไนลอนอยู่ในช่วง 132-149 °C ต้องระวังระดับความร้อนให้ดี ไม่เช่นนั้นอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นเหลืองได้

vi. การติดไฟ เป็นสมบัติที่นับเป็นเอกลักษณ์ของไนลอน สามารถนำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์เส้นใยได้เป็นอย่างดี เมื่อไนลอนเข้าสู่เปลวไฟจะเกิดการหลอมและหดตัวออกจากเปลวไฟ จากนั้นจึงเกิดการติดไฟทำให้เส้นใยหลอมเหลวและเกิดเป็นหยด กลิ่นคล้ายคัสไนซ์ มีควันขาวออกมา จี๊เส้าที่เหลือมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลดำ

#### 2.4.2.2 สมบัติทางเคมี

i. กรด ไนลอนถูกทำลายด้วยสารละลายกรดเข้มข้น เช่น กรดไนตริก กรดกำมะถัน กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น หากต้มในสารละลาย 5% ของกรดไฮโดรคลอริกไนลอนจะสลายตัวได้

ii. ค่าคง ไนลอนมีความทนทานต่อด่างได้ดี

iii. สารละลายอินทรีย์ ทนทานต่อสารละลายอินทรีย์ได้ดี สามารถซักแห้งได้ ไนลอนไม่ละลายในสารละลายเอซีโตน แต่ละลายได้ในกรดฟอร์มิกที่เข้มข้น

iv. สารซักฟอก หากรักษาให้มีความจำเป็นในการซักฟอกไนลอนแทบจะไม่มี เนื่องจากไนลอนสามารถรักษาความขาวได้นาน แต่หากจะต้องซักฟอกก็สามารถใช้สารซักฟอกในตลาดชนิดออกซิไดส์หรือชนิดรีดิวส์ก็ได้ แต่ต้องเป็นสารที่ไม่แ่กจนเกินไป นอกจากนั้นการใช้สารซักฟอกประเภทคลอรีน อาจต้องระวังเพราะมีผลเสียต่อไนลอนได้

v. รา และแมลง ไม่มีผลต่อผ้าไนลอนในสภาวะการใช้งานปกติ

vi. แสงแดด โดยทั่วไปไนลอนทนต่อแสงแดดได้ดี ไนลอนชนิดที่มีความมันสูงหรือสว่างทนต่อแสงได้ดีกว่าชนิดที่มีความมันต่ำหรือทึบ

vii. การย้อมสี ไนลอน 6 ย้อมสีได้ดีติดทนนานกว่าไนลอน 6,6 และย้อมได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามไนลอนทั้งสองชนิดสามารถรักษาสีไว้ได้นานไม่จางง่าย

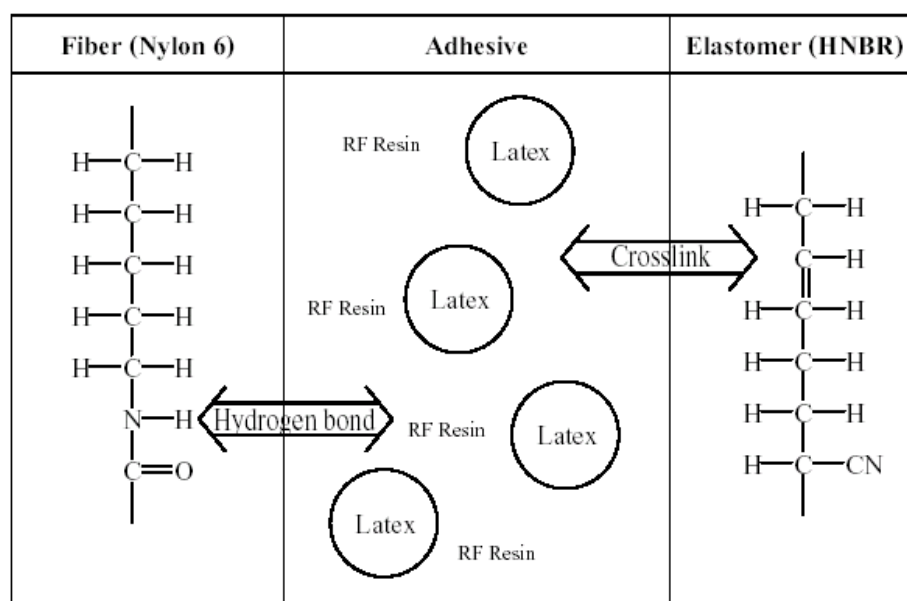
#### 2.4.2.3 การใช้งานของผ้าไนลอน

ผ้าไนลอนสามารถใช้ผสมกับเส้นใยชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น ไนลอนผสมผ้าฝ้าย ทำให้ได้เส้นด้ายที่มีความเล็กละเอียดสูงแต่ความแข็งแรงดีมีผิวเรียบ คล้ายไหม และไม่จับฝุ่นง่ายอันเป็นสมบัติของไนลอนในขณะที่ฝ้ายให้ความนุ่มนวล และดูดซับความชื้นที่ดี ดังนั้นผ้าที่ได้จึงให้สมบัติที่ดีมากของเส้นใยทั้งสองชนิดรวมกัน ไนลอนผสมขนสัตว์ได้ผ้าที่เบาและทนทานมีความทั้งตัวดีสวมใส่สบายรักษารูปทรงได้ดี โดยทั่วไปใช้ในลอนผสมประมาณ 10-15% ไนลอนผสมกับไหมทำให้ดูดซับความชื้นดี รักษารูปทรงดี มีการยืดตัว และความแข็งแรงดี ไนลอนผสมเรยอนทำให้ผ้าไม่ยับง่ายมีความแข็งแรง ได้ผ้าที่มีคุณภาพสูงและน้ำหนักเบา การผสมไนลอนอย่างน้อย 17% จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ดูแลรักษาง่ายเช่นเดียวกันไนลอนผสมแอซีเทต หรือไนลอนผสมไตรแอซีเทต ที่แม้จะทำให้สวมใส่ไม่สบายนักเพราะการดูดซับความชื้นไม่ดี แต่ก็ได้

ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง คุ้มค่า และไม่ยับ ในวงการอุตสาหกรรมสิ่งทอ ไนลอนที่ใช้กันมาก คือ ไนลอน 6 สำหรับใช้ทำเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มทั่วไปทั้งผ้าถัก และผ้าทอ ส่วน ไนลอน 6,6 มักนิยมใช้ในกิจการอุตสาหกรรม เช่น ผ้าใบยางรถยนต์ อวน ตาข่าย แปรง เส้นเอ็นใน อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น การผลิตเส้นใยไนลอนมีทั้งที่อยู่ในรูปของเส้นใยยาวและเส้นใยสั้น

#### 2.4.3 หลักการและเทคนิคการเคลือบผ้าใบ (Loganathan, 1998)

ผลิตภัณฑ์ประเภท ล้อยางยานพาหนะ สายพานรูปตัววี สายพานลำเลียง และท่ออย่าง มีการผลิตและใช้งานมากเป็นอันดับต้นๆของผลิตภัณฑ์อย่างทั้งหมด จากลักษณะการใช้งานของ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องมีความแข็งแรงของพันธะ ระหว่างยางกับผ้าใบ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจึงจำเป็นต้องใช้กาวเพื่อให้ยางและวัสดุเสริมแรงยึดติดกัน ได้แน่นยิ่งขึ้น ส่วนผ้าใบที่ใช้ในงานด้านการเคลือบมีมากมายหลายชนิด เช่น ผ้าฝ้าย ไนลอน เรยอน และโพลีเอสเตอร์ เป็นต้น ผ้าฝ้ายเป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติไม่มีปัญหาด้านการเคลือบด้วยยาง สามารถยึดติดกับยางได้ดี และไม่ต้องเตรียมผ้าใบด้วยการฉาบสารช่วยยึดติดใดๆ ส่วนผ้าใบสังเคราะห์จะมีความแข็งแรงสูง แต่มีปัญหาเรื่องการยึดติดกับยางจึงจำเป็นต้องฉาบด้วยสารช่วยยึดติด Resorcinol formaldehyde latex (RFL) ลงบนผ้าใบก่อนที่จะเคลือบด้วยยางจะทำให้การยึดติดระหว่างยางกับผ้าใบดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 กลไกการยึดติดระหว่างยาง HNBR กับเส้นใยไนลอน 6 (Yoichiro *et al.*, 1991)

รูปที่ 2.17 แสดงกลไกความแข็งแรงของพันธะระหว่างไนลอนกับ Resorcinol formaldehyde latex (RFL) โดยที่หมู่ฟังก์ชันของเอมีนในโครงสร้างของไนลอนเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของ (RFL) ส่วนพันธะระหว่างกาวยาง (Adhesive agent layer) กับยาง HNBR จะมีความแข็งแรงมากก็ต่อเมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ เนื่องจากพันธะคู่ในโครงสร้างของกาวยางจะไปเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับพันธะคู่ในโครงสร้างของยาง HNBR ส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับผ้าไนลอนสูงขึ้น (Yoichiro *et al.*, 1991)

#### 2.4.3.1 ยาง หรือ อีลาสโตเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบผ้าใบมี 2 สถานะ (Conner, 2003)

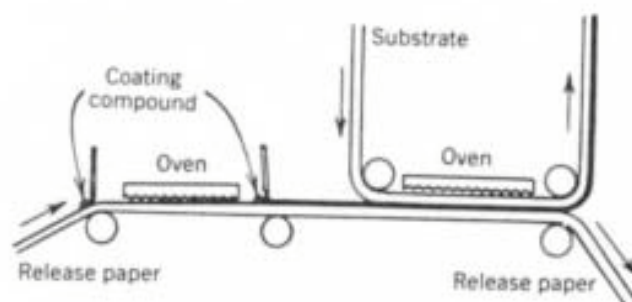
i. ใช้ในรูปของน้ำยาง

ii. ใช้ในรูปของแข็ง (ยางแห้ง)

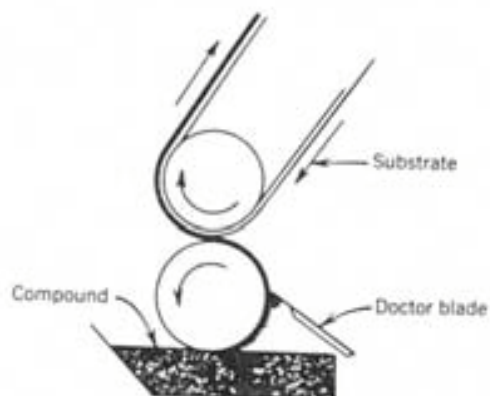
กรณีที่ต้องการเคลือบผ้าใบด้วยน้ำยางหรือสารละลายยาง ทำได้โดยการจุ่ม (Dipping) หรือการฉาบ (Spreading) น้ำยางหรือสารละลายยางลงไปบนผ้าใบ และถ้าต้องการเคลือบผ้าใบด้วยยางในสถานะของแข็ง (ยางแห้ง) ทำได้โดยใช้เครื่องรีดยาง (Calender) ผ้าใบที่เคลือบด้วยยางสามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภท เสื้อกันฝน เรือยาง ผ้ากันเปื้อน ผ้าใบคลุมรถบรรทุก ภาชนะบรรจุของเหลว ถังขยะ ผ้าใบมุงหลังคา ถูกลมนิรภัย และคู่อบไอน้ำ เป็นต้น ยางที่ใช้เคลือบผ้าใบในอุตสาหกรรมมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ยางธรรมชาติ ยางซิลิโคน ยางพอลิไอโซพรีน สไตรีน-บิวทาไดอีน-รับเบอร์ และยางประเภทอื่นๆ อีกมากมาย การนำยางไปใช้งานขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ว่าต้องการจะนำไปใช้งานในลักษณะใด เช่น ต้องการความทนน้ำมัน ทนน้ำ และทนไฟ เป็นต้น

#### 2.4.3.2 การเคลือบยางลงบนผ้าใบด้วยเทคนิคการเคลือบ (Conner, 2003)

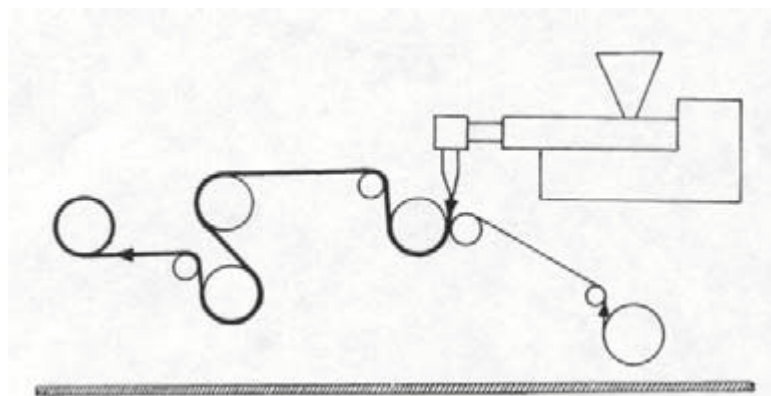
การเคลือบยางลงบนผ้าใบขึ้นอยู่กับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงเลือกผ้าใบที่จะใช้และยางที่จะนำมาเคลือบ ในกระบวนการเคลือบผ้าใบจะต้องคำนึงถึงระบบต่างๆ เช่น ขณะเคลือบอุณหภูมิต้องสูงพอ ผ้าใบที่จะเคลือบต้องอยู่ในสภาวะที่ตึง (Tension) เมื่อผ่านเข้าลูกกลิ้ง ซึ่งลูกกลิ้งจะเป็นตัวรีดยางให้ติดกับผ้าใบ ลูกกลิ้งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในกระบวนการเคลือบยางลงบนผ้าใบ เทคนิคการเคลือบ มีชุดลูกกลิ้งมีหลายแบบซึ่งแต่ละแบบจะมีขนาดและจำนวนลูกกลิ้งที่ต่างกันได้แก่ Transfer coating, Direct-gravure coating, และ Extrusion coating ดังรูปที่ 2.18 ถึง 2.20



รูปที่ 2.18 ชุดลูกกลิ้งแบบ Transfer coating (Kroschwitz *et al.*, 1986)



รูปที่ 2.19 ชุดลูกกลิ้งแบบ Direct-gravure coating (Kroschwitz *et al.*, 1986)



รูปที่ 2.20 ชุดลูกกลิ้งแบบ Extrusion coating (Wypych, 1988)

#### 2.4.4.3 การทำแผ่นยางด้วยเครื่องคาลเลนเดอร์ (บุญธรรม และปรีชา, 2534)

ในการทำผลิตภัณฑ์ยาง บางครั้งการใช้ยางแต่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถนำมาใช้งานได้เนื่องจากความแข็งแรงของยางไม่เพียงพอ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ได้แก่ ยางรถยนต์ ยางท่อ รองเท้า และสายพาน เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ จะมีผ้าใบเพื่อเสริมความแข็งแรง โดยให้เส้นใยเหล่านี้ฝังอยู่ในยาง หรือให้ยางเคลือบบนผ้าใบ การกระทำดังกล่าวต้องใช้เครื่องคาลเลนเดอร์ (Calender) เป็นตัวใช้เคลือบ นอกจากนั้นในการทำผลิตภัณฑ์ยางแผ่นบางๆ เพื่อนำไปประกอบหรือบุภาชนะอื่นๆ เช่น ถังบรรจุสารเคมี ยางบุท่อ และยางลูกกอล์ฟ เป็นต้น การทำแผ่นยางดังกล่าวนี้ ต้องใช้เครื่องคาลเลนเดอร์เช่นกัน เครื่องคาลเลนเดอร์ประกอบด้วยลูกกอล์ฟตั้งแต่ 3 ลูกขึ้นไป วางในแนวนอน โดยที่ลูกกอล์ฟเหล่านี้จะวางซ้อนกันขึ้นไปตรงๆ หรืออาจจะวางเฉียงกันก็ได้ การทำแผ่นยางทำได้โดยนำยางไปผ่านช่องว่างของลูกกอล์ฟของเครื่องคาลเลนเดอร์ ความเร็วลูกกอล์ฟของเครื่องคาลเลนเดอร์สามารถปรับความเร็วได้ อาจจะให้ลูกกอล์ฟหมุนด้วยความเร็วที่เท่ากัน หรือต่างกันก็ได้ อุณหภูมิของลูกกอล์ฟสามารถควบคุมให้ร้อนตามที่ต้องการได้ โดยทั่วไปจุดประสงค์ใหญ่ของเครื่องคาลเลนเดอร์อยู่ที่การทำแผ่นยางให้เรียบ และสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นเครื่องคาลเลนเดอร์ที่ดีต้องสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์นี้ได้

##### i. ชนิดของเครื่องคาลเลนเดอร์ แบ่งตามจำนวนลูกกอล์ฟเช่น

ia. เครื่องคาลเลนเดอร์สองลูกกอล์ฟ โดยลูกกอล์ฟของเครื่องนี้อาจวางในแนวนอนตั้งตรงหรือเฉียงก็ได้ หลักการทำงานจะถูกจำกัดอยู่ที่ยางจะผ่านลูกกอล์ฟเพียงครั้งเดียว การทำงานของเครื่องนี้มักจะใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้าที่ทำพื้นรองเท้า และโรงงานทำกระเบื้องยาง ซึ่งยางที่ผ่านเครื่องคาลเลนเดอร์นี้จะถูกส่งไปอัดที่แท่นอัดอีกครั้งหนึ่ง ข้อเสียของเครื่องนี้คือ การที่ยางผ่านลูกกอล์ฟเพียงครั้งเดียว ทำให้อากาศที่ขังอยู่ในยางไม่สามารถกำจัดออกไปได้หมด นอกจากนั้นยางที่ส่งเข้าไปจะดันลูกกอล์ฟให้ห่างออกจากกัน ทำให้ลูกกอล์ฟเกิดการโค้งในตอนกลาง (Bending) ทำให้แผ่นยางที่ได้ตอนกลางจะหนากว่าตอนริม

ib. เครื่องคาลเลนเดอร์สามลูกกอล์ฟ โดยหลักการทำงานของเครื่องนี้จะให้ยางผ่านช่องระหว่างลูกกอล์ฟถึงสองครั้งด้วยกัน การผ่านครั้งแรกเป็นการเตรียมยางส่งเข้าไปในช่องว่างที่สอง ช่องของลูกกอล์ฟแรกนั้นเรียกว่า Conditioning nip ส่วนการผ่านลูกกอล์ฟในชั้นที่สองนั้นจะทำให้หน้าที่ยางได้ขนาดความหนาตามต้องการ ช่องว่างระหว่างลูกกอล์ฟนั้นเรียกว่า Metering nip เทคนิคของการรีดแผ่นยางบนเครื่องรีดสามลูกกอล์ฟนี้ ถ้าหากเราสามารถส่งยางให้สม่ำเสมอเข้าช่องว่างระหว่างลูกกอล์ฟแรก ยางที่ผ่านช่องว่างแรกเข้าไปก็就会被ส่งอย่างสม่ำเสมอไปยังช่องว่างระหว่างลูกกอล์ฟหลัง (Nip ที่สองหรือ Nip หลัง) ทำให้ยางที่ออกมามีขนาดสม่ำเสมอขึ้น นอกจากนั้นถ้าอยากจัดให้ Nip ที่สองมียางเป็น Bank อยู่ด้วยขนาดเท่ากันสอง Bank ดังกล่าวจะเป็นตัวที่ขับฟองอากาศออกไปจากแผ่นยางจนหมดได้ เทคนิคที่มี Bank อยู่สอง Nip นี้เรียกว่า (Double bank

technic) แผ่นยางที่ได้จากการรีดด้วยเครื่องรีดสามลูกกลิ้งนี้ จะทำให้หนาได้ตั้งแต่ 0.2-2 mm ถ้าบางเกินไปแรงดันบนลูกกลิ้งจะสูงมาก แต่ถ้าหนาจนเกินไป จะทำให้ฟองอากาศขังอยู่ในแผ่นยางได้ ดังนั้นในกรณีที่หนามากกว่า 2 mm เราก็จะทำการซ้อน (Ply) แผ่นยางที่รีดได้เข้าด้วยกัน การฉาบยางด้วยเครื่องรีดสามลูกกลิ้งนี้สามารถฉาบผ้าได้ครั้งละด้านเท่านั้น ดังนั้นการฉาบทั้งสองด้านจะต้องทำถึงสองครั้งด้วยกัน ถ้าหากใช้เครื่องรีดแผ่นยางสี่ลูกกลิ้งแล้ว จะทำให้ฉาบผ้าได้ทั้งสองด้านในการกระทำเพียงครั้งเดียว

## ii. เทคนิคการฉาบผ้าใบด้วยเครื่องคาเลนเดอร์

ii.a. Topping หรือ Skim coating เป็นการนำแผ่นยางมาปะลงไปบนผ้าใบ ความเร็วของลูกกลิ้งที่นำผ้าเข้าไปกับลูกกลิ้งที่นำยางลงมาจะทำให้เท่ากัน การทำเช่นนี้จะทำให้เนื้อยางแทรกเข้าไปบนพื้นผ้าเล็กน้อยเท่านั้น ถ้าต้องการให้ยางติดกับผ้าดีก็ควรนำผ้าใบนั้นไปอบยางด้วยวิธีการ Frictioning หรือ Spreading ก่อน (Blow, 1971)

ii.b. Frictioning เป็นการฉาบยางอย่างบางๆ ลงไปบนผ้าใบ กระบวนการนี้ทำโดยให้ยางหมุนติดอยู่กับลูกกลิ้งกลางที่หมุนเร็วกว่าลูกกลิ้งล่าง ซึ่งนำผ้าใบเข้าไปเราอาจจะใช้หางนม (Skim milk หรือ Casein solution) ทาไปบนลูกกลิ้งกลางก่อนเพื่อให้ยางยึดติดกับลูกกลิ้งกลางได้ดี การฉาบยางด้วยเครื่องรีดสามลูกกลิ้งนี้สามารถฉาบผ้าได้ครั้งละด้านเท่านั้น ดังนั้นการฉาบทั้งสองด้านจะต้องทำถึงสองครั้งด้วยกัน ถ้าหากใช้เครื่องรีดแผ่นยางสี่ลูกกลิ้งแล้ว จะทำให้ฉาบผ้าได้ทั้งสองด้านในการกระทำเพียงครั้งเดียว (Blow, 1971)

## iii. เทคนิคในการทำแผ่นยางด้วยเครื่องคาเลนเดอร์

ในการที่จะทำได้แผ่นยางที่เรียบสม่ำเสมอ นั้น จะต้องควบคุมสิ่งต่างๆ หลายประการด้วยกัน คือ ปริมาณยางที่ใส่เข้าไป ความหนืดของยาง และอุณหภูมิของลูกกลิ้งและของยาง ปริมาณยางที่ใส่ในเครื่องรีดจะต้องสม่ำเสมอ ถ้าปล่อยให้ Bank ใหญ่เกินไปอากาศจะถูกไล่ออกจากยางได้ยาก แต่ถ้าให้ Bank เล็กเกินไปจะควบคุมให้ปริมาณยางสม่ำเสมอได้ยาก ทำให้ได้แผ่นยางที่แตกต่างกันมาก ความหนืดของยางที่เข้าเครื่องรีดจะต้องสม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดแรงผลักลูกกลิ้งสม่ำเสมอ จะทำให้ได้แผ่นยางที่เรียบสม่ำเสมอทั้งหมด นั่นคือระยะเวลาบดยาง ระยะเวลาบดสารเคมี จะต้องควบคุม และอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นยางจะต้องควบคุมด้วย อุณหภูมิของยาง ก่อนที่จะเข้าเครื่องควรมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของเครื่องเอง ถ้าปล่อยให้ยางที่เย็นเข้า จะทำให้ยางมีความหนืดสูงขึ้นการพองตัวของยางที่ออกมาจากเครื่องก็จะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความหนาของยางที่ได้ไม่สม่ำเสมอกัน วิธีการที่ดีที่สุดคือ การส่งยางเป็นแถบต่อเนื่องกันไป โดยแถบยางดังกล่าวออกมาจากเครื่องผสมยาง แล้วส่งโดยตรงเข้าเครื่องรีดแผ่นยางโดยใช้สายพานลำเลียง และส่งเข้า Nip ของเครื่องรีดแผ่นยางตลอดทั้งแนวความกว้าง โดยใช้ระบบ Pendulum ป้อนเข้าไป ปริมาตรยางที่ส่งเข้าไป สามารถควบคุมได้ทั้งจากความหนาของแถบยาง และความกว้างของแถบยาง



#### 2.4.4.4 ปัญหาของการรีดแผ่นยาง และการแก้ไข (บุญธรรม และปรีชา, 2534)

เมื่อมียางเข้าไปใน Nip ของเครื่องรีดแผ่นยาง ยางจะส่งแรงดันลูกกลิ้งออกจากกัน ทำให้ลูกกลิ้งโค้งออกในคอนส่วนกลาง ยางแผ่นที่ออกมาจะหนาในบริเวณส่วนกลางและบางในส่วนข้างๆ ความหนาที่เพิ่มขึ้นมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของยาง ความหนืดของยาง ปริมาณสารตัวเติมในยาง ปริมาณยางที่ใส่เข้าไป ระยะห่างของ Nip อุณหภูมิที่ใช้รีด และความเร็วที่ใช้ในการรีด เป็นต้น

i. การหดตัวของแผ่นยาง แผ่นยางที่ออกมาเมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดการหดตัว โดยที่หดลงตามความยาว และจะกว้างออกตามแนวกว้าง และความหนาเพิ่มขึ้นด้วยถ้านำแผ่นยางไปใช้ก่อนที่ยางจะหดตัวอย่างสมบูรณ์ จะทำให้แผ่นยางที่จะใช้มีรูปร่างผิดไปจากที่ต้องการได้ สามารถลดการเกิดการหดตัวลงได้ โดยการใช้ยางที่มี “Low nerve” เช่น บดยางธรรมชาติให้นาน ใช้ยางที่มีการเชื่อมโยงบางส่วนใช้พลาสติกผสม เลือกใช้สารตัวเติมที่มีโครงสร้างสูง และเพิ่มปริมาณสารตัวเติมให้มากขึ้น นอกจากนั้นควบคุมวิธีการเก็บยางแผ่นไว้ในผ้า Liner ซึ่งมีสองวิธีใหญ่ๆ คือนำยางแผ่นนั้นไปใส่ใน Liner อย่างรวดเร็ว และปล่อยให้มันเย็นขณะที่ถูกรีดตัวไว้ใน Liner นั้น กับอีกวิธีหนึ่งคือให้แผ่นยางเย็นตัวก่อนหรือใช้บังคับให้หดตัวก่อนเก็บไว้ใน Liner

ii. ผิวยางไม่เรียบ ยางที่มีผิวไม่เรียบจะต้องแก้ไขโดยการออกสูตรเหมือนกับการแก้เรื่องการหดตัว นอกจากนั้นแล้วจะต้องควบคุมอุณหภูมิของลูกกลิ้งด้วย ถ้าอุณหภูมิของลูกกลิ้งต่ำเกินไปจะเกิดรอยตีนกา (Crowfeet) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะเกิดการพุพองที่ผิวยาง

### 2.5 ผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสอาหาร (อรสา, 2547)

#### 2.5.1 ผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสอาหารแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ยางที่ต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรงและตลอดเวลา เช่น ภาชนะบรรจุอาหารและยางผนึกฝาขวดแก้ว

กลุ่มที่ 2 ยางที่สัมผัสชั่วคราวกับอาหารที่เป็นของเหลว เช่น ยางท่อลำเลียงอาหาร ยางซีลสำหรับหม้อไอน้ำความดัน ลีนยาง และจุกขวด

กลุ่มที่ 3 ยางที่สัมผัสกับน้ำมันและอาหารที่มีไขมัน ได้แก่ ท่อนม สายพานลำเลียงอาหาร

กลุ่มที่ 4 ยางสัมผัสกับน้ำดื่มและอาหารแห้ง เช่น สายพานลำเลียง ยางหุ้มลูกกลิ้ง ยางส่วนประกอบของปั้มน้ำ

กลุ่มที่ 5 กลุ่มพิเศษ เช่น ของเล่นเด็ก ลูกโป่ง หัวนม ยางกัดสำหรับเด็ก ฟันยางนกกมวย

## 2.5.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ยอมรับได้ในผลิตภัณฑ์สัมผัสอาหารแต่ละกลุ่ม

2.5.2.1 ยางธรรมชาติ ต้องเป็นชนิดสีจาง และมีสารที่ถูกสกัดด้วยอะซิโตนไม่เกิน 3.5%

2.5.2.2 สารตัวเติม สารตัวเติมอื่นๆ ไม่มีข้อกำหนด แต่เขม่าดำมีข้อกำหนดดังนี้ผลิตภัณฑ์อย่างกลุ่มที่ 1 ใช้เขม่าดำได้ไม่เกิน 2.5% กลุ่มที่ 2 และ 4 ใช้ได้ไม่จำกัดปริมาณ กลุ่มที่ 3 ใช้ได้ไม่เกิน 30% และกลุ่มพิเศษห้ามใช้เขม่าดำเลย

2.5.2.3 น้ำมัน ควรเป็นน้ำมันพาราฟิน ผลิตภัณฑ์อย่างกลุ่มที่ 1 ถึง 4 ใช้น้ำมันได้ไม่เกิน 5% แต่กลุ่มพิเศษห้ามใช้

2.5.2.4 สารวัลคาไนซ์ กำมะถันใช้ได้ในทุกกลุ่ม

2.5.2.5 สารตัวเร่ง ผลิตภัณฑ์อย่างกลุ่มที่ 1 และ 2 ห้ามใช้สารเร่งกลุ่มซัลฟิเนอไมด์ แต่กลุ่มไรโอโซล และ ETU สามารถใช้ได้ถึง 0.05% กลุ่มโซลูเรม ไรโอคาร์บาเมต และกำมะถัน ใช้ได้ถึง 1.2% กลุ่มที่ 3 สามารถใช้ MBTS 1% และ DPG 0.3% กลุ่มที่ 4 สามารถใช้ได้ทุกตัวและกลุ่มพิเศษใช้ได้บางตัวในปริมาณที่น้อย

2.5.2.6 สารกระตุ้น ผลิตภัณฑ์อย่างกลุ่มที่ 1 ถึง 4 ใช้ซิงค์ออกไซด์ได้ไม่เกิน 3% และกลุ่มพิเศษใช้ซิงค์ออกไซด์ได้ไม่เกิน 1%

2.6.2.7 สารหน่วง ผลิตภัณฑ์อย่างทุกกลุ่มใช้ Phthalic anhydride ได้ไม่เกิน 2.5% ของผลิตภัณฑ์

2.5.2.8 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ ผลิตภัณฑ์อย่างทุกกลุ่มใช้ในกลุ่มฟินอลไม่เกิน 1% ได้แก่ BHT, Styrenated phenol (Antage SP), Methylene bis-phenol

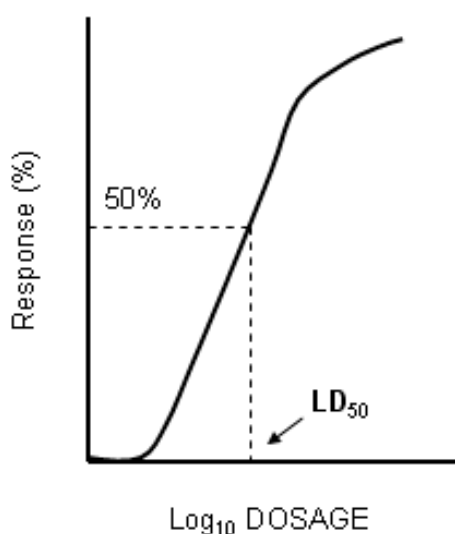
2.5.2.9 สารต้านทานปฏิกิริยาไอโซน ผลิตภัณฑ์อย่างทุกกลุ่มใช้ขี้ผึ้งพาราฟิน และ Microcrystalline wax ได้ไม่เกิน 3%

## ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างสูตรยางหุ้มนมเด็ก (อรสา, 2547)

ยาง/สารเคมี	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
ยางเครฟขาว	100	100
ซีลีกา	-	5
ซิงค์ออกไซด์ Active	0.5	0.5
ZDC	0.5	0.3
ZEPD	-	0.3
TMTM	-	0.1
กำมะถัน	1.8	1.8
อบสุกที่ 130 °C	8	12

## 2.6 การทดสอบความเป็นพิษของสารเคมี (Ramathibodi Poison Center, 2003)

พิษวิทยา (Toxicology) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งซึ่งศึกษาถึงผลกระทบของสารเคมีต่างๆ ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อม พิษวิทยาจึงมีส่วนสัมพันธ์กับวิชาต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น เภสัชวิทยา ชีวเคมี สรีรวิทยา สาธารณสุข แพทยศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และนิเวศน์วิทยา เป็นต้น พิษวิทยาจึงมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ ปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ ทางวิทยาศาสตร์ได้ก้าวหน้าไปมาก เช่น การสังเคราะห์ยาและสารเคมีชนิดใหม่ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตลอดจนความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม สิ่งก็ตามมาก็คือผลกระทบจากวิทยาการใหม่ๆ ต่อชีวิต และสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และพืช ตลอดจนสิ่งแวดล้อม ผู้ที่ได้รับสารพิษ (Toxic substance) โดยตรงหรือโดยอ้อมมักเกิดอาการเป็นพิษต่างๆ ซึ่งต้องพึ่งแพทย์ในการตรวจวินิจฉัย และรักษาตามอาการที่ปรากฏ ดังนั้นความรู้และความเข้าใจทางพิษวิทยาคลินิกจะช่วยในการตรวจวินิจฉัย ตลอดจนรักษาโรคอันสืบเนื่องจากสารพิษต่างๆ ได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง โดยทั่วไปแล้วนิยามของความเป็นพิษ (Toxicity) จากสารต่างๆ นั้นกำหนดเป็นสากลด้วยค่า  $LD_{50}$  (Lethal dose at 50%) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าสารต่างๆ ที่มนุษย์ได้รับจะเป็นอันตรายมากน้อยเพียงไร โดยทดลองให้ปริมาณ (Dose) ของสารเคมี หรือยาต่างๆ ในสัตว์ทดลอง เช่น หนู กระจายสุนัข แมว เป็นต้น  $LD_{50}$  จะเป็นขนาดของยาหรือสารเคมีที่สัตว์ทดลองรับเข้าสู่ร่างกายโดยวิธีใดๆ เช่น รับประทาน หายใจ ผ่านทางผิวหนังหรือฉีด แล้วทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50% จากสัตว์ทดลองที่ใช้ทั้งหมด ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารพิษที่รับเข้าไปและเปอร์เซ็นต์การตายของสัตว์ทดลองเมื่อได้รับสารพิษ (Rispien *et al.*, 2002)

การสาธิตค่า LD<sub>50</sub> ของสารต่างๆ โดยการนำเข้าสู่ร่างกาย (Route of administration) ด้วยวิธีต่างๆ พบว่าสารแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.8 และ 2.9 ค่า LD<sub>50</sub> ของสารใดที่มีค่าต่ำแสดงว่าสารนั้นจะมีความเป็นพิษสูง เช่น Botulinus toxin จะมีความเป็นพิษสูงกว่า Tetrodotoxin เมื่อให้สารโดยการฉีดเข้าเส้นเลือดดำ การเปรียบเทียบความเป็นพิษของสารแต่ละชนิดว่ามีความรุนแรงต่างกันเพียงไร ต้องคำนึงถึงการได้รับสารนั้นๆ เข้าสู่ร่างกายโดยวิธีเดียวกัน เช่น โดยการฉีดเข้าเส้นเลือด หรือฉีดเข้าใต้ผิวหนัง หรือรับประทาน ซึ่งจะเป็ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ การดูดซึมของสารนั้นๆ เข้าสู่กระแสโลหิต สารชนิดหนึ่งๆ อาจเป็นพิษเมื่อนำเข้าสู่ร่างกาย แต่ขณะเดียวกันไม่ก่ออาการเป็นพิษเมื่อรับประทานเข้าไป ความรุนแรงของสารพิษต่างๆ สามารถจำแนกลำดับความเป็นพิษได้ 6 ประเภท ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างค่า LD<sub>50</sub> ของสารเคมีชนิดต่างๆ (Ramathibodi Poison Center, 2003)

สาร	สัตว์ที่ทำการทดลอง	ทางที่ให้	LD <sub>50</sub> (mg/kg)
Ethyl alcohol	หนูถีบจักร	Oral	10,000
Sodium chloride	หนูถีบจักร	Intraperitoneal	4,000
Ferrous sulfate	หนูขาว	Oral	1,500
Morphine sulfate	หนูขาว	Oral	900
Phenobarbital, sodium	หนูขาว	Oral	150
DDT	หนูขาว	Oral	100
Picrotoxin	หนูขาว	Subcutaneous	5
Strychnine sulfate	หนูขาว	Intraperitoneal	2
Nicotine	หนูขาว	Intravenous	1
d-Tubocurarine	หนูขาว	Intravenous	0.5
Hemicholinium-3	หนูขาว	Intravenous	0.2
Tetrodotoxin	หนูขาว	Intravenous	0.10
Dioxin	หนูตะเภา	Intravenous	0.001
Botulinus toxin	หนูขาว	Intravenous	0.00001

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างค่า LD<sub>50</sub> ของสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง (Nutt, 1984)

สาร	สัตว์ที่ทำการทดลอง	ทางที่ให้	LD <sub>50</sub> (mg/kg)
Hexamethylene tetramine (HMT)	หนูขาว	Oral	10,000
Zinc dimethyldithiocarbamate (ZDMC)	หนูขาว	Oral	500-14,000
Zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC)	หนูขาว	Oral	3,530
Zinc dibuthyldithiocarbamate (ZDBC)	หนูขาว	Oral	2,000
<i>N,N'</i> -Diphenyl-guanidine (DPG)	หนูขาว	Oral	280
Di- <i>O</i> -Tolyl- guanidine (DOTG)	หนูขาว	Oral	134
<i>N</i> -Tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide (TBBS)	หนูขาว	Oral	6,310
<i>N</i> -Cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide (CBS)	หนูขาว	Oral	5,300
2-Morpholinothiobenzothiazole (MBS)	หนูขาว	Oral	7,940
2-Mercaptobenzothiazole (MBT)	หนูขาว	Oral	3,800
2,2'-Dibenzothiazyl disulphide (MBTS)	หนูขาว	Oral	7,940
Zinc salt of 2-Mercaptobenzothiazole (ZMBT)	หนูขาว	Oral	7,050
Ethylenethiourea (ETU)	หนูขาว	Oral	920
1,3-Diethylthiourea (DETU)	หนูขาว	Oral	316
1,3-Diphenyl-2- thiourea (DPTU)	หนูขาว	Oral	4,500
1,1,3-Tributylthiourea (TBTU)	หนูขาว	Oral	5,500
Tetramethylthiuram monosulphide (TMTM)	หนูขาว	Oral	1,250-1,400
Tetramethylthiuram disulphide (TMTD)	หนูขาว	Oral	780-1,300
Tetraethylthiuram disulphide (TETD)	หนูขาว	Oral	2,000
Tetrabutylthiuram disulphide (TBUT)	หนูขาว	Oral	2,000
Zinc isopropyl xanthate (ZIX)	หนูขาว	Oral	2,000
3-Methyl-2-thione-thiazolidine	หนูขาว	Oral	1,200
<i>N</i> -Nitrosodiphenylamine	หนูขาว	Oral	2,000
Cyclohexylthioptalimide	หนูขาว	Oral	2,600
Salicylic acid	หนูขาว	Oral	890
Phalic anhydride	หนูขาว	Oral	800-1600
Phenyl <i>B</i> -naphthylamine (PBN)	หนูขาว	Oral	8,700
<i>N</i> -Isopropyl- <i>N'</i> -phenyl- <i>p</i> -phenylenediamine (IPPD)	หนูขาว	Oral	900
<i>N</i> -1,3-Dimethylbutyl- <i>N'</i> -phenyl- <i>p</i> -phenylenediamine (6PPD)	หนูขาว	Oral	3,580

2,6-Ditert-butyl- <i>p</i> -cresol (BHT)	หนูขาว	Oral	1,700-1,970
2,2'-Methylene-bis(4-methyl-6-tert-butylphenol) (Antioxidant 2246)	หนูขาว	Oral	10,000
Poly-2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ)	หนูขาว	Oral	2250
3-(3-tert-butyl-4-hydroxy-5-methylphenyl) propionate (Wingstay L)	หนูขาว	Oral	16,000

ตารางที่ 2.10 การจำแนกลำดับความเป็นพิษของสารพิษต่างๆ (Ramathibodi Poison Center, 2003)

อัตราความรุนแรงของพิษ	ขนาดของสารพิษ	ปริมาณของสารพิษที่รับเข้าไปทางปาก สำหรับ ผู้ใหญ่ที่มีน้ำหนักตัวเฉลี่ยประมาณ 70 kg
Practically nontoxic	> 15 g/kg	มากกว่า 1 ควอทซ์
Slightly toxic	5-15 g/kg	ระหว่างไฟนถึงควอทซ์
Moderately toxic	0.5-5 g/kg	ระหว่างออนซ์ถึงไฟน
Very toxic	50-500 mg/kg	ระหว่างช้อนชาถึงออนซ์
Extremely toxic	5-50 mg/kg	ระหว่าง 7 หยดถึง 1 ช้อนชา
Super toxic < /td>	< 5 mg/kg	น้อยกว่า 7 หยด

นอกจากทราบค่า  $LD_{50}$  แล้วยังต้องคำนึงถึงค่า  $ED_{50}$  (Effective dose at 50%) ซึ่งเป็นปริมาณของสารเคมีหรือยาต่างๆ ซึ่งเมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วสามารถแสดงประสิทธิภาพในการรักษา 50 % ของสัตว์ทดลองทั้งหมด จากการเปรียบเทียบค่า  $LD_{50}$  และ  $ED_{50}$  ของสารต่างๆ สามารถนำมาคำนวณหาดัชนีของการรักษา Therapeutic index (TI) ของสารนั้นๆ ซึ่งคำนวณ ได้ดังนี้

$$TI = LD_{50}/ED_{50}$$

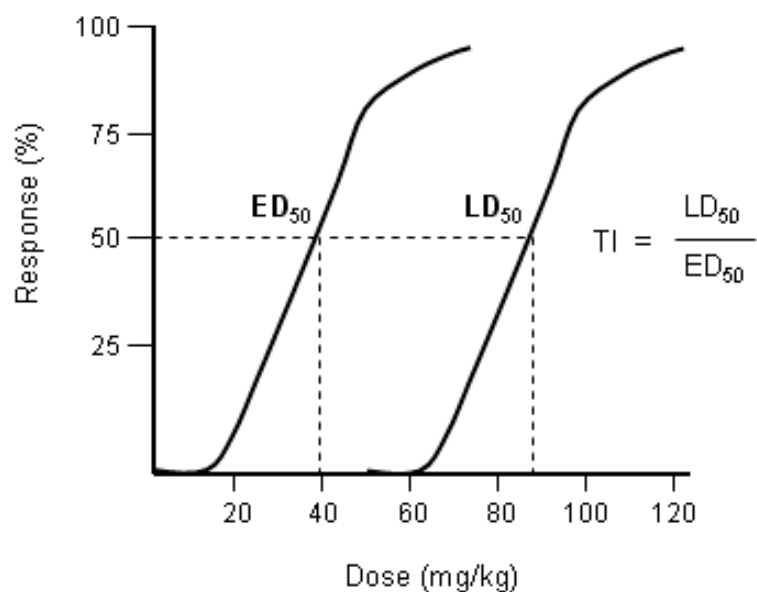
เมื่อ TI คือ ค่าดัชนีของการรักษา

$LD_{50}$  คือ ปริมาณของสารเคมีที่สัตว์ทดลองรับเข้าสู่ร่างกายโดยวิธีใดๆ แล้วทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50 %

$ED_{50}$  คือ ปริมาณของสารเคมีต่างๆ ซึ่งเมื่อรับเข้าสู่ร่างกายแล้วสามารถแสดงประสิทธิภาพในการรักษา 50 % ของสัตว์ทดลองทั้งหมด

ค่า TI จะบ่งบอกถึงความปลอดภัยของสารต่างๆ ดังรูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสาร และการตอบสนองต่อสารนั้นๆ (Dose response curve) เพื่อดูผลของสารในแง่

การรักษา ( $ED_{50}$ ) และผลของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไป 50 % ( $LD_{50}$ ) ถ้ากราฟของ  $LD_{50}$  เคลื่อนมาทางซ้ายจะพบว่าค่า TI จะเล็กลงซึ่งแสดงว่าสารนั้นๆ จะมีความปลอดภัยน้อยลง หรือพูดได้อีกนัยหนึ่งว่าสารนั้นๆ มีความเป็นพิษมากขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลทางสถิติ และข้อมูลทางเภสัชศาสตร์ หน่วย  $LD_{50}$  นี้คือ mg ของสารต่อมวลของสัตว์ทดลองเป็น kg การทดสอบความเป็นพิษในสัตว์ทดลองต่างๆ นั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานซึ่งจะนำไปประเมินความปลอดภัยของการใช้สารนั้นๆ ในมนุษย์ ซึ่งต้องเลือกชนิดของสัตว์ทดลองให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงระบบดูดซึมตลอดจนระบบกำจัดสารนั้นๆ ให้ใกล้เคียงกับมนุษย์มากที่สุดเพื่อประเมิน และประมาณความเป็นพิษ (Extrapolation) ของสารนั้นๆ ต่อมนุษย์ เนื่องจากจรรยาบรรณทางการแพทย์จะไม่มี การทดลองขนาดของยา หรือสารต่างๆ ในมนุษย์โดยตรงเพื่อดูผลการใช้รักษาตลอดจนพิษภัยของสารนั้นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการทดลองในสัตว์ทดลองดังกล่าว เมื่อได้ขนาดของยาในสัตว์ทดลองแล้วสามารถนำไปเปรียบเทียบขนาดของยาที่จะใช้ในคน เพื่อให้ได้ขนาดของยาที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในคนดังตารางที่ 2.11



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารและการตอบสนองต่อสารนั้นๆ เพื่อคำนวณดัชนีความปลอดภัยของสาร (Ramathibodi Poison Center, 2003)

ตารางที่ 2.11 ค่าเปรียบเทียบขนาดของยาต่อน้ำหนักตัวและพื้นผิว (100 mg/kg) ในคนและสัตว์ต่างๆ (Ramathibodi Poison Center, 2003)

ชนิดของสัตว์	น้ำหนัก	พื้นที่ผิว	ขนาดของยาต่อน้ำ	ขนาดของยาต่อพื้นที่	อัตราส่วนของขนาดของ
--------------	---------	------------	-----------------	---------------------	---------------------

	(g)	(cm <sup>3</sup> )	หนักตัว (mg/kg)	ผิว (mg/cm <sup>2</sup> )	ยาต่อน้ำหนักตัว (cm <sup>2</sup> /kg)
หนูถีบจักร	20	36	2	2	1.00
หนูขาว	200	325	20	14	1.43
หนูตะเภา	400	564	40	24	1.65
กระต่าย	1,500	1,272	150	55	2.74
แมว	2,000	1,381	200	60	3.46
ลิง	4,000	2,975	400	128	3.12
สุนัข	12,000	5,766	1,200	248	4.82
คน	70,000	18,000	7,000	776	9.08