

## บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

### 2.1 น้ำยางธรรมชาติ [1,2]

#### 2.1.1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติได้จากต้นยางพารา (*Hevea Brasiliensis*) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม มีความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นกรด - ด่าง (pH) 6.5 - 7.0 น้ำยางธรรมชาติเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลวเป็นตัวกลางและมีอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ นอกจากนี้ยังมีสารที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber substances) ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง แมงกานีส ชิ้นส่วนของโปรตีนจะมีอยู่ 1-1.5% ของน้ำยางคิดเป็น 30 - 50 มิลลิกรัมต่อกรัมยางแห้ง รายละเอียดองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

องค์ประกอบ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%)
สารที่อยู่ในรูปของแข็ง	36
เนื้อยางแห้ง	33
สารจำพวกโปรตีน	1-1.5
สารจำพวกเรติน	1-2.5
ซีเถ้า	1
น้ำตาล	1
น้ำในปริมาณที่รวมแล้วเป็น	100

#### 2.1.1.1 ส่วนของวัฏภาคยาง (Rubber Phase)

อนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน ประเภท ซิส 1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene:  $(C_5H_8)_n$ ) เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและมีลักษณะเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รูปร่างส่วนใหญ่เป็นรูปกลมและรูปลูกแพร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.02 - 3 ไมโครเมตร ในสภาพน้ำยางสดผิว

รอบอนุภาคถูกห่อหุ้มด้วยไขมันพอสฟอไลปิด (phospholipid) และโปรตีนโดยพอสฟอไลปิดเป็นตัวยึดระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับสารโปรตีน

ส่วนของเนื้อเยื่อส่วนใหญ่ประกอบด้วยยางไฮโดรคาร์บอน น้ำ ไขมัน และโปรตีน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 นอกจากสารดังกล่าวแล้วอาจมีอนุมูลของโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียม และทองแดง ประมาณ 0.05% โดยน้ำหนัก ปนอยู่ในส่วนของเนื้อเยื่อ

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อเยื่อ

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำ (กระจายอยู่ในไฮโดรคาร์บอน)	10
สารพวกไขมัน	3
สารพวกโปรตีน	1

#### 2.1.1.2 ส่วนที่เป็นของเหลว (Aqueous Phase)

ส่วนที่เป็นของเหลวของน้ำยางหรือเรียกว่าซีรัม มีความหนาแน่น 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ดังนี้

1) คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่เป็นประเภท แอล - เมทิลลิโนซิทอล (L-methylinositol) หรือที่เรียกกันว่าควิบราซิทอล (quebrachitol) มีอยู่ประมาณ 1% โดยน้ำหนักของน้ำยาง และยังมีคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ บ้างเล็กน้อย ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กาแลคโตส ฟรุคโตส เป็นต้น คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อน้ำยาง กล่าวคือหากมีการรักษาสภาพน้ำยางไม่พอเพียง จุลินทรีย์จะเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดฟอร์มิก อะซีติก และไพโรพิโนอิก กรดเหล่านี้มีผลทำให้น้ำยางเสียสถานะและจับตัวเป็นก้อนได้

2) โปรตีนและกรดอะมิโน โปรตีนที่สำคัญ ได้แก่ แอลฟา-โกลบูลิน ( $\alpha$ -globulin) และฮีวิน (hevein) แอลฟา-โกลบูลินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีมากในส่วนของเหลวของน้ำยางสด มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 200,000 มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารละลายของเกลือ กรด และด่าง การเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางจะเพิ่มการเคลื่อนไหวของแอลฟา-โกลบูลินและอนุภาคยาง ซึ่งเป็นการช่วยรักษาสภาพน้ำยางได้ ฮีวินเป็นโปรตีนชนิดที่เป็นผลึกมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพียงประมาณ 10,000 ละลาย ได้ดีในน้ำ ไม่ตกตะกอนด้วยความร้อน และไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการคงสภาพเป็นสารแขวนลอยของน้ำยาง นอกจากโปรตีนทั้งสองชนิดดังกล่าวแล้ว ในซีรัมยังมี

โปรตีนชนิดอื่นๆ โปรตีนเหล่านี้อาจมีผลกระทบต่อการคงสภาพเป็นสารแขวนลอยของน้ำยาง ทั้งนี้ เพราะโปรตีนดังกล่าวมีประจุบวกที่ pH ที่เป็นกลางหรือค่อนข้างเป็นด่าง

สำหรับกรดอะมิโนอิสระมีซีรัมอยู่ประมาณ 0.1% โดยน้ำหนักของน้ำยางซึ่งยังไม่แน่ชัดว่ากรดอะมิโนเหล่านี้มีมาแต่เดิมหรือมาจากการสลายตัวของโปรตีน กรดอะมิโนที่สำคัญ ได้แก่ กรดกลูตามิก (glutamic acid) อะลานีน (alanine) และกรดแอสปาร์ติก (aspartic acid) ในน้ำยางที่ใส่แอมโมเนีย โปรตีนจะสลายตัวด้วยน้ำอย่างช้าๆ ได้พอลิเปปไทด์ (polypeptide) กับกรดอะมิโน

3) ส่วนอื่นๆ ได้แก่ สารพวกที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนอิสระ เช่น โคลีน (choline) และเมทิลเอมีน (methyl amine) กรดอินทรีย์ (ที่ไม่ใช่กรดอะมิโน) แอนไอออนของสารอินทรีย์ (โดยเฉพาะพวกฟอสเฟตและคาร์บอเนต) และโลหะไอออน (รวมทั้งพวกโพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก โซเดียม และทองแดง) สารประกอบไฮโดรไซยาไนด์อิสระ (RCN-) สารประกอบพวกไทออล (thiol) และน้ำย่อยหลายชนิด

### 2.1.1.3 ส่วนลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่นๆ

เมื่อปั่นน้ำยางสดที่ความเร็วต่ำพบว่าน้ำยางแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่อยู่ชั้นบนมีสีขาว ประกอบด้วยอนุภาคยางเป็นส่วนมากและส่วนที่อยู่ชั้นล่างมีสีเหลือง ซึ่งมีประมาณ 20 - 30% ของปริมาณทั้งหมด ส่วนชั้นล่างเป็นอนุภาคที่ไม่ค่อยเกาะตัวกันแน่น มีความแตกต่างจากอนุภาคของยางและเรียกว่า ลูทอยด์

ลูทอยด์มีลักษณะเป็นทรงกลมมีเยื่อบางห่อหุ้มอยู่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 5 ไมโครเมตร ภายในเยื่อบางของลูทอยด์ประกอบด้วยของเหลว เรียกว่า ซีรัมบี (B-serum) มี pH ประมาณ 5.5 เป็นสารละลายของกรด กลีเซอรอล โปรตีน น้ำตาลและพอลิฟีนอล ออกซิเดส (polyphenol oxidase) ซึ่งพอลิฟีนอล ออกซิเดสนี้ ทำให้น้ำยางมีสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศ หรือออกซิเจน ลูทอยด์ในน้ำยางมีอิทธิพลต่อความหนืดและสภาพการเป็นสารแขวนลอยในน้ำยางสด เนื่องจากลูทอยด์มีสมบัติที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออสโมซิส (osmosis) ได้ง่าย ดังนั้น การเติมน้ำลงในน้ำยางจึงมีผลให้ลูทอยด์เกิดการบวมหรือพองตัวแล้วแตกออกทำให้ความหนืดของน้ำยางเพิ่มขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลให้ลูทอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งแตกออกคือ ขณะที่น้ำยางไหลออกจากต้นยางนั้นลูทอยด์จะเกิดการเสียดสีกันเองมีผลทำให้ลูทอยด์แตกออกได้

นอกจากนี้ในชั้นของลูทอยด์ยังมีสารอีกพวกหนึ่งที่เรียกว่า อนุภาคฟรี-วิสลิง (Frey-wysling) อนุภาคนี้มีลักษณะกลมอยู่กันเป็นกลุ่ม มีสีเหลืองจัด ไม่ใช่เป็นส่วนของเนื้อเยื่อ มีขนาดและความหนาแน่นมากกว่าอนุภาคขนาดเล็กน้อย อนุภาคฟรี-วิสลิงมีสีเหลืองเนื่องจากสารคาโรทีนอยด์ อนุภาคฟรี-วิสลิงประกอบด้วยไขมันและคาโรทีนอยด์

## 2.2 น้ายางชั้น [3,4]

### 2.2.1 การผลิตน้ายางชั้น

ปกติน้ายางที่มาจากสวน จะมีปริมาณยางแห้งเพียงร้อยละ 25-45 นอกนั้นส่วนใหญ่เป็นน้ำและมีสารของแข็งที่ไม่ใช่ยางบ้าง ฉะนั้นหากต้องการนำน้ายางไปใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ไกลจากสวนยางหรือจากแหล่งยางธรรมชาติ จึงเป็นการไม่สะดวก นอกจากนั้นสารบางอย่างที่มีอยู่ในน้ายาง ยังอาจมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีคุณภาพไม่ดีด้วยเหตุผลเหล่านี้คือที่มาของการทำน้ายางสดให้เป็นน้ายางที่มีความข้นคือมีปริมาณน้ายางแห้งเป็น 60 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ วิธีการผลิตน้ายางชั้นที่ทำกันในเชิงการค้ามี 3 วิธีคือ วิธีระเหยน้ำ วิธีทำให้เกิดครีม วิธีปั่นและอีกวิธีหนึ่งซึ่งไม่สามารถทำเป็นการค้าได้เพราะไม่สะดวกและลงทุนสูง คือ การใช้กระแสไฟฟ้าแยกสำหรับในประเทศไทย ปัจจุบันทำการผลิตน้ายางชั้นโดยวิธีการปั่นเพียงอย่างเดียว รายละเอียดของแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

#### 2.2.1.1 วิธีการระเหยน้ำ

น้ายางสดจากสวนก่อนการทำให้ข้นโดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้น้ายางคงตัว (stabilizers) เช่น สบู่โพแทสเซียมเสียก่อน การระเหยน้ำออกจากน้ายางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือ ภาชนะที่หมุนได้รอบๆ แกน ตามแนวนอนและถังนี้ถูกให้ความร้อนรอบๆถึง การระเหยน้ำจากน้ายางจะทำให้ได้น้ายางชั้นซึ่งมีปริมาณเนื้อเยื่อ 60% น้ายางชั้นที่ได้จากวิธีนี้มีความคงสภาพเป็นน้ายางดีมาก จึงเหมาะสำหรับการที่จะต้องขนย้ายน้ายางไปไกล และเหมาะกับการนำไปผลิตวัตถุสำเร็จรูปประเภทที่ต้องใส่พวกสารตัวเติม (filler) จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตกาว (Latex Cement)

### 2.2.1.2 วิธีทำให้เกิดครีม

น้ำยางธรรมชาติไม่ว่าอยู่ในสถานะสด หรือสถานะที่มีการใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง (preserved latex) ประกอบด้วยระบบของสารคอลลอยด์แบบอิมัลชัน (colloidal emulsion) ของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าซีรัม อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในซีรัมเกิดการเคลื่อนไหวแบบ Brownian (คือการเคลื่อนไหวทุกทิศทางอย่างไม่มีระเบียบ) และการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางสดจะรวดเร็วกว่าการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางที่ใส่สารเคมีรักษาสภาพ เนื่องจากอนุภาคของยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีรัม ดังนั้นอนุภาคยางเหล่านี้จึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำยางได้ ถ้าอนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้น และอนุภาคยางจะใหญ่โตขึ้นได้เมื่อเติมสารคอลลอยด์ที่จะไปทำหน้าที่พอกหรือเคลือบผิวของอนุภาคยาง สารนี้จึงเรียกว่าเป็นตัวการทำให้เกิดครีม (creaming agent) ตัวอย่างสารพวกนี้ได้แก่ sodium alginate, locust bean gum, gum karaya, gum tragacanth เป็นต้น อนึ่งการผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีทำให้เกิดครีมยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา แต่เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิธีนี้ คือ น้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธีนี้มีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านกรรมวิธีการทำให้เกิดครีมซ้ำหลายๆ ครั้ง

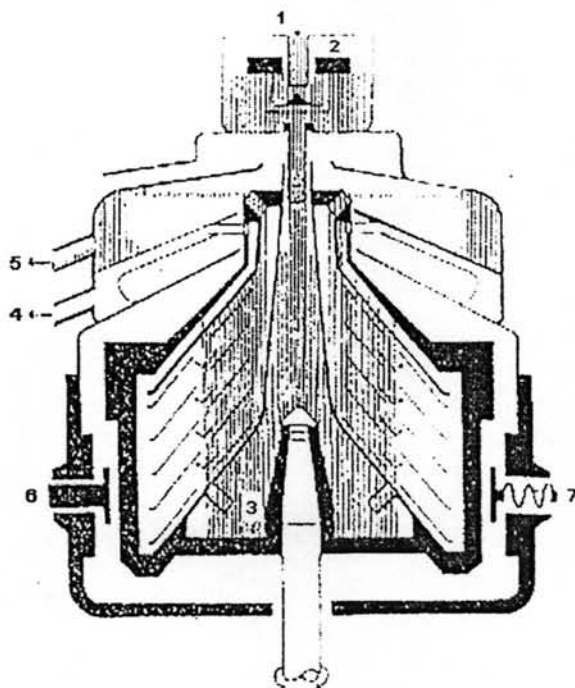
### 2.2.1.3 วิธีการปั่น

เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารละลายที่จัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ (colloid system) ที่ประกอบด้วยส่วนของอนุภาคยาง (rubber particle) แขวนลอยกระจัดกระจายอยู่ในซีรัม อนุภาคยางเหล่านี้เคลื่อนไหวแบบไร้ทิศทาง (Brownian movement) และเนื่องจากอนุภาคยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีรัม ดังนั้นอนุภาคยางจึงมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสู่ผิวหน้าของน้ำยาง อัตราการเคลื่อนของอนุภาคยางขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลก ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดึงดูดได้เป็น 2000 ถึง 3000 เท่าของแรงดึงดูดของโลก จึงสามารถเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางได้ จากหลักการนี้จึงถูกนำมาพิจารณา สร้างเครื่องปั่นน้ำยางเพื่อการผลิตน้ำยางข้น

เครื่องผลิตน้ำยางข้น ผลิตจำหน่ายโดยหลายบริษัท เช่น บริษัท Alfa-Laval ประเทศสวีเดนบริษัท Westfalia Separatro Co. ประเทศเยอรมันนี และอีกสองบริษัทในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น รูปที่ 2.1 แสดงถึงภาพหน้าตัดตามยาวภายในของถังปั่นแบบ Alfa-Laval น้ำยางจะไหลเข้าทาง (1) ซึ่งอยู่ส่วนบนสุดของตัวเครื่อง ระดับของน้ำยางจะปรับให้คงที่โดย (2) น้ำยางไหลโดยแรงโน้มถ่วง (gravity) ไปที่จุดกลางของถังปั่นและแรงปั่นของเครื่องจะปั่นให้น้ำยางไหลไปตามรูของชุดจานแยก (3) จากนั้นน้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีน้ำหนัก (heavy phase) คือหางน้ำยาง (skim) ไหลออกสู่อบนอกของถังปั่นและไปตามทางด้าน



บนของถังผ่านสกรู ปรับสูงที่เก็บแยกหางน้ำยาง (4) ส่วนของน้ำยาง (concentration or cream) ซึ่งเป็นส่วนที่มีเนื้อยางจะไหลเข้าสู่กลางถังปั่นไปยังด้านบนจนถึงเข้าสู่ที่เก็บ (5)



รูปที่ 2.1 ภาพหน้าตัดตามยาวภายในของเครื่องปั่นน้ำยางชั้น [3]

ปกติน้ำยางชั้นที่ได้จากเครื่องปั่นจะมีความเข้มข้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางแห้ง เครื่องปั่นน้ำยางขนาดเล็กๆ สามารถแยกน้ำยางสดได้ประมาณ 15 ลิตร/ชั่วโมง และเครื่องขนาดใหญ่แยกน้ำยางสดได้ 400-600 ลิตร/ชั่วโมง และปกติการเดินเครื่องปั่นจะสามารถเดินติดต่อกันได้อย่างมากครั้งละไม่เกิน 3 ชั่วโมง เพราะจำเป็นต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดล้างพวกตม (sludge) ที่ติดอยู่ในเครื่อง

#### 2.2.1.4 วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

จากการที่ในสถานะของน้ำยาง อนุภาคแขวนลอยอยู่ในซีรัมต่างถูกห่อหุ้มด้วยคาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion,  $\text{RCO}_2^-$ ) ที่เป็นประจุลบ ดังนั้นจึงสามารถที่จะอาศัยไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของซีรัมได้ โดยวิธีการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่ได้เติมสารเคมีช่วยทำให้น้ำยางคงตัวไว้ แล้วอนุภาคยางจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ไปรวมอยู่ทางขั้วบวกและลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าของน้ำยางในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคยางต่ำกว่าความหนาแน่นของซีรัม อย่างไรก็ตามวิธีการทำน้ำยางชั้นโดยใช้ไฟฟ้านี้เป็นวิธีที่ยุงยากและไม่ประหยัดจึงไม่เป็นที่นิยม

### 2.2.2 การรักษาสภาพน้ำยางข้น

น้ำยางข้นที่ผลิตได้ต้องเติม หรือปรับด้วยแอมโมเนียเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง ปกติ มีวิธีรักษาน้ำยางข้น 2 วิธี คือ

- 1) รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียสูง ประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักยาง เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (high ammonia)
- 2) รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียต่ำ ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักยาง แล้วเติมสารบางชนิด เช่น TMTD/ZnO ในอัตราส่วน 0.025 เปอร์เซ็นต์หรือ ZDEC 0.01 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (low ammonia)

### 2.2.3 สมบัติน้ำยางข้น

สมบัติที่ใช้ระบุคุณภาพของน้ำยางข้น คือ

- 1) ปริมาณสารของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content , TSC)
- 2) ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)
- 3) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, %NH<sub>3</sub>)
- 4) เวลาความคงตัวเชิงกล (Mechanical Stability Time , MST)
- 5) ค่าของกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile Fatty Acid Number , VFA No.)
- 6) ค่าของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide Number, KOH No.)
- 7) ปริมาณก้อนยางจับตัว (Coagulum Content)
- 8) ปริมาณตม (Sludge Content)
- 9) กลิ่นและสีของน้ำยาง
- 10) ทองแดงและแมงกานีส
- 11) ความหนืด (Viscosity)
- 12) ขนาดของอนุภาคยาง (Particle Size)
- 13) การนำไฟฟ้า (Conductivity)
- 14) การเป็นคริมของน้ำยางข้น
- 15) ความสามารถในการกรองผ่าน (Filterability)

## 2.3 วัตถุประสงค์และสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางคงรูป [5,6]

วิธีการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบไปด้วยการนำน้ำยางข้นหรือน้ำยางสด มาผสมกับสารเคมีที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent) ซึ่งประกอบด้วยซิงก์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา เช่น zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC) และกำมะถัน พร้อมทั้งสารช่วยความคงตัว

### 2.3.1 น้ำยางข้น (concentration latex)

นิยมใช้น้ำยางข้น 60% DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยการหมุนเหวี่ยง ซึ่งอาจจะมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียปริมาณต่ำ (LA-TZ, Low Ammonia Tetramethyl Thiuram Disulphide/Zinc Oxide) หรือแบบรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียปริมาณสูง (HA) ก็ได้

### 2.3.2 สารเคมีที่เป็นส่วนผสม

#### 2.3.2.1 สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer)

โดยทั่วไปเป็นต่างและสบู่ของกรดไขมัน ต่างที่ใช้จะใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะอนุมูลของโพแทสเซียมมีผลต่อการลดความคงตัวของน้ำยาง น้อยกว่าอนุมูลของโซเดียม ปริมาณการใช้ต่างจะอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้น้ำยางโดยการช่วยรักษาความเป็นต่างของน้ำยาง เพราะแอมโมเนียอาจจะหายไปบ้าง นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดคริมที่ผิวหน้ายางอีกด้วย ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 8-12 อะตอม เช่น โพแทสเซียมแคปริเลต (potassium caprylate,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$ ) และโพแทสเซียมลอเรต (potassium laurate,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$ ) สบู่ของกรดไขมันจะช่วยให้ยางมีความคงตัวเชิงกล (mechanical stability) ดีขึ้น แต่ไม่ควรใส่สารนี้มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดฟองได้ โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 0.2-0.4 ส่วนต่อน้ำยาง 100 ส่วน

#### 2.3.2.2 สารในระบบการคงรูป (Vulcanizing System)

ใช้ระบบการคงรูปที่ประกอบด้วยกำมะถันเป็นสารทำให้เกิดการคงรูป (vulcanizing agent) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้น (activator) และใช้สารเร่งปฏิกิริยากงรูป (accelerator) ชนิดเดียวหรือสองชนิดขึ้นไปสามารถจะใช้สารเร่งชนิดไวต่อปฏิกิริยา (ultra accelerator) เช่น กลุ่ม dithiocarbamate ได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องปัญหาการคงรูปก่อนกำหนด ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เกิดกับยางแห้ง



ปริมาณการใช้ซัลเฟอร์อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน แปรตามอัตราความเร็วที่จะเกิดการคงรูปและมอดุลัส (modulus) ของยางที่ต้องการ และขึ้นกับปริมาณสารอื่นๆ ที่เติมลงในน้ำยางด้วย หากต้องการให้ฟิล์มทนความร้อนได้ดีที่สุดต้องใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับมอดุลัสที่ต้องการด้วย ในการใช้ซัลเฟอร์ปริมาณต่ำต้องใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้มีอัตราเร็วของการเกิดยางคงรูป (rate of vulcanization) เพียงพอ สารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูปที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDEC) ปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3-1.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน ZDEC จะเพิ่มอัตราเร็วของการคงรูปขึ้นอย่างเด่นชัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ZDEC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการคงรูปก่อน (pre-vulcanization) ถ้าเก็บน้ำยางที่ผสม ZDEC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้น้ำยางที่ผสม ZDEC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ การใช้ ZDEC ในยางที่ไม่เติมสารตัวเติม (filler) จะได้ยางที่มีสมบัติความต้านทานแรงดึงจนขาดและความยาวที่ยางยืดจนขาดดีเยี่ยม มอดุลัสปานกลาง หากยางที่มีมอดุลัสสูงขึ้นไปใช้ ZDEC ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป กลุ่มไทอาโซล (thiazole) เช่น ซิงค์เมอแคปโทเบนซไทอาโซล (zinc mercaptobenzthiazole, ZMBT) การใช้ ZDEC ร่วมกับ ZMBT นอกจากทำให้น้ำยางมีมอดุลัสเพิ่มขึ้นแล้ว ยังมีผลในการเสริมประสิทธิภาพการคงรูปให้เร็วขึ้นมากกว่าการใช้สารแต่ละตัวตามลำพัง

สารกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตตัวอื่นๆ ที่นำมาใช้แทน ZDEC เพื่อให้ได้สมบัติบางอย่าง เช่น ซิงค์ไดบูทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dibutyl dithiocarbamate, ZBDC) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเร็วกว่า ZDEC จึงง่ายต่อการที่ยางจะเกิดการคงรูปขึ้นก่อนอย่างช้าๆ ขณะบ่มน้ำยางผสมสารเคมีไว้ที่อุณหภูมิห้อง

### 2.3.2.3 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามี 2 กลุ่มคือ

- 1) เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (Amine/Amine Derivatives)
- 2) ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol/ Phenol Derivatives)

กลุ่มแรกมีข้อเสีย คือ ทำให้น้ำยางเปื้อนติดสี (staining) ส่วนกลุ่มที่สองจะไม่ทำให้น้ำยางเปื้อนติดสี (non-staining) แต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่ากลุ่มแรก ความนิยมในการผลิตถุงมือยางนิยมใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลมากกว่า ปริมาณการใช้ประมาณ 1 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน สารทุกกลุ่มดังกล่าวข้างต้นเมื่อจะใช้ผสมกับน้ำยางจะต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลว

เช่น สารละลาย สารแขวนลอยหรืออิมัลชันเสียก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะใช้ว่าสามารถเตรียมให้อยู่สถานะใดได้

## 2.4 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง [7]

ข้อที่ควรนำมาพิจารณาในการผสมสารเคมีต่างๆ กับน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังผสมเสร็จแล้ว (latex compounded) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ สารเคมีที่ได้เตรียมให้อยู่ในสถานะต่างๆ คือ สารละลาย สารแขวนลอย หรืออิมัลชันแล้วนั้นควรต้องมีความตรวจสอบความเข้มข้น คือ ตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดพอเพียงหรือไม่ (ปกติควรมีความละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร) ตลอดจนถึงต้องตรวจสอบความเป็นกรด-ด่างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยควบคุมเกี่ยวกับสถานะความคงตัวของน้ำยางที่เสีย คือ จับตัวง่าย และสถานะความเป็นต่างมากเกินไป น้ำยางที่มีความคงตัวมากไปก็จะมีปัญหา กล่าวคือ น้ำยางไม่เกิดการเกาะแบบฟิมพ์ ขณะที่ถึงขั้นตอนที่ต้องการให้ยางจับฟิมพ์เป็นต้น

ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยาง

- 1) เติมน้ำลงในน้ำยางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ
- 2) เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว (Stabilizer)
- 3) เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป (Vulcanizing System)\*
- 4) เติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ
- 5) เติมสารสี (Pigment) (ถ้าต้องการ)

\*ควรเติม ZnO หลังสุดเพื่อถนบน้ำยางหนืด (Zinc Oxide Thickening)

สารแต่ละชนิดหรือแต่ละกลุ่มที่เติมลงไปในน้ำยางจะต้องเข้ากับน้ำยางได้เป็นอย่างดีก่อนแล้วจึงเติมสารตัวอื่นลงไป ในการกวนผสมน้ำยางจะใช้เครื่องกวนติดใบกวนใบใหญ่ ความเร็วของการกวนประมาณ 5-60 รอบ/นาที

ภาชนะที่จะใช้บรรจุน้ำยางผสมควรทำจากสแตนเลส หรือ epoxy-lined mild steel หรือ glass-fiber reinforced plastics เป็นต้น ไม่แนะนำให้ใช้ภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม และไม่ควรใช้ทองเหลืองในส่วนใดๆ ของภาชนะ ขนาดของภาชนะขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตและความถี่ของการผสมน้ำยาง รูปร่างของภาชนะควรเป็นทรงกระบอกเตี้ย คือ มีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความลึก ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการล้างทำความสะอาดและมีฝาปิดได้สนิท

ภาชนะบรรจุน้ำยาควรมียุโรปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำยาซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของการกวนภาชนะได้ในช่วง 5-60 รอบต่อนาที โบกวนควรมีขนาดใหญ่ (เช่น 3/4 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ) เพื่อให้การกวนมีประสิทธิภาพที่ความเร็วต่ำ แกนของใบพัดส่วนที่จะต้องสัมผัสกับน้ำยาควรทำจากสแตนเลส ถ้าหากภาชนะมีความลึก ควรมีใบพัดกวนมากกว่า 1 ชุด เพื่อให้กวนได้อย่างสม่ำเสมอ

ระยะเวลาที่จะกวนน้ำยาผสมกับสารเคมีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบกวนและปริมาณของน้ำยาผสม อย่างไรก็ตามควรกวนน้ำยาให้น้อยที่สุด แต่ขณะเดียวกันการกวนต้องพอเพียงที่จะทำให้น้ำยาผสมอย่างทั่วถึง ระยะเวลาการผสมอาจประมาณ 30-60 นาที ถ้าจะเก็บน้ำยาผสมไว้เพื่อการบ่ม หรือเพื่อการทำให้เกิดพรีวัลคาไนซ์ก็ควรกวนน้ำยาต่อไปซึ่งอาจกวนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ (5-10 รอบต่อนาที) หรือกวนเป็นครั้งคราวด้วยความเร็วสูงเล็กน้อย (20-30 รอบต่อนาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันสารเคมีต่าง ๆ ตกตะกอนลงก้นภาชนะ จุดประสงค์ของการกวนน้ำยาด้วยความเร็วต่ำและจำกัดระยะเวลา也是为了ป้องกันปัญหาน้ำยาผสมสูญเสียความคงตัว

ในขณะที่กวนผสมน้ำยาหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีฟองอากาศเกิดขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งฟองอากาศจะเกิดมากถ้ากวนน้ำยาด้วยความเร็วสูง การเติมสบู่ของกรดไขมันในปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ซึ่งยากแก่การกำจัดออกจากน้ำยา อย่างไรก็ตาม เมื่อนำน้ำยาไปใช้งานจะต้องกำจัดฟองอากาศออกเสียก่อน โดยปกติแล้วฟองอากาศมักจะลอยสู่ผิวหน้า เมื่อดังตั้งไว้ การกวนเบาๆ ขณะเก็บน้ำยาจะช่วยเร่งการลอยของฟองอากาศสู่ผิวหน้าน้ำยา แต่การกวนเร็วและมากเกินไปก็จะกลับทำให้ฟองอากาศลอยสู่ผิวหน้าช้าลง นอกจากนี้อัตราการเคลื่อนที่ของฟองอากาศสู่ผิวหน้ายังขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศและความหนืดของน้ำยา ถ้าฟองอากาศมีขนาดเล็กมากหรือถ้าน้ำยาที่มีความหนืดสูง อาจต้องกำจัดฟองอากาศโดยใช้ระบบสูญญากาศ โดยใช้วิธีลดความดันบรรยากาศที่เหนือผิวหน้าน้ำยาลงเหลือประมาณ 200 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งจะช่วยกำจัดฟองอากาศออกได้ภายในเวลา 12-16 ชั่วโมง การลดความดันดังกล่าวมีผลในการเพิ่มขนาดของฟองอากาศให้ลอยสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น

## 2.5 สารตัวเติม (Filler) [8]

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- 1) เพื่อลดต้นทุน
- 2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- 3) เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
- 4) ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- 5) เพิ่มอายุการใช้งานของยาง

### 2.5.1 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต

แบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1) สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมา  
บดให้ละเอียด

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ค

- แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม

- ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

2) สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน

3) สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตซิลิกา ไฮเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮเดรตอะลูมิเนียมออกไซด์

4) สารตัวเติมในรูปของเขม่า หรือผงฝุ่น เช่น เขม่าดำ ซิงก์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์

5) สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรืออบผิว ผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมดังกล่าวมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

## 2.5.2 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ

แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

### 2.5.2.1 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated Fillers)

ก. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ยางมีความต้านทานต่อการกระดองลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดเล็ก ประมาณ  $180-600 \text{ \AA}$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเขม่า เช่น เขม่าดำ และซิลิกา เป็นต้น

ข. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และคาโอลิน เป็นต้น

ค. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (diluent filler) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่  $100 \text{ \AA}$  ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แบงก์ลัม และแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ความแข็งแรง และ มอดุลัสดีขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปง่าย ลดการพองของยาง และช่วยลดต้นทุนการผลิต เพราะมีราคาถูก

นอกจากนี้แล้วสารตัวเติมประเภทที่มีลักษณะเป็นเม็ด ยังแบ่งได้เป็นชนิดที่มีสีดำและชนิดที่ไม่ใช่สีดำ ซึ่งเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดที่มีสีดำที่นิยมใช้กันมาก ส่วนสารตัวเติมชนิดที่ไม่เป็นสีดำที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ซิลิกา

### 2.5.2.2 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Fillers)

ก. แอสเบสทอส (Asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง



ข. ผงเยื่อไม้ (Wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งขึ้น และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง

### 2.5.2.3 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous Filler)

เรซินที่ใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำใหยางแข็งขึ้น มักจะใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น เขม่าดำ และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่จำกัด ถ้ามากเกินไปแล้วจะทำให้ผสมเข้ากับยางได้ยาก ยางจะแห้งและมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม จึงมีการเลือกใช้พวกเรซินเติมลงไปในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซินและฟีนอลิกเรซิน

## 2.6 เขม่าดำ (Carbon Black) [9]

สามารถจำแนกได้ 3 ชนิด ตามกระบวนการผลิต คือ

1) Channel black ได้จากการเผาถ่านหินธรรมชาติแล้วให้เปลวไฟกระทบกับแผ่นโลหะเย็น ทำให้เกิดเขม่าดำที่แผ่นโลหะ และสามารถควบคุมขนาดของเขม่าดำที่ออกมา โดยควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้ อุณหภูมิของเตาเผาและปริมาณอากาศที่ให้ออกมา ความดันของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้และอื่นๆ เขม่าดำที่ได้จะมีขนาดตั้งแต่  $100-400 \text{ \AA}$  แต่ที่ใช้กับยางควรมีขนาดตั้งแต่  $170 \text{ \AA}$  ขึ้นไป เนื่องจากเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่า  $150 \text{ \AA}$  จะผสมเข้ากับยางได้ยาก ส่วนยางที่ได้ก็จะแข็งและแปรรูปยาก นอกจากนี้แล้วเขม่าดำที่ได้จะมีสมบัติเป็นกรด ทำให้เวลาในการคงรูปของยางนานขึ้น

2) Furnace black ได้จากการนำถ่านหินหรือน้ำมันที่ได้จากโรงงานถ่านหินหรือโรงงานน้ำมัน มาเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ การผลิตเขม่าดำในปัจจุบันจะนิยมผลิตโดยวิธีนี้ ซึ่งสามารถเตรียมเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่  $140-900 \text{ \AA}$  เขม่าดำชนิดนี้มีสมบัติเป็นต่างดั่งนั้นยางที่ผสมด้วยเขม่าดำชนิดนี้จะคงรูปเร็วกว่ายางที่ผสมด้วย Channel black ถ้าใช้สารเร่งชนิดเดียวกัน

3) Thermal black ได้จากการแยกสลายถ่านหินธรรมชาติที่ใช้ความร้อนสูงถึง  $1300$  องศาเซลเซียส ในสภาพที่ปราศจากอากาศ เขม่าดำชนิดนี้มีขนาดอนุภาคใหญ่มาก และมีสมบัติเป็นกลาง

### 2.6.1 สมบัติของเขม่าดำ

ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ

1) ขนาดอนุภาค โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีขนาดเล็กจะทำให้ยางที่ผสมมีความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น การผสมเข้ากับยางก็ยากขึ้นด้วย

2) โครงสร้างของเขม่าดำ เป็นการจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำ คือ ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างที่สูง ถ้าการจัดตัวไม่ต่อกัน หรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างที่ต่ำ

เขม่าดำมีโครงสร้างต่างกันมากหรือน้อย ขึ้นกับกระบวนการเตรียมเขม่าดำนั้นๆ เช่น Thermal black มีโครงสร้างน้อยมาก หรือไม่มีเลย ส่วน Channel black มีโครงสร้างปานกลาง แต่ Furnace black ชนิดที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกสูง จะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง

3) ลักษณะผิว โดยการจัดตัวของอะตอมคาร์บอนในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น Thermal black จะมีการจับของอะตอมคาร์บอนเรียงขนานกันอย่างมีระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบเท่า และยิ่งเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้น การจัดตัวของอะตอมคาร์บอนก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้น บางครั้งลักษณะของอะตอมคาร์บอนที่ผิวจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเอง จนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบทำให้เกาะติดกับยางไม่ดี การเสริมประสิทธิภาพก็จะต่ำ แต่ถ้าอะตอมคาร์บอนมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้นและเพิ่มมากขึ้น ถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะทำการผสม

4) สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 90 - 99 % โดยที่เหลือเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเขม่าดำด้วย ปริมาณของกำมะถันขึ้นกับปริมาณของกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ทำเขม่าดำ สารเคมีพวกไฮโดรเจนออกซิเจน และกำมะถันนี้ ทำให้ pH ของเขม่าดำต่างกัน คือ Channel Black มีออกซิเจนสูง pH เป็นกรด ส่วน Furnace Black มีออกซิเจนน้อยกว่า 1% จะมี pH เป็นกลางหรือเป็นด่าง ซึ่งความ

เป็นกรดหรือด่างของเขม่าดำนี้มีผลต่อการคงรูป เช่น การใช้กำมะถันในการคงรูปอย่างที่มีเขม่าดำ pH เป็นด่างจะคงรูปได้เร็วกว่าเขม่าดำที่มี pH เป็นกรด เป็นต้น

5) ความเป็นรูปพรุนของเขม่าดำ ผิวของเขม่าดำไม่เรียบเนื่องจากในการเตรียมเขม่าดำ ทำโดยให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดเป็นรูปพรุนขึ้นในอนุภาคของเขม่าดำได้ การมีรูปพรุนมากหรือน้อยในเขม่าดำจะเป็นเหตุทำให้การคงรูปเร็วหรือช้าได้ เนื่องจากรูปพรุนเหล่านี้จะดูดเอาสารตัวเร่งเข้าไป ทำให้การคงรูปช้าลงได้ และพบว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนมากมีจำนวนอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย ดังนั้นถ้าใช้เขม่าดำจำนวนเท่าๆ กันโดยน้ำหนักใส่ในยาง เขม่าดำที่มีรูปพรุนมากจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย เนื่องจากมีจำนวนอนุภาคมากกว่า

#### 2.6.2 อิทธิพลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางคงรูป

สมบัติของยางที่คงรูป ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และการกระดอนของยาง จะขึ้นกับขนาดของอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนความแข็งของยางขึ้นกับโครงสร้างมากกว่าขนาดอนุภาค

1) อิทธิพลของเขม่าดำต่อความต้านทานแรงดึง คือ เขม่าดำส่วนใหญ่ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น

2) อิทธิพลของเขม่าดำต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ คือ ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำอย่างมาก ขนาดอนุภาคยิ่งเล็กทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอยิ่งสูง

3) อิทธิพลของเขม่าดำต่อความแข็งของยาง คือ ยางที่ใส่เขม่าดำจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำ และถ้าเขม่าดำยังมีขนาดอนุภาคเล็ก ความแข็งก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นซึ่งปริมาณของเขม่าดำที่ทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นในยางแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน

4) อิทธิพลของเขม่าดำต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด คือ เขม่าดำมีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดคล้ายกับความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยเขม่าดำจะทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น จนถึงจุดหนึ่งเมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลง และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะขึ้นกับขนาดอนุภาค ถ้าขนาดเล็กจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง

5) อิทธิพลของเขม่าดำต่อการกระดอนของยาง คือ โดยทั่วไปถ้าใส่สารตัวเติมลงไปในยางพบว่า ทำให้การกระดอนของยางลดลง ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นเท่าใด การกระดอนก็จะยิ่งลดลง โดยเฉพาะถ้าสารตัวเติมมีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้การกระดอนลดลง

จากงานวิจัยของ Vinod [10] และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ผสมผงอลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำจะมีค่า LOI เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งค่า LOI จะใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่ผสมซิลิกาและเคย์

## 2.7 ซิลิกา (Silica) [11]

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) และอาจมีน้ำในผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ (nonblack filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้กันมาก เพราะเป็นสารตัวเติมชนิดที่เสริมความแข็งแรงให้กับยาง มักใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาวหรือสีต่าง ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) ซิลิกาบด (Ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบด หรือทรายบดละเอียด มีอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช ( $75,000 \text{ \AA}$ ) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง แต่มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางทนความร้อน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่จึงทำให้สมบัติไม่ดีและพื้นที่ผิวน้อย การดูดซึมสารเร่งไว้ที่ผิวจะมีน้อย ดังนั้นซิลิกาบดจึงไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูป

2) ซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอน (Precipitated silica) โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกาออกมาล้างและทำให้แห้งจะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำอยู่ในอนุภาค ซิลิกาที่ได้มีขนาดตั้งแต่  $100\text{-}400\text{ \AA}$

ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง การฉีกขาด และการสึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลักษณะโปร่งแสงและมีสีขาว

3) ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาไหม้ (furnace silica) ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiCl}_4$  กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา มีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงเสริมความแข็งแรงได้ดีมาก ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง การฉีกขาดและการสึกหรอ ซิลิกาชนิดนี้มีราคาแพงมากมักใช้เพื่อวัตถุประสงค์พิเศษกับยางซิลิโคน เป็นต้น

ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนและการเผาไหม้ เมื่อใช้กับยางจะก่อให้เกิดการชะลอกการคงรูป เนื่องจากผิวหน้าที่ไวต่อปฏิกิริยาของอนุภาคซิลิกา จะดูดซึมสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป หรือใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูป ได้แก่ พวกไกลคอล เช่น DEG และ PEG เป็นต้น หรือพวกเอมีน เช่น triethanolamine เป็นต้น โดยจะใช้ประมาณ 6% ของปริมาณซิลิกาในยาง

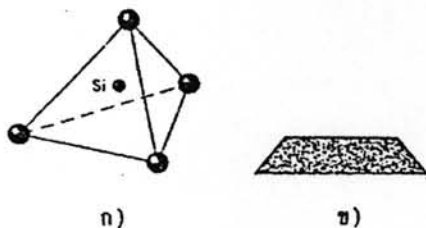
โดยงานวิจัยของ Fu [12] และคณะ ได้ศึกษาการผสมซิลิกาลงไปในยางอีวีเอ ร่วมกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อใส่ซิลิกามากขึ้นทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และ

## 2.8 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [13]

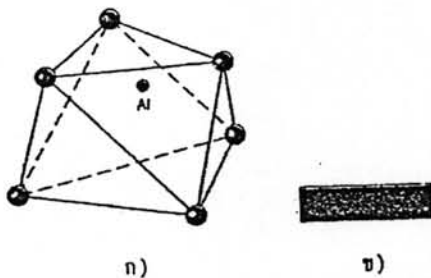
มอนต์มอริลโลไนต์เป็นอนุภาคดินเหนียว (clay) ประเภทหนึ่ง ดินเหนียว (clay) มีขนาดเล็กกว่า 21 ไมครอน ( $\times 10^{-6}$  m) และมีสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้าเคมี (electrochemically very active) ซึ่งจะมีปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลงตามลำดับแร่ธาตุดินเหนียวหลักประกอบด้วยไฮดรอลอะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrated aluminum silicate) และเหล็ก (iron) และแมกนีเซียม (magnesium) กับรูปแบบแร่ธาตุต่าง (alkaline minerals) เป็นส่วนประกอบหลัก แร่ธาตุเหล่านี้จะไม่ละลายในกรด (acid) มีลักษณะซึมซับน้ำได้ดี ยืดหยุ่น (elastic) เมื่อเปียก และยึดน้ำได้ดี (water retentive) มีความเชื่อมแน่น (coherent) เมื่อแห้งรูปลักษณะแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นผลึก (crystalline) เป็นแผ่น (sheetlike) หรือเป็นโครงสร้างเรียงชั้น (layer) ของแร่ 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกา (silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (alumina sheet)

แผ่นซิลิกา (silica sheet) เป็นรูปเตตระฮีดรอน (tetrahedron) ประกอบด้วยระนาบสามเหลี่ยม 4 ด้าน มีอะตอมออกซิเจน (oxygen atom) อยู่ที่จุดยอดระยะห่างเท่ากัน และอะตอมซิลิกา (silica atom) อยู่ภายในโดยมีระยะห่างจากอะตอมออกซิเจนเท่ากัน แผ่นซิลิกาแต่ละหน่วยดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะรวมซ้อนกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) และเป็นโครงผลึกของแร่ (lattice of mineral) ส่วนแผ่นอะลูมินา (alumina) เป็นแถวเรียงสองของอะลูมินาอยู่ตรงกลางรูปออกตะฮีดรอน (octahedron) ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนไฮดรอกซิล (oxygen atom hydroxyl) (OH) ในแนวตั้งในแถวสลับกันตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3





รูปที่ 2.2 ก) หน่วยแผ่นซิลิการูปทรงแห้วสี่ดรอน (silica tetrahedron) ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า [13]



รูปที่ 2.3 ก) อะลูมินารูปออกตะห้วดรอน (alumina octahedron) ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า [13]

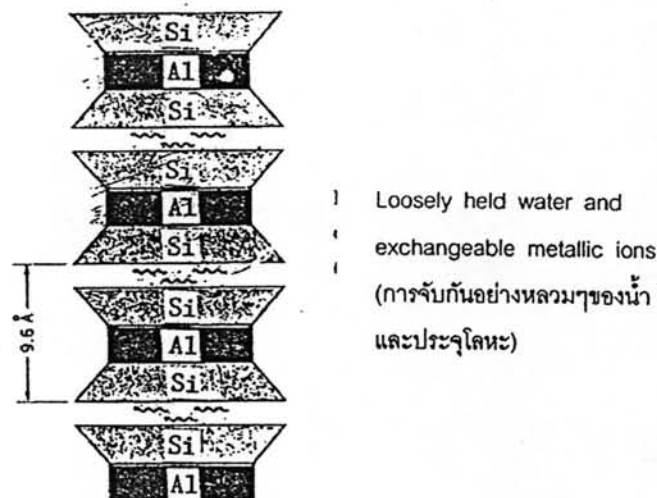
การศึกษาแร่ธาตุดินเหนียวในปัจจุบันใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ที่มีอัตราส่วนขยายสูง การวิเคราะห์ด้วยวิธีดีทีเอ (DTA, differential thermal analysis) และวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (x-ray) ซึ่งด้วยเครื่องมืออุปกรณ์สมัยใหม่เหล่านี้ทำให้สามารถศึกษาแร่ธาตุดินเหนียวได้อย่างกว้างขวาง แร่ธาตุดินเหนียว โดยปกติแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักซึ่งจะแยกตามลักษณะโครงสร้างการจับตัว (lattice structure) ของแร่ธาตุประกอบด้วยสมบัติของอนุภาคดินเหนียวเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต

คุณสมบัติต่างๆ	ชนิดของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต		
	Montmorillonite	Kaolinite	Illite
ขนาดผลึก (micron)	0.01-1.0	0.1-5.0	0.1-2.0
รูปร่าง	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบาง รูปหกเหลี่ยม	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	700-800	5.0-20.0	
ความยืดหยุ่น, ความเหนียว	สูง	ต่ำ	ปานกลาง
ความสามารถในการยึดและหดตัว	สูง	ต่ำ	ปานกลาง
ความสามารถในการแลกเปลี่ยน	80-100	3.0-15.0	15.0-40.0

สูตรเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ คือ  $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$  เป็นส่วนประกอบของแผ่นอะลูมินารูปออกตะฮีดรอน (octahedron) ระหว่างแผ่นซิลิการูปออกตะฮีดรอน (octahedron) 2 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การจับตัวกันระหว่างแผ่นแร่ธาตุที่ค่อนข้างหลวม ทำให้เป็นแร่ธาตุที่ไม่อยู่ตัว (unstable) โดยเฉพาะเมื่อเปียกโดยมีลักษณะดูดจับน้ำได้มาก หลังจากนั้นจะพองตัว (swell) และขยายตัวสูง (expansion) ในทางตรงกันข้ามเมื่อแห้งจะหดตัวมากซึ่งจะเห็นรอยแตกแยกอย่างชัดเจน

มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) เกิดจากการผุกร่อนของแร่ธาตุเฟอร์โรแมกนีเซียม (ferromagnesium minerals) หรือเรียกว่า เฟลเลอร์สเอิร์ธ (fellers earth) และจะมีแร่ธาตุย่อยอีก 2 ตัว คือ ไบเดลไลต์ (beidellite) และนอนไทรท์ (nontrite) จะมีส่วนผสมอยู่ในดินเป็นส่วนใหญ่ ที่รู้จักกันแพร่หลาย คือ ดินเบนโตไนต์ (bentonite) ที่มีส่วนผสมหลักของมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) มีคุณสมบัติพิเศษ จะพองตัว (swell) หลายเท่า เมื่อนำมาผสมกับน้ำ มีค่าพิกัดเหลว (liquid limit) สูงกว่า 500% ทำให้มีสมบัติพิเศษที่นำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น ผสมน้ำนำไปอัด (grout) ในชั้นดินได้ฐานเขื่อนให้ที่บ้น้ำ นำมาผสมน้ำเป็นน้ำโคลนเจาะดิน (mud-slurry) เจาะบ่อบาดาล เจาะบ่อน้ำมัน เจาะเสาเข็มเจาะ (bore pile) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของน้ำโคลนเบนโตไนต์ (bentonite) จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเล็กน้อย และจะเคลือบผนังบ่อดิน (ทราย) ไม่ให้น้ำซึมออกจากบ่อดินได้เร็วสามารถเวียนน้ำโคลนกลับขึ้นมาใช้ใหม่ได้และน้ำโคลนจะทำให้เกิดแรงดันทดแทนดินที่ขุดออกไปจากหลุมดินผนังไม่ให้ดินพัง ในขณะที่ใช้เครื่องมือขุดเจาะลงไปสามารถทำงานให้ระดับน้ำโคลนได้ตามปกติ เทคนิคนี้ทำได้ ด้วยวิธีเทได้น้ำ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

### 2.8.1.1 ดินเบนโตไนต์

ดินเบนโตไนต์เป็นดินชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในงานหลายๆ ด้าน อาทิเช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือใช้เป็นสารตัวเติมในการเพิ่มปริมาณเนื้อสารดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ดินเบนโตไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดีและสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ จากสมบัติของดินเบนโตไนต์นี้ทำให้เราสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นออร์กาโนเคลย์ (organoclay) ที่ใช้เป็นสารตัวเติมลงไปในการประกอบพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามสมบัติของดินก็ยิ่งแตกต่างกันไป ในเรื่องของความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์

ดินเบนโตไนต์ที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม

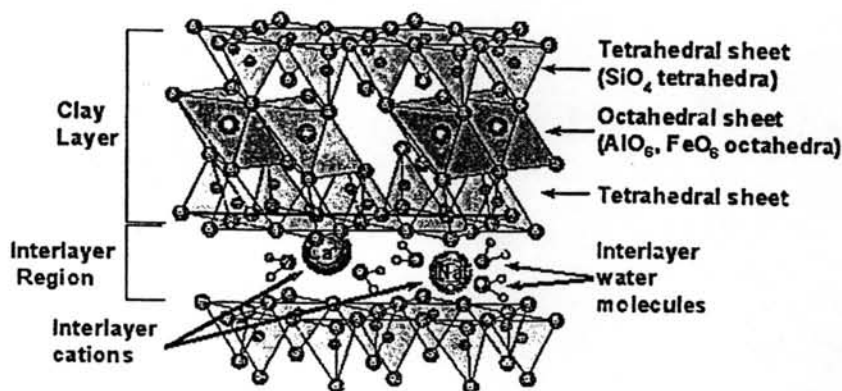
- 1) Natural Sodium Bentonite หรือ Sodium Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน  $\text{Na}^+$
- 2) Natural Calcium Bentonite หรือ Calcium Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน  $\text{Ca}^{+2}$
- 3) Sodium Activated Bentonite หรือ Sodium Activated Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยนประจุจาก  $\text{Ca}^{+2}$  กลายเป็น  $\text{Na}^+$

โซเดียมเบนโตไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถพองตัวได้มากถึง 15-20 เท่าจากปริมาตรเดิม มีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่นและกันการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลนและใช้ขุดยาหรือแนวของเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียมและแคลเซียมแมกนีเซียมเบนโตไนต์มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโตไนต์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้เป็นแอคทีเวตเตดเคลย์ (activated clays) สำหรับให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซดาไฟโดยเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโตไนต์

### 2.8.1.2 แรมมอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของแผ่นอะลูมิเนียม โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางจะเป็นชั้นของอะลูมินา ที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกา เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2:1 phyllosilicate แต่ละชั้นมีความบางมาก ซึ่งมีความหนาน้อย

กว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 1000 เท่า ทำให้มีค่า aspect ratio สูงเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่าแกลเลอรี (gallery) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

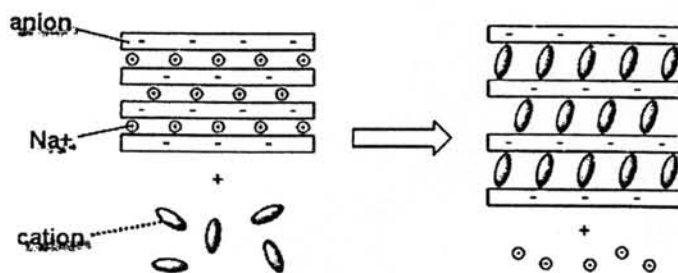
พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) มีประจุลบ แต่ชั้นเหล่านี้สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และ แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) จะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินเหนียวกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดินเหนียว

มอนต์มอริลโลไนต์ โดยธรรมชาติจะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับพอลิเมอร์ได้ยากดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (modified montmorillonite) ก่อนที่จะนำไปผสมเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อที่จะทำให้ชั้นแผ่นโครงสร้างของเคลย์เกิดการแยกชั้น สามารถเข้าร่วมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติกซึ่งจะทำให้สมบัติบางประการของพลาสติกดียิ่งขึ้น เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ความทนความร้อน (heat resistance) เป็นต้น ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่นคือโตโยต้า (Toyota) โดยการนำเอามอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับไนลอน 6 แล้วพบว่าทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นกว่าการใช้ไนลอนเพียงอย่างเดียว

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือการทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) โดยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (organic cation) เช่น เกลือควอเทอร์นารีของแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (phosphonium salt) จะสามารถเข้าแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เรียกว่าออร์กาโนเคลย์ (organoclay) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

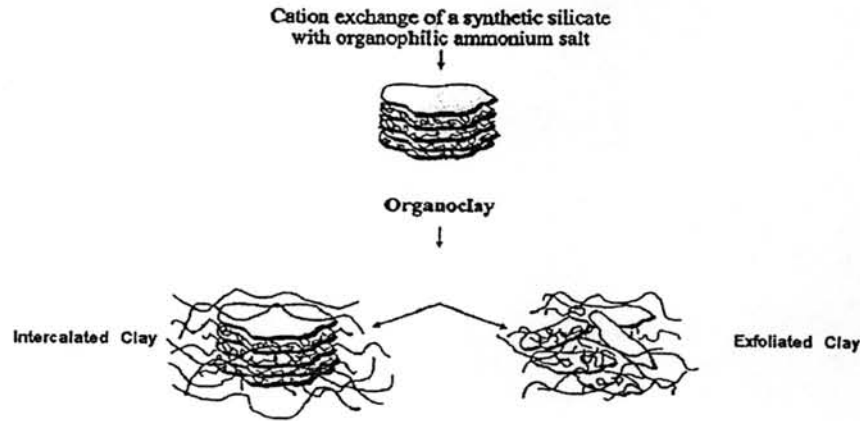


รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแคทไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นของดินกับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน

ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน (quaternary ammonium ion) ซึ่งมีสายโซ่อัลคิลที่ยาว (long alkyl chain) ซึ่งเป็นส่วนที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อเข้าไปแทนที่  $\text{Na}^+$  ที่อยู่ระหว่างชั้นของดินจะทำให้ได้ออร์กาโนเคลย์ที่มีสมบัติเข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดี

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกทำให้ช่องแกลเลอรี (gallery) ขยายออก นั่นคือระยะห่างระหว่างชั้นของดินจะเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ดินเกิดการพองตัว เรียกออร์กาโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่าการแยกตัวแบบแทรกสอด (intercalated clay) แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการพองตัวมากจนทำให้เกิดการแยกชั้นของดินออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะเรียกว่า การแยกตัวออกจากกัน (exfoliated clay) ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ โดยจะก่อให้เกิดการเสริมแรงในระดับโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.8 ชนิดของออร์กาโนเคลย์

จากงานวิจัย Szep [14] และคณะ ได้ศึกษาผลของมอนอมอริลโลไนต์ในยางอีวีเอ พบว่าเมื่อผสมมอนอมอริลโลไนต์ลงไปทำให้ LOI มีค่า 20 แต่เมื่อผสมมอนอมอริลโลไนต์กับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ค่า LOI สูงขึ้นมากเป็น 34

## 2.9 สารหน่วงไฟ [15]

สารหน่วงไฟมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสารหน่วงไฟนี้ช่วยให้เข้าใจความสามารถในการทำงานของสารหน่วงไฟ ทำให้สามารถเลือกใช้สารหน่วงไฟตรงกับวัตถุประสงค์ที่ ดังต่อไปนี้

### 2.9.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ

#### 2.9.1.1 สารหน่วงไฟเชิงเติม (Additive Flame Retardants)

สารหน่วงไฟชนิดนี้เป็นลักษณะของสารเติมแต่ง (additives) โดยสารหน่วงไฟจะเคลือบอยู่บนบริเวณผิวหน้าวัสดุ ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ตัวอย่าง เช่น เกลืออนินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แอนติโมนีคลอไรด์ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซิงก์คลอไรด์ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นต้น ซึ่งโดยปกติแล้วเกลืออนินทรีย์เหล่านี้จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยเพิ่มถ่านคาร์บอนจากการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการดีไฮเดรชัน แต่สารหน่วงไฟเชิงเติมนี้มีข้อเสียคือ สามารถเกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ง่ายกว่าสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา เมื่อเวลาผ่านไปสมบัติการหน่วงไฟจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ อาจแก้ปัญหาได้โดยการใช้สารหน่วงไฟที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น

### 2.9.1.2 สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา (Reactive flame retardants)

สารหน่วงไฟชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการตกแต่งหน่วงไฟ โดยนำสารหน่วงไฟมาทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส เพื่อให้เซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟบนสายโซ่โมเลกุลโดยตรง ซึ่งการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีชนิดต่างๆจะทำให้ขนาดของสายโซ่โมเลกุล และหมู่ไฮดรอกซีที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 ของหน่วยซ้ำของกลูโคไพราโนส เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮดรอกซีเซลลูโลสออกแล้วเกิดปฏิกิริยากับอะลิฟาติกไฮดรอกซี จึงทำได้โดยการเอสเทอร์ไฟต์ด้วยสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ ซึ่งจะให้อนุพันธ์ของเซลลูโลส ตัวอย่างการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น การไนเตรชัน อะซิทิลเลชัน ฟอสฟอริเลชัน และซัลเฟชัน สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยานี้จะทำให้วัสดุมีสมบัติการหน่วงไฟที่คงทน เกิดการระเหย หรือแยกตัวออกจากวัสดุได้ยากแต่จะมีต้นทุนสูงในส่วนของราคาสารหน่วงไฟ และเครื่องมือเพิ่มเติมที่ต้องใช้ในกระบวนการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ตัวอย่างสารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยาประเภทมีความคงทนสูง ได้แก่ Pyrovatex, Proban (THPC และยูเรีย) เป็นต้น

### 2.9.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ

การทำงานของสารหน่วงไฟจะไปขัดขวางวงจรการเผาไหม้ ไม่ให้ดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เปลวไฟลุกไหม้ช้าลงแล้วดับในที่สุด สามารถจำแนกสารหน่วงไฟได้จากกลไกการหน่วงไฟ ดังนี้

#### 2.9.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ

การขัดขวางทางกายภาพประกอบไปด้วย

- การทำให้ระบบเย็นตัวลง เนื่องจากการสลายตัวของสารหน่วงไฟเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งใช้ความร้อนบางส่วนไปทำให้เกิดการหลอม หรือระเหิด ทำให้พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าลดลง เส้นใยได้รับความร้อนน้อยลงระบบจึงมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสายโซ่ได้ หรือสารหน่วงไฟสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดชัน เกิดน้ำระเหยออกมา ทำให้พื้นผิววัสดุเย็นลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น อะลูมินาไตรไฮเดรต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

- การทำให้เกิดชั้นเคลือบบนพื้นผิววัสดุ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้รวมถึงเกลืออนินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเส้นใยได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเผาไหม้จะทำให้สารหน่วง

ไฟเกิดการหลอมละลายมาปกคลุมบริเวณผิวหนังของเส้นใย ซึ่งจะช่วยป้องกันให้แก๊สออกซิเจนมาสัมผัสกับเส้นใย และกักขังไอระเหยที่สามารรถถูกติดไฟที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยไปสู่ผิวหนังของเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่เกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่เกิดการติดไฟไปยังจุดอื่นๆ ทำให้เปลวไฟที่เกิดการลุกลามต่อ ซึ่งการเคลือบของสารบนผิวหนังเส้นใยนี้จะต้องเสถียรจนถึงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น บอริก-บอแรกซ์ ซิลิเกต ฟอสเฟต และพอลิฟอสเฟต

- การปลดปล่อยแก๊สที่ไม่ติดไฟ สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อติดไฟแล้วจะสลายตัวใช้แก๊สที่ติดไฟยาก หรือไม่ติดไฟ เช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สแอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ และไอน้ำ เป็นต้น จะทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของเส้นใยซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย เจือจางลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่าจุดที่ติดไฟได้ และทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเส้นใยลดลง เส้นใยไม่สามารถเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมโบคาร์บอเนต แอมโมเนียมเฮไลด์ ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลฟาเมต และฟอสเฟต เป็นต้น

#### 2.9.2.2 การขัดขวางทางเคมี

การขัดขวางทางเคมีประกอบไปด้วย

- วัฏภาคแก๊ส (gas phase หรือ vapor phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้เมื่อโดนความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระที่สามารถไปจับกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใยได้ เช่น  $H^\circ$ ,  $OH^\circ$  กลายเป็นแก๊สซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการขยายตัวของสายโซ่อนุมูลอิสระสิ้นสุดลง (free radical chain propagation) การลุกไหม้ก็จะสิ้นสุดลง ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่น สารประกอบฮาโลเจน และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฮาโลเจน และแอนติ-โมนีออกไซด์

- วัฏภาคของแข็ง (solid phase หรือ condensed phase) สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ทำหน้าที่เร่งให้เส้นใยเกิดการสลายเร็วขึ้นเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟหรือถ่านคาร์บอน เพื่อให้ส่วนที่มีการลุกติดไฟกับส่วนที่ยังไม่ลุกติดไฟแยกห่างออกจากกันมากขึ้น และในที่สุด ไฟก็ไม่สามารถลุกลามไปถึงส่วนนั้นได้ อีกทางหนึ่งจะก่อให้เกิดถ่านคาร์บอน โดยเร่งให้วัสดุทำปฏิกิริยากับกรดลิวอิสผ่านคาร์บอนเนียม ไอออนเกิดการดีไฮเดรชันของเส้นใยแล้วเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห และถ่านคาร์บอนนี้ จะช่วยในการหน่วงไฟโดยการเกิดขึ้นเป็นชั้นถ่านคาร์บอนมาเคลือบเส้นใยไว้ ผิวหน้า

วัสดุจะไม่สัมผัสกับความร้อน ตัวอย่างของสารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ เช่นสารประกอบฟอสฟอรัส และการทำงานของสารหน่วงไฟที่เป็นสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

### 2.9.3 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี

ความหลากหลายในหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารหน่วงไฟชนิดต่างๆ ทำให้สารหน่วงไฟแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว อีกทั้งสมบัติของสารหน่วงไฟอาจเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุที่นำไปผสม อย่างไรก็ตามสามารถจำแนกสารหน่วงไฟตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

#### 2.9.3.1 สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์

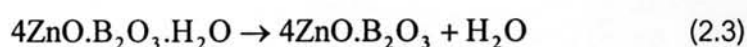
สารหน่วงไฟประเภทนี้ ที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ผสมลงไปในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 180-200 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการแตกตัวปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการสลายน้ำออก เกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แสดงดังสมการที่ 2.2 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และยังช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุ ส่วนการเกิดอะลูมิเนียมออกไซด์ ช่วยทำให้เกิดขารซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ และมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้



งานวิจัยของ A. Castrovinci [16] และคณะ ได้ศึกษาถึงผลของการเติม ammonium polyphosphate (APP) และ aluminum trihydroxide (ATH) เพื่อเพิ่มความสามารถในการทนไฟของยาง SBR พบว่าเมื่อเติม APP และ ATH ในปริมาณ 10-12% โดยน้ำหนัก ลงไปในยาง SBR จะทำให้อย่างมีความสามารถในการต้านทานการติดไฟที่สูงสุด แต่เมื่อเติม APP และ ATH ในปริมาณ 60 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ยางมีความสามารถในการหน่วงไฟลดน้อยลงเมื่อเทียบกับการเติม APP และ ATH ในปริมาณ 12 % โดยน้ำหนัก โดยงานวิจัย Zhang [17] และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงภายในของ EVA/ATH พบว่าเพิ่มใส่ ATH เพิ่มขึ้นทำให้ค่า LOI เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และ Nachtigall [18] และคณะ ได้ศึกษาโมเลกุลของสารหน่วงไฟในระดับไมโคร พบว่าเมื่อใส่ ATH ลงไปในพอลิโพรเพนีนจะทำให้มีค่า LOI เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

### 2.9.3.2 สารหน่วงไฟประเภทบอเรต

สารหน่วงไฟในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้กันคือซิงก์บอเรต (zinc borate) โดยสามารถช่วยในการหน่วงไฟและลดควันที่เกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตกแต่งหน่วงไฟในสิ่งทอหรือผสมลงไปในพลาสติก เมื่อสารหน่วงไฟชนิดนี้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 290-450 องศาเซลเซียส ซิงก์บอเรตจะเกิดการแตกตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดูดความร้อนบางส่วนไปใช้ในการสลายน้ำออก แสดงดังสมการที่ 2.3 ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้จะไปเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย และยังช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าใกล้พื้นผิวของวัสดุและยังทำให้เกิดขารซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนให้แก่พื้นผิวของวัสดุ โดยมีสมบัติในการลดควันที่เกิดจากการเผาไหม้



Carpentier [19] และคณะ ได้ศึกษาการเผาไหม้ของ ethylene vinyl acetate (EVA) ที่ผสมด้วย magnesium hydroxide และ zinc borate พบว่าเมื่อผสม EVA กับ magnesium hydroxide และ zinc borate ในอัตราส่วน 40:57:3 ตามลำดับ จะทำให้มีค่า LOI สูงที่สุด คือ 43 แต่เมื่อใส่ zinc borate จำนวนที่มากขึ้นทำให้ค่า LOI มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ และงานวิจัยของ Ramazani [20] และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการหน่วงไฟและเชิงกลของ zinc borate กับ ATH ในโพรเพรีน พบว่าเมื่อใส่ zinc borate กับ ATH ลงไปทำให้ได้ค่า LOI สูงที่สุด

### 2.9.3.3 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ

ฮาโลเจนนั้นประกอบด้วยธาตุ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ ฟลูออรีน คลอรีน โบรมีน และ ไอโอดีน แต่ที่นิยมใช้เป็นสารหน่วงไฟ คือ คลอรีนและโบรมีน เนื่องจากในกรณีของฟลูออรีนนั้น พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นแข็งแรงเกินไป จึงไม่สามารถแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระได้ ส่วนในกรณีของไอโอดีน พันธะที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนนั้นอ่อนเกินไปทำให้แตกตัวอย่างรวดเร็วด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย เช่นการโดนแสง และยังส่งผลให้สมบัติในการหน่วงไฟสูญเสียไป สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจนนี้ สามารถปลดปล่อยอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจนไอออนเข้าสู่บริเวณที่เกิดการลุกไหม้ โดยบริเวณนี้จะมีอนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระอื่นๆ ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 และ 2.5





เมื่ออนุมูลอิสระของธาตุไฮโดรเจนนี้มาพบกับอนุมูลอิสระของธาตุฮาโลเจน จะทำให้เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ลดลง ดังนั้นสารประกอบฮาโลเจนสามารถเรียกได้ว่าเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ (free radical scavengers) ทำให้สามารถลดอัตราการลุกลามของการเผาไหม้ แสดงดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.9



โดยที่ RX คือ สารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ X (คือ Cl หรือ Br) จากนั้นอนุมูลอิสระ X ทำปฏิกิริยากับสารพอลิเมอร์ RH เช่น เซลลูโลส เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนเฮไลด์ (HCl หรือ HBr) ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระ HO• และ H•

ถ้าเปรียบเทียบสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากโบรมีนจับกับคาร์บอนด้วยพันธะที่อ่อนกว่า ทำให้เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว สารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนโบรมิเด (HBr) ในปริมาณความเข้มข้นที่สูง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้ คือ โบรมิเนตอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (brominated aromatic hydrocarbon) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพดี เมื่อวงแหวนอะโรมาติกถูกแทนที่ทุกตำแหน่ง เช่น เดคาโบโรโมไดฟีนิลออกไซด์ (decabromodiphenyl oxide)

Li Yu [21] และคณะ ได้ศึกษาผลของสารหน่วงไฟ decabromodiphenyl oxide และ antimony trioxide ใน ethylene-propylene-diene copolymer/polypropylene blends พบว่า เมื่อใส่ decabromodiphenyl oxide และ antimony trioxide มากขึ้นทำให้ค่า LOI มากขึ้น แต่เมื่อนำมาผสมกันทำให้ค่า LOI สูงมากขึ้นกว่าเดิมอีก เนื่องจาก antimony trioxide จะไปจับกับหมู่ฮาโลเจนแล้วจะปลดปล่อยน้ำออกมาเพื่อลดความร้อนให้ลดลงและงานวิจัย Ramesan [22] ได้ศึกษาผลทางความร้อน ความสามารถในการติดไฟและการทนทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่ผสม dichlorocarbene modified styrene butadiene rubber (DCSBR) พบว่าเมื่อปริมาณ DCSBR มากขึ้นทำให้ค่า LOI มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ทำให้ค่าความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดลดลง

แต่ในบางกรณีที่ต้องการความคงทนต่อแสง สารหน่วงไฟที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกแสง สารหน่วงไฟประเภทนี้ที่นิยมใช้คือ คลอรีเนตพาราฟิน (chlorinated paraffin) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ถูกนำมาทำปฏิกิริยากับคลอรีนเพื่อให้มีธาตุคลอรีนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยมีส่วนประกอบของคลอรีน อยู่ประมาณ 30-70 % โดยน้ำหนัก สารหน่วงไฟชนิดนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของเรซินที่ถูกนำไปผสมให้พลาสติกใสต์มากขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งด้วยสารหน่วงไฟประเภทนี้เมื่อเกิดการลุกไหม้ จะให้ควันพิษที่เป็นอันตราย และเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ โดยเฉพาะสารหน่วงไฟที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จึงมีการห้ามตกแต่งหน่วงไฟด้วยสารหน่วงไฟชนิดนี้

#### 2.9.3.4 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้มีประสิทธิภาพในการหน่วงไฟกับวัสดุที่ปริมาณออกซิเจนสูง เช่น เซลลูโลส อนุพันธ์ของเซลลูโลส และพลาสติกที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน สารหน่วงไฟประเภทนี้มีทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และธาตุ (ฟอสฟอรัสแดง) เช่น ฟอสฟีน ฟอสฟีนออกไซด์ สารประกอบฟอสฟอเนียม ฟอสฟอเนต ฟอสไฟต์ และฟอสเฟต สามารถหน่วงไฟได้ทั้ง Vapor phase และ Condensed phase ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้จะทำปฏิกิริยาใน Vapor phase ระเหยกลายเป็นไอ เกิดในรูปอนุมูลอิสระ PO แล้วเข้าขัดขวางการลุกไหม้โดยการจับอนุมูลอิสระที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (HO• และ H•) ดังสมการที่ 2.10 ถึง 2.13



ส่วนใน condensed phase สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวไปเป็นกรดฟอสฟอริก หรือกรดพอลิฟอสฟอริก ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปเอสเทอร์ฟายหมู่คาร์บอกซิลของเซลลูโลส เกิดชั้นของเหลวหนืดปกคลุมผิวของวัสดุเพื่อป้องกันไม่ให้เปลวไฟและแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเซลลูโลส และกรดที่เกิดขึ้นนี้ยังเป็นตัวทำให้เกิดการสลายน้ำ (dehydrating agent) โดยทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซีคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของแอนไฮโดรกลูโคส เพื่อสร้างชั้นของซาร์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะช่วยเจือจางแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย

ตัวอย่างของสารประกอบของสารหน่วงไฟประเภทนี้ ได้แก่ ฟอสเฟตเอสเทอร์ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยฟอสเฟตเป็นหลัก แล้วเกิดพันธะกับหมู่อัลคิล หรือเอริล สารหน่วงไฟที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ ไอโซโพรพิลไตรฟีนิลฟอสเฟต (Isopropyltriphenylphosphate) อัลคิลไดเอริลฟอสเฟต (alkyl diarylphosphate) ซึ่งมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) นิยมใช้ในการตกแต่งหน่วงไฟพอลิไวนิลคลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก แต่เนื่องจากกรดฟอสฟอริก มีการกัดกร่อนสูง จึงนิยมใช้ในรูปแบบที่เป็นเกลือ เช่น แอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต

งานวิจัยของ A.R. Horrocks [23] และคณะ เป็นการพัฒนาสารหน่วงไฟในสิ่งทอ พบว่า ใน polyamide 6.6 เมื่อใส่สารหน่วงไฟไปมากขึ้นเท่าไรจะทำให้ค่า LOI มากขึ้นด้วย แต่ค่า LOI ที่สูงที่สุดในการทดลอง คือ 26 ที่ปริมาณของ nanoclay ผสมกับ ammonium polyphosphate ที่ 30 % โดยงานวิจัยของ Song [24] และคณะ ได้ทำการศึกษาสมบัติของสารหน่วงไฟที่ปราศจากธาตุฮาโลเจนที่เติมลงใน polyamide 6/organoclay(PA6/OMT) nanocomposite ซึ่งได้แก่ magnesium hydroxide(MH) และ red phosphorus (RP) โดยสารทั้งสองทำหน้าที่เป็นสารหน่วงไฟ ในขณะที่ organoclay (OMT) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเสริมการหน่วงไฟ พบว่า นาโนคอมโพสิตที่ได้จะมีความสามารถในการต้านทานการติดไฟที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ polyamide 6 บริสุทธิ์ และงานวิจัยของ Menon [25] และคณะ ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับระหว่าง phosphorylated cashew nut shell liquid และ 2-ethyl hexyl diphenyl phosphate พบว่า เมื่อปริมาณสารเคมีเท่ากัน ค่า LOI ก็มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 2.9.3.5 สารหน่วงไฟประเภทที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

สารหน่วงไฟประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน เมลามีนไฮยานูเรต เมทิลอลเมลามีน สารประกอบกัวนิติน ยูเรีย ไฮยานาไดเอไมด์ เป็นต้น ซึ่งสารหน่วงไฟประเภทนี้ทำหน้าที่ในรูปของการเกิดอินทูเมสเซนส์ (Intumescent) เป็นลักษณะที่เกิดการพองตัวเป็นชั้นของ Char ที่มีลักษณะคล้ายโฟม ทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนและการสัมผัสกับออกซิเจนให้แก่วัสดุ