

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

4.1.1 อิทธิพลของปริมาณผงโลหะ

ค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะ โดยแปรปริมาณของผงโลหะ คือ 0, 30, 50 และ 70 phr ของผงโลหะทั้งสามชนิด คือ ผงอลูมิเนียมที่ขนาดอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 13 μm (A113) และ 30 μm (A130) และผงดีบุกที่ขนาดอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 30 μm (Sn30) โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 ตามลำดับ พบว่า ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะทุกชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของผงโลหะเพิ่มขึ้น และพบว่า ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียม (A113 และ A130) มีแนวโน้มให้ค่า SE สูงกว่าเมื่อเติมผงดีบุก (Sn30) เพราะจากค่าสภาพนำไฟฟ้าของอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าดีบุก คือ 37.7×10^6 ซีเมนส์ต่อเมตร (<http://Aluminium.biography.ms/>, 2006) และ 9.17×10^6 ซีเมนส์ต่อเมตร (<http://tin.biography.ms/>, 2006) ตามลำดับ แสดงว่า อลูมิเนียมสามารถนำไฟฟ้าได้มากกว่าดีบุก ซึ่งจะสอดคล้องกับสูตรของค่า SE ที่แสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.7 (บทที่ 2) จะขึ้นอยู่กับค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) คือ อลูมิเนียมจะส่งผลต่อค่า SE มากกว่าดีบุก เมื่อนำมาเติมในยางธรรมชาติก็จะทำให้ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่า SE สูงกว่าเมื่อเติมด้วยดีบุก และเนื่องจากการใช้ผงโลหะที่มีน้ำหนักเท่ากัน ซึ่งดีบุกมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าอลูมิเนียม คือ 7.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ (<http://en.wikipedia.org>, 2005) ทำให้เมื่อใช้ผงโลหะที่มีน้ำหนักเท่ากัน ปริมาณของผงดีบุกจึงมีน้อยกว่าผงอลูมิเนียม ทำให้ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมด้วยผงดีบุกต่ำกว่าค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมด้วยผงอลูมิเนียม

$$SE = A_{dB} + R_{dB} \quad (2.3)$$

$$A_{dB} = Ka t(\mu\sigma F)^{0.5} \quad (2.4)$$

ค่าการสะท้อน ซึ่งประกอบด้วยค่าการสะท้อนทางไฟฟ้า ค่าการสะท้อนทางแม่เหล็ก และค่าการสะท้อนคลื่นระนาบ

1. Electric (High Impedance) Fields ($d < \lambda / 2\pi$)

$$RE_{dB} = Ke - 10 \log_{10} (\mu_\gamma F^3 d^2 / \sigma_\gamma) \quad (2.5)$$

2. Magnetic (Low Impedance) Fields ($d < \lambda / 2\pi$)

$$RH_{dB} = Kh - 10 \log_{10} (\mu_\gamma / Fd^2 \sigma_\gamma) \quad (2.6)$$

3. Far Field (Plane Wave) Conditions ($d \geq \lambda / 2\pi$)

$$RP_{dB} = 108.1 - 10 \log_{10} (\mu_\gamma F / \sigma_\gamma) \quad (2.7)$$

โดยที่ ค่า A_{dB} เป็นค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ค่า R_{dB} เป็นค่าการสะท้อน (ค่าการสะท้อนทางไฟฟ้า ค่าการสะท้อนทางแม่เหล็ก ค่าการสะท้อนคลื่นระนาบ)

Ka คือ ค่าคงที่ (3.338 หรือ 131.4 สำหรับความหนาในหน่วย mils หรือ มิลลิเมตรตามลำดับ)

t คือ ความหนา (mils หรือ เมตร)

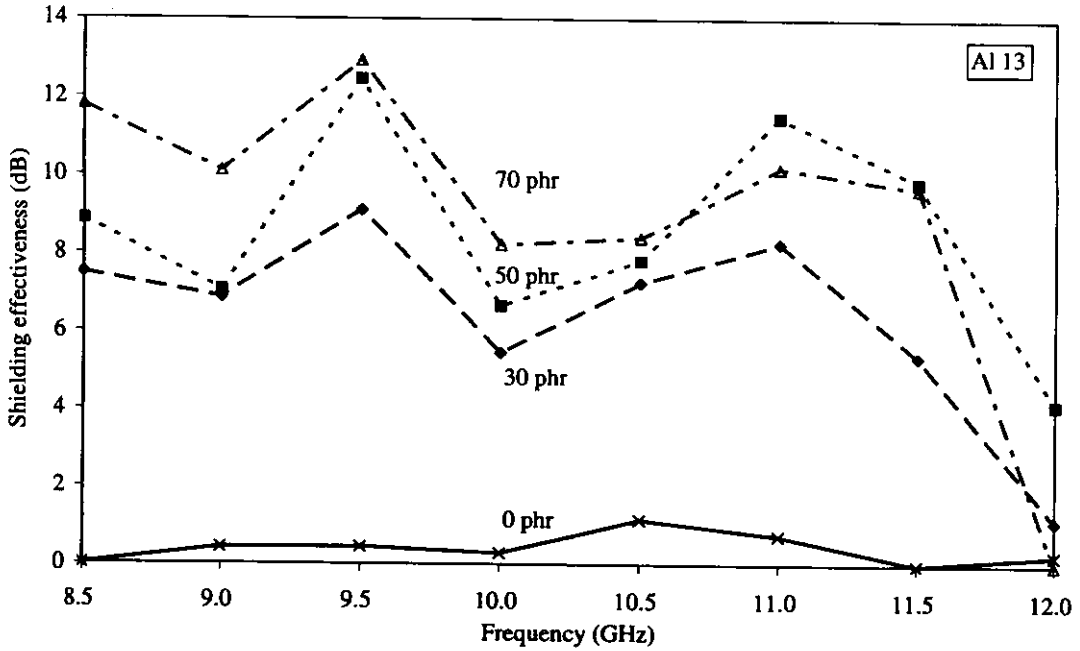
μ หรือ μ_γ คือ ค่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ (magnetic permeability)

σ หรือ σ_γ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative conductivity)

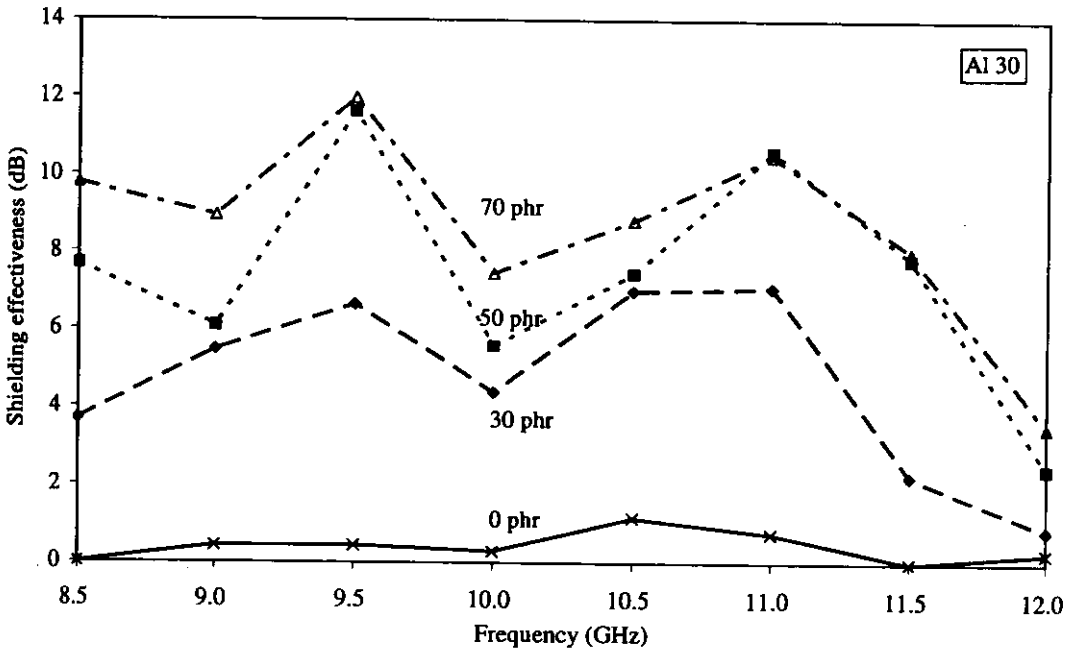
F คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

Ke และ Kh คือ ค่าคงที่

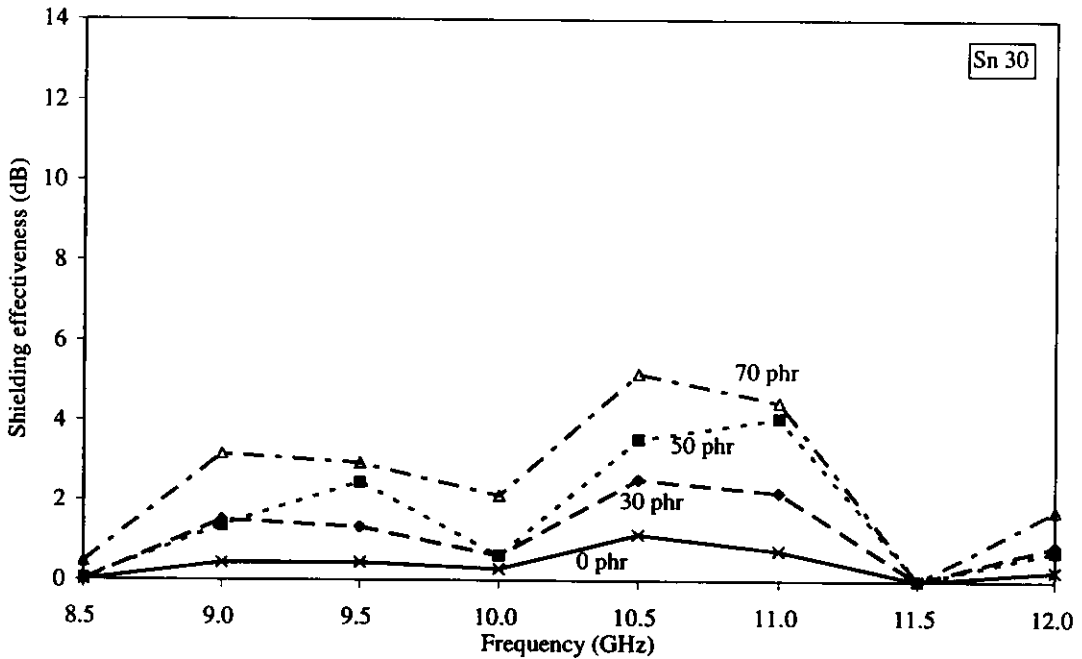
d คือ ระยะห่าง (separation distance)



รูปที่ 4.1 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียมขนาด 13 μm 0, 30, 50 และ 70 phr โดยไม่เติมขี้เถ้าคาร์บอนนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



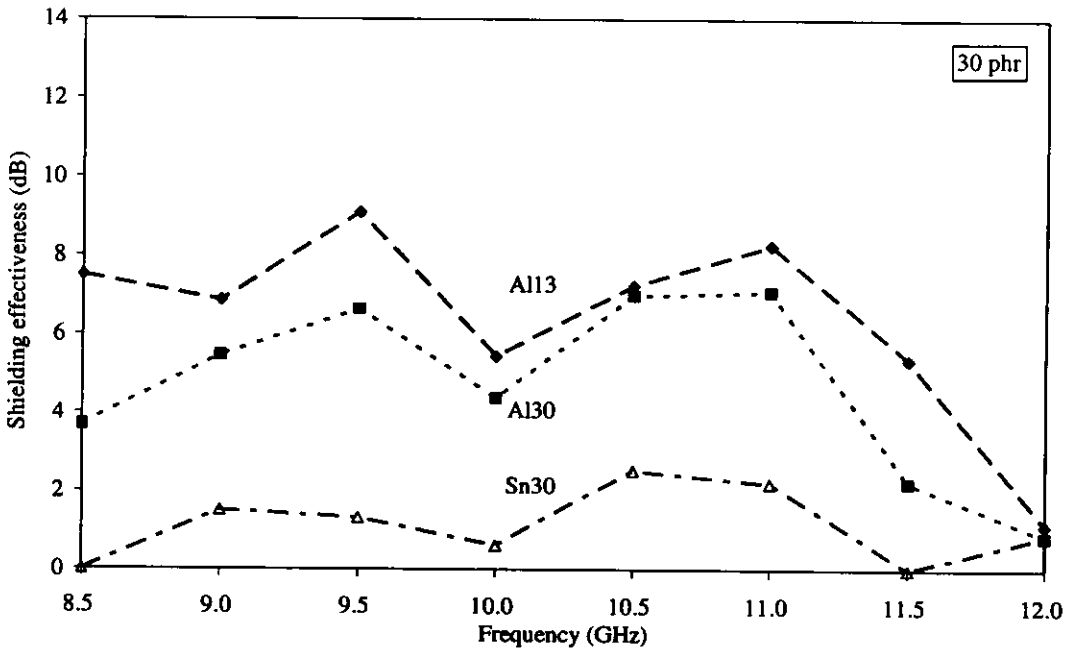
รูปที่ 4.2 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm 0, 30, 50 และ 70 phr โดยไม่เติมขี้เถ้าคาร์บอนนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



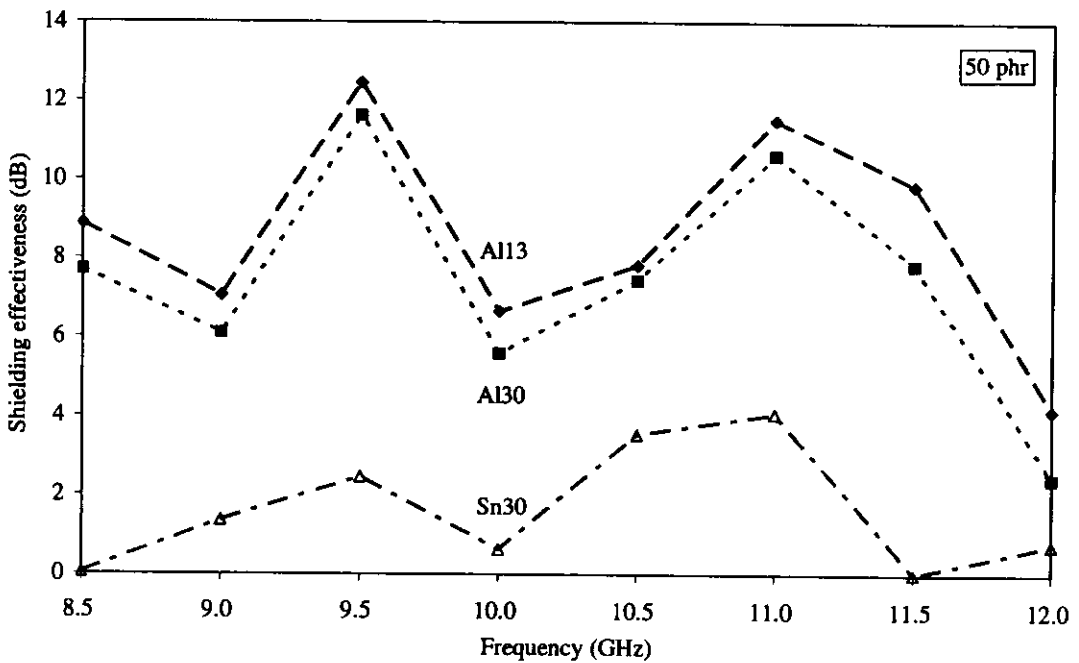
รูปที่ 4.3 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณผงดีบุกขนาด $30\ \mu\text{m}$ 0, 30, 50 และ 70 phr โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

4.1.2 อิทธิพลของชนิดและขนาดอนุภาคของผงโลหะ

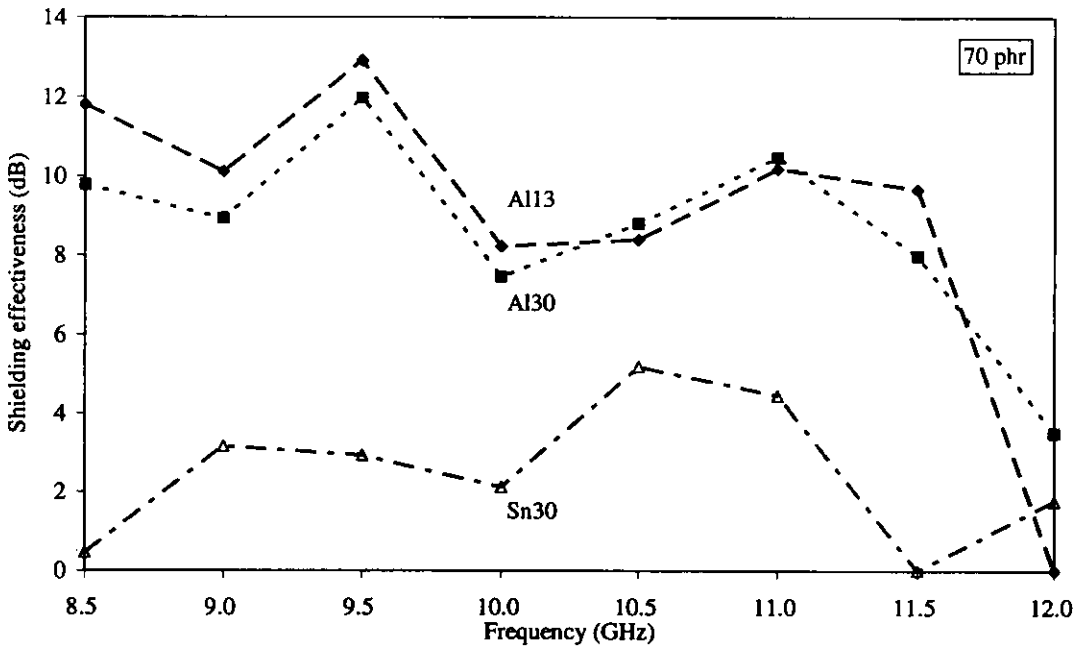
ค่า SE ของยางธรรมชาติที่หนา 1 มิลลิเมตร และเติมผงอลูมิเนียมขนาด $13\ \mu\text{m}$ ผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ และผงดีบุกขนาด $30\ \mu\text{m}$ ปริมาณ 30, 50 และ 70 phr โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะที่มีน้ำหนักเท่ากัน ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียม จะให้ค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมด้วยผงดีบุก และเมื่อเปรียบเทียบค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันคือ ผงอลูมิเนียมขนาดอนุภาคมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย $13\ \mu\text{m}$ และ $30\ \mu\text{m}$ พบว่า ค่า SE ของยางธรรมชาติที่ใช้ผงอลูมิเนียมทั้งสองชนิดจะมีค่า SE ที่ใกล้เคียงกันในทุกปริมาณการใช้ผงอลูมิเนียมที่เท่ากัน



รูปที่ 4.4 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะทั้งสามชนิดในปริมาณ 30 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



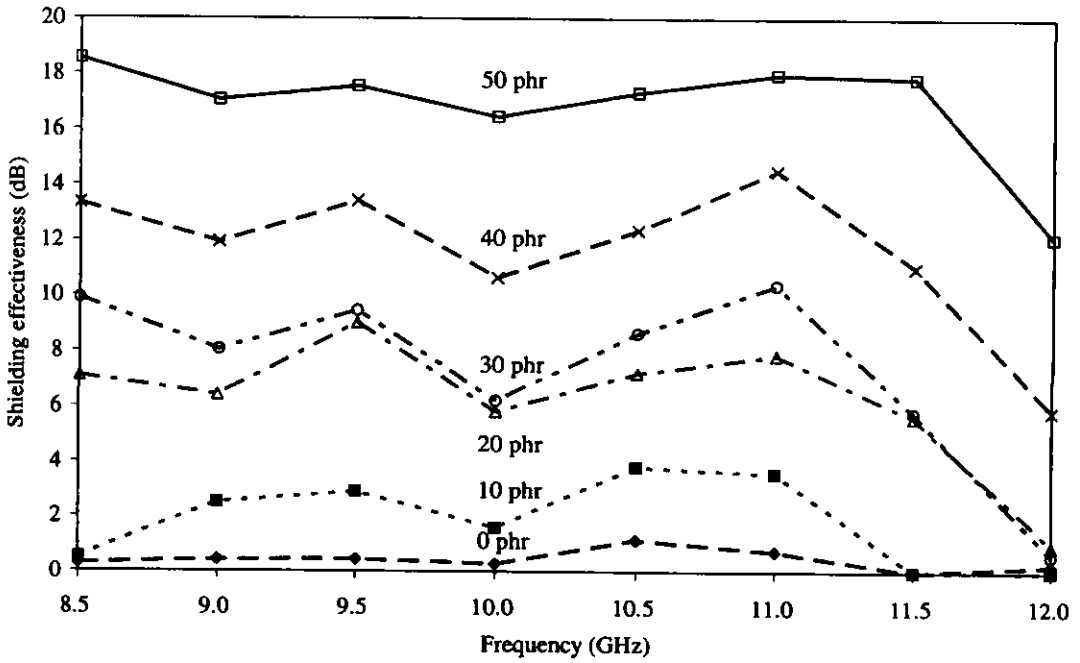
รูปที่ 4.5 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะทั้งสามชนิดในปริมาณ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



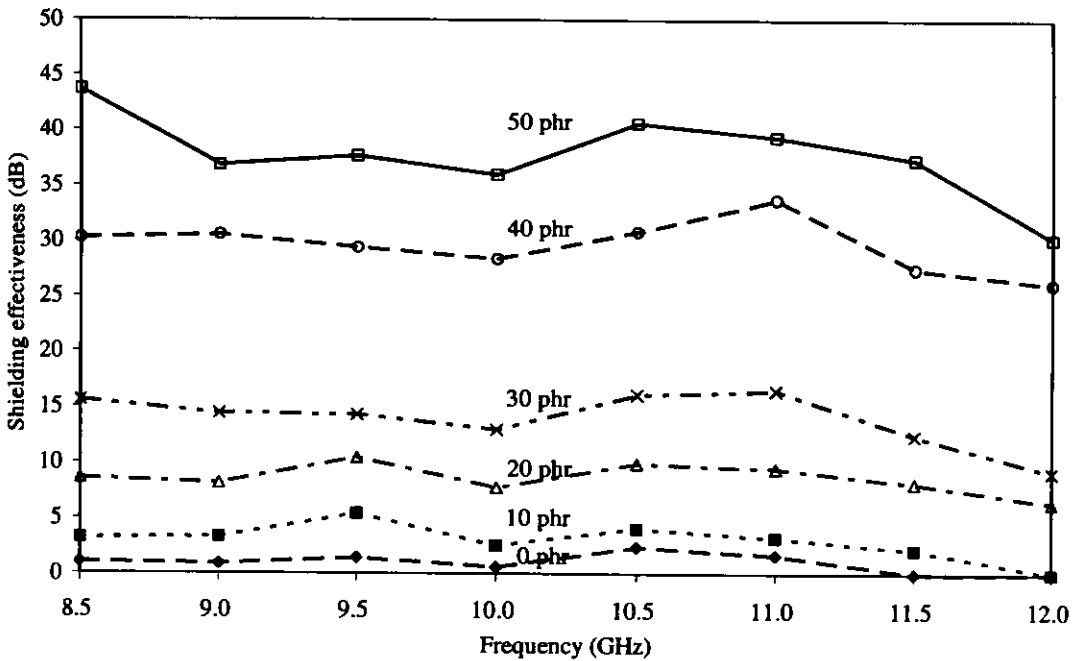
รูปที่ 4.6 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะทั้งสามชนิดในปริมาณ 70 phr โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

4.1.3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า

เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าที่ใช้ คือ Ketjenblack EC-300J ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0 – 50 phr (เพิ่มขึ้นทีละ 10 phr) โดยไม่เติมผงโลหะ ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะให้ค่า SE เพิ่มขึ้น และยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตามลำดับ และเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจะให้ค่า SE เพิ่มขึ้น

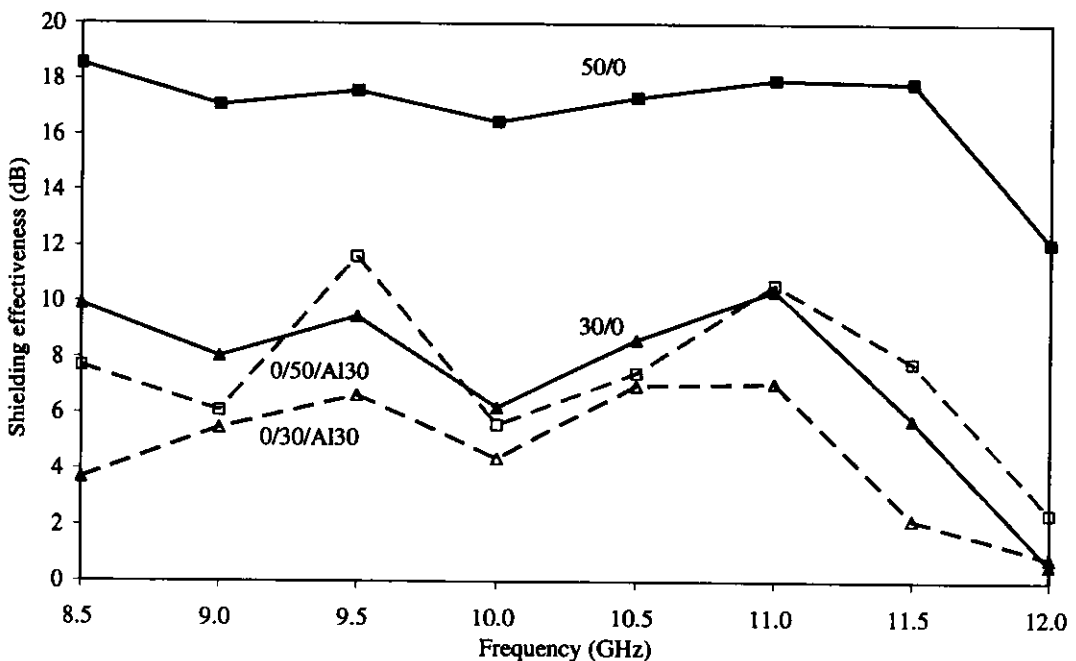


รูปที่ 4.7 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0 - 50 phr โดยไม่เติมผงโลหะชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

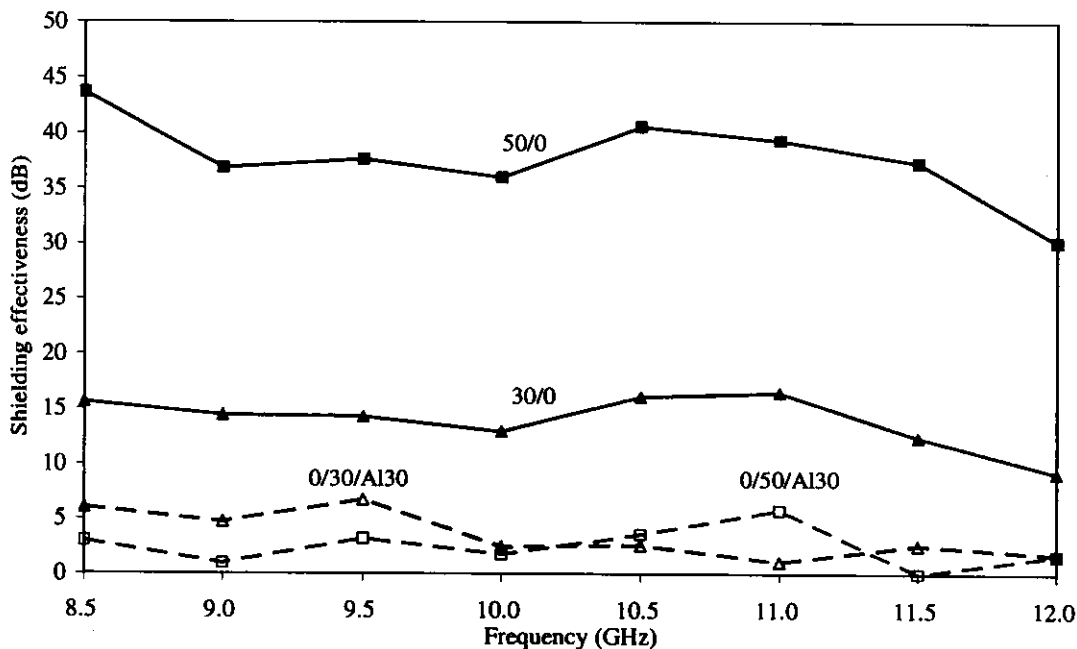


รูปที่ 4.8 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0 - 50 phr โดยไม่เติมผงโลหะชั้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่า SE ระหว่างยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว กับยางธรรมชาติที่เติมผงโลหะเพียงอย่างเดียว ยกตัวอย่างกรณีที่ใช้ผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้ที่เท่ากันของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ากับผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ พบว่า ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะให้ค่า SE สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ เพียงอย่างเดียว นั่นคือ เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะส่งผลต่อค่า SE มากกว่าผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ เนื่องจากเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีขนาดอนุภาคเล็กและมีปริมาณมากพอที่จะสามารถกระจายตัวให้อนุภาคของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากจนเกิดเป็นร่างแหต่อเนื่องที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าผงอลูมิเนียม ความหนาแน่นของผงอลูมิเนียมเท่ากับ 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 0.125 – 0.145 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อมีการใช้ในน้ำหนักที่เท่ากันจึงทำให้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีปริมาณมากกว่าผงอลูมิเนียม ดังนั้นเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจึงส่งผลต่อค่า SE มากกว่าเมื่อเติมด้วยผงอลูมิเนียม และเมื่อชั้นทดสอบมีความหนา 3 มิลลิเมตร มีแนวโน้มเช่นเดียวกับชั้นทดสอบที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.10



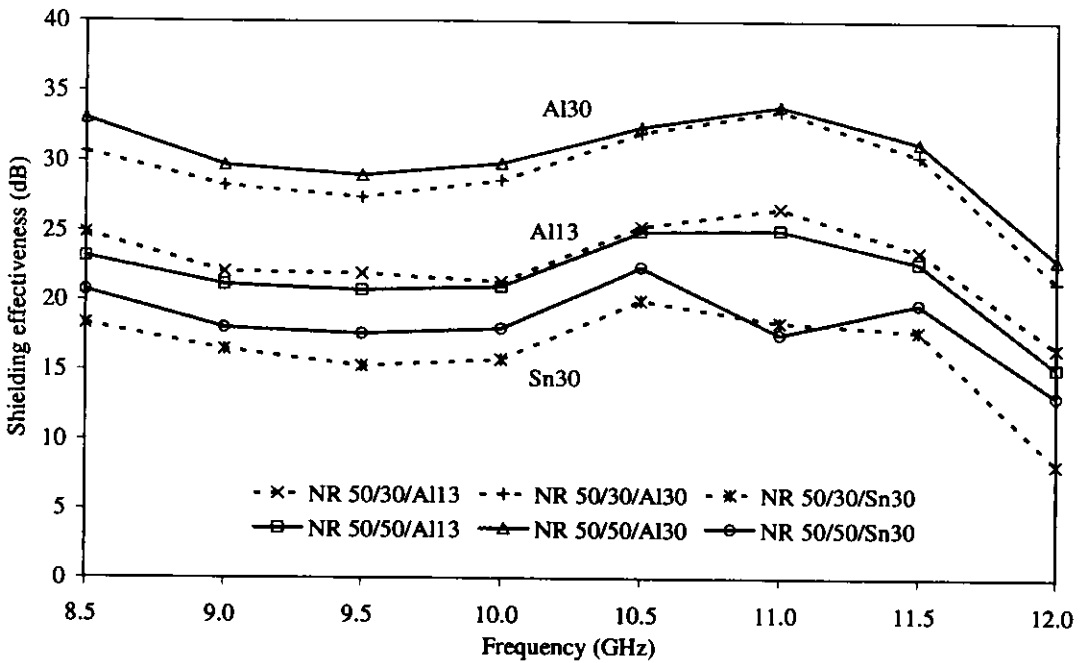
รูปที่ 4.9 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมขนาด $30\ \mu\text{m}$ ปริมาณ 30 และ 50 phr (0/30/A130, 0/50/A130) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr (30/0, 50/0) ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm ปริมาณ 30 และ 50 phr (0/30/A130, 0/50/A130) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ปริมาณ 30 และ 50 phr (30/0, 50/0) ชั้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

4.1.4 อิทธิพลของการใช้ผงโลหะร่วมกับเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า

ค่า SE ของยางธรรมชาติที่มีการเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 50 phr ร่วมกับผงโลหะ ทั้งสามชนิด (Al13, Al30 และ Sn30) ในปริมาณ 30 และ 50 phr ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.11 ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณเท่ากัน แต่ชนิดของผงโลหะต่างกัน ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm จะให้ค่า SE สูงกว่า ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมขนาด 13 μm และยางธรรมชาติที่เติมผงดีบุกขนาด 30 μm ตามลำดับ เนื่องจากผงอลูมิเนียมสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าผงดีบุกจึงส่งผลให้มีค่า SE สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ใช้ปริมาณของผงโลหะ คือ 30 และ 50 phr ของผงโลหะแต่ละชนิดแต่ใช้ปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเท่ากัน ให้ค่า SE ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากผงโลหะมีผลต่อค่า SE น้อยกว่าเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเมื่อเพิ่มปริมาณของผงโลหะจะทำให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

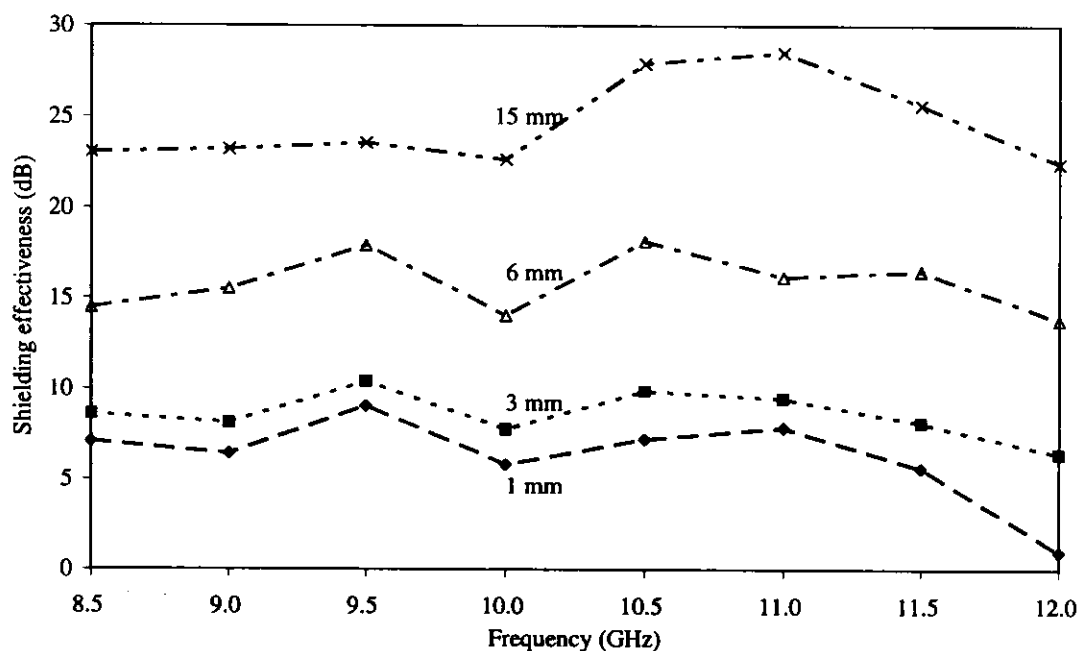


รูปที่ 4.11 ค่า SE ของยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงโลหะ (AI13, AI30 และ Sn30) ปริมาณ 30 และ 50 phr ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

4.1.5 อิทธิพลของความหนาชั้นทดสอบ

ค่า SE ของยางสูตร NR 20/0 คือ ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 20 phr โดยไม่เติมผงโลหะ ที่ความหนาต่างๆ กัน คือ 1, 3, 6 และ 15 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อความหนาของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ยางธรรมชาติเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเป็น 30 และ 40 phr (NR 30/0 และ NR 40/0) ที่ความหนา 15 มิลลิเมตร และที่ปริมาณการใช้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 50 phr (NR 50/0) ที่ความหนา 6 และ 15 มิลลิเมตร ไม่สามารถวัดค่า SE ได้ เนื่องจากมีค่า SE ที่สูงเกินกว่าที่เครื่องมือจะทำการวัดได้ จึงรายงานข้อมูลความหนาของยางธรรมชาติที่สูตร NR 20/0

ค่า SE ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นทดสอบ (Das *et al.*, 2001) และความหนาของชั้นทดสอบยังส่งผลต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (absorption) และค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในชั้นทดสอบ แสดงในสมการที่ 2.3 ดังนั้นเมื่อความหนาของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่า SE เพิ่มขึ้นด้วย (Pramanik *et al.*, 1991) สมการค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงในสมการที่ 2.4 จากสมการจะมีค่า τ คือ ความหนาของชั้นทดสอบ ดังนั้นถ้ามีความหนาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้น และส่งผลทำให้ค่า SE สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.12 ค่า SE ของยางธรรมชาติสูตร NR 20/0 ที่ความหนา 1, 3, 6 และ 15 มิลลิเมตร

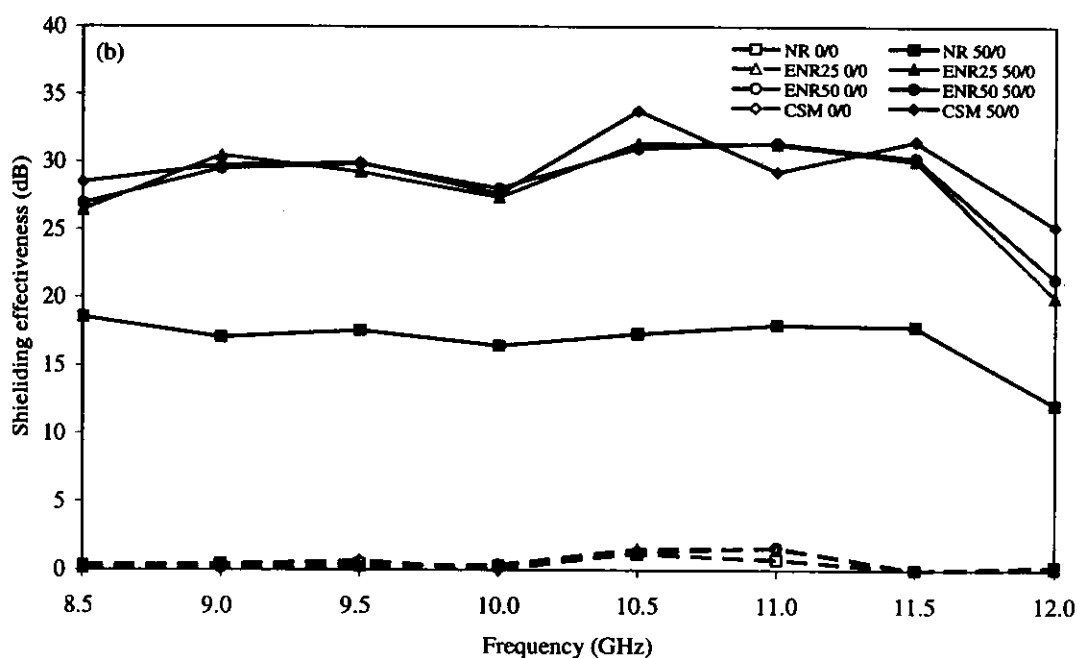
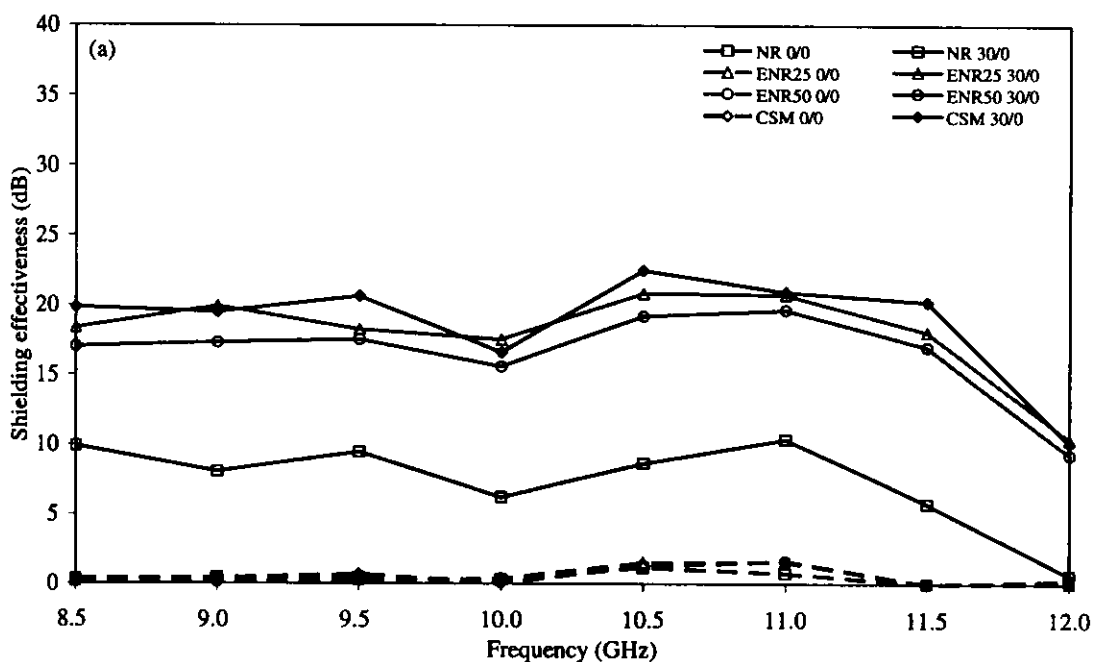
4.1.6 ผลของชนิดของยาง

ทำการวัดค่า SE ของยางชนิดอื่น ได้แก่ ยาง ENR25 ยาง ENR50 และยาง CSM ที่มีการแปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr แต่ไม่เติมผงโลหะ ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.13 (a) และ (b) พบว่า ยางทั้งสามชนิดเมื่อไม่เติมทั้งเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงโลหะจะให้ค่า SE ที่มีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่า SE ที่ต่ำ นั่นคือยางที่ไม่มีสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าผสมอยู่ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านได้ง่าย (Das *et al.*, 2000)

เมื่อมีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในยางแต่ละชนิด พบว่า ยางธรรมชาติจะให้ค่า SE ที่ต่ำกว่ายางชนิดอื่น (ENR25 ENR50 และยาง CSM) เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว ซึ่งต่างจากยางชนิดอื่นที่ใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นยางที่มีขั้วทั้งหมด ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Das (Das *et al.*, 2001) ที่ใช้ยาง EPDM และ ยาง EVA เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (Vulcan[®] XC -72) พบว่า ยาง EPDM จะให้ค่า SE ต่ำกว่ายาง EVA เนื่องจากยาง EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ส่วนยาง EVA เป็นยางที่มีขั้ว

เมื่อชั้นทดสอบมีความหนา 3 มิลลิเมตร มีแนวโน้มเช่นเดียวกับชั้นทดสอบที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากยาง CSM เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณ 50 phr ที่ชั้น

ทดสอบมีความหนา 3 มิลลิเมตร เครื่องมือวัดไม่สามารถวัดค่า SE ได้ เนื่องจากมีค่า SE สูงเกินกว่า เครื่องทดสอบจะวัดค่าได้



รูปที่ 4.13 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR25 ยาง ENR50 และยาง CSM (a) เต็มเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 0 และ 30 phr (b) เต็มเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 0 และ 50 phr ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

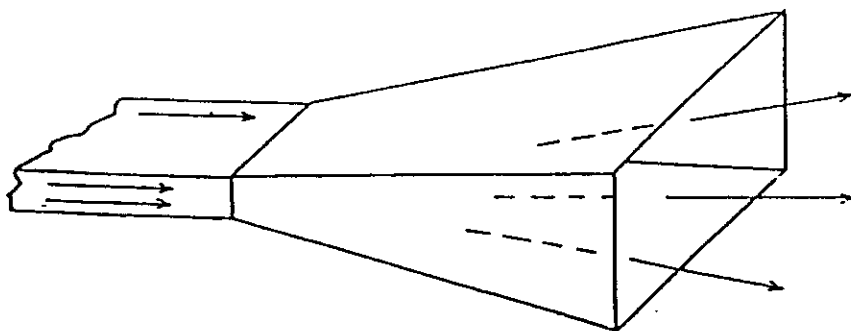
4.2 ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50147-1

จากการทดสอบค่า SE เบื้องต้น ได้คัดเลือกสูตรเพื่อทดสอบค่า SE ตามมาตรฐาน EN 50147 - 1 ดังนี้

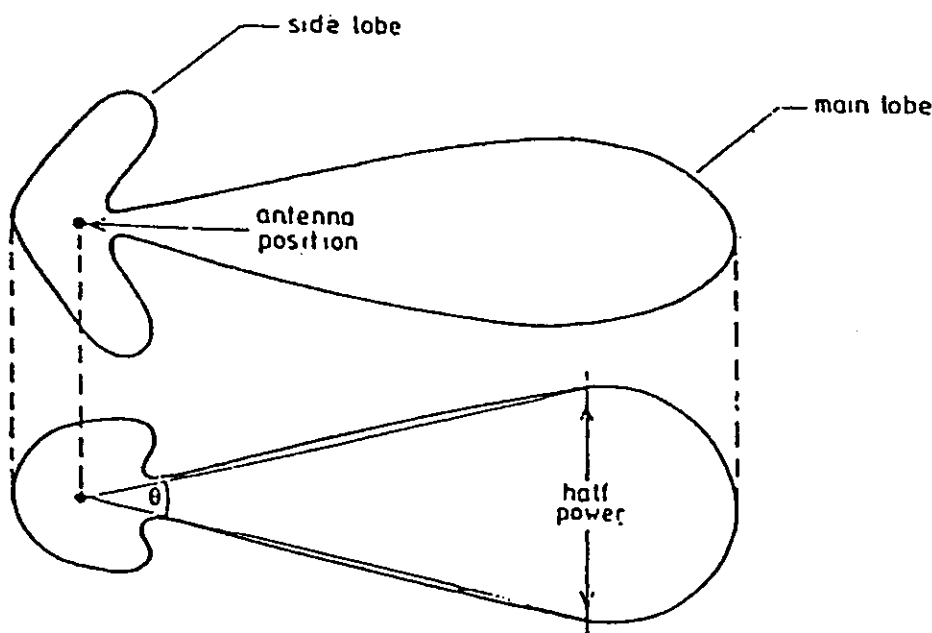
1. ขางที่ใช้ คือ ขางธรรมชาติ ขาง ENR50 และขาง CSM
2. ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ คือ 0, 30 และ 50 phr
3. ผงโลหะที่เลือกใช้ คือ ผงอลูมิเนียมขนาดอนุภาคมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 30 μm และปริมาณที่ใช้ คือ 0, 30 และ 50 phr เหตุผลที่เลือกใช้ผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm เนื่องจากขางที่เติมด้วยผงอลูมิเนียมให้ค่า SE สูงกว่าขางที่เติมด้วยผงดีบุก และผสมง่ายกว่า ไม่ฟุ้งกระจายเหมือนกับผงอลูมิเนียมขนาด 13 μm ที่มีขนาดอนุภาคเล็กเกินไปและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และค่า SE มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อใช้ในปริมาณเท่ากัน

4.2.1 ผลการหาฉากร้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 8.5 – 12 จิกะเฮิรตซ์

เนื่องจากรูปร่างของสายอากาศมีลักษณะแบบปากแตร (horn) ทำให้ลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมา มีลักษณะลู่ออก (divergent beam) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดังนั้นสายอากาศชนิดนี้จะให้รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiated pattern) ที่มีลักษณะเรียกว่า “โลบ” (lobe) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ในบางกรณีรูปแบบการแผ่คลื่นนี้อาจมีเพียงโลบหลัก (main lobe) หรือบางกรณีอาจมีโลบข้างเคียง (side lobe) อยู่ด้วย ความกว้างของโลบหลักนี้มีชื่อเรียกว่า ลำกว้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (beam width) จะเห็นว่าความกว้างของโลบหลักขึ้นอยู่กับมุม (θ) และระยะทางที่ห่างจากตำแหน่งส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (antenna position) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยทั่วไปความกว้างของโลบหลัก หรือลำกว้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะวัดอยู่ในรูปมุม (องศา) ระหว่างจุดสองจุดบนโลบหลักที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ 3 เดซิเบล ทั้งสองจุด ซึ่งที่ตำแหน่ง 3 เดซิเบล นี้จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด (half power) ตำแหน่งจุดสองจุดนี้คือตำแหน่งที่อยู่ในทิศตรงข้ามกันบนคอนทัวร์ (contour) ของโลบหลักดังแสดงในรูปที่ 4.15 นั่นเอง ลำกว้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า “3-dB beam width” (William, 1998)



รูปที่ 4.14 ลำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากสายอากาศลักษณะแบบปากแตร มีลักษณะลู่ออก (divergent beam) (Handbook of microwave trainer MWT530, 2000)



รูปที่ 4.15 รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiated pattern) (Handbook of microwave trainer MWT530, 2000)

จากการทดลองวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มุมต่างๆ ในทิศทางขวก (ทวนเข็มนาฬิกา) และทิศทางลบ (ตามเข็มนาฬิกา) ผลการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มุมต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากการทดลองได้ทำการวัดค่ามุมที่ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล ของความถี่ 8.5, 10.0 และ 12.0 จิกะเฮิร์ตซ์ และจากรูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาค่ามุมที่ค่ากำลังเท่ากับ 3 เดซิเบล ได้เช่นกัน แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ามุมที่ให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล ที่ความถี่ 8.5, 10.0 และ 12.0 จิกะเฮิร์ตซ์

ทิศทางของมุม	ค่าที่ได้จากการวัด / ค่าที่ได้จากกราฟ	ความถี่ (จิกะเฮิร์ตซ์)		
		8.5	10.0	12.0
มุมในทิศทางบวก (องศา)	จากการวัด	13.5	12.0	10.5
	จากกราฟ	13.0	12.0	10.0
มุมในทิศทางลบ (องศา)	จากการวัด	-14.0	-12.0	-10.5
	จากกราฟ	-14.0	-12.5	-10.5

จากตารางที่ 4.2 เลือกมุมที่มีค่ามากที่สุด คือ มุม 14 องศา ซึ่งเป็นมุมในทิศทางลบ เพียงทิศทางเดียวแต่ถ้าในทิศทางบวกมีมุมขนาดเท่ากัน แสดงว่ามุมในการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดทั้งหมด 28 องศา ที่ความถี่ 8.5 จิกะเฮิร์ตซ์ ทำการคำนวณหาขนาดของชั้นทดสอบที่จะใช้ในการทดสอบค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถนำค่ามุมขนาดครึ่งหนึ่งมาคำนวณหาขนาดของชั้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

พิจารณาจากสามเหลี่ยม AXC

$$\tan 14^\circ = \frac{XC}{AX} \quad (4.1)$$

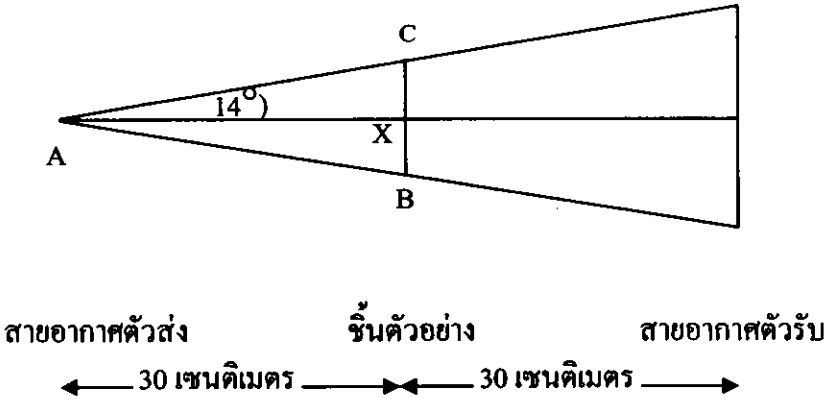
$$XC = (\tan 14^\circ)(AX)$$

$$XC = (0.2493)(30\text{cm})$$

$$XC = 7.479\text{cm}$$

XC คือ ขนาดครึ่งหนึ่งของชั้นทดสอบ ยาวประมาณ 7.5 เซนติเมตร ถ้าชั้นทดสอบ

ขนาดเต็มแผ่น คือ $7.5 \times 2 = 15$ เซนติเมตร

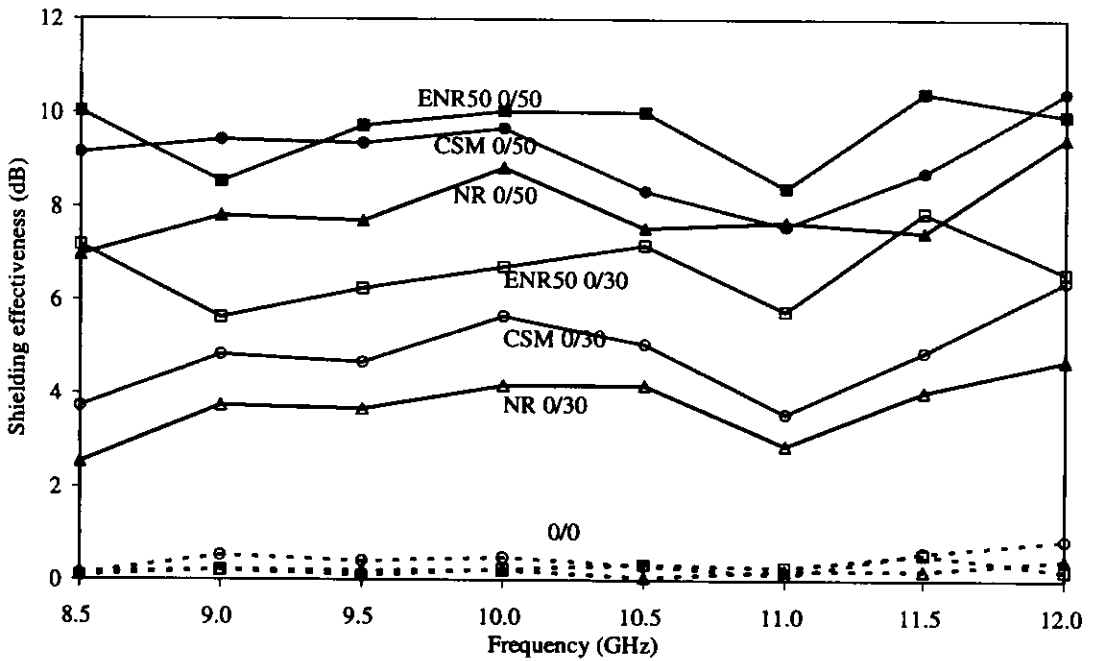


รูปที่ 4.17 การหาขนาดของชั้นทดสอบจากลำกว้างของสายอากาศที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เพราะฉะนั้น จึงต้องเตรียมชั้นทดสอบในการทดสอบค่า SE ในช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12 จิกะเฮิร์ตซ์ ให้ชั้นทดสอบมีขนาดอย่างน้อย 15×15 เซนติเมตร แต่ในการทดสอบได้ชั้นรูปชั้นทดสอบที่มีขนาด 30×30 เซนติเมตร เพื่อให้แน่ใจว่าชั้นทดสอบมีขนาดใหญ่กว่าลำกว้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.2 อิทธิพลของปริมาณของผงอลูมิเนียม

ค่า SE ของยางทุกชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.18 ข้างทั้งสามชนิดเมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้า จะมีค่า SE ในช่วง 0.06 ถึง 0.86 เดซิเบล เมื่อเติมผงอลูมิเนียมในข้างทั้งสามชนิดจะทำให้ค่า SE ของยางทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ การทดสอบค่า SE เบื้องต้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของยางที่ใช้ผงอลูมิเนียม ในปริมาณที่เท่ากันพบว่ายาง ENR50 จะให้ค่า SE สูงกว่ายาง CSM และยางธรรมชาติ ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

4.2.3 อิทธิพลของปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า

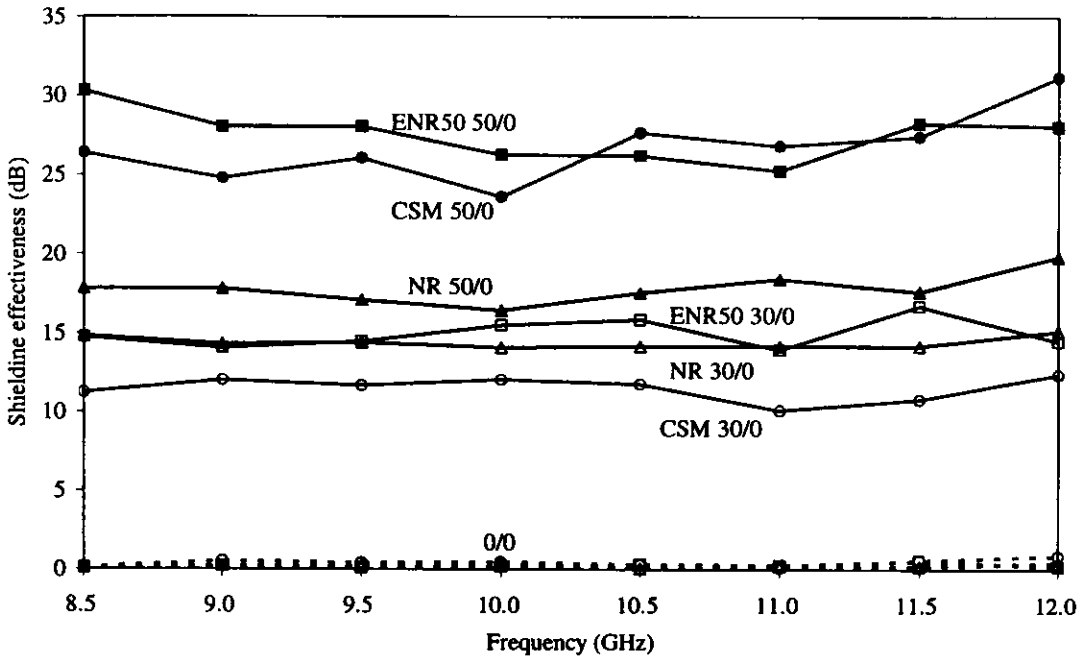
ค่า SE ของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม ชั้นทดสอบมีความหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า จะทำให้ค่า SE ของยางทั้งสามชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบค่า SE เบื้องต้น ค่า SE เพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างแบบตาข่ายที่ต่อเนื่องในยางจึงทำให้ค่า SE เพิ่มขึ้น (Das et al., 2000) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของยางที่ใช้ พบว่า เมื่อเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr (30/0) ในยางทั้งสามชนิด ค่า SE ของยางธรรมชาติที่หนา 1 มิลลิเมตรมีค่า SE ใกล้เคียงกับยาง ENR50 แต่สูงกว่ายาง CSM แต่ที่ความหนา 3 มิลลิเมตร ยางธรรมชาติจะให้ค่า SE สูงกว่าทั้งยาง ENR50 และ ยาง CSM

เมื่อเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณ 50 phr (50/0) ในยางแต่ละชนิด ค่า SE ของยางธรรมชาติมีค่าต่ำกว่ายาง ENR50 และ ยาง CSM ตามลำดับ ทั้งที่ความหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร อาจเนื่องมาจากยาง ENR50 และยาง CSM ต้องการปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณมาก จึงจะส่งผลทำให้ค่า SE มีค่าสูง ซึ่งแตกต่างจากยางธรรมชาติที่เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่า

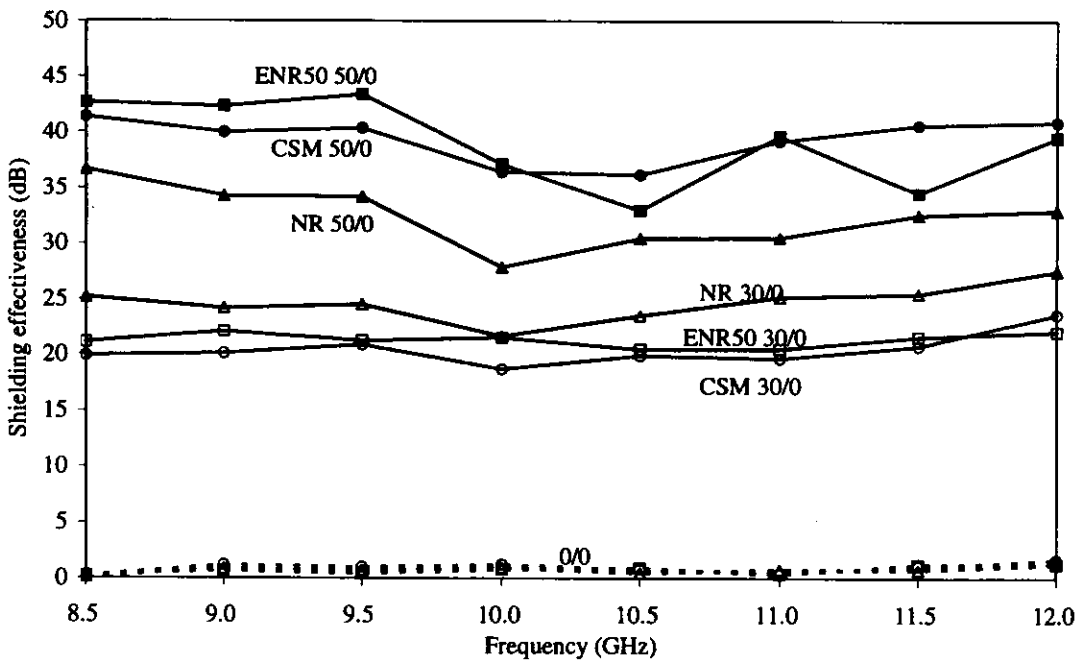
ชนิดนำไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ค่า SE เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ค่า SE จะน้อยกว่ายาง CSM และ ยาง ENR50 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันงานวิจัยของ Das (Das *et al.*, 2000) ที่ได้วัดค่า SE ในช่วงความถี่ 8 – 12 จิกะเฮิรตซ์ ของยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า คือ Vulcan[®] XC-72 ในปริมาณ 0 – 60 phr ค่า SE เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่า SE กับงานวิจัยของ Das พบว่า มีค่า SE มากกว่างานวิจัยของ Das คือ ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr มีค่า SE ในช่วง 12 – 18 เดซิเบล และ 30 – 43 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ แต่งานวิจัยของ Das จะให้ค่า SE ในช่วง 8 – 10 เดซิเบล สำหรับความหนา 3.5 มิลลิเมตร

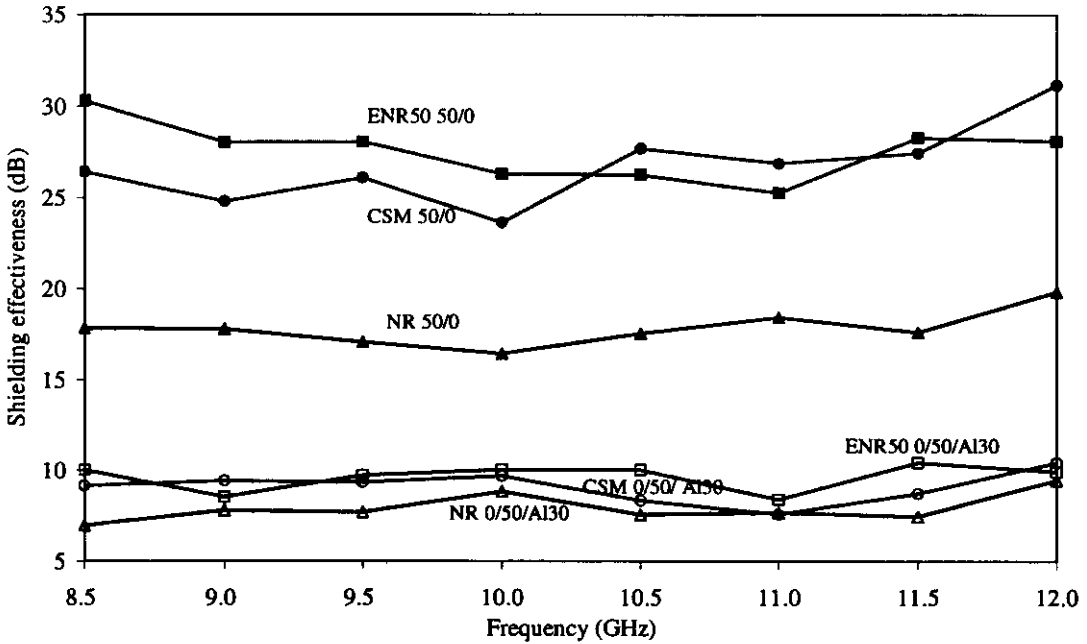
เมื่อเปรียบเทียบค่า SE ระหว่างยางทั้งสามชนิดที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว กับยางทั้งสามชนิดที่เติมผงโลหะเพียงอย่างเดียว ในปริมาณ 50 phr โดยชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า ค่า SE ของยางทั้งสามชนิดที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าในกรณีที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว นั่นคือ เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะส่งผลต่อค่า SE มากกว่าผงอลูมิเนียม เนื่องจากเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีขนาดอนุภาคเล็ก และมีปริมาณมากพอที่จะสามารถกระจายตัวให้อนุภาคของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมาก จนเกิดเป็นร่างแหต่อเนื่องที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าผงอลูมิเนียม ความหนาแน่นของผงอลูมิเนียมมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการใช้ในน้ำหนักที่เท่ากัน จึงทำให้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีปริมาณมากกว่าผงอลูมิเนียม ดังนั้นเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจึงส่งผลต่อค่า SE มากกว่าเมื่อเติมด้วยผงอลูมิเนียม



รูปที่ 4.19 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.20 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม ชั้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.21 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า หรือเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 50 phr เพียงอย่างเดียว ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

4.2.4 อิทธิพลของการใช้ผงอลูมิเนียมร่วมกับเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า

ค่า SE ของยางทั้งสามชนิด ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 และ 50 phr ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ และแสดงค่า SE ในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน พบว่า ค่า SE เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่า SE ของสูตร NR 50/30/A130 มีค่าในช่วง 24.30 – 28.23 เดซิเบล และ 34.89 – 40.54 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่า SE ของสูตร NR 50/50/A130 มีค่าในช่วง 29.05 – 36.66 เดซิเบล และ 35.46 – 41.54 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่า SE เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ค่า SE ของสูตร ENR50 50/30/A130 มีค่าในช่วง 32.04 – 38.72 เดซิเบล และ 35.02 – 43.11 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่า SE ของสูตร ENR50 50/50/A130 มีค่าในช่วง 33.22 – 41.74 เดซิเบล และ 35.03 – 42.76 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ยาง CSM ที่เดิมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่า SE เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง ENR50 และเนื่องจากการทดสอบค่า SE เบื้องต้นไม่สามารถวัดค่า SE ของยาง CSM ที่ความหนา 3 มิลลิเมตรของยาง สูตร CSM 50/30/AI30 และ CSM 50/50/AI30 ได้จึงไม่ได้ทำการวัดค่า SE ของยางสูตรดังกล่าวตามมาตรฐาน EN 50147-1 ดังนั้นค่า SE ของยาง CSM ที่หนา 1 มิลลิเมตรในยางสูตร CSM 50/30/AI30 และ CSM 50/50/AI30 มีค่าในช่วง 30.30 – 38.45 เดซิเบล และ 30.06 – 40.73 เดซิเบล ตามลำดับ

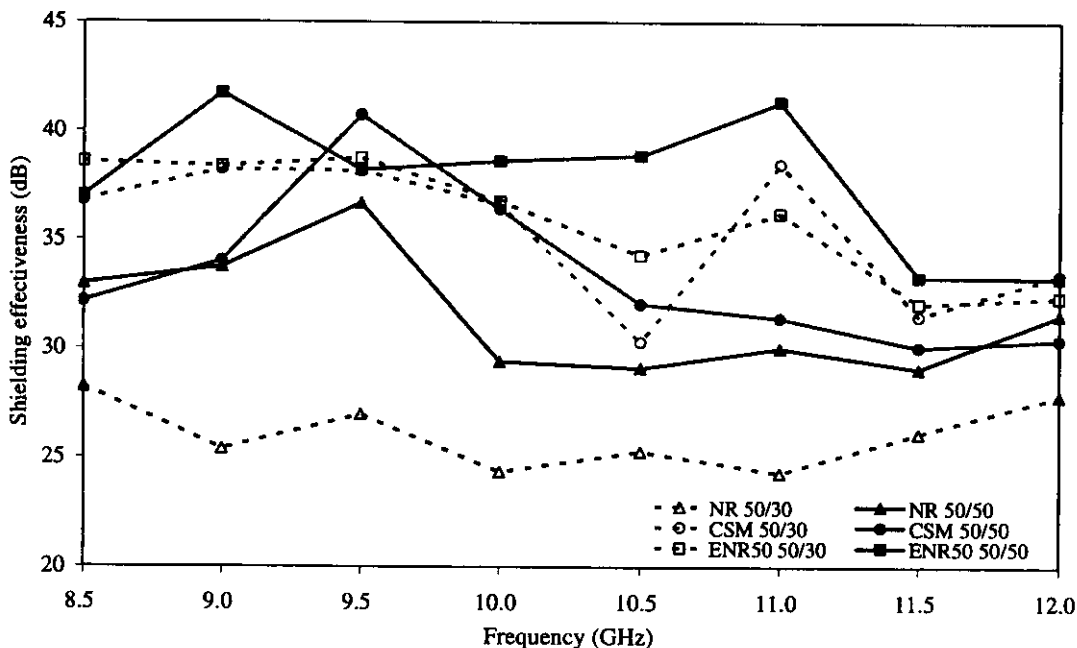
ดังนั้นยางที่เดิมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ยาง ENR50 และยาง CSM ให้ค่า SE ที่มีค่าใกล้เคียงกันและให้ค่า SE สูงกว่ายางธรรมชาติสำหรับความหนา 1 มิลลิเมตร ส่วนความหนา 3 มิลลิเมตร ยาง ENR50 ให้ค่า SE สูงกว่ายางธรรมชาติ สำหรับค่า SE ของชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร ให้ค่า SE แตกต่างกันไม่มากนัก เพราะความหนาอยู่ในช่วงเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ค่า SE ในช่วงความถี่ 8.5 – 12 จิกะเฮิรตซ์ ของยางสูตรต่างๆ โดยชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

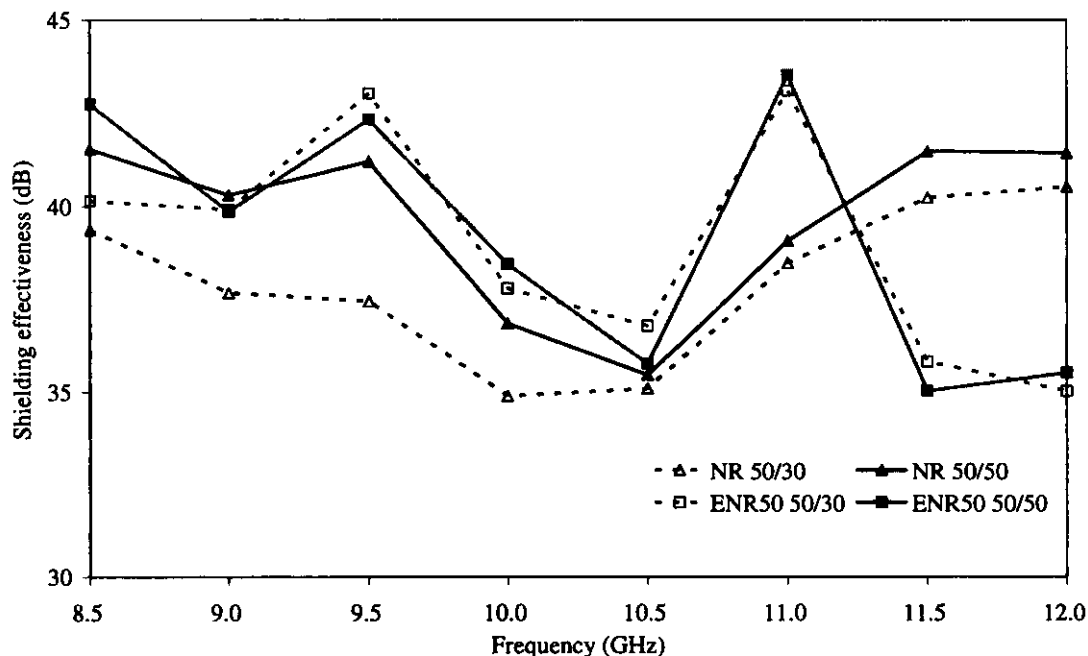
ปริมาณ CCB / AI30	ค่า SE (เดซิเบล)		
	NR	ENR50	CSM
0/0	0.06 – 0.44	0.09 – 0.56	0.10 – 0.86
0/30	2.53 – 4.72	5.63 – 7.88	3.57 – 6.40
0/50	6.97 – 8.83	8.40 – 10.44	7.59 – 10.44
30/0	14.10 – 15.15	13.97 – 16.72	10.10 – 12.41
50/0	16.44 – 19.85	25.29 – 30.31	23.64 – 31.17
30/30	18.73 – 21.77	21.34 – 24.54	16.64 – 21.11
30/50	20.30 – 24.46	24.10 – 27.11	19.04 – 21.34
50/30	24.30 – 28.23	32.04 – 38.72	30.30 – 38.45
50/50	29.05 – 36.66	33.22 – 41.74	30.06 – 40.73

ตารางที่ 4.4 ค่า SE ในช่วงความถี่ 8.5 – 12 จิกะเฮิร์ตซ์ ของยางสูตรต่างๆ โดยขึ้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

ปริมาณ CCB / AI30	ค่า SE (เดซิเบล)		
	NR	ENR50	CSM
0/0	0.11 – 1.26	0.25 – 1.26	0.19 – 1.69
0/30	1.01 – 5.57	0.95 – 6.01	3.08 – 6.48
0/50	0.90 – 7.37	2.88 – 8.07	1.47 – 7.54
30/0	21.64 – 27.46	20.47 – 22.06	19.64 – 23.59
50/0	27.82 – 36.64	32.94 – 43.37	36.16 – 41.34
30/30	26.45 – 32.77	33.57 – 39.56	24.22 – 26.74
30/50	36.06 – 40.17	32.54 – 40.97	28.25 – 35.52
50/30	34.89 – 40.54	35.02 – 43.11	-
50/50	35.46 – 41.54	35.03 – 42.76	-



รูปที่ 4.22 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 30 และ 50 phr ขึ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.23 ค่า SE ของยางธรรมชาติ และ ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 30 และ 50 phr ชั้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

ค่า SE ของยางทั้งสามชนิด ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr ชั้นทดสอบมีความหนา 1 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ และแสดงค่า SE ในตารางที่ 4.3 และ 4.4

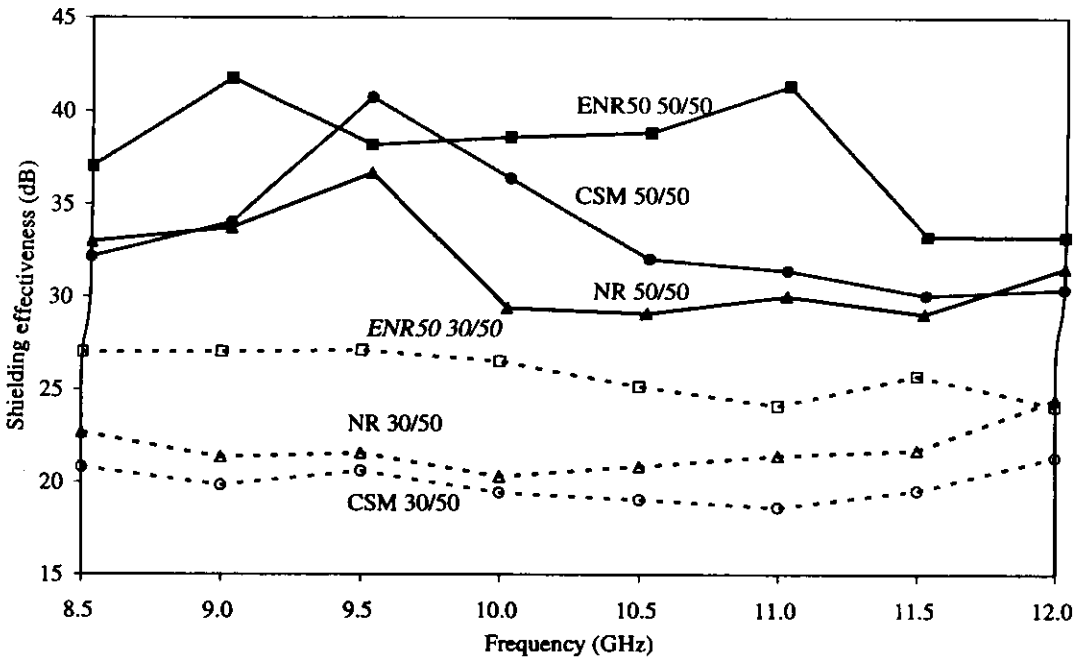
ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณต่างกันเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมเท่ากัน ค่า SE เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่า SE ของสูตร NR 30/50/A130 มีค่าในช่วง 20.30 – 24.46 เดซิเบล และ 36.06 – 40.17 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่า SE ของสูตร NR 50/50/A130 มีค่าในช่วง 29.05 – 36.66 เดซิเบล และ 35.46 – 41.54 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณต่างกันเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมเท่ากัน ค่า SE เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ค่า SE ของสูตร ENR50 30/50/A130 มีค่าในช่วง 24.10 – 27.11 เดซิเบล และ 32.54 – 40.97 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่า SE ของสูตร ENR50 50/50/A130 มีค่าในช่วง 33.22 – 41.74 เดซิเบล และ 35.03 – 42.76 เดซิเบล สำหรับชั้นทดสอบหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ

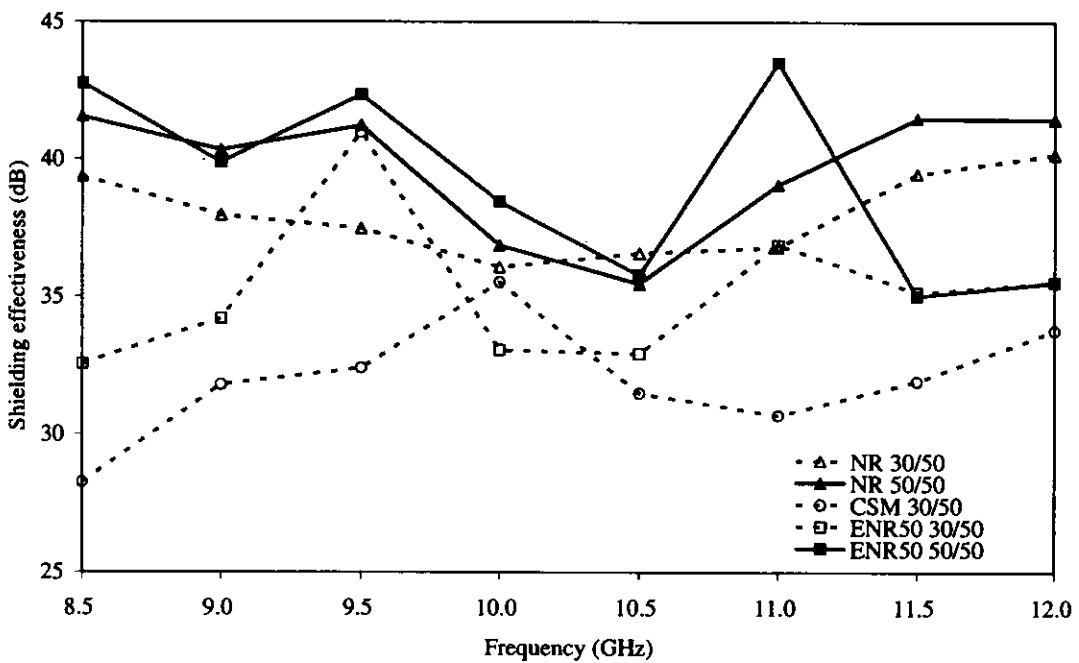
ยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณต่างกันเท่ากัน แต่ปริมาณของผง อลูมิเนียมเท่ากัน ค่า SE เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยาง ธรรมชาติและยาง ENR50 ค่า SE ของสูตร CSM 30/50/A130 มีค่าในช่วง 19.04 – 21.34 เดซิเบล และ 28.25 – 35.52 เดซิเบล สำหรับความหนา 1 และ 3 มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนค่า SE ของสูตร CSM 50/50/A130 ความหนา 1 มิลลิเมตรมีค่าในช่วง 30.06 – 40.73 เดซิเบล แต่ที่ความหนา 3 มิลลิเมตรไม่ได้ทำการวัดคั้งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ดังนั้นยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณต่างกัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียม เท่ากัน ยางสูตร 30/50/A130 ที่ให้ค่า SE มากที่สุด คือ ยาง ENR50 ยางธรรมชาติ และยาง CSM ตามลำดับสำหรับความหนา 1 มิลลิเมตร ส่วนความหนา 3 มิลลิเมตร ยางธรรมชาติ ให้ค่า SE สูง กว่ายาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ ยางสูตร 50/50/A130 ยางที่ให้ค่า SE มากที่สุด คือ ยาง ENR50 ยาง CSM และ ยางธรรมชาติ ตามลำดับสำหรับความหนา 1 มิลลิเมตร ส่วนความหนา 3 มิลลิเมตร ยาง ENR50 ให้ค่า SE สูงกว่ายางธรรมชาติ

ค่า SE ส่วนใหญ่ของยาง ENR50 และยาง CSM จะให้ค่า SE ที่มีค่าใกล้เคียงกัน และให้ค่า SE สูงกว่ายางธรรมชาติในสูตรเดียวกัน เนื่องจากยาง ENR50 และยาง CSM เป็นยางที่มี ขี้้ว ส่วนยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขี้้วจึงทำให้ค่า SE มีค่าน้อยกว่ายางที่มีขี้้ว และการที่ยางทั้งสาม ชนิดเมื่อมีการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าจะทำให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมตัวของสารตัว เติมนำไฟฟ้ารวมตัวกันเป็นร่างแหตาข่ายที่ต่อเนื่อง จึงทำให้ยางที่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าสามารถนำ ไฟฟ้าได้มากจึงทำให้ค่า SE มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.24 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยางENR50 และ ยางCSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr และเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 50 phr ชั้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.25 ค่า SE ของยางธรรมชาติ ยางENR50 และ ยางCSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr และเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 50 phr ชั้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

4.3.1 ผลการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก หรือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ เป็นสมบัติของวัสดุ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถบอกความเป็นฉนวน (insulators) ของวัสดุได้ (นิรันดร์, 2545) ถ้าวัสดุนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อย แสดงว่า วัสดุนั้นจะมีความเป็นฉนวนมาก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และยาง CSM ที่ไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า ยางธรรมชาติเมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 2.71 ซึ่งโดยทั่วไปค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางจะมีค่าประมาณ 2.0 – 4.0 (<http://www.tpub.com>, 2005) ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM ที่ไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้เท่ากับ 5.73 และ 7.89 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นยางธรรมชาติมีค่าเป็นฉนวนมากกว่ายาง ENR50 และ ยาง CSM ตามลำดับ

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.27 ยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียมจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียม ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM เมื่อเติมผงอลูมิเนียมก็จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียม จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิดเมื่อเติมผงอลูมิเนียมในปริมาณที่เท่ากัน ยาง CSM มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่า ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ แสดงว่าเมื่อเติมผงอลูมิเนียมในยางแล้วยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนมากกว่ายาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ

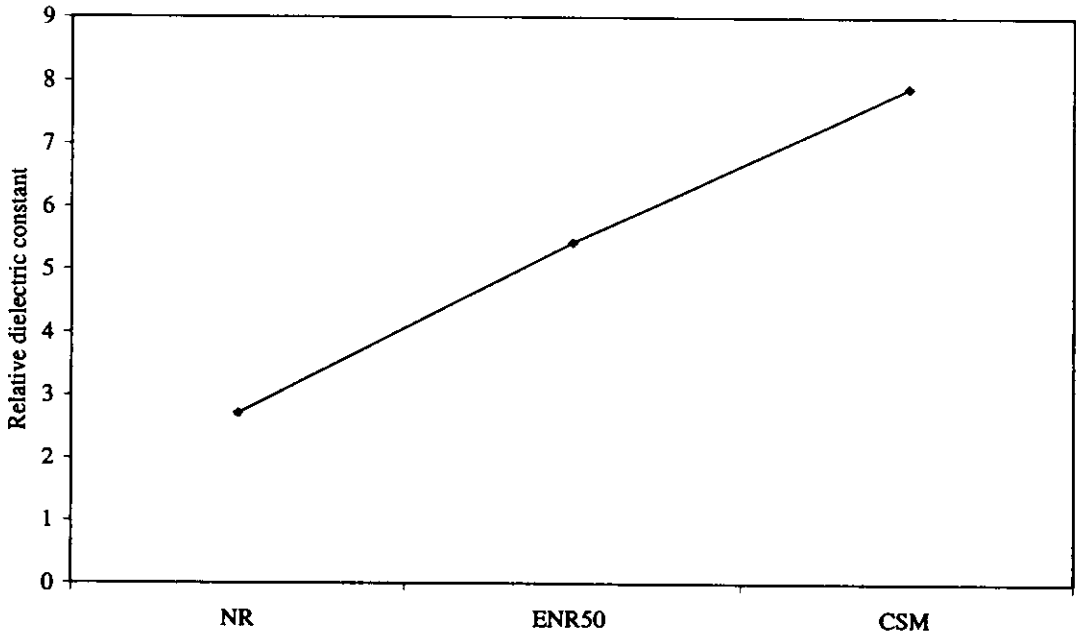
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 4.28 ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติเมื่อไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้ามียค่าเท่ากับ 2.71 แต่เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณ 30 และ 50 phr มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 5.42×10^3 และ 1.08×10^4 ตามลำดับ ในกรณีของยาง ENR50 และยาง CSM พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และยาง CSM มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ใกล้เคียงกับยาง ENR50 แสดงในตารางที่ 4.5 และเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าที่เพิ่มจาก 30 phr เป็น 50 phr จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นไม่สูงเท่ากับจาก 0 phr เป็น 30 phr ซึ่ง

ดูได้จากความชันของเส้นกราฟ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิดที่มีการเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณเท่ากัน พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยาง CSM มีค่าใกล้เคียงกับยาง ENR50 และจะมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

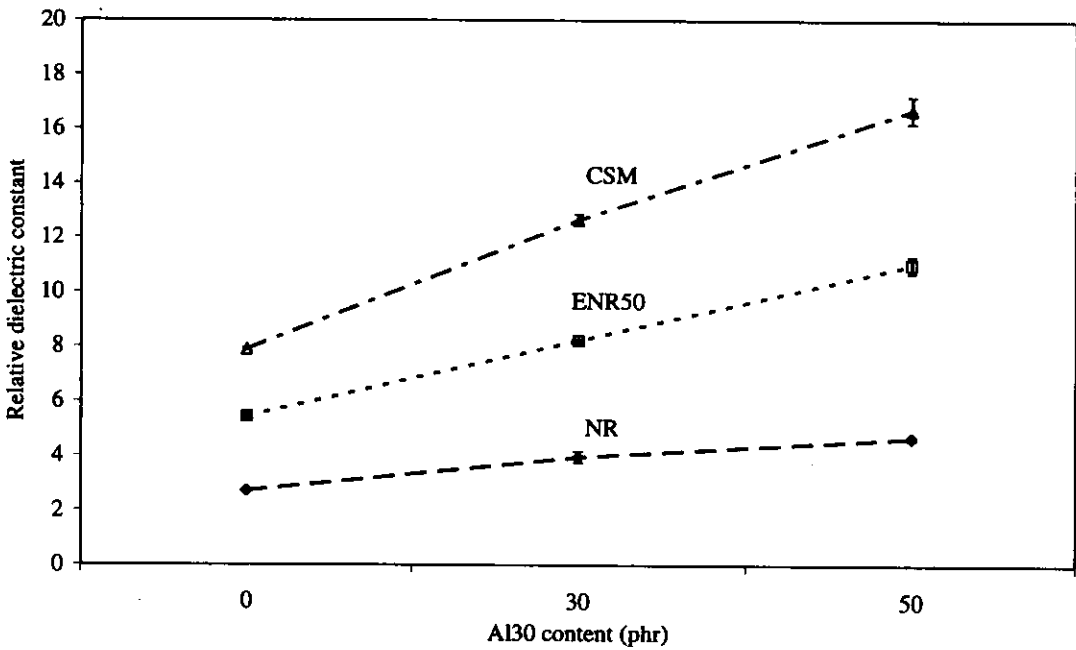
เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิด ที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.27) และที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.28) พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางที่เติมผงอลูมิเนียม มีค่าน้อยกว่ายางที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า แสดงว่า ยางที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจะมีความเป็นฉนวนน้อยกว่า (สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า) ยางที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการรวมตัวกันของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเป็นร่างแหที่สามารถนำไฟฟ้าภายในยาง (Das, *et al.*, 2000) ได้ดีกว่าผงอลูมิเนียม และความหนาแน่นของผงอลูมิเนียมซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีการใช้น้ำหนักที่เท่ากันจึงทำให้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้ามีปริมาณมากกว่าผงอลูมิเนียม ดังนั้นยางที่เติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าจึงส่งผลต่อทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่ายางเมื่อเติมด้วยผงอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางสูตรต่างๆ

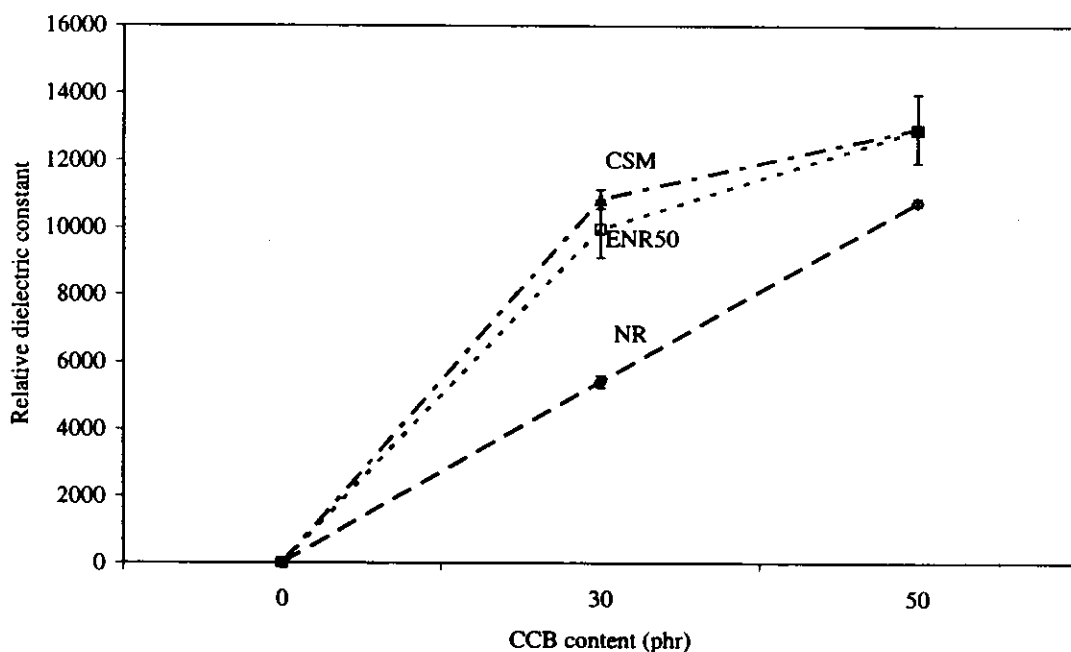
ปริมาณ CCB / AI30	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก		
	NR	ENR50	CSM
0/0	2.71	5.43	7.89
0/30	3.95	8.21	12.65
0/50	4.66	11.02	16.69
30/0	5.42×10^3	9.97×10^3	1.09×10^4
50/0	1.08×10^4	1.29×10^4	1.30×10^4
30/30	6.51×10^3	1.02×10^4	1.14×10^4
30/50	7.47×10^3	1.17×10^4	1.30×10^4
50/30	1.09×10^4	1.39×10^4	1.33×10^4
50/50	1.47×10^4	1.67×10^4	1.60×10^4



รูปที่ 4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่ไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าและผงโลหะ



รูปที่ 4.27 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า



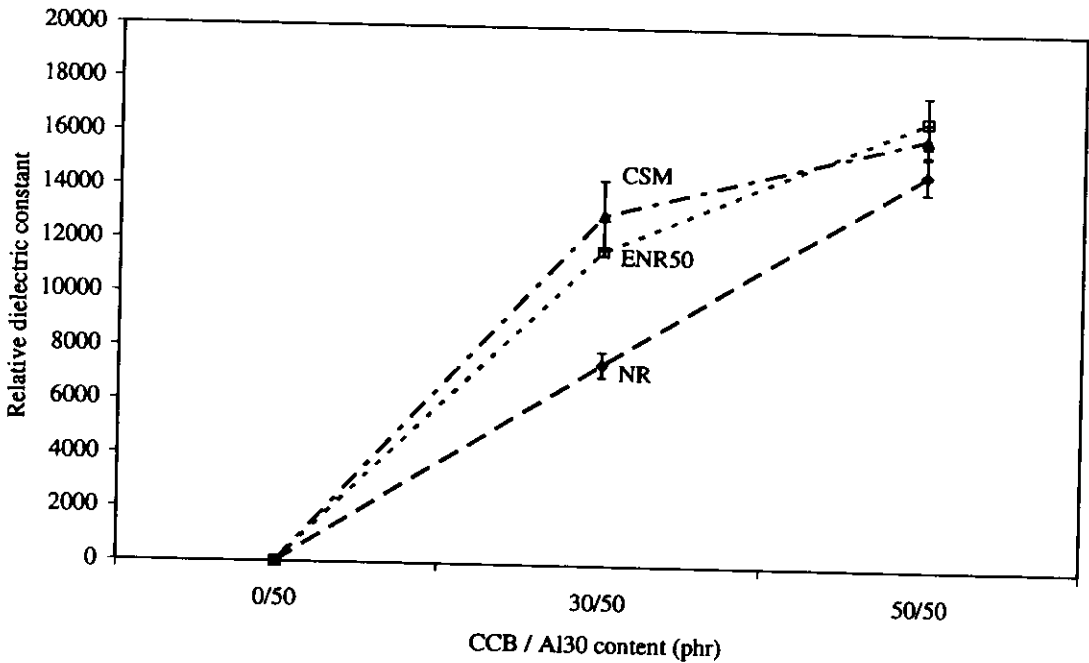
รูปที่ 4.28 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิด ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.29 ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเท่ากับ 2.71 , 7.47×10^3 และ 1.47×10^4 สำหรับปริมาณผงอลูมิเนียม 50 phr ร่วมกับปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยาง ENR50 และยาง CSM ในสูตรเดียวกันกับยางธรรมชาตินี้ พบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกระหว่างยาง ENR50 และ ยาง CSM มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงในตารางที่ 4.5 และเมื่อเปรียบเทียบยางทั้งสามชนิด พบว่า ยาง ENR50 และ ยาง CSM มีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ

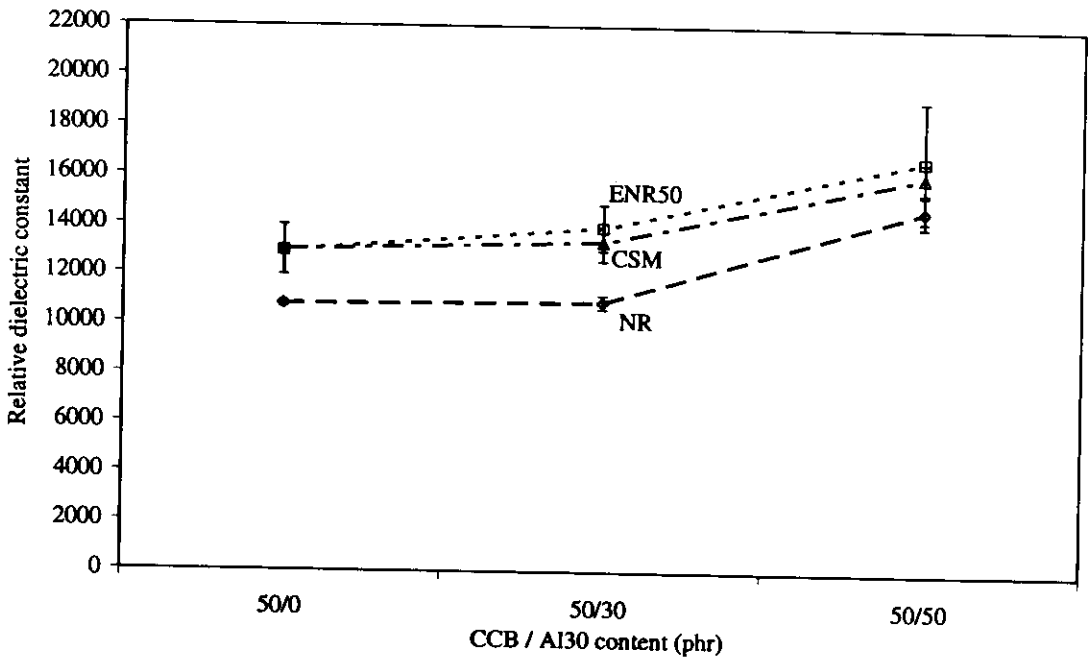
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นการใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกันเช่นเดียวกับรูปที่ 4.29 พบว่า ยางธรรมชาติเมื่อเติมปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr เท่ากัน แต่แปรปริมาณของผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.08×10^4 , 1.09×10^4 และ 1.47×10^4 ตามลำดับ ซึ่งจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับยาง ENR50 และ ยาง CSM ด้วย และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ

ยางทั้งสามชนิด พบว่า ยาง ENR50 มีค่าสูงกว่า ยาง CSM เพียงเล็กน้อย และมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติตามลำดับ

เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของยางที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.27) หรือเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.28) และเติมผงอลูมิเนียม ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (รูปที่ 4.29 และ 4.30) พบว่า ยางที่เติมทั้งเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่ายางที่เติมผงอลูมิเนียม หรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แสดงว่า ยางที่เติมผงอลูมิเนียมร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า จะมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียมหรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการรวมตัวเป็นร่างแหนำไฟฟ้า (Das, et al., 2000) ได้ดีกว่า จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาสูตรยางที่ให้ค่า SE สูงสุด คือ ยางสูตร 50/50/AI30 ของยางทั้งสามชนิดในตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางทั้งสามชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.29 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 50 phr และเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 0, 30 และ 50 phr



รูปที่ 4.30 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนดำ ไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

4.3.2 ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance, Z) หรือค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็นโอห์ม ถ้าค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อนมีค่ามากแสดงว่ามีความต้านทานไฟฟ้ามาก ซึ่งจะนำไฟฟ้าได้น้อย และจะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือ ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลง ค่าอิมพีแดนซ์ทำการวัดที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ และความต่างศักย์ไฟฟ้า 1,000 มิลลิโวลต์ โดยขึ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ของยางสูตรต่างๆ แสดงค่าในตารางที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิดที่ไม่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 4.31 ยางธรรมชาติมีค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุดเท่ากับ 3.61×10^6 โอห์ม ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM จะให้ค่าอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 2.02×10^6 และ 1.29×10^6 โอห์ม ตามลำดับ แสดงว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามาก จึงสามารถนำไฟฟ้าได้น้อยกว่ายาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ

ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.32 ยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียมจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 3.61×10^6 , 3.43×10^6 และ 2.15×10^6 โอห์ม สำหรับยางธรรมชาติที่ใช้ปริมาณผง

อลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr ตามลำดับ ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM แสดงผลแนวโน้มเดียวกันกับยางธรรมชาติ แต่จะให้ค่าต่ำกว่า แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางทั้งสามชนิดที่เติมเฉพาะผงอลูมิเนียมในปริมาณเท่ากัน พบว่ายางธรรมชาติมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่ายาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ

ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิด ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 4.33 ยางธรรมชาติเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง และเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงตามลำดับ โดยค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr และ 50 phr มีค่าเท่ากับ 3.64×10^3 และ 8.45×10^2 โอห์ม ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อมีปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามูลค่าลดลง วัสดุจึงสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งในส่วนของยาง ENR50 และ ยาง CSM มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบยางทั้งสามชนิดในสูตรยางที่ใช้ปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน ยางธรรมชาติมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ตามลำดับ แสดงว่ายางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมผงอลูมิเนียม (รูปที่ 4.32) หรือเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (รูปที่ 4.33) เพียงอย่างเดียว พบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของยางที่เติมผงอลูมิเนียม มีค่ามากกว่ายางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า แสดงว่า ยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีความต้านทานน้อยกว่า (สามารถนำไฟฟ้าได้มากกว่า) ยางที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าสามารถแทรกอยู่ระหว่างเนื้อยางได้ทั่ว และสามารถรวมตัวเป็นร่างแหที่สามารถนำไฟฟ้าได้ภายในยาง (Das, *et al.*, 2000) ได้ดีกว่าเมื่อเติมด้วยผงอลูมิเนียม

ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิด ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr เท่ากัน ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.34 พบว่า ยางธรรมชาติที่ใช้ผงอลูมิเนียมเท่ากัน และแปรปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.97×10^3 , 7.26×10^2 โอห์ม สำหรับยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียม 50 phr และเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr ตามลำดับ ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและค่าอิมพีแดนซ์แสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบชนิดของยางในยางสูตรดังกล่าว ยางธรรมชาติมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ตามลำดับ

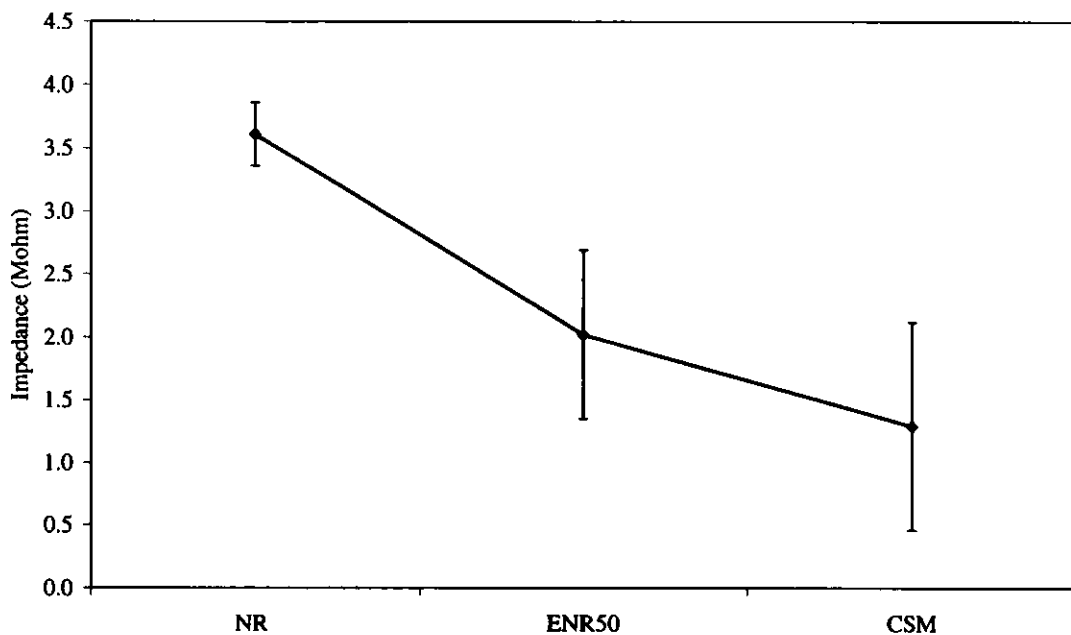
ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr เท่ากัน แสดงในรูปที่ 4.35 ยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำ

ชนิดนำไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.45×10^2 , 8.09×10^2 และ 7.26×10^2 โอห์ม สำหรับยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน (50 phr) และปริมาณของผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr ตามลำดับ ส่วนยาง ENR50 และยาง CSM ก็ให้ผลแนวโน้มเดียวกันกับยางธรรมชาติ แสดงค่าในตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบยางทั้งสามชนิดในสูตรดังกล่าว พบว่า ยางธรรมชาติให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ตามลำดับ แสดงว่ายางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้ามากกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ตามลำดับ

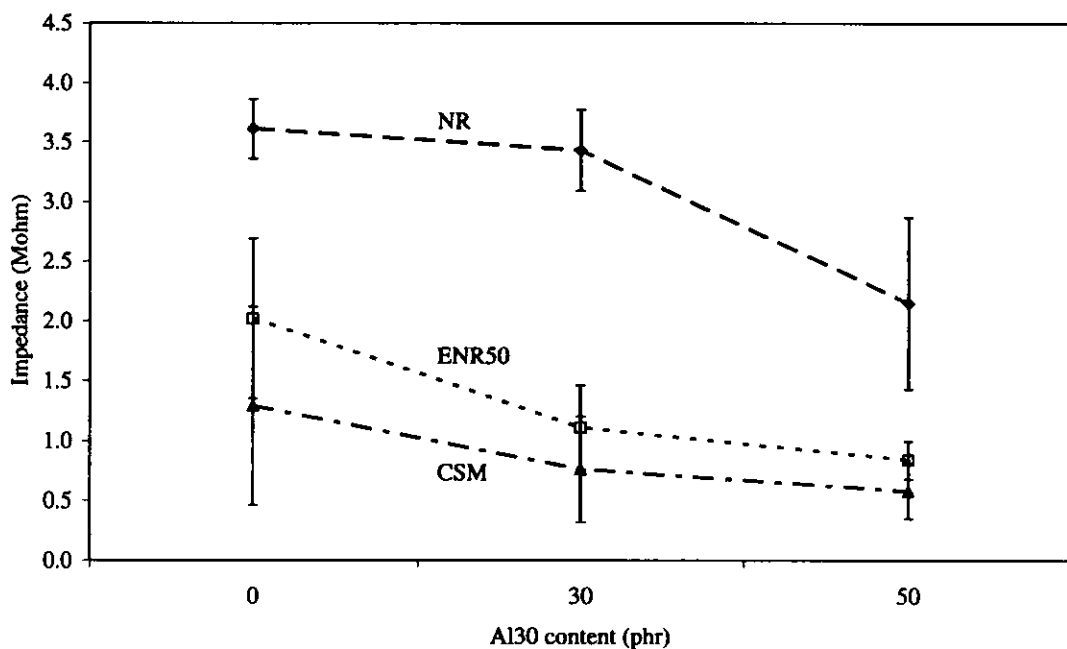
เปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของยางที่เติมผงอลูมิเนียม (รูปที่ 4.32) หรือเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.33) และเติมผงอลูมิเนียมร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (รูปที่ 4.34 และ 4.35) พบว่า ยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียม จะให้ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่ายางที่เติมเพียงผงอลูมิเนียมหรือเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แสดงว่า ยางที่เติมทั้งผงอลูมิเนียมและเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า จะมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีกว่ายางที่เติมผงอลูมิเนียมหรือเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากการรวมตัวเกิดเป็นร่างแหที่สามารถนำไฟฟ้าเกิดได้มากขึ้นจึงทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น และเมื่อพิจารณาสูตรยางที่ให้ค่า SE สูงสุด คือ ยางสูตร 50/50/A130 ของยางทั้งสามชนิด พบว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของยางทั้งสามชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางสูตรต่างๆ

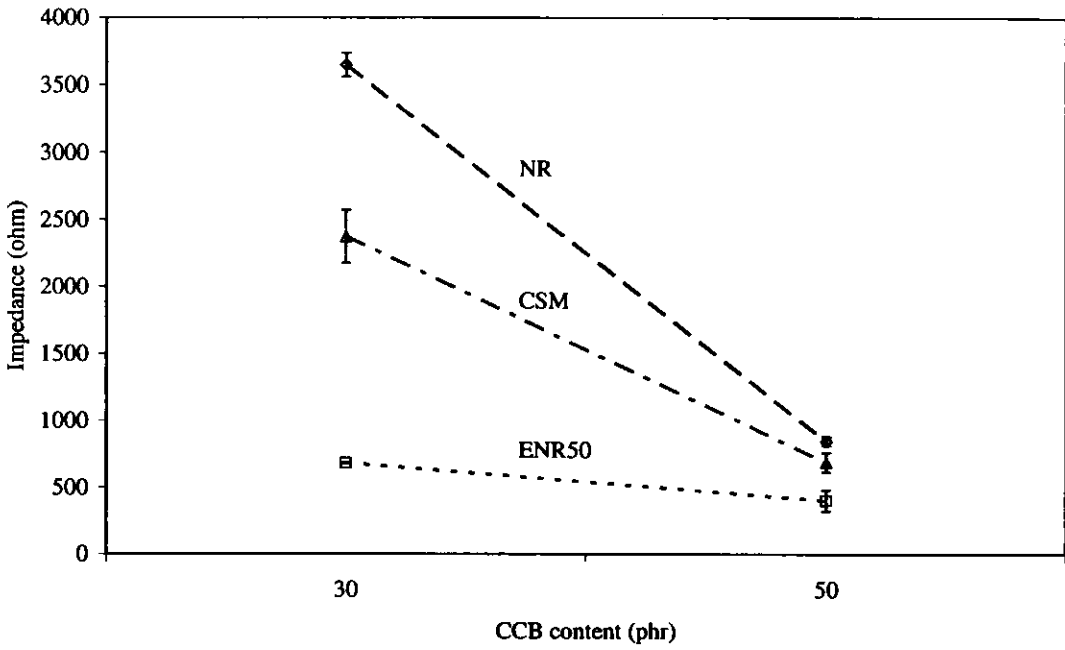
ปริมาณ CCB / A130	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)		
	NR	ENR50	CSM
0/0	3.61×10^6	2.02×10^6	1.29×10^6
0/30	3.43×10^6	1.11×10^6	7.63×10^5
0/50	2.15×10^6	8.43×10^5	5.76×10^5
30/0	3.64×10^3	6.80×10^2	2.37×10^3
50/0	8.45×10^2	3.98×10^2	6.86×10^2
30/30	2.67×10^3	6.68×10^2	1.63×10^3
30/50	1.97×10^3	6.64×10^2	1.67×10^3
50/30	8.09×10^2	2.95×10^2	5.15×10^2
50/50	7.26×10^2	1.74×10^2	4.15×10^2



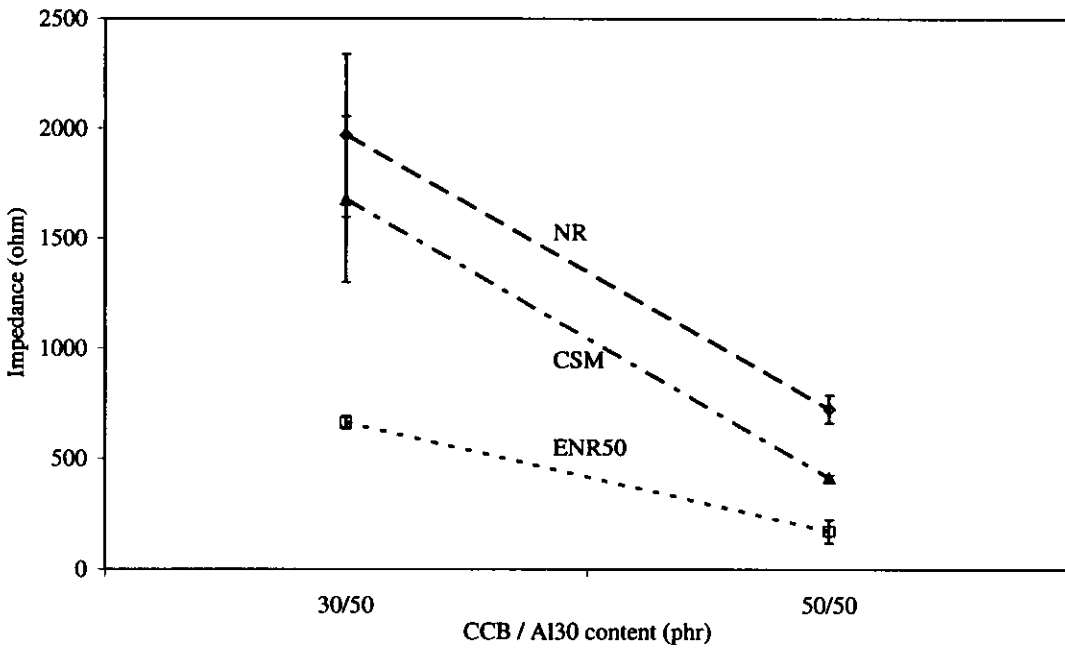
รูปที่ 4.31 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่ไม่เติมทั้งผงอลูมิเนียมและเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า



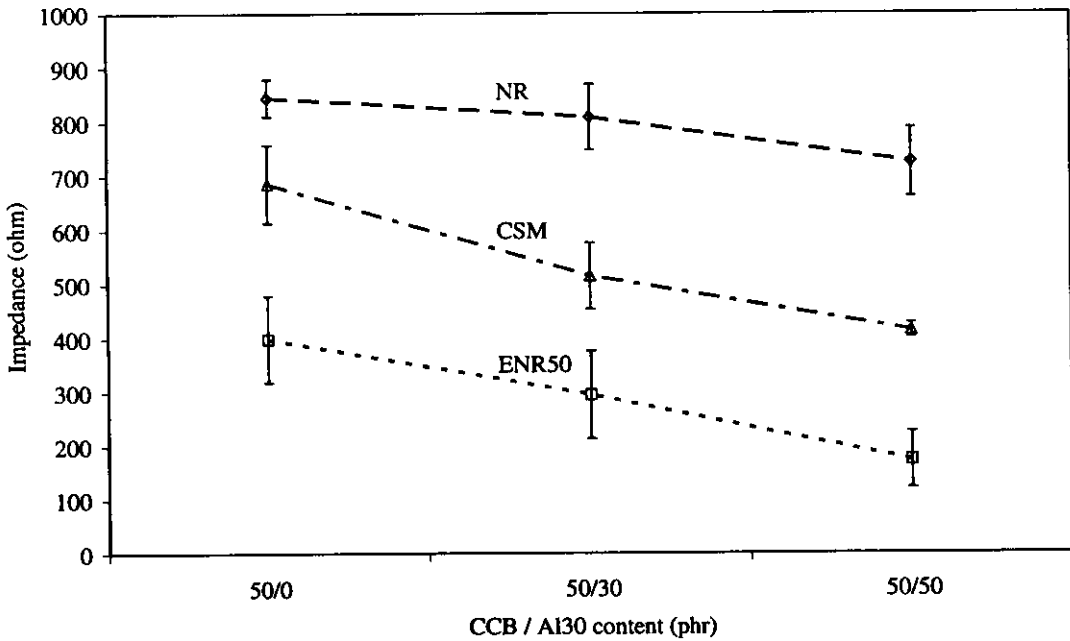
รูปที่ 4.32 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr โดยไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า



รูปที่ 4.33 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ปริมาณ 30 และ 50 phr โดยไม่เติมผงอลูมิเนียม



รูปที่ 4.34 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr และเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 และ 50 phr



รูปที่ 4.35 ค่าอิมพีแดนซ์ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ปริมาณ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

จากการทดสอบค่า SE ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสภาพนำไฟฟ้า (แสดงในภาคผนวก ค) ของยางสูตรต่างๆ มีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อค่า SE มีค่ามาก ค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ทฤษฎีของค่า SE ดังสมการที่ 2.3 – 2.7 ที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องในสมการ และได้ทำการ วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพีแดนซ์เพื่อเป็นการบอกสมบัตินำไฟฟ้าทางอ้อมของวัสดุที่ผลิต ขึ้นได้

4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง

4.4.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

ค่าความทนต่อแรงดึงของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า หรือแปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.36 ยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมเพียงผง อลูมิเนียม ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความ ทนต่อแรงดึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากผงอลูมิเนียมที่อยู่ในยางทำให้เกิดเป็นจุดตำหนิในชั้น ทดสอบ และเมื่อมีการเติมเพียงเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง และเมื่อปริมาณ

เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง ซึ่งจะแตกต่างจากยางที่เติมเขม่าดำทั่วไป จะทำให้มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารตัวเติมที่ใช้ทั้งสองชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจึงทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง

ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อเติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงชนิดเดียว ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และเมื่อเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงตามลำดับ

ยาง CSM เมื่อเติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับ และเมื่อเติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าเมื่อไม่มีการเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 50 phr ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง และลดลงมากกว่ายางที่ไม่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า แสดงว่าเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าสามารถเสริมแรงให้กับยาง CSM ได้ แต่ต้องใช้ในปริมาณ 30 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นก็จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลง

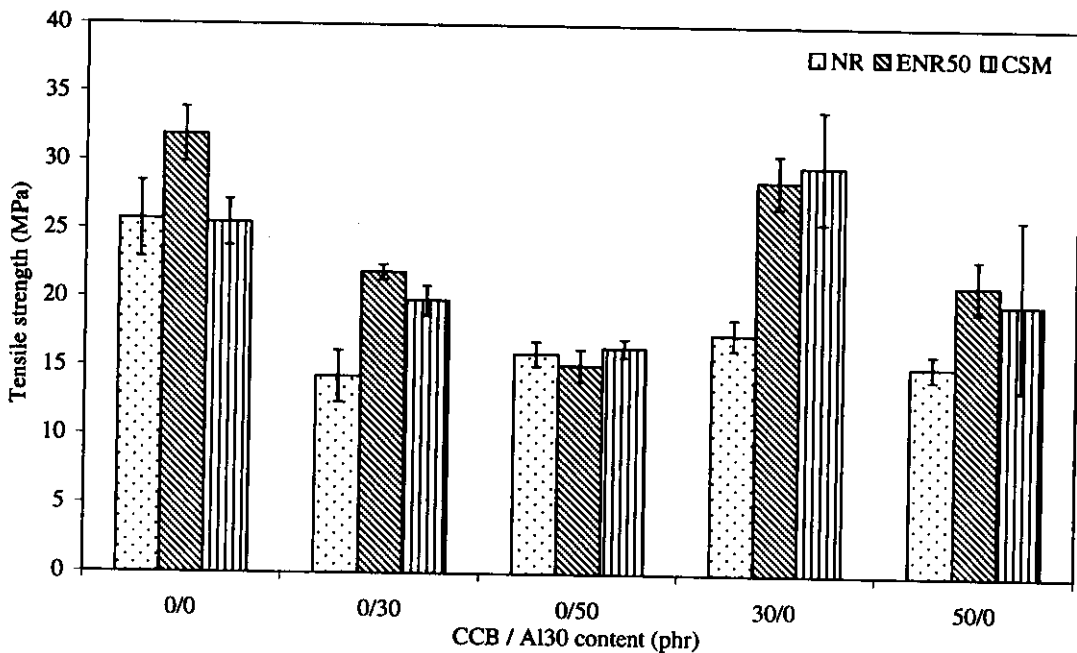
เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึงระหว่างยางทั้งสามชนิด พบว่า ยางที่ไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้า ยาง ENR50 มีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่ายางธรรมชาติและยาง CSM ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr เพียงอย่างเดียว ยาง ENR50 มีค่าสูงกว่ายาง CSM และยางธรรมชาติตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณเพิ่มเป็น 50 phr ค่าความทนต่อแรงดึงของยางทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ยางทั้งสามชนิดที่เติมเพียงเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ยาง CSM มีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ การที่ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า อาจเนื่องมาจากเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าอาจเกิดการรวมกันเองจนทำให้เกิดลักษณะของผิวจัดตัวเป็นระเบียบ ทำให้เกิดเกาะติดกับยางไม่ดีทำให้การเสริมประสิทธิภาพจึงทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงจึงลดลง (พรพรรณ, 2540)

ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามชนิดที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า หรือเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.37 ยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียม ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงจากเมื่อมีไม่มีการเติมผงอลูมิเนียม เมื่อเติมผงอลูมิเนียมในปริมาณ 30 phr มีค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr เล็กน้อย แต่เมื่อเติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และเมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงตามลำดับ

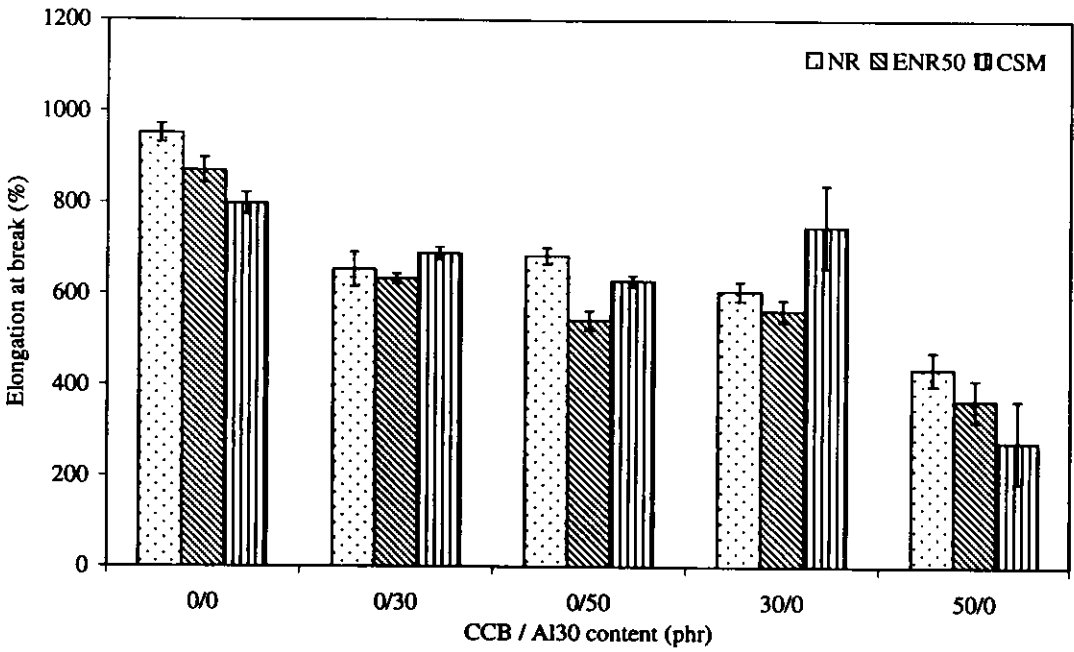
ยาง ENR50 ที่เติมเพียงผงอลูมิเนียม ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น และค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยาง ENR50 เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว มีค่าลดลง และเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงตามลำดับ

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียม ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียม และเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าอย่างเดียว ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และมีค่าลดต่ำลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เปรียบเทียบค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามชนิด ยางที่ไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิด พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าระยะยืด ณ จุดขาด สูงกว่า ยาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ และค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามที่เติมเพียงผงอลูมิเนียม ยางธรรมชาติและยาง CSM มีค่าสูงกว่ายาง ENR50 และค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามที่เติมเพียงเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr ยาง CSM มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง ENR50 ตามลำดับ ส่วนที่ปริมาณ 50 phr ยางธรรมชาติมีค่าระยะยืด ณ จุดขาด สูงกว่ายาง ENR50 และยาง CSM ตามลำดับ



รูปที่ 4.36 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr หรือแปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr



รูปที่ 4.37 ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่า ค้ำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และแปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr

ค่าความทนต่อแรงดึงของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr และเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.38 ยางธรรมชาติที่เติมทั้งผงอลูมิเนียมและเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้า จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิด เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับค่าความทนต่อแรงดึงของยางที่เติมเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน

ยาง ENR50 ที่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดร่วมกันมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงจากยาง ENR50 ที่ไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าทั้งสองชนิด พิจารณายาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน จะมีค่าความทนต่อแรงดึงแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อปริมาณของเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับ

ยาง CSM ที่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดร่วมกันมีค่าความทนต่อแรงดึงลดลงจากยาง CSM ที่ไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าทั้งสองชนิด พิจารณายาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าค้ำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าความทนต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แต่

เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับ

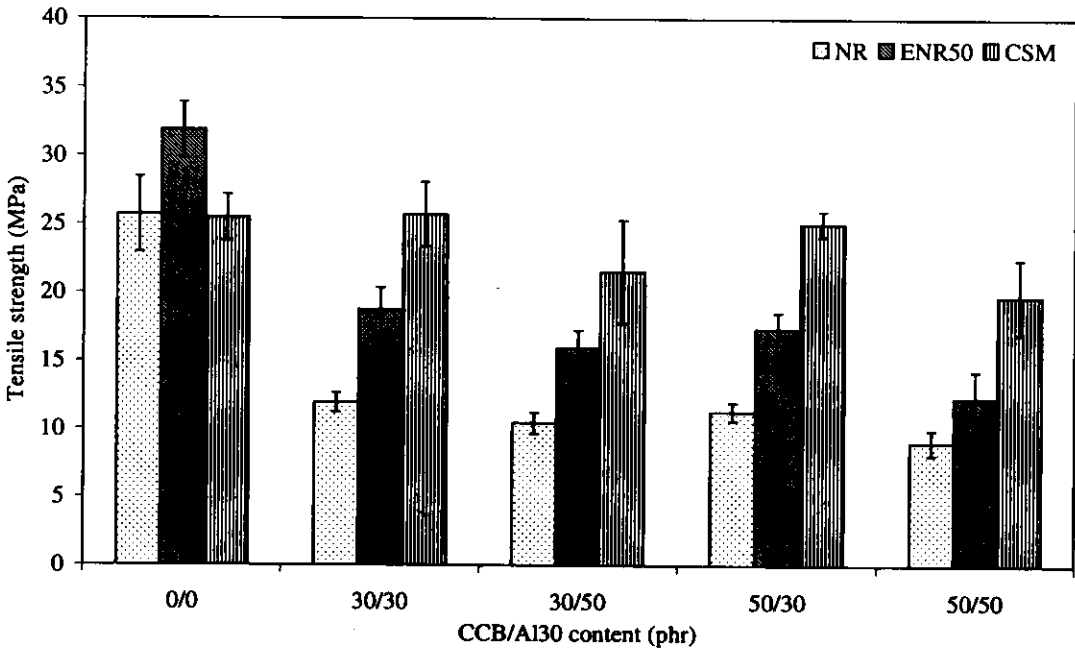
เปรียบเทียบยางทั้งสามชนิด เมื่อมีการใช้สารตัวเติมที่นำไฟฟ้าร่วมกันทั้งสองชนิด ค่าความทนต่อแรงดึงของยาง CSM มีค่าสูงกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr และเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.39 ยางธรรมชาติที่เติมทั้งผงอลูมิเนียมและเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิด พิจารณาปริมาณของผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

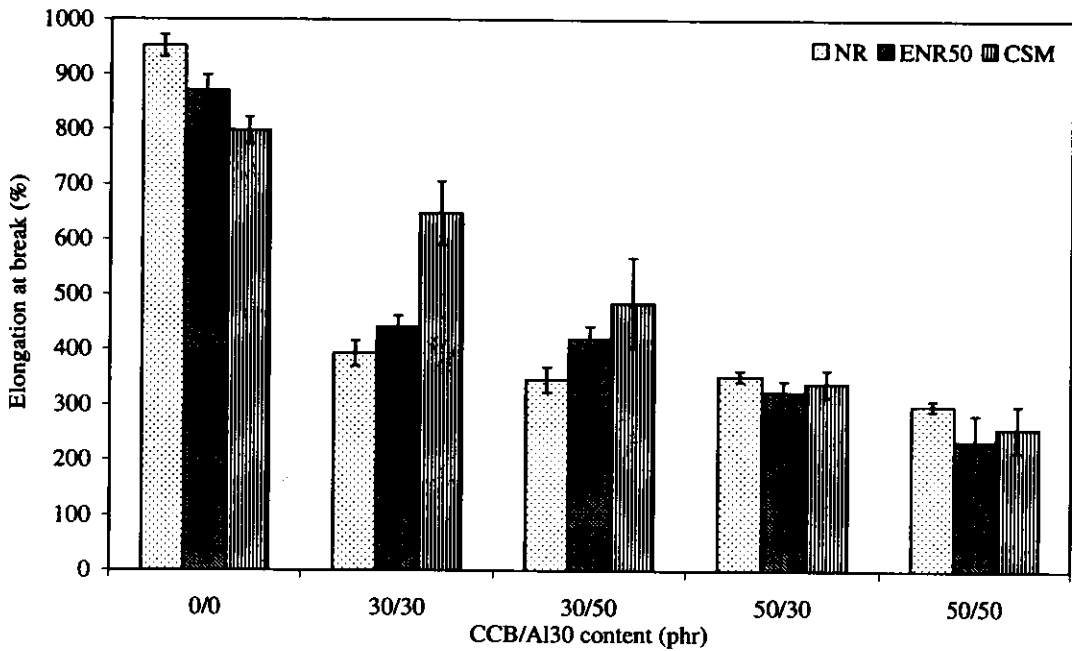
ยาง ENR50 ที่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดร่วมกันมีค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยาง ENR50 ที่ไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าทั้งสองชนิด พิจารณายาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าต่างกัน มีค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน มีค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน

ยาง CSM ที่เติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดร่วมกันมีค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงจากยาง CSM ที่ไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าทั้งสองชนิด พิจารณายาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

เปรียบเทียบค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามชนิดที่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกัน เมื่อเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน (30 และ 50 phr) ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยาง CSM มีค่าสูงกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.38 ค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำ ชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr



รูปที่ 4.39 ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำ ชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

4.4.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

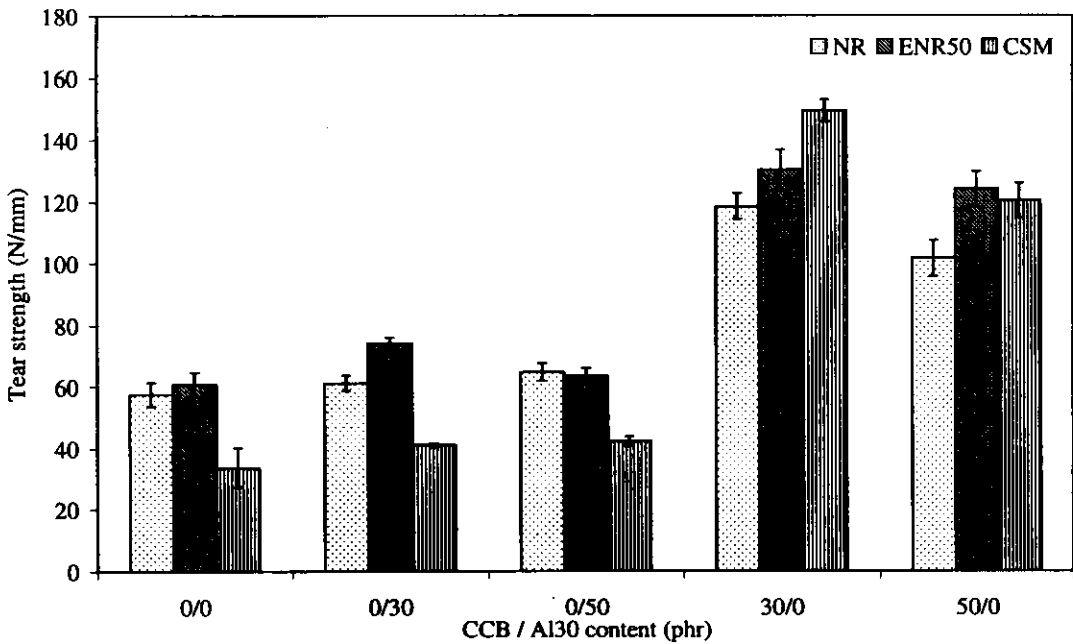
ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณของผงอลูมิเนียม หรือเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.40 ยางทั้งสามชนิดที่ไม่เติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้า พบว่า ยางธรรมชาติและยาง ENR50 มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ายาง CSM

ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียม เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากเขม่าคาร์บอนที่มีอนุภาคเล็ก ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดดีขึ้น (พรพรรณ, 2540) แต่เมื่อปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง

ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียม เมื่อเติมผงอลูมิเนียมทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าสูงขึ้น ผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr แต่เมื่อเติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น และเมื่อเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียม เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น และเมื่อเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงจากเมื่อใช้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณ 30 phr

ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางทั้งสามชนิดที่เติมเพียงผงอลูมิเนียม ในปริมาณ 30 phr ยาง ENR50 มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง CSM ตามลำดับ แต่เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr ยางธรรมชาติและยาง ENR50 มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ายาง CSM ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางทั้งสามชนิดที่เติมเพียงเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเพราะเขม่าคาร์บอนที่เติมในยางมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น (พรพรรณ, 2540) เมื่อใช้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr ยาง CSM มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ แต่เมื่อใช้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณ 50 phr ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยาง ENR50 และยาง CSM มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติ



รูปที่ 4.40 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียม 0, 30 และ 50 phr

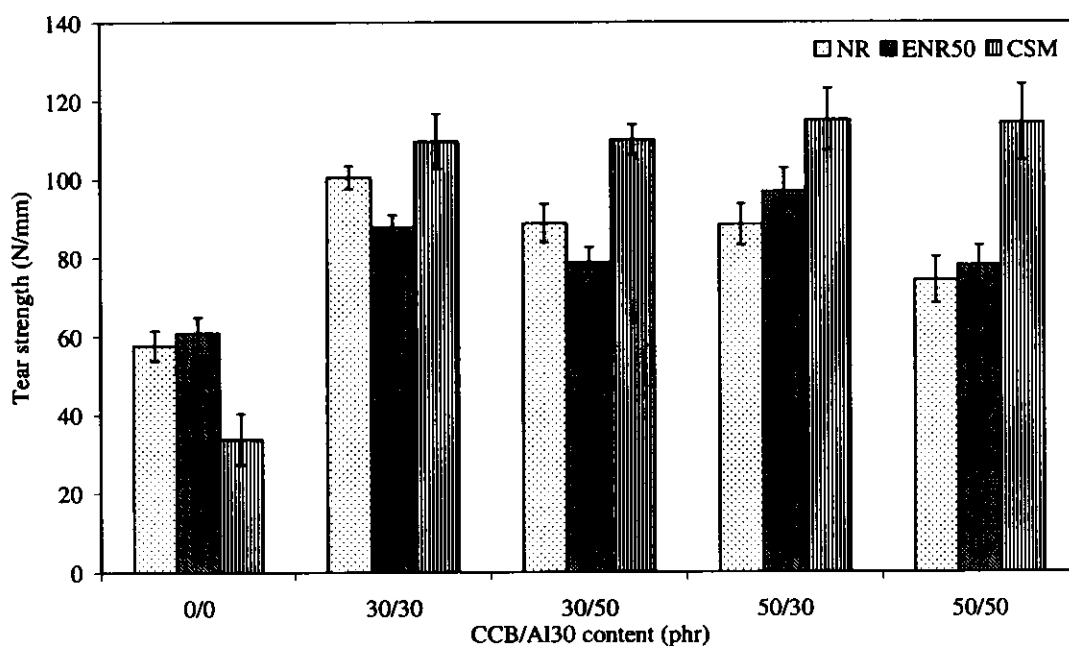
ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.41 ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน ร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง และพิจารณาเมื่อปริมาณการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง

ยาง ENR50 มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับยางธรรมชาติ คือ เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเท่ากัน ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากันแต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางทั้งสามชนิด ที่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกัน สูตรยางที่มีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 และ 50 phr ยาง CSM มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง ENR50 ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม พบว่า ยาง CSM มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

เหตุผลที่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่ม เมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียม หรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า เนื่องมาจากการทดสอบการฉีกขาดเป็นการวัดแรงที่ใช้ฉีกชั้นทดสอบที่มีรอยตำหนิ ให้เกิดผิวใหม่อย่างต่อเนื่องจนขาดออกจากกัน (ชลดดา, 2546) ดังนั้นยางที่เติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงนั้นก็อาจจะเนื่องมาจากมีการยึดกันดีตลอดแนวยาวของการฉีกขาดที่จะทำให้เกิดผิวใหม่ทำให้ด้านทานการฉีกขาดได้ดี จึงมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง



รูปที่ 4.41 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

4.4.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ค่าความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน รายงานผลเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด เปรียบเทียบระหว่างสมบัติก่อนและหลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ แสดงในตารางที่ 4.7

การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม หรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งของยางทั้งสามชนิดที่ไม่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม ยางธรรมชาติและยาง CSM มีค่าความทนต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นหลังจากบ่มเร่ง แต่ยาง ENR50 มีค่าความทนต่อแรงดึงลดลง ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังจากการบ่มเร่งของยางทั้งสามชนิดมีค่าลดลง ซึ่งยาง ENR50 มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ายาง CSM และยางธรรมชาติตามลำดับ

ยางธรรมชาติเมื่อเติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ในปริมาณ 30 phr จะมีค่าความทนต่อแรงดึงหลังจากการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น แต่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และเมื่อเติมปริมาณผงอลูมิเนียม 50 phr ทั้งค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงหลังจากการบ่มเร่ง และค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr ส่วนยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดลดลงหลังจากการบ่มเร่ง

ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด เมื่อใช้ปริมาณผงอลูมิเนียม 30 phr มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเร่ง แต่มีค่าลดลงเมื่อใช้ในปริมาณ 50 phr ส่วนยาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงหลังการบ่มเร่ง แต่ปริมาณการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงมากกว่าเมื่อใช้ในปริมาณ 50 phr

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังจากการบ่มเร่งมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลง ส่วนยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งของยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr มีค่าลดลง แต่เมื่อเติมปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr มีค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น

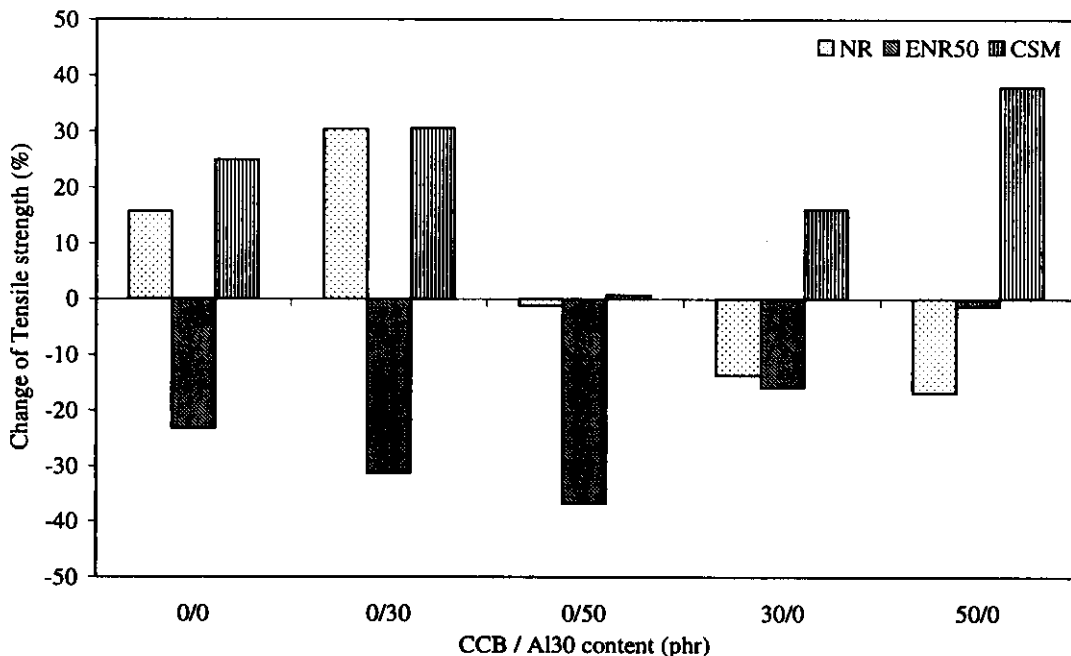
จากรูปที่ 4.42 และ 4.43 ยาง CSM มีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน เนื่องจากยาง CSM มีลักษณะการวัลคาไนซ์แบบมาร์ชิ่ง (marching) ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยง (crosslink) มากขึ้น เมื่อได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนยางธรรมชาติ และยาง ENR50 เมื่อมีการบ่มเร่งจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โพลิเมอร์ (chain scission)

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางสูตรต่างๆ หลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

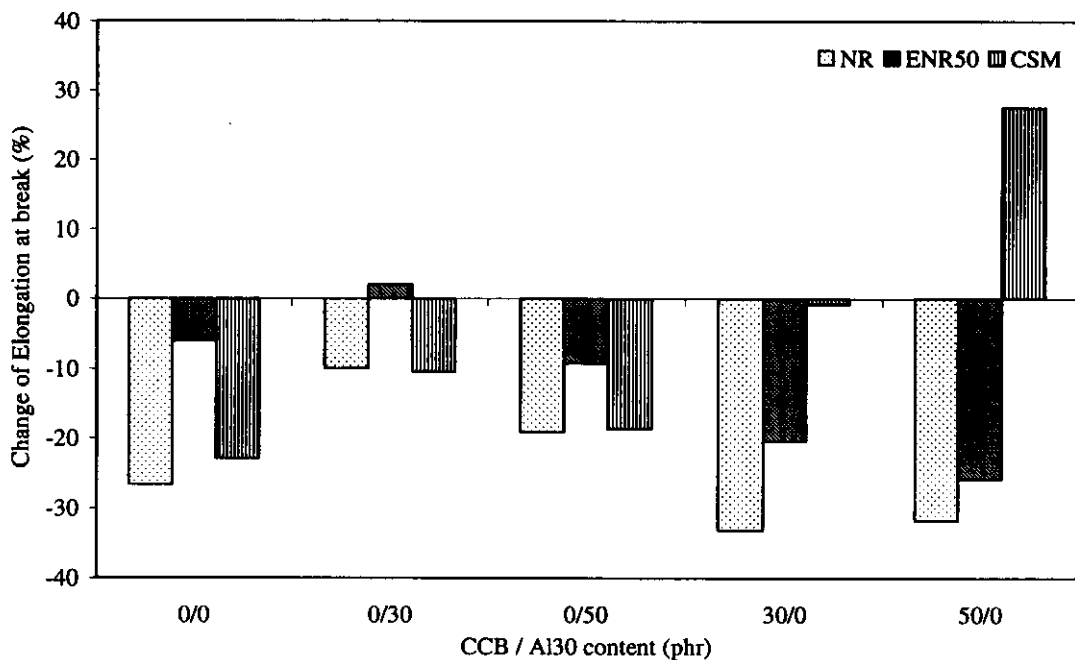
สูตร (CCB / AI30)	ชนิด ของยาง	ค่าความทนต่อแรงดึง			ค่าระยะยืด ณ จุดขาด		
		ก่อนการ บ่มเร่ง (MPa)	หลังการ บ่มเร่ง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การ เปลี่ยนแปลง	ก่อนการ บ่มเร่ง (%)	หลังการ บ่มเร่ง (%)	เปอร์เซ็นต์ การ เปลี่ยนแปลง
0/0	NR	25.70	29.73	15.68	952	699	-26.58
	ENR50	31.89	24.47	-23.27	871	818	-6.08
	CSM	25.49	31.86	24.99	798	615	-22.93
0/30	NR	14.29	18.64	30.44	653	588	-9.95
	ENR50	21.91	15.05	-31.31	633	646	2.05
	CSM	19.83	25.91	30.66	689	617	-10.45
0/50	NR	16.01	15.81	-1.25	683	552	-19.18
	ENR50	15.16	9.59	-36.74	542	492	-9.23
	CSM	16.46	16.58	0.73	628	511	-18.63
30/0	NR	17.46	15.07	-13.69	606	405	-33.17
	ENR50	28.64	24.10	-15.85	563	448	-20.43
	CSM	29.74	34.50	16.01	748	742	-0.80
50/0	NR	15.19	12.63	-16.85	437	298	-31.81
	ENR50	21.17	20.88	-1.37	367	272	-25.89
	CSM	19.79	27.30	37.95	276	352	27.54

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

สูตร (CCB / AI30)	ชนิด ของยาง	ค่าความทนต่อแรงดึง			ค่าระยะยืด ณ จุดขาด		
		ก่อนการ บ่มเร่ง (MPa)	หลังการ บ่มเร่ง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การ เปลี่ยนแปลง	ก่อนการ บ่มเร่ง (%)	หลังการ บ่มเร่ง (%)	เปอร์เซ็นต์ การ เปลี่ยนแปลง
30/30	NR	11.93	7.84	-34.28	393	214	-45.55
	ENR50	18.74	13.63	-27.27	441	312	-29.25
	CSM	25.71	25.05	-2.57	648	545	-15.90
30/50	NR	10.44	6.68	-36.02	345	169	-51.01
	ENR50	15.97	10.07	-36.94	419	245	-41.53
	CSM	21.55	23.72	10.07	485	455	-6.19
50/30	NR	11.28	6.73	-40.34	352	157	-55.40
	ENR50	17.38	15.80	-9.09	324	192	-40.74
	CSM	25.07	22.58	-9.93	339	294	-13.27
50/50	NR	9.05	6.31	-30.28	300	135	-55.00
	ENR50	12.33	10.57	-14.27	236	130	-44.92
	CSM	19.73	27.52	39.48	258	288	11.63



รูปที่ 4.42 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr



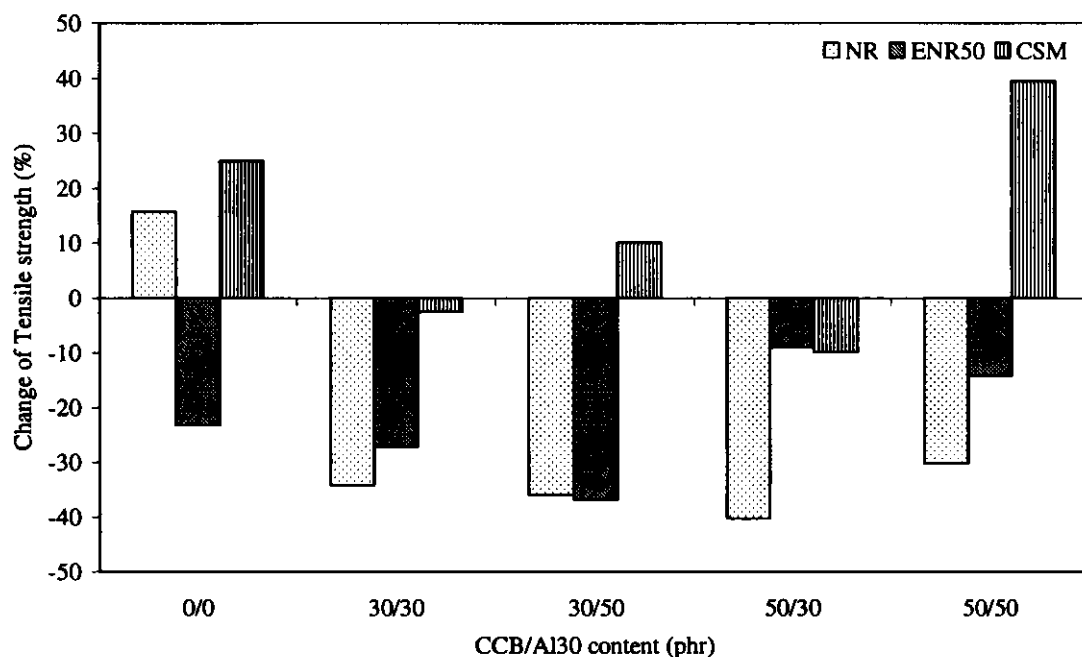
รูปที่ 4.43 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

การเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr แสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ในกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 30 phr มีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 50 phr และเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังจากการบ่มเร่งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พิจารณายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 และ 50 phr มีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งใกล้เคียงกัน แต่เมื่อใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 และ 50 phr มีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

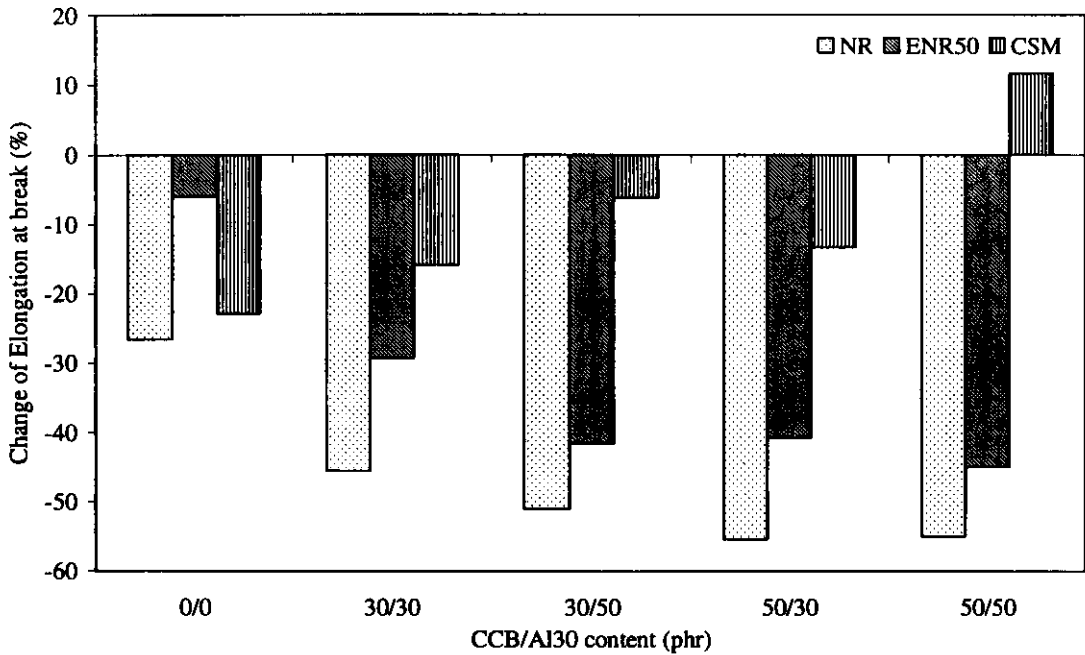
ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ในกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 30 phr มีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 50 phr ก็ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังจากการบ่มเร่งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พิจารณายาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดหลังจากการบ่มเร่งลดลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ในกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 30 phr มีค่าการเปลี่ยนแปลงความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลงเมื่อปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เติมผงอลูมิเนียม 50 phr ค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr มีค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังการบ่มเร่งมากกว่ากรณีที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 30 phr แต่กรณีที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr ค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง พิจารณายาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากัน แต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน ยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr หรือ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 phr มีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งลดลง แต่เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr ทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนระยะยืด ณ จุดขาดหลังจากการบ่มเร่งมีค่าลดลง ยกเว้นในสูตรยาง CSM ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr จะมีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.44 และ 4.45 หลังจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนบางสูตรของยาง CSM มีความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น ส่วนยางธรรมชาติและยาง ENR50 มีสมบัติทั้งสองลดลง เนื่องจากความร้อนไปทำลายสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้สมบัติทั้งสองมีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง



รูปที่ 4.44 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr



รูปที่ 4.45 ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr

4.4.4 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด แสดงถึงความสามารถของยางในการคืนรูปร่างและขนาดหลังจากมีแรงมากระทำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปในระยะเวลาหนึ่ง (พรพรรณ, 2540) และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดนี้ เป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับยางที่จะนำไปใช้งานที่ต้องรับแรงอัดเป็นเวลานาน เช่น ปะเก็น เป็นต้น และค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ดีต้องมีค่าต่ำ นั่นคือ ยางสามารถคืนตัวได้ดีเมื่อนำแรงที่มากระทำออกไป

การวัดค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ได้ทำการทดสอบที่สองอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ยางทุกสูตรที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่า อุณหภูมิสูงทำให้ยางที่ได้รับแรงเป็นระยะเวลาหนึ่งสามารถคืนรูปได้น้อยเมื่อนำแรงที่กระทำออกไป

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิดที่แปรปริมาณผงอลูมิเนียม หรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ

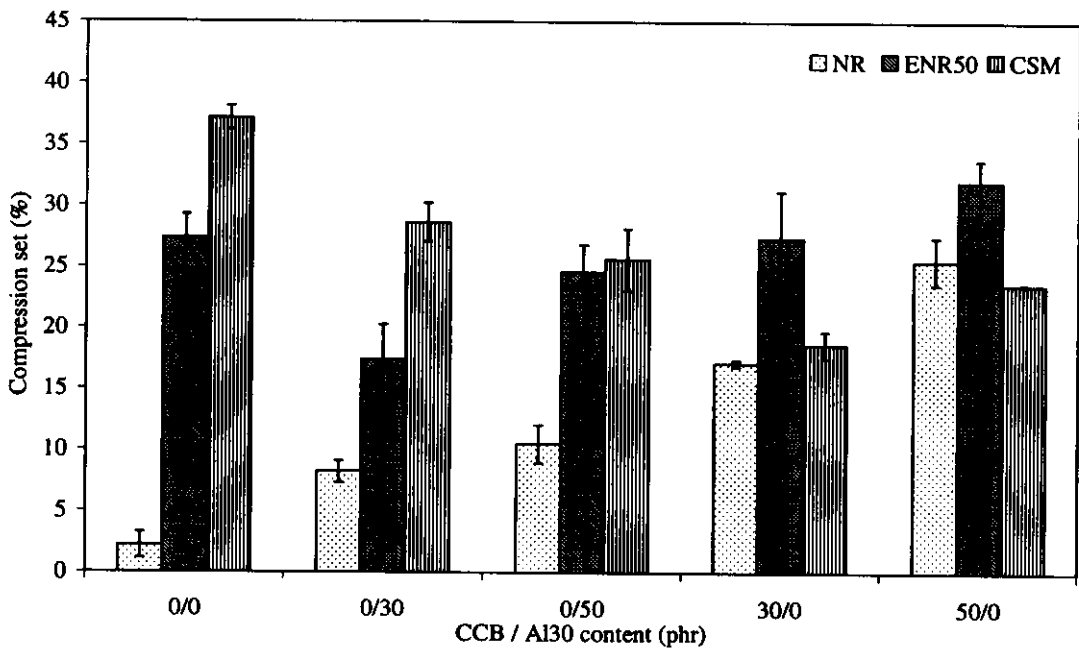
ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิดที่ไม่เติมทั้งเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และผงอลูมิเนียม ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติจะให้ค่าการยุบตัว เนื่องจากแรงอัดน้อยกว่ายาง ENR50 และยาง CSM แสดงว่า ยางธรรมชาติสามารถคืนรูปได้ดีกว่า ยาง ENR50 และยาง CSM เมื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไประยะหนึ่ง

ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิห้องมีค่าการยุบตัว เนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่าเมื่อเติมผงอลูมิเนียม ปริมาณ 30 phr แต่จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเติมในปริมาณ 50 phr แสดงว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr ทำให้สมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดีขึ้น คือ ยางสามารถคืนรูปได้ดีเมื่อนำแรงกระทำออก และเมื่อยางธรรมชาติเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวทั้ง ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

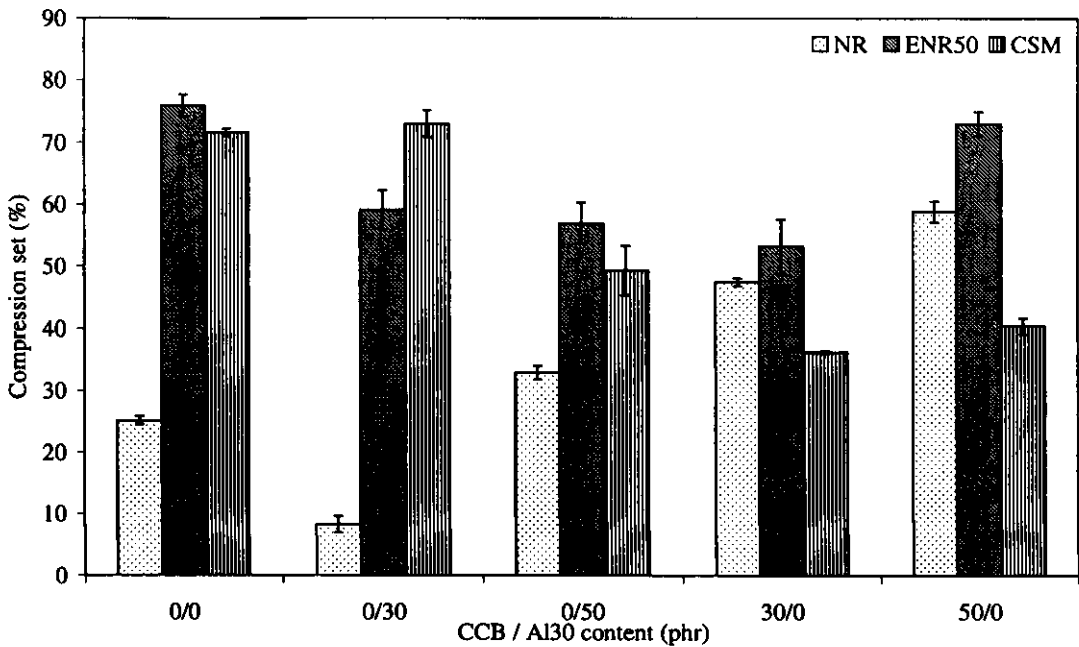
ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลงกว่าเมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า แต่ที่ อุณหภูมิห้องเมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำกว่าเมื่อใช้ใน ปริมาณ 50 phr ส่วนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น และเมื่อยาง ENR50 ที่เติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่าง เดียวที่อุณหภูมิห้องมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำ ไฟฟ้า เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ปริมาณ 30 phr มีค่าต่ำกว่าเมื่อไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า แต่เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ปริมาณ 50 phr จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ใกล้เคียงกันกับเมื่อไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้า

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr จะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมี ค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับยาง CSM ที่ไม่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิเดียวกัน และ เมื่อยาง CSM ที่เติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดลดลง แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 30 phr มี ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำกว่าเมื่อใช้ในปริมาณ 50 phr แสดงว่ายาง CSM เมื่อเติมด้วยเขม่าดำ ชนิดนำไฟฟ้าเพียง 30 phr สามารถปรับปรุงสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดให้ดีขึ้น

เปรียบเทียบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิด ยางที่เติมผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว ยาง CSM มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ แสดงว่ายางธรรมชาติสามารถคืนรูปได้ดีกว่ายาง CSM และยาง ENR50 ส่วนยางที่เติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว พบว่า ยาง ENR50 มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง CSM ตามลำดับ



รูปที่ 4.46 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr หรือผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.47 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM ที่แปรปริมาณ เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr หรือผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิด ที่แปรปริมาณเขม่าดำชนิดนำ ไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.48 และ 4.49 ยางธรรมชาติที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณ เท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าต่างกัน ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศา เซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยาง ธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณ ของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่า ยางธรรมชาติเมื่อเติม สารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกันทำให้สมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดไม่ดี คือ ยางสามารถ คืนรูปได้น้อยเมื่อเอาแรงกระทำออก

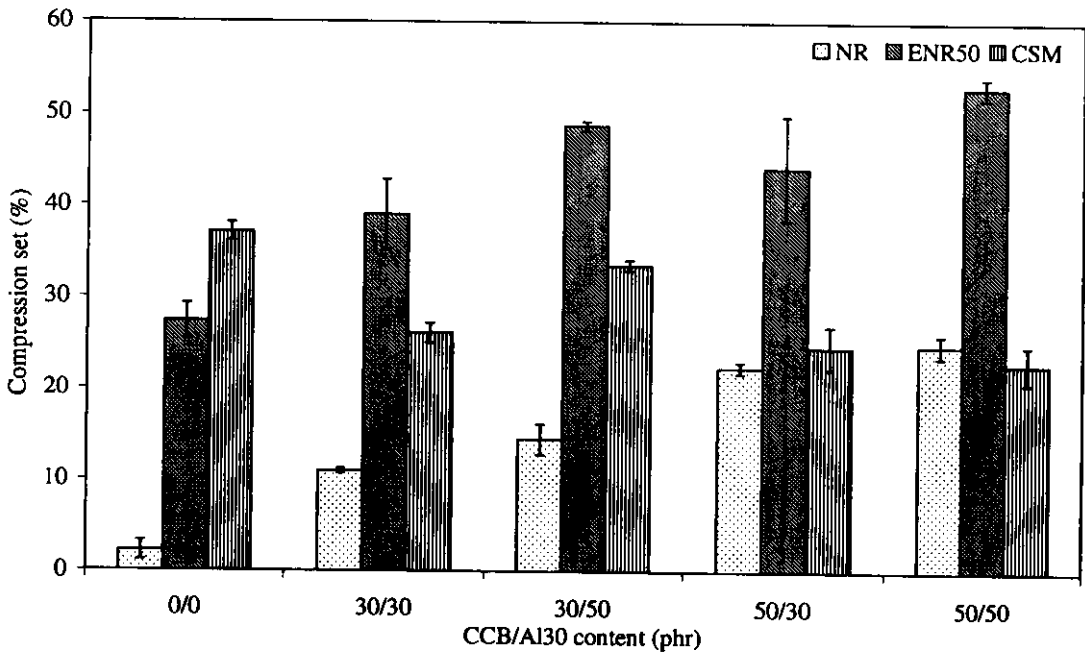
ยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ต่างกัน ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อ ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิด นำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน พบว่า ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

ยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมปริมาณเท่ากัน แต่ปริมาณของเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อปริมาณเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีค่าลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าเท่ากันแต่ปริมาณของผงอลูมิเนียมต่างกัน พบว่า ทั้งที่อุณหภูมิและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ของยาง CSM ที่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้า 30 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 และ 50 phr จะให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณของเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้า 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 และ 50 phr จะให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่มีค่าใกล้เคียงกัน

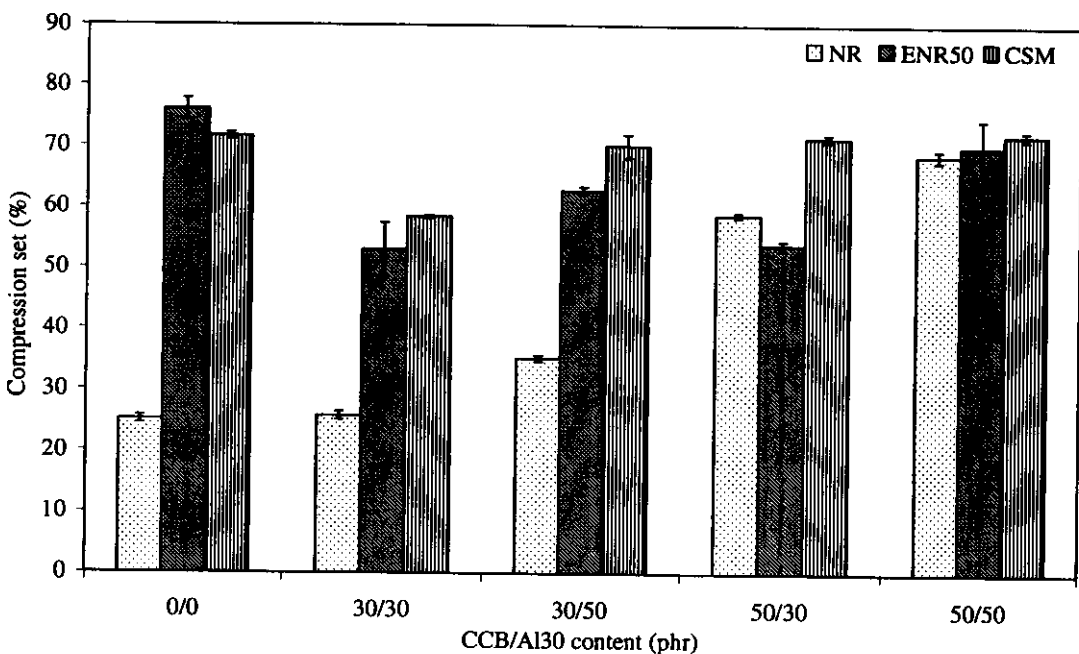
เปรียบเทียบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ของยางทั้งสามชนิดที่เติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกัน สูตรยางที่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้า 30 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 และ 50 phr ที่อุณหภูมิห้อง ยาง ENR50 มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่า ยาง CSM และยางธรรมชาติตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ยาง CSM มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่า ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ ส่วนสูตรยางที่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 และ 50 phr ที่อุณหภูมิห้อง ยาง ENR50 มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่ายาง CSM และยางธรรมชาติซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ยางที่เติมเขม่าคาร์บอนดำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 30 phr ยาง CSM มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงกว่ายางธรรมชาติและยาง ENR50 ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียม 50 phr ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

ยางที่มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดน้อย แสดงว่า ยางสามารถคืนรูปได้ดีเมื่อมีการนำเอาแรงที่กระทำออก ส่วนยางที่มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมาก อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงทำให้พันธะเชื่อมโยงถูกทำลายมาก จึงสามารถคืนตัวได้น้อย

จากการทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดยางธรรมชาติ ที่เติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้า จะให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูง แสดงว่าสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดไม่ดี ดังนั้นการใช้งานจึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องรับแรงกดเป็นเวลานานๆ



รูปที่ 4.48 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และยาง CSM ที่แปรปริมาณ เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ที่ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.49 ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และยาง CSM ที่แปรปริมาณ เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 0, 30 และ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 0, 30 และ 50 phr ที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

4.4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

ค่าความแข็งของยางสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.8 ยางทั้งสามชนิดเมื่อมีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียม จะทำให้ค่าความแข็งของยางมีค่าเพิ่มขึ้นและความแข็งของยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีความแข็งมากกว่าเมื่อเติมด้วยผงอลูมิเนียม ในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อเติมทั้งเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม จะให้ค่าความแข็งสูงกว่าในกรณีที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งของยางทั้งสามชนิดที่สูตรยางเดียวกัน พบว่า ยาง CSM มีค่าความแข็งมากกว่า ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งของยางสูตรต่างๆ มีหน่วยเป็น shore A

ปริมาณของ CCB/AI30	ค่าความแข็ง (shore A)		
	NR	ENR50	CSM
0/0	38	45	45
0/30	50	63	61
0/50	63	66	68
30/0	56	71	80
50/0	68	80	94
30/30	67	78	87
30/50	73	80	91
50/30	77	88	96
50/50	81	89	97

4.4.6 ผลการทดสอบค่าความดัดงอเฉพาะ

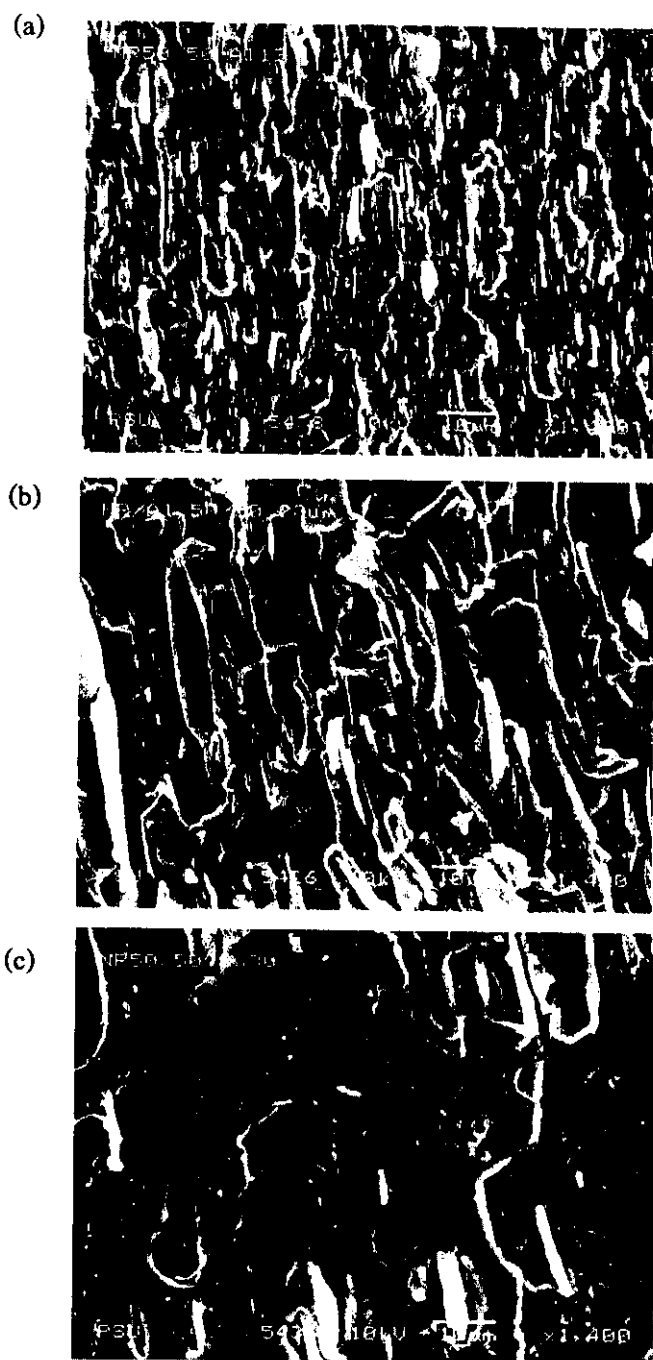
ค่าความดัดงอเฉพาะของยางสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9 ยางทั้งสามชนิดเมื่อมีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียม จะทำให้ค่าความดัดงอเฉพาะของยางมีค่าเพิ่มขึ้น และความดัดงอเฉพาะของยางที่เติมผงอลูมิเนียมมีความดัดงอเฉพาะมากกว่า เมื่อเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และเมื่อเติมทั้งเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและผงอลูมิเนียม จะให้ค่าความดัดงอเฉพาะสูงกว่า กรณีที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของยางทั้งสามชนิดที่สูตรยางเดียวกัน พบว่า ยาง CSM มีค่าความดัดงอเฉพาะมากกว่า ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ค่าความถ่วงจำเพาะของยางสูตรต่างๆ

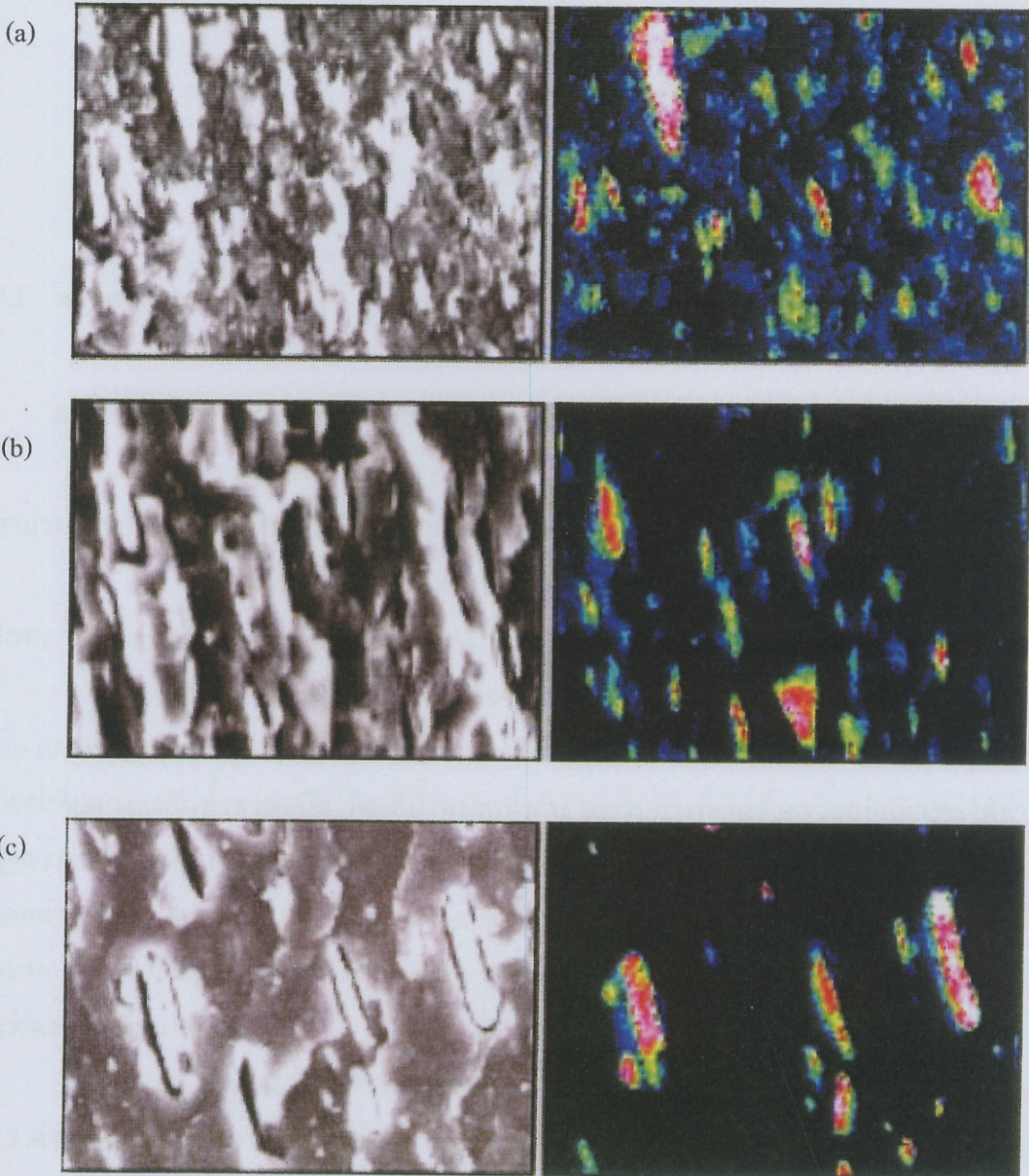
ปริมาณของ CCB/AI30	ค่าความถ่วงจำเพาะ		
	NR	ENR50	CSM
0/0	0.9598	1.0512	1.1930
0/30	1.1267	1.1680	1.3323
0/50	1.1814	1.2105	1.4211
30/0	1.0417	1.1178	1.2716
50/0	1.1012	1.1787	1.3022
30/30	1.1401	1.2413	1.3545
30/50	1.2276	1.2921	1.4225
50/30	1.2036	1.2482	1.3741
50/50	1.2555	1.3270	1.4407

4.5 ผลการตรวจสอบการกระจายของผงโลหะในยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และภาพ x-ray mapping image ของอลูมิเนียมและดีบุกที่เติมในยางธรรมชาติที่มีเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า 50 phr และผงโลหะทั้งสามชนิด (Al13, AI30 และ Sn30) ปริมาณ 50 phr โดยใช้กำลังขยายเท่ากัน คือ 1,400 เท่า แสดงในรูปที่ 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ ผงโลหะทั้งสามชนิด สามารถกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ และจากภาพ x-ray mapping image สามารถสังเกตรูปร่างของผงโลหะทั้งผงอลูมิเนียมและดีบุกได้ว่ามีรูปร่างเป็นแท่ง ซึ่งลักษณะของผงโลหะลักษณะแบบนี้เหมาะสำหรับงานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยางธรรมชาติที่เดิมเขม่าดำ ชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และผงโลหะปริมาณ 50 phr (a) อลูมิเนียมขนาด 13 μm (b) อลูมิเนียม ขนาด 30 μm และ (c) คีบูกขนาด 30 μm



รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดง secondary electron image และ x-ray mapping image ของยางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และผงโลหะปริมาณ 50 phr (a) อลูมิเนียมขนาด 13 μm (b) อลูมิเนียม ขนาด 30 μm และ (c) คีบูกขนาด 30 μm