

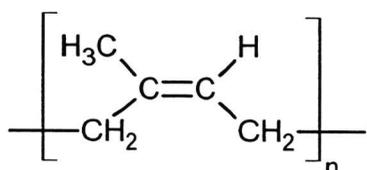


บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) โครงสร้างหลักประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนดังโครงสร้างทางเคมี รูปที่ 2.1 จึงทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันแต่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [5]

เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน สายโซ่ของยางธรรมชาติเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย จึงทำให้คงสภาพยืดหยุ่นได้ดี นอกจากนี้ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อได้รับการยืดออก ทำให้มีความทนแรงดึงสูงมาก เนื่องจากยางธรรมชาติมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาว เพื่อนำไปใช้งานต้องทำการบดให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลงและเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดพันธะข้ามสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงของยางธรรมชาติ สามารถทำโดยการเติมสารตัวเติมแบบเสริมแรงได้ เช่น ผงเขม่าดำ หรือผงซิลิกา

2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น (Elasticity) ลักษณะที่เด่นประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงเดิมอย่างรวดเร็ว



ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูปมีสมบัติที่ดีในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องประกอบหลายชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน เช่นยางล้อรถยนต์ ความต้านแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกคั้งยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยไม่ต้องใช้สารเสริมแรงเข้าช่วย การเติมสารเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งจะต่างจากยางสังเคราะห์ทั่วไปที่มีค่าความต้านแรงดึงต่ำซึ่งมักเติมสารเสริมแรงเพื่อให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น

ความต้านต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงดีกว่ายาง SBR อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานการขัดถูในกลุ่มที่สูงมาก

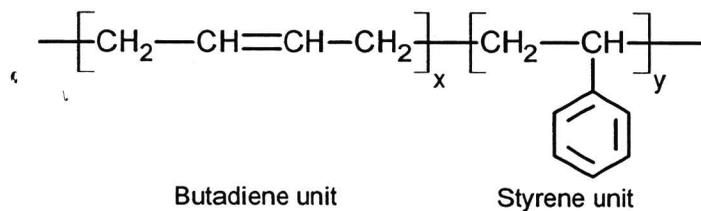
การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยางด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิต ผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti degradants) และไข (Wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึก ทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไปในขณะที่ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมคุณภาพ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดลดลง

การกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในขณะที่เปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อยางใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะกับการใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูง อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

2.1.2 ยางเอสบีอาร์ (SBR)

ยางเอสบีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) หรือยางสังเคราะห์สไตรีนบิวตะไดอิน เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสไตรีน และมอนอเมอร์ของบิวตะไดอิน ได้จากการปฏิกิริยาของการพอลิเมอไรซ์แบบอิมัลชัน มักประกอบด้วยสไตรีน โมโนเมอร์ (Styrene monomer) ประมาณ 23.5% และบิวตะไดอิน โมโนเมอร์ (Butadiene monomer) ประมาณ 76.5% ซึ่งโมโนเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random copolymer) โครงสร้างของยางเอสบีอาร์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางเอสบีอาร์ [5]

2.1.2.1 สมบัติทั่วไปของยางเอสบีอาร์

ยางเอสบีอาร์เป็นยางประเภทที่มีการใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เพราะสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง และเนื่องจากเป็นยางสังเคราะห์จึงมีสมบัติที่สม่ำเสมอ สิ่งเจือปนน้อยและไม่ต้องบดยางให้ نرم ก่อนทำการผสมเนื่องจากถูกสังเคราะห์มาโดยกำหนดไม่ให้มีน้ำหนักรีดที่สูงมากนัก ยางจึงมีความเหนียวเหมาะสมและสารเคมีกระจายตัวได้ดี

ความเหนียวติดกัน ยาง SBR มีสมบัติความเหนียวติดกันต่ำ ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่นยางล้อรถยนต์ จึงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติที่มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดีเข้าช่วย (หรือใช้กาวจากยางธรรมชาติเข้าช่วยโดยการทาที่บริเวณพื้นผิวของยาง SBR)

ความยืดหยุ่น ยาง SBR มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ และค่าความยืดหยุ่นของยางลดลงเมื่อปริมาณของสไตรีนสูงขึ้น

ความต้านแรงดึง เนื่องจากยาง SBR ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางชนิดนี้จึงมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (ต่ำกว่ายางธรรมชาติประมาณ 7- 10 เท่าในกรณีที่ไม่มีสารเสริมแรง) ใดๆก็ได้

ตาม การเติมสารเสริมแรงสามารถทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเล็กน้อย

ความทนทานต่อการฉีกขาด ยาง SBR มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเสริมแรงลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านนี้

ความต้านทานต่อการขาด ยาง SBR มีสมบัติที่เด่นในด้านการต้านการขาด การเติมสารเสริมแรงลงไป ในยาง SBR ทำให้ความต้านทานการขาดสูงกว่ายางธรรมชาติ 10-20%

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากยาง SBR มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลดังนั้นยางเอสปีอาร์ จึงเสื่อมสภาพได้เร็วในสภาวะที่มี ออกซิเจน แสงแดด โอโซน หรือความร้อนเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ และเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นเพราะเกิดการเชื่อมโยงของสายโมเลกุล (Crosslinking) มากกว่าเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปจะช่วยยืดอายุการใช้งานของยางชนิดนี้

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี ยาง SBR จัดเป็นยางที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน แต่ยางชนิดนี้จะทนต่อกรดและด่างเจือจาง แอลกอฮอล์ น้ำ ไกลคอล เกลือ และน้ำมันซิลิโคนได้เป็นอย่างดี

การกระดอน ยาง SBR เป็นยางที่มีการกระดอนต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก คือในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนสูง (มี hysteresis สูง) ดังนั้นเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยาง SBR จึงมีความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ยาง SBR จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตล้อรถบรรทุก หรือล้อรถยนต์ขนาดใหญ่เพราะความร้อนที่สะสมสูง อาจทำให้ยางระเบิดได้

2.1.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) หมายถึง โครงสร้างแบบที่มีสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาอยู่รวมกัน และระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์สองชนิดที่เชื่อมต่อกันด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าการเป็นพันธะเคมี เหตุผลโดยทั่วไปในการทำพอลิเมอร์ผสม คือการปรับปรุงสมบัติบาง



ประการของพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้นเพื่อตอบสนองต่อเงื่อนไขของสภาวะการใช้งาน โดยนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการ

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ [6]

1. พอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend)
2. พอลิเมอร์ผสมแบบแยกเฟส (Immiscible blend)

ซึ่งในส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 แบบ คือ Homogeneous blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่ต่างเกรดกัน และ Heterogeneous blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เนื้อเดียวกันที่มาจากสารตั้งต้นที่ต่างชนิดกัน (เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกับยางไนไตรด์) ส่วนพอลิเมอร์ผสมแบบ Immiscible มีโครงสร้างแบบแยกเฟสซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์ไม่ละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ Compatible blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะที่เหนียวแน่นระหว่างเฟส และ Incompatible blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ไม่ดีทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ แต่การยึดเกาะและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer หรือ Coupling agent) ลงไป

พอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างแบบแยกเฟส (Immiscible blend) สมบัติขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมมีพอลิเมอร์ชนิดใดเป็นหลัก หรือเป็นเฟสที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งตัวแปรหลักที่กำหนดว่าพอลิเมอร์ใดเป็นเฟสที่ต่อเนื่อง (Matrix) ซึ่งสัดส่วนในการผสมและสัดส่วนความหนืด โดยทั่วไปพอลิเมอร์ตัวที่มีปริมาณอัตราส่วนมากกว่าหรือมีความหนืดน้อยกว่ามีโอกาสเกิดเป็น Matrix ได้มากกว่า

การผสมยางธรรมชาติกับยางชนิดต่างๆ

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยาง SBR ยางพอลิไอโซพรีน (IR) และยางบิวตะไดอิน (BR) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมสมบัติของยางนั้นเข้าด้วยกัน เช่นการผสมกับยาง SBR จะทำให้ยางผสมมีความต้านทานการขีดถูที่ดีกว่ายางธรรมชาติและมีสมบัติความต้านแรงดึงที่ดีกว่ายาง SBR หรือพัฒนาสมบัติการทนต่อน้ำมันโดยการผสมกับยางไนไตรด์ หรือยางคลอโรพรีน แต่อย่างไรก็ตามในการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ทำการผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลโดยตรงต่อยางผสม อันได้แก่ ความหนืด และระบบการคงรูปของยางทั้งสองชนิด โดยก่อนทำการผสมต้องทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดที่ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อนเพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากัน

ได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลน้อย เช่นยางบิวไทล์ หรือยางเอทิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดที่มีสมบัติการคงรูปที่ต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันระหว่างการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลอาจช่วยลดปัญหานี้ได้ส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ในกรณีที่ผสมยางที่ความเป็นขั้วต่างกันมาผสมกันอาจต้องพิจารณาถึงความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกันด้วย เพราะสารตัวเติมแต่ละชนิดก็มักจะเข้าได้ดีกับยางที่มีขั้วชนิดเดียวกับสารนั้นๆ ทำให้สมบัติของยางคงรูปที่ได้มีสมบัติต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2.1.4 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง ตัวอย่างเช่น ผงเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์ และซิลิกา เป็นต้น ซึ่งถูกใส่เข้าไปในยาง [9] โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุนการผลิต
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและกายภาพของยาง
3. เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต
4. เพื่อช่วยลดการพองตัวหรือบวมตัวของยางในน้ำมัน
5. เพื่อเพิ่มหรือยืดอายุการใช้งานของยาง เช่น ป้องกันไม่ให้แสงส่องผ่านเข้าไปในยางได้

ลักษณะของสารเติมแต่ง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารเติมแต่งชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อใส่เข้าไปในยางแล้ว ทำให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการขีดถู ความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้น ชนิดของสารเติมแต่งชนิดนี้ที่นิยมใช้ คือ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เป็นต้น ส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 180-600 อังสตรอม
2. สารเติมแต่งชนิดไม่เสริมแรง (Inert fillers) สารเหล่านี้มีราคาถูก และมีขนาดตั้งแต่ 10000 อังสตรอมขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์ แบไรต์ และทัลคัม เป็นต้น สารบางตัวมีอนุภาคขนาดปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต จัดอยู่ในประเภทสารกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing fillers)

สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมได้แก่ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เนื่องจากมีความสามารถในการเสริมแรงได้ดี แต่ถ้าใช้สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไปจนเมทริกซ์ของยางไม่สามารถยึดสารตัวเติมเข้าด้วยกัน ทำให้ยางมีความแข็งกระด้างและเปราะ ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จึงสูญเสียไป นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความต้านแรงดึงสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และอนุภาคขนาดเล็กมีหน้าสัมผัสระหว่างยางกับสารตัวเติมได้มากกว่า จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อแน่น มีช่องว่างหรือความพรุนตัวต่ำ

2.1.5 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินจาก โรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยถูกคักจับไว้ด้วยตัวคักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอนุรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น [7-8]

ลักษณะเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ

1. เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash หรือ Dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน โดยอาศัยเครื่องจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า แล้วเก็บรวบรวมไว้ในไซโล
2. เถ้าหนัก (Bottom ash หรือ Wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่ทำให้เกิดการหลอมเถ้าที่ปะทะกันรวมเป็นเม็ดหรือก้อนตกลูกกันเตา

สมบัติพื้นฐานทางด้านเคมีของเถ้าลอย

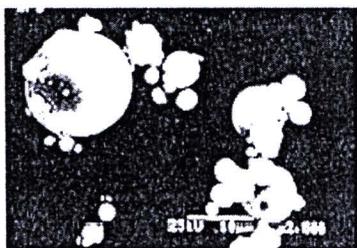
1. ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ซึ่งส่วนประกอบของเถ้าลอยมี 2 กลุ่มใหญ่คือ ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 พบได้ทั่วไปในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ ส่วนอีกกลุ่มคือส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง ได้แก่ Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O พบได้ในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence เถ้าลอยประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมี

เหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของถ่านล้อย ขบวนการเผาอุณหภูมิต่างกัน

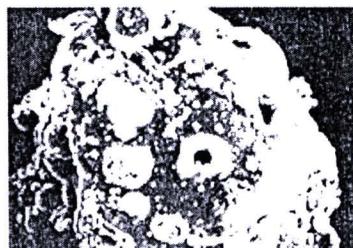
2. ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของถ่านล้อย (Mineralogical composition) ขณะที่มีการเผาถ่านหินและมีการเย็นตัวของถ่านล้อยหลังจากการเผา ทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของถ่านล้อยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับถ่านล้อยลิกไนต์ จะมีความเป็นอสัณฐาน (noncrystalline) มากกว่า 90% อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่มีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ที่มีความเกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของถ่านล้อย

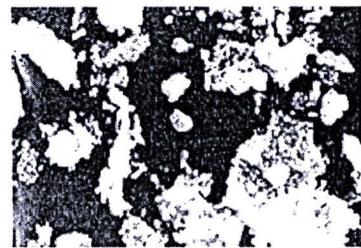
ถ่านล้อยมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม ส่วนรูปร่างอื่นๆ อาจพบมีลักษณะเป็น รูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม ดังแสดงรูปที่ 2.3



ถ่านล้อยลักษณะกลม



ถ่านล้อยลักษณะที่มีรูพรุน



ถ่านล้อยที่มีลักษณะไม่แน่นอน

รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะต่างๆ ของถ่านล้อย [4]

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผาและชนิดของถ่านหิน

ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. การกำจัดทิ้ง ในปัจจุบันผงถ่านล้อยที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าได้ต่อวันมีปริมาณค่อนข้างมาก หากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ก็เป็นรายได้เพิ่มของหน่วยงาน



2. มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม พงเถ้าลอยเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งเข้าข่ายถูกกำหนดให้เป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ต้องกำจัดทิ้ง

ดังนั้น หากสามารถนำพงเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ได้ในปริมาณที่มาก ก็จะสามารถลดหรือกำจัดปัญหาทั้ง 2 ประการนี้ออกไปได้ สำหรับปริมาณของเถ้าลอยในปัจจุบันที่มีปริมาณมาก โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศ โดยมีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี แต่ในปี 2540-2545 มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะมากที่สุดเป็นจำนวน 400,000 ตันต่อปี คิดเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ของที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังมีโรงงานที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพของเถ้าลอยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น โรงงานในนิคมอุตสาหกรรมจังหวัดระยอง จังหวัดสมุทรสาคร และจังหวัดกาญจนบุรี

2.1.6 พงเถ้าดำและซิลิกา

2.1.6.1 ตัวแปรปฐมภูมิ: ขนาดและโครงสร้างของสารตัวเติม

ตัวแปรที่สำคัญต่อการเสริมแรงในยางคือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1000 nm ไม่สามารถเสริมแรงได้ดี ซึ่งต่างจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm สามารถแสดงการเสริมแรงได้เด่นชัดมากกว่า นอกจากนี้โครงสร้างยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งโดยที่พงเถ้าดำเป็น สารตัวเติมที่มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างซับซ้อนของอนุภาคทรงกลมขนาดในช่วง 10-90 nm อนุภาคเหล่านี้สามารถก่อตัวอยู่ในรูปของ Aggregate แบบต่างๆ และเมื่อ Aggregate หลายกลุ่มมาก่อตัวรวมกันเรียกว่า Agglomerate โดยที่โครงสร้างของพงเถ้าดำควรมีการก่อตัวของ Aggregate ขนาดเล็กๆ เพื่อให้มีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี

สารตัวเติมชนิดซิลิกาแบบ Precipitated หรือ Fumed มีรูปทรงที่คล้ายกัน โดยการก่อตัวของโครงสร้างเริ่มจากอนุภาคทรงกลมชั้นต้นก่อตัวเป็น Aggregate จากนั้นหลายๆ Aggregate ก่อตัวกันเป็น Agglomerate และหลายๆ Agglomerate ก่อตัวเป็น Cluster ในที่สุด ด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมาก ซึ่ง Aggregate ของอนุภาคซิลิกาไม่สามารถแตกตัวได้ขณะผสม แต่มักก่อตัวเป็น agglomerate จึงทำให้มีการก่อตัวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น Cluster แบบหลวมๆด้วยพันธะไฮโดรเจน หากเปรียบเทียบสารตัวเติมระหว่างซิลิกากับพงเถ้าดำที่มีความสามารถในการเสริมแรงที่เท่ากัน พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาสูงกว่าพงเถ้าดำมาก [10]



2.6.1.2 ตัวแปรทุติยภูมิ: คุณลักษณะของผิวสารตัวเติม

ผงเขม่าดำมีส่วนประกอบของหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนหลากหลาย เช่น หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล ฟีนอล แลคโตน คิวโนน คีโตน อัลดีไฮด์ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ซับซ้อนเหล่านี้สามารถแตกตัวเป็นฟรีเรดิคัลและสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับยางได้ เป็นการเสริมแรงให้กับยางได้ดี

สำหรับพื้นผิวของซิลิกาที่มีปริมาณไฮดรอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกามาก ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคกับอนุภาคแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้อนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางไม่ดีเหมือนกับผงเขม่าดำ จึงต้องใช้สารคู่ควบไฮดรอกซิล TESPT (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfane) ช่วยให้มีการกระจายตัวได้ดีขึ้นและยังทำให้สารคู่ควบ TESPT มีการเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมกับยางด้วย [10]

2.1.7 กลไกยึดเกาะระหว่างยางกับสารเติมแต่ง [11]

ในวัสดุคอมโพสิต เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเทอร์เฟสได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะหลักๆ ที่อินเทอร์เฟสของวัสดุคอมโพสิตมี 5 กลไก ซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกัน ดังนี้

1. การดูดซับและการเปียก (Adsorption and wetting) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ ทำให้เกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิด อยู่ใกล้ชิดกันมากถึงระดับไมครอน หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส
2. การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ว่ามีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โพลิเมอร์ที่เกิดการพันกัน การยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลายทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติไซเซอร์ ทำให้สายโซ่โพลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 13 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 246708
เลขเรียกหนังสือ.....



3. แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) แรงดึงดูดเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวก และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส และพันธะไอออนิก เช่นการยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวกมีการยึดติดที่คล้ายเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว เป็นต้น
4. พันธะเคมี (Chemical bonding) เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญ เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น
5. การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) การยึดเกาะเชิงกลเกิดระหว่างในกระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใย ในขณะที่เป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องรูและช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ ทำให้เมทริกซ์ถูกจับติดอยู่กับพื้นผิวของเส้นใย

2.1.8 ทฤษฎีการเกิดโฟม

หลักการทั่วไปในการผลิตโฟมเป็นการผ่านก๊าซลงไปในพอลิเมอร์เหลว และทำให้ฟองอากาศอยู่ภายใน และส่วนมากระบบโฟมขยายตัวโดยการขยายขนาดของฟองอากาศก่อนทำให้อยู่ตัว

กลไกในการเกิดฟองมี 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นการเกิดฟอง (Bubble formation)
2. ขั้นการขยายตัวของฟอง (Bubble growth)
3. ขั้นการทำให้ฟองอยู่ตัว (Bubble stabilization)

ปัจจัยที่มีผลกับกระบวนการคือ แรงตึงผิว ซึ่งมีส่วนอย่างมากกับการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอน โดยในขั้นการเกิดฟองนั้น ต้องมี Microvoid ในปริมาณที่มาก ๆ หรือมี Nucleating agent เล็กๆ เพื่อ



ช่วยในการเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์ ส่วนในขั้นการขยายตัวของฟองนั้น เป็นผลมาจากก๊าซที่แทรกซึมจากของเหลวเข้าสู่ Microvoid หรือเข้าสู่ฟองก๊าซที่มีอยู่แล้ว

ปัจจัยด้านอื่นที่ช่วยในการเกิดโฟม [11]

1. การเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์จากการให้ความเย็น หรือจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในด้านการพองฟอง
2. การลดความหนาของผนังเซลล์ (ลดความแข็งแรงของแรงตึงผิว) ซึ่งเมื่อฟองก๊าซขยายตัวทำให้ผนังซึ่งบางเป็นฟิล์มมีความบางลงเรื่อยๆ ผนังในส่วนอื่นที่มีความหนามากกว่าจะมาช่วยเสริมทดแทนในส่วนของผนังที่บางลงได้ เรียกว่า Self healing
3. การเพิ่มพื้นที่ผิวต้องมีการเพิ่ม Free energy โดยพื้นที่เล็กๆที่เพิ่มขึ้นนั้นก็จะนำไปสู่การพังทลายของผนังเซลล์ ซึ่งพลังงานในส่วนนี้ คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดการพังทลาย
4. Electric double layer effect มีผลให้ผิวหน้าของผนังเซลล์ 2 ผิว เกิดการผลักกัน

ปัจจัยที่ทำให้ผนังเซลล์เกิดพังทลาย (Collapse)

1. การไหลของของไหลจากส่วนที่เป็นผนังไปยังส่วนแกน ซึ่งขึ้นกับ Capillary action และแรงโน้มถ่วง
2. การขยายตัวของฟองที่มากเกินไป ทำให้ไม่มีพอลิเมอร์ที่เพียงพอที่จะเป็นทั้งผนังเซลล์และส่วนแกน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับการขยายตัว
3. แรงแวนเดอร์วาล ระหว่างพื้นที่ผิวของฟิล์มบางๆ ทำให้ฟิล์มมีความบางลง
4. การลดลงของแรงตึงผิว ซึ่งขึ้นกับความร้อนที่ให้มากเกินไป หรือการที่มีการเติม Antifoam agent ซึ่งอาจทำให้ผนังมีความแข็งแรงลดลง นำไปสู่การพังทลายของผนังเซลล์

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้เกิดโฟมได้ยากขึ้น นั่นคือ การเพิ่มพลังงานอิสระของระบบซึ่งจะเกิดขณะที่เริ่มเกิดโฟม ซึ่งพลังงานมีสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ มักเกิดการพังของผนัง อีกประการหนึ่ง คือ ความสมดุลของความแข็งแรงของผนังเซลล์ความแข็งแรงของส่วนแกน และเวลาที่ทำให้โฟมมีขนาดใหญ่มากที่สุด ซึ่งส่วนแกนต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่คงปริมาตรของโฟมได้

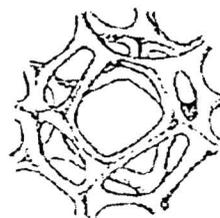
2.1.9 วัสดุเซลลูลาร์ (Cellular Materials)

2.1.9.1 ยางเซลลูลาร์

ยางเซลลูลาร์เตรียมจาก Solid rubber ที่ประกอบด้วย สารเชื่อมขวาง และสารช่วยในการเชื่อมขวางกับสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ซึ่งให้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนืด อุณหภูมิการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟอง ต่อผลที่ลักษณะยางจะเกิดเป็นเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด [12] โดยในขั้นเริ่มต้นการให้ความร้อน ให้ความความหนืดของยางลดลง และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่เริ่มเกิดการเชื่อมขวาง ความหนืดก็จะเพิ่มสูงขึ้น จุดที่เกิดฟองอากาศต้องเกิดก่อนที่ยางเกิดการเชื่อมขวางโดยสมบูรณ์ โดยหากการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองเกิดก่อนที่ยางเกิดการเริ่มมีความหนืดที่เพิ่มขึ้นยางมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด เนื่องจากผนังของเซลล์ (ที่บางเป็นลักษณะฟิล์ม) มีความแข็งแรงน้อยซึ่งไม่เพียงพอที่จะช่วยพยุงก๊าซได้ ทำให้ก๊าซทะลุผนังเกิดการเชื่อมกันของเซลล์ ในทางตรงข้ามหากเกิดการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองหลังจากยางได้เริ่มมีการเชื่อมขวางและมีความหนืดเพิ่มขึ้นแล้ว ผนังของเซลล์จะมีความแข็งแรงเพียงพอที่ทำให้ผนังไม่เกิดการพังและเกิดการเชื่อมกันของเซลล์

คำว่ายางเซลลูลาร์ (Cellular rubber) มีการใช้อย่างกว้างขวางในยางธรรมชาติ และ ยางสังเคราะห์ที่มีเซลล์ หรือช่องว่าง หรือรูพรุนเล็กๆ โดยครอบคลุมถึง โฟมลาเท็กซ์ (Latex foam) ยางฟองน้ำ (Sponge rubber) และ ยางโฟมแบบขยาย (Expanded rubber) ในลักษณะที่มีเซลล์แทรกอยู่ปริมาณมากในเนื้อยาง ทั้งเซลล์ที่เป็นรูปแบบเปิด และเซลล์ที่เป็นรูปแบบปิด [13]

2.1.9.2 โครงสร้างของเซลล์เปิด (Open Cell Structure)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์เปิด (Open cell) [12]

ลักษณะของเซลล์เปิดหรือยางฟองน้ำ โครงสร้างของผนังที่กั้นระหว่างเซลล์มีการแตก หรือทะลุถึงกัน ทำให้อากาศหรือก๊าซสามารถผ่านได้อย่างอิสระ ทำให้โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะเป็นการเชื่อมต่อกัน



ของโครงสร้างเนื้อเยื่อที่สามารถดูดซับแรงไว้ได้โดยตัวมันเอง ทำให้วัสดุประเภทนี้มีสมบัติที่เด่นในด้านการรับแรงแบบ Load bearing วัสดุประเภทนี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานประเภท ยางกันกระแทกหรือยางกันซึม โดยลักษณะของเซลล์ประเภทนี้สามารถทำได้โดยการใส่สารเคมีที่สลายตัวแล้วเกิดก๊าซผสมลงไปกับยาง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ที่สลายตัวแล้วทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะการให้ความร้อนในกระบวนการวัลคาไนเซชันเกิดเป็นฟองก๊าซที่ทะลุถึงกันในเนื้อเยื่อ โดยยางประเภทเซลล์เปิดนี้มักมีสมบัติการกระดอน และการคืนตัวกลับ สมบัติความแข็งแรงเชิงกล และความเป็นฉนวนความร้อนต่ำ

ผลิตภัณฑ์ประเภทเซลล์เปิดมักขึ้นรูปในรูปแบบแผ่น แบบแท่ง (Strips) และตามลักษณะการใช้งานต่างๆ และนำไปใช้งานในรูปแบบของการรับแรงเป็นรอบๆ หรือแบบการรับแรงกระแทกแบบทันทีทันใดเนื่องจากวัสดุประเภทนี้สามารถกระจายแรงที่มากระทำได้ดี ซึ่งนอกจากกลไกในเชิงโครงสร้างที่กระจายแรงได้ดีแล้วอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเสริมการรับแรงคือการผ่านเข้าออกอย่างอิสระของอากาศ

2.1.9.3 โครงสร้างของเซลล์ปิด (Closed Cell Structure)



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์ปิด (Closed cell) [12]

โครงสร้างของเซลล์ชนิดเซลล์ปิดหรือ Expanded rubber ประกอบด้วยโครงสร้างที่ผนังของเซลล์ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกัน ซึ่งเกิดจากการที่เนื้อเยื่อมีการกักฟองก๊าซเอาไว้อย่างแยกออกจากกัน โดยการทำให้เกิดเป็นวัสดุประเภทนี้ต้องคำนึงถึงความพอดีกันระหว่าง การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง และระบบที่ทำให้ยางสุกตัว ซึ่งต้องทำให้ยางสุกตัวในขณะที่เกิดก๊าซและยังไม่ได้แพร่ออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งหากยางสุกช้าเกินไปอาจทำให้ก๊าซออกนอกเนื้อเยื่อไปจนหมดทำให้ยางขยายตัวได้น้อย และมีความหนาแน่นสูง การเกิดการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองก่อนการเริ่มสุกตัวของยางทำให้เกิดเซลล์ที่มีการทะลุถึงกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการติดกันเป็นกลุ่มของฟองก๊าซทำให้เนื้อเยื่อเกิดผิวที่ไม่สม่ำเสมอจนถึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบเซลล์เปิด



สารทำให้เกิดฟองที่มักใช้กับวัสดุชนิดเซลล์ปิดมักเป็นสารที่สลายตัวแล้วให้ก๊าซใน โตรเจน มากกว่า สารทำให้เกิดฟองที่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากก๊าซใน โตรเจนมีการซึมผ่านที่น้อยกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [14]

เนื่องจากลักษณะของเซลล์ที่ผนังไม่ได้มีการทะลุถึงกันทำให้วัสดุประเภทเซลล์ปิดนี้มีการดูดซึมน้ำได้น้อย มีการกระดอนที่ดี และมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วย ซึ่งเหมาะต่อการนำไปเป็นวัสดุลอยน้ำ วัสดุที่รับแรงกระแทกแบบทันทีทันใด และวัสดุฉนวนกันความร้อน

วัสดุประเภทเซลล์ปิดส่วนมากขึ้นรูปในรูปแบบเดียวกับวัสดุเซลล์เปิด เช่นแบบแผ่น แบบแท่ง และตามรูปร่างการใช้งานเฉพาะต่างๆ โดยนำมาตัดเป็นแผ่นที่บางลงในภายหลังหรือตัดเป็นรูปทรงต่างๆ ในการทำเป็นวัสดุปะเก็นหรือชิ้นส่วนในเครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน วัสดุกันซึม โดยหน้าตัดของชิ้นงานสามารถเห็นเป็น โครงสร้างของผนังเซลล์ ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยเครื่องอัดรีด (Extruder) ผนังมีลักษณะผิวเรียบยกเว้นด้านที่ถูกตัด สามารถเห็นเป็น โครงสร้างของเซลล์เช่นกัน

2.1.10 สารทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent)

สารทำให้เกิดฟอง คือ สารที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง ที่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยก๊าซใน โตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อน หรือระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของรูป ก๊าซที่ปล่อยออกมาทำให้ยางมีรูพรุน หรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไป [15] สารทำให้เกิดฟองที่ดีควรมีสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้

1. สามารถปลดปล่อยก๊าซออกมาได้มาก
2. ไม่เป็นพิษ
3. สารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวไม่ควรมีกลิ่นเหม็น
4. ไม่ควรทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนสี
5. ควรกระจายตัวในยางได้ดีเพื่อให้ฟองอากาศเกิดได้สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน
6. ยางเสื่อมสภาพเร็วไม่ควรมีผลต่อปฏิกิริยาการสุก และไม่ทำให้
7. มีช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวที่เหมาะสม
8. ราคาถูก

สารทำให้เกิดฟองสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ สารอินทรีย์ (Organic blowing agent) และ สารอนินทรีย์ (Inorganic blowing agent) ซึ่งสารประเภทอนินทรีย์มีราคาถูกแต่สารทำให้เกิดฟอง



กลุ่มนี้กระจายตัวในยางได้ยาก ทำให้ความสม่ำเสมอของขนาดและชนิดของฟองน้ำที่เกิดขึ้นไม่ดี ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งนิยมใช้ร่วมกับกรดอินทรีย์อย่างอ่อน เช่น กรดทาพาริก กรดสเตียริก กรดโอเลอิก ด้วยอัตราของกรดต่อโซเดียมไบคาร์บอเนต 1:2 หรือ 1:3 โดยน้ำหนัก ปัจจุบัน การผลิตยางเซลลูลาร์นิยมใช้สารอินทรีย์ที่สลายตัวให้ก๊าซในโตรเจนมากกว่าสารอนินทรีย์ สารเคมีที่ทำให้เกิดฟองที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

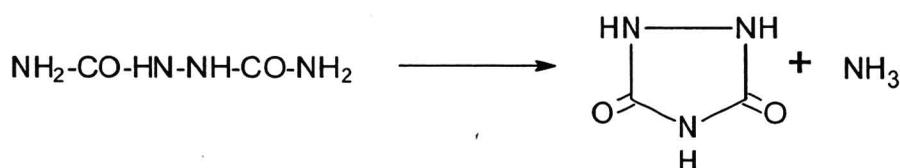
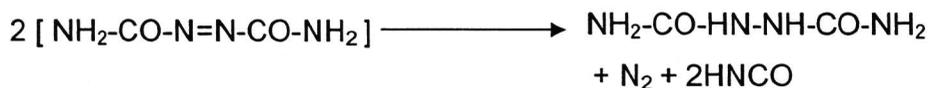
2.1.10.1 เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, ADC)

เอโซไดคาร์โบนาไมด์ มีสูตรโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (ADC)

สารทำให้เกิดฟองชนิด ADC ช่วงแรกได้ถูกนำมาใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งช่วงแรกในการใช้งานนั้น การสลายตัวของสาร ADC ต้องใช้อุณหภูมิที่สูง ทำให้การนำมาใช้กับยางต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการทำใญ่างสุดท้าย ซึ่งจากงานวิจัยของ Naugatuck Chemicals พบว่า สารไกลคอล และกลีเซอรอล สามารถลดอุณหภูมิการสลายตัวของ ADC ได้ ปฏิกริยาการสลายตัวของ ADC แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง ADC [16]



สมบัติของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์

สารทำให้เกิดฟอง ADC เป็นสารสีเหลืองส้มที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 195 – 216°C ซึ่งเป็นสารทำให้เกิดฟองที่มีประสิทธิภาพชนิดหนึ่งที่มีการให้ก๊าซขณะเกิดการสลายตัวประมาณ 220 cm³/g โดยให้ก๊าซส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย [16] โดยการสลายตัวของ ADC นั้นให้เถ้าที่เป็นสีขาวเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆของ ADC หลังการสลายตัวแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารที่ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ADC [16]

สารจากการสลายตัว	อัตราส่วน (% by weight)
ก๊าซ	32
เถ้าของแข็ง (Solid residue)	41
ผลิตภัณฑ์เหลือจากการระเหิด (Sublimate)	27

ส่วนองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ADC แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ ADC [16]

องค์ประกอบของก๊าซ	อัตราส่วน (% by weight)
ไนโตรเจน	65
คาร์บอนมอนอกไซด์	32
คาร์บอนไดออกไซด์	3

การกระตุ้นสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์

อุณหภูมิการสลายตัวของ ADC โดยปกติสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้ยางสุกตัว แต่สามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงได้โดยการทำการผสมเป็นคอมปาวด์กับสารที่เรียกว่า Blow activator

โดยการใช้สารเคมีหลายชนิดที่ใช้เป็นส่วนผสมในการคอมปาวด์ซึ่งมีหน้าที่หลักคือกระตุ้นให้ ADC สลายตัวได้เร็วขึ้น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และเกลือของสังกะสี (Salt of zinc) ส่งผลอย่างมากต่อการลดอุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิการสลายตัวลงได้ถึง 140°C ซึ่งเหมาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปร่าง คือระหว่าง 140 – 180°C

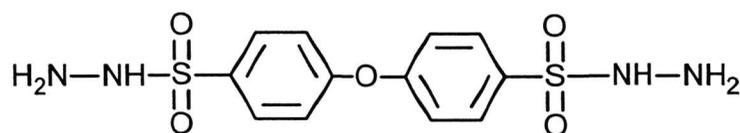
ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์

อัตราการสลายตัวของ ADC แปรผันตามอุณหภูมิ ชนิดของสารกระตุ้น ปริมาณที่ใช้ รวมทั้งขนาดของอนุภาคของแต่ละเกรดของ ADC โดยตัวกระตุ้นที่ใช้ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ ซิงก์สเตียเรท ซิงก์ออกเตท สารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organic metal complex) ไกลคอล และ ยูเรียที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว โดยการเติมสารกระตุ้นดังกล่าวมาในชนิดและปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ได้ ADC ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวตรงตามความต้องการ

สารกลีเซอรอล และยูเรียที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว มีผลต่อการกระตุ้นการสลายตัวของยางด้วย ดังนั้นในการเลือกใช้สูตรยางหากเลือกใช้สารประเภทนี้จึงควรคำนึงถึงการลดปริมาณสารกระตุ้น เพื่อชดเชยจากอิทธิพลของสารนี้ เนื่องจากเวลาในการสลายตัวก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งต่อปริมาตรของฟองก๊าซซึ่งส่งผลต่อลักษณะของเซลล์ที่ต้องการในที่สุด

2.1.10.2 ซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (Sulfonyl Hydrazide)

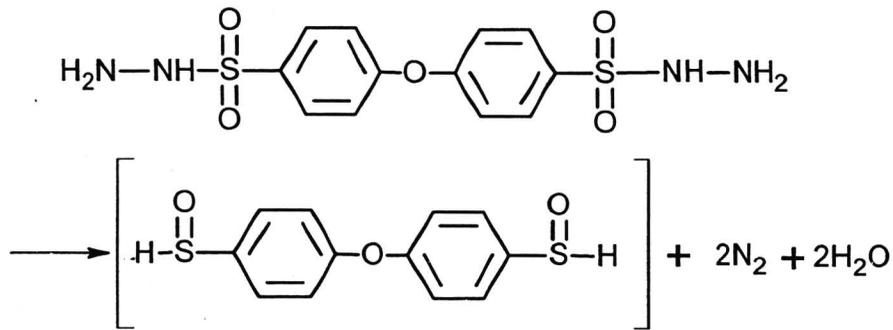
สารทำให้เกิดฟองชนิดซัลโฟนิลไฮดราไซด์ที่ใช้มากที่สุดคือ ออกซิบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ [p,p'-oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH)] และในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดย OBSH ได้ถูกค้นพบโดย Loren Schoene ในปี 1951



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟอง OBSH [13]

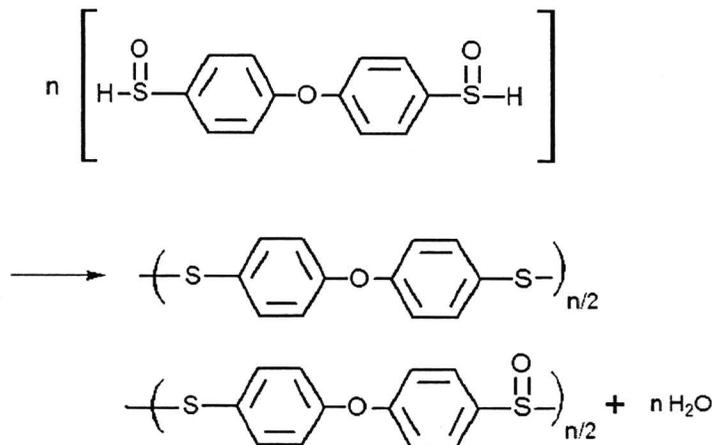
สมบัติของสารทำให้เกิดฟอง OBSH

ลักษณะทางกายภาพของ OBSH เป็นผงสีขาวที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 160°C โดยให้ก๊าซประมาณ 125 cm³/g [17] ซึ่งเป็นก๊าซไนโตรเจนและน้ำปริมาณเล็กน้อย และเป็นสารที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจาก ไม่เปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ ไม่ทำให้เกิดคราบ ให้ก๊าซไนโตรเจนและน้ำที่ไร้มลทิน OBSH สามารถกระจายตัวได้ดีในยางระหว่างการผสมในเครื่องผสมระบบเปิด ส่วนการผสมในเครื่องผสมในระบบปิดสามารถทำได้โดยต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 110°C และขนาดของอนุภาคของ OBSH ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวเนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำและมีอัตราการสลายตัวที่ค่อนข้างเร็ว ปฏิกริยาการสลายตัวของ OBSH แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง OBSH [13]

โดยการสลายตัวเกิดเป็นซัลโฟไฮดร่าไซด์ในช่วงแรกนั้นจะเกิดเป็นกรดซัลฟินิกที่ไม่เสถียร ซึ่งเสถียรได้โดยกระบวนการ Disproportionation เกิดเป็นสายโซ่ไดซัลไฟด์และไทโอซัลโฟเนต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งไม่มีสี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดของแข็งที่เหลือจากการสลายตัวของ OBSH [13]

การกระตุ้นสารทำให้เกิดฟอง OBSH

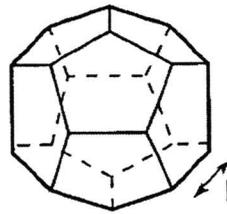
การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิที่ประมาณ 125°C โดยช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวได้ทันทีคือ 143 – 160°C ซึ่งอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้ไม่ต่ำเกินไปสามารถใส่สารลงไปบดผสมกับยางได้ โดยทั่วไปแล้วสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH มักใช้กับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูปประมาณ 135 – 170°C การลดอุณหภูมิการสลายตัวสามารถทำได้โดยการเติมสารกระตุ้น เช่น ยูเรีย หรือ ไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) (TEA) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถเป็นตัวกระตุ้น ได้ทั้งการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง และกระตุ้นให้เกิดการคงรูปยาง

การใช้งานสารทำให้เกิดฟอง OBSH

สารทำให้เกิดฟอง OBSH สามารถใช้ในการเป็นสารทำให้เกิดฟองในระบบที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ และระบบที่ขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (เช่น Extrusion) ของโฟมยางแบบขยายได้ เช่น ใช้กับยาง EPDM ยางคลอโรพรีน ยางเอสบีอาร์ และเทอร์โมพลาสติก เช่น PVC และ LDPE โดยการใช้งานที่สำคัญมักใช้ OBSH ในการขึ้นรูปท่อจนวนกันความร้อน ปะเก็นยางที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ และอุปกรณ์ลอยน้ำต่างๆ ปริมาณที่ใช้งานตั้งแต่ 1 – 15 phr

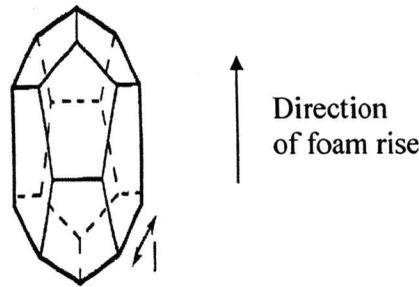
2.1.11 โครงสร้างแบบเซลล์ดาร์

ลักษณะโครงสร้างของโฟมประกอบด้วยเซลล์หลายรูปร่าง และหลายขนาด เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม จตุรัส ห้าเหลี่ยม หกเหลี่ยม ทำให้รูปร่างของเซลล์ในสามมิตินั้นมีหลายรูปแบบ ส่วนมากที่พบบ่อยเป็นแบบ Pentagonal dodecahedrons (รูปห้าเหลี่ยม 12 หน้าต่อหนึ่งเซลล์) [16] แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แบบ Pentagonal dodecahedrons [12]

โฟมที่ยังเหลว (Liquid foam) จะมีความเสถียรมากที่สุดเมื่อฟองก๊าซในโฟมเหล่านั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมเนื่องจากพื้นที่ผิวและ ความดันคาพิลลารี (Capillary pressure) มีค่าต่ำที่สุดเมื่ออยู่ในสถานะนี้ สำหรับ Monodispersed spherical cellular structure การจัดตัวจะจัดได้ชิดที่สุดเมื่อทรงกลมนั้นติดกับทรงกลมอื่นๆ อีก 12 ทรงกลมจะทำให้ก๊าซมีอัตราส่วนในปริมาตรโฟมถึง 74% ถ้าอัตราส่วนของก๊าซต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ทรงกลมจะเปลี่ยนรูปร่างไปเนื่องจากปริมาตรของก๊าซที่เพิ่มขึ้น เกิดเซลล์ที่มีลักษณะที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม (Polyhedral) โดยทั่วไป พบว่า เซลล์ดาร์พอลิเมอร์มีลักษณะเป็น Anisotropic คือ เซลล์มีลักษณะที่ยืดยาวตามแนวทิศทางของการเกิด โฟม ทั้งนี้มาจากความเค้นเกิดขึ้นขณะที่มีการกระจายของฟองก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งโฟมเป็นผลให้ฟองก๊าซมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในทิศทางที่มีความเค้นที่มากกระทำน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.12

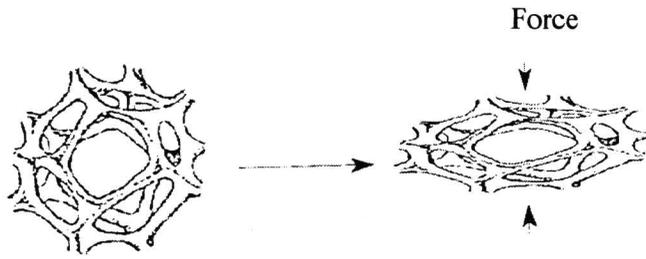


รูปที่ 2.12 การยืดตัวของเซลล์ขณะเกิดโฟม [12]

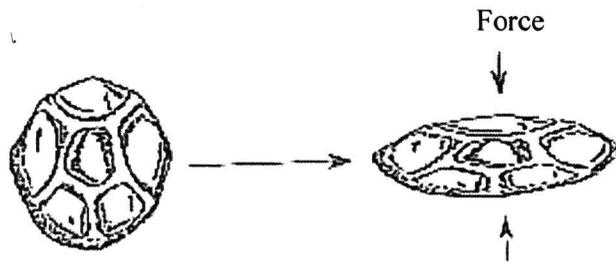
เมื่อโฟมขยายตัวในระบบปิด การเกิดเซลล์ในลักษณะ Anisotropic เกิดน้อยกว่าการเกิดโฟมในระบบเปิด และกฎเกิดเซลล์ที่มีลักษณะยืดจะเกิดเฉพาะบริเวณใกล้ๆผิวของแม่พิมพ์ ทั้งนี้ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นในแม่พิมพ์จะทำให้เซลล์มีความเป็นทรงกลมมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่พื้นผิวเซลล์ด้านนอกของโฟมส่วนใหญ่มีเซลล์ขนาดเล็ก และที่ความดันสูงมากๆ พื้นผิวที่ได้จะค่อนข้างเรียบ

2.1.12 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แบบเซลล์ลวด

สมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง (Rigid Foam) มีความแตกต่างจากโฟมที่ยืดหยุ่น (Flexible foam) ทำให้การทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะมีวิธีการที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน สมบัติ Compressive เป็นสมบัติที่สำคัญของ พอลิเมอร์แบบเซลล์ลวด ค่าการดูดซับพลังงานจากการกดอัด และลักษณะการเสียรูปของโฟมขึ้นกับความหนาแน่นของโฟม ชนิดของพอลิเมอร์ ลักษณะของเซลล์ อยู่ในรูปแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด เป็นปัจจัยหลัก ในโฟมแบบเซลล์เปิดนั้นการเสียรูปขึ้นกับการงอและการโค้งของผนังเซลล์ และเป็นแบบกลับคืนตัวได้ เซลล์ที่กักอากาศมีขนาดเล็กลงเมื่อมีแรงกดอัด ทำให้อากาศผ่านเข้าออกได้ช้าลง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานต่อการเสียรูปขณะกดอัด อีกนัยหนึ่งการผ่านของอากาศจะไม่ช้าเร็วกว่าที่ควรจำเป็นหากเป็นเซลล์ที่ปิด ซึ่งในกรณีเซลล์ปิดการเสียรูปขึ้นกับการงอหรือโค้งของผนังเซลล์ (Reversible) ความดันของก๊าซ ผนังเซลล์เกิดการดึงยืด และเกิด Yield (Non-reversible) กดอัดทำให้เซลล์เกิดการพังทลายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14

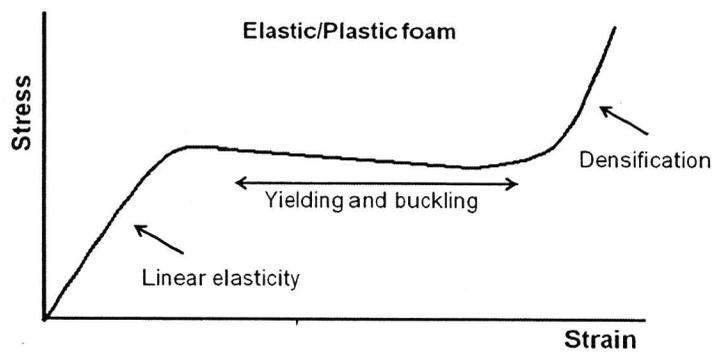


รูปที่ 2.13 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์เปิด (Open cell) [17]



รูปที่ 2.14 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์ปิด (Close cell) [17]

ลักษณะการดูดซับพลังงานของโฟมสามารถอธิบายได้ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมแบบยืดหยุ่น [17]



ในกรณีของพลาสติกโฟมที่มีเซลล์ปิดแบบยืดหยุ่นได้ การเสียรูปที่ความเครียดต่ำๆ แสดงความเป็นอิลาสติก เนื่องจากผนังเซลล์ถูกยืด จากนั้นมีช่วงความเค้นค่อนข้างคงที่ระยะหนึ่ง เนื่องจากการกดอัดอากาศที่เกิดจากผนังเซลล์เกิด Yield และ โกง และเมื่อเซลล์เกือบพังทลายหมด ผนังเซลล์ที่อยู่ตรงข้ามจะเริ่มเข้าไปชิดกับผนังอื่นจากนั้นความเครียดที่มากขึ้น ทำให้วัสดุติดกันมากขึ้นจนลักษณะเกือบเป็นเนื้อของแข็ง โดยเซลล์ปิดแสดงลักษณะการเพิ่มที่ค่อยเป็นค่อยไปแสดงในกราฟความเค้นกับความเครียด จนถึงช่วงที่เซลล์มีการทลาย นอกจากนั้นการเกิดการอัดติดกันของผนังในเซลล์เปิดจะเกิดที่ความเค้นที่ต่ำกว่าเซลล์ปิด

2.1.13 การใช้งานของพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์

การใช้งานพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย มักใช้สมบัติด้านความเป็นฉนวนความร้อนและการดูดซับพลังงานที่มากกระทำเป็นสมบัติหลัก ตัวอย่างการใช้งานมีดังต่อไปนี้

งานประเภทฉนวนกันความร้อน โฟมความหนาแน่นต่ำมีค่าการนำความร้อนที่ประมาณ 10^{-2} W/m-K โดยโฟมแบบเซลล์ปิดจะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเซลล์แบบเปิด ส่วนใหญ่มักใช้วัสดุโฟมแข็ง (Rigid foam) เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน มากกว่าการใช้โฟมแบบยืดหยุ่น (Flexible foam) การใช้งานโฟมในด้านนี้แพร่หลายและมีอัตราการ ใช้งานในด้านนี้มากกว่าการใช้งานด้านอื่นๆ

งานประเภทบรรจุภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพต้องมีการดูดซับพลังงานจากการกระแทกโดยการลด Damping stress ที่จะส่งผ่านไปยังตัวผลิตภัณฑ์ โดยวัสดุพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์ให้การดูดซับแรงได้ดี และสามารถกระจายแรงกระแทกได้ ทำให้ลดแรงที่มากกระทำให้น้อยลง สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับเนื้อวัสดุที่นำมาทำโฟม โครงสร้างของเซลล์ ความหนาแน่น ความหนา พื้นที่รับแรง ซึ่งปรับเปลี่ยนได้ตามวัตถุประสงค์ โดยพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน

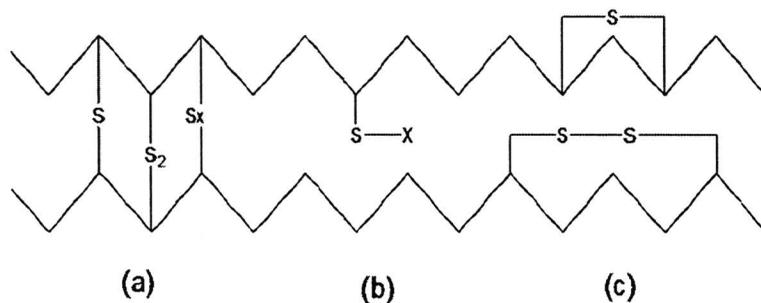
งานประเภทการรองกันกระแทก (Cushioning) การใช้งานโฟมกับงานชนิดนี้ใช้ โฟมแบบยืดหยุ่นได้เป็นหลัก โดยสมบัติประการที่สำคัญในการใช้งานประเภทนี้คือ สมบัติการคืนตัวที่เหมาะสม มีการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่น้อย มีการกระดอนสูง มีค่าการทนต่อแรงดึงสูง และการยืดตัวที่จุดขาดสูง เนื่องจากวัสดุโฟมมีช่วงการได้รับแรงกดอัดได้กว้างซึ่งขึ้นกับสมบัติด้านกายภาพ และองค์ประกอบเคมีที่ใช้ทำให้เกิด โฟม ทำให้มีการใช้งานด้านการกันกระแทกได้หลากหลาย การใช้โฟมยืดหยุ่นเป็นยางรองกันกระแทกใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เฟอ์นเจอร์ พื้นพรม และอุปกรณ์กีฬา

นอกจากนี้ พอลิเมอร์ชนิดเซลลูลาร์ยังมีการใช้งานในงานประเภทวัสดุลอยน้ำ วัสดุดูดซับเสียง งานโครงสร้างที่ไม่รับแรงมากแต่ต้องการน้ำหนักที่เบา เป็นต้น

2.1.14 การเสื่อมสภาพของยาง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือพลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อมีการนำไปใช้งานกลางแจ้งหรืองานภายนอกอาคารคือ แสงแดด ความชื้น และความร้อน เมื่อยางสัมผัสกับอากาศ ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับโครงสร้างทางเคมีของยาง ทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางขาดออกจากกัน (Chain scission) ส่งผลให้ยางมีความแข็ง (Hardness) และความตึงตัว (Stiffness) ลดลง ในขณะที่เดียวกันออกซิเจนก็ทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกัน (Crosslinking) ได้เช่นเดียวกัน หรือ ในกรณีที่ยางซึ่งผ่านการคงรูปด้วยกำมะถัน ก็จะทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางนั้น เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีความแข็ง และความตึงตัวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเปราะในที่สุด เมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น การเกิดการขาดและการเชื่อมโยงของโครงสร้างทางเคมีของยาง มักเกิดพร้อม ๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการใดจะเกิดขึ้นมากกว่ากัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงไปในที่สุด

สมบัติต่างๆของยางที่สุกด้วยกำมะถันนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมโยง (Type of crosslinking) และจำนวนของการเชื่อมโยง (Number of crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน [18]

จากรูปที่ 2.16 แสดงชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันโดยที่รูป (a) เป็นการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบ โมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic) และพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ตามลำดับ ส่วนรูป (b) นั้นแสดงการเชื่อมโยงแบบเพนแดนท์กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลื่ออยู่ (Accelerator Pendant Sulfur) สำหรับรูป (c) แสดงการเชื่อมโยงของกำมะถันในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Intramolecular linkage) ทั้งนี้ชนิดของการเชื่อมโยงนั้นจะขึ้นกับชนิดของตัวเร่งและอัตราส่วนของตัวเร่งกับกำมะถัน

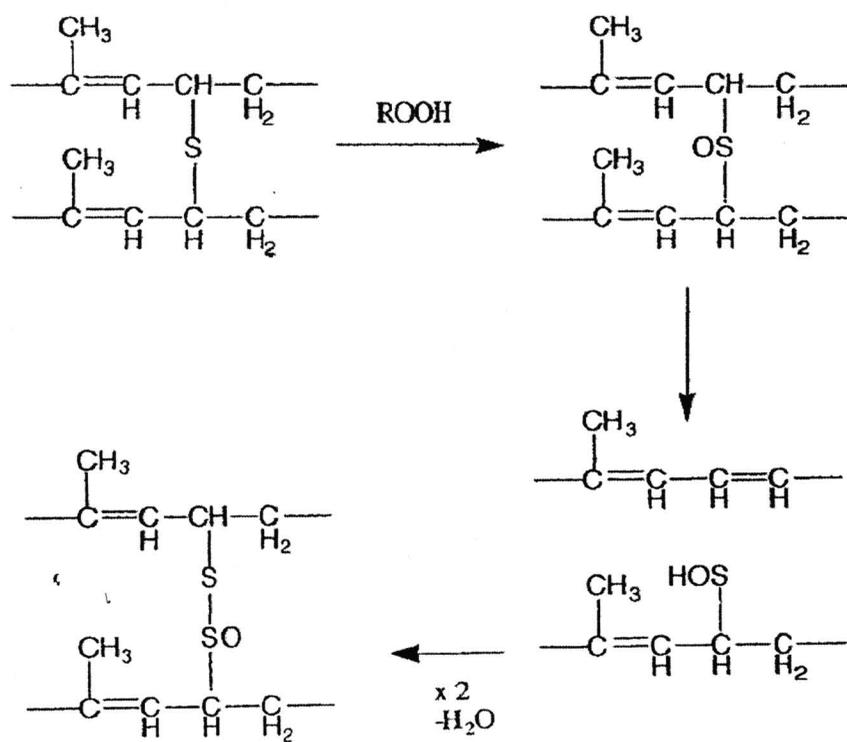
โดยลักษณะของการเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิก และพอลิซัลฟิดิกมักไม่ทนต่อปฏิกิริยา Thermal-oxidative ซึ่งผลที่ตามมาคือพันธะเชื่อมโยงดังกล่าวนี้สามารถเกิด การขาดของพันธะ หรือการเปลี่ยนแปลงชนิดของพันธะที่เชื่อมโยงเป็นพันธะที่สั้นลง ซึ่งทำให้ยางที่มีการเชื่อมโยงแบบ พอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนมาก หลังการเกิดปฏิกิริยา Thermal-oxidative จึงมีความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น มากกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ โมโนซัลฟิดิก หรือพันธะคาร์บอน-คาร์บอน [19]

การเกิดปฏิกิริยา Thermal-oxidation ของยางธรรมชาติเกิดผ่านกลไก การเกิดเป็นชั้นที่เหนียว (sticky surface layer) ก่อนและตามมาด้วยการเกิดลักษณะที่แข็งเปราะเนื่องมาจากการเพิ่มความหนาแน่นของ พันธะ (Crosslink density) ทำให้ Free volume ลดลง ส่งผลต่อการแทรกซึมของออกซิเจน

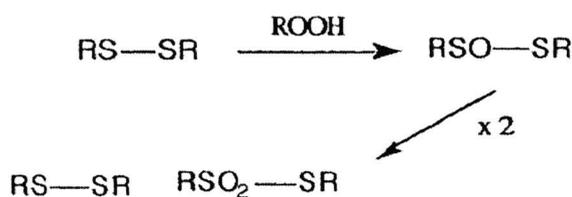
ภายใต้สภาวะสถิตย์ (Static condition) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวภายนอกเป็นการ ป้องกันการผ่านของออกซิเจนที่จะผ่านไปเกิดปฏิกิริยากับเนื้อภายในได้ แต่อย่างไรก็ตามภายใต้ สภาวะพลวัต (Dynamic condition) ยางมีความทนต่อแรงดึงมากแต่มีการยืดตัวที่จุดขาดลดลง เนื่องจากพื้นผิวภายนอกถูกออกซิไดส์ทำให้มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่มาก

ในยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยกำมะถัน ออกซิเจนที่เข้ามาส่วนหนึ่งจะอยู่ในรูปของหมู่ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และอีกส่วนหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับพันธะกำมะถัน เกิดเป็นพันธะ กำมะถันลักษณะใหม่ที่เรียกว่า Sulphoxide และ Sulphenic acids ดังรูปที่ 2.17



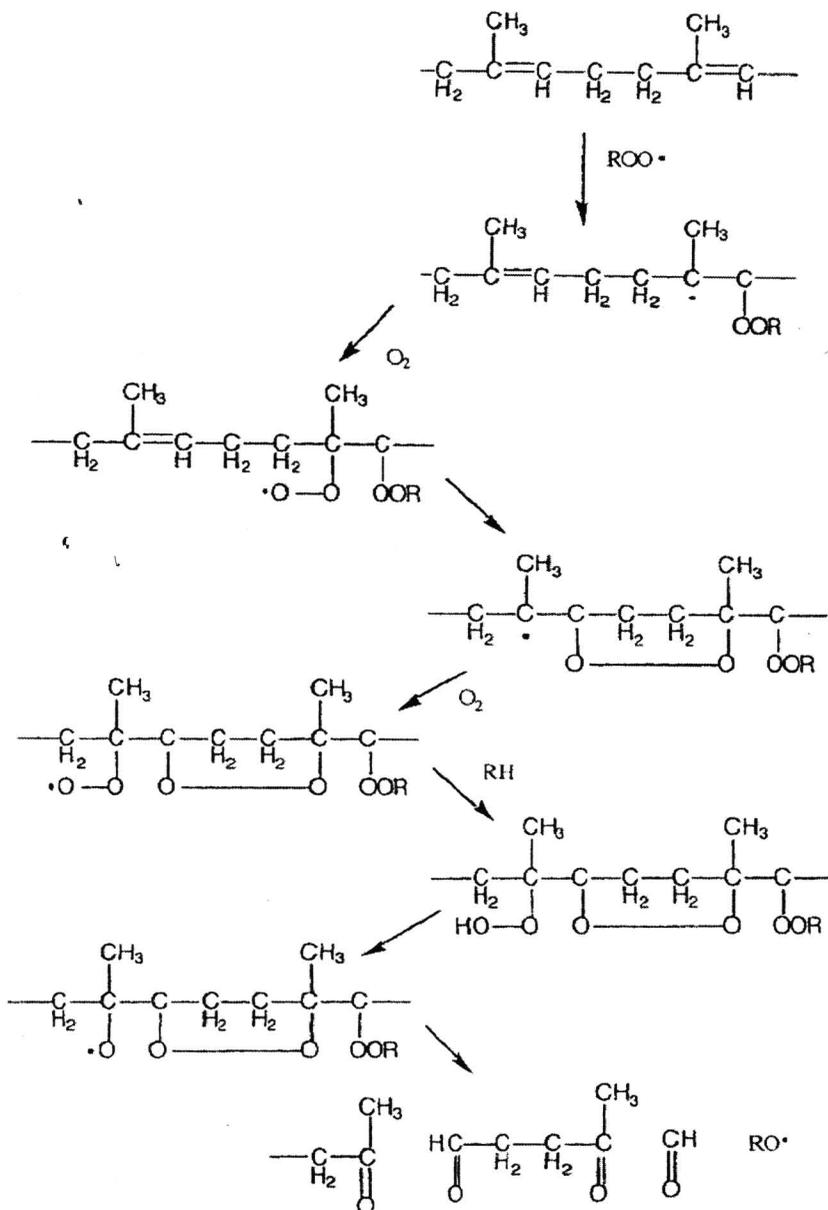


and/or



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับพันธะกำมะถันในยางธรรมชาติ [20]

ปฏิกิริยา Autooxidation เชื่อกันว่าเกิดผ่านกระบวนการ Intramolecular radical additions ซึ่งทำให้สามารถเกิดสารโมเลกุลเล็กขึ้น เช่น Leuvalnic aldehyde และ limonene ดังรูปที่ 2.18 โดยในขั้นตอนแรกของการเกิดการเสื่อมสภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการขาดออกของสายโซ่เกิดอย่างรวดเร็วและเกิดสารโมเลกุลเล็กจำนวนมากทำให้ผิวของยางที่เกิดออกซิเดชันขณะนั้นมักมีลักษณะเหนียว (Sticky)



รูปที่ 2.18 การเกิดผลิตภัณฑ์สาร โมเลกุลขนาดเล็กจากการเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติ [20]

2.1.15 การบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน (Heat aging)

ในสถานะอุณหภูมิที่สูง (Elevated temperature) ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเร็วขึ้น และเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงมีวิธีทดสอบมาตรฐานที่เรียกว่า การเร่งอายุ



ด้วยความร้อน หรืออุณหภูมิสูง (Heat aging) เพื่อประเมินสมบัติของยางเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น โดยการทดสอบคือนำยาง ไปอบในตู้อบที่มีอากาศไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ หรือ อบภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่มีความดันสูง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่น ยางธรรมชาติ อบที่ 70°C สำหรับยางสังเคราะห์ อบที่ 100°C หรือ 120°C เป็นต้น แต่ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางที่ผ่านการอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ กับระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของยางขณะใช้งานจริง ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แท้จริงได้

นอกจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเกิดได้เร็วขึ้น และเร่งให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นแล้ว โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อของยาง ได้แก่ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ เนื่องจากไอออนของโลหะเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการทำให้เกิด Chain scission ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง แสงแดดและโอโซนในบรรยากาศ สามารถทำให้ผิวหนังของยางเกิดการรอยแตก และเสื่อมสภาพได้เช่นเดียวกับออกซิเจน ยางที่มีเขม่าดำ (Carbon black) เป็นองค์ประกอบสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพจากรังสี UV (Ultraviolet radiation) ที่มีในแสงแดดได้ โดยเขม่าดำจะดูดกลืนรังสี UV อย่างไรก็ดีตามในทางปฏิบัติ ยางส่วนใหญ่มักจะถูกใช้งานในที่ร่ม ซึ่งมีความเข้มข้นของรังสีน้อยกว่ากลางแจ้ง โอโซนปริมาณเล็กน้อยในบรรยากาศ ซึ่งมีความเข้มข้นในระดับตั้งแต่ 1 ส่วนในร้อยล้านส่วน (1 ppbm) หรือถ้าคิดเป็นปริมาตรของโอโซนต่อปริมาตรของอากาศทั้งหมดเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อหนึ่งร้อยลูกบาศก์เมตรสามารถทำให้ผิวหนังของยางที่มีความเครียด (Strain) เนื่องจากมีแรงมาทำให้รูปร่างของยางเปลี่ยนไปจากเดิม เกิดรอยแตกได้ โดยลักษณะของรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งจะแตกต่างจากรอยแตกที่เกิดจากแสงแดด ที่มีลักษณะกระจายคล้ายรอยแตกของผิวหนังคน ซึ่งขาดน้ำในหน้าแล้ง ขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกที่เกิดจากโอโซน จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เพิ่มขึ้นของยางที่มีการนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม เช่น แผ่นยางรองคานสะพาน แผ่นยางรองฐานของเครื่องจักรกล เป็นต้น การเสื่อมสภาพของยางเหล่านั้น เนื่องจากโอโซน และออกซิเจน เป็นปัจจัยในอันดับต้น ๆ ที่ใช้ในการตัดสินใจความทนทาน หรืออายุของยางชิ้นนั้น โอโซนจะทำปฏิกิริยากับยางเฉพาะที่ผิวหนังของยางเท่านั้น ในขณะที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับยางทั่วทั้งก้อน โดยจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่ผิวด้านนอกของยางก่อนแล้วค่อย ๆ ซึม และ แพร่เข้าไปภายใน อย่างไรก็ตาม การซึมผ่านของออกซิเจนถูกจำกัดโดยความหนาของยาง ผิวด้านของยางส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้ว ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกัน (Protective layer) ไม่ให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อยางภายในที่เหลืออยู่ได้ จึงทำให้ยางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก



2.1.16 การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อม โดยวิธีเร่งสภาวะด้วยเครื่อง

QUV Accelerated Weathering

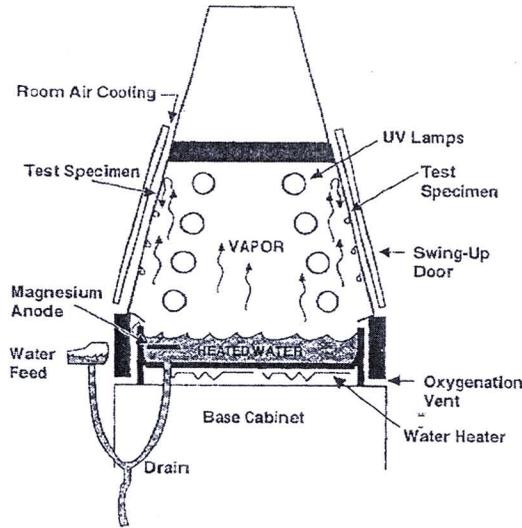
เมื่อมีการผลิตหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆขึ้น การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้งานมีความสำคัญมาก การทดสอบที่สภาวะการใช้งานโดยนำผลิตภัณฑ์ไปวางไว้กลางแจ้ง (Outdoor test) และสังเกตผลที่เกิดขึ้นจะต้องใช้เวลานานหลายปีจึงจะทราบผลการทดสอบ ดังนั้นเพื่อเป็นลดเวลาการทดสอบให้เร็วขึ้นจึงทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องเร่งสภาวะ เครื่องเร่งสภาวะนี้ได้ออกแบบมาเพื่อให้ขึ้นทดสอบสัมพันธ์กับปัจจัยหลักที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพนั้น โดยตรง ทำให้สามารถทราบผลที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น

รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นปัจจัยแรกที่มีความสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติก ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสียูวี (Ultraviolet, UV) นั้นมีพลังงานสูงสามารถทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติกทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ การทดสอบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ ขึ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงยูวีเอ (315-400 นาโนเมตร) หรือยูวีบี (280-315 นาโนเมตร) สลับกับความชื้นที่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ปัจจัยความชื้นในสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์สามารถทดสอบโดยขึ้นทดสอบจะได้รับความชื้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำในถาดเก็บน้ำด้านล่างของตัวเครื่องเร่งสภาวะ เมื่อน้ำกลายเป็นไอจนในห้องทดสอบมีความชื้นถึงระดับอิ่มตัว ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อมากระทบกับความเย็นที่ผิวตัวอย่างจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนผิวตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.19

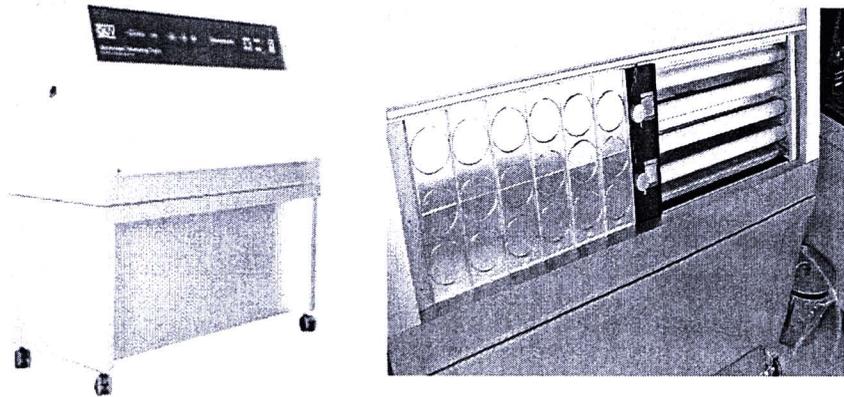
ส่วนความร้อนซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เสริมให้เกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เครื่องเร่งสภาวะได้ออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการทดสอบให้สูงกว่าสภาวะแวดล้อมปกติทั้งในช่วงที่ให้แสงยูวีและช่วงที่ให้ความชื้น

การทดสอบการเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G 154 ซึ่งนอกจากผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติกแล้วยังสามารถทดสอบวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic material) ได้ ทั้งนี้ขึ้นทดสอบต้องหนาไม่เกิน 20 มิลลิเมตร หลังการทดสอบทำการตรวจพินิจลักษณะภายนอก เช่น การแตก การขึ้นเหลือง ความมันวาว การเปลี่ยนแปลงของสี หรือนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านแรงดึง และการยึดตัวเมื่อขาด เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบชุดควบคุมที่ถูกเก็บไว้ในที่มีดในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง การเลือกสภาวะการทดสอบขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานจริงของตัวอย่าง เช่น พลาสติก ABS ที่ใช้ทำตู้

รับจดหมาย จะใช้สภาวะทดสอบคือให้แสงยูวีบีความยาวคลื่นหลัก 313 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงสลับกับไอน้ำความแน่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สลับกันไปจนครบเวลา 1 สัปดาห์



รูปที่ 2.19 ภาพตัดขวางของเครื่องเร่งสภาวะแสดงการให้ความชื้นสัมพันธ์กับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.20 เครื่องเร่งสภาวะ QUV Accelerated Weathering

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการสามารถบอกความทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง และเป็นตัวบ่งชี้หรือแนวโน้มการคงทนของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ทำให้สามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ได้เหมาะสมกับงานและเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ให้คงทน



และมีอายุการใช้งานยาวขึ้น นับเป็นประโยชน์ของการใช้เครื่องเร่งสภาวะ ทำให้ประหยัดเวลาการทดสอบ และหากคำนึงถึงสภาพความเป็นจริง ปัจจัยอื่นๆ ก็มีผลต่อความทนต่อสภาพแวดล้อมนั้นๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น ความแตกต่างกันของดินฟ้าอากาศในแต่ละปี ตำแหน่งที่ตั้งของบริเวณที่ใช้งานโอเต็มจากทะเลและปัจจัยร่วมในการเกิดการเสื่อมสภาพอื่นๆ รวมทั้งลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2.2 เอกสารบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

ฉรรค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ [3-4] ศึกษาเกี่ยวกับการนำถ้ำลอยเป็นสารเสริมแรงในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ โดยศึกษาการใช้ซิลิกาจากผงถ้ำลอย และการปรับปรุงผิวผงถ้ำลอย ที่สัดส่วนปริมาณซิลิกาจากถ้ำลอยเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า และทำการปรับปรุงผิวสารเสริมแรงทั้งสองชนิดด้วยสารคู่ควบซิลิโคน คือ บิส-(3-ไตรเอททอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลเฟน (Si69) และได้ทดสอบสมบัติการคงรูปยาง สมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกลพลวัต และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ผลการวิจัยโดยรวม พบว่า เมื่อนำถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวมาใส่ในยางผสม NR/SBR ทำให้เวลาในการคงรูปยางลดลง และสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ส่วนการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้าด้วยสารคู่ควบซิลิโคน Si69 ความเข้มข้นที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิกา ที่สัดส่วนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ 50 : 50 พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าเพิ่มขึ้น เวลาในการคงรูปยางมีแนวโน้มลดลงและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ในกรณีการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ลดลง

วัชรพงศ์ แซ่เต๋ และคณะ [21] ศึกษาเกี่ยวกับโฟมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก โดยใช้กระบวนการไดนามิกสวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติด้วย Dicumylperoxide (DCP) ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งยางมีการกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทำให้เกิดโฟมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกโดยใช้สารพองฟู (blowing agent) ชนิด Azodicarbonamide (ADC) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโฟมกับปริมาณของสารพองฟู และปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น พบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับยางธรรมชาติที่อัตราส่วน 40 : 60 มีความแข็งแรงสูงสุด และเมื่อปริมาณของ พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่การยืดตัวของโฟมยางลดลง

Ghazali และคณะ [22] ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอ ที่ปริมาณสัดส่วน 60 : 40 ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง (lowing agent) ชนิด AZO-R และ AZO-K ที่มีสาร Azodicarbonamide ที่ปริมาณ 64.5 และ 67.5 % โดยใช้การแผ่รังสีของลำอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 20-200 kGy เพื่อให้เกิดการ Crosslinking ในวัสดุโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 160-180°C และ 190-210°C ตามลำดับ และตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโพลีเมอร์กับปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง พบว่าการเติมสารฟองฟูชนิด AZO-R ในวัสดุผสมต้องใช้ปริมาณความเข้มของลำแสงอิเล็กตรอนมากกว่า 100 kGy ส่วนการเติมสารฟองฟูชนิด AZO-K ต้องใช้ปริมาณความเข้มของลำแสงอิเล็กตรอน ระหว่าง 40-60 kGy

Lin และคณะ [23] ศึกษาการเติมเส้นใยสังเคราะห์โพลีเอไมด์ลงในยางธรรมชาติ โดยมีการเติมสารฟองฟูที่ปริมาณต่างๆ ให้มีลักษณะขึ้นงานแบบไมโครเซลลูลาร์โพลีเมอร์ โดยเลือกเส้นใยแบบปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวในยางโพลีเมอร์ ทำให้เกิดเซลล์ที่อยู่บริเวณรอบๆ เส้นใย แต่ไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเนื้อโพลีเมอร์เมื่อเติมเส้นใยที่ปรับปรุงผิว ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสแรงอัด ความเค้นแรงอัด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิวทำให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

Choi [24] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและสมบัติการคงรูปยางของซิลิกาที่เติมในสารประกอบยางเอสบีอาร์ โดยการทดสอบการเติมสารเติมแต่งลงในยางเอสบีอาร์ 2 แบบ คือแบบซิลิกาอย่างเดียวดังแต่ 20-70 phr และแบบซิลิกากับผงเขม่าดำ โดยปริมาณสารตัวเติมรวมทั้งหมดเท่ากับ 80 phr สำหรับสมบัติด้านการคงรูปยาง พบว่า แบบการเติมซิลิกาอย่างเดียวยังทำให้เวลาในการคงรูปยางไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับการเติมแบบซิลิกากับผงเขม่าดำทำให้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่วนพฤติกรรมการไหลของยาง พบว่า ทั้งการเติมซิลิกาอย่างเดียวและการเติมซิลิกาและผงเขม่าดำทำให้แรงบิดต่ำสุดและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วง 50-70 phr ค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นสูงกว่าในช่วง 20-40 phr เนื่องจากซิลิกามีกลุ่มไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลที่ผิวอนุภาคและเกิดการยึดเกาะกันมากขึ้น

Kruger และคณะ [25] ศึกษาการใช้ถั่วลอยเป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ โดยใช้ถั่วลอยเกรดการค้า 2 เกรด คือ Plasfill 5 และ Plasfill 15 เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (Kulu 15 และ Kulu 5) และดินขาว (Kaolin 5) ที่ปริมาณ 50 100 และ 150 phr โดยทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ พบว่าการเติมถั่วลอยลงในยางธรรมชาติทำให้อย่างมีค่าความหนืดลดลง อนุภาคของถั่วลอยสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับยางได้เร็วและยังผลิตได้ง่ายกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่น เนื่องจากอนุภาคมีลักษณะที่กลม



และละเอียดมากจึงทำหน้าที่เสมือนกับเป็นสารหล่อลื่นเมื่อทำการบดผสมกับยาง ในขณะที่การเติมถ้ำลอลยลงในยางธรรมชาตินั้นไม่มีผลกับกระบวนการคงรูปของยาง สำหรับสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีถ้ำลอลยเป็นสารเติมแต่งมีค่าไม่แตกต่างกับการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ [26] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา (Silica, SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) ที่มีต่อสมบัติการผสม สมบัติเชิงกล กายภาพและโครงสร้างจุลภาค ของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโพล (Cellular natural rubber) ซึ่งผ่านกระบวนการคงรูปแบบทั่วไป (Conventional vulcanization) อุณหภูมิคงรูปที่ 160°C และเวลาให้ยางคงรูปที่ 7 นาที และใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Oxybis(benzene sulphonyl hydrazide) (OBSH) ผลการทดลองพบว่า ยางโพลที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการบวมตัวในโทลูอีนที่สภาวะสมดุลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีของยางโพลที่ผสมซิลิกาในปริมาณคงที่ 20 phr ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 phr ซึ่งทำให้สามารถคงสมบัติที่ต้องการ และไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวใน โทลูอีนที่สภาวะสมดุล ปริมาณสารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 20 phr

สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ [27] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดภายในพอลิเอททิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ที่มีลักษณะโพล ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมใน LDPE โพล ตั้งแต่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวที่จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงอัด (Flexural strength) และทำการศึกษาโครงสร้างภายใน ดังนี้ ปริมาณและขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานโพล พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมลงใน LDPE โพล ที่ 10%wt ค่าความต้านแรงดึงและความต้านทานต่อแรงดัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและการยืดตัวที่จุดขาดก่อนการแตกหักที่สูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณเส้นใยแก้วที่ 20 และ 30%wt ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) และเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวที่ได้รับแรงดึง ซึ่งเป็นผลมาจากกรรมวิธีการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีด เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน LDPE โพล ที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณต่างๆ กัน พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบปิด (Closed cell) ตลอดจนปริมาณและขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยแก้วที่ผสมลงในพอลิเมอร์ทำหน้าที่เสมือน Nucleating agent ช่วยในการเกิดรูพรุนได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นน้อย และมีน้ำหนักเบา ใกล้เคียงกับชิ้นงานพอลิเอททิลีนโพล ที่ไม่มีการผสมเส้นใยแก้ว แต่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า จึงมีความเหมาะสมที่น่าไปประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุรับแรงเชิงกลด้านการกระแทก

Matuana และคณะ [28] ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการผลิตและรูปร่างเซลล์ของ โฟมวัสดุผสม PVC กับเส้นใยไม้ พบว่า การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น สาร Surface treatment ของเส้นใยไม้ เวลาของการขึ้นรูป และอุณหภูมิขึ้นรูปโฟมนั้นส่งผลต่อรูปร่างเซลล์ของโฟมวัสดุผสม โดยที่เมื่อการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นนั้น ทำให้ความหนืดลดลงและเกิดปริมาณก๊าซมากขึ้น ส่วนการเติมสาร Surface treatment นั้นช่วยในการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยไม้กับ PVC ให้ดีขึ้น ซึ่งป้องกันการรั่วของก๊าซ โดยที่ 2 ตัวแปรนี้ทำให้วัสดุมีความเป็นเซลล์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับเวลาในการขึ้นรูป และอุณหภูมิของการขึ้นรูปโฟมนั้น มีผลต่อขนาดของเซลล์ ซึ่งเวลาในการขึ้นรูปเมื่อเพิ่มขึ้น ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีการรวมตัวของเซลล์เข้าด้วยกัน แต่สำหรับอุณหภูมิของการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นค่อยลดลง เนื่องจากในช่วงแรกเซลล์มีการรวมตัวกัน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเริ่มรั่วออกจากเซลล์ จึงทำให้มีขนาดของเซลล์ลดลง

Jo และ Naguib [29] ได้ทำการศึกษาโฟมเชิงประกอบในระดับนาโนของ HDPE/Clay โดยศึกษาปริมาณ Nano clay และสถานะการเกิดโฟมที่มีต่อสมบัติด้านการต้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนี้ โดยตัวอย่าง Microcellular-closed cell nanocomposite เตรียมโดยที่มีปริมาณของ Nano clay ที่สัดส่วน 0.5 0.1 และ 2.0 %wt ทำให้เกิดฟองโดยใช้ก๊าซ Carbon dioxide พบว่า ผลของปริมาณ Clay ที่ใส่ลงไปวัสดุ จะทำให้ขนาดของเซลล์ ปริมาตรในการขยายตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Clay มากขึ้น เมื่อสังเกตสมบัติเชิงกลในด้านความต้านทานแรงดึง สัดส่วนค่าการยึดดึงสูงสุดสูงกว่าการใส่ clay ลงไปทำให้ทั้งใน Nanocomposite และ Nanocomposite foam มีสมบัติด้าน Elastic modulus และ Tensile strength at yield ดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง โฟม HDPE ที่เติม Clay กับไม่ได้เติม Clay พบว่า โฟม HDPE ที่เติม Clay มีความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่า ทั้งนี้ที่ปริมาณการเติม Clay ลงไป 5.0%wt สมบัติเชิงกลของทั้ง Nanocomposite และ Nanocomposite foam เพิ่มขึ้นมากที่สุด

Sombatsompop และ Lertkamolsin [30] ศึกษาผลกระทบของสารทำให้เกิดฟองและสารเติมแต่งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในด้านผลของสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Azodicarbonamide (ADC) และ Oxybis(benzene sulphonyl hydrazide) (OBSh) ซึ่งมีการแตกตัวที่อุณหภูมิ 150-190°C และ 150-170°C ตามลำดับ โดยเติมสารทำให้เกิดฟองแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยจะทำการสังเกตความหนาแน่นของโฟมและพฤติกรรมการบวมตัว ผลจากพฤติกรรมการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองแต่ละชนิดจะมีผลให้พฤติกรรมการบวมตัวที่แตกต่าง พบว่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSh เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสารทำให้เกิดฟอง ADC โดยที่สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSh มีช่องว่างในยางได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ADC ซึ่งนั่นทำให้การบวมตัวจาก OBSh มีมากกว่าอัตราการบวมตัวจากการใช้ ADC ยางโฟมส่วนใหญ่มีสมบัติการทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [31] ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำและพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคอีทahunที่ใช้แล้วเป็นสารเติมแต่ง ทำการทดสอบแรงดึง เบอร์เซนด์การคืนรูปของชิ้นงาน การทดสอบด้วยแรงดัดอย่างค่อเนื่อง และการบวมตัวของชิ้นงานยาง พบว่า การใช้อนุภาคของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคเหมาะสม อยู่ระหว่าง 20-30 phr สำหรับการใส่เขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสม 50-60 phr ในกรณีที่ต้องการให้ชิ้นงานคงความเป็นอีลาสติค การเติมแต่งพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าการใช้เขม่าดำในช่วงความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่างๆ ส่วนระดับการบวมตัว (Swelling ratio) ของชิ้นงานยางที่มีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ ขึ้นกับความยืดหยุ่นของชิ้นงานยางและระดับของการเสริมแรงระหว่างโมเลกุลของยางกับสารเติมแต่ง

Findik และคณะ [32] ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมีสารเสริมแรงเป็นผงเขม่าดำสองเกรด คือ ISAF และ HAF พบว่า ค่า Hardness ของเกรด ISAF มีค่ามากกว่าเกรด HAF จนถึงอัตราส่วน NR/SBR 40 : 60 แต่หลังจากอัตราส่วนนี้จะลดลงต่ำกว่าค่าความแข็งของเกรด HAF ที่เพิ่มอิทธิพลตามอัตราส่วน SBR ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า Elastic modulus ของยางผสมที่เติมเกรด HAF จะมีค่ามากกว่าเกือบทุกอัตราส่วน แต่ค่า Tensile strength ของเกรด ISAF จะมีค่ามากกว่าเกรด HAF ในทุกอัตราส่วน ส่วนผลต่อ Scorch time และ Cure time นั้น เกรด ISAF ไม่ต่างกันในทุกอัตราส่วน แต่ที่เติมเกรด HAF ค่า Scorch time และ Cure time มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน SBR ที่เพิ่มขึ้น

Chand [33] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ภาพถ่าย SEM รอยหักของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอสเตอร์กับถั่วลอ ในการศึกษาทดลองนี้ใช้ถั่วลอที่มีขนาด 15-75 ไมครอน และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยการหล่อ โดยมีการเติมถั่วลอลงในพอลิเอสเตอร์ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ค่าความต้านแรงดึง และความทนแรงกระแทกมีค่าน้อยลงเมื่อมีปริมาณถั่วลอมากขึ้น และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่า ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่รอยต่อระหว่างถั่วลอกับพอลิเอสเตอร์

Stieber และ Hannon [34] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Azodicarbonamide treatment for carbon black and rubber compounds โดยพบว่า Azodicarbonamide สามารถช่วยการยึดเกาะระหว่าง ผงเขม่าดำและยางได้ ซึ่งผลจากการเกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้นนี้ทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้นในด้านพลวัต (dynamic properties) เช่นการลด Hysteresis แต่สมบัติการ Scorch จะเกิดได้เร็วขึ้น โดยประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางรถยนต์ และยางฉาบผ้าใบ โดยอัตราการใช้สารเติมแต่ง Azodicarbonamide จะใช้ที่ปริมาณ 0.1 – 20 phr และทำการผสมที่อุณหภูมิที่มากกว่า 160 °C



Omura [35] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Material for a gasket coated with foam rubber โดยใช้ยางโฟมเคลือบวัสดุโลหะทั้งสองด้านบนและล่างเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการยืดหยุ่น และลดการเกิดการบวมตัวกรณีการใช้ยางโฟมเพียงอย่างเดียว โดยยางใช้ยางไนไตรล์ซึ่งมีอัตราการบวมตัวสูงเมื่อใช้งานกับน้ำมัน และพบว่าสมบัติของยางไนไตรล์ที่ใช้เคลือบวัสดุควรมีสัดส่วนของ Acrylonitrile ในยางสังเคราะห์ที่ปริมาณน้อยกว่า 30% และค่าความหนืดมูนิควรมีค่ามากกว่า 60 และสามารถเพิ่มสารเติมแต่งที่เป็น inorganic fillers ได้แก่ clay หรือ calcium carbonate ที่อัตราส่วน 0 – 80 phr

Nord และคณะ [36] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Cushioned rubber floor mat and process พัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทยางรองพื้นกันกระแทก (Cushion) โดยมีเป้าหมายให้สามารถดักจับฝุ่นได้ โดยการทำวัสดุเป็นสองชั้นที่ต่างกัน โดยชั้นด้านบนเป็นยางตัน (Solid rubber) และชั้นด้านล่างเป็นยางโฟม (Foam rubber) ซึ่งชั้นที่เป็นยางตันนั้นมีส่วนที่ยื่นออกมาเพื่อดักจับฝุ่น ใช้วัสดุชนิดยาง SBR EPDM หรือ NBR และส่วนยางโฟมชั้นล่างทำหน้าที่รับแรงกระแทกและต้องมีสมบัติเป็นเซลล์ปิดเพื่อให้มีการกระดอนที่ดี และไม่สูญเสียความแข็งแรงหรือมอดูลัสหลังการทำความสะอาด ใช้วัสดุชนิดยาง NBR SBR carboxylate-NBR carboxylate-SBR หรือยางผสม NBR/SBR และความหนาของชั้นโฟมควรมีความหนาอย่างน้อย 25 mm

Guriya และ Tripathy [37] ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยาง Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer (EPDM) ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) และผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่าการเติมผงเขม่าดำส่งผลต่อขนาดเซลล์เฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากผิวของผงเขม่าดำที่มีสมบัติเป็นเบส และการเติมผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อความหนาแน่นของการเกิดฟองที่ลดลง และการเกิดเป็นเซลล์ปิดมีผลทำให้ยางมีค่ามอดูลัสที่สูงขึ้นที่การดึงยืดสูงๆ และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่ามอดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าลดลง พฤติกรรม Stress relaxation มีค่าที่ขึ้นกับปริมาณสารทำให้เกิดฟองซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟองก๊าซ

Kim และคณะ [38] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดฟองของสารทำให้เกิดฟองชนิด N,N'-dinitroso pentamethylene tetramine (DPT) และปริมาณการเติมผงเขม่าดำ ที่มีต่อพฤติกรรมการสึกตัว และ สมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันพร้อมทั้งทำให้เกิดโฟมคือ 155°C และความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำให้ยางสึกตัว และสมบัติความต้านทานการฉีกขาด ความต้านแรงดึง มอดูลัสแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น แต่การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าลดลง