

การใช้ยาง STR 5L ผสมผงเฟอร์ไรต์ป้องกันรังสีแกมมา Ferrite-STR 5L Rubber Composites as Gamma Radiation Shields

กัลยาณี คุปตานนท์ (Kalayanee Kooptarnond)^{1*}

เล็ก สีคง (Lek Sikong)¹

ไตรภพ ผ่องสุวรรณ (Tripob Bhongsuwan)²

สมพงษ์ นนทพันธุ์ (Sompong nontapan)³

บทคัดย่อ

การศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติ STR 5L ผสมกับผงเฟอร์ไรต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานและผงเขม่าดำในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจาก ^{241}Am (พลังงาน 59.8 keV) โดยแปรค่าความหนาของแผ่นยาง 1–5 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแปรตามปริมาณของผงเฟอร์ไรต์ที่ผสม และความหนาของแผ่นยางที่เพิ่มขึ้น ยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำ 20 phr และผงเฟอร์ไรต์ 100 phr มีค่า Attenuation coefficient 2.31 ซม.⁻¹ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงสมบัติความทนทานต่อแรงดึง ความแข็ง และความหนาแน่นของยางผสมนี้ด้วย

Abstract

STR 5L natural rubber mixed with various amounts of waste ferrite and carbon black (CB) powder were investigated for shielding efficiency with varying thickness of 1–5 mm. The composites were studied for gamma ray shielding by using ^{241}Am ($E = 59.8 \text{ keV}$) as a gamma radiation source. It was found that the shielding efficiency increased with increasing amount of ferrite and specimen thickness. The attenuation coefficient is 2.31 cm⁻¹ for 100 phr of ferrite and 20 phr of carbon black in the rubber composite. Tensile strength, hardness and density of these composites were also investigated.

คำสำคัญ: ยางกันรังสี, รังสีแกมมา, เฟอร์ไรต์, อเมริเซียม

Keywords: Gamma rays shielded rubber, waste ferrite, radiation shielding materials, Americium

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

³อาจารย์ วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ หาดใหญ่ 90110

*corresponding author ,e-mail : kalayanee.k@psu.ac.th

บทนำ

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสี ปัจจุบันนี้ถึงแม้ว่ารังสีแกมมาจะไม่เป็นที่รู้จักและใช้งานอย่างแพร่หลายเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ หรือรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากการใช้ประโยชน์ของรังสีแกมมา ไม่ค่อยได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวัน ส่วนใหญ่มักจะใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมอื่น ๆ จึงไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก รังสีแกมมานับเป็นรังสีที่มีพลังงานสูงกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น พลังงานจากรังสีมีคุณอนันต์และมีโทษมหันต์ต่อร่างกายเช่นกัน ปัจจุบันได้มีการนำรังสีแกมมา มาใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้ทำลายเซลล์มะเร็ง ทางทางการแพทย์ เทคโนโลยีพันธุกรรมด้านการเกษตร การถนอมอาหาร การยืดอายุการเก็บอาหารลดการปนเปื้อนของเชื้อโรค โดยไม่จำเป็นที่จะต้องทำให้สุก เป็นต้น เพื่อความปลอดภัยจากการใช้รังสี จึงมีการศึกษาวิจัยคิดค้นหาวัสดุกำบังรังสีมาป้องกันรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีต่าง ๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อรังสีเคลื่อนผ่าน วัสดุกำบังจะดูดกลืนรังสี ทำให้ความเข้มของรังสีลดลง ชนิดของวัสดุที่กำบังรังสีขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีหรือแหล่งกำเนิดของรังสี ได้มีผู้ทดลองใช้สารประกอบอนินทรีย์ของตะกั่วผสมเข้าไปในเนื้อยางหรือพอลิเมอร์ เพื่อป้องกันรังสี จากแหล่งกำเนิดของรังสีต่าง ๆ กัน เช่น การใช้ Styrene-butadiene rubber ผสมกับ lead oxide จำพวก PbO , PbO_2 , Pb_3O_4 (Abdel-Aziz., 1997) การใช้ยาง NR+SBR ผสมกับผงแร่กาลีน่า (Gwaily et al. 2002) การใช้ยางธรรมชาติผสมกับผงตะกั่ว (Gwaily et al. 2002) การใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล ผสมกับ Lead oxide (Hussain., 1997) แร่กาลีน่าผสมกับยาง STR 5L ป้องกันรังสีเอ็กซ์ (Kooptamond., 2004) ยาง ผสมกับเศษกระดาษหนังสือพิมพ์ (Madani., 2004) เป็นต้น วัสดุผสมที่มีมวลอะตอมสูงเช่น ตะกั่ว หรือสารประกอบของตะกั่วมีความสามารถดูดซับรังสีได้ดี จึงมีการใช้วัสดุเหล่านี้ในการป้องกันรังสีมาอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพการป้องกันรังสี เพิ่มตามสัดส่วนของ ตะกั่ว หรือ สารประกอบของตะกั่ว อย่างไรก็ตามผงตะกั่วหรือ

สารประกอบของตะกั่วจัดเป็นสารที่ต้องห้าม เพราะในกระบวนการผลิตอาจจะปล่อยของเสียที่เป็นอันตรายออกมา ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะทดลองนำผงเฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมวลอะตอมสูง และเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ และช่วยลดกากของเสีย โดยนำมาผสมกับยางธรรมชาติซึ่งผลิตได้เองในภาคใต้ของประเทศ มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้เป็นวัสดุกันรังสีที่มีความยืดหยุ่นของรูปลักษณะได้ เพื่อเป็นโอกาสทางเลือกของการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์จากสารตะกั่ว เพื่อลดปริมาณการใช้ตะกั่ว และเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติอีกทางหนึ่ง สร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางปัญญาของประเทศ

วิธีการวิจัย

วัสดุ และสารเคมี

- ยางแท่ง STR 5L เป็นวัตถุดิบจาก บริษัท ฉลองอุตสาหกรรม จำกัด อำเภอนะจะ จังหวัดสงขลา
- ผงเขม่าดำที่ใช้ชนิดนำไฟฟ้าเกรด Vulcan® XC72R บริษัท อีสต์เอเชียติก (ประเทศไทย) จำกัด
- เฟอร์ไรต์ เป็นของเสียที่มีค่าหืนและจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ของบริษัท JFE ferrite Co., Ltd. ซึ่งประกอบด้วย Fe_2O_3 70%, MnO_2 20% และ ZnO 10%
- สารเคมีเกรดอุตสาหกรรม ได้แก่ Zinc oxide, Stearic acid, Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS), Tetramethylthiuram disulfide (TMTD) และ กำมะถัน

- สารกัมมันตรังสี ^{241}Am (59.8 keV)

การเตรียมชิ้นยางตัวอย่าง

นำชิ้นส่วน เฟอร์ไรต์ มาบดหยาบด้วย Jaw crusher และ Roll crusher ได้ขนาด 600 ไมครอน บดละเอียดด้วย Jet mill ได้ขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอน และบดต่อด้วย Jar mill เป็นเวลา 5 ชม. จนกระทั่งได้ขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน เตรียมตัวอย่างยาง ผสมผงเฟอร์ไรต์ (40-100 phr) และเขม่าดำ (5-20

phr) โดยใช้เครื่อง Two rolls mill เพื่อการนวดผสมยางแท่ง STR 5L ตามสูตรผสม ดังตารางที่ 1

ทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time, t_{90}) ของยางผสม และหาค่าเวลาในการสุกตัวของยาง โดยใช้เครื่อง MDR 2000 ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกที่ความดัน 2500 psi เตรียมชิ้นงาน อบที่อุณหภูมิ 150 °C ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D-412 (Die C) ใช้เครื่อง LLOYD รุ่น LR10K ทดสอบค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 วัดเป็นหน่วย Shore A ทดสอบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของผงเฟอร์ไรต์ในเนื้อยาง ด้วยการชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบชิ้นงานที่ตัดเป็นขนาดเท่ากัน ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้เทคนิค x-ray mapping

หมายเหตุ: การเตรียมยางและการทดสอบมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ในทุกเงื่อนไขของการทดลอง

การทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา

เครื่องมือ (รูปที่ 1) และอุปกรณ์ประกอบไปด้วยเครื่องวัดรังสีชนิด Geiger Muller ยี่ห้อ SPECTECH รุ่น ST-350 Counter USA, ชั้นวางสารกัมมันตรังสี, สารกัมมันตรังสี ^{241}Am , แท่งตะกั่วขนาด 30 x 30 x 7 มม. มีรูขนาด 8 มม. สำหรับบังคับลำรังสี การจัดวางชิ้นงานเป็นดังรูปที่ 2

วิธีทำ

- กำหนด Operating voltage 825 V และตั้งเวลาการวัดรังสี 10 นาที วัด Background radiation
- วัดรังสีที่เกิดจาก สารรังสี ^{241}Am พลังงาน 59.8 keV โดยวัดซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย (I_0)
- นำแผ่นยางที่เตรียมไว้ให้ได้ขนาด 5 ซม. x 5 ซม. ที่ความหนาตามแต่ละกรณี วางลงไประหว่างสารรังสี- แท่งตะกั่วบังคับลำรังสี กับหัววัด ดังแสดงในรูปที่ 2 วัดรังสีที่เกิดจาก สารรังสีเมื่อมีแผ่นยางกั้นโดยวัดซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย (I)
- ค่า (I_0) และ (I) จะต้องลบ ด้วยค่า Background radiation จึงจะเป็นค่าสุทธิ และใช้ค่าเฉลี่ย ต่อเวลา 1 นาที

ผลและการวิเคราะห์ผล

การลดทอนรังสีแกมมา

รังสีแกมมา สามารถถูกลดทอนลงได้ โดยผ่านตัวกลาง (Absorber) ซึ่งดูดซับรังสีแกมมาไว้ การลดทอนของรังสีแกมมาขึ้นกับชนิดและ ความหนาของตัวกลาง โดยการลดทอนรังสี เป็นดังสมการ (Chilton, 1984)

$$I / I_0 = \exp (-\textcircled{R}x) \quad (1)$$

โดยที่ I / I_0 = Intensity of transmitted beam /
Intensity of incident beam

$\textcircled{R}$ = Attenuation coefficient ของ
Absorber (mm^{-1})

x = Absorber thickness (mm)

ที่ความหนาของ Absorber ที่ทำให้พลังงานของรังสี ลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL)

$$I / I_0 = 0.5 = \exp (-\textcircled{R}x_{1/2}) \quad (2)$$

$$\textcircled{R} = \ln 2 / x_{1/2} \quad (3)$$

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนาของตัวกลาง การลดทอนรังสีแกมมาจากสารรังสี ^{241}Am โดยใช้แผ่นยางที่มีความหนา 1 - 5 มม. เปรียบเทียบกับแผ่นเหล็ก และแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนา อยู่ในช่วงเดียวกัน เห็นได้ชัดเจนว่ายางผสมผงเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีดีกว่ายาง STR 5L ธรรมชาติและแผ่นอะลูมิเนียม ตลอดช่วงของความหนาของตัวกลางที่ศึกษา เนื่องจากผงเฟอร์ไรต์ซึ่งประกอบด้วยธาตุโลหะหนัก เช่น เหล็ก (น้ำหนักอะตอม 55.85) แมงกานีส (น้ำหนักอะตอม 54.94) มีมวลอะตอมที่สูง จึงมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง เป็นเหตุให้มีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพการกั้นรังสี ของยาง STR 5L ให้สูงขึ้น เปรียบเทียบกับ แผ่นอะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุโลหะเบา (น้ำหนัก

อะตอม 26.98) จึงมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำกว่ามาก อย่างไรก็ตาม เนื้อยางผสมผงเฟอร์ไรต์ยังคงมีความหนาแน่นธาตุโลหะหนักต่ำกว่าเนื้อของแผ่นเหล็กล้วนๆ อีกมาก จึงเห็นได้ว่ายางผสมผงเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีต่ำกว่าการใช้แผ่นเหล็กอีกประมาณ 50% หรือเท่าตัว โดยที่ ยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำสูงสุด 20 phr และผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr ความหนา 3-5 มม. สามารถลดทอนรังสีแกมมาจาก ^{241}Am ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่า HVL 3 มม. มีค่า Attenuation coefficient 2.31 ซม.^{-1} ในขณะที่แผ่นเหล็ก มีค่า HVL 0.82 มม. มีค่า Attenuation coefficient 8.45 ซม.^{-1} ตามลำดับ

ค่าความหนาของยาง 4-5 มม. มีผลให้ประสิทธิภาพการลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นเพียง ประมาณ 1-3 % เท่านั้น ส่วนปริมาณเขม่าดำ 5-20 phr ไม่มีผลต่อการช่วยลดทอนรังสีในกรณีนี้ (รูปที่ 3-7) เนื่องจากเขม่าดำประกอบด้วยธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุเบาที่มีมวลอะตอมต่ำ (น้ำหนักอะตอม 12.01) จึงมีผลต่อดูดซับรังสีได้น้อย

สมบัติทางกายภาพและเชิงกล

การกระจายตัวของผงเฟอร์ไรต์และเขม่าดำ

การกระจายตัวของผงเฟอร์ไรต์และเขม่าดำในเนื้อยาง สามารถศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้เทคนิค x-ray mapping ดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นภาพ x-ray mapping ของยางผสมผงเฟอร์ไรต์และเขม่าดำเห็นการกระจายตัวของธาตุ Mn, Fe และ Zn ซึ่งเป็นองค์ประกอบในผงเฟอร์ไรต์พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในชิ้นงาน ส่วนเขม่าดำ (พิจารณาที่ธาตุคาร์บอน) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเช่นกัน แสดงว่าชิ้นงานยางผสมที่เตรียมมีการกระจายตัวของสารตัวเติมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

แม้ว่าปริมาณเขม่าดำ 5 - 20 phr แทบไม่มีผลต่อการช่วยลดทอนรังสีในกรณีนี้ แต่การผสมเขม่าดำลงไปในเรื่องยางธรรมชาติมีผลเสริมแรง ทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 9) ทั้งนี้เพราะเขม่าดำมีขนาดเล็กมากเพียงประมาณ 30 nm ซึ่งทำให้อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface-area-to-volume) มีค่ามากจึงยึดเกาะกับเนื้อยางได้ดี (Frogley, 2003) ในขณะที่ผงเฟอร์ไรต์มีอนุภาคขนาดใหญ่ประมาณ 5 μm อาจเข้าไปขัดขวางการตกผลึกของยางเมื่อยางยืดตัว เมื่อปริมาณผงเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลง จึงพบว่าผสมผงเฟอร์ไรต์ 40-100 phr (ไม่ได้ผสมผงเขม่าดำ) มีผลให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลงประมาณ 4-34 % ตามลำดับ ในขณะที่ ยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำสูงสุด 20 phr และผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr มีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลงประมาณ 31 % เมื่อเปรียบเทียบกับยาง STR 5L ธรรมดาที่ไม่ได้ผสมทั้งผงเขม่าดำ และผงเฟอร์ไรต์ซึ่งมีค่าความทนทานต่อแรงดึงประมาณ 20 MPa

ค่าความแข็ง (Hardness)

ปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำ มีผลต่อค่าความแข็งของยางผสมอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 10 ยาง STR 5L ธรรมดา มีค่าความแข็ง 45.8 Shore A และเมื่อผสมกับเฉพาะผงเขม่าดำ 20 phr มีผลให้ค่าความแข็งเป็น 50 Shore A (เพิ่มขึ้น 9 %) แต่เมื่อผสมเฉพาะผงเฟอร์ไรต์ 100 phr ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 52 Shore A (เพิ่มขึ้น 15%) ส่วนชิ้นงานยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำสูงสุด 20 phr และผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr มีค่าความแข็งสูงถึง 64.2 Shore A นั่นคือการเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 40 % เมื่อเปรียบเทียบกับยาง STR 5L ที่ไม่ได้ผสมทั้งผงเขม่าดำและผงเฟอร์ไรต์ ดังนั้น ผงเขม่าดำและผงเฟอร์ไรต์ซึ่งเป็นผงเซรามิกส์ได้เข้าไปแทรกในเนื้อยาง มีส่วนช่วยเสริมค่าความแข็งของชิ้นงาน ให้เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Density)

โดยที่ยาง STR 5L มีความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัม/ซม.³ ส่วนผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำมีความหนาแน่น 5.14 กรัม/ซม.³ และ 1.85 กรัม/ซม.³ ตามลำดับ ปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำ มีผลต่อค่าความหนาแน่นของยางผสมดังแสดงในรูปที่ 11 ค่าความหนาแน่นของยางผสมที่สูงขึ้นแปรตามปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำที่ผสมเข้าไปในเนื้อยาง โดยเหตุที่ผงเฟอร์ไรต์เป็นเซรามิกซึ่งมีความหนาแน่นสูง จึงส่งผลกระทบต่อมวลของยางผสมมากกว่าปริมาตร จึงมีผลต่อค่าความหนาแน่นหรือ น้ำหนักของยางผสมมากกว่าเขม่าดำ

สรุปผลการทดลอง

ประสิทธิภาพการกั้นรังสีแกมมาจาก ²⁴¹Am พลังงาน 59.8 keV ของแผ่นยางแปรตามปริมาณผงเฟอร์ไรต์ที่ผสมและความหนาของแผ่นยาง ในขณะที่เขม่าดำ 5–20 phr แทบไม่มีผลต่อการช่วยลดทอนรังสีในกรณีนี้ การทดลองนี้สามารถเตรียมแผ่นยางผสมผงเฟอร์ไรต์ที่มีความหนา 1–5 มม. ที่มีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีดีกว่ายาง STR 5L ธรรมดาและแผ่นอะลูมิเนียม แต่มีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีต่ำกว่าการใช้แผ่นเหล็กอีกประมาณ 50% ตลอดช่วงของความหนาเดียวกัน โดยที่ยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำสูงสุด 20 phr และผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr ความหนา 3–5 มม. สามารถลดทอนรังสีแกมมาจาก ²⁴¹Am ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่า HVL = 3 มม. ค่า Attenuation coefficient = 2.31 ซม.⁻¹ เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบรังสีที่มีความยืดหยุ่นแบบยางธรรมชาติ

การผสมผงเฟอร์ไรต์ลงไปในเนื้อยาง STR 5L มีผลให้ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง แต่ช่วยเสริมค่าความแข็งของชิ้นงาน ให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ค่าความหนาแน่นของยางผสมที่สูงขึ้นแปรตามปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำที่ผสมเข้าไปในเนื้อยาง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่สนับสนุนทุนดำเนินงานวิจัย สัญญาเลขที่ ENG 48330 บริษัท เจ เอฟ อี เฟอร์ไรต์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์วัตถุดิบ ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ยาง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวก ด้านสถานที่ และการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

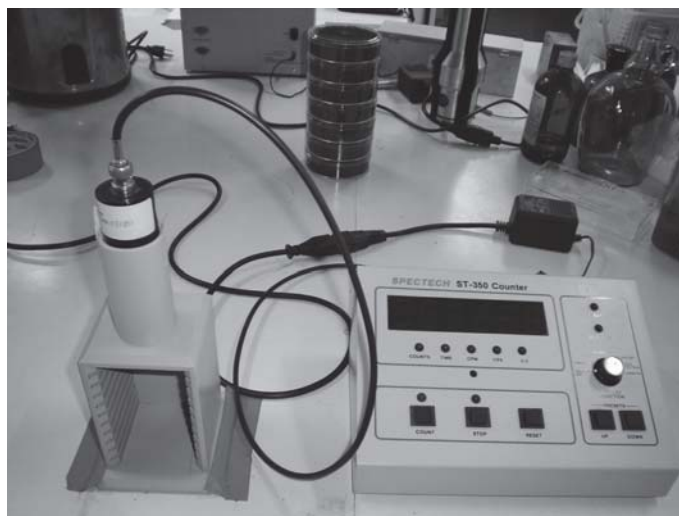
- Abdel-Aziz , M.M. and Gwaily, S.E., 1997. "Thermal and Mechanical Properties of Styrene-Butadiene rubber/Lead oxide Composites as Gamma-Radiation Shields", *Polymer Degradation and Stability* 55: 269–274.
- Chilton A.B. 1984. *Principles of Radiation Shielding*. NJ: Prentice-Hall Englewood Cliffs.
- Frogley, M.D., Ravich, D. and Wagner, H.D., 2003. "Mechanical Properties of Carbon Nanoparticle-reinforced Elastomers", *Composites Science and Technology* 63: 1647–1654.
- Gwaily, S.E., 2002. "Galena – (NR+SBR) Rubber Composites as Gamma Radiation Shields", *Polymer Testing* 21: 883–887.
- Hussain, R., Haq Z.U. and Mohammad, D, 1997. "A Study of Shielding Properties of Polyethylene Glycol- Lead oxide Composite", *Journal of Islamic Academy of Sciences* 10: 81–84.

Kooptarnond, K., Sikong, L., and Kaewboontong, P., 2004. “Galena – STR 5 L Composites as X-rays Shields”, The Third Thailand Materials Science and Technology Conference: 441–443.

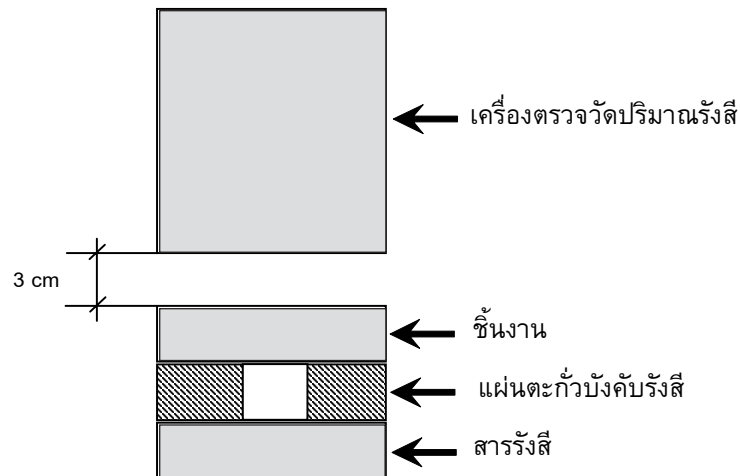
Madani, M., Basta, A.H., Abdo, A., El-Sayed, H. and El-Saied, H., 2004. “ Utilization of Waste Paper in the Manufacture of Natural Rubber Composite for Radiation Shielding”, Progress in Rubber Plastic Recycling Technology 20: 287–310.

ตารางที่ 1 สูตรผสมของยางในการทดลอง (phr : parts per hundred of rubber)

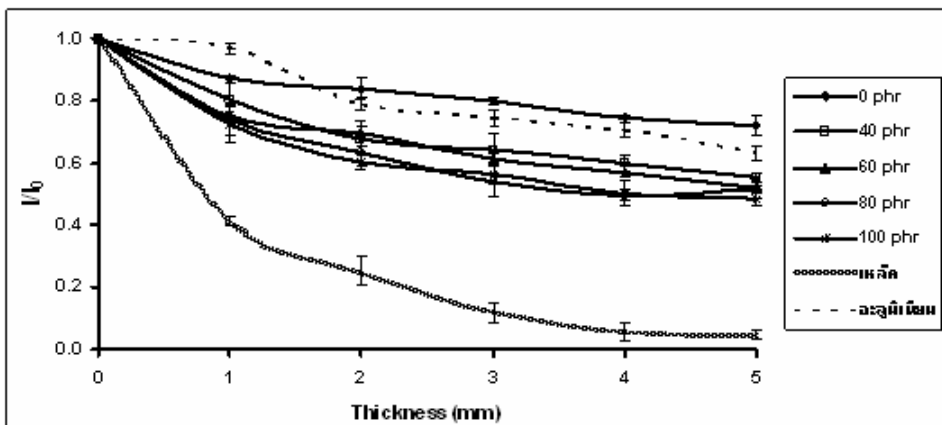
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
1. ยาง STR 5L	100
2. Zinc oxide	5
3. Stearic acid	3
4. Sulfur	2
5. MBTS	1
6. TMTD	0.5
7. ผงเฟอร์ไรต์	0, 40, 60, 80, 100
8. ผงเขม่าดำ	0, 5, 10, 15, 20



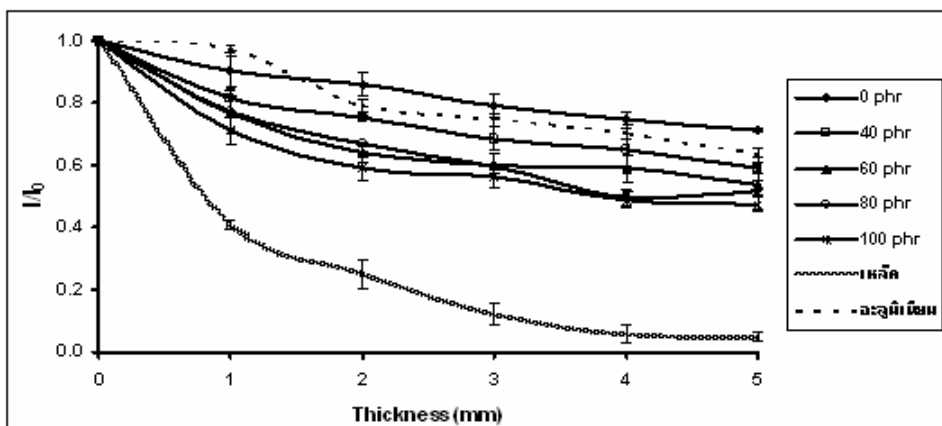
รูปที่ 1 เครื่องวัดการลดทอนรังสีแกมมา



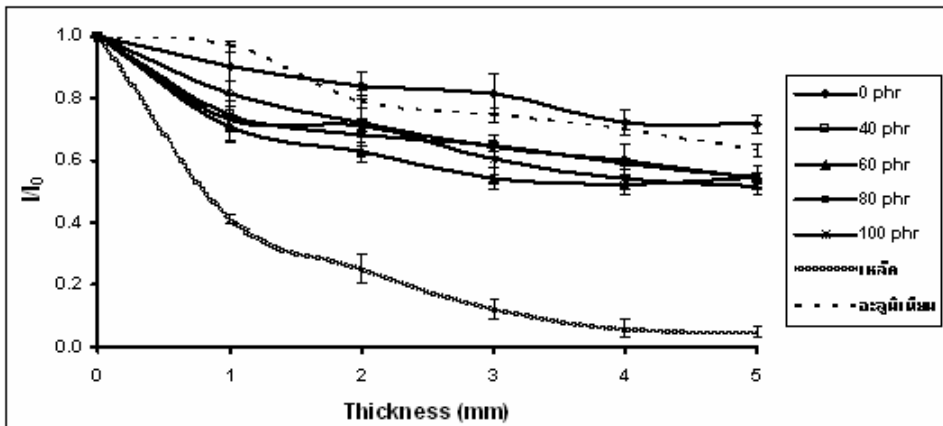
รูปที่ 2 ลักษณะการวางชั้นงานการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมา



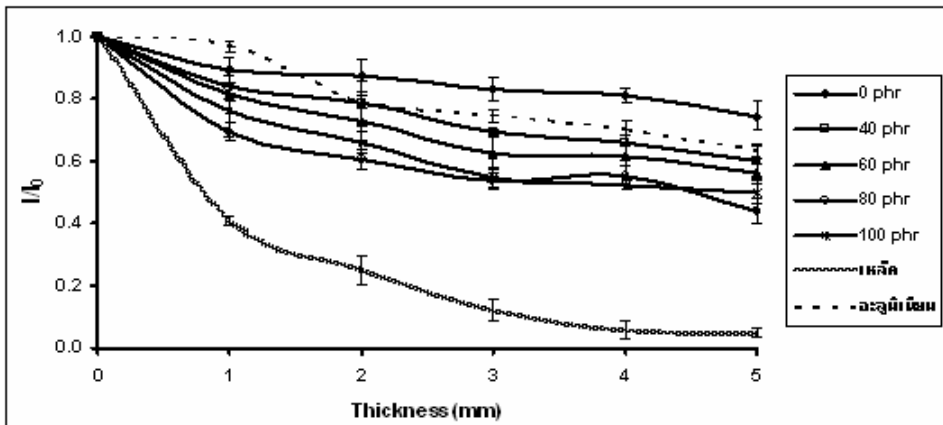
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนา (เฟอร์ไรต์ 0-100 phr ไม่เติมเซมาดำ)



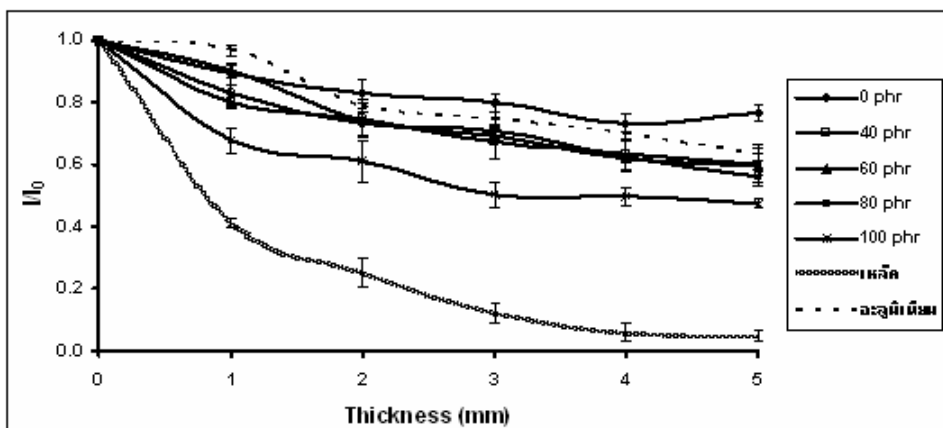
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนา (เฟอร์ไรต์ 0-100 phr เติมเซมาดำ 5 phr)



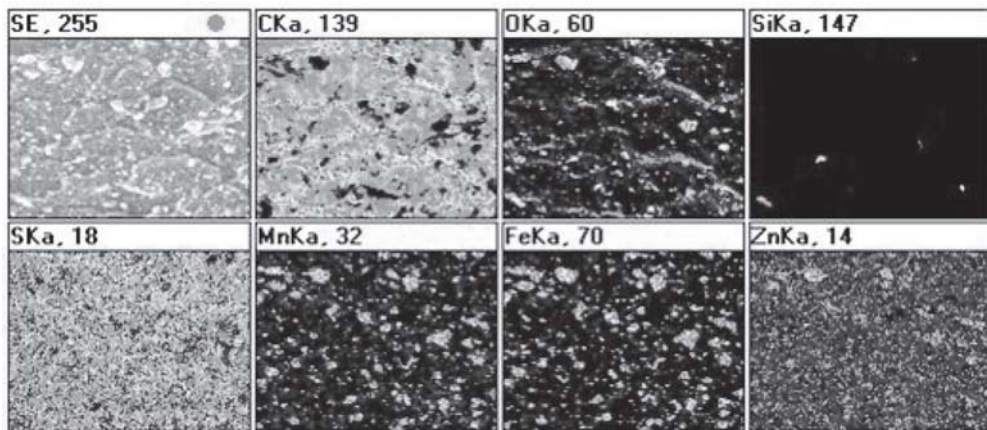
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนา (เฟอร์ไรต์ 0-100 phr เติมเขม่าดำ 10 phr)



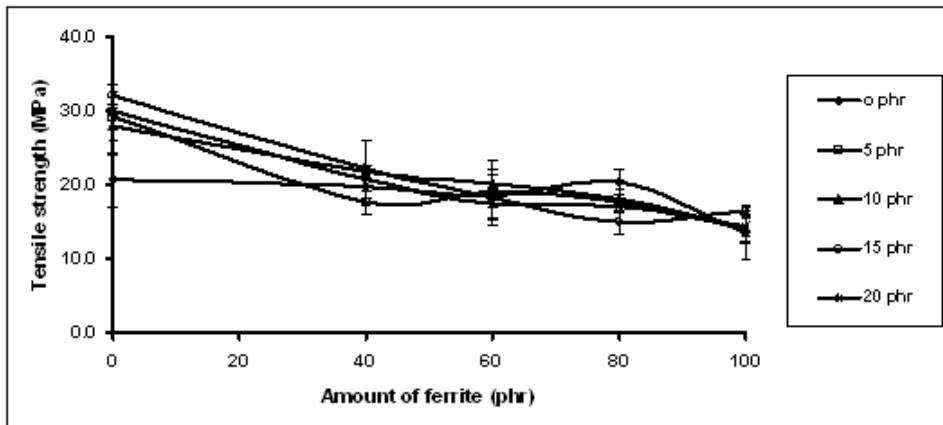
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนา (เฟอร์ไรต์ 0-100 phr เติมเขม่าดำ 15 phr)



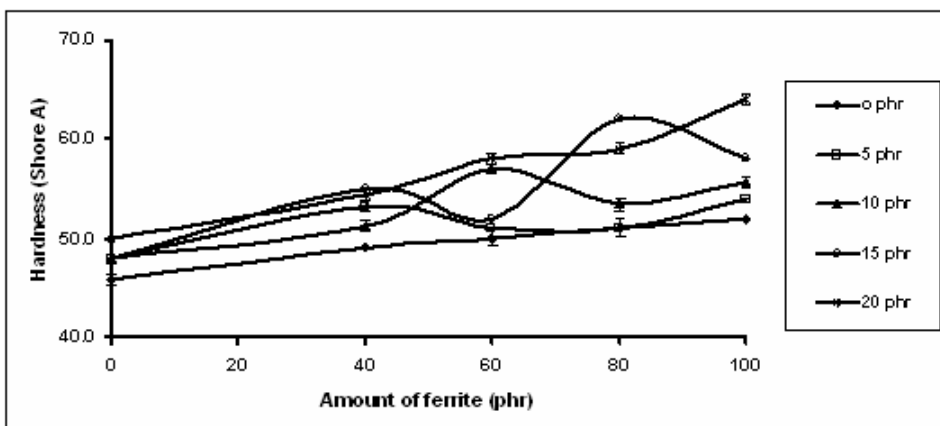
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนรังสีแกมมา กับ ความหนา (เฟอร์ไรต์ 0-100 phr เติมเขม่าดำ 20 phr)



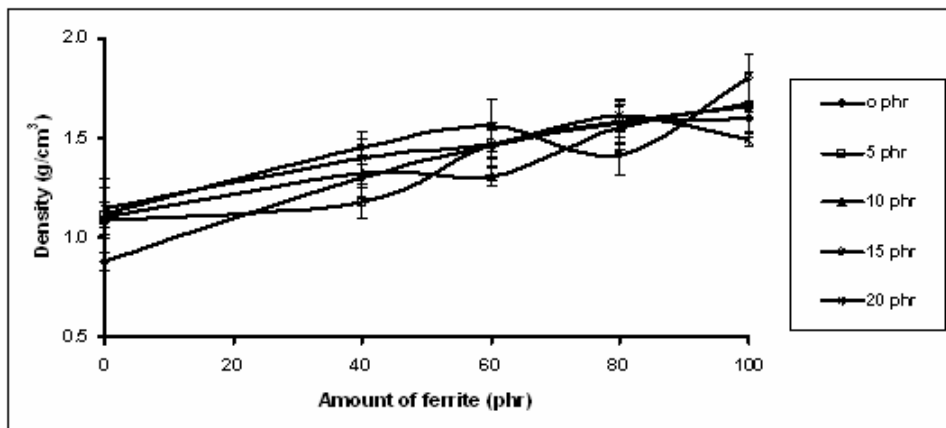
รูปที่ 8 การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบในยาง STR 5L ผสม ผงเขม่าดำ 20 phr และผงเฟอร์ไรต์ 100 phr



รูปที่ 9 ผลของปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำที่เติมต่อความทนทานต่อแรงดึงของยางผสม



รูปที่ 10 อิทธิพลของปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำ ที่มีต่อค่าความแข็งของยางผสม



รูปที่ 11 อิทธิพลของปริมาณผงเฟอร์ไรต์ และเขม่าดำ ที่มีต่อความหนาแน่น ของยางผสม