

การเสื่อมสภาพจากโอโซนและออกซิเจน

วิศิษฐ์ อิศร์ดิษฐ์ และ อุกฤษณ์ นพสุวรรณ

บทนำ

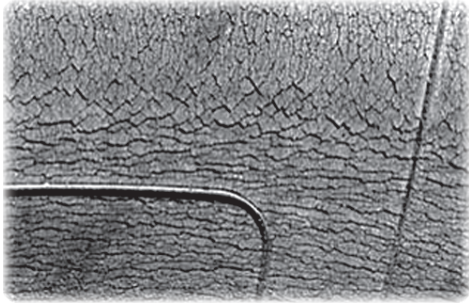
เป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยางขึ้นอยู่กับการตั้งปัจจัยภายในซึ่งก็คือลักษณะการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง และปัจจัยภายนอกซึ่งได้แก่แรงที่เข้ามากระทำ สารเคมี น้ำมัน ตัวทำละลาย รวมถึงออกซิเจน โอโซน ความร้อน และแสงแดด อัตราเร็วของการเสื่อมสภาพเนื่องจากตัวแปรภายในขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะเชื่อมโยง ด้วยเหตุนี้ยางที่เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูงจึงมีความทนต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางที่เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะไมโนซิลฟิดิก ไดซิลฟิดิก และโพลีซิลฟิดิกตามลำดับ ส่วนการเสื่อมสภาพที่เกิดจากปัจจัยภายนอกนับเป็นอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพหรืออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของยางมากที่สุด คือ โอโซนและออกซิเจนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บทความนี้จะชี้แจงให้มีความรู้เกี่ยวกับกลไกและวิธีป้องกันการเสื่อมสภาพของยางที่เกิดจากสิ่งเร้าดังกล่าว

การเสื่อมสภาพจากโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ปกคลุมพื้นผิวโลกซึ่งมีอยู่ในปริมาณมากในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (stratosphere) ทั้งนี้เพราะโอโซนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่มีพลังงานสูง (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 240 นาโนเมตร) กับก๊าซออกซิเจนซึ่งแสดงในสมการที่ 1 และ 2 โดยลมจะเป็นตัวพาก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งลงมายังชั้นบรรยากาศในระดับพื้นดิน นอกจากการทำปฏิกิริยาดังกล่าวแล้ว โอโซนยังเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างประจุไฟฟ้า (electrical discharges) กับก๊าซออกซิเจนอีกด้วย โดยทั่วไปก๊าซโอโซนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นในบรรยากาศประมาณ 1-10 ส่วนในร้อยล้านส่วน (pphm) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้ง สภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งความเข้มข้นของโอโซนยังขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของวัน โดยโอโซนจะมีความเข้มข้นสูงสุดในช่วงตอนเที่ยงหรือบ่ายต้นๆ เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวมีความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตสูงมากที่สุดและความเข้มข้นของโอโซนจะลดลงในเวลากลางคืน อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโอโซนอาจสูงขึ้นได้ถึง 100 pphm ในเมืองใหญ่ๆ ที่มีมลภาวะสูงหรืออาจมีค่าสูงกว่านี้ในช่วงที่เกิดมลภาวะจากหมอกควัน (smog) เพราะโอโซนที่ระดับพื้นดินในกรณีนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO₂) กับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายภายใต้สภาวะที่ได้รับแสงอาทิตย์



เนื่องจากโอโซนจัดเป็นสารออกซิไดซ์ที่ว่องไว (มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงกว่าก๊าซออกซิเจน) สามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว โอโซนจึงทำให้ยางที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเกิดการเสื่อมสภาพได้แม้ว่าจะมีระดับความเข้มข้นต่ำเพียงแค่ 1 pphm ก็ตาม ด้วยเหตุนี้โอโซนจึงถือเป็นหนึ่งในตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหรืออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง การเสื่อมสภาพจากโอโซนจะมีรูปแบบที่ชัดเจน กล่าวคือโอโซนจะทำให้เกิดรอยแตกบนพื้นผิวยางในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการยืดตัวเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1



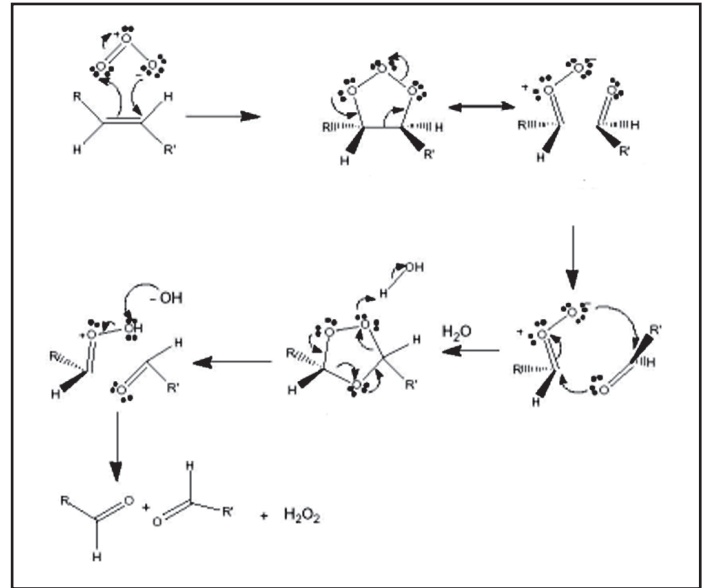
รูปที่ 1 ตัวอย่างรอยแตกที่เกิดจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน

นอกจากการเสื่อมสภาพข้างต้นแล้ว สำหรับในกรณีของยางสีที่สัมผัสกับโอโซน ความชื้นและแสงแดดพร้อมๆ กันก็อาจพบการเสื่อมสภาพที่เรียกว่า “ฟรอสตติ้ง (frosting)” ซึ่งการเกิดฟรอสตติ้งจะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว (พบเห็นได้หลังการวัลคาไนซ์เพียงไม่กี่วัน) และทำให้ยางสีที่มีพื้นผิวเรียบเป็นเงาเปลี่ยนสภาพไปเป็นยางสีที่มีพื้นผิวด้านและหยาบคล้ายๆ การบวมของสารเคมี แต่การเกิดฟรอสตติ้งไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเช็ดด้วยตัวทำละลายเหมือนเช่นปัญหาการบวม ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเข้าโจมตีของโอโซนภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง (บางครั้งเกิดได้โดยไม่ต้องมีแรงดึง) ส่งผลทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากบนพื้นผิวของยาง ทำให้ความมันวาวของพื้นผิวยางเสียไป การเสื่อมสภาพแบบฟรอสตติ้งพบเห็นได้ง่ายในยางสีที่ทำจากยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์บางชนิดที่มีพันธะคู่ในปริมาณสูง

1. กลไก

เมื่อยางสัมผัสกับโอโซนในระหว่างการใช้งาน โอโซนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยางที่อยู่บนพื้นผิวตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นโอโซนไนด์ (ozonide) หรือไตรออกไซด์ (trioxolane) ที่ไม่เสถียรดังแสดงในรูปที่ 2 หากยางได้รับแรงดึงหรือมีความเครียดในระดับที่สูงเพียงพอ ไตรออกไซด์จะสลายตัวต่อไปกลายเป็นหมู่แอลดีไฮด์ทำให้โมเลกุลยางเกิดการตัดขาดและเกิดรอยแตกขึ้นบนพื้นผิวยางทำให้มีเนื้อยางใหม่สัมผัสกับโอโซนเรื่อยๆ หากกลไกนี้ดำเนินต่อไปก็จะส่งผลทำให้รอยแตกขยายใหญ่และลึกมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากโอโซนจะเข้าโจมตียางตรงตำแหน่งพันธะคู่ได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลสูง เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางไนไตรล์ (NBR) จึงเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย ทั้งนี้ ยางคลอโรพรีน (CR) ถือเป็นข้อยกเว้นเพราะแม้ว่ายางชนิดนี้จะมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลสูงแต่เนื่องจากในโมเลกุลมีอะตอมของคลอรีนอยู่ติดกับพันธะคู่ จึงทำให้พันธะคู่ที่มีอยู่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาต่ำ ยางคลอโรพรีนจึงมีความทนต่อโอโซนและออกซิเจนในระดับดีปานกลาง ส่วนยางชนิดที่มีสายโซ่หลักเป็นแบบอิ่มตัว เช่น ยางอะคริลิก (ACM) ยางคลอโรซัลไฟเนตโพลีเอทิลีน (CSM) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ยางฟลูออโรคาร์บอน (FKM) และยางซิลิโคน (Q) ต่างก็มีความทนต่อโอโซนที่ดีเยี่ยม



รูปที่ 2 กลไกการทำปฏิกิริยาของโอโซนและยาง [1]

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพจากโอโซน

รูปแบบและความรุนแรงของการเสื่อมสภาพจากโอโซนขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

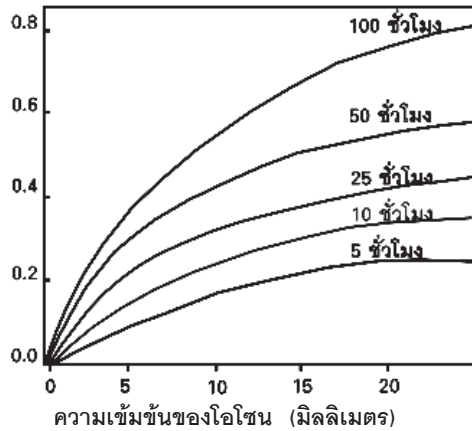
2.1 ความเครียด

หากผลิตภัณฑ์ยางได้รับความเครียดต่ำมากๆ รอยแตกจากโอโซนก็จะไม่ปรากฏเพราะรอยแตกจากการโจมตีของโอโซนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อยางได้รับการดึงยืดหรือมีความเครียดสูงกว่าค่าวิกฤตค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งค่าความเครียดวิกฤตนี้ขึ้นอยู่กับสูตรเคมียางและระดับของการวัลคาไนซ์ ทั้งนี้ค่าความเครียดวิกฤตของยางส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของการยืดตัวประมาณร้อยละ 10-50 [2] โดยยางที่มีพันธะคู่อยู่มากจะมีระดับความเครียดวิกฤตต่ำกว่ายางที่มีพันธะคู่อยู่น้อย ด้วยเหตุนี้ยางที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยว (ยางอิ่มตัว) จึงมีความทนต่อโอโซนสูงกว่ายางที่มีพันธะคู่ เมื่อยางได้รับความเครียดสูงกว่าค่าวิกฤตการโจมตีของโอโซนจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้น ทั้งนี้ลักษณะและความรุนแรงของการเสื่อมสภาพจะขึ้นอยู่กับระดับของความเครียดที่ยางได้รับ กล่าวคือหากยางได้รับความเครียดสูงมาก รอยแตกที่เกิดจากการโจมตีของโอโซนจะมีลักษณะเป็นรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งถ้ายางได้รับโอโซนนานๆ รอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากเหล่านี้ อาจขยายตัวมาชนกันและรวมกันกลายเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ต่อไปได้เช่นกัน แต่ถ้ายางได้รับความเครียดต่ำ รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนน้อยแต่เป็นรอยแตกที่ค่อนข้างลึก ซึ่งกรณีหลังนี้จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการประลัยได้เร็วขึ้น

2.2 ความเข้มข้นของไอโซน

อัตราเร็วของการเสื่อมสภาพขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของไอโซน กล่าวคือการเพิ่มความเข้มข้นของไอโซนจะส่งผลให้อัตราเร็วและความรุนแรงของการเสื่อมสภาพสูงขึ้นรูปที่ 3 แสดงผลความเข้มข้นของไอโซนต่อระดับความลึกของรอยแตกในยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารป้องกันไอโซน จากรูปพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของไอโซนส่งผลทำให้รอยแตกมีความลึกมากยิ่งขึ้น

ความลึกของรอยแตก (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของรอยแตกและความเข้มข้นของไอโซน [3]

2.3 ระยะเวลา

ระยะเวลาที่ยางสัมผัสไอโซนก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อระดับความรุนแรงของการเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปความหนาแน่นของรอยแตกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะแรกๆ ของการทดสอบ หลังจากนั้น รอยแตกที่เกิดขึ้นก็จะขยายตัวและอาจมาชนกันเกิดเป็นรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในกรณีนี้อาจส่งผลทำให้ความหนาแน่นของรอยแตกลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาที่สัมผัสกับไอโซนก็ส่งผลทำให้ความลึกของรอยแตกสูงมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3

3. สารป้องกันไอโซน

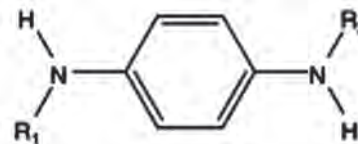
การเสื่อมสภาพเนื่องจากไอโซนสามารถป้องกันได้ด้วยการเติมสารป้องกันไอโซนเข้าไปในสูตรยาง โดยสารป้องกันไอโซนอาจจะช่วยป้องกันการเกิดไอโซนตั้งแต่ต้นหรือป้องกันการสลายตัวหรือแตกตัวของไอโซนในดีโดยการเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรแทน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพจากไอโซนจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ดังนั้นสารป้องกันไอโซนที่ดีจึงต้องมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถเคลื่อนตัวออกมาที่พื้นผิวยางได้ดีและเร็ว (ในกรณีที่มีการเติมสารป้องกันไอโซนลงไปปริมาณที่สูงเกินกว่าขีดความสามารถในการละลายของสารเคมีนั้นๆ ในเนื้อยาง) เพื่อทำหน้าที่ปกป้องพื้นผิวยางจากการโจมตีของไอโซน
2. ต้องไม่ระเหยออกจากเนื้อยางโดยปราศจากการทำปฏิกิริยากับไอโซน
3. ไม่ควรมีอัตราการเคลื่อนที่ออกมาที่พื้นผิวต่ำเกินไป ไม่เช่นนั้นอาจทำให้ไอโซนเข้าโจมตียางได้ก่อนที่สารป้องกันไอโซนจะบรรลุออกมาทำหน้าที่อยู่บริเวณพื้นผิว

3.1 สารป้องกันไอโซนกลุ่มตกลีและเปลี่ยนสี

สารป้องกันไอโซนกลุ่มที่มีความสำคัญมากที่สุด ในอุตสาหกรรมยาง คือ สารประกอบในกลุ่มของพาราฟีนิลลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine; PPD) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 4 ในภาพรวมสามารถแบ่งสารประกอบพาราฟีนิลลีนไดเอมีนออกเป็น 3 กลุ่มย่อยขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่แทนที่ (หมู่ R) ที่เข้ามาเกาะอยู่กับโครงสร้างหลัก ได้แก่

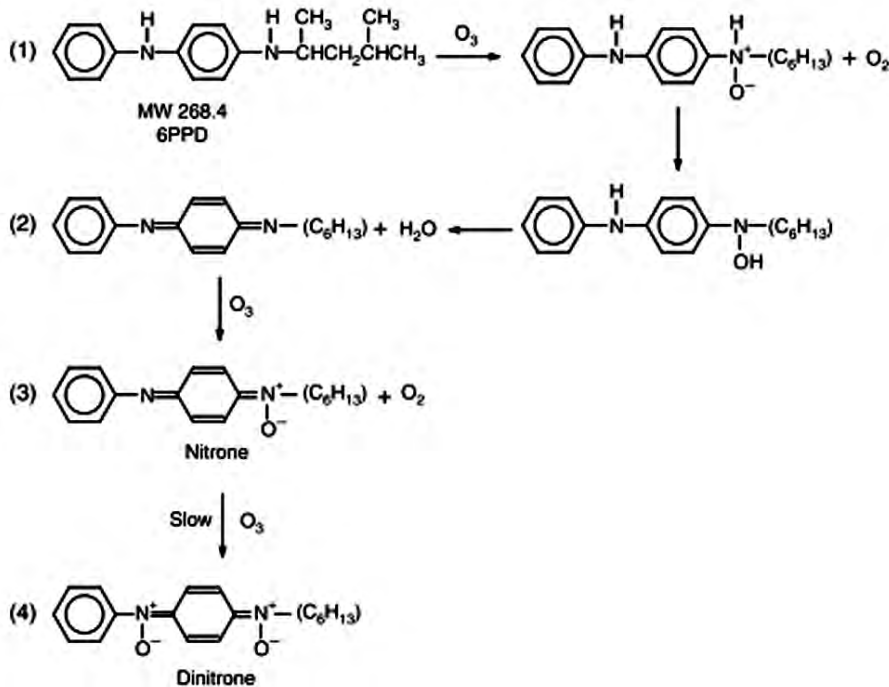
1. ไดเอทิลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน: หมู่แทนที่ทั้ง 2 หมู่เป็นหมู่เอทิล ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ DOPD (N,N'-bis-(1-ethyl-3-methylpentyl)-p-phenylenediamine)
2. ไดเอริลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน: หมู่แทนที่ทั้ง 2 หมู่เป็นหมู่ที่มีวงแหวน เช่น หมู่ฟีนิล ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ DPPD (N,N'-diphenyl-p-phenylenediamine)
3. แอลคิลเอริลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน: หมู่แทนที่ 1 หมู่เป็นหมู่ที่มีวงแหวน เช่น หมู่ฟีนิล และหมู่แทนที่อีก 1 หมู่เป็นหมู่เอทิล ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ 6PPD (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine) และ IPPD (N-isopropyl-N'-phenyl-p-phenylenediamine)



รูปที่ 4 โครงสร้างเคมีของพาราฟีนิลลีนไดเอมีน

เนื่องจากหมู่แทนที่ที่เข้าไปจับกับโครงสร้างหลักมีหมู่ฟังก์ชันและขนาดที่แตกต่างกัน ทำให้สารป้องกันไอโซนแต่ละชนิดมีขีดความสามารถในการละลายในเนื้อเยื่อและอัตราเร็วในการเคลื่อนตัวมาที่พื้นผิวของแตกต่างกันไปด้วย สารเคมีในแต่ละกลุ่มจึงมีประสิทธิภาพในการปกป้องอย่างแตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้วสารเคมีในกลุ่มไดแอลคิลพาราฟีนิลลีนไดเอมีนจะมีขนาดโมเลกุลเล็กทำให้เคลื่อนตัวออกมาที่ผิวยางได้เร็วกว่าส่งผลทำให้สารเคมีในกลุ่มนี้เหมาะสำหรับใช้ปกป้องยางที่ถูกนำไปใช้งานในเชิงสถิต ส่วนสารเคมีในกลุ่มไดเอริลพาราฟีนิลลีนไดเอมีนนั้นส่วนใหญ่จะมีขนาดโมเลกุลใหญ่ทำให้เคลื่อนตัวออกมาที่พื้นผิวยางได้ช้า สารเคมีในกลุ่มนี้จึงมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากไอโซนไม่สูงมากนัก (นิยมใช้ในการปกป้องยางจากออกซิเจนมากกว่า) ส่วนสารเคมีในกลุ่มแอลคิลและเอริลพาราฟีนิลลีนไดเอมีนจัดเป็นสารเคมีกลุ่มที่มีการใช้ในการปกป้องยางจากการเสื่อมสภาพมากที่สุด สารเคมีในกลุ่มนี้ให้ประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากไอโซนดีที่สุดเหมาะสำหรับใช้ในกรณีที่ต้องนำผลิตภัณฑ์ยางไปใช้งานในเชิงพลวัตหรือได้รับแรงเชิงพลวัตเป็นครั้งคราว แม้ว่าสารเคมีในกลุ่มพาราฟีนิลลีนไดเอมีนนี้จะให้ประสิทธิภาพในการปกป้องยางจากไอโซนสูง แต่สารเคมีในกลุ่มนี้ก็ส่งผลทำให้ยางเกิดการตกสีและเปลี่ยนสียางได้ด้วย (ทำให้ยางเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มอมดำ) ด้วยเหตุนี้สารเคมีในกลุ่มพาราฟีนิลลีนไดเอมีนจึงเหมาะสำหรับใช้ในยางสีดำเท่านั้น

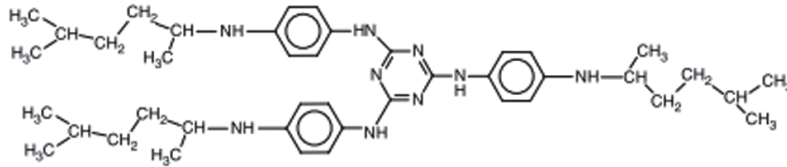
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างกลไกการปกป้องยางของ 6PPD โดยในขั้นแรก 6PPD ที่เคลื่อนตัวออกมาที่พื้นผิวยางจะทำปฏิกิริยากับไอโซนเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรและจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นสารประกอบไฮดรอกซีไดเอมีน (hydroxydiamino compound) หลังจากที่มีการปลดปล่อยน้ำก็จะได้เป็นสารประกอบควิโนไดเอมีน (quinine diimine) ในขั้นตอนที่ 2 จากนั้นสารประกอบควิโนไดเอมีนที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยากับไอโซนต่อเกิดเป็นไนโตรน (nitron) และออกซิเจนดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 ทั้งนี้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับสารป้องกันไอโซนส่วนที่เหลือและเปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารประกอบที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง ส่วนสารประกอบไนโตรนที่เกิดขึ้นก็สามารถทำปฏิกิริยากับไอโซนต่อในขั้นตอนที่ 4 เกิดเป็นสารประกอบไดไนโตรน



รูปที่ 5 ตัวอย่างกลไกการปกป้องยางของ 6PPD

3.2 สารป้องกันไอโซนกลุ่มที่ไม่ตกสี

สารเคมีในกลุ่มพาราฟีนิลลีนไดเอมีนซึ่งเป็นสารเคมีที่ทำให้ยางตกสีได้ถูกใช้เป็นสารป้องกันไอโซนสำหรับยางมาอย่างยาวนาน จนกระทั่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารเคมีในกลุ่มไตรอะซีน (triazine) ขึ้นมาซึ่งสามารถใช้ปกป้องยางจากไอโซนได้เช่นกันโดยที่ไม่ทำให้ยางตกสีและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของยางเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ TAPDT (2,4,6-tris-(N-1,4-dimethyl-pentyl-p-phenylenediamino)-1,3,5-triazine) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเคมีดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างเคมีของ TAPDT

TAPDT เป็นสารเคมีที่มีลักษณะเด่น คือ สามารถป้องกันยางจากไอโซนได้ดีเยี่ยม (เนื่องจากมีความว่องไวต่อไอโซนสูง) โดยไม่ทำให้เกิดการตกสี จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่จะถูกนำไปใช้งานทั้งในเชิงสถิติและพลวัต (ช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการหักงอของยางได้ดีด้วย) สารเคมีในกลุ่มนี้มีกลไกในการปกป้องยางเหมือนสารประกอบในกลุ่มแอลคิลแอริลพาราฟีนิลลีนไดเอมีน อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก TAPDT มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่มากทำให้เคลื่อนตัวมาที่พื้นผิวได้ช้า ดังนั้นสารเคมีชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการปกป้องยางจากไอโซนในระยะยาว

3.3 ไข (Paraffin wax)

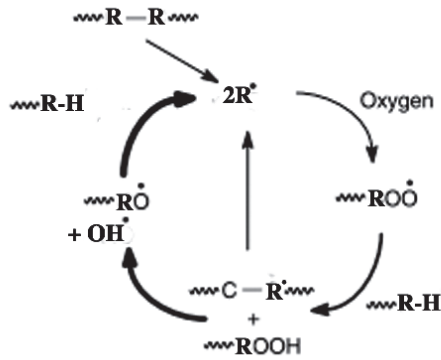
เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มพาราฟีนิลลีนไดเอมีนและไตรอะซีนมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับไอโซนสูงมาก (สูงกว่ายางประมาณ 200 เท่า) ดังนั้นเมื่อสารเคมีเหล่านี้บวมออกมาที่พื้นผิวจึงช่วยปกป้องยางด้วยการเข้าไปแย่งจับกับโมเลกุลของไอโซนตามกลไกที่แสดงในหัวข้อ 3.1 และเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ปกป้องยางจากการสัมผัสกับไอโซน การป้องกันในลักษณะนี้เรียกว่าการป้องกันการทางเคมี ส่วนการป้องกันการเสื่อมสภาพจากไอโซนด้วยการเติมไขนั้นถือเป็นการป้องกันทางกายภาพเพราะเมื่อเติมไขลงไปในส่วนที่มากเกินพอ (ส่วนที่เกินกว่าขีดความสามารถในการละลาย) จะบวมออกมาที่พื้นผิวและเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางที่ช่วยป้องกันไม่ให้ไอโซนเข้ามาสัมผัสกับโมเลกุลยางได้โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากไขพาราฟินเป็นไขที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยวเท่านั้น ไขพาราฟินจึงเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยากับไอโซน การปกป้องยางจากไอโซนจะคงอยู่ตราบเท่าที่แผ่นฟิล์มไขพาราฟินยังไม่ถูกทำลาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟิล์มไขพาราฟินมีความยืดหยุ่นต่ำจึงเปราะแตกได้ง่าย ด้วยเหตุนี้การปกป้องยางจากไอโซนด้วยการเติมไขพาราฟินจึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำไปใช้งานในเชิงสถิติเท่านั้น การปกป้องยางด้วยไขพาราฟินต้องตระหนักเรื่องอุณหภูมิการใช้งานของผลิตภัณฑ์ด้วย เพราะหากอุณหภูมิสูงขึ้นไขก็จะมีขีดความสามารถในการละลายในเนื้อยางได้มากขึ้น การบวมของไขก็จะน้อยลงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการปกป้องยางได้เช่นกัน

การเสื่อมสภาพจากการออกซิเดชัน

โดยปกติยางจะมีความทนต่อความร้อนสูงขึ้นในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน เช่น ภายใต้อากาศของไนโตรเจนหรือภายใต้สภาวะสุญญากาศ อย่างไรก็ตามในเชิงปฏิบัติแล้วผลของความร้อนและออกซิเจนต่อการเสื่อมสภาพของยางแทบจะแยกจากกันไม่ออก ทั้งนี้เพราะในอากาศที่เราอยู่มีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูงมากและก๊าซออกซิเจนก็มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาก่อนข้างสูง สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพโดยผ่านปฏิกิริยาที่รู้จักกันดีว่า “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” ทั้งนี้ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้เร็วในยางที่มีพันธะคู่ ด้วยเหตุนี้ยางที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยว (ยางอิมมัต) จึงมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนสูงกว่ายางที่มีพันธะคู่ (ยางไม่อิมมัต)

1. กลไก

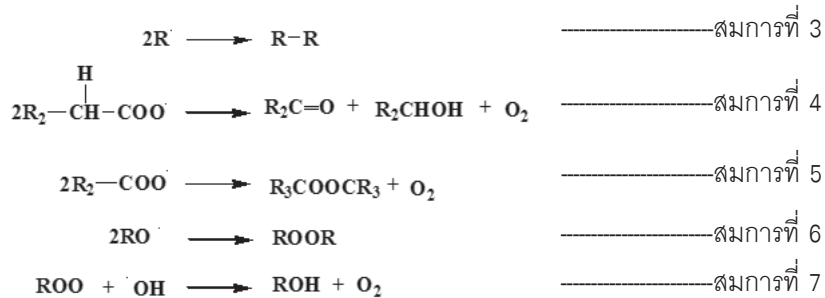
การเสื่อมสภาพของยางจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดผ่านอนุมูลอิสระเพราะเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก (ไม่ว่าจะเป็นจากความร้อน แสงเชิงกล แสงแดด หรือรังสีต่างๆ) พันธะเคมีในโมเลกุลยางจะเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (R*) จากนั้นก็จะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ต่อเนื่องตามมาดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กลไกการเกิดออกซิเดชัน [4]

เมื่อโมเลกุลยาง R-R เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (R*) 2 ตัว ออกซิเจนซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ R* ที่เกิดขึ้นกลายเป็นอนุมูลอิสระของเพอร์ออกไซด์ (R-O-O*) ซึ่งอนุมูลอิสระของเพอร์ออกไซด์นี้มีความว่องไวค่อนข้างสูงจึงสามารถดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลยางอีกสายโซ่หนึ่งเกิดเป็นไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (R-O-O-H) และมีอนุมูลอิสระของสายโซ่คาร์บอน (R*) เกิดขึ้นใหม่ หากได้รับอุณหภูมิสูงไฮโดรเพอร์ออกไซด์ก็จะแตกตัวต่อไปกลายเป็นอนุมูลอิสระของแอลคอกซี (R-O*) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (*O-H) ซึ่งอนุมูลอิสระทั้ง 2 ชนิดหลังที่เกิดขึ้นนี้ก็จะไปดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลยางต่อไปเกิดเป็นวงจรต่อเนื่องไป ดังแสดงในรูปที่ 7

หลังจากที่เกิดปฏิกิริยาการเริ่มต้น (initiation) และขั้นการแผ่อกไปของปฏิกิริยา (propagation) ของอนุมูลอิสระดังแสดงในรูปที่ 6 แล้วในขั้นสุดท้าย คือ การสิ้นสุดปฏิกิริยา (termination) ซึ่งเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 3-7



หากปฏิกิริยาลิ้นสุดเกิดผ่านการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระและกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียรดังแสดงในสมการที่ 3, 5 และ 6 ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือการเชื่อมโยงโมเลกุลของยาง (crosslink) ในบางกรณีอนุมูลอิสระสามารถเข้าทำปฏิกิริยาแบบเติม (addition reaction) กับพันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลยางเกิดเป็นการเชื่อมโยงได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งในกรณีหลังนี้การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นจะยังคงไม่เสถียรและจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปจนกว่าอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียร ดังนั้นอนุมูลอิสระเพียงแค่ 1 ตัวก็อาจทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้มากมาย หากเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลหลายๆ ยางก็จะแข็งและเปราะทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ ด้อยลง แต่ถ้าปฏิกิริยาลิ้นสุดเกิดผ่านสมการที่ 4 และ 7 ก็จะทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุลยาง (chain scission) ทำให้ความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลต่างๆ ด้อยลงด้วยเช่นกัน ตารางที่ 1 สรุปผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางชนิดต่างๆ สำหรับกรณีส่วนใหญ่แล้วปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่และปฏิกิริยาการเชื่อมโยงอาจจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันหากปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่เกิดขึ้นได้มากกว่าก็จะส่งผลทำให้ยางนิ่มลง แต่ถ้าปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้มากกว่าก็จะส่งผลทำให้ยางแข็งขึ้น

ตารางที่ 1 ผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางชนิดต่างๆ [5]

ยาง	กลไกหลัก	ผลลัพธ์สุดท้าย
ยางธรรมชาติ (NR)	การตัดขาดสายโซ่	ยางนิ่มลง
ยางโพลีไอโซพรีน (IR)	การตัดขาดสายโซ่	ยางนิ่มลง
ยางคลอโรพรีน (CR)	การเชื่อมโยงและการตัดขาดสายโซ่	ยางแข็งขึ้น
ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR)	การเชื่อมโยงและการตัดขาดสายโซ่	ยางแข็งขึ้น
ยางไนไตรล์ (NBR)	การเชื่อมโยง	ยางแข็งขึ้น
ยางบิวทาไดอีน (BR)	การเชื่อมโยง	ยางแข็งขึ้น
ยางบิวไทล์ (IIR)	การตัดขาดสายโซ่	ยางนิ่มลง
ยางเอทิลีนโพรพิลีน (EPM)	การเชื่อมโยงและการตัดขาดสายโซ่	ยางแข็งขึ้น
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)	การเชื่อมโยงและการตัดขาดสายโซ่	ยางแข็งขึ้น

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อออกซิเดชัน

การเสื่อมสภาพของยางจากปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.1 ความร้อน

ความร้อนส่งผลทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้เร็วขึ้น ได้มีการรายงานว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะสูงขึ้นประมาณ 2 เท่าทุกๆ การเพิ่มอุณหภูมิ 10°C หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปเป็น 70°C จะส่งผลทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้นประมาณ 50 เท่าหรือถ้าเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C ก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้องถึงประมาณ 8,000 เท่า [6] ด้วยเหตุนี้จึงพบว่าผลิตภัณฑ์ยางจะเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นเมื่อถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.2 แสงแดด

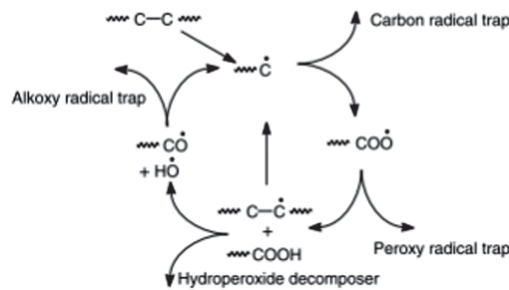
ยางที่สัมผัสกับแสงแดดและออกซิเจนมีโอกาสที่จะเกิดรอยแตกที่พื้นผิวยางอีกรูปแบบหนึ่งที่แตกต่างจากรอยแตกที่เกิดจากโอโซน เพราะรอยแตกที่เกิดขึ้นจะไม่มีทิศทางที่แน่นอน (คล้ายรอยแตกบนผิวข้าง) เรียกลักษณะการเสื่อมสภาพในกรณีนี้ว่า “แครซซิง (crazing)” การเสื่อมสภาพแบบนี้เกิดจากแสงอัลตราไวโอเล็ตไปกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พื้นผิวของยาง (เกิด photooxidation) ทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางของยางที่ถูกออกซิไดซ์บนพื้นผิว จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีความเป็นขั้วสูงอาจถูกน้ำฝนชะล้างออกไป เมื่อผิวยางแห้งแผ่นฟิล์มออกซิไดซ์ก็จะเกิดการหดตัวทำให้เห็นเป็นรอยแตกขนาดเล็กขยายตัวออกไปทุกทิศทาง และถ้าหากชั้นฟิล์มออกซิไดซ์นี้ถูกน้ำชะล้างออกไปสารตัวเดิมที่อยู่ในเนื้อยางก็จะไหลออกมาและสามารถใช้มือลูบเอาสารตัวเดิมออกจากเนื้อยางได้ เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “ชอล์คกิง (chalking)” ทั้งนี้การเสื่อมสภาพแบบแครซซิงหรือชอล์คกิงนี้จะเห็นได้ชัดเจนในผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีและทำจากยางที่ไม่อิมัตว เพราะสำหรับผลิตภัณฑ์ยางสีดำที่มีการเติมเขม่าดำลงไป เขม่าดำจะช่วยดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้ยางมีความทนต่อแสงแดดมากยิ่งขึ้น

2.3 โลหะ

ไอออนของโลหะหนักบางชนิดเช่น โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง แมงกานีส และเหล็กมีส่วนในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง จึงเรียกไอออนเหล่านี้ว่า “โปรออกซิแดนท์ (pro-oxidant) เพราะเชื่อว่าไอออนของโลหะหนักเหล่านี้จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับยางบางชนิดโดยเฉพาะยางธรรมชาติ วิธีแก้ไขปัญหาคาร์บอนของไอออนโลหะหนักที่ดีที่สุดคือ หลีกเลี่ยงการใช้สารประกอบที่มีไอออนของโลหะหนักเหล่านี้ เช่น สารประกอบของทองแดงและแมงกานีสที่อยู่ในรูปของสเตรนหรือโอลิเอต เพราะสารเหล่านี้สามารถละลายได้ดีในเนื้อยางและสามารถให้ไอออนของทองแดงและแมงกานีสแก่ยางได้โดยตรง แม้ว่าออกไซด์ของไอออนโลหะหนักเหล่านี้จะละลายในยางได้น้อย แต่ว่าสารประกอบออกไซด์ของโลหะหนักเหล่านี้ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาได้ด้วยเช่นกันเพราะเมื่อสารประกอบออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกที่มีอยู่ในระบบก็จะทำให้เกิดเป็นสเตรนที่สามารถละลายในเนื้อยางได้มากขึ้น นอกจากการหลีกเลี่ยงสารประกอบที่มีไอออนของโลหะหนักเหล่านี้แล้ว การเติมสารป้องกันออกซิเดชันบางชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงต่อกรปกป้องการเสื่อมสภาพจากโลหะหนักก็ช่วยลดอัตราเร็วของการเสื่อมสภาพได้เช่นกัน ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มที่ช่วยปกป้องยางจากโลหะหนัก ได้แก่ สารประกอบอะโรมาติกเอมีน เพราะสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง

สารต้านออกซิเดชัน

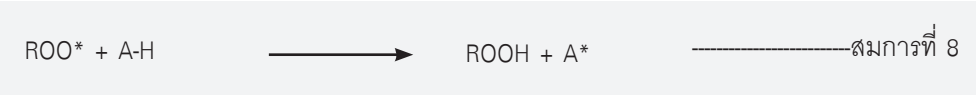
สารต้านออกซิเดชันไม่สามารถระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างสมบูรณ์เพียงแต่ช่วยชะลออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงด้วยการเข้าไปรบกวนขั้นตอนต่างๆ ของการเกิดออกซิเดชันดังแสดงในรูปที่ 8 ในภาพรวมสามารถแบ่งสารต้านออกซิเดชัน ตามหน้าที่การทำงานออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ สารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิและสารต้านออกซิเดชันทุติยภูมิ



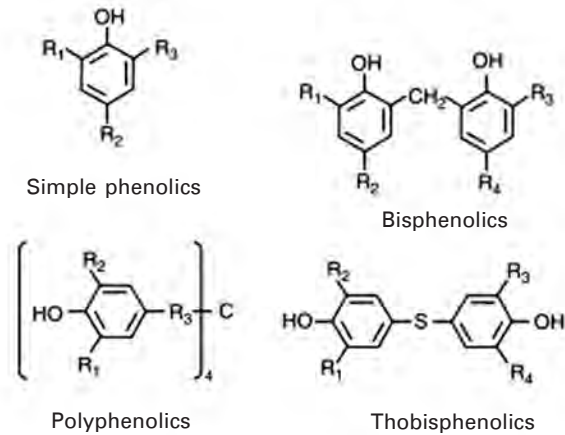
รูปที่ 8 กลไกการทำงานของสารต้านออกซิเดชัน

1. สารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ

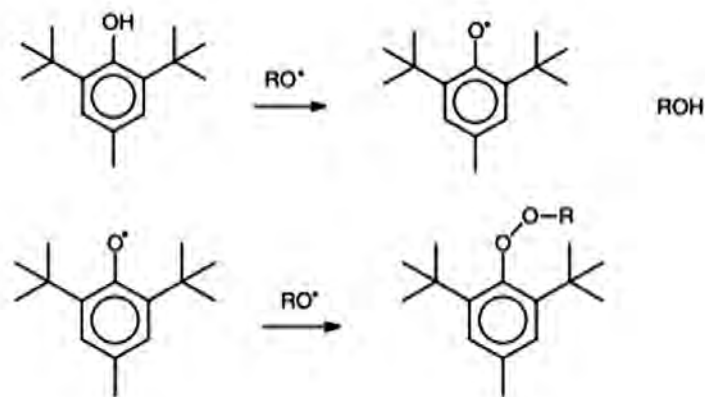
สารต้านออกซิเดชันปฐมภูมิ คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาถูกใช้ด้วยการจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน เช่น อนุมูลอิสระของเพอร์ออกไซด์ (ROO*) และแอลคอกไซด์ (RO*) ตัวอย่างของสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของเอมีน (เช่น octylated diphenylamine; Octamine) และสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล (เช่น butylated hydroxytoluene; Naugard BHT) ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารประกอบเหล่านี้จะให้อะตอมของไฮโดรเจน (N-H หรือ O-H) แก่อนุมูลอิสระโดยเฉพาะอนุมูลอิสระของเพอร์ออกไซด์ดังแสดงในสมการที่ 8



ทั้งนี้อนุมูลอิสระของสารต้านออกซิเดชัน (A*) จะต้องเป็นอนุมูลอิสระที่มีความเสถียรสูงและต้องไม่ทำปฏิกิริยาต่อเนื่องทำให้เกิดอนุมูลอิสระชนิดใหม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอนุมูลอิสระของสารต้านออกซิเดชันจะมีความเสถียรสูงเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) นั้นเอง รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างของสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอลที่นิยมใช้ในการปกป้องผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีเพราะสารเคมีในกลุ่มนี้ไม่เปลี่ยนสียางและไม่ทำใหยางตกสี ส่วนรูปที่ 10 แสดงตัวอย่างกลไกการจับอนุมูลอิสระของแอลคอกซีโดยสารต้านออกซิเดชัน BHT จากรูปจะเห็นได้ว่า BHT 1 โมเลกุลสามารถจับกับอนุมูลอิสระของแอลคอกซีได้ 2 ตัวหลังจากนั้นก็ไม่สามารถป้องกันอย่างต่อเนื่องได้อีก ด้วยเหตุนี้หากต้องการใช้สารประกอบอนุพันธ์ของฟีนอลเป็นสารป้องกันหลักก็ควรเติมสารต้านออกซิเดชันทุติยภูมิลงไปด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการปกป้องอย่างสูงสุด

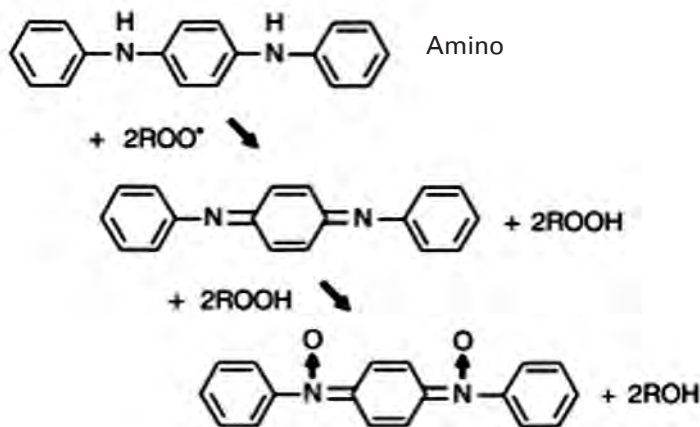


รูปที่ 9 ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล



รูปที่ 10 กลไกการจับอนุมูลอิสระของแอลคอกซีของ BHT

สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของเอมีนส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบของไดฟีนิลเอมีนและพาราฟีนิลลีนไดเอมีน ตัวอย่างกลไกการทำงานของสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของเอมีนแสดงในรูปที่ 11 โดยสารประกอบเอมีนจะให้อะตอมของไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระของเพอร์ออกไซด์ (ROO*) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันทำให้เกิดเป็นไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (ROOH) จากนั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเพอร์ออกไซด์ต่อไปได้เป็น R-OH ส่วนเอมีนที่เกิดขึ้นก็ยังคงสามารถเข้าไปจับอนุมูลอิสระตัวอื่นต่อไปได้อีก ด้วยเหตุนี้สารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของเอมีนจึงมีประสิทธิภาพในการปกป้องอย่างสูงกว่าสารประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล อย่างไรก็ตามสารเคมีในกลุ่มนี้ก็ทำให้ยางตกรสีและเปลี่ยนสีค่อนข้างรุนแรงจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์สีดำเท่านั้น



รูปที่ 11 ตัวอย่างกลไกการทำงานของสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มเอมีน

2. สารต้านออกซิเดชันหัตถิยภูมิ

สารต้านออกซิเดชันหัตถิยภูมิ คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่สลายไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (ROOH) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการเกิดออกซิเดชันให้กลายเป็นแอลกอฮอล์ ตัวอย่างของสารป้องกันการเสื่อมสภาพในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารประกอบฟอสไฟต์ (เช่น tris(nonylphenyl)phosphite; TNPP) สารประกอบไทโอเอสเทอร์ (เช่น dilauryl thiodipropionate; DLTDT) และสารประกอบไดไทโอคาร์บาเมต (เช่น Nickel di-n-butylthiocarbamate; Naugard NBC)

สารประกอบฟอสไฟต์นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชันที่ไม่เปลี่ยนสียางแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียรของสี (color stabilizer) ได้อีกด้วย รูปที่ 12 แสดงกลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบฟอสไฟต์กับไฮโดรเพอร์ออกไซด์แล้วเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์ สารประกอบฟอสไฟต์ทำงานเสริมกันได้ดีกับสารต้านออกซิเดชันในกลุ่มฟีนอลิกจึงนิยมใช้เป็นสารต้านออกซิเดชันรองควบคู่กับสารต้านออกซิเดชันหลักในกลุ่มฟีนอลิก อย่างไรก็ตามสารประกอบฟอสไฟต์มีข้อเสียหลัก คือ เกิดการไฮโดรไลซิสได้ง่ายเมื่อสารประกอบชนิดนี้ได้รับความชื้นจะเกิดเป็นกรดฟอสฟอรัสที่นอกจากจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นแล้ว ยังส่งผลต่อการสึกกร่อนของเครื่องมือในโรงงานด้วย



รูปที่ 12 การทำงานของสารประกอบฟอสไฟต์

การเลือกสารต้านออกซิเดชัน

โดยหลักการทั่วไปแล้วการออกสูตรเพื่อให้ยางได้รับการปกป้องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดนั้น ผู้ออกสูตรควรเติมสารต้านออกซิเดชันทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิลงไปด้วยกันเพื่อให้สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันทั้ง 2 ชนิดช่วยกันยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันในทุกขั้นตอน นอกจากนี้ผู้ออกสูตรต้องพิจารณาถึงตัวแปรอื่นๆ ในการเลือกใช้สารต้านออกซิเดชันด้วย อันได้แก่

- การเปลี่ยนสีและการตกสี
- ความเป็นพิษ
- ประสิทธิภาพ
- ความยากง่ายในการสูญเสียไปในระหว่างการใช้งาน ซึ่งต้องพิจารณาถึงอัตราเร็วในการระเหยที่อุณหภูมิสูง หรือความยากง่ายในการถูกสกัดโดยของเหลวที่ต้องสัมผัสในระหว่างการใช้งาน
- ต้นทุน
- กลิ่น

สรุป

การเสื่อมสภาพจากโอโซนและออกซิเจนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุการใช้งานสั้นลง ยางที่มีเฉพาะพันธะเดี่ยวอยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุลจะมีความทนต่อการเสื่อมสภาพทั้งจากโอโซนและออกซิเจนสูง แต่ยางที่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล จะเกิดการเสื่อมสภาพได้ค่อนข้างรวดเร็ว โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพจากโอโซนจะมีรูปแบบที่ชัดเจนคือจะทำให้เกิดรอยแตกในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของความเครียด ส่วนการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนนั้นจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตของยางด้อยลง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่สามารถมองเห็นการเสื่อมสภาพได้ด้วยตาเปล่า การป้องกันยางจากโอโซนและออกซิเจนสามารถทำได้โดยการเติมสารป้องกันโอโซนและสารป้องกันออกซิเจนตามลำดับ นอกจากการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพแล้ว การใช้เทคโนโลยีอย่างผสมก็สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อการเสื่อมสภาพของยางได้ด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.columbia.edu/itc/chemistry/chem-c3045/organic/archive/ozonolysis.pdf>
2. K., Nagdi, “Rubber as an Engineering Materials: Guideline for Users”, Hanser Publishers, 1992.
3. R.F., Ohm, “Improving the Heat Resistance of HNBR, ACM, EAM by the Use of Antioxidants”, Crompton, presented at Connecticut Rubber Group Meeting, April 6, 2004.
4. R.A., Mazzeo, “Antioxidants for Specialty Elastomers” in “Handbook of Specialty Elastomers”, Edited by R.C. Klingender, CRC Press, 2008.
5. R.A., Mazzeo, “Non-staining, Non-discoloring Antidegradants”, Paper E, Uniroyal Chemical Company, Inc., Presented at the 143 rd Rubber Division, A.C.S. Meeting in Denver, May 18-29, 1993.

วินัสรินทร์ อินทร์ดี:

การศึกษา: ปริญญาโท (เทคโนโลยีชีวามาตรัส)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: ผู้ช่วยวิจัย ห้องปฏิบัติการยาง

หน่วยวิจัยโพลีเมอร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

อุทัย เทพสุวรรณ

การศึกษา: ปริญญาตรี (วิศวกรรมไฟฟ้า)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: ผู้ช่วยวิจัย ห้องปฏิบัติการยาง

หน่วยวิจัยโพลีเมอร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ