

# สมบัติแม่เหล็กและไดอิเล็กตริกของพอลิเมอร์ผสมแม่เหล็ก

จิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

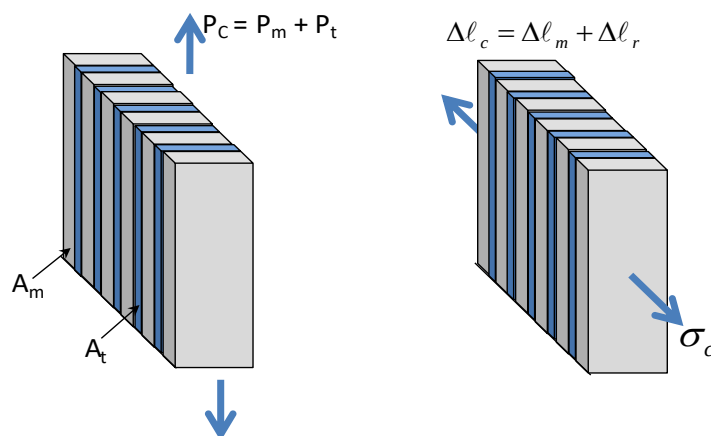
## บทคัดย่อ

วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ได้รับความสนใจจากวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ เพราะเป็นวัสดุที่ผสมสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของแม่เหล็ก เข้ากับสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงปรากฏการณ์อื่นๆ เช่น Magnetoelectric Effect เป็นต้น บทความนี้กล่าวถึงการใช้กฎการผสม อธิบายสมบัติแม่เหล็กและไดอิเล็กตริกของพอลิเมอร์ที่ผสมผงแม่เหล็ก

การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ (Magnetic Polymer Composite) ในยุคแรกเน้นการผสมแม่เหล็ก Alnico กับ Phenolic Resin จนต่อมาได้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเหล่านี้ให้มีความหลากหลาย มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งยังแสดงปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอื่นๆ เช่น Magnetoelectric Effect การประยุกต์ของวัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ได้แก่ การใช้งานเป็น แม่เหล็กที่มีน้ำหนักเบาและดัดเป็นรูปร่างได้ วัสดุที่ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เซนเซอร์ และ ตัวเปลี่ยนพลังงาน เป็นต้น

## กฎการผสม (Rule of Mixture)

เมื่อนำวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน วัสดุใหม่ที่ได้เรียกว่าวัสดุคอมโพสิต (Rule of Mixture) วัสดุเชิงประกอบที่ได้นี้จะมีคุณสมบัติแบบเดียวกับวัสดุตั้งต้นหรือคุณสมบัติแบบใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากการผสม ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารตั้งต้น การกระจายตัว และอันตรกิริยาระหว่างวัสดุตั้งต้นแต่ละชนิด คุณสมบัติส่วนหนึ่งอธิบายด้วย กฎการผสม



รูปที่ 1 แนวการให้ความเค้นและความเครียดที่เกิดในวัสดุคอมโพสิต

กฎของการผสม เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมบัติใดๆ แบบเชิงเส้นของคอมโพสิตกับสมบัติเฉพาะตัวของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ รวมถึงปริมาณเฟส (Phase) ต่าง ๆ โดยมักจะใช้อธิบายสมบัติทางกายภาพ เช่น โมดูลัสของยัง ( $E$ ) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ( $\alpha$ ) ความหนาแน่น ( $\rho$ ) หรือสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้น ( $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$ ) ความเครียด ( $\varepsilon_1$  และ  $\varepsilon_2$ )

คุณสมบัติของคอมโพสิตที่ถูกอธิบายด้วยกฎการผสมอย่างง่าย สามารถประเมินสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อคอมโพสิตเชิงวิศวกรรม โดยเฉพาะกับคอมโพสิตที่สังเคราะห์เพื่อการเสริมแรงให้กับวัสดุ (ฟิลเลอร์ที่เป็นเส้นใย) พิจารณาการใช้กฎการผสมในการอธิบายโดยให้ค่าความเค้นและความเครียดคงที่ (Constant-Stress and Constant-Strain) ในแนวนอนและตั้งฉากกับตัวเสริมแรงแสดงดังรูปที่ 1

ถ้าผลรวมของแรงที่ให้แก่อคอมโพสิตมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่ให้กับเมทริกซ์และ ฟิลเลอร์ คือ  $F_c = F_m + F_f$  และ ความสัมพันธ์ของความเค้น  $\sigma = \frac{F}{A}$  เมื่อ  $F$  = โหลด (Load)  $A$  = พื้นที่หน้าตัด (Cross sectional) จะได้เป็นสมการที่ (1)

$$P_c = \sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (1)$$

จากกฎของฮุก ( $\sigma = E\varepsilon$ ) จะได้สมการที่ (2)

$$P_c = E_c \varepsilon_c A_c = E_m \varepsilon_m A_m + E_f \varepsilon_f A_f \quad (2)$$

จัดรูปใหม่สมการที่ (2) ใหม่ จะได้เป็นสมการที่ (3)

$$E_c = \left( \frac{A_m}{A_c} \right) E_m + \left( \frac{A_f}{A_c} \right) E_f \quad (3)$$

เมื่อ  $\frac{A_m}{A_c}$  คือ พื้นที่หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทริกซ์ เขียนแทนเป็น  $V_m$  และ  $\frac{A_f}{A_c}$  คือ พื้นที่หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์ เขียนแทนเป็น  $V_f$  จึงเขียนสมการที่ (2) ใหม่เป็นสมการที่ (4)

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f \quad (4)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของความเค้น ได้เป็นสมการที่ (5)

$$\sigma_c = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f \quad (5)$$

ฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็กจะทำให้เกิดความเป็นแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetism) หรือเฟอร์รี่ (Ferrimagnetism) ในพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ปริมาณที่แสดงความเป็นแม่เหล็กต่างๆ เช่น แรงลบล้างแม่เหล็ก (Coercive field), Maximum energy product, สภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability) และแมกนีไทเซชัน (Magnetization) สามารถวัดได้จากแมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) ที่

แสดงผลเป็นฮิสเทอรีซิสลูป จากผลการวิจัยในคอมโพสิตของยางและเฟอร์ไรต์ [1,2] พบว่า สามารถใช้กฎของการผสม (Rule of mixture) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติแม่เหล็กตามองค์ประกอบของคอมโพสิต ได้เช่นเดียวกับสมบัติเชิงกล เช่น ในกรณี แมกนีไทเซชัน อิมิตัวของคอมโพสิต ( $M_{mpc}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็ก ( $W_m$ ) กับพอลิเมอร์ที่เป็นเมทริกซ์ ( $W_p$ )

$$M_{mpc} = M_m W_m + M_p W_p \quad (6)$$

โดยที่  $M_m$  และ  $M_p$  คือแมกนีไทเซชันอิมิตัวของผงแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ตามลำดับ เนื่องจากพอลิเมอร์ทุกชนิดไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กแบบเฟอร์โร หรือ เฟอร์รี  $M_p$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ สมการจึงลดรูปเป็น

$$M_{mpc} = M_m W_m \quad (7)$$

อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดในการใช้กฎของการผสมอธิบายสมบัติแม่เหล็กที่เป็น Combined property ของคอมโพสิต เพราะอันตรกิริยาระหว่างคลัสเตอร์ของฟิลเลอร์แม่เหล็กที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ปริมาณทางแม่เหล็กต่างออกไป เช่น ค่าการลบล้างทางแม่เหล็กไม่แปรผันตรงตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของฟิลเลอร์แม่เหล็ก หรือแม้กระทั่งแมกนีไทเซชันอิมิตัวของคอมโพสิต ในกรณีปริมาณฟิลเลอร์มากๆ จนถึงค่า Percolation threshold [3] ก็ไม่เพิ่มขึ้นตามสมการ (7)

กฎของการผสม เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมบัติใดๆ แบบเชิงเส้นของคอมโพสิตกับสมบัติเฉพาะตัวของฟิลเลอร์และเมทริกซ์ รวมถึงปริมาณเฟส (Phase) ต่าง ๆ โดยมีจะใช้อธิบายสมบัติทางกายภาพ เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความหนาแน่น หรือสมบัติเชิงกล เช่น ความเค้น ความเครียด หรือมอดูลัสของยัง ( $E$ ) คุณสมบัติของคอมโพสิตที่ถูกอธิบายด้วยกฎการผสมอย่างง่าย สามารถประเมินสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อวิศวกรรมวัสดุ โดยเฉพาะกับคอมโพสิตที่สังเคราะห์เพื่อการเสริมแรงให้กับวัสดุ มีงานวิจัยของ K.K. Chawla [4] ที่ใช้กฎของการผสมวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโลหะ พบว่ากระบวนการเตรียมคอมโพสิตส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทริกซ์ และค่าความเครียดที่วัดได้แสดงให้เห็นถึงขอบเขตระนาบบริเวณพลาสติกหรือบริเวณที่เมทริกซ์แสดงความเป็นพลาสติก ขณะที่เส้นใยโลหะจะแสดงความเป็นอีลาสติก นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลสำคัญอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลด้วย เช่น Volume fraction โดยงานวิจัยของ C. Lee et al [5] ใช้กฎการผสมสำหรับทำนายสมบัติของเส้นใยที่จัดเรียงตัวในลักษณะมีทิศทางแน่นอน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้เป็นเชิงเส้นกับกฎการผสม แต่ถ้าวัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่มความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้นกับกฎการผสม (Non-linear) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.S. Rangaraj et al [6] ที่วัดค่า Ultimate tensile strengths ที่พบว่าความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่อธิบายว่าเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเส้นใยที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งปัจจัยจากการจัดเรียงแบบสุ่มของเส้นใยในเมทริกซ์ด้วย และได้นำเสนอโมเดลดัดแปลงกฎการผสมตามแบบของ Karam ว่าสามารถยอมรับค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ Volume fraction ต่ำและยังคงมีค่าที่เที่ยงตรงเมื่อ Volume fraction สูง นอกจากโมเดลของ Karam ที่ถูกเสนอแล้วยังมีโมเดลอีกหลายโมเดลที่ถูกนำเสนอเพื่ออธิบายลักษณะของฟิลเลอร์แต่ละแบบ (อนุภาคหรือเส้นใย) รวมไปถึงความอ่อนและความแข็งของฟิลเลอร์ด้วย แต่ยังคงเงื่อนไขการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน เช่นในงานของ H.S. Kim et al [7] ได้ทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะข้างต้น โดยการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element) กับยูนิตเซลล์ที่มีแกนสมมาตร (Axisymmetric unit cell) และใช้

กฎการผสมตามโมเดลของ Voigt และ Reuss ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล พบว่ากราฟแสดงระนาบพลาสติก (Plastic Flow Curve) สอดคล้องกับโมเดลของ Voigt ที่ Volume fraction สูง ส่วนที่ Volume fraction ต่ำ สอดคล้องกันทั้งโมเดลของ Voigt และ Reuss ทั้งฟิลเลอร์แบบอ่อนและแบบแข็ง และได้มีความพยายามที่จะกำหนดหรือสร้างเงื่อนไขของลักษณะฟิลเลอร์ให้เป็นรูปทรงที่แน่นอนมากขึ้น เพื่อช่วยในการอธิบายทั้งที่เป็นเส้นใยและอนุภาค G.R.Liu [8] ได้นำเสนอลักษณะของฟิลเลอร์ที่เป็นเส้นใยว่ามีลักษณะแบบทรงกระบอก (Cylinder) และเป็นแบบทรงกลม (Sphere) สำหรับอนุภาค เก็บข้อมูลของค่ามอดูลัสแบบตามยาวพบว่าสอดคล้องกันกับวิธีการอื่น ๆ และยังคงสอดคล้องเมื่อเป็นค่ามอดูลัสแบบแนวขวางและแนวเฉือน อย่างไรก็ตามแต่ ยังมีปัจจัยเกี่ยวกับข้อบกพร่องของคอมโพสิตที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเช่น ช่องว่าง (Blowholes), รอยแตก (Cracks), รอยแยกเฟส (Debonding), รูพรุน (Porosity) ดังนั้น B.K. Sarkar et al [9] ได้วิเคราะห์ข้อบกพร่องในการผสมดังกล่าว โดยดัดแปลงสมการของกฎการผสมเพื่ออธิบายข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น พบว่าที่ระดับข้อบกพร่องเกิน 30 เปอร์เซ็นต์ในเมทริกซ์ที่เป็นเรซิน ยังไม่มีผลต่อความแข็งแรงของคอมโพสิต แต่ข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อยของเส้นใยจะมีผลอย่างมาก ข้อสรุปของความบกพร่องข้างต้น ทำนายที่ปริมาณฟิลเลอร์ใกล้เคียงกับ 40 เปอร์เซ็นต์ในคอมโพสิต ฟิลเลอร์ที่มีลักษณะอื่น เช่น ฟิลเลอร์ที่เป็นไมซึ่งมีรูปทรงไม่แน่นอน ดังในงาน C. Burgstaller et al [10] ใช้โมเดลของ Kelly-Tyson ที่ดัดแปลงมาจากกฎการผสมแล้ว สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ Volume fraction กับค่าความต้านทานต่อการดึงแบบเชิงเส้นได้ รวมไปถึงการทำนายพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตที่มีสารตั้งต้นมากกว่าสองชนิด ดังงานของ J.F. Luongo-Ortiz et al [11] แสดงความเป็นเชิงเส้นของน้ำหนักรวมกับอันตรกิริยาของสารตั้งต้นมากกว่าสองชนิดโดยกำหนดด้วย Multibody interaction parameters

### ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Electrical Permittivity)

นอกจากพฤติกรรมทางแม่เหล็กแล้ว ฟิลเลอร์ที่เป็นผงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้า คือ สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Electrical permittivity) อีกด้วย เนื่องจากผงแม่เหล็กมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงช่วยในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น และประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิว (Surface charge) ของฟิลเลอร์ทำให้โพลาริเซชันมีค่าสูงขึ้น สมการของวากเนอร์ (Wagner's equation) สามารถใช้อธิบายค่าไดอิเล็กตริก หรือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_{mpc}$ ) ในกระบวนการโพลาริเซชันของวัสดุคอมโพสิตที่มีอนุภาคทรงกลม โครงสร้างแบบลูกบาศก์ เป็นฟิลเลอร์ปริมาณน้อย ๆ จนปราศจากอันตรกิริยาระหว่างกัน [12]

$$\epsilon_{mpc} = \epsilon_p (1 + 3\phi) \quad (8)$$

โดย  $\epsilon$  คือ สภาพยอมของพอลิเมอร์ และ  $\phi$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์

สมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิตจะวิเคราะห์จากการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ของคอมโพสิต โดยการแสดงความสัมพันธ์กับค่า Volume fraction ซึ่งมีปรากฏการทบทวนโมเดลที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในงานของ K. Lal et al [13] เช่น โมเดลของ Rayleigh (1892), Wagner (1914), Bruggeman (1935), Bottcher (1952), De Loor (1956) และ Van Beek (1967) โดยอธิบายฟิลเลอร์โลหะที่มีลักษณะทรงกลมและไม่เป็นทรงกลม ส่วนการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์นอกจากมีค่าสมบัติทางแม่เหล็กแล้ว ยังสามารถวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าได้ด้วย เนื่องจากฟิลเลอร์ที่เป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้คือเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ และงานของ Gokturk et al [12] ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Volume fraction กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า พบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

### ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

สมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีความถี่สูง คือ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่คลื่นวิทยุ และไมโครเวฟเข้าสู่วัสดุคอมโพสิตของแม่เหล็กและพอลิเมอร์ จะเกิดการแมกนีไทเซชันของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กตามสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พร้อมไปกับการเกิดโพลาริเซชันของไดโพลไฟฟ้าตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของฟิลเลอร์แม่เหล็กจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แมกซ์เวลล์-วากเนอร์ (Maxwell-Wagner effect) [14] ส่งผลให้โพลาริเซชันที่มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ปราศจากฟิลเลอร์ จึงเกิดการดูดกลืนคลื่นมากกว่าพอลิเมอร์ที่ปราศจากฟิลเลอร์ที่คลื่นสามารถทะลุผ่านได้โดยปราศจากอันตรกิริยา ความสามารถในการดูดกลืนคลื่นจึงระบุได้ด้วยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อนในกรณีความถี่สูง) ซึ่งมีส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นและองค์ประกอบของคอมโพสิต

สำหรับสภาพซึมได้ของผงแม่เหล็ก เนื่องจากกระบวนการ Ferromagnetic resonance และ Domain wall motion เป็นไปตาม Lorentzian law [15]

$$\mu = \frac{1 + (\mu_s - 1)}{1 - i\beta(f - f_r) - (\frac{f}{f_r})^2} \quad (9)$$

โดยที่  $\beta$  คือ Damping parameter และ  $f$  คือความถี่

ส่วนความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) สัมพันธ์กับสภาพซึมได้สถิต ( $\mu_s$ ) ผ่านกระบวนการ Ferromagnetic resonance และ Domain wall motion ตาม Snoek's law

$$(\mu_s - 1)f_r = \left(\frac{2}{3}\right)(\gamma 4\pi M_s) \quad (10)$$

โดยที่  $M_s$  คือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัว และ  $\gamma$  เป็นค่าคงที่

สภาพซึมได้จะลดลงที่ความถี่สูง ซึ่งสามารถขยาย Snoek limit สูงมากกว่า 1 GHz ด้วยการผสมเฟอร์ไรต์กับพอลิเมอร์ เมื่อผงแม่เหล็กกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ สามารถใช้กฎของการผสม ในการอธิบายค่าของสภาพยอมและสภาพซึมได้ [16] ตามสูตรของ Maxwell-Garnet

$$K = K_1 \left(1 + \frac{3\phi\beta}{1 - \phi\beta}\right) \quad (11)$$

หรือสูตรของ Bruggeman-Hanai

$$\frac{K - K_2}{K_1 - K_2} \left( \frac{K_1}{K} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \phi \quad (12)$$

โดยที่  $K$  คือ สภาพยอม ( $\varepsilon$ ) หรือ สภาพซึมได้ ( $\mu$ ) ของคอมโพสิต

$K_1$  คือ สภาพยอม ( $\varepsilon$ ) หรือสภาพซึมได้ ( $\mu$ ) ของพอลิเมอร์เมทริกซ์

$K_2$  คือ สภาพยอม ( $\varepsilon$ ) หรือสภาพซึมได้ ( $\mu$ ) ของฟิลเลอร์เฟอร์ไรต์

$$\beta = \frac{K - K_1}{K_2 + 2K_1} \quad \text{และ } \phi \text{ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของฟิลเลอร์เฟอร์ไรต์}$$

ซึ่งสูตรเหล่านี้ สามารถใช้อธิบายผลการวัดสภาพยอม และ สภาพซึมได้ ของ ยางธรรมชาติ พอลิยูรีเทน พอลิโพรไพลีน ที่ผสมโคมบอด์ เฟอร์ไรต์ [17, 18] และ ยางธรรมชาติที่ผสมนีโอดีเมียมไอออนโบรอน [19] ได้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] M.H. Makled, T. Matsui, H. Tsuda, H. Mabuchi, M.K. El-Mansy and K. Morii, J. Mater. Process. Technol. 160, 229 (2005).
- [2] M.R. Anantharaman, K.A. Malini, S. Sindhu, E.M. Mohammed, S.K. Date, S.D. Kulkarni, P.A. Joy and P. Kurian, Bull. Mater. Sci. 24, 623 (2001).
- [3] T.J. Fiske, H.S. Gokturk and D.M. Kalyon, J. Mater. Sci. 32, 5551 (1997).
- [4] K.K. Chawla, Rev. Bras. Fis. 4(3), 411 (1974).
- [5] C. Lee and W. Hwang, J. Mater. Sci. Lett. 17, 1601 (1998).
- [6] S.S. Rangaraj and S.B. Bhaduri, J. Mater. Sci. 29, 2795 (1994).
- [7] H.S. Kim, S.I. Hong, and S.I. Kim, J. Mater. Process. Technol. 112, 109 (2001).
- [8] G.R. Liu, Compos. Struct. 40, 313 (1998).
- [9] B.K. Sarkar, Bull. Mater. Sci. 21, 329 (1998).
- [10] C. Burgstaller and W. Stadlbauer, 13<sup>th</sup> European conference of Composite Materials (ECCM13), Stockholm, Sweden (2008).
- [11] J.F. Luongo-Ortiz and K.E. Starling, Fluid Phase Equilib. 132, 159 (1997).
- [12] H.S. Gokturk, T.J. Fiske and D.M. Kalyon, IEEE Trans. Magn. 29, 4170 (1993).
- [13] K Lal and R Parshad, J. Phys. D: Appl. Phys. 6, 1788 (1973).
- [14] E.T. Thostenson and T.W. Chou, Compos. Part A-Appl Sci. Manufac. 1055 (1999).
- [15] A.N. Lagarkov and K.N. Rozanov, J. Magn. Magn. Mater. 321, 2082 (2009).
- [16] B.W. Li, Y. Shen, Z.X. Yue and C.W. Nan, J. Magn. Magn. Mater. 313, 322 (2007).
- [17] A. Hunyek, C. Sirisathitkul and P. Jantaratana, Plast. Rubber Compos. 42, 89 (2013).
- [18] A. Hunyek and C. Sirisathitkul, Polym.-Plast. Technol. Eng. 50, 593 (2011).
- [19] P. Jantaratana, C. Sirisathitkul, A. Hunyek and S. Maensiri, Adv. Compos. Lett. 20, 48 (2011).