

เทคโนโลยียางผสม: เทคนิค ปัญหา และวิธีการแก้ไข

ชนากา นิมลสุวรรณ

บทนำ

เทคโนโลยียางผสม (rubber blend technology) คือ การนำยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกัน เพื่อให้ได้ยางผสมใหม่ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ เทคโนโลยียางผสมมีการใช้กันมานานแล้วในอุตสาหกรรมยาง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ 1) ให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ โดยได้สมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดมารวมกัน ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะไม่สามารถหาได้จากยางเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น การผสมยางธรรมชาติ (NR) ที่มีสมบัติไม่ทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและโอโซนกับยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ที่ทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดี เพื่อให้ได้ยางธรรมชาติที่สามารถทนการเสื่อมสภาพได้ดีขึ้น หรือ 2) เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้วัสดุที่มีราคาถูกผสมเข้าไปเพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุที่มีราคาแพงลง หรือ 3) ปรับปรุงสมบัติการแปรรูป (processing properties) ของยางเพื่อให้กระบวนการผลิตสามารถทำได้ง่ายขึ้น

การเตรียมยางผสม

การเตรียมยางผสมสามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่ การผสมในรูปของน้ำยาง (latex blending) การผสมในรูปของสารละลาย (solution blending) และการผสมในรูปของยางแห้ง (dry blending)

1. การผสมในรูปของน้ำยาง

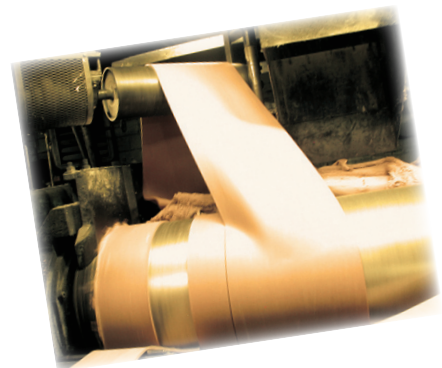
เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากของผสมสามารถจะเกิดการกระจายตัวได้ดีและเข้ากันได้อย่างทั่วถึง และใช้พลังงานน้อยในการผสม แต่จะต้องให้ความสนใจกับการใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) หรือสบู่ ทั้งชนิดและปริมาณเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางเสียสภาพและเกิดการจับตัวเป็นก้อนเสียก่อน อย่างไรก็ตามการผสมในรูปของน้ำยางนี้มีข้อเสียในเรื่องของต้นทุน เพราะการจับตัว การเอาน้ำออก และการทำให้แห้งล้วนแล้วแต่เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ต้นทุนสูง

2. การผสมในรูปของสารละลาย

เป็นการนำยางมาผสมกันในรูปของสารละลาย จากนั้นจึงค่อยแยกยางผสมนี้ออกจากตัวทำละลาย โดยการตกตะกอนด้วยสารที่ไม่ใช่ตัวทำละลายหรือทำให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมด การเตรียมยางผสมโดยวิธีนี้มีข้อเสียหลายอย่าง ได้แก่ ตัวทำละลายมีราคาแพงและการแยกยางผสมทำได้ยาก การทำให้ยางแห้งต้องใช้พลังงานมากทำให้ต้นทุนสูง อีกทั้งการเตรียมยางผสมไม่สามารถทำในปริมาณมากได้เนื่องจากความหนืดของสารละลายยางจะมีค่าสูงมากหากปริมาณยางที่ละลายมีค่าเกินร้อยละ 5 ของน้ำหนักยาง/ปริมาตรตัวทำละลาย ฉะนั้นการเตรียมยางผสมในรูปของสารละลายนี้จึงมักใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น (ในกรณีที่มีตัวอย่างยางน้อย)

3. การผสมในรูปของยางแห้ง

ยางผสมส่วนใหญ่มักจะเตรียมด้วยวิธีนี้ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และประหยัด โดยสามารถใช้เตรียมเฉพาะยางผสมหรือใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์โดยการผสมยางและสารเคมีเข้าไปด้วยเลย การผสมอาจทำในเครื่องผสมยางแบบปิด เครื่องเอ็กซ์ทรูดหรือเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง



ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของยางผสม

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของยางผสม ได้แก่

1. โครงสร้างพื้นฐาน (morphology)
2. ระบบการวัลคาไนซ์ (vulcanization system)
3. การกระจายตัวของสารเคมีต่างๆ (compounding ingredients distribution)

1. โครงสร้างพื้นฐาน

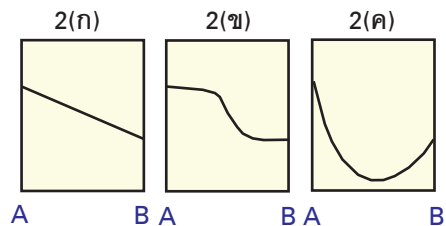
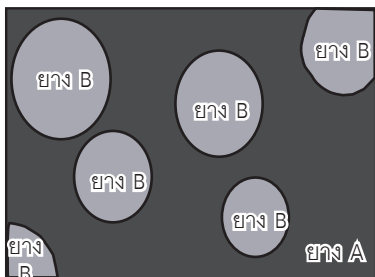
โดยทั่วไปสมบัติของยางผสมจะดีหรือไม่ขึ้นกับ “โครงสร้างพื้นฐาน” ของยางผสมที่มักจะแยกออกเป็นวัฏภาค (phase) ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะพบยางผสมอยู่ในลักษณะที่มียางชนิดหนึ่งกระจายตัว (dispersed phase) อยู่ในเมทริกซ์ (matrix) หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ของยางอีกชนิดหนึ่ง (ดังแสดงในรูปที่ 1) ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ายางส่วนใหญ่จะผสมเข้ากันไม่ได้ (immiscible) เพราะมีความเป็นขั้วต่างกัน

ปกติสมบัติของยางผสมจะขึ้นอยู่กับการเข้ากันได้ของโมเลกุลของยางผสม หากสามารถผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล ของผสมนั้นจะมีสมบัติเป็นไปตาม “กฎของการผสม” (mixture rule) ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) สำหรับยางผสมนั้นโอกาสที่ยาง 2 ชนิดจะผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลแทบจะเป็นไปไม่ได้ ยางส่วนใหญ่จะผสมเข้ากันได้บางส่วน (เช่น ยาง NR กับยาง SBR เนื่องจากมีความเป็นขั้วไม่ต่างกันมาก) หรือผสมเข้ากันไม่ได้เลย (เช่น ยาง NR กับยาง NBR เนื่องจากมีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาก) ยางที่สามารถเข้ากันได้บางส่วนจะมีสมบัติเป็นไปตามรูปที่ 2(ข) และมีขนาดของวัฏภาคกระจายตัวที่เล็กกว่ายางที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ สำหรับยางที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้จะแสดงสมบัติตามรูปที่ 2(ค) และมักจะมีขนาดของวัฏภาคกระจายตัวที่ใหญ่

การผสมให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติดีนั้น วัฏภาคกระจายตัวของยางผสมควรต้องมีขนาดเล็ก กล่าวคือ ยิ่งวัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กมากเท่าใด ยางผสมที่ได้ก็จะมีสมบัติดีขึ้นเท่านั้น ตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐาน (morphology) ได้แก่

1.1 ชนิดของยาง

การที่ยางคู่ผสมนั้นจะสามารถผสมเข้ากันได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของยางที่จะนำมาผสมกัน กล่าวคือ ยางที่จะนำมาผสมกันควรจะมีระดับความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน ยางคู่ผสมนั้นจึงจะสามารถเข้ากันได้ดี ซึ่งเมื่อยางเข้ากันได้ดี แรงตึงผิวระหว่างรอยต่อของวัฏภาค (interfacial tension) ก็จะมีค่าต่ำทำให้ระหว่างการผสมวัฏภาคกระจายตัวนั้นสามารถแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ดีขึ้น ในทางกลับกัน ถ้ายางคู่ผสมมีความเป็นขั้วแตกต่างกันมาก ทำให้แรงตึงผิวระหว่างรอยต่อของวัฏภาคมีค่าสูง วัฏภาคกระจายตัวก็จะแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ได้ยาก ทำให้วัฏภาคกระจายตัวที่ได้มีขนาดใหญ่ สำหรับการดูความเข้ากันได้ของยางนั้นสามารถดูได้จากค่าตัวกำหนดการละลาย (solubility parameter) โดยถ้ายางคู่ผสมมีค่าตัวกำหนดการละลายใกล้เคียงกัน ยางคู่ผสมนั้นก็จะสามารถผสมเข้ากันได้ดี ผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า โพลีเมอร์คู่ผสมที่มีค่าตัวกำหนดการละลายแตกต่างกันน้อยกว่า $0.1 \text{ MPa}^{1/2}$ จะสามารถผสมเข้ากันได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราสามารถเลือกยางคู่ผสมที่มีค่าตัวกำหนดการละลายให้แตกต่างกันได้ไม่เกิน $2 \text{ MPa}^{1/2}$ ก็จะทำให้ยางคู่ผสมนั้นสามารถผสมกันได้ ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ยางธรรมชาติมีค่าตัวกำหนดการละลายใกล้เคียงกับโพลีไอโซพรีนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน (16.9 และ $16.7 \text{ MPa}^{1/2}$) จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ง่ายกว่าการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางชนิดอื่น เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีค่าตัวกำหนดการละลาย $21 \text{ MPa}^{1/2}$



2(ก) เข้ากันได้ในระดับโมเลกุล
 2(ข) เข้ากันได้บางส่วน
 2(ค) ไม่สามารถเข้ากันได้

รูปที่ 1 ภาพภาพแสดงการผสมของยางสองชนิด
 ยาง A เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และ ยาง B เป็นวัฏภาคกระจายตัว

รูปที่ 2 กราฟแสดงสัดส่วนการผสมของยางสองชนิด
 ที่มีต่อสมบัติของยางผสม

ตารางที่ 1 ค่าตัวกำหนดการละลาย (solubility parameter) ของยางชนิดต่างๆ [1]

| ยาง | ค่าตัวกำหนดการละลาย | |
|---|---------------------|-------------------------|
| | MPa ^{1/2} | (cal/cc) ^{1/2} |
| อะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนโคโพลิเมอร์ | 18.0 | 8.9 |
| - 25% | 19.0 | 9.4 |
| - 30% | 20.0 | 9.9 |
| - 39% | 21.0 | 10.4 |
| โพลิไอโซบิวทิลีนไอโซพรีนโคโพลิเมอร์ | 16.3 | 8.0 |
| โพลิคลอโรพรีน | 18.7 | 9.2 |
| | 19.9 | 9.8 |
| โพลิคลอโรไพเรฟลูออโรเอทิลีน | 16.0 | 7.9 |
| โพลิไดเมทิลไซล๊อกเซนอิลาสโทเมอร์ | 15.0 | 7.4 |
| | 16.4 | 8.1 |
| สไตรีนบิวทาไดอีนโคโพลิเมอร์ | 17.0 | 8.4 |
| | 18.1 | 8.9 |
| โพลิเอทิลอะคริเลต | 18.6 | 9.2 |
| เอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (นอร์บอรีน) เทอร์โพลิเมอร์ | 17.1 | 8.4 |
| โพลิไอโซบิวทิลีน | 16.5 | 8.1 |
| โพลิไอโซพรีน | 16.7 | 8.2 |
| ยางธรรมชาติ | 16.9 | 8.3 |

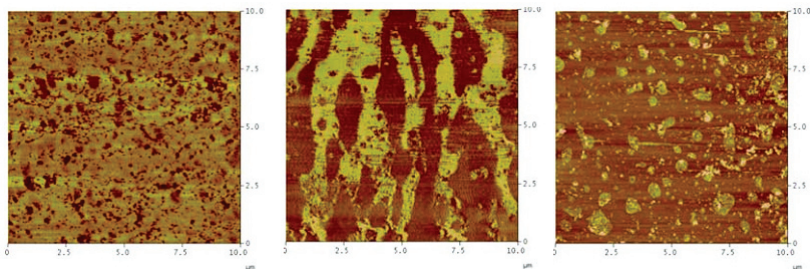
1.2 อัตราส่วนความเหนียวของยางคู่ผสม

อัตราส่วนความเหนียวของยางคู่ผสมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานของยางผสมได้ กล่าวคือ ความเหนียวของยางคู่ผสมนั้นควรจะมีค่าใกล้เคียงกันจึงจะทำให้ยางสามารถเข้ากันได้ดี หากยางที่นำมาผสมกันมีความเหนียวที่แตกต่างกันมาก มักจะให้โครงสร้างพื้นฐานที่มีการแยกวัฏภาคโดยที่ยางที่มีความเหนียวสูงมักจะเป็นวัฏภาคกระจายตัว ส่วนยางที่มีความเหนียวต่ำมักจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง [4] ดังนั้นความเหนียวของยางคู่ผสมที่เลือกมาผสมกันก็ไม่ควรที่จะแตกต่างกันมาก หากต้องการให้ได้ยางผสมที่มีการผสมเข้ากันได้ดี สำหรับการผสมยางสังเคราะห์กับยางสังเคราะห์ด้วยกันนั้นมักไม่ค่อยมีปัญหาในเรื่องของความเหนียว เนื่องจากเราสามารถเลือกเกรดของยางสังเคราะห์ที่มีความเหนียวใกล้เคียงกันมาผสมกันได้ แต่ถ้าจะนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์นั้น ความเหนียวก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ควรต้องพิจารณา เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติมักมีความเหนียวสูงกว่ายางสังเคราะห์อย่างมาก ดังนั้นจึงอาจจำเป็นต้องปรับยางธรรมชาติก่อนที่เรียกว่า มาสติเคชัน (mastication) เพื่อลดความเหนียวยางธรรมชาติลงมาให้ใกล้เคียงยางสังเคราะห์เสียก่อน แล้วจึงค่อยเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป จึงจะทำให้ยางทั้งสองชนิดนั้นผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

1.3 สัดส่วนของยางคู่ผสม

ปริมาณของยางคู่ผสมที่นำมาผสมกันจะมีผลต่อโครงสร้างพื้นฐานด้วยเช่นกัน ยางที่ใช้ในปริมาณมากกว่ามักจะมีแนวโน้มที่จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องหรือเมทริกซ์ ส่วนยางที่ใช้ในปริมาณน้อยกว่ามักมีแนวโน้มที่จะเป็นวัฏภาคกระจายตัว ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) จะเห็นว่ายาง NR (สีอ่อน) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ยาง EPDM (สีเข้ม) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าจะเป็นวัฏภาคกระจายตัว และรูปที่ 3(ค) ยาง EPDM (สีเข้ม) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ยาง NR (สีอ่อน) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเป็นวัฏภาคกระจายตัว ในกรณีที่ยางคู่ผสมมีสัดส่วนการผสมใกล้เคียงกัน (เช่น 50/50) โครงสร้างพื้นฐานที่เป็นไปได้คือยางชนิดใดชนิดหนึ่งจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องและยางอีกชนิดหนึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัว หรือยางทั้งสองชนิดจะเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่องทั้งคู่ (co-continuous) ทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยการผสมอื่นๆ ด้วย (รูปที่ 3(ข))

อย่างไรก็ตามหลักการข้างต้นอาจใช้ไม่ได้เสมอไป มีรายงานว่ายางที่มีปริมาณน้อยแต่มีความหนืดต่ำก็อาจเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้ในขณะที่ยางที่มีปริมาณมากแต่มีความหนืดสูงก็มีโอกาสที่จะเกิดเป็นวัฏภาคกระจายตัวได้แทนที่จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการทำไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) ของยาง NR ผสมกับยาง EPDM ในอัตราส่วน 70:30 ถ้าเป็นยางผสมในระบบปกติ ยาง NR จะเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เนื่องจากมีปริมาณมากกว่า และยาง EPDM ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าก็จะเป็นวัฏภาคกระจายตัว แต่ในกรณีของการทำไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) ซึ่งทำโดยการเติมสารวัลคาไนซ์ลงไปเพื่อทำให้วัฏภาคของ NR เกิดพันธะเชื่อมโยงขึ้นระหว่างการผสมจะทำให้ยาง NR ที่วัลคาไนซ์แล้วมีความหนืดสูงขึ้น และเกิดเป็นวัฏภาคกระจายตัวอยู่ในยาง EPDM ที่มีปริมาณน้อยกว่าได้



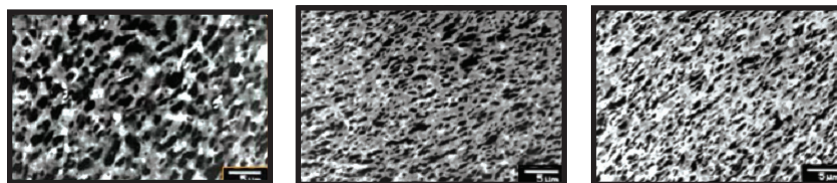
รูปที่ 3 โครงสร้างสัณฐานของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM [2]

รูปที่ 3 โครงสร้างสัณฐานของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง EPDM [2]

1.4 สภาวะที่ใช้ในการผสม

1.4.1 ความเร็วของโรเตอร์

โดยทั่วไปความเร็วในการผสมมีผลต่อโครงสร้างสัณฐานที่ได้ กล่าวคือ ที่ความเร็วของโรเตอร์ต่ำ วัฏภาคกระจายตัวจะมีขนาดใหญ่ (รูปที่ 4(ก)) และเมื่อเพิ่มความเร็วของโรเตอร์สูงขึ้นอนุภาคยางจะได้รับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแตกออกและมีขนาดเล็กลง (รูปที่ 4(ข)) แต่เมื่อความเร็วของโรเตอร์สูงขึ้นไปอีก ขนาดของวัฏภาคกระจายตัวที่ได้ อาจจะไม่เล็กลงไปกว่าเดิม (รูปที่ 4(ค)) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วของโรเตอร์สูงขึ้น (ในตัวอย่างนี้ คือ 60 รอบต่อนาที) แรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อของวัฏภาคยางผสม อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้แรงที่ส่งผ่านไปยังบริเวณรอยต่อของวัฏภาคมีค่าต่ำ จึงไม่สามารถทำให้วัฏภาคกระจายตัวเกิดการแตกออกได้มากขึ้น ขนาดของวัฏภาคกระจายตัวจึงไม่ลดลง นอกจากนี้การที่ความเร็วของโรเตอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความร้อนจากแรงเฉือนสูงขึ้นในระบอบอย่างมาก อนุภาคของยางผสมจะนิ่มและไหลได้ง่ายขึ้น จึงมีโอกาสที่จะมาชนกันและเกิดการรวมตัวกันขึ้น (coalescence) กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้อีกครั้ง (รูปที่ 5)

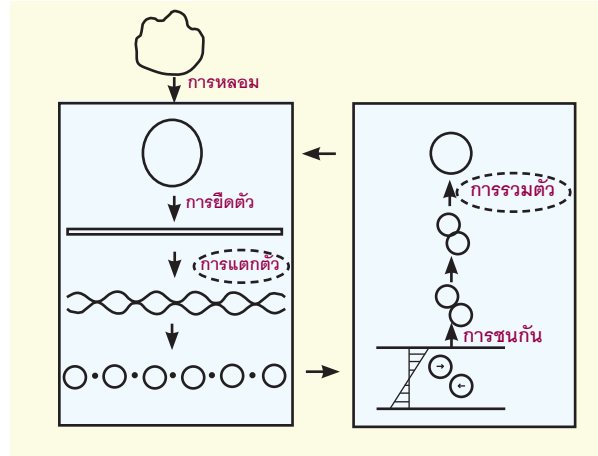


4(ก) 40 รอบต่อนาที

4(ข) 50 รอบต่อนาที

4(ค) 60 รอบต่อนาที

รูปที่ 4 ยางผสมระหว่าง CPE/NR ในอัตราส่วน 50:50 (โดยใช้สารวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์) [3]

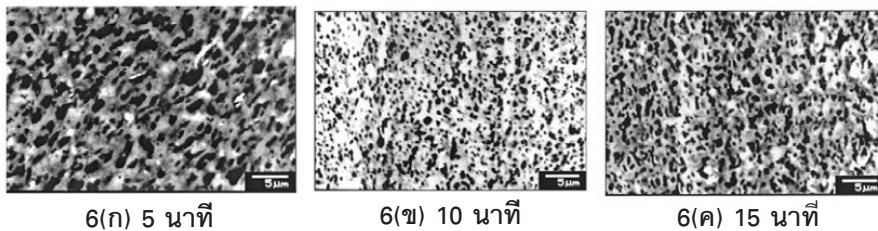


รูปที่ 5 กลไกการแตกตัวและการรวมตัวของอนุภาค

1.4.2 เวลาในการผสม

โดยปกติเมื่อระยะเวลาในการผสมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กลง เนื่องจากแรงเฉือนในระบบจะทำให้อนุภาคยางเกิดการแตกตัว วัฏภาคกระจายตัวที่ได้จึงมีขนาดเล็กลง (รูปที่ 6(ข)) อย่างไรก็ตามขนาดของวัฏภาคกระจายตัวจะไม่ได้เล็กลงไปเรื่อยตามเวลาในการผสมที่เพิ่มขึ้น แต่จะมีขนาดเล็กลงไปจนถึงขนาดหนึ่งเท่านั้น จากนั้นการเพิ่มระยะเวลาจะไม่ส่งผลให้ขนาดวัฏภาคเล็กลงไปได้อีก ในทางตรงกันข้ามขนาดของวัฏภาคกระจายตัวอาจมีขนาดใหญ่ขึ้นได้อีก เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของวัฏภาคเดิม (รูปที่ 6(ค)) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ เพราะเมื่อในระบบมีพลังงานสูงจะทำให้เกิดการชนกันของวัฏภาคกระจายตัวที่ไม่เสถียร และเกิดการรวมกันของวัฏภาคดังกล่าวได้ (ดังแสดงในรูปที่ 5) ซึ่งกระบวนการทั้งสอง (การแตกตัวและการรวมตัว) จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการใดจะสามารถเกิดได้มากกว่า

ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจึงต้องเลือกเครื่องมือและสภาวะที่ใช้ในการผสมให้เหมาะสมและคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น ข้อจำกัดทางด้านเศรษฐกิจที่ว่ายิ่งผสมนานก็ยิ่งสิ้นเปลือง หรือการที่จะเกิดอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากขณะผสมจนทำให้ส่งผลต่อสมบัติของยางผสมได้ เป็นต้น



รูปที่ 6 ยางผสมระหว่าง CPE/NR ในอัตราส่วน 50:50 (โดยใช้การวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์) [3]

2. ระบบการวัลคาไนซ์ของยางคู่ผสม

ระบบการวัลคาไนซ์ของยางคู่ผสมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติของยางผสม ดังนั้นจึงควรเลือกรูปแบบการวัลคาไนซ์เหมือนกัน เช่น ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเหมือนกันหรือใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์เหมือนกัน หากนำยางที่มีระบบการวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกันมาผสมกันอาจก่อให้เกิดปัญหาการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงได้ เช่น การผสมยาง NR ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันกับยาง EPDM ที่วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ ซึ่งการผสมดังกล่าวจะทำให้ยางคู่ผสมนั้นมีความแตกต่างในอัตราการวัลคาไนซ์มาก ส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติที่ด้อยลง

3. การกระจายตัวของสารเคมีต่างๆ ในวัฏภาคของยางผสม

สารเคมีต่างๆ เช่น สารตัวเติม สารช่วยการแปรรูป สารวัลคาไนซ์ สารต้านออกซิเดชัน ที่เติมเข้าไปในยางผสม ล้วนแล้วแต่มีผลต่อสมบัติของยางผสม ทั้งนี้เป็นเพราะสารเคมีเหล่านี้มีความเป็นขั้วแตกต่างกัน ทำให้มีความชอบที่จะกระจายตัวในวัฏภาคของยางต่างชนิดกันแตกต่างกัน เพราะโดยปกติสารเคมีเหล่านี้จะชอบกระจายตัวในยางที่มีขั้วใกล้เคียงกับมันมากกว่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เมื่อเติมสารเคมีเหล่านี้ลงไป ในยางผสมจะเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอโดยพบว่าจะเข้าไปอยู่ที่วัฏภาคใดวัฏภาคหนึ่งมากกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางผสมที่ได้

สารเคมีที่จะมีผลมากต่อสมบัติของยางผสม เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันในแต่ละวัฏภาคของยาง ได้แก่ สารวัลคาไนซ์ (กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยา และสารกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา) เนื่องจากปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์มีผลอย่างมากต่อโครงสร้างของยางที่ได้ และสารตัวเติมเสริมแรง (เช่น คาร์บอนดำและซิลิกา) ซึ่งใช้ในปริมาณมากและมีผลมากต่อการเสริมแรงยาง ส่วนสารเคมีที่ใช้ในปริมาณน้อย เช่น สารช่วยการแปรรูป สารต้านออกซิเดชัน จะไม่ค่อยมีผลมากนักต่อสมบัติของยางผสม แม้ว่ากระจายตัวในแต่ละวัฏภาคของยางได้ไม่เท่ากัน

3.1 การกระจายตัวของสารตัวเติม (filler distribution)

สารตัวเติมที่นิยมใช้ในยาง เช่น ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต และเคลย์ มักจะเติมลงไปเพื่อลดต้นทุนการผลิตเป็นหลัก ในขณะที่เขม่าดำและซิลิกาซึ่งจัดเป็นสารตัวเติมเสริมแรง เมื่อใส่เข้าไปในยางจะช่วยให้เกิดพันธะที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น จากการศึกษาของ Corrish และ Palmer [4] พบว่ายางต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการรับปริมาณสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางคอมพาวด์ได้แตกต่างกัน ดังนั้นการจะทำให้สารตัวเติมกระจายตัวเท่ากันในแต่ละวัฏภาคจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติของยางผสม

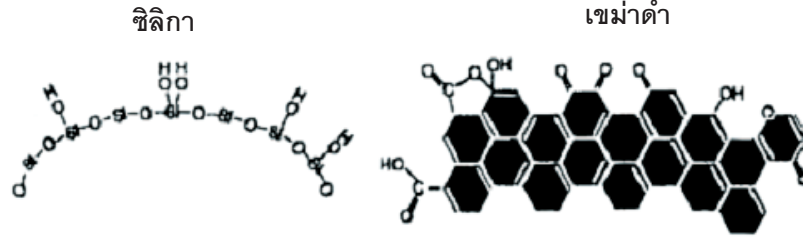
เขม่าดำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ เฟอร์เนสแบล็ก (furnace black) ชาแนลแบล็ก (channel black) เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) และอะเซทิลีนแบล็ก (acetylene black) ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกันทั้งขนาดอนุภาค พื้นที่ผิว โครงสร้างสัณฐาน ชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เช่น -OH, -COOH, -SH เป็นต้น ดังนั้นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางและเขม่าดำจึงขึ้นอยู่กับทั้งโครงสร้างทางเคมีของยางรวมถึงชนิดและโครงสร้างของเขม่าดำ

Ayala และคณะ [5] ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยาง 4 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวโทล (IIR) และยางไนไทรล์ (NBR) พบว่าอันตรกิริยาของเขม่าดำในยาง SBR > NBR > NR > IIR ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นขั้วและความเสถียรทางกล-เคมีของยาง ความแตกต่างของอัตราการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยางต่างชนิดกันอาจจะนำไปสู่การกระจายตัวของเขม่าดำที่ไม่สม่ำเสมอในยางผสม ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางเหล่านั้น

Callan และคณะ [6] ได้ศึกษาการกระจายตัวของเขม่าดำกับยางผสมชนิดต่างๆ ในสัดส่วน 50:50 พบว่าสามารถจะเรียงลำดับความชอบของเขม่าดำที่จะกระจายตัวในยางได้ดังนี้ ยาง BR > SBR > CR > NBR > NR > EPDM และ IIR ตามลำดับ และเขม่าดำจะเคลื่อนย้ายจากยางที่มีความอึดตัวไปยังยางที่ไม่อึดตัว (มีพันธะคู่ในโมเลกุล) นอกจากนี้ความหนืดของยางและวิธีการผสมก็ยังมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของเขม่าดำด้วย Ashida [7] พบว่าเมื่อเติมเขม่าดำ HAF ลงไปในยางผสมมาสเตอร์แบดจ์ BR/IR ในช่วงแรกของการผสม เขม่าดำมีแนวโน้มจะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของ IR มากกว่า แต่เมื่อผสมเสร็จแล้วพบว่าปริมาณเขม่าดำจะเข้าไปอยู่วัฏภาคของ BR มากกว่า แต่ในการทดลองที่เติมยาง IR ลงไปในมาสเตอร์แบดจ์ BR ที่มีเขม่าดำอยู่ พบว่าเขม่าดำส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ในวัฏภาคของ BR แม้ว่าผ่านการผสมไปเป็นระยะเวลาแล้วก็ตาม ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมโดยเฉพาะเขม่าดำสามารถจะเคลื่อนย้ายจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่งได้ถ้ามีการปรับลักษณะทางเคมีของยางและให้ความร้อนที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามแม้ว่าเขม่าดำจะมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิว ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้บ้าง แต่ปริมาณหมู่ฟังก์ชันจะมีอยู่ในปริมาณต่ำ ทำให้อาจจัดได้ว่าเขม่าดำเป็นสารตัวเติมไม่มีขั้ว ฉะนั้นเขม่าดำจึงสามารถผสมเข้ากับยางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวทาไดอีน (BR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ได้ดี

ในกรณีของซิลิกาที่มีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวแตกต่างจากเขม่าดำ คือ มีหมู่ซิลานอล (ดังแสดงในรูปที่ 7) ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง ฉะนั้นผิวของอนุภาคซิลิกาจึงมีความเป็นขั้วสูง ทำให้ซิลิกาสามารถผสมเข้ากับยางที่มีความเป็นขั้วได้ดี เช่น ยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber; CR) ยางไนไทรล์ (nitrile rubber; NBR) ยางคลอโรซัลโฟเนตโพลีเอทิลีน (chlorosulfonated polyethylene; CSM) แต่โดยทั่วไปถ้านำซิลิกามาผสมเข้ากับยางที่ไม่มีขั้ว (เช่น ยางธรรมชาติ) จะทำให้การผสมทำได้ยาก จึงต้องเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบซิลเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อลดความเป็นขั้วของซิลิกา ซึ่งจะทำให้เข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น การผสมก็จะทำได้ง่ายขึ้น แต่ในกรณีของยางผสม การเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางคู่ผสมนั้นอาจจะแตกต่างกันได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการผลิตสารคู่ควบซิลเลนขึ้นมาหลากหลายชนิดตั้งแต่มีขั้วต่ำไปจนถึงมีขั้วสูง ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเลือกสารคู่ควบซิลเลนที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงหรือเหมาะสมกับความเป็นขั้วของยางที่ใช้ในการผสม



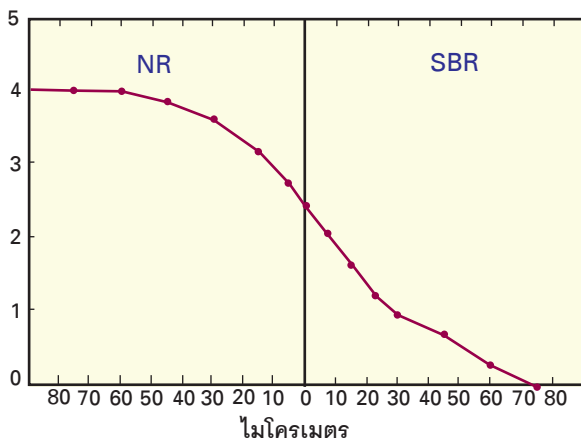
รูปที่ 7 พื้นผิวทางเคมีของซิลิกาและเขม่าดำ

3.2 การกระจายตัวของสารวัลคาไนซ์ (curative distribution)

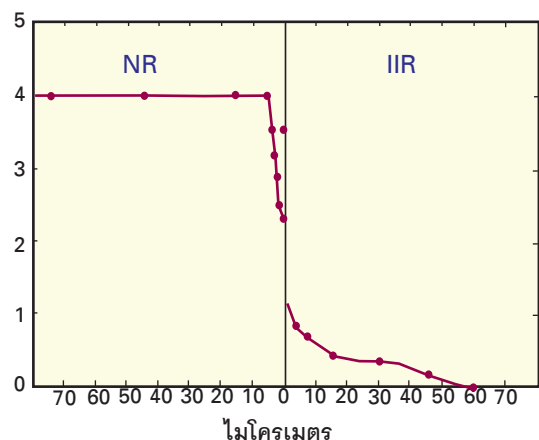
สารวัลคาไนซ์อื่นได้แก่ กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยา และสารกระตุ้นปฏิกิริยาในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และสารเพอร์ออกไซด์ และโคเอเจนต์ในระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์อาจจะมีการกระจายตัวเข้าไปในยางผสมแต่ละวิฏภาคไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้า ยางคู่ผสมนั้นมีความไม่อิ่มตัวและระดับความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะกำมะถัน เพอร์ออกไซด์ และสารตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ จะมีขั้ว จึงเกิดการเคลื่อนย้ายของสารเหล่านี้เข้าไปอยู่ในวิฏภาคของยางที่มีขั้วได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของการกระจายตัวของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (crosslink density distribution) ในยางแต่ละชนิด

จากการศึกษาของ Gardiner [8,9] พบว่าโดยทั่วไปสารวัลคาไนซ์ เช่น กำมะถัน เทตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) เบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (MBTS) และไดโทลิลกัวนิดีน (DOTG) จะเคลื่อนย้ายจากยางที่มีความไม่อิ่มตัวต่ำ (มีพันธะคู่่น้อย) ไปยังยางที่มีความไม่อิ่มตัวสูง (มีพันธะคู่มาก) แต่อย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจจะพบว่าสารวัลคาไนซ์ เช่น กำมะถัน จะสามารถแพร่จากยางที่มีความไม่อิ่มตัวสูง ไปยังยางที่มีความไม่อิ่มตัวต่ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ซึ่งในกรณีนี้ กำมะถันจะค่อยๆ แพร่จากวิฏภาคของยาง NR (มีความไม่อิ่มตัวสูง) ไปยังวิฏภาคของยาง SBR (มีความไม่อิ่มตัวต่ำกว่า) ทีละน้อย (รูปที่ 8) แต่สามารถจะแพร่จากวิฏภาคของยาง NR ไปยังวิฏภาคของยาง IIR ได้อย่างรวดเร็ว (รูปที่ 9) ทั้งนี้เนื่องจากกำมะถันสามารถละลายในยาง NR และ SBR ได้ใกล้เคียงกัน แต่ละลายในยาง NR และ IIR ได้แตกต่างกัน ในกรณีของสารตัวเร่งปฏิกิริยา MBTS ก็มีแนวโน้มที่จะเป็นไปในทำนองเดียวกับกำมะถัน แต่จะมีความแตกต่างในการกระจายตัวน้อยกว่า เพราะ MBTS มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่า จึงทำให้มีอัตราการแพร่กระจายน้อยกว่านั่นเอง นอกจากนี้แล้วการเคลื่อนย้ายของสารวัลคาไนซ์ยังสามารถเกิดจากวิฏภาคยางที่วัลคาไนซ์ได้ช้าไปยังวิฏภาคยางที่วัลคาไนซ์ได้เร็วอีกด้วย ทำให้การควบคุมสมดุลของสารวัลคาไนซ์ในยางผสมยากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่ออุณหภูมิในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น อาจทำให้การเคลื่อนย้ายของสารวัลคาไนซ์ระหว่างวิฏภาคเกิดได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย

กำมะถัน (phr)



กำมะถัน (phr)



รูปที่ 8 การแพร่ของกำมะถันจากวิฏภาคของยาง NR ไปยังยาง SBR (ที่อุณหภูมิ 150°C, 9 วัน) [9]

รูปที่ 9 การแพร่ของกำมะถันจากวิฏภาคของยาง NR ไปยังยาง IIR (ที่อุณหภูมิ 150°C, 9 วัน) [9]

ปัญหาของยางผสมและแนวทางการแก้ไข

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ปัญหาใหญ่ของยางผสมก็คือ ปัญหาเรื่องความเข้ากันไม่ได้ของยางคู่ผสม ทำให้เกิดการแยกตัวเป็นวัฏภาค และปัญหาในเรื่องของการกระจายตัวของสารวัลคาไนซ์ และสารตัวเติม ที่ไม่เท่ากันในยางแต่ละวัฏภาค ทำให้ยางในแต่ละวัฏภาคเกิดการวัลคาไนซ์ไม่เท่ากัน การกระจายตัวของสารตัวเติมในวัฏภาคยางแต่ละชนิดไม่เท่ากัน มีผลให้สมบัติของยางผสมด้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าว แนวทางการแก้ไขอาจทำได้ดังนี้

1. เลือกยางคู่ผสมที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกัน

การเลือกยางคู่ผสมที่มีความเป็นขั้วหรือมีความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน ก็จะทำให้ยางผสมนั้นเข้ากันได้ดีขึ้น เช่น การผสมยาง NR กับยาง BR หรือ SBR ซึ่งเป็นยางไม่มีขั้วเหมือนกันและมีค่าตัวกำหนดการละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกัน คือ 16.9, 17 และ 17.5 MPa^{1/2} ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราก็ไม่ได้เลือกผสมยางแค่เฉพาะคู่ที่มีความเป็นขั้วหรือมีความสามารถในการละลายใกล้เคียงกันเท่านั้น แต่เราอาจจำเป็นต้องผสมยางที่มีความเป็นขั้วต่างกัน เช่น ยาง NR (ไม่มีขั้ว) กับยาง NBR (มีขั้ว) เพื่อให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติตามต้องการ แนวทางแก้ไขคือการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือในกรณีของยาง NR กับยาง NBR อาจเลือกใช้ยาง NBR ที่มีปริมาณอะคริไลโนไทรล์ต่ำ (ความเป็นขั้วต่ำลง) ก็อาจช่วยให้ยาง NR เข้ากับยาง NBR ได้ดีขึ้น

2. เพิ่มความเข้ากันได้ของยางคู่ผสม

การเพิ่มความเข้ากันได้ของยางคู่ผสมสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

- 1) การใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ (compatibilizer) โดยใส่ในปริมาณเล็กน้อย สารเสริมสภาพเข้ากันได้ ได้แก่ บล็อกหรือกราฟต์โคโพลิเมอร์ หรือโพลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยเมทิลเมทาคริเลต (PMMA-g-NR) หรือยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber; CR) เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในยางผสม NR กับ NBR
- 2) การทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างยางคู่ผสมในระหว่างการผสม (reactive blending) ซึ่งจะให้เกิดกราฟต์โคโพลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้

3. ควบคุมความหนืดของระบบให้ใกล้เคียงกัน

ความหนืดของยางคู่ผสมจะส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานที่ได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้โครงสร้างพื้นฐานที่มีวัฏภาคการกระจายตัวขนาดเล็ก อาจทำได้โดยควบคุมความหนืดของยางคู่ผสมนั้นไม่ให้เกิดต่างกันมาก (มีอัตราส่วนความหนืดประมาณเท่ากับ 1) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การบดหรือมาสดิเคชันยางธรรมชาติให้มีความหนืดตั้งต้นใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อนที่จะนำไปผสมกัน หรืออาจใช้สารปรับความหนืด (viscosity modifier) ปรับความหนืดของยางได้ตามให้ที่ต้องการ หรือการปรับสภาวะการผสม เช่น การเพิ่มความเร็วของโรเตอร์เพื่อเพิ่มแรงเฉือน ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของยางผสมสูงขึ้น และทำให้ความหนืดลดลง อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะปรับความหนืดของยางด้วยวิธีใดก็ตาม ก็ยังจำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับยางคู่ผสมในแต่ละคู่ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้มาจากผลการทดลอง

4. ปรับวิธีการผสมสารตัวเติม

การกระจายตัวของสารตัวเติมในยางแต่ละวัฏภาคไม่เท่ากันหรือไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เนื่องจากยางแต่ละชนิดชอบสารตัวเติม (เขม่าดำหรือซิลิกา) ไม่เท่ากัน เช่น ยาง NR เป็นยางไม่มีขั้วจะชอบเขม่าดำที่ไม่มีขั้วเช่นกัน ในขณะที่ยาง NBR ซึ่งเป็นยางที่มีขั้วจะชอบซิลิกา ซึ่งเป็นสารมีขั้วมากกว่า ดังนั้นการปรับวิธีการผสมสารตัวเติมช่วยให้สามารถปรับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางแต่ละวัฏภาคได้ดีขึ้น จากข้อมูลในตารางที่ 2 จะเห็นว่าการผสมเขม่าดำกับยางแต่ละชนิดก่อน (มาสเตอร์แบตช์) แล้วจึงนำยางมาสเตอร์แบตช์มาผสมกันจะช่วยให้ได้การกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีมาก ในขณะที่วิธีการอื่นให้การกระจายตัวของเขม่าดำที่ด้อยกว่า นอกจากนี้จะเห็นว่าการให้ความร้อนกับยางมาสเตอร์แบตช์ NR ก่อนแล้วจึงผสมกับยาง BR จะลดการเคลื่อนย้ายของเขม่าดำจากวัฏภาคของยาง NR ไปยังวัฏภาคของยาง BR ลงได้อย่างมาก ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเกิดพันธะระหว่างยางกับเขม่าดำ ทำให้เขม่าดำไม่สามารถเกิดการเคลื่อนย้ายได้

ตารางที่ 2 ผลของวิธีการผสมที่มีต่อการกระจายตัวของเขม่าดำในยางผสม NR/BR (50:50) [10]

| วิธีการผสม | ร้อยละของเขม่าดำ ในวัฏภาคของ BR |
|---|------------------------------------|
| ผสมยาง NR และ BR เข้ากันก่อนแล้วจึงใส่เขม่าดำ | 75 |
| ผสมเขม่าดำในยางมาสเตอร์แบตช์ของ NR และ BR แล้วค่อยนำยางมาสเตอร์แบตช์ทั้งสองมาผสมกัน | 59 |
| ผสมเขม่าดำในยางมาสเตอร์แบตช์ของ NR แล้วจึงผสมกับยาง BR | 40 |
| ผสมเขม่าดำในยางมาสเตอร์แบตช์ของ NR แล้วให้ความร้อนที่ 155°C เป็นเวลา 10 นาทีก่อนแล้วจึงผสมกับยาง BR | 18 |

หมายเหตุ: ใช้เขม่าดำ 20 phr

5. ควบคุมไม่ให้สารวัลคาไนซ์ยางในแต่ละวัฏภาคต่างกันมาก

ความไม่สมดุลของปริมาณสารวัลคาไนซ์ (กำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา) ในแต่ละวัฏภาคเกิดจากการที่สารวัลคาไนซ์กระจายตัวในวัฏภาคของยางแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากันและมีความไวต่อปฏิกิริยาในยางแต่ละชนิดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่มากเกินไป (overcure) ในวัฏภาคหนึ่ง และเกิดการวัลคาไนซ์ที่น้อยเกินไป (undercure) ในอีกวัฏภาคหนึ่ง ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในแต่ละวัฏภาคไม่เท่ากัน ส่งผลให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง ซึ่งเราสามารถจะแก้ไขปัญหานี้ได้ดังนี้

- (1) ปรับวิธีการผสมยางกับสารเคมียาง เช่น เปลี่ยนลำดับการเติมสารเคมียาง กล่าวคือ เราสามารถผสมสารวัลคาไนซ์ในยางแต่ละชนิดก่อนแล้วจึงค่อยนำยางทั้งสองชนิดมาผสมกันภายหลัง ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงในยางแต่ละวัฏภาคให้ใกล้เคียงกันมากขึ้น [7] ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเติมสารวัลคาไนซ์ในลำดับสุดท้ายเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดยางตาย (scorch) ก็ตาม
- (2) ปรับอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ยางในวัฏภาคต่างๆ โดยการเลือกใช้สารวัลคาไนซ์ที่มีอัตราการแพร่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นขั้วของยาง ได้แก่

- 1) การปรับชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น เช่น การเลือกใช้ TBBS (N-t-butylbenzothiazole-2-sulfenamide) แทนการใช้ CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide) ในการวัลคาไนซ์ยางคู่ผสม NR/NBR ทั้งนี้ TBBS ซึ่งมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงกว่า CBS (แม้ว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดจะจัดอยู่ในกลุ่มซัลไฟนาไมด์เหมือนกัน แต่ก็แตกต่างกันที่ชนิดของหมู่เอมีนที่เข้ามาแทนที่ ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยง) จะสามารถวัลคาไนซ์ในยาง NBR ได้ดีกว่า ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในยางทั้งสองวัฏภาคใกล้เคียงกัน (ในขณะที่ CBS จะให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง NR มากกว่า)
- 2) การใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1 ชนิดร่วมกัน เช่น การเลือกใช้ CBS ร่วมกับ MBTS (2,2'-benzothiazole disulfide) ซึ่งเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยารอง ในการวัลคาไนซ์ยางคู่ผสม NR/NBR เพื่อลดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่เกิดในวัฏภาคของยาง NR จากการใช้ CBS แต่เพียงอย่างเดียว โดยจะทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางทั้งสองวัฏภาคใกล้เคียงกัน
- 3) การใช้สารหน่วงปฏิกิริยา (retarder) เพื่อทำให้วัฏภาคที่สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลง แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้วิธีปรับเปลี่ยนสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราการวัลคาไนซ์สูงขึ้นในวัฏภาคของยางที่มีการวัลคาไนซ์ช้ามากกว่า
- 4) การเพิ่ม/ลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาในการผสมยาง SBR กับ ยางธรรมชาติ (ยาง SBR มีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่ช้ากว่ายางธรรมชาติ)
- 5) การตัดแปรยางเชิงเคมีเพื่อเพิ่มความไวปฏิกิริยาของยาง เช่น การเพิ่มระดับความไม่อิ่มตัวของยาง EPDM เพื่อให้สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันร่วมกับยาง NR ในยางผสมได้

สรุป

การผสมยางสองชนิดให้เข้ากันได้และมีสมบัติที่ดีเป็นเรื่องยาก เพราะยางผสมส่วนใหญ่มีปัญหาพื้นฐานมาจากการที่ยางที่นำมาผสมกันนั้นไม่สามารถเข้ากันได้ ทำให้มีโครงสร้างแยกเป็นวัฏภาค ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลของสารวัลคาไนซ์ในแต่ละวัฏภาค รวมถึงการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของสารตัวเติมในยางแต่ละวัฏภาคด้วย ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้ไม่สามารถเตรียมยางผสมที่มีสมบัติดีตามต้องการได้ ดังนั้นเราจึงควรต้องทำความเข้าใจกับปัญหาดังกล่าว และทราบแนวทางแก้ไขเพื่อนำไปปรับปรุงการผลิตผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมยางให้มีสมบัติที่ดีตามที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

1. Keyte, D.N., Walters, M.H., *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **38**, 40 (1962)
2. Pangamol, P., “Control of phase morphology of NR/EPDM blends and its effects on ozone resistance of the blends”, M.Sc.Thesis Mahidol University, 2010.
3. Sirisinha, C., Saeoui, P. and Guaysomboon, J., “Relationship among phase morphology, oil resistance, and thermal aging properties in CPE/NR blends: Effect of blending conditions”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 4038 (2003)
4. Corrish, P.J., Palmer, M.J., “Advances in Polymer Blends”, Inst. Rubber Ind.Conference, Laughborough, England, (1969)
5. Ayla, A., Hess, W.M., Kistler, F.O. and Joyce, G.A., “Carbon black-elastomer interaction”, *Rubber Chem. Technol.*, **64**, 19, (1991)
6. Callan, J.E., Hess, W.M. and Scott, C.E., “Elastomer blends, compatibility and relative response to fillers”, *Rubber Chem. Technol.*, **44**, 814, (1971)
7. Ashida, M., Inugai, Y., Wantabe, T., et.al., *J. Soc. Rubber Ind. Jpn*, **46**, 421 (1973)
8. Gardiner, J.R., “Curative diffusion between dissimilar elastomers and its influence on adhesion”, *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 1312, (1968)
9. Gardiner, J.R., “Measurement of curative diffusion between rubbers by microinterferometry”, *Rubber Chem. Technol.*, **42**, 1058, (1969)
10. Hess, W.M., Scott, C.E. and Callan, J.E., “Carbon black distribution in elastomer blends”, *Rubber Chem. Technol.*, **40**, 371, (1967)
11. Tinker, A.J. and Jones, K.P., “Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers”, Chapman&Hall, 1998.
12. Leblanc, J.L., *Plast.Rubber Process.Appl.*, **2**, 361 (1982)
13. Mangaraj, D., “Elastomer blends”, *Rubber Chem. Technol.*, **75**, 365, (2002)



ชญาภา นิ่มสุวรรณ
การศึกษา : ปริญญาโท (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน : นักวิเคราะห์โครงการ
 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ