

การประยุกต์ใช้งานฉนวนซิลิโคนด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

Applications of Silicone Insulation in Electrical Engineering

ไชยพร หล่อทองคำ*

Chaiyaporn Lothongkam*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

School of Electrical and Electronic Engineering, Mahanakorn University of Technology

*Corresponding Author E-mail: chaiyapo_chaiya@hotmail.com

Received: 09/06/24, Revised: 09/07/24, Accepted: 11/07/24

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอข้อมูลเชิงทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติและเทคโนโลยีการผลิตของซิลิโคน ซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการฉนวนทางไฟฟ้าด้วยคุณสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น อธิบายถึงข้อมูลทั่วไปและโครงสร้างทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ คุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก จุดเด่นและการใช้งานฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางและแรงดันสูง รวมถึงคุณสมบัติทางแสงสำหรับการตรวจวัดคิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับวิศวกรไฟฟ้า

คำสำคัญ: ฉนวนยางซิลิโคน, คุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า, ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก

Abstract

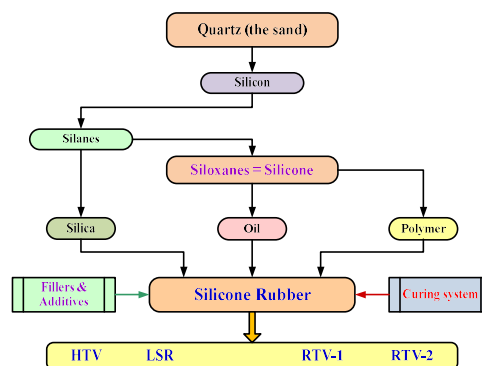
This paper presents a review of the investigation of the properties and production technology of silicone rubber. That is the material of choice for electrical insulation with outstanding specific properties. It deals with the chemical structure, physicochemical, mechanical and electrical properties, dielectric strength, the advantages and use of silicone in medium- and high-voltage system, including the optical properties for partial discharge detection in cable accessories. All of these will be helpful for an electrical engineer.

Keywords: silicone rubber, mechanical and electrical properties, dielectric strength

1. บทนำ

ซิลิโคนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ประกอบด้วยพอลิเมอร์ซิลิโคนเชิงเส้น (linear silicone polymers) เชื่อมโยงข้ามระหว่างชั้นโครงข่าย 3 มิติ (cross-linked in a 3-dimensional network) ในหลายกรณีฟิลเลอร์เสริมแรง (reinforcing fillers) ถูกเติมเข้าไปในการออกแบบซิลิโคนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความแข็งแรงทางกล, ทางเคมี และทาง

กายภาพบางอย่างให้ดีขึ้น รวมทั้งเพื่อลดค่าใช้จ่าย ดังรูปที่ 1 พอลิเมอร์ซิลิโคนโดยทั่วไปจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ทนต่อสภาพแวดล้อมที่เลวร้ายได้ดี และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี มีความยืดหยุ่น ไม่อมน้ำ (hydrophobic) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความแข็งแรงเชิงกลที่ดี [1-3] เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์ซิลิโคนปัจจุบันจึงนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบสายส่งแบบใช้เคเบิลแรงดันสูง (high voltage cable system) โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริมของเคเบิล (cable accessories)



รูปที่ 1 แผนผังการผลิตซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ [4]

บทความฉบับนี้เป็นการเรียบเรียงผลการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติของซิลิโคน ประกอบด้วย คุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า จุดเด่นในการใช้งานเป็นวัสดุฉนวนในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางและแรงดันสูง รวมถึงการตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดคิซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล เพื่อประโยชน์ใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนางานวิจัยทางวิศวกรรมไฟฟ้าต่อไป

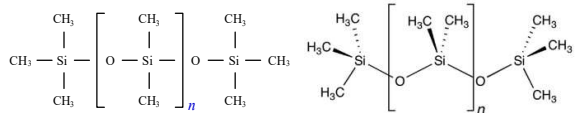
2. คุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติทางกลของซิลิโคน

2.1 โครงสร้างทางเคมีและเทคโนโลยีการผลิตยางซิลิโคน

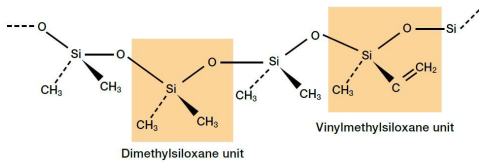
โมเลกุลของซิลิโคน (silicone) เป็นวัสดุโปร่งแสง มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อนินทรีย์ (inorganic polymer) ศัพท์เทคนิคสำหรับยางซิลิโคน คือ

พอลิไซลอกเซน (polysiloxanes) หรือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxanes: PDMS) ตามรูปที่ 2 ก) ในเชิงการค้าฉนวนยางซิลิโคน เป็น “วัสดุกึ่งอินทรีย์” (semiorganic materials) ซิลิโคนมีโครงสร้างคล้ายกับควอตซ์แต่เปลี่ยนอินทรีย์ ซึ่งมีโครงสร้างหลัก (main chain หรือ backbone) ประกอบด้วยอะตอมซิลิกอน (Si) จับตัวกับอะตอมออกซิเจน (O) สลับกันเป็นเมตริกซ์ ดังรูปที่ 2 ข) พันธะ Si – O มีพลังงานยึดเกาะสูง ทำให้โครงสร้างทางเคมีมีเสถียรภาพมาก [5-11]

ซิลิโคนต้องผ่านกระบวนการบ่มหรือการเชื่อมขวาง (curing or cross-linking reaction) เพื่อให้กลายเป็นยางซิลิโคน (silicone rubbers) ผลลัพธ์ที่ได้คือผลึกโครงข่ายสามมิติที่มีความยืดหยุ่นสูง ดังรูปที่ 3 [7-9]

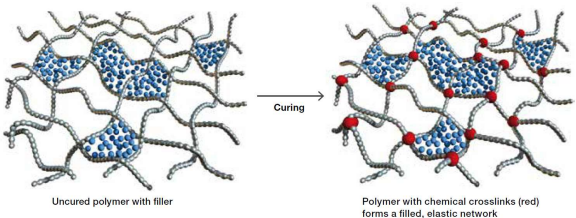


ก) โครงสร้างทางเคมี ของ polydimethylsiloxane (PDMS)



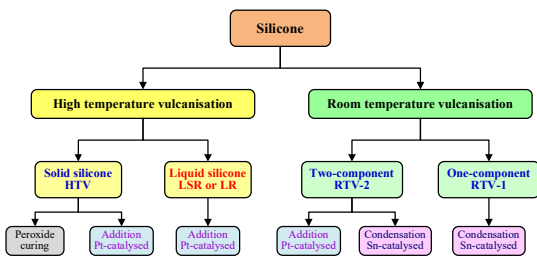
ข) เมทิลเชิงเส้นหรือไวโนลไซลอกเซนพอลิเมอร์ (PDMS)

รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของฉนวนยางซิลิโคน (silicone rubber)



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาการบ่มหรือการเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น

การบ่มยางซิลิโคนในทางเทคนิคมี 3 วิธี คือ การบ่มโดยใช้อุณหภูมิสูงหรือความร้อน (heat curing) การบ่มที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (room temperature curing) โดยใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (catalyst) พวก organometallic compound (เช่น Pt หรือ Sn) และ การบ่มด้วยรังสี UV curing [4] ซึ่งซิลิโคนเชิงการค้า สามารถแบ่งได้ตามดัง ในรูปที่ 4 [7-11]



รูปที่ 4 ชนิดและเทคโนโลยีการผลิตยางซิลิโคน

2.2 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (physicochemical properties)

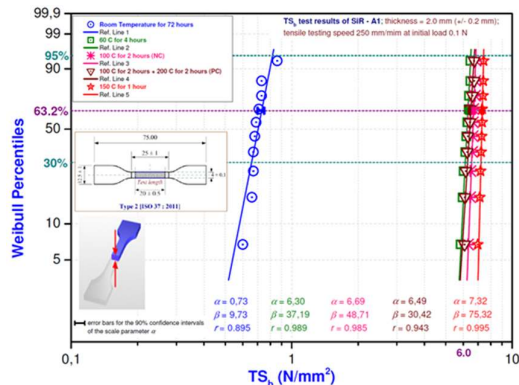
คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่สำคัญ คือ พลังงานยึดเกาะ (bond strength หรือ bond energy) ระหว่างอะตอมในโครงสร้างโมเลกุล แสดงในตารางที่ 1 [12] พบว่าพลังงานพันธะระหว่าง C-C เท่ากับ 346 kJ/mol ซึ่งแตกต่างจากพันธะระหว่าง Si-O ที่สูงถึง 452 kJ/mol ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสั้นจากแสงแดด (shortwave sunlight) หรือคลื่นความร้อนรังสีอุลตราไวโอเลต (UV rays) ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 300 nm มีระดับพลังงานประมาณ 6.2×10^{-22} kJ หรือประมาณ 398 kJ/mol สามารถทำลายพันธะ C-C ด้านข้าง (side chain) ของโครงสร้างโมเลกุลซิลิโคนได้ แต่ไม่สามารถทำลายพันธะหลัก Si-O (backbone) ตามรูปที่ 2 ทำให้ถูกฉนวนยางซิลิโคนมีความคงทนทางโครงสร้างหลักไม่เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายแต่ที่ผิวถูกฉนวนยางซิลิโคนจะเกิดปรากฏการณ์ chalking sunlight เมื่อสัมผัสกับแสงแดดโดยตรงเป็นระยะเวลานาน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของพันธะ Si - X และ C - X

Element X	Bond length in Å		Bond strength in kJ/mol		Ionic character in %	
	Si - X	C - X	Si - X	C - X	Si - X	C - X
C	1.88	1.54	240-340	346	12	-
H	1.47	1.07	318	411	2	4
O	1.63	1.42	452	358	50	22
Si	2.34	1.88	222	240-340	-	12

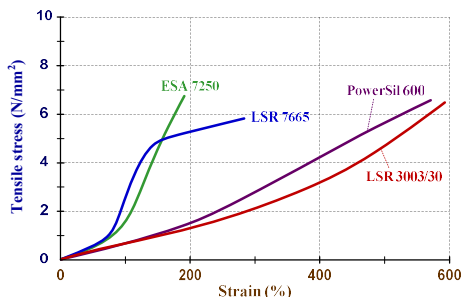
2.3 คุณสมบัติทางกล (mechanical properties)

คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ซิลิโคนสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมได้ด้วยการใส่ตัวเติม (fillers) ลงไปในโครงสร้างระดับโมเลกุล [4, 7-10] ด้วยโครงสร้างโมเลกุลแบบขดเกลียวและมีแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลต่ำ ยางซิลิโคนจึงมีความยืดหยุ่นและรับการบีบอัดได้สูง จึงนิยมใช้คุณสมบัติของยางซิลิโคนเพื่อรับแรงดันที่ปลายสายเคเบิลในระบบ HV/EHV และใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบของเคเบิลเพื่อควบคุมความเครียดตามไฟฟ้าและลดแรงดันตามผิวที่จุดต่อและปลายสายเคเบิล เรียกว่า “กรวยลดแรงดัน (tress cone)” แบบกดสวม (push-on) [13] โดยทั่วไปยางซิลิโคนสามารถต้านทานแรงดึง (tensile strength at break) อยู่ในช่วง 5 N/mm² ถึง 12 N/mm² และการยืดตัวเมื่อขาด (elongation at break) อยู่ในช่วง 110% ถึง 1,100% ขึ้นอยู่กับเกรดของยางซิลิโคน จากการตรวจสอบคุณสมบัติ tensile strength and elongation at break ของยางซิลิโคนชนิดไอโซเพื่อพัฒนาเซนเซอร์ตรวจวัดข้อผิดพลาดบางส่วน (PD) ในอุปกรณ์ประกอบของเคเบิลด้วยการตรวจวัดทางแสง (optical PD sensors) พบข้อมูลที่น่าสนใจแสดงดังผลตามรูปที่ 5 ซึ่งค่า tensile strength at break (TS_b) ของยางซิลิโคนชนิดไอโซ จะขึ้นอยู่กับระดับการเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ (degree of crosslinking in polymers)



รูปที่ 5 tensile strength at break (TS_b) ของยางซิลิโคนชนิดใส

การตรวจสอบคุณสมบัติ Stress-strain characteristics ของตัวอย่างยางซิลิโคนเชิงการค้าแบบ LSR2 (A:B) จำนวน 4 ชนิด คือ ESA7250 (10:1), LSR7665 (1:1), LSR3003/30 (1:1) เปรียบเทียบกับ PowerSil 600 (9:1) ที่นิยมใช้งานทางไฟฟ้า [4, 8] ปรากฏผลดังรูปที่ 6

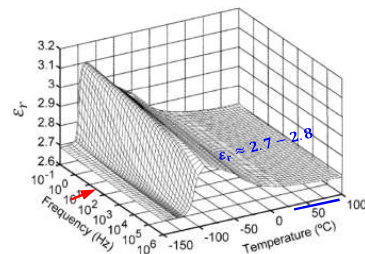


รูปที่ 6 Stress-strain characteristics ของตัวอย่างยางซิลิโคนเชิงการค้า

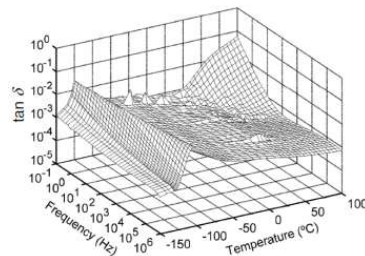
ยางซิลิโคน ESA 7250 และ LSR 7665 เป็นแบบใส (transparent) เหมาะสำหรับการพัฒนาเซนเซอร์ตรวจจับแสง (optical sensor), LSR 3003/30 เป็นแบบโปร่งแสง (translucent) และ PowerSil 600 คือซิลิโคนชนิดที่ใช้งานทางไฟฟ้า (electronic grade silicone) สีเทาทึบแสง

3. คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ซิลิโคนขึ้นอยู่กับหลายแฟกเตอร์ เช่น ชนิด (grade), ความบริสุทธิ์ (purity), ประเภทของสารวัสดุเติม (fillers) ฉนวนซิลิโคนมีค่าต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 10^{14} ถึง $10^{16} \Omega\text{-cm}$ ตลอดย่านอุณหภูมิแบบช่วงกว้าง [4, 8, 14] ทนไฟและยากต่อการติดไฟจึงนิยมนำใช้งานฉนวนซิลิโคนสำหรับสายเคเบิลทนไฟ (fire safety cables) [15] ทนต่อการกัดกร่อนจากไอโซนที่เกิดจากปรากฏการณ์โคโรนา (corona) ในงานด้านไฟฟ้าแรงดันสูง มีคุณสมบัติการเสื่อมสภาพไดอิเล็กตริกต่ำจึงมีเสถียรภาพความเป็นฉนวนที่ดีภายใต้อุณหภูมิและความชื้นสูง, ไม่อมน้ำ (hydrophobic) และทนทานต่อการเกิดรอยทางไฟฟ้า (tracking resistance) เหมาะกับการใช้งานเป็นฉนวนกลางแจ้งในระบบสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง [16-17] แฟกเตอร์การสูญเสียของไดอิเล็กตริก (ϵ_r และ $\tan \delta$) ของฉนวนซิลิโคนสำหรับงานทางไฟฟ้า ในฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความถี่ แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ [18]

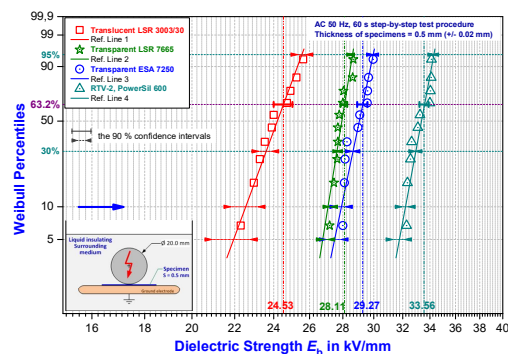


รูปที่ 7 ค่า ε_r ของซิลิโคนในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความถี่

รูปที่ 8 ค่า $\tan \delta$ ของซิลิโคนในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความถี่

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ของเพอลิเมอร์ซิลิโคนจะแปรผันตามความยาวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นตามจำนวนมอนอเมอร์ (n) [รูปที่ 2 ก) ประกอบ] ที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างของฉนวนพอลิเมอร์ซิลิโคน เรียกว่า degree of polymerization (**DP**) และค่า ϵ_r จะแน่นอนลงตัวเมื่อ DP ของฉนวนซิลิโคนมีค่าสูงขึ้น [19] ดังนั้นการใช้งานฉนวนซิลิโคนทางไฟฟ้าจึงควรผ่านการบ่ม (curing) เพื่อให้เกิด DP สูง ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนซิลิโคน เช่น ค่า ϵ_r และค่า E_b [13] มีเสถียรภาพ

การตรวจสอบค่าความคงทนฉนวน (dielectric strength: E_b) ของตัวอย่างยางซิลิโคนเชิงการค้าแบบ LSR2 (A:B) จำนวน 4 ชนิด คือ ESA7250 (10:1), LSR7665 (1:1), LSR3003/30 (1:1) เปรียบเทียบกับ PowerSil 600 (9:1) ที่นิยมใช้งานทางไฟฟ้า ปรากฏผลดังรูปที่ 9 [20]



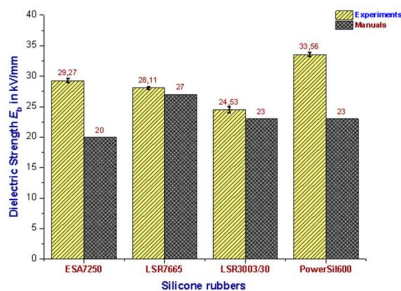
รูปที่ 9 ค่า dielectric strength: E_b ของตัวอย่างยางซิลิโคนเชิงการค้า

การประมาณขอบเขตของพารามิเตอร์ Weibull (α และ β) ในช่วงความเชื่อมั่น 90 % จากกราฟ Weibull ตามรูปที่ 9 แสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: ช่วงความเชื่อมั่น 90 % ของพารามิเตอร์ Weibull (α และ β) จาก การประเมินกราฟ ผลการทดลองตามรูปที่ 9

Silicone rubbers	Sample size (n)	90 % confidence intervals						Correlation coefficient (r)
		Scale α , in kV/mm			Shape β			
		α_{lower}	α	α_{upper}	β_{lower}	β	β_{upper}	
ESA7250	10	28.91	29.27	29.58	32.50	47.23	81.60	0.926
LSR7665	10	27.86	28.11	28.28	50.30	61.15	126.28	0.925
LSR3003/30	10	24.00	24.53	25.02	17.88	26.73	44.89	0.982
PoweSil600	10	33.22	33.56	33.90	36.69	52.89	92.11	0.923

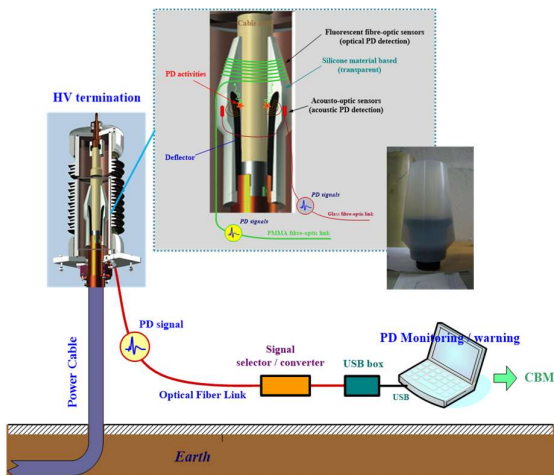
เมื่อเปรียบเทียบกับค่า E_b ที่ระบุโดยบริษัทผู้ผลิตวัสดุซิลิโคนที่ ทดสอบตาม IEC 60243-1 และ ASTM D149 ผลการเปรียบเทียบแสดง ดังกราฟแท่งรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่า E_b ของตัวอย่างยางซิลิโคนเชิงการค้า

4. คุณสมบัติทางแสงและการประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้าแรงสูง

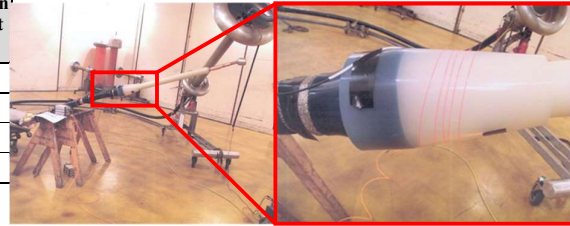
การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ซิลิโคนเพื่อพัฒนาเซนเซอร์ตรวจจับดิส ชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์ (PD online monitoring) ในอุปกรณ์เสริม ของเคเบิลด้วยวิธีตรวจจับสัญญาณแสง (optical PD detection) [21] มี แนวคิดแสดงดังรูปที่ 11 [13] เพื่อติดตามเงื่อนไขความผิดปกติที่เกิดขึ้น และแจ้งเตือนความเสียหายให้เป็นไปอย่างทันทั่วทั้ง



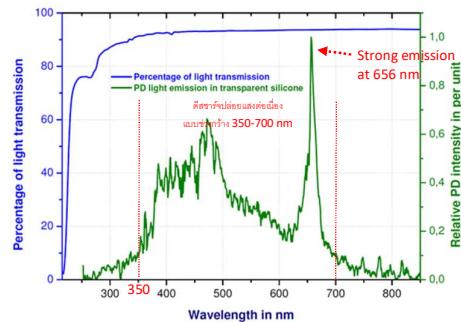
รูปที่ 11 แนวคิดการตรวจจับ optical PD ในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล

ซิลิโคนใสทั้ง ESA7250 และ LSR7665 มีดัชนีหักเห (refractive index, n_D) ประมาณ 1.41 และการส่งผ่านแสงสูงกว่า 90% ที่ความหนา 10 mm. [22] จากการศึกษาสเปกตรัมการปล่อยแสงจาก PD ภายใต้กรวย ดดแรงดัน (tress cone) วัสดุฉนวนซิลิโคนในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล

แรงดันสูงในห้องทดสอบ แสดงดังรูปที่ 12 [21] โดยใช้ซิลิโคนใส ESA7250 ทดแทนแบบโปร่งแสง ผลที่ได้แสดงตามรูปที่ 13 [13]



รูปที่ 12 แนวคิดการตรวจจับ optical PD ในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล



รูปที่ 13 เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงเทียบกับสเปกตรัมการปล่อยแสง จาก PD ในยางซิลิโคนใสหนา 10 มม.

5. บทสรุป

บทความนี้เป็นการทบทวน (review) ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับ คุณสมบัติเฉพาะที่โดดเด่นของฉนวนยางซิลิโคน เพื่อเป็นวัสดุทางเลือก สำหรับเทคนิคการฉนวนทางไฟฟ้า โดยกล่าวถึงข้อมูลทั่วไปและ โครงสร้างทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ คุณสมบัติทางกล (Stress-strain characteristics) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ϵ , $\tan \delta$ และ E_b) ของ ฉนวนซิลิโคน นอกจากนี้ยังกล่าวถึงคุณสมบัติพิเศษบางประการที่เป็น จุดเด่นของฉนวนซิลิโคนที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลาง และแรงดันสูง รวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางแสงสำหรับการพัฒนา เซนเซอร์ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD) ในอุปกรณ์เสริมของเคเบิล ข้อมูลทั้งหมดนี้มีประโยชน์สามารถใช้เป็นฐานสำหรับการพัฒนาต่อยอด ทางวิศวกรรมไฟฟ้าของประเทศต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.H. Davis and D.E.W. Rees, "Silicone rubbers: their present place in electrical insulation", in *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 112, No. 8, pp. 1607-1613, August 1965.
- [2] J.L. Goudie, M.J. Owen and T. Orbeck, "A review of possible degradation mechanisms of silicone elastomers in high voltage insulation applications", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Vol. 1, pp. 120-127, 1998.
- [3] J. Österheld, "The Dielectric Behaviour of Silicone Elastomer Insulation under High Electrical Field Strength", PhD dissertation (in German), TU-Dresden, German, 1995.

- [4] Wacker Chemie AG, “Silicone Solutions for the Transmission and Distribution Technology”, Wacker technical brochure, 2009, Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <http://www.wacker.com>.
- [5] D. Denisov, W. Köhler, S. Tenbohlen, R. Grund and T. Klein, “On-Site Condition Assessment of HV Cable Terminations in Service”, in *Proc. 20th International Conference on Electricity Distribution*, Prague, 8-11 June 2009, Paper No 0894.
- [6] J.H. Davis and D.E.W. Rees, “Silicone rubbers: their present place in electrical insulation”, in *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 112, No. 8, pp. 1607-1613, August 1965.
- [7] Wacker Chemie AG, “Solid and Liquid Silicone Rubber - Material and Processing Guidelines”, Wacker technical brochure, 2011, Feb. 4, 2024. [Online]. Available: <http://www.wacker.com>.
- [8] Shin-Etsu Chemical, “Characteristic properties of Silicone Cone Rubber Compounds”, Shin-Etsu Silicone brochure, Tokyo, Japan, 2012, Jan. 20, 2044. [Online]. Available: <http://www.silicone.jp>.
- [9] P. Jerschow, “Silicone Elastomers”, *Rapra review report 137*, Vol. 12, November 2001.
- [10] E.G. Rochow, “*Silicon and Silicones*”, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- [11] W. Noll “*Chemistry and Technology of Silicones*”, Academic Press, New York, 1968.
- [12] T.L. Cottrell, “*The Strengths of Chemical Bonds*”, 2 nd edition, Butterworths, London, 1958.
- [13] ไชยพร หล่อทองคำ, “ค่าความคงทนฉนวนทางไฟฟ้ากระแสสลับของยางซิลิโคนใต้อุณหภูมิสูงหลังการเร่งอายุด้วยความร้อน”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44 (EECON44)*, วันที่ 17-19 พฤศจิกายน 2564, โรงแรม ดิ อิมเพรส น่าน, อ.เมืองน่าน จ.น่าน, หน้า 203-233
- [14] M. Andriot et al., “*Silicones in Industrial Applications*”, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan, USA, 2007. [Originally released in 2007 as a chapter in “Inorganic Polymers”, an advanced research book by Nova Science Publishers].
- [15] A. Bacher, “Silicone Rubber used for Fire Safety and Fire Retardant Cables”, in *Proc. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-2, 2010.
- [16] Wacker Chemie AG, “Silicone Solutions for the Transmission and Distribution Technology”, Wacker technical brochure, 2009, Jan. 15, 2024. [Online]. Available: <http://www.wacker.com>.
- [17] IEC 60587, “*Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*”, International Electrotechnical Commission (IEC), 3rd Edition, Geneva, May 2007
- [18] C. Johansson and M. Robertsson, “Broadband Dielectric Characterization of a Silicone Elastomer”, *Journal of Electronics Materials*, Vol. 36, No. 9, 2007
- [19] E. B. Baker, A. J. Barry and M. J. Hunter, “Dielectric constants of dimethyl siloxane polymers”, *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 39, No. 11, pp. 1117-1120, 1946.
- [20] ไชยพร หล่อทองคำ, “การประเมินค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของฉนวนยางซิลิโคน”, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON42)*, 30 ตุลาคม ถึงวันที่ 1 พฤศจิกายน 2562, เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่, อ.ปากช่อง, จ.นครราชสีมา, หน้า 9-13
- [21] W. R. Habel, U. Buchholz, G. Heidmann, M. Hoehse and C. Lothongkam, “Fibre-optic Sensors for Early Damage Detection in Plastic Insulations of High Voltage Facilities”, in *Proc. 17th International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 22th -26th August, 2011.
- [22] D. Siebler, C. Lothongkam, P. Rohwetter, W. Habel and G. Heidmann, “Fluorescent Fibre Optical Partial Discharge Sensor in High Voltage Cable Facilities”, in *Proc. 22nd International Conference on Plastic Optical Fibers - POF2013*, Buzios, Rio de Janeiro, Brasil, September 2013.