

ซีลยางสำหรับงานที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง

ธีรรัตน์ ลากพุลละอนันต์

1. บทนำ

ซีลยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ป้องกันการรั่วซึมที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน สามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม เช่น ซีลยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ซีลยางขอบตู้เย็นและเครื่องทำความเย็น โดยทั่วไปเครื่องทำความเย็นจะมีคอมเพรสเซอร์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ดูดและเพิ่มแรงดันน้ำยาแอร์ เพื่อส่งไปยังคอนเดนเซอร์ ซึ่งใช้ความดันมากกว่า 14.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [1] และน้ำยาแอร์ที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารประกอบกลุ่มคาร์โบไดฮาไลเจน (halogenated carbide) ได้แก่ R12 หรือสาร CFC (chlorinated fluorocarbon) R134a (CH₂F-CF₃) และ R744 (carbon dioxide) เป็นต้น ซึ่งทางสหภาพยุโรป (EU) และพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ได้ระบุว่าน้ำยาแอร์ R12 และ R134a เป็นสารที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก จึงเป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนมาใช้ R744 ที่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แทนเพื่อช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง [2] ดังนั้นซีลยางที่จะนำมาใช้ในคอมเพรสเซอร์จะต้องทนต่อความดันและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ไม่เกิดการฉีกขาดหรือมีรอยแตกที่จะนำไปสู่อุบัติเหตุจากการใช้งาน

ตารางที่ 1 แสดงความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและความทนต่อน้ำมันของยางแต่ละชนิดที่เลือกใช้เป็นซีลยาง ซึ่งนอกจากจะคำนึงถึงการเลือกชนิดของยางให้เหมาะสมกับการใช้งานแล้ว การเข้าใจถึงปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับซีลยางก็เป็นสิ่งสำคัญ ปัญหาส่วนใหญ่ของซีลยางเมื่อนำมาใช้ในงานภายใต้สภาวะความดันสูงและเมื่อมีการลดความดันลงอย่างรวดเร็วจะเกิดการแพร่ผ่านย้อนกลับ (reverse diffusion process) ซึ่งจะทำให้ซีลยางเกิดการพองตัวหรือเกิดรอยแตกได้ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การระเบิดเนื่องจากการลดความดัน (explosive decompression)” [3-4] ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอชนิดของยางและสารตัวเติมที่มีผลต่อการบ่มแรงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงปริมาณการเกิดฟองอากาศและรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ 1 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซและความทนต่อน้ำมันของยางชนิดต่างๆ [5]

ชนิดของยาง	การซึมผ่านของก๊าซ	ความทนต่อน้ำมัน
ยางธรรมชาติ (NR)	5	6
ยางไอโซพรีน (IR)	5	6
ยางสไตรีนบิวทาไดเอิน (SBR)	4	5
ยางบิวทาไดเอิน (BR)	4	6
ยางไนไตรล์ (NBR)	2	1
ยางอะคริลิก (ACM)	3	1
ยางคลอโรพรีน (CR)	3	2
ยางอีพิกลอโรไฮดริน (ECO)	1	1
ยางคลอโรซัลโฟเนตโพลีเอทิลีน (CSM)	3	2
ยางฟลูออโรคาร์บอน (FKM)	3	1
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดเอิน (EPDM)	4	4
ยางเอทิลีนอะครีเลต (EAM)	2	4
ยางเมทิลฟีนิลไวโนลซิลิโคน (PVMQ)	6	1
ยางโพลียูรีเทน (AU)	1	1

หมายเหตุ 1 คือ ดีที่สุด และ 6 คือ ด้อยที่สุด

2. คาร์บอนไดออกไซด์

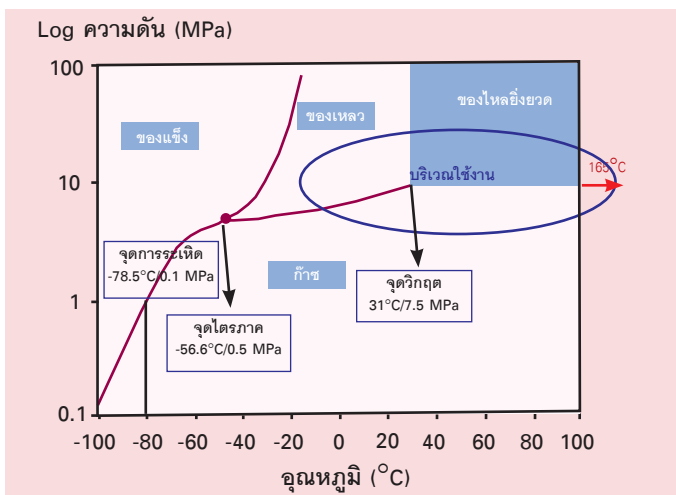
ที่อุณหภูมิห้อง คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่ติดไฟ จากรูปที่ 1 แสดงถึงสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามความดันและอุณหภูมิ คือ ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นของแข็งสีขาว (หรือที่เรียกกันว่า “น้ำแข็งแห้ง”) ที่ความดันต่ำแต่อุณหภูมิสูงคาร์บอนไดออกไซด์จะมีสถานะเป็นก๊าซ และที่ความดันและอุณหภูมิสูง (ความดันมากกว่า 6 MPa หรือ 60 บาร์ และอุณหภูมิมากกว่า -56°C) คาร์บอนไดออกไซด์จะมีสถานะเป็นของเหลว นอกจากนี้ในรูปที่ 1 ยังระบุถึงจุดสมดุลต่างๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ดังเช่น จุดการระเหิด จุดไตรภาค และจุดวิกฤต โดยจุดการระเหิด (sublimation point) [6] คือ จุดที่คาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอได้โดยไม่ต้องผ่านสถานะของเหลวก่อน (อุณหภูมิ -78.5°C ความดัน 0.1 MPa) เนื่องจากโมเลกุลที่อยู่ชิดกันอาจเกิดการชนกันและเกิดการถ่ายเทพลังงานทำให้บางโมเลกุลมีพลังงานจลน์สูงขึ้นและสามารถหลุดออกมาได้ในที่สุด จุดไตรภาค (triple point) [7] คือ จุดที่คาร์บอนไดออกไซด์ปรากฏอยู่ทั้ง 3 สถานะ (อุณหภูมิ -56.6°C ความดัน 0.5 MPa) ส่วนจุดวิกฤต (critical point) คือ จุดที่คาร์บอนไดออกไซด์แสดงสถานะเป็นก๊าซเสมอ (อุณหภูมิ 31°C ความดัน 7.5 MPa) และสภาวะของไหลยิ่งยวด (super-critical fluid) คือ สภาวะของของไหลที่มีความดันและอุณหภูมิอยู่เหนือกว่าจุดวิกฤต โดยของไหลนี้ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นของเหลวหรือไอ [8]

3. พลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อสมบัติของยางแต่ละชนิด

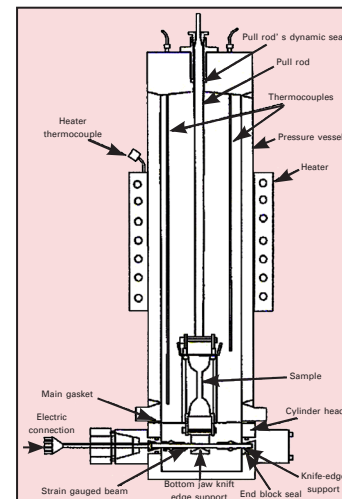
Davies, O.M. และคณะ [9] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของยาง 3 ชนิด ได้แก่

1. ยางฟลูออโรคาร์บอนที่มีความแข็ง 80 Shore A (F80)
2. ยางไนไตรล์ที่มีความแข็ง 80 Shore A (N80)
3. ยางซิลิโคนที่มีความแข็ง 65 Shore A (S65)

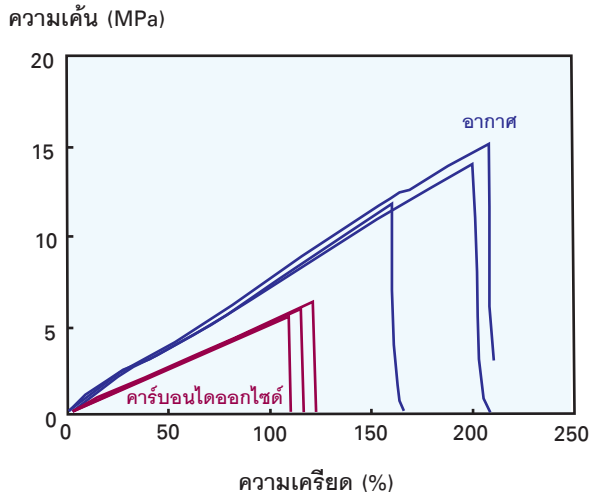
เพื่อใช้งานร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง โดยใช้เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงดังรูปที่ 2 ซึ่งดัดแปลงอุปกรณ์บางส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะถูกเก็บไว้ในห้องบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa (40 บาร์) อุณหภูมิ 23°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



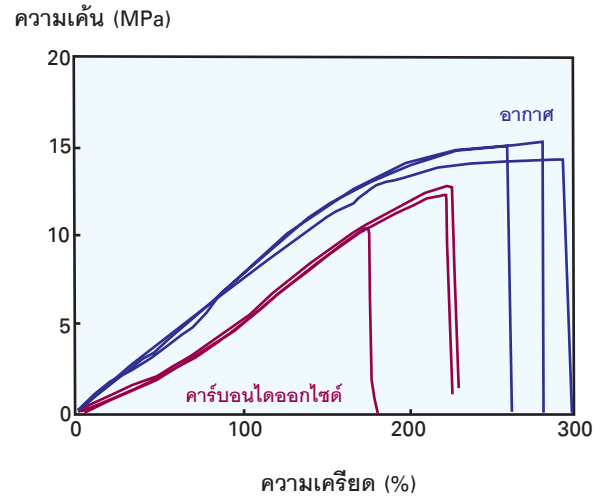
รูปที่ 1 สภาวะต่างๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์



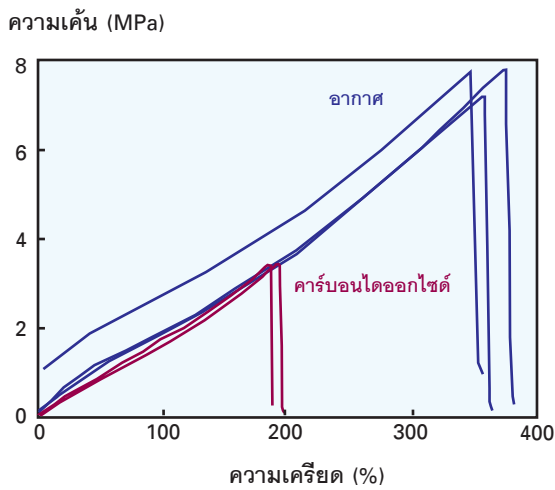
รูปที่ 2 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงที่ความดันของก๊าซสูง



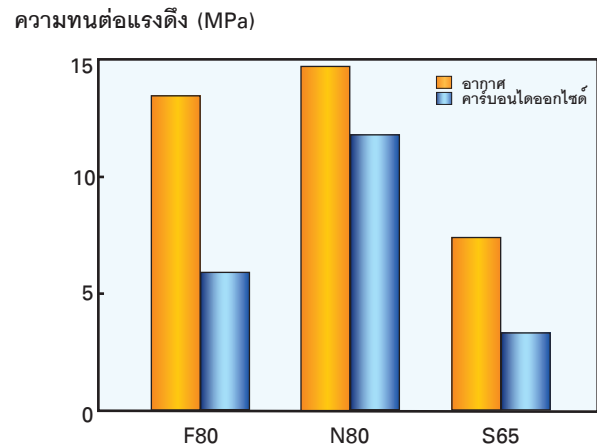
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบ F80 ในอากาศและในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa



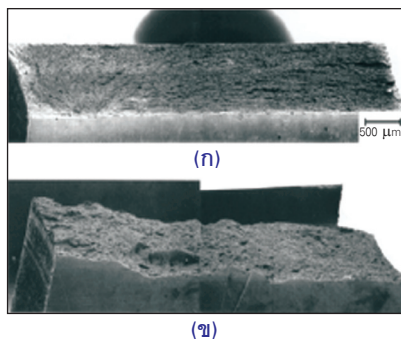
รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบ N80 ในอากาศและในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa



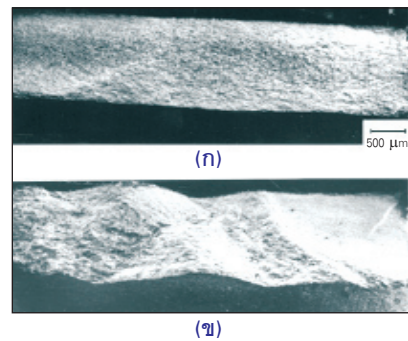
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบ S65 ในอากาศและในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa



รูปที่ 6 ความทนต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบในอากาศและในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa



รูปที่ 7 พิวของชิ้นงานทดสอบ F80 ในสภาวะ: (ก) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa และ (ข) ในอากาศ จากเครื่อง Electron micrograph



รูปที่ 8 พิวของชิ้นงานทดสอบ N80 ในสภาวะ: (ก) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa และ (ข) ในอากาศ จากเครื่อง Electron micrograph

ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ F80 N80 และ S65 ที่สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa แตกต่างจากผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 ชนิดในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า ยางที่อยู่ในอากาศมีค่าโมดูลัส การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่อยู่ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในรูปที่ 6 ชิ้นงานทดสอบ F80 N80 และ S65 ที่อยู่ในอากาศมีความทนต่อแรงดึงเป็น 14 MPa 15 MPa และ 8 MPa ตามลำดับ ขณะที่ชิ้นงานทดสอบ F80 N80 และ S65 ที่อยู่ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa มีความทนต่อแรงดึงอยู่ที่ 6 MPa 12 MPa และ 3 MPa ตามลำดับ เมื่อสังเกตรอยแตกที่ผิวของยางที่ทดสอบในอากาศกับในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa (รูปที่ 7 และ 8) จะเห็นว่ารอยแตกที่ผิวชิ้นงานทดสอบที่อยู่ในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเรียบกว่ารอยแตกของผิวชิ้นงานทดสอบที่อยู่ในอากาศ

4. ผลของความดันและอุณหภูมิต่อสมบัติของยางที่สัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์

Magg, H. และ Welle, A. [4] ได้ศึกษาการแพร่ผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ในยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนไฮโดรจีเนต (HNBR) เปรียบเทียบกับยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (NBR) พบว่ายาง HNBR มีสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่ายาง NBR ที่ปริมาณอะครีโลไนไตรล์เท่ากัน ขั้นตอนต่อไปได้มีการศึกษาว่า HNBR ที่จะใช้เป็นซีลยางที่ใช้ในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยมีสูตรผสมเคมีดังตารางที่ 2 ในสูตรได้มีการแปรปริมาณอะครีโลไนไตรล์ของยาง HNBR และชนิดของสารตัวเติมที่มีผลต่อการใช้งานในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาตัดเป็นรูปดัมป์เบลล์ตามมาตรฐาน ISO 37 Type 2 (ปกติดัมป์เบลล์ Type 2 มีความหนา 2 มิลลิเมตร และความยาว 75 มิลลิเมตร [10]) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้ปรับความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 4 มิลลิเมตร เพื่อให้ยางไวต่อการระเบิดมากขึ้น ทำให้สามารถเห็นผลได้เร็วขึ้น ซึ่งในการทดสอบจะทำในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ที่ความดัน 7.5 MPa (75 บาร์) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ คือ

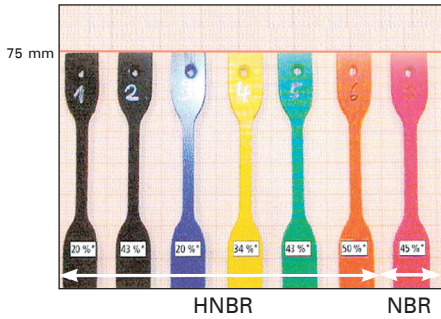
1. อุณหภูมิ 20°C (คาร์บอนไดออกไซด์เหลวหรือคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต; sub-critical CO₂)
2. อุณหภูมิ 31°C (คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะวิกฤต; critical CO₂)
3. อุณหภูมิ 100°C (คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต; super-critical CO₂)

หลังจากที่ชิ้นงานทดสอบผ่านการแช่คาร์บอนไดออกไซด์ในหม้อนึ่งอัดไอแล้ว นำชิ้นงานทดสอบมาตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และ 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตการเกิดฟองอากาศและรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นหลังการลดความดันลง

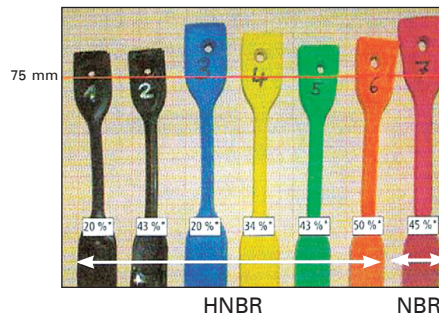
ตารางที่ 2 สูตรผสมเคมีของ HNBR

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนไฮโดรจีเนต (HNBR) (43% อะครีโลไนไตรล์ มีความหนืดสูง ML 1+4 ที่ 100°C = 40 MU)	100
พลาสติกไซเซอร์	5
ไดโทมาเซียส เอิร์ท ¹ (inactive mineral filler)	105
ซิลิกา (active precipitate silica)	25
เพอร์ออกไซด์	7.5
สารเคมีอื่นๆ	10.4
สมบัติเชิงกล	
ความแข็ง (Shore A)	86
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	11.5
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	225
การเสียรูปถาวรหลังกดที่ 150°C 24 ชั่วโมง (%)	34

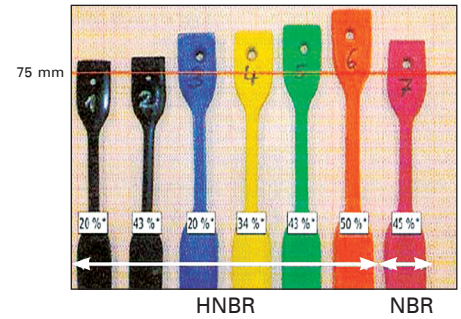
4 ¹ ไดโทมาเซียส เอิร์ท (Diatomaceous earth) [11 และ 12] เป็นแร่ดินเบาที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรไปจนถึง 1 มิลลิเมตร ไดโทมาเซียส เอิร์ท ที่แห้งแล้วจะประกอบด้วยซิลิกาประมาณร้อยละ 80-90 อะลูมิเนียมร้อยละ 2-4 และเหล็กออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.5-2 สูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ SiO₂ นำหนักโมเลกุลเท่ากับ 60.08



(ก) ก่อนการทดสอบ



(ข) ผ่านการแช่ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่
สภาวะวิกฤตตั้งทิ้งไว้ 10 นาที



(ค) ผ่านการแช่ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่
สภาวะวิกฤตตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

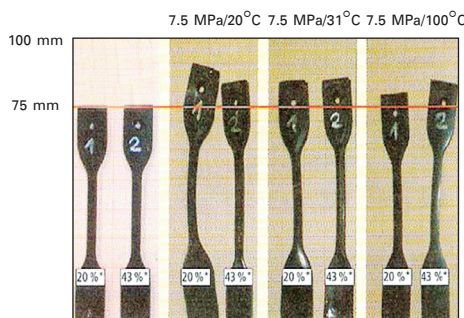
รูปที่ 9 ชิ้นงานทดสอบยาง HNBR และ NBR ที่มีปริมาณอะครีโลไนไตรล์ร้อยละต่างๆ

รูปที่ 9(ก) แสดงชิ้นงานทดสอบยาง HNBR และ NBR ก่อนการทดสอบที่มีความยาว 75 มิลลิเมตรและร้อยละของอะครีโลไนไตรล์ไว้โดยหมายเลข 1 และ 2 เป็นยาง HNBR ผสมเขม่าดำ หมายเลข 3-6 เป็นยาง HNBR ผสมกับสารตัวเติมไดโกลมาเซียส เอิร์ท และซิลิกา และเปรียบเทียบกับยาง NBR (หมายเลข 7) เมื่อนำชิ้นงานทดสอบยางในรูปที่ 9(ก) ไปแช่ในคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะวิกฤต (critical condition) ที่อุณหภูมิ 31°C ความดัน 7.5 MPa พบว่ายางเกิดการบวมตัวมาก ซึ่งการบวมตัวของยางนี้ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องแม้ว่าจะนำยางออกมาตั้งทิ้งไว้แล้ว 1 ชั่วโมง

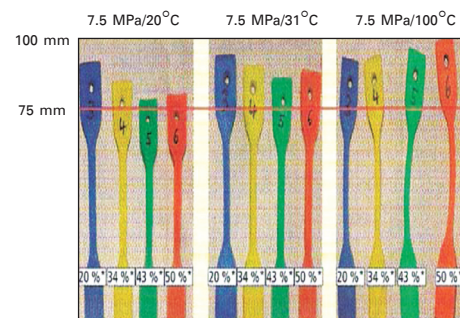
จากรูปที่ 9(ข) และ 9(ค) พบว่ายาง HNBR ที่ผสมเขม่าดำจะมีการบวมตัวต่ำกว่ายาง HNBR ที่ผสมกับไดโกลมาเซียส เอิร์ท และซิลิกา โดยทั่วไปการบวมตัวจะลดลงเมื่อปริมาณอะครีโลไนไตรล์เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9(ข) แต่หลังจากตั้งชิ้นงานทดสอบทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ยางที่มีปริมาณอะครีโลไนไตรล์สูงจะเกิดการผิดรูปอย่างถาวรค่อนข้างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการคลายตัวและการระเหยออกของคาร์บอนไดออกไซด์จากโพลีเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูงต้องใช้เวลานานกว่า นอกจากนี้ผลการทดลองยังบ่งชี้ว่า ยาง HNBR จะมีการบวมตัวสูงกว่ายาง NBR ที่ระดับความมีขั้วใกล้เคียงกัน

เมื่อทดสอบยางภายใต้สภาวะที่คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลว (liquid CO_2) และสภาวะเหนือจุดวิกฤต (super-critical CO_2) ยางจะเกิดการบวมตัวสูง ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับความมีขั้วของยางวัลคาไนซ์ (ตามปริมาณอะครีโลไนไตรล์ในโพลีเมอร์)

จากรูปที่ 10(ก) เมื่อแช่ชิ้นงานทดสอบลงในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ยางจะมีการบวมตัวลดลงเมื่อปริมาณอะครีโลไนไตรล์เพิ่มขึ้น ขณะที่ถ้าแช่ชิ้นงานทดสอบในสภาวะเหนือจุดวิกฤตจะให้ผลตรงกันข้าม คือ การบวมตัวของยางจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณอะครีโลไนไตรล์ และในสภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต (sub-critical CO_2) การบวมตัวของยางไม่ขึ้นกับปริมาณอะครีโลไนไตรล์ และผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมจากเขม่าดำ (รูปที่ 10(ก)) มาเป็นไดโกลมาเซียส เอิร์ท และซิลิกา (ดังรูปที่ 10(ข)) ก็จะทำให้ผลทำนองเดียวกัน



(ก) ยาง HNBR ผสมกับเขม่าดำ

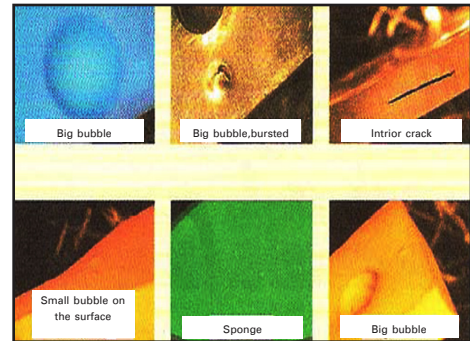
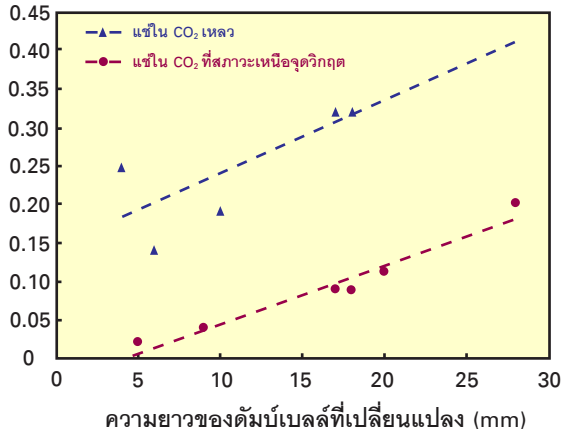


(ข) ยาง HNBR ผสมกับไดโกลมาเซียส เอิร์ท และซิลิกา

รูปที่ 10 ผลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ ต่อการบวมตัวของยาง HNBR ที่ผสมกับสารตัวเติมหลังตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

นอกจากการทดสอบการบวมตัวแล้ว ยังได้มีการหาน้ำหนักของยางที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากตั้งทิ้งไว้ 10 นาที พบว่าน้ำหนักของยางที่แช่ในสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เหลวมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 6-10 ขึ้นกับปริมาณอะคริไลไนไทรล์ที่มีอยู่ในยาง แต่ในความเป็นจริงแล้วยางจะบวมตัวสูงถึงร้อยละ 10-20 ภายใต้สภาวะความดันสูง ยางที่แช่ในคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดมากกว่ายางที่แช่ในคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต ทั้งนี้เป็นผลมาจากสภาวะของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ก็อาจเป็นผลมาจากอัตราการระเหยที่สูงขึ้นในสภาวะการทดสอบที่รุนแรง เช่น ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งผลการทดลองที่ได้ยังไม่ได้ให้ข้อสรุปที่ชัดเจนจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g)

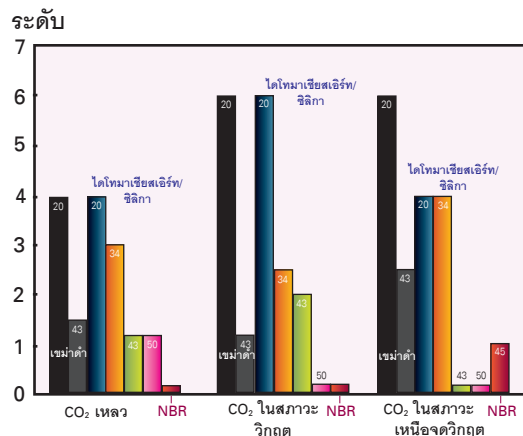


รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและขนาดของยาง HNBR ที่บวมตัวหลังจากทดสอบในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว และคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเหนือจุดวิกฤต

รูปที่ 12 ลักษณะของฟองอากาศและรอยแตกที่เกิดจากการลดความดันลง

เมื่อสังเกตชิ้นงานทดสอบหลังจากคลายความดันและนำออกจากหม้อน้ำอัดไอ พบว่าฟองอากาศและรอยแตกอาจจะไม่ได้เกิดขึ้นทันที แต่อาจจะเกิดขึ้นหลังจากที่ทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ในสภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้องก็ได้ ลักษณะของรอยแตกและฟองอากาศที่พบไม่มีรูปแบบที่แน่นอนดังรูปที่ 12

รูปที่ 13 แสดงผลการเกิดฟองอากาศและรอยแตกที่พบในสเกลเปรียบเทียบ พบว่าเมื่อปริมาณอะคริไลไนไทรล์เพิ่มขึ้นปริมาณการเกิดฟองอากาศและรอยแตกจะลดลง นอกจากนี้สารตัวเติมที่ใช้ในยางคอมพาวด์ไม่มีผลต่อการช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศและรอยแตก



รูปที่ 13 ฟองอากาศและรอยแตกของยาง HNBR และ NBR ที่เกิดขึ้นหลังจากการลดความดัน

สรุป

จากการศึกษายางทั้ง 3 ชนิด (ยางฟลูออโรคาร์บอน ยางไนไตรล์ และยางซิลิโคน) ที่นำมาใช้เป็นซีลยางที่ต้องสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 4 MPa พบว่ายางทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติเชิงกลลดลง เมื่อความดันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 7.5 MPa ยาง HNBR มีการบวมตัวลดลงเมื่อปริมาณอะคริโลไนไตรล์เพิ่มขึ้น นอกจากความดันจะมีต่อผลการบวมตัวของยาง HNBR แล้ว อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบและปริมาณอะคริโลไนไตรล์ในยาง HNBR ก็มีผลต่อการบวมตัวเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิ 100°C ยาง HNBR มีการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่สูงขึ้น ในขณะที่ที่อุณหภูมิ 20°C และ 31°C ยาง HNBR มีการบวมตัวลดลงเมื่อปริมาณอะคริโลไนไตรล์เพิ่มขึ้น แม้ว่าความดัน อุณหภูมิ และปริมาณของอะคริโลไนไตรล์จะมีผลต่อการบวมตัวของยาง HNBR แต่ชนิดของสารตัวเติมกลับไม่มีผลต่อการบวมตัวของยาง HNBR

เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.phithan-toyota.com>
2. <http://www.visteon.com>
3. <http://www.bhrgroup.co.uk>
4. Magg, H. and Welle, A., "Elastomeric materials based on hydrogenated nitrile rubber for seals in carbon dioxide (R744) high pressure service", *RFP.*, **4**, 145-151, (2009)
5. Nelson, C., Mauricio, de G., Alberto, C.N. and Alberto, N.C., "Applied Rubber Technology", Hanser Publishers, Munich, Germany, 2002.
6. <http://www.neutron.rmutphysics.com>
7. <http://www.pkc.ac.th>
8. <http://www.tit.ac.th>
9. Davies, O.M., Arnold, J.C. and Sulley, S., "The mechanical properties of elastomers in high-pressure CO₂", *J. Mat. Sci.*, **34**, 417-422, (1999)
10. ISO 37:2005 "Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties"
11. <http://en.wikipedia.org>
12. <http://www.chemblink.com>
13. <http://www.specseal.co.th>



ชินรัตน์ ลากพูนอนันต์

การศึกษา: ปริญญาโท (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (วิทยาเขตปัตตานี)

สถานที่ทำงานปัจจุบัน: เจ้าหน้าที่สารสนเทศ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล