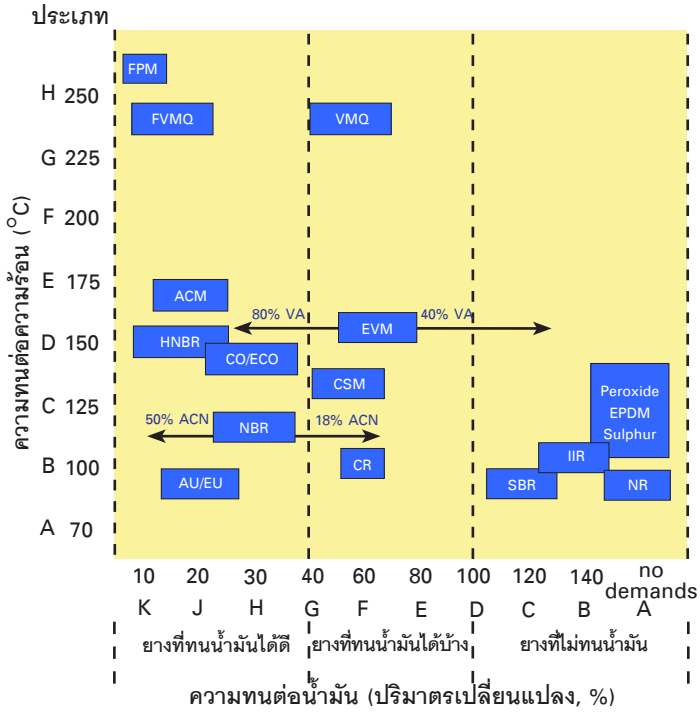
# ยางเอทิลีนไวนิลอะซิเทต

ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์

ปัจจุบันยางเอทิลีนไวนิลอะซิเทต (ethylene vinyl acetate rubber หรือ EVM หรือ EVA) นิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยางพื้นรองเท้า ยางหุ้มกระป๋อง และโฟมยาง เนื่องจากสมบัติเด่นบางประการ เช่น ทนน้ำมันที่อุณหภูมิสูงได้ดี (ดังรูปที่ 1) ทนต่อโอโซนและสภาพอากาศได้มากกว่ายางทั่วไป ตัวอย่างชื่อทางการค้าที่สำคัญของยาง EVM ได้แก่ Levapren (ผลิตโดยบริษัท Lanxess), Escorene Ultra (ผลิตโดยบริษัท ExxonMobil), Evatane (ผลิตโดยบริษัท Arkema) และ Greenflex (ผลิตโดยบริษัท Polimeri Europa) เป็นต้น




รูปที่ 1 สมบัติความทนต่อน้ำมันและความร้อนของยาง EVM เทียบกับยางชนิดอื่น

## โครงสร้างทางเคมี

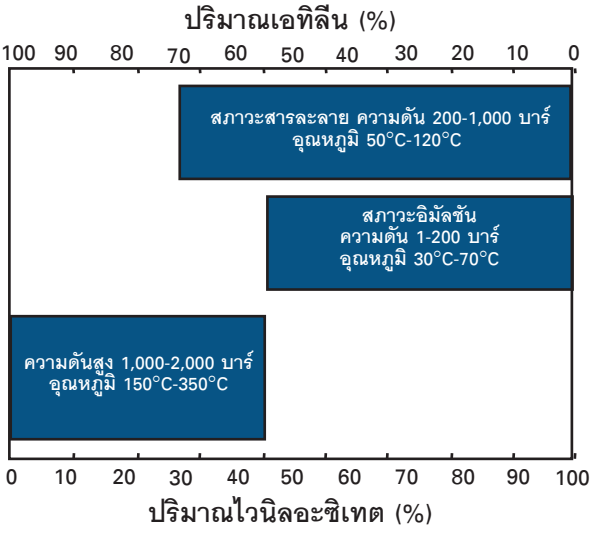
ยาง EVM มีสูตรโครงสร้างที่ประกอบด้วยเอทิลีนและไวนิลอะซิเทต การผลิต EVM สามารถทำได้ 3 วิธี (ดูรูปที่ 2) ได้แก่

1. การโพลิเมอไรซ์แบบบัลค์ (bulk polymerization) ใช้ความดันสูง (1,000-2,000 บาร์) อุณหภูมิ 150-350°C ให้ปริมาณไวนิลอะซิเทตร้อยละ 0-45 วิธีนี้มีข้อเสีย คือ น้ำหนักโมเลกุลที่ได้ต่ำและมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง

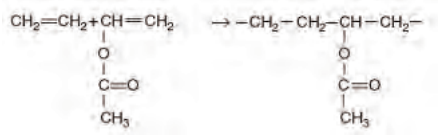
2. การโพลิเมอไรซ์แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ใช้ความดันต่ำ (1-200 บาร์) อุณหภูมิ 30-70°C ให้ปริมาณไวนิลอะซิเทตร้อยละ 45-100 ซึ่ง EVM ที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีนี้ไม่ค่อยจะใช้ในอุตสาหกรรมยาง แต่นิยมใช้เป็นสารปรับการรับแรงกระแทก (impact modifier) ในอุตสาหกรรมพลาสติกมากกว่า

3. การโพลิเมอไรซ์แบบสารละลาย (solution polymerization) ใช้ความดันปานกลาง (200-1,000 บาร์) อุณหภูมิ 50-120°C ให้ปริมาณไวนิลอะซิเทตร้อยละ 30-100 ใช้สารประกอบอะโซ (azo) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และใช้โทลูอีน เบนซีน เฮปเทน เทอร์เชียรีบิวทานอล (tertiary butanol) เป็นตัวทำละลายและตัวย้ายสายโซ่โมเลกุล ในบรรดาตัวทำละลายนี้ เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีสมบัติในการทำให้สายโซ่สิ้นสุดต่ำ วิธีโพลิเมอไรซ์แบบนี้จึงให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงและเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตยาง EVM ในปัจจุบัน

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ EVM แสดงในรูปที่ 3 โดยโคโพลิเมอร์ที่ได้จะจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (random copolymer) จากโครงสร้างของยาง EVM ที่เป็นพันธะเดี่ยวทำให้สมบัติบางประการ เช่น ความทนต่อความร้อน ความทนต่อสภาพอากาศ ความทนต่อโอโซนและความทนต่อน้ำมัน (ขึ้นอยู่กับปริมาณไวนิลอะซิเทต) ดีกว่ายางทั่วไป นอกจากนี้ยางชนิดนี้ยังไม่ตกสี มีค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (compression set) ต่ำ สามารถเติมสารตัวเติมได้ในปริมาณมากและง่ายต่อการผลิตดังแสดงในรูปที่ 4

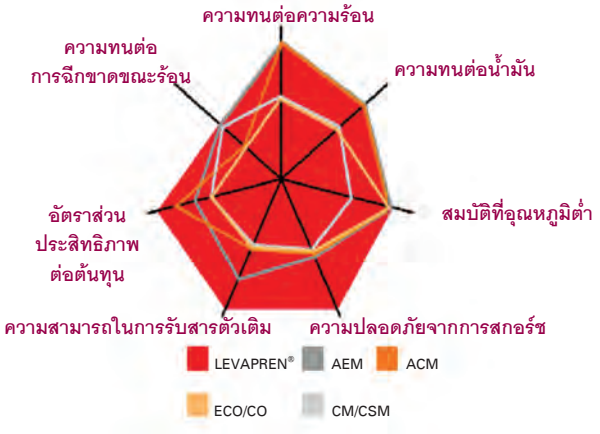



รูปที่ 2 การผลิต EVM




เอทิลีน ไวนิลอะซิเทต เอทิลีนไวนิลอะซิเทต โคโพลิเมอร์

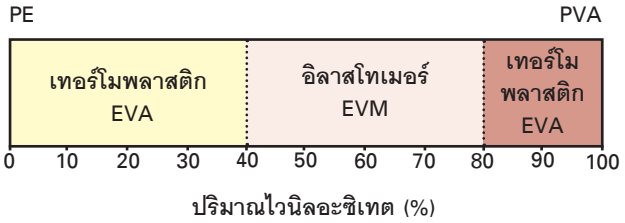
รูปที่ 3 ปฏิกิริยาการโพลิเมอไรซ์ของ EVM




รูปที่ 4 สมบัติต่างๆ ของยาง EVM (LEVAPREN®) เทียบกับยางชนิดอื่น

## การจัดเกรดยาง EVM

ตามมาตรฐาน ASTM D1418-06 “Standard Practice for Rubber and Rubber Latices-Nomenclature” ได้จัดให้ยางเอทิลีนไวนิลอะซิเทต (Ethylene Vinyl Acetate Rubber, EVM หรือ EVA) เป็นยางกลุ่ม M ซึ่งมีสายโซ่หลัก (backbone) ที่มีความอิ่มตัว สัดส่วนของเอทิลีนและไวนิลอะซิเทตในโครงสร้างจะมีผลต่อสมบัติความเป็นยางและพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 5 กล่าวคือ EVM จะมีสมบัติเป็น “ยาง” เมื่อมีปริมาณไวนิลอะซิเทตร้อยละ 40-80 ถ้ามีปริมาณไวนิลอะซิเทตต่ำกว่าร้อยละ 40 หรือมากกว่าร้อยละ 80 EVM จะมีสมบัติเป็นพลาสติก




รูปที่ 5 สัดส่วนของเอทิลีนและไวนิลอะซิเทตในโครงสร้างที่มีผลต่อสมบัติความเป็นยางหรือพลาสติก

ตารางที่ 1 ตัวอย่างยาง EVM เกรดต่างๆ ของบริษัท Lanxess [2]

| ชื่อทางการค้า | ปริมาณไวนิลอะซิเทต (%) | ความหนาแน่น ($g/cm^3$) | ความหนืด (ML 1+4, 100°C) (MU) |
|---|---|---|---|
| **Standard Grades:** | | | |
| Levapren® 400 | 40 | 0.98 | 20 |
| Levapren® 500 HV | 50 | 1 | 27 |
| Levapren® 600 HV | 60 | 1.04 | 27 |
| Levapren® 700 HV | 70 | 1.08 | 27 |
| Levapren® 800 HV | 80 | 1.11 | 28 |
| Levapren® VP KA 8939 | 90 | - | 40 |
| **Pre-crosslinked Grades:** | | | |
| Levapren® VP KA 8857 | 50 | - | 55 |
| Levapren® VP KA 8936 | 80 | - | 55 |

## การวัลคาไนซ์ยาง EVM

เนื่องจากสายโซ่หลักของยาง EVM เป็นพันธะเดี่ยวหมด ดังนั้นยางชนิดนี้จึงไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันได้ แต่จะสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีพลังงานสูง (high-energy radiation) สำหรับระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์โดยทั่วไปการเลือกใช้เพอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมนั้นจะต้องพิจารณาจากอุณหภูมิการผสมและกลิ่นที่จะเกิดขึ้น ซึ่งในบรรดาเพอร์ออกไซด์ที่มีการจำหน่ายกันในท้องตลาดนั้น 1, 4-bis(tertiary butyl peroxy isopropyl) benzene เป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีกลิ่นน้อยและให้ความปลอดภัยในการผลิตสูง สำหรับ 2, 5-dimethyl-2, 5-bis(tertiary butyl peroxy) hexane ก็ให้กลิ่นน้อยแต่มีข้อเสีย คือ วัลคาไนซ์ได้ช้ากว่า ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไม่คำนึงถึงเรื่องกลิ่น dicumyl peroxide จะเป็นสารที่นิยมใช้กันมากเพราะสามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (150-160°C)

การใช้เพอร์ออกไซด์เดี่ยวๆ ไม่สามารถให้ระดับการวัลคาไนซ์ที่สูงเพียงพอ จึงจำเป็นต้องใช้สารโคเอเจนต์ (co-agent) เช่น triallyl cyanurate (TAC), triallyl isocyanurate (TAIC), trimethylol propane trimethacrylate (TMPTA) หรือ ethylene dimethacrylate (EDMA) ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มปริมาณพันธะเชื่อมโยงเนื่องจากสารเหล่านี้จะเข้าไปเพิ่มตำแหน่งในการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ในสายโซ่โพลิเมอร์และเกิดการรวมตัวของอนุมูล (radical) เหล่านั้น เป็นพันธะเชื่อมโยง

ปริมาณสารเคมีที่แนะนำให้ใช้ ได้แก่ สารเพอร์ออกไซด์ 2-7 phr สารโคเอเจนต์ 0.5-5 phr สำหรับคอมพาวด์ที่มีสี ส่วนคอมพาวด์ที่ใส่เขม่าดำแนะนำให้ใช้สารเพอร์ออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 25

เนื่องจากยาง EVM เป็นโพลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) จึงไม่สามารถเกิดผลึกให้เกิดการเสริมแรงได้ในตัวเอง ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ จึงมักมีการออกสูตรให้ใช้สารตัวเติมเสริมแรง ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับผลิตภัณฑ์สีดำก็ยังคงเป็นเขม่าดำที่ได้รับความนิยม เขม่าดำเกรด N330, N550 (สามารถใช้ได้ปริมาณมากถึง 60 phr) N770 (ใช้ได้ปริมาณมากถึง 80 phr) และ N990 (ใช้ได้ปริมาณมากถึง 100 phr) เขม่าดำเกรด N220 นิยมนำมาผสมร่วมกับเขม่าดำเกรดอื่นๆ กรณีที่ต้องการสมบัติการนำไฟฟ้าแนะนำให้ใช้เขม่าดำเกรด N475 สำหรับการเลือกใช้สารตัวเติมสีขาวต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะสารบางตัวในกลุ่มนี้ เช่น ซิลิกา (ใช้ได้ปริมาณมากถึง 60 phr) แม้ว่าจะทำให้สมบัติความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น แต่จะไปหน่วงระบบการวัลคาไนซ์ทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ลดลง ดังนั้นอาจจะเลือกใช้สารตัวเติมสีขาวอื่นๆ เช่น ทัลคัม (ไมโครทัลคัม) เคลย์ (50-100 phr) ได้ นอกจากนี้การใช้ซิลิกานิยมใช้ร่วมกับสารคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา กรณีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้ติดไฟสามารถใช้อะลูมิเนียมไทรไฮเดรต (ปริมาณ 100-200 phr) ร่วมกับไวนิลไซเลน ซิงก์บอเรต (ปริมาณ 10-20 phr) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (ปริมาณ 0-20 phr)

ส่วนการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชันหรือป้องกันการเสื่อมสภาพนั้น โดยปกติแล้วยาง EVM จะมีสมบัติความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดีอยู่แล้ว และการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ก็ไม่จำเป็นต้องเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความต้านทานต่อความร้อนได้ดีที่สุด เราอาจจำเป็นต้องเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชัน เช่น สไตรีเนตไดฟีนิลลามีน (styrenated diphenylamine, SDPA) หรือออกทิเลตไดฟีนิลลามีน (octylated diphenylamine, ODPA) ลงไป 1 phr

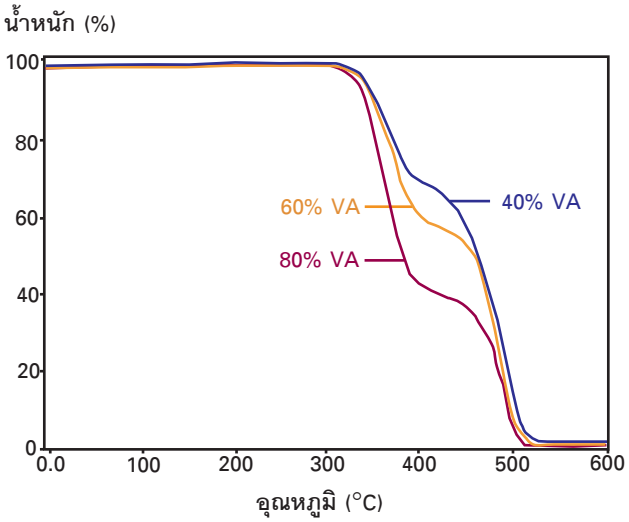
การใช้สารพลาสทิไซเซอร์มีความจำเป็นอย่างมากในกรณีที่ใช้ยาง EVM เกรดที่มีความหนืดสูงหรือมีการเติมสารเคมีลงไปในปริมาณมาก ซึ่งสารพลาสทิไซเซอร์ที่นิยมใช้กับยาง EVM ได้แก่ น้ำมันพาราฟินิก แต่ไม่แนะนำให้ใช้น้ำมันแนฟทินิกและน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งจะไปมีผลต่อการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ ส่วนสารพลาสทิไซเซอร์สังเคราะห์ในกลุ่มของอะดิเพต (adipate-type) และซีบาเคต (sebacate-type) เติมลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ยาง EVM เกรดที่ปริมาณไวนิลอะซิเทตสูง

นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจมีการใช้กรดสเตียริก (ปริมาณ 1 phr) เพื่อลดความเหนียวติดของของผสมที่ใช้ยาง EVM เกรดที่มีความหนืดต่ำและช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมให้ดีขึ้นด้วย หรืออาจใช้ซิงก์สเตรียเรต (ปริมาณ 1-2 phr) ก็ได้ ไขพาราฟินนั้นโดยปกติไม่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน แต่ถ้าใช้ในปริมาณ 5 phr จะทำหน้าที่เป็นสารช่วยการแปรรูป (processing aid) ที่ดีได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสันสวยงามจำเป็นต้องคำนึงถึงสารสีที่ใช้เนื่องจากสารสีหลายชนิดเป็นสีอินทรีย์ที่มีผลรบกวนต่อระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ ดังนั้นจึงแนะนำใช้สารสีที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ปราศจากกรดแทน นอกจากนั้นยังอาจต้องหลีกเลี่ยงสารที่มีพันธะคู่ pH ต่ำหรือมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบบางกลุ่ม เช่น เรซิน สารตัวเติมสีขาวที่มีฤทธิ์เป็นกรดและน้ำมันพืช

## สมบัติทั่วไปของยาง EVM

### 1. ความต้านทานต่อความร้อนและการบ่มเร่ง

สมบัติเด่นของยาง EVM วัลคาไนซ์ ก็คือความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนที่ดีเยี่ยม จากข้อมูลของการวัดสมบัติเชิงความร้อนโดยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) สามารถบอกถึงสมบัติความทนความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของโพลิเมอร์ได้



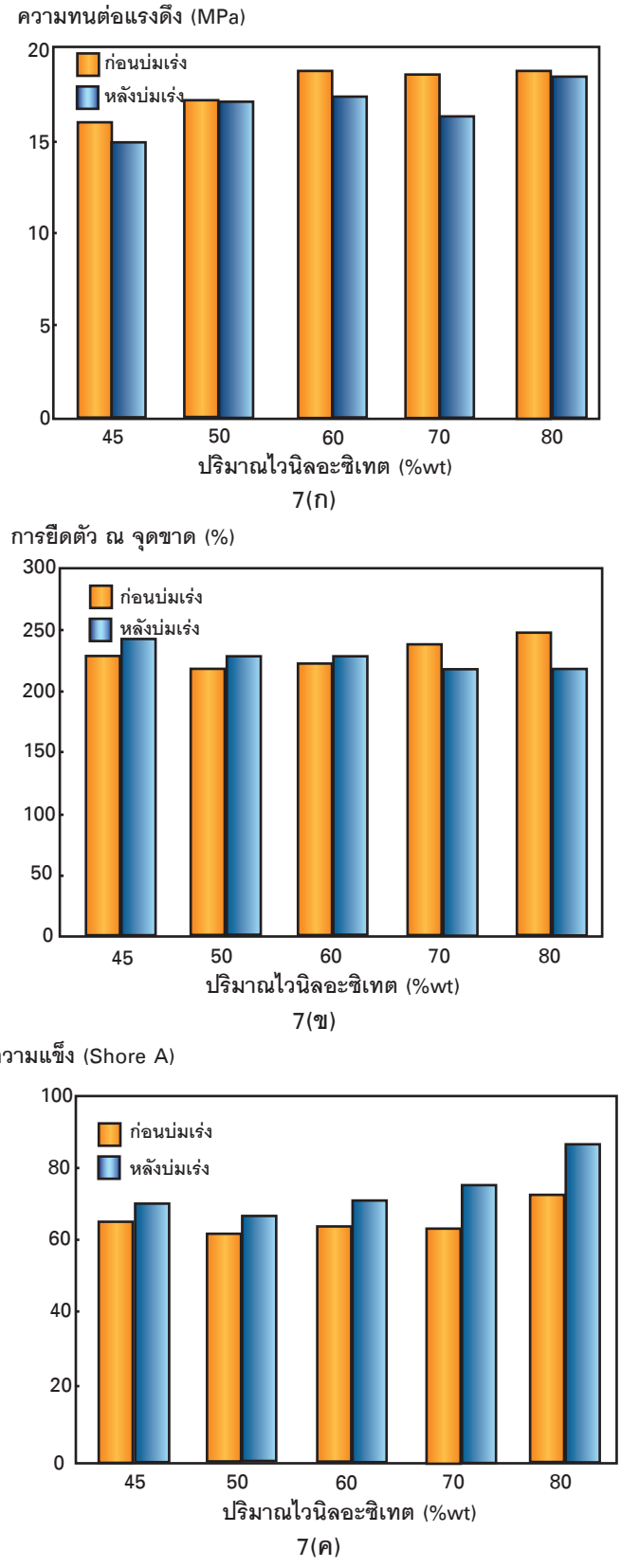

รูปที่ 6 การวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis) ของยาง EVM ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตร้อยละ 40 60 และ 80 วัดที่อัตราการเพิ่มความร้อน 20°C ต่อนาที

รูปที่ 6 แสดงการวัดอุณหภูมิการสลายตัวของยาง EVM ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทต (VA) ร้อยละ 40 60 และ 80 ด้วยเครื่อง TGA ในบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าการสลายตัวของโคโพลิเมอร์นี้เกิดขึ้น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการแตกตัวให้กรดอะซิติกในโคโพลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 350°C เหมือนกันไม่ว่าจะมีปริมาณไวนิลอะซิเทตเท่าใด แต่โคโพลิเมอร์ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตสูงก็จะมีน้ำหนักที่หายไปจากการสลายตัวสูง แสดงว่าปริมาณไวนิลอะซิเทตมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของโคโพลิเมอร์หลังได้รับความร้อน ในช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของโครงสร้างหลักของโพลิเมอร์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเหมือนกันทั้งในอากาศและในบรรยากาศของไนโตรเจน เพียงแต่ว่าในอากาศ อุณหภูมิการแตกตัวในช่วงแรกจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 280-300°C

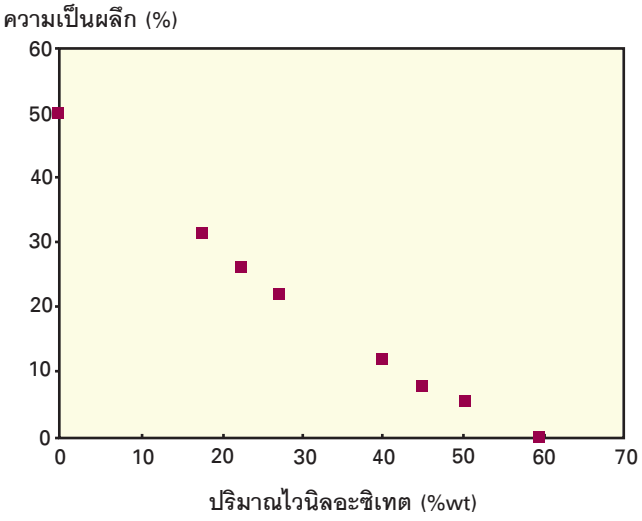
รูปที่ 7 แสดงสมบัติความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งของยาง EVM ก่อนและหลังบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 14 วัน จะเห็นได้ว่าสมบัติความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งของยาง EVM ก่อนการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณไวนิลอะซิเทตที่สูงขึ้น แต่หลังบ่มเร่งสมบัติการยืดตัว ณ จุดขาดของยาง EVM ลดลง ตรงกันข้ามกับความแข็งของยาง EVM ที่กลับเพิ่มขึ้นตามปริมาณไวนิลอะซิเทตที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนต่อแรงดึงของยาง EVM หลังการบ่มเร่งมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มเร่งเล็กน้อย

## 2. อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและความเป็นผลึก

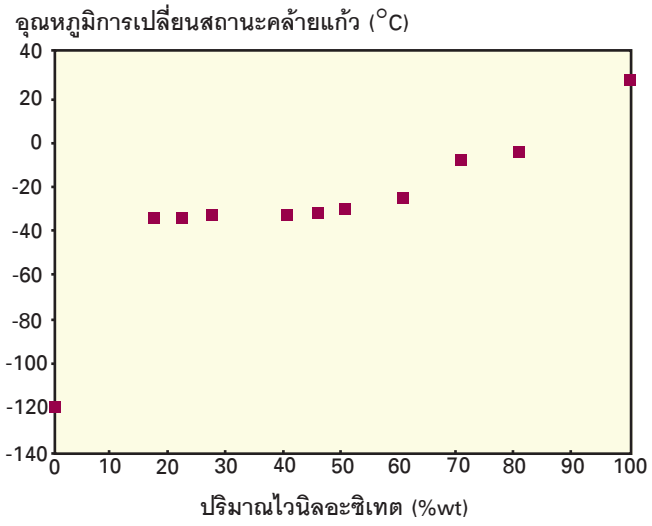
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; $T_g$) และความเป็นผลึกจัดเป็นสมบัติที่สำคัญมากสำหรับการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยาง ซึ่งโพลิเอทิลีนแสดงความเป็นผลึกสูงมาก เพราะโครงสร้างที่เป็นระเบียบเรียบร้อยของสายโซ่โพลิเมอร์ ในขณะที่ไวนิลอะซิเทตมีหมู่เกะกะห้อยมาจากสายโซ่ซึ่งทำให้ขัดขวางการเกิดผลึก รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าปริมาณไวนิลอะซิเทตมีผลต่อความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอย่างมาก ปริมาณไวนิลอะซิเทตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการเกิดผลึกลดลงในขณะที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยาง EVM จะเพิ่มสูงขึ้น และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยาง EVM จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณไวนิลอะซิเทตเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 50 เป็นต้นไป




รูปที่ 7 สมบัติเชิงกลของยางคอมพาวด์ก่อนและหลังบ่มเร่ง (ก) ความทนต่อแรงดึง (ข) การยืดตัว ณ จุดขาด (ค) ความแข็ง




8(ก)

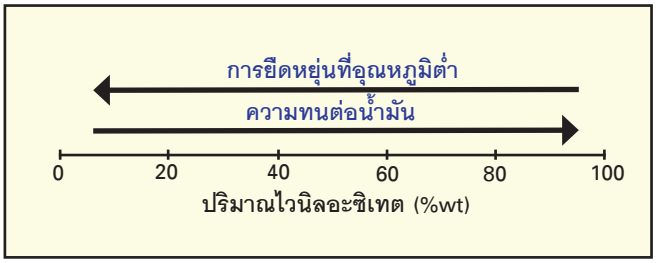



8(ข)

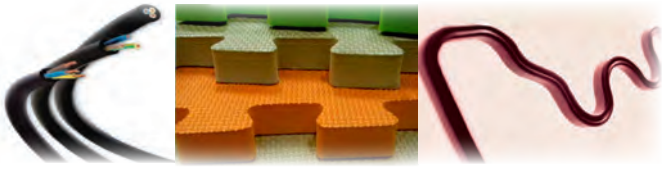
รูปที่ 8 ผลของปริมาณไวนิลอะซิเทตต่อ (ก) ความเป็นผลึก (ข) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

### 3. ความทนต่อน้ำมัน

ความทนต่อน้ำมันขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของยาง ความเป็นขั้วของยาง EVM ขึ้นอยู่กับปริมาณของไวนิลอะซิเทตเพราะไวนิลอะซิเทตมีความเป็นขั้วสูง จากรูปที่ 9 เห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อปริมาณไวนิลอะซิเทตเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการทนต่อน้ำมันดีขึ้น ขณะที่ความสามารถในการหักงอที่อุณหภูมิต่ำจะลดลง ดังนั้นการเลือกใช้ยาง EVM จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานและสมบัติที่ต้องการ




รูปที่ 9 ผลของปริมาณไวนิลอะซิเทตต่อความทนต่อน้ำมันและการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ



### 4. สมบัติอื่นๆ

นอกจากสมบัติความทนต่อความร้อน สภาพอากาศ และโอโซนที่ดีเยี่ยมแล้ว ยาง EVM ยังมีสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับยางชนิดอื่นๆ เช่น สมบัติของ Levapren® ที่แสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2 สมบัติโดยทั่วไปของ Levapren® เมื่อเทียบกับยางอื่นๆ [2]**

| สมบัติทางกายภาพของยาง | Levapren® | AEM | ACM | ECO/CO | CM/CSM | HNBR |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ความทนต่อแรงดึง (MPa) | สูงได้ถึง 24 | สูงได้ถึง 20 | สูงได้ถึง 18 | สูงได้ถึง 15 | สูงได้ถึง 20 | สูงได้ถึง 38 |
| ความแข็ง (Shore A) | 50-90 | 50-90 | 50-90 | 50-90 | 50-90 | 50-90 |
| ความต้านทานต่อการสึกกร่อน | B | B | B | C | A | A |
| ความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยฉีกขาด | C | C | C | C | C | A |
| การกระเด้งตัว (rebound resilience) | A-D | C | C | C | C | B-C |
| ความต้านทานต่ออากาศร้อน (อุณหภูมิสูงสุดที่ทนได้ภายใต้ความเค้นเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง) ($^{O}$C) | 175 | 175 | 175 | 135 | 135 | 150 |
| ความทนต่ออุณหภูมิต่ำ | C | C | D | C | D | C |
| ความทนต่อสภาพอากาศและโอโซน | A | A | A | A | A-B | A-B |
| พฤติกรรมการเผาไหม้ | A | A-B | C | D | D | A-B |

**หมายเหตุ:** A=ดีเยี่ยม B=ดีมาก C=ดี D=ปานกลาง
AEM คือ ยางเอทิลีนอะคริลิก (ethylene-acrylic elastomer)
ACM คือ ยางอะคริเลต (acrylate elastomer)
ECO/CO คือ ยางอิพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin)
CM/CSM คือ ยางคลอริเนต/คลอโรซัลโฟเนตโพลิเอทิลีน (chlorinated/chlorosulfonated polyethylene)
HNBR คือ ยางไนไทรล์ไฮโดรจิเนต (hydrogenated NBR)

## การใช้งาน

เนื่องด้วยยาง EVM มีสมบัติที่ทนต่อความร้อน น้ำมัน สภาพอากาศ และโอโซน จึงนิยมนำ EVM ไปใช้ในอุตสาหกรรมเคเบิลและชิ้นส่วนในรถยนต์ เช่น ปะเก็น ซีล และท่อต่างๆ จากการศึกษาของบริษัท Lanxess ที่นำเอายาง EVM 2 เกรด ได้แก่ ยาง Levapren® 600 HV (ไวนิลอะซิเทตร้อยละ 60) และยาง Levapren® 700 HV (ไวนิลอะซิเทตร้อยละ 70) มาทดสอบเปรียบเทียบกับยาง ACM (acrylate elastomer) และยาง AEM (ethylene-acrylic elastomer) 2 เกรด ได้แก่ ยาง AEM1 ยาง AEM2 โดยใช้สูตรผสมเคมียางดังแสดงในตารางที่ 3 และผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 10-13

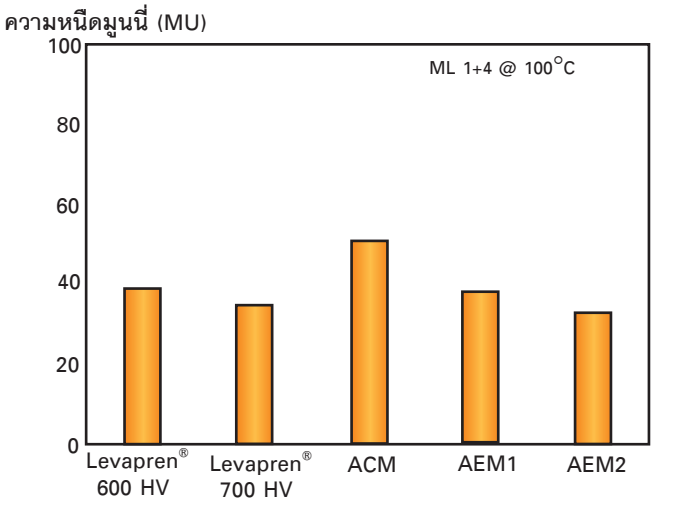
ตารางที่ 3 สูตรผสมเคมีที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของยางคอมพาวด์ [3]

| สูตรผสมเคมี | Levapren® 600 HV (phr) | Levapren® 700 HV (phr) | ACM (phr) | AEM1 (phr) | AEM2 (phr) |
|---|---|---|---|---|---|
| ยาง | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1-ออกตะเดเคนเอมีน, N-ออกตะเดคซิล | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| เขม่าดำ (N550) | 50 | 50 | 60 | 55 | 55 |
| แมกนีเซียมออกไซด์ | 3 | 3 | 3 | - | - |
| 4,4'- บิส (แอลฟา,แอลฟา-ไดเมทิลเบนซิล) ไดฟีนิล | 1.5 | 1.5 | 3 | 2 | 2 |
| ได (2-เอทิลเฮกซิล) ซีเบเคต | 5 | 5 | - | - | - |
| สารต้านการเสื่อมสภาพ (Rhenogran® PCD-50) | 3 | 3 | - | - | - |
| กรดสเตียริก | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 1.5 |
| สารพลาสทิไซเซอร์ (Thikol TP-759) | - | - | - | 7 | 7 |
| โพลิออกซีเอทิลลีน ออกตะเดซิล อีเทอร์ ฟอสเฟต | - | - | 1 | 1 | 1 |
| ซิงก์-4,5-เมทิล-2-เมอร์แคปโต-เบนซิไมดาโซล (ZMMBI) | 0.4 | 0.4 | - | - | - |
| ซิงก์ออกไซด์ | 2 | 2 | - | - | - |
| ไดโทลีลกัวนิดีน (DOTG) | - | - | 2 | 4 | 4 |
| เฮกซะเมทิลีนไดอะมีนคาร์บาเมต | - | - | 0.6 | 1.5 | 1.5 |
| ไทรแอลลิลไอโซไซยานูเรต | 1 | 1 | - | - | - |
| แอลฟา,แอลฟา-บิส (เทอร์-บิวทิวเพอร์ออกซี) ไดไอโซโพรพิลเบนซีน | 4.5 | 4.5 | - | - | - |

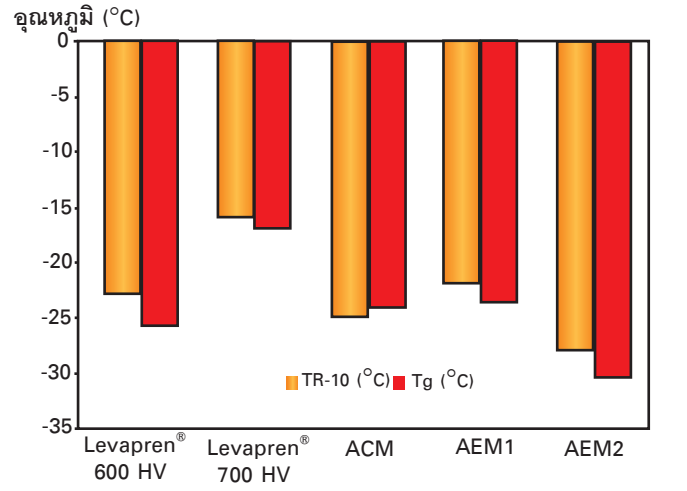
จากการทดสอบสมบัติความหนืดของยางคอมพาวด์แต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า ยาง ACM มีค่าความหนืดสูงสุด รองลงมา คือ ยาง Levapren® 600 HV ยาง AEM1 ยาง Levapren® 700 HV และยาง AEM2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของยาง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ยาง Levapren® 600 HV มีค่า $T_g$ และ TR-10 (temperature retraction, 10%)[1] อยู่ระหว่างยาง ACM และยาง AEM2 และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยาง Levapren® 600 HV กับยาง Levapren® 700 HV พบว่ายาง Levapren® 700 HV มีค่า $T_g$ อยู่ที่ -17°C และ TR-10 เป็น -16°C ซึ่งสูงกว่ายาง Levapren® 600 HV มีค่า $T_g$ อยู่ที่ -26°C และ TR-10 เป็น -23°C

เมื่อวัลคาไนซ์ยางตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3 สมบัติของยางที่ได้จะแตกต่างกันตามชนิดของยาง จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาสกอร์ชที่ 125°C และ 135°C ของยาง EVM 2 เกรด มีค่าสูงที่สุด ซึ่งยาง Levapren® 700 HV จะมีระยะเวลาสกอร์ชที่ 135°C สูงกว่ายาง Levapren® 600 HV ยาง AEM และยาง ACM ตามลำดับ

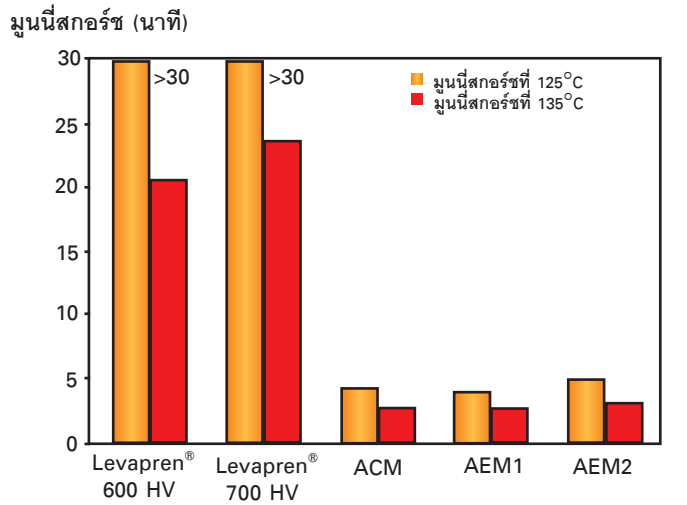
[1] TR-10 (temperature retraction, 10%) เป็นการวัดอุณหภูมิของยางที่หดตัวลงร้อยละ 10 ภายหลังที่ยืดยางออกร้อยละ 100 (100% Elongation) ที่อุณหภูมิ -70°C ตามมาตรฐาน ASTM D1329-08 Standard Test Method for Evaluating Rubber Property— Retraction at Lower Temperatures (TR Test)




รูปที่ 10 ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์แต่ละชนิด




รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของยางคอมพาวด์แต่ละชนิด



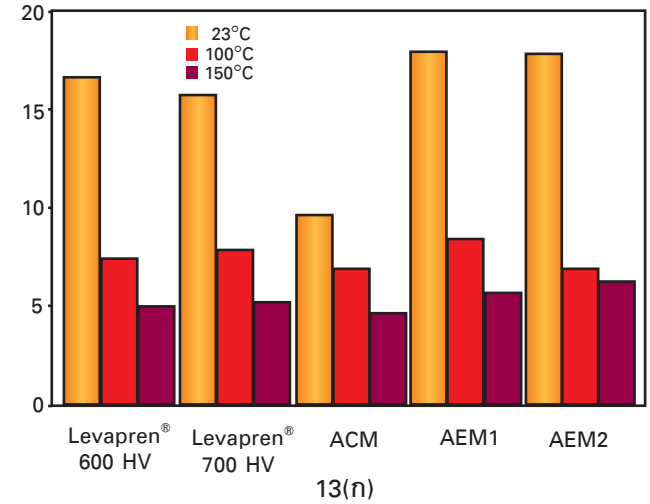

รูปที่ 12 เปรียบเทียบสมบัติของยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ

เมื่อนำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนต่อการฉีกขาดและการเสียรูปถาวรหลังกดโดยทดสอบสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิห้องและบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และ 150°C เนื่องจากในการใช้งานผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์ปะเก็น ซีล และท่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นและลงอยู่ตลอดอายุการใช้งาน ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ายาง EVM จะมีค่าความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และการยืดตัว ณ จุดขาดอยู่ระหว่างยาง ACM และยาง AEM โดยสมบัติเชิงกลเหล่านี้จะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 13 และเมื่อบ่มเร่งที่ 150°C เป็นเวลา 0 วัน 7 วัน และ 21 วัน ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เมื่อบ่มเร่ง 7 วัน จะมีค่าสูงสุด และจะลดลงเมื่อบ่มเร่งนาน 21 วัน สำหรับยางทุกชนิด (รูปที่ 13 (จ)) ส่วนการเสียรูปถาวรหลังกดในรูปที่ 13(ค) ยางทุกชนิดมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกดที่อุณหภูมิ 150°C 70 ชั่วโมง ต่ำกว่าร้อยละ 20 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเร่งเป็น 168 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150°C ร้อยละของค่าการเสียรูปถาวรหลังกดจะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อน้ำมันและความร้อนของยาง EVM ตามมาตรฐาน ASTM D2000/SAE J200 (ดังรูปที่ 1) จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณไวนิลอะซิเทตเพิ่มขึ้นความทนต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นและเมื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง EVM เทียบกับยางชนิดอื่นๆ ในน้ำมันเครื่อง Engine oil Helix 5W30 และน้ำมันเครื่อง Engine oil Cecilia 20 เป็นเวลา 1,008 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150°C ดังรูปที่ 14 พบว่ายาง EVM มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นและการเปลี่ยนแปลงความแข็งลดลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับยางวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆ แต่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าความทนต่อแรงดึงจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่นๆ ทั้งในน้ำมันเครื่อง Engine oil Helix 5W30 และน้ำมันเครื่อง Engine oil Cecilia 20 แต่เมื่อเทียบกันระหว่างยาง EVM ทั้ง 2 ชนิด พบว่ายาง EVM ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากกว่ายาง EVM ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตสูงเมื่อแช่ในน้ำมัน

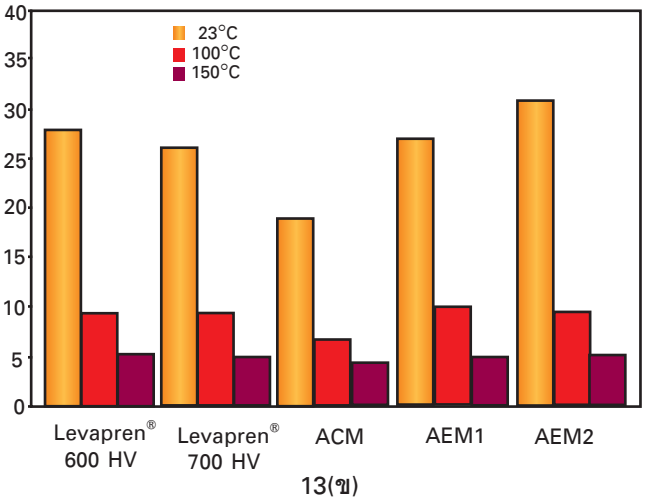
จากรูปที่ 15 สามารถเห็นได้ชัดว่ายางคอมพาวด์ทั้ง 5 เกรดมีสมบัติใกล้เคียงกัน โดยยาง EVM มีสมบัติอยู่ระหว่างยาง AEM และยาง ACM ซึ่งยาง AEM จะมีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนต่อการฉีกขาดสูงสุด รองลงมาคือ ยาง EVM ทั้ง 2 เกรด และยาง ACM ตามลำดับ แต่เมื่อดูระยะเวลาการสกอร์ชยาง EVM จะมีระยะเวลาสกอร์ชสูงสุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อความปลอดภัยในกระบวนการผลิต

ความทนต่อแรงดึง (MPa)



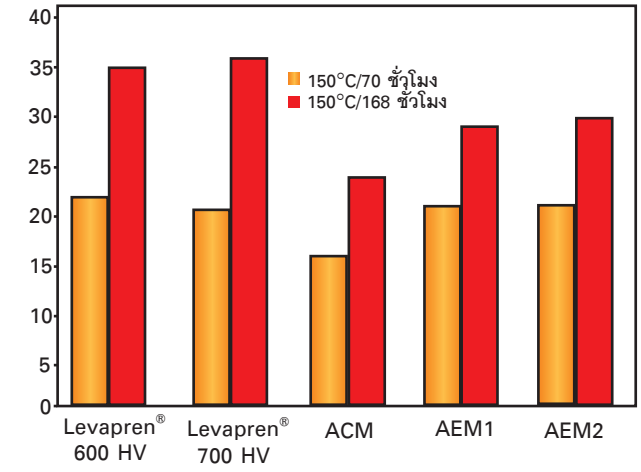

13(ก)

ความทนต่อการฉีกขาด ($N/m^2$)



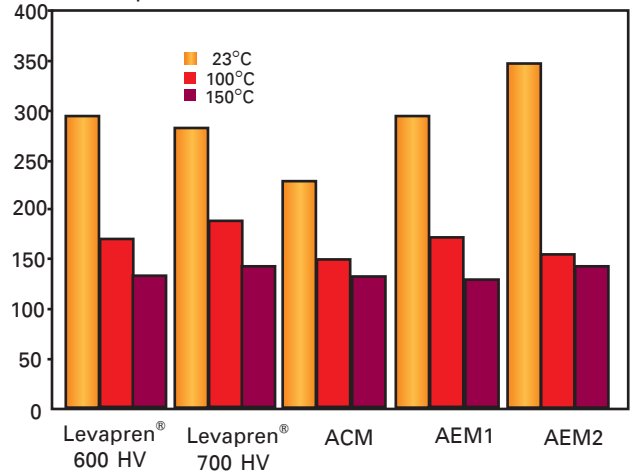

13(ข)

การเสียรูปถาวรหลังกด (%)



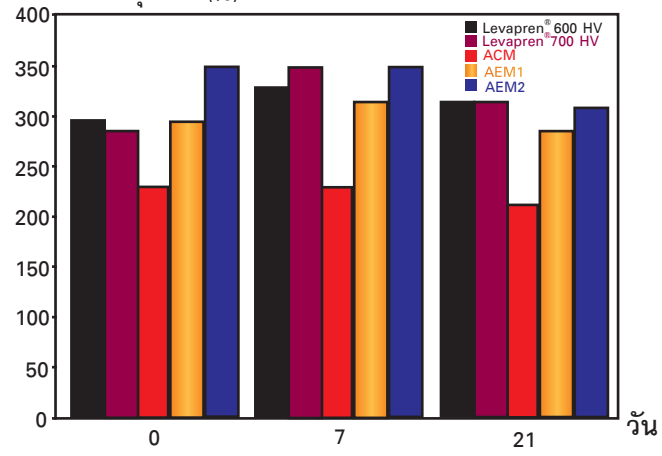

13(ค)

การยืดตัว ณ จุดขาด (%)




13(ง)

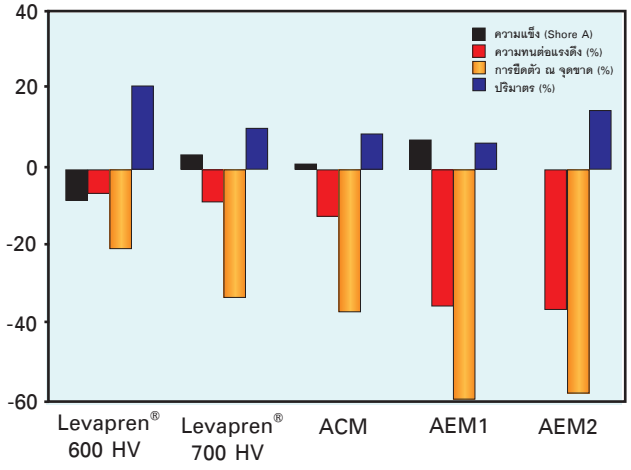
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)




13(จ)

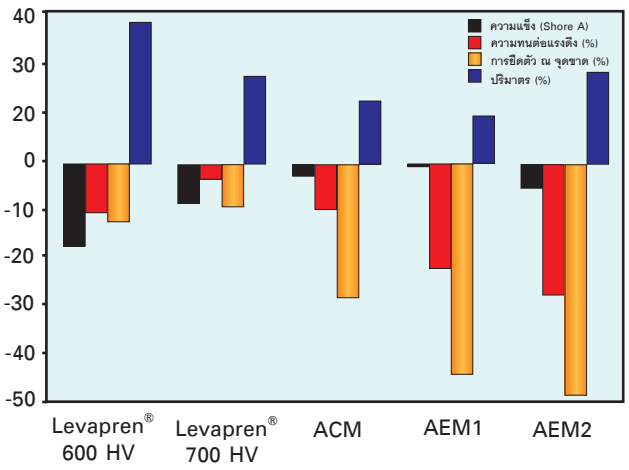
รูปที่ 13 สมบัติเชิงกลของยางแต่ละชนิด (ก) ความทนต่อแรงดึง (ข) ความทนต่อการฉีกขาด (ค) การเสียรูปถาวรหลังกด (ง) การยืดตัว ณ จุดขาด (จ) การยืดตัว ณ จุดขาด หลังบ่มเร่งที่ 150°C

สมบัติเปลี่ยนแปลง



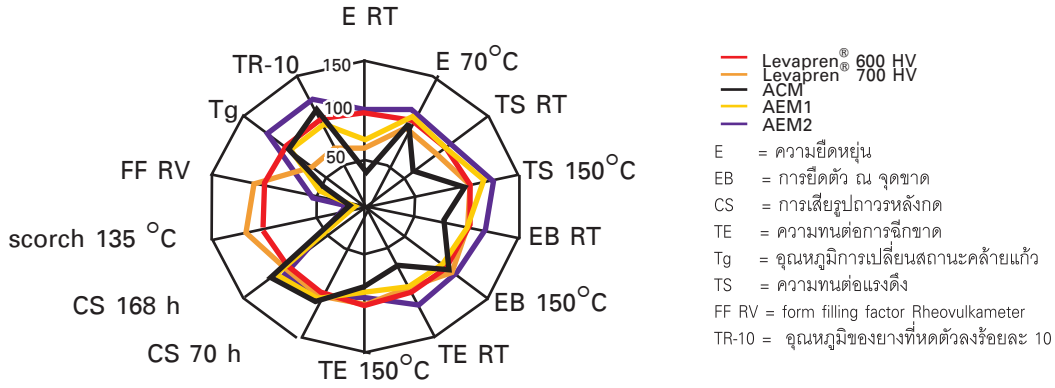

14(ก) Engine oil Helix 5W30

สมบัติเปลี่ยนแปลง



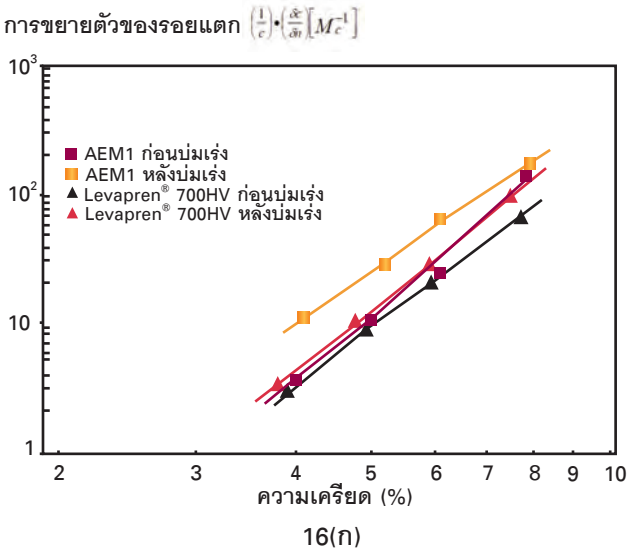

14(ข) Engine oil Cecilia 20

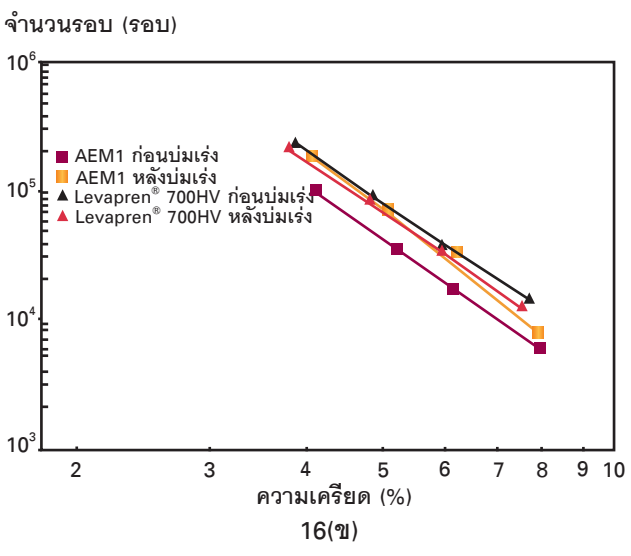
รูปที่ 14 สมบัติทางกายภาพของยางแต่ละชนิดหลังจากแช่ในน้ำมันเครื่องที่ 150°C 1,008 ชั่วโมง



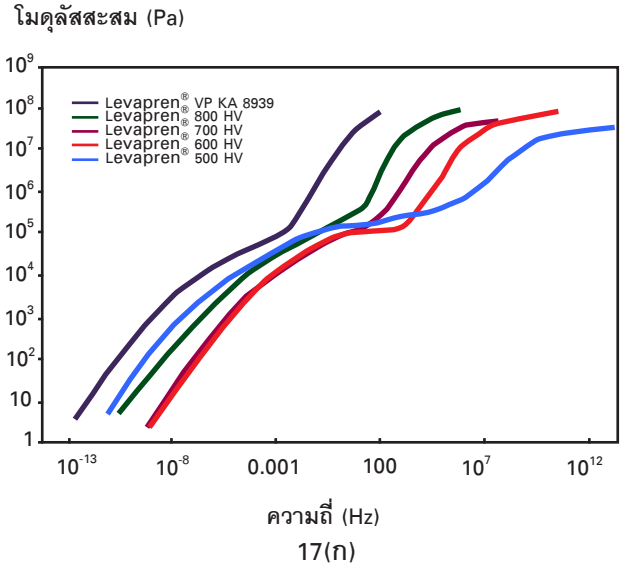

รูปที่ 15 สมบัติของยางคอมพาวด์

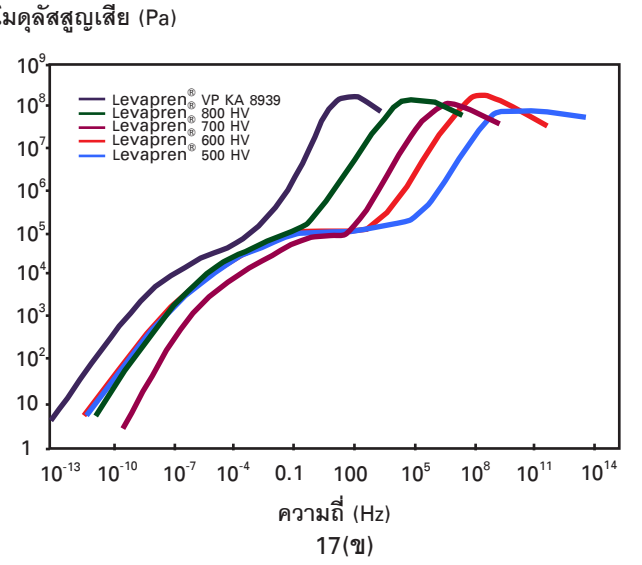
เนื่องจากในผลิตภัณฑ์ประเภทท่อ ซีลหรือปะเก็น จะเกิดการแตกหักได้ง่ายเมื่อต้องสัมผัสกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกระหว่างการใช้งาน ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบการขยายตัวของรอยแตกระหว่างยาง Levapren® 700HV (ยาง EVM) กับยาง AEM ซึ่งพบว่ายาง EVM มีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตกได้ดีกว่ายาง AEM1 ดังรูปที่ 16(ก) ขณะที่จำนวนรอบของการหักงอที่ทำให้เกิดการฉีกขาดในยาง AEM1 ก่อนบ่มเร่งจะมีค่าต่ำสุด คือ สามารถแตกหักได้เร็วที่สุด รองลงมา คือ ยาง AEM1 หลังบ่มเร่ง ยาง EVM หลังบ่มเร่ง และยาง EVM ก่อนบ่มเร่งมีความทนต่อการฉีกขาดได้ดีที่สุด ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 16(ข)




รูปที่ 16 การเปรียบเทียบยาง EVM กับยาง AEM โดย Tear analyzer (ก) การขยายตัวของรอยแตก (ข) จำนวนรอบ




รูปที่ 17 ความถี่ของโมดุลัสเฉือนเชิงซ้อนที่อุณหภูมิ 20°C ของวัตถุดิบ (วัดโดย Mettler DMA/STDA861e และ Rheometer Physica MCR300) (ก) โมดุลัสสะสม (ข) โมดุลัสสูญเสีย

ในผลิตภัณฑ์แบริ่งและยางล้อรถต้องมีการทดสอบความถี่ของโมดุลัสเฉือนเชิงซ้อน ซึ่งในรูปที่ 17 เป็นการทดสอบความถี่ของโมดุลัสเฉือนเชิงซ้อนของยาง EVM เกรดต่างๆ โดยยาง EVM เกรดที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตสูง (ยาง Levapren® VP KA 8939 และยาง Levapren® 800 HV) มีการกระเด้งตัวสูงที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ยาง EVM เกรดที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตต่ำ (เช่น ยาง Levapren® 500 HV) แสดงสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี ซึ่งในบางกรณีเราอาจนำเอายาง EVM เกรดต่างกันมาผสมกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเชิงกลตามต้องการ

นอกจากนี้ Dr. Roos, A. ได้ศึกษาสมบัติของยาง EVM และยางอะคริโลไนไทรล์บิวทาไดอีนไฮโดรจิเนต (HNBR) คอมพาวด์ร่วมกับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ATH เป็นสารหน่วงไฟ) เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุหน่วงไฟที่ไม่มีฮาโลเจน (Halogen Free Flame Retardant, HFFR) โดยผสมยางคอมพาวด์ตามตารางที่ 4 โดยเป็นการแปรชนิดของยาง EVM และแปรขนาดพื้นที่ผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 18 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของยางคอมพาวด์จะลดลงตามปริมาณไวนิลอะซิเทตที่เพิ่มขึ้นในยาง EVM ซึ่งอาจเป็นผลจากการลดลงของความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยง (network density) เมื่อปริมาณไวนิลอะซิเทตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ความทนต่อแรงดึงของยาง EVM แต่ละเกรดจะเพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่ผิวของสารหน่วงไฟ

ตารางที่ 4 สูตรผสมเคมีท่อทนไฟยาง EVM [4]

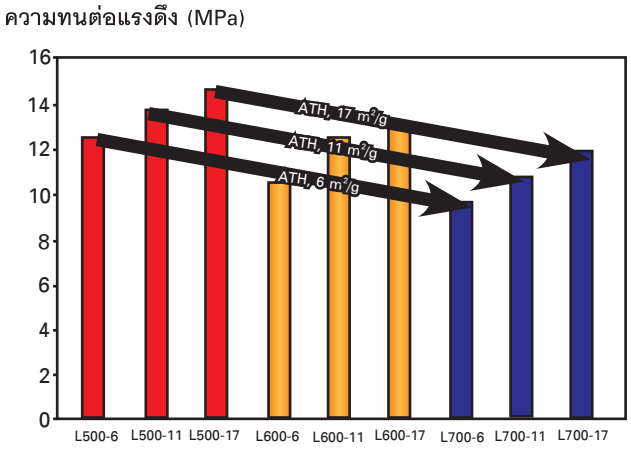
| สูตรผสมเคมี | L500-6 | L500-11 | L500-17 | L600-6 | L600-11 | L600-17 | L700-6 | L700-11 | L700-17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Levapren® 500* | 100 | 100 | 100 | - | - | - | - | - | - |
| Levapren® 600* | - | - | - | 100 | 100 | 100 | - | - | - |
| Levapren® 700* | - | - | - | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| แมกนีเซียมออกไซด์ | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| บิส (2-เอทิลเฮกซิล) เดคเคนไดโอเอต | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| ATH-6** | 160 | - | - | 160 | - | - | 160 | - | - |
| ATH-11** | - | 160 | - | - | 160 | - | - | 160 | - |
| ATH-17** | - | - | 160 | - | - | 160 | - | - | 160 |
| กรดสเตียริก | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ไขมันเอมีนปฐมภูมิ (AFLUX18) | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 3-เมทาคริโลออกซิลโพรพิลไทรเมทอกซีไซเลน | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ไทรเมทิลออลโพรเพนไทรเมทาคริเลต (70%) | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| เพอร์ออกไซด์ (40%) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| ปริมาณรวม (phr) | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 | 280.1 |

หมายเหตุ: *Levapren® 500 มีปริมาณไวนิลอะซิเทต (VA) ร้อยละ 50
Levapren® 600 มีปริมาณไวนิลอะซิเทต (VA) ร้อยละ 60
Levapren® 700 มีปริมาณไวนิลอะซิเทต (VA) ร้อยละ 70
**ATH-6 คือ สารหน่วงไฟที่มีพื้นที่ผิว BET = 6 $m^2/g$
ATH-11 คือ สารหน่วงไฟที่มีพื้นที่ผิว BET = 11 $m^2/g$
ATH-17 คือ สารหน่วงไฟที่มีพื้นที่ผิว BET = 17 $m^2/g$

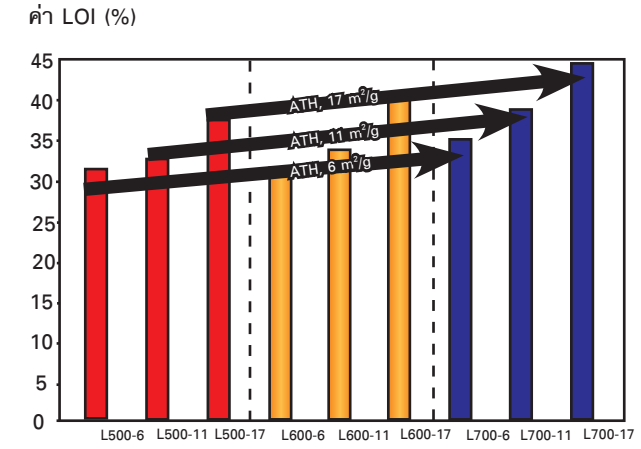
จากการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสของ ATH และปริมาณไวนิลอะซิเทตเพิ่มขึ้น ทำให้พบว่า ยาง EVM เกรดที่มีปริมาณไวนิลอะซิเทตสูง ค่าความต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในการเผาไหม้ (LOI)[2] จะเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อใส่ ATH จะทำให้ค่า LOI จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 6-10 ตามขนาดของ ATH ที่เพิ่มขึ้น โดยยางคอมพาวด์ L700-17 มีค่า LOI สูงสุดร้อยละ 44 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการทนไฟของผลิตภัณฑ์ยางคอมพาวด์ขึ้นอยู่กับปริมาณไวนิลอะซิเทตและขนาด ATH ที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ยางคอมพาวด์ L700-17 ติดไฟได้ยาก (รูปที่ 19) เมื่อนำชิ้นทดสอบมาแช่น้ำมัน IRM 902 และ IRM 903 เป็นเวลา 168 ชั่วโมงที่ 100°C เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง EVM พบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง EVM เกรดต่างๆ สูงมาก ทั้งในการแช่ในน้ำมัน IRM 902 และ IRM 903 (รูปที่ 20) โดยยางคอมพาวด์ L700 มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยที่สุด เมื่อแช่ในน้ำมันทั้ง 2 ชนิด (ความทนต่อน้ำมันสูงสุด) ตามด้วยยางคอมพาวด์ L600 และ L500 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากมีปริมาณไวนิลอะซิเทตสูง ความทนต่อน้ำมันย่อมสูงขึ้น แต่เมื่อใส่สารอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงไป ความทนต่อน้ำมันของยางทั้ง 3 เกรดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อความทนต่อน้ำมัน แต่จะมีผลทำให้ความทนต่อแรงดึงลดลง ขณะที่การติดไฟของยางคอมพาวด์จะเป็นไปได้ยากขึ้น



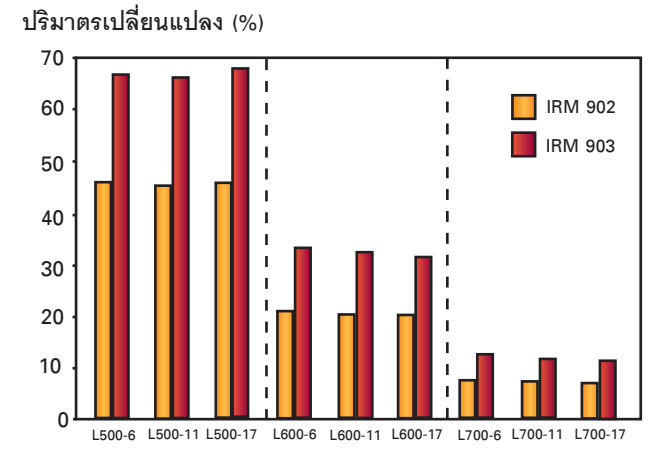
[2] LOI หรือ Limited Oxygen Index คือ ตัวเลขความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำสุดในของผสมระหว่างออกซิเจนกับไนโตรเจนที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ของชิ้นทดสอบ (ในแนวตั้ง) ภายใต้สภาวะทดสอบการติดไฟที่กำหนดของโพลิเมอร์ ถ้า LOI มีค่าสูงแสดงถึงความยากในการติดไฟของวัสดุนั้น ยิ่งมีค่า LOI มากเท่าไร วัสดุก็จะติดไฟยากขึ้นเท่านั้น




รูปที่ 18 ผลของ ATH ต่อความทนต่อแรงดึงของยาง EVM เกรดต่างๆ




รูปที่ 19 ผลของ ATH ต่อระดับความต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในการเผาไหม้ (LOI) ของยาง EVM เกรดต่างๆ




รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง EVM เกรดต่างๆ ต่อความทนต่อน้ำมัน 2 ชนิด

## สรุป

เนื่องจากยาง EVM เป็นยางที่มีความทนต่ออุณหภูมิสูงและต่ำได้ดี อีกทั้งยังทนต่อน้ำมัน โอโซนและสภาพอากาศได้ดีจึงมักจะใช้ยาง EVM ผลิตเป็นท่อ สายเคเบิล ซีล โฟมและพื้นกันลื่น นอกจากนี้ยาง EVM ยังมีข้อดี คือ มีระยะเวลาสกอร์ชนาน ง่ายต่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์และเป็นยางที่ไม่ต้องทำการวัลคาไนซ์เพิ่มในภายหลัง (post cure) เหมือนกับยาง ACM และยาง AEM ซึ่งถือเป็นการลดขั้นตอนการผลิตและยังช่วยลดต้นทุนการผลิตลงอีกด้วย นอกจากนี้การเลือกใช้ยาง EVM ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต้องคำนึงถึงปริมาณไวนิลอะซิเทต สารหน่วงไฟ สารพลาสทิไซเซอร์และยางที่ใช้ในการผสม เป็นต้น เพื่อให้ได้สมบัติสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

## เอกสารอ้างอิง

1. Robert, C.K., “Handbook of Specialty Elastomers”, CRC Press., 2008.
2. Levapren. “The cost-effective specialty rubber”, LANXESS Deutschland GmbH, Leverkusen, 2010.
3. Kelbch, S., “Levapren® vs AEM&ACM in Automative Application”, LANXESS Deutschland GmbH, Leverkusen, 2005.
4. Roos, A., “Halogen Free Flame Retardant (HFFR) Compounding with EVM and EVM/HNBR”, *KGK*, March, **39**, (2011)
5. ASTM D1418-06 “Standard Practice for Rubber and Rubber Latices-Nomenclature”
6. พงษ์ธร แซ่อุย ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2547.
7. http://www.highbeam.com
8. http://www.kraiburg.cn

ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์
**การศึกษา:** ปริญญาโท (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (วิทยาเขตปัตตานี)
**สถานที่ทำงานปัจจุบัน:** เจ้าหน้าที่สารสนเทศ
ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง มหาวิทยาลัยมหิดล