



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิต

ยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต

Preparation of Lead - Free X - Ray Shielding Materials Based on
Natural Rubber/Barium Sulfate Composites

สุทธิษา ก้อนเรือง

อานนท์ ศรีสุข

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทงานมูลฐาน กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์

วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยทักษิณ

ประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2565



คำรับรองคุณภาพ

รายงานวิจัยเรื่อง การเตรียมวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพลิตยางธรรมชาติผสมกับ
แบเรียมซัลเฟต

ผู้วิจัย อ.ดร.สุทธิษา ก้อนเรือง

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ ขอรับรองว่ารายงานวิจัยฉบับนี้ได้ผ่านการประเมิน
จากผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว และผลการประเมินคุณภาพงานวิจัยอยู่ในระดับดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมัคร แก้วสุกแสง)

รักษาการแทนผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและนวัตกรรม

วันที่ 8 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟตแตกต่างกันเพื่อใช้เป็นวัสดุป้องกันรังสีเอกซ์ที่ปราศจากตะกั่ว จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการลดทอนรังสี พบว่า โฟมคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ และแบเรียมซัลเฟตมีความหนาแน่นและความแข็งของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ขณะที่ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดลง เมื่อทดสอบสมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์พบว่าค่าร้อยละการลดทอนรังสี สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ_l) และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) สูงขึ้น เมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าครึ่งความหนา (HVL) ลดลง นอกจากนี้พบว่าคอมโพสิตที่เตรียมจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีเอกซ์มากกว่าโฟมคอมโพสิตที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, แบเรียมซัลเฟต, แผ่นกำบังรังสีเอกซ์, วัสดุคอมโพสิต

Abstract

This work prepared and investigated the lead-free X-ray shielding materials and analyzed their mechanical properties. The NR/BaSO₄ and RC/BaSO₄ composites were prepared with varying contents of BaSO₄. For NR/BaSO₄ composites, density and hardness (Shore A) increasing with increasing BaSO₄ contents, while tensile strength, elongation at break and tear strength decreased. The results showed that increases in the BaSO₄ contents improved the x-ray shielding properties of the NR/BaSO₄ and RC/BaSO₄ composites including to X-ray attenuation ratio (%), linear attenuation coefficient (μ_l), mass attenuation coefficient (μ_m) and half value layer (*HVL*). In summary, the composites prepared from RC/BaSO₄ had better X-ray attenuation efficiency than foam composites prepared from NR/BaSO₄.

Keywords: natural rubber, barium sulfate, x-ray shielding, composite materials

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายการ
อุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยมหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2565 (สัญญาเลขที่ TSU-65A105000017) ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรสาขาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีฯ เพื่อชุมชน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยทักษิณ และศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 11 สุราษฎร์ธานี ที่ให้คำแนะนำและให้ความ
ช่วยเหลือจนวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

สุทธิษา ก้อนร้อง

อานนท์ ศรีสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(6)
สารบัญภาพ	(7)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางธรรมชาติ	5
2.2 แบริมซัลเฟต	8
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี	11
2.4 รังสีเอกซ์	12
2.5 การหาค่าการกำบังรังสี	16
2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 วิธีการทดลอง	32
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของโฟม	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง	36
4.1 ผลการวิเคราะห์โฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบริมซัลเฟต	36
4.1.1 ผลของปริมาณแบริมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบริมซัลเฟต	36
4.1.2 ผลของปริมาณสารแบริมซัลเฟตที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ผลของการแปรปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อการกระจายตัวและปริมาณการกระจายตัวของธาตุของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	40
4.1.4 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	42
4.1.5 ผลของการทดสอบสมบัติทางด้านรังสีของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	45
4.2 ผลการวิเคราะห์คอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	51
4.2.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	51
4.2.2 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อลักษณะสัญญาณวิทยา	52
4.2.3 ผลของการแปรปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อการกระจายตัวและปริมาณการกระจายตัวของธาตุของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์	54
4.2.4 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	55
4.2.5 ผลของการทดสอบสมบัติทางด้านรังสีของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	59
บทที่ 5 อภิปรายผลสรุปและ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบของน้ำยาง	5
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ	6
ตารางที่ 2.3	ส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต	8
ตารางที่ 2.4	สมบัติโดยทั่วไปของแบเรียมซัลเฟต	9
ตารางที่ 2.5	แสดงการรับปริมาณกัมมันตภาพรังสีและผลกระทบต่อร่างกาย	14
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมในการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	32
ตารางที่ 3.2	ส่วนผสมในการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	34
ตารางที่ 4.1	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	37
ตารางที่ 4.2	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตต่างกัน	41
ตารางที่ 4.3	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	42
ตารางที่ 4.4	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	43
ตารางที่ 4.5	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	51
ตารางที่ 4.6	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตต่างกัน	54
ตารางที่ 4.7	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	55
ตารางที่ 4.8	ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	57

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแบเรียมซัลเฟต	8
ภาพที่ 2.3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	11
ภาพที่ 2.4 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง	12
ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ	13
ภาพที่ 2.6 การลดทอนของรังสี	17
ภาพที่ 2.7 แสดงการหาความเครียดของวัสดุ	19
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมโพลีคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	24
ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงการทดสอบสมบัติของโพลีคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต	25
ภาพที่ 3.3 เครื่องผสมอาหาร	27
ภาพที่ 3.4 ตู้อบลมร้อน	27
ภาพที่ 3.5 แม่พิมพ์ขนาด 25.4×25.4 cm ² ลึก 5 mm	27
ภาพที่ 3.6 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง	28
ภาพที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	28
ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง	28
ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ	29
ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง	29
ภาพที่ 3.11 เครื่องวัดความหนา	29
ภาพที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	30
ภาพที่ 3.13 เครื่องซั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบ 2 ตำแหน่ง	30
ภาพที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
ภาพที่ 3.15 เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป	31
ภาพที่ 3.16 เครื่องวัดปริมาณรังสี	31
ภาพที่ 3.17 โพลีคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟต	33
ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างแผ่นยางคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟตเตรียม	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 3.19 การทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์ (a) เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป , (b) เครื่องวัดอุปกรณ์วัดปริมาณรังสี และปริมาณรังสีเอกซ์, (c) ตัวอย่าง	36
ภาพที่ 4.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	38
ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้า (ซ้าย) และภาคตัดขวาง (ขวา) ของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (ก), (ข) 0 phr ; (ค), (ง) 50 phr ; (จ), (ฉ) 75 phr และ (ช), (ซ) 100 phr.	39
ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่างกัน (ก) 50 phr (ข) 75 phr และ (ค) 100 phr.	40
ภาพที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	42
ภาพที่ 4.5 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	44
ภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อการยึดตัว ณ จุดขาดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	44
ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานการฉีกขาดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	45
ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต (ก) 60 kVp (ข) 70 kVp (ค) 80 kVp (ง) 90 kVp และ (จ) 100 kVp	48
ภาพที่ 4.9 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	49
ภาพที่ 4.10 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	49
ภาพที่ 4.11 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าครึ่งความหนาของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต	50

ภาพที่ 4.12	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโคมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	52
ภาพที่ 4.13	ลักษณะสัญญาณวิทยาบริเวณผิวหน้า (ซ้าย) และภาคตัดขวาง (ขวา) ของโคมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (ก), (ข) 0 phr ; (ค), (ง) 50 phr ; (จ), (ฉ) 100 phr และ (ช), (ซ) 150 phr.	53
ภาพที่ 4.14	การกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในโคมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่างกัน (ก) 50 phr (ข) 100 phr และ (ค) 150 phr.	54
ภาพที่ 4.15	แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโคมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	56
ภาพที่ 4.16	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	57
ภาพที่ 4.17	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	58
ภาพที่ 4.18	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	58
ภาพที่ 4.19	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต (ก) 60 kVp (ข) 70 kVp (ค) 80 kVp (ง) 90 kVp และ (จ) 100 kVp	61
ภาพที่ 4.20	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	62
ภาพที่ 4.21	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	62
ภาพที่ 4.22	ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นครั้งค่าของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต	63

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และพลังงานสูง (เสาวภาคย์ ภูศิริและคณะ, 2562) ถูกนำมาใช้ทางการแพทย์ วิศวกรรม และอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะทางการแพทย์ใช้รังสีเอกซ์วินิจฉัยโรคและรักษาโรค เนื่องจากรังสีเอกซ์สามารถทำลายเนื้อเยื่อได้จึงถูกนำมาใช้ทำลายเนื้อเยื่อของเซลล์มะเร็งซึ่งผลที่ตามมาคือทำให้เนื้อเยื่อผิวหนังบริเวณใกล้เคียงถูกทำลายไปด้วย และหากร่างกายได้รับรังสีเอกซ์ในปริมาณมากกว่าค่าที่มากที่สุดที่ร่างกายจะรับได้โดยไม่มีการสะสมของรังสีจะส่งผลให้จำนวนเม็ดเลือดขาวลดลง นอกจากนี้ในทางชีววิทยายังทำให้เกิดการผ่าเหล่า (genetic mutation) (วิหวัศ เสงขชัยยง, 2548) ด้วยเหตุนี้การทำงานเกี่ยวกับรังสีเอกซ์จึงต้องมีอุปกรณ์กำบังรังสีเพื่อลดทอนพลังงานของรังสีเอกซ์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อร่างกายโดยเฉพาะกับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วย วัสดุกำบังรังสีส่วนใหญ่ทำจากตะกั่ว (Lead; Pb) เพราะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) และความหนาแน่นสูง ซึ่งตะกั่วมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะดูดกลืนหรือกำบังรังสีได้ดี (Poltabtim *et.al*, 2021) อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีจากตะกั่วมีข้อเสียหลายประการ เช่น มีน้ำหนักค่อนข้างมาก เมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเมื่อยล้า แดกหักได้ง่ายเนื่องจากตะกั่วมีความแข็งและเปราะ ส่งผลให้วัสดุกำบังรังสีมีประสิทธิภาพลดลงทำให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี มีกระบวนการขึ้นรูปยาก เนื่องจากตะกั่วมีจุดหลอมเหลวที่สูง ($327.46\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562) และมีความเป็นพิษสูง ถ้าได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของร่างกาย เช่น ผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ผู้ป่วยจะมีอาการเหนื่อยอ่อนเพลีย หงุดหงิด เชื่องซึม นอนไม่หลับ ปวดศีรษะ ชักและโคล่า ผลต่อระบบประสาทส่วนปลาย ผู้ป่วยจะมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ผลต่อระบบเลือด ผู้ป่วยจะมีอาการซีด ผลต่อระบบทางเดินปัสสาวะ ทำให้การขับกรดยูริกลดลง ผลต่อระบบสืบพันธุ์ ทำให้เกิดภาวะมีบุตรยาก มีผลต่อเพศ และความผิดปกติของโครโมโซมทารกในครรภ์ และผลต่อระบบทางเดินอาหาร ผู้ป่วยจะมีอาการปวดท้อง เบื่ออาหาร คลื่นไส้และท้องผูก (สุดา วรรณประสาท, 2565)

จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้นักวิจัยพยายามพัฒนาวัสดุชนิดอื่น ๆ เพื่อใช้กำบังรังสีแทนตะกั่ว เช่น แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) (Kalkornsurapranee *et. al.*, 2021, Kim *et.al*, 2019 และ Lim-aroon *et. al.*, 2019) ซาแมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) (Toyen *et. al.*, 2019) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) (Soylu *et. al.*, 2015) เหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ทังสเตนออกไซด์ (W_2O_3) (Toyen *et. al.*, 2019) และ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (Khalaf *et. al.*, 2021) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) เป็นสารที่มีเลขอะตอมสูงจึงมีสมบัติเป็นสารทึบรังสี (contrast media) ทำให้สามารถลดทอนรังสีได้ อีกทั้งยังไม่

เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ (เขาวโซติ วิชญาศิริ 2560) อย่างไรก็ตามวัสดุกำบังรังสีเหล่านี้มีข้อด้อยบางประการเช่น มีน้ำหนักมากและความยืดหยุ่นต่ำ ซึ่งไม่สะดวกสำหรับการใช้งานบางพื้นที่ ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวจึงจำเป็นต้องผสมสารประกอบที่ใช้กำบังรังสีกับพอลิเมอร์ เช่น พอลิยูรีเทนกับแบเรียมซัลเฟต (PU/BaSO₄) (ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล, 2560) ยางธรรมชาติกับแบเรียมซัลเฟต (Plangpleng *et. al.*, 2022 และ Konruang *et. al.*, 2022) ยางซิลิโคนกับแบเรียมซัลเฟตและเซลลูโลสอสัณฐาน (Mungpayaban *et. al.*, 2023) ยางธรรมชาติกับบิสมัทออกไซด์ (Toyen and Saenboonruang, 2020) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนกับแบเรียมซัลเฟตและเหล็กออกไซด์ (Kumar *et. al.*, 2018) เอซิสโนพรพิลีนไดอีนกับแบเรียมซัลเฟต (Cherkasov, *et. al.*, 2020) ยางแท่ง STR5L กับแบเรียมซัลเฟต (Plangpleng *et. al.*, 2022) และพอลิไวนิลคลอไรด์กับบิสมัทคลอไรด์และผงไม้ (จริยาภรณ์ รัชแก้ว 2563) เป็นต้น

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศรวมทั้งสิ้นประมาณ 20.11 ล้านไร่ ผลิตน้ำยางได้ประมาณ 4.77 ล้านตันต่อปี ซึ่งมีปริมาณการส่งออกยางพาราอยู่ที่ 4.15 ล้านตันต่อปี ทำให้แนวโน้มพื้นที่ปลูกยางนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2018) ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เชิงกลที่ดีหลายประการ เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น การทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการกระแทก เป็นต้น (ศิริลักษณ์ อินต้อม 2562) จึงนิยมนำมาผสมกับวัสดุหรือสารตัวเติมอื่น ๆ เพื่อสร้างวัสดุคอมโพสิต (Composites) ที่มีสมบัติตามความต้องการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่นสูง มีน้ำหนักเบา ในรูปของวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; BaSO₄) โดยใช้ยางธรรมชาติ 2 ชนิด คือ น้ำยางชนิดแอมโมเนียสูงความเข้มข้น 60% และยางแผ่นรมควันชั้น 3 จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติด้านรังสีโดยทำการทดสอบด้วยรังสีเอกซ์ทางการแพทย์ที่ระดับพลังงานสูงสุด 60 - 100 kVp ที่ความหนาของตัวอย่างต่าง ๆ กัน ผู้วิจัยเชื่อว่า ผลงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุกำบังรังสีเอกซ์เชิงพาณิชย์เพื่อใช้ลดผลกระทบที่เกิดจากการสัมผัสรังสีให้กับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วยได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราของส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตที่เหมาะสมสำหรับการกำบังรังสีเอกซ์

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการกำบังรังสีเอกซ์ของวัสดุคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

1.2.3 เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติกับแบเรียมซัลเฟต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต โดยใช้แบเรียมซัลเฟตปริมาณ 0, 50, 75 และ 100 phr ด้วยวิธีการดันลอป

1.3.2 เตรียมแผ่นยางคอมปาวด์จากยางแผ่นรมควันชั้น 3 ผสมกับแบเรียมซัลเฟต โดยใช้แบเรียมซัลเฟตปริมาณ 0, 50, 100 และ 150 phr แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบ 2 ลูกกลิ้ง

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการกำบังรังสีเอกซ์ของวัสดุคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต เช่น ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ความแข็ง ความหนาแน่น สัณฐานวิทยา เปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลและความหนาครึ่งค่า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ทราบกระบวนการเตรียม อัตราส่วนที่เหมาะสมและสมบัติของวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.4.2 ด้านวิชาการ

งานวิจัยฉบับนี้จะสามารถนำมาตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการ และสามารถเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยต่อไป

1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ

ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟตเพื่อต่อยอดผลงานนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ และเพิ่มมูลค่าแก่ยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย

1.4.4 ด้านสังคม

ช่วยลดอันตรายจากรังสีแก่บุคลากรทางการแพทย์ที่ทำงานด้านรังสี ผู้ป่วย และประชาชนทั่วไปที่ต้องสัมผัสรังสีในโรงพยาบาล สถานบริการทางการแพทย์หรือโรงงานอุตสาหกรรม

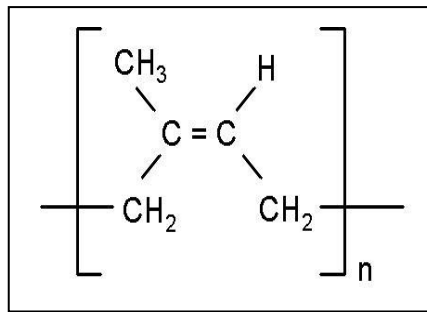
1.4.5 ด้านสิ่งแวดล้อม

ได้วัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟตที่มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นการลดการใช้สารตะกั่วซึ่งมีความเป็นพิษสูง

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งได้มาจากยางของต้นยางพารา (Hevea Braziliensis) ยางธรรมชาติมีสูตรทางเคมีคือ ซิส - 1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis- 1,4- polyisoprene) (กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล และวัลลภ หาญณรงค์ชัย, 2558) ดังภาพที่ 2.1 น้ำยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.975-0.98 g/ml มีค่าความเป็นกรด - ด่าง 6.5 - 7.0 เนื่องจากน้ำยางอยู่ในสภาวะแขวนลอยและมีประจุเป็นลบ จึงผลักรันตลอดเวลาทำให้คงสภาพอยู่ได้จนกว่าสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวน เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของน้ำยาง (ดาริกา จาเอาะและอาปีติน ดะแซสาเมาะ. 2554) น้ำยางสดประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดัง ตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ปราโมทย์ วีรานุกูล และคณะ 2561)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยาง (สายรุ่ง และขวัญจิตต์, 2556)

องค์ประกอบ	น้ำยางสด (% โดยน้ำหนัก)
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
นิวทรอลลิปิด	1.0
ไกลโคลิปิดและฟอสโฟลิปิด	0.6
คาร์บอนโบไฮเดรต	1.6
สารอนินทรีย์	0.5
น้ำ	58.5
อื่นๆ	0.4

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ

องค์ประกอบ	น้ำยางสด (% โดยน้ำหนัก)
ยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำ (กระจายอยู่ในไฮโดรคาร์บอน)	10
สารพวกไขมัน	3
สารพวกโปรตีน	1

(ดาโรกา จาเอาะและอาปีติน ดะแซสาเมาะ. 2554)

สัดส่วนของปริมาณเนื้อยางในน้ำยางขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อายุของต้นยาง พันธุ์ของต้นยาง กรรมวิธีการกรีดยาง ฤดูกาล และพื้นที่ปลูกยาง เป็นต้น น้ำยางที่ได้จากการกรีดยางต้องมีการเติมสารรักษาสภาพน้ำยางเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการ (กัลทิมา เซาว์ชาญชัยกุล และวัลลภ หาญณรงค์ชัย, 2558)

2.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ (กัลทิมา เซาว์ชาญชัยกุล และวัลลภ หาญณรงค์ชัย, 2558)

1. ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วหรือผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะมีสมบัติความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2. ความเหนียวติดกัน (tock) ยางธรรมชาติสภาพที่ยังไม่คงรูปมีสมบัติที่เยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันเช่นยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนแรงดึงสูงสุด (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืดดึง ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนต่อแรงดึงสูงสุดมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรง (ประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปยิ่งช่วยทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดสูงยิ่งขึ้น แต่ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีค่าความทนแรงดึงสูงสุดต่ำจึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

4. ความทนแรงฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้เมื่อถูกยืดดึง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนแรงฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางสูงขึ้น

5. สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติที่มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนในระหว่างการใช้งานนอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วยเช่นเดียวกับความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังด้อยกว่ายาง SBR (Styrene Butadiene Rubber) เล็กน้อย

6. ความทนต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วดังนั้นจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

7. อุณหภูมิของการทำงาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 55 °C จนถึง 70 °C อย่างไรก็ตามหากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไปแต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่างๆก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมีอย่างได้อย่างเหมาะสมโดยมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิตั้งแต่ 90 °C จนถึง 100 °C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.1.2 วิธีการขึ้นรูปโฟมยางจากธรรมชาติ (Natural Rubber Foam)

โฟมยางที่ทำจากยางธรรมชาติ สามารถขึ้นรูปได้ 2 วิธีดังนี้ คือ

1. การขึ้นรูปจากน้ำยาง ซึ่งโฟมยางที่ขึ้นรูปจากน้ำยางหรือที่เรียกว่าลาเท็กซ์โฟม (Latex foam) คือโฟมที่ทำจากน้ำยางธรรมชาติ หรือ ลาเท็กซ์ (Latex) เป็นวัสดุซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน ระบายอากาศออกได้และสามารถหดหรือบิดได้โดยไม่เสียรูปร่างถาวรมีความยืดหยุ่นสูง ในปัจจุบันนี้มีการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ จำพวกวัสดุรองกันกระแทก หมอนฟูก บางครั้งก็ทำการผสมด้วยลาเท็กซ์สังเคราะห์ เพื่อเพิ่มความทนทาน ความสบายและความยืดหยุ่น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเมมโมรี่โฟม (memory foam) หรือโฟมที่มีสมบัติยืดหยุ่นหนืด ซึ่งมีความกระด้างกระดอนน้อย (Low resilience) หรือเกิดการยุบตัวตามรูปทรง (Profile) ของวัตถุที่มากดทับ เมื่อเกิดการยุบตัวของเซลล์โดยน้ำหนักของวัตถุที่มากดทับจะทำให้เกิดการยุบตัวโดยไม่คืนรูปทันทีทันใด ทำให้ลดความดันบริเวณนั้นได้และเช่นเดียวกันเมื่อบริเวณใดมีความร้อนกระทำ ทำให้เซลล์อ่อนตัวหรือแม้กระทั่งเปิดออกทำให้รู้สึกสบายแบบเดียวกันกับกรณีมีน้ำหนักมากกระทำ การผลิตโฟมยางหรือยางพองน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นรูพรุนส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน เสื้อการสอย ตุ๊กตา และของชำร่วยต่าง ๆ เช่น พวงกุญแจ หลักการสำคัญของการผลิต

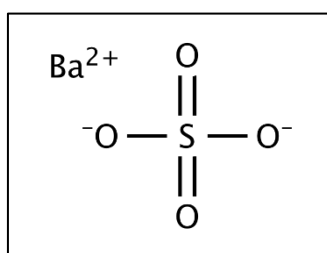
ยางพองน้ำคือการทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆแล้วทำให้ฟองยางองรูปหรือการวัลคาไนซ์ด้วยสารเคมีและความร้อน (เจริญยุทธ เดชวายุภู และคณะ. (2552)

การปรับค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูป (Stiffness) ของฟองยางสามารถทำได้ด้วยการเติมสารตัวเติมต่าง ๆ เช่น Clay , CaCO , Silica หรือ C-black ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งการเติมในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ความยืดหยุ่นลดลงและยุบตัวถาวรได้ นอกจากนี้แล้วยังสามารถปรับค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปได้ด้วยการปรับปริมาณกำมะถันและ DPG

2. โฟมยางที่ขึ้นรูปจากยางแห้ง โฟมยางชนิดนี้สามารถทำได้จากยางคอมปาวด์ (Rubber compound) ที่มีการเติมสารเคมีและสารตัวเติมลงไปในยางดังแสดงในตารางที่ 2.3 ทำให้ตัดแปลงสมบัติตามที่ต้องการได้แล้วนำไปวัลคาไนซ์ด้วยความร้อนจะทำให้ยางธรรมชาติคงรูปมากขึ้นเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลหรือโซ่ของ (เจริญยุทธ เดชวายุภู และคณะ. (2552)

2.2 แบเรียมซัลเฟต

แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) มีสูตรเคมีคือ $BaSO_4$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 233.34 g/mol แบเรียมซัลเฟตเป็นกากแร่ในสายแร่โลหะมักเกิดร่วมกับเงิน ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และแอนติโมนี บางครั้งอาจพบเกิดเป็นสายแร่ตัดผ่านหินปูนมีแคลไซต์ปะปนหรือพบการเกิดเป็นก้อนแร่ตกค้าง (Residual messes) ในดินเหนียวที่ซ้อนอยู่บนหินปูนหรือเป็นวัตถุประสานในหินทราย แบเรียมซัลเฟตมีส่วนประกอบดังตารางที่ 2.3 (สุภารัตน์ รักชลธี, 2561)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแบเรียมซัลเฟต (ที่มา : สืบค้นเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2565.

จาก <https://www.smartscience.co.th/product/77117/barium-sulfate-99->)

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต (สุภารัตน์ รักชลธี, 2561)

ธาตุ	ปริมาณ (% wt)	สารประกอบออกไซด์	ปริมาณ (% wt)
Barium (Ba)	58.84	BaO	65.70
Sulfur (S)	13.74	SO ₃	34.30
Oxygen (O)	27.42		

ตารางที่ 2.4 สมบัติโดยทั่วไปของแบเรียมซัลเฟต (สุภารัตน์ รักชลธิ, 2561)

สี	ขาวไม่มีสีเหลืองแดงน้ำเงินอ่อน
ความวาว	วาวแบบแก้ว-ไข่มุก
ความแข็ง	3-3.5 Mohs
ความถ่วงจำเพาะ	4.5
โครงสร้างผลึก	ผลึกรูปแผ่นในระนาบ (001) และผลึกรูปเพชรมัทแสดงลักษณะ 1 st และ 2 nd Order prism ผลึกรูปแผ่นแบบ Crested barite หรือ Barite rose
จุดหลอมเหลว	1580°C
ค่าการละลาย (K _{sp})	1.0842 x 10 ⁻¹⁰ (25°C)
ความสามารถในการละลายในน้ำ	0.0002448 g / 100 mL (20°C)
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายในแอลกอฮอล์สามารถละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid)

2.2.1 การแบ่งประเภทของแบเรียมซัลเฟต (สุภารัตน์ รักชลธิ, 2561)

แบเรียมซัลเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ประเภท 1 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากธรรมชาติ มี 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 1 และชั้นคุณภาพ 2
- ประเภท 2 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งแบเรียมซัลเฟตในเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดได้จากการนำแร่แบไรต์ (Mineral barite) ซึ่งมักจะมีสิ่งเจือปนสูงมาผ่านกระบวนการปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชัน (Carbothermal reduction : heating with coke) เพื่อให้ได้แบเรียมซัลไฟด์ (Barium sulfide, Bas) อังแสดงในสมการที่ 2.1



จากนั้นเป็นขั้นการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ซึ่ง Bas สามารถละลายได้ในน้ำและถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในรูปของ คาร์บอเนต และไฮไดรด์ (Hydride) จากนั้นเติม H₂SO₄ เพื่อตกตะกอน Baso, ทำให้ได้ BaSO₄ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดย BaSO₄ ที่ตกตะกอนได้เรียกว่า บลิ่งฟิซ (Blanc fixe)

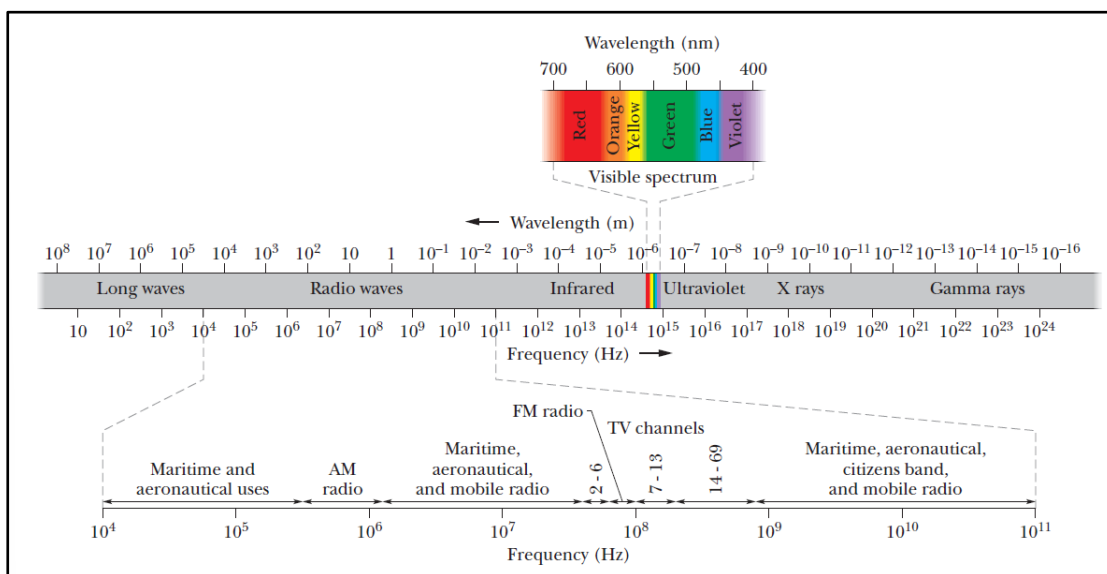


2.2.2 การใช้งานแบเรียมซัลเฟต

1. ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติกเช่นในงานฟิล์มงานเป่าและงานฉีดขึ้นรูป เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อกรดต่าง
2. นำไปผสมกับยางเพื่อผลิตภัณฑ์หนักสำหรับถ่วงท่ออย่างแผ่นยางหุ้มฉนวนยางรองฐานกรวยป้ายจราจร
3. ผสมไปในพอลิเมอร์สำหรับทำฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับแบ่งเขตแดน
4. นำไปผสมใน PE เพื่อผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลาสำหรับใช้ในงานประมง
5. นำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อทำบรรจุภัณฑ์เก็บสารกัมมันตภาพรังสี
6. ใช้ในงานเคลือบเงาเพื่อลดการแผ่รังสีจากจอคอมพิวเตอร์และโทรทัศน์
7. นำไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) สำหรับทำเป็นสารเคลือบภาพวาด
8. ใช้ผลิตเป็นเส้นใยนาโนคอมโพสิตโดยใช้พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) สำหรับทำอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีในงานรังสีวินิจฉัย
9. ส่วนผสมของ $BaSO_4$ ใช้เป็นพื้นสีขาวสำหรับการผลิตสีโดยจะนำไปผสมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
10. ใช้ $BaSO_4$ เกรดนาโนผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งใส (Transparent polymer) สำหรับทำเป็นกระจกด้านข้างรถ (Side windows) และกระจกหลังคารถ (Sunroof) แทนการใช้กระจกโดย $BaSO_4$ จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วนและสามารถกันรังสี UV ได้บางส่วน (สุภารัตน์ รักชลธี, 2561)

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี

รังสี (Radiation) คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิด (Source) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic; Photon) ที่มีความถี่และความยาวคลื่นต่างกัน เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ แสง รังสีอินฟราเรด รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 หรือในลักษณะของอนุภาค (Particle) ที่มีความเร็วสูง เช่น แอลฟา และ บีตา เป็นต้น (สัจจพล พงษภมร, 2554 และศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562)



ภาพที่ 2.3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Holiday,)

2.3.1 การจำแนกประเภทของรังสี

การจำแนกประเภทของรังสีจากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ (สัจจพล พงษภมร, 2554 และจริยาภรณ์ รักษ์แก้ว, 2563)

(1) รังสีไม่ก่อไอออน (Non-ionizing radiation)

รังสีไม่ก่อไอออน หมายถึง รังสีที่มีพลังงานต่ำ เมื่อปะทะหรือผ่านเข้าไปในตัวกลางใดๆ แล้วไม่สามารถทำให้ตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากมีพลังงานไม่สูงพอให้ไปผลักอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากอะตอมได้ รังสีประเภทนี้มีความยาวคลื่นสูงและพลังงานอยู่ในช่วง $10^{-2} - 10^2$ eV เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสง และรังสีอินฟราเรด เป็นต้น

(2) รังสีก่อไอออน (Ionizing radiation)

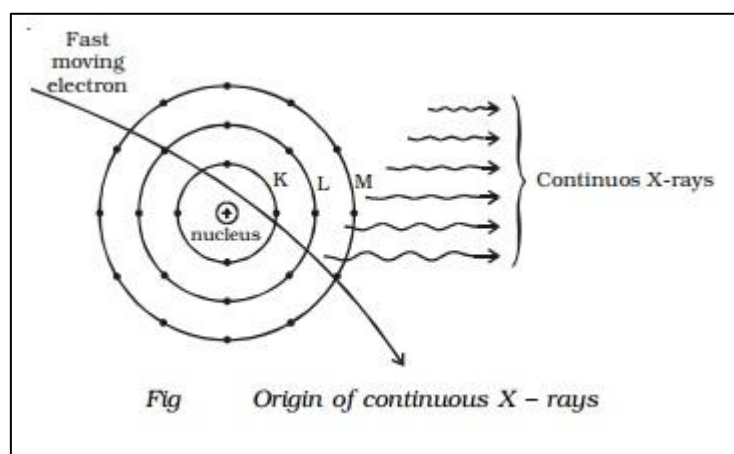
รังสีก่อไอออน หมายถึง รังสีที่มีพลังงานสูงในช่วง keV - MeV ซึ่งมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสูงหรือมีลักษณะของอนุภาค เมื่อรังสี

เหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ แล้วทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออน เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีแอลฟา และรังสีบีตา เป็นต้น

2.4 รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 130 nm ถึง 480 nm ไม่มีประจุ ไม่สามารถเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าได้ มีความสามารถในการเคลื่อนที่ทะลุผ่านวัสดุที่ไม่หนาจนเกินไป และมีความหนาแน่นน้อย ๆ ได้ เช่น ไม้ เนื้อเยื่อคน เป็นต้น (ศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562) รังสีเอกซ์ถูกสร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดรังสี เช่น เครื่องเอกซเรย์ หรือเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูง เกิดจากการเร่งให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากไส้หลอดแล้ววิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนเป้าหลอดที่ทำด้วยโลหะหนัก พลังงานส่วนใหญ่ของอิเล็กตรอนสูญเสียไปอยู่ในรูปพลังงานความร้อน ส่วนที่เหลือซึ่งน้อยกว่า 1% เปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์ กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์มี 2 แบบ คือ (จริยาภรณ์ รักษ์แก้ว, 2563 และชาวโชติ วิษญาศิริ, 2560)

1. รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-ray) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้าแล้วลดความเร็วลงพลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงเปลี่ยนไปเป็นรังสีเอกซ์ เรียกว่า เบรมสส์ตราลุง (Bremsstrahlung)

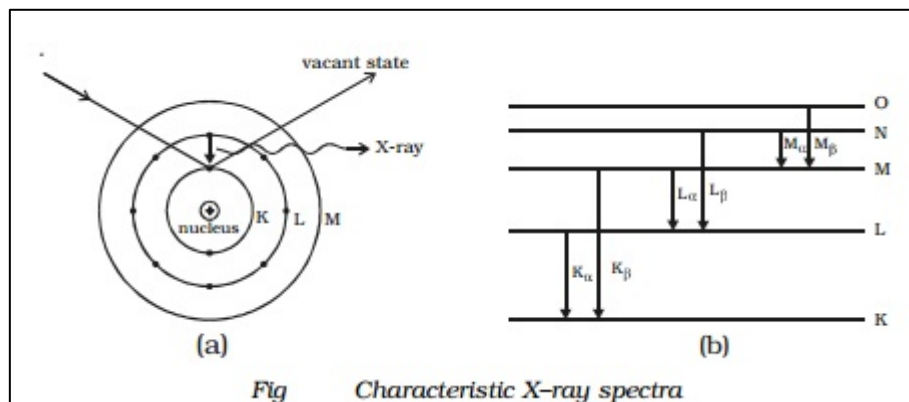


ภาพที่ 2.4 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง

(ที่มา : สืบค้นเมื่อวันที่ 2 มกราคม 2565. จาก https://www.brainkart.com/article/X-ray-spectra---continuous-and-characteristic-X-ray-spectra_2935/)

2. รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนความเร็วสูงวิ่งไปชนจนอิเล็กตรอนวงโคจรใน (Inner orbital electron) ของอะตอมเป้า จนอิเล็กตรอนวงโคจรในนั้นหลุดออกจากอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนจากวงโคจรถัดไปวิ่งเข้ามาแทนที่แล้วปลดปล่อยพลังงาน

ส่วนเกินออกมาเป็นรังสีเอกซ์ เรียกว่า รังสีเอกซ์แคแรกเทอริสติก (Characteristic X-rays) พลังงานของรังสีเอกซ์ประเภทนี้มีค่าเฉพาะตามการเปลี่ยนแปลงระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนและเป็นค่าเฉพาะของเป้าแต่ละชนิด



ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ

(ที่มา : สืบค้นเมื่อวันที่ 2 มกราคม 2565. จาก https://www.brainkart.com/article/X-ray-spectra---continuous-and-characteristic-X-ray-spectra_2935/)

2.4.1 การประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ทางการแพทย์

ตั้งแต่การค้นพบของ Prof. Wilhelm Röntgen's ว่า รังสีเอกซ์สามารถบอกรูปร่างของกระดูกได้ รังสีเอกซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพในการแพทย์ นำไปสู่สาขาที่เรียกว่ารังสีวิทยา โดยนักรังสีวิทยาได้ใช้ภาพถ่ายทางรังสี (radiography) มาใช้ช่วยในการการวินิจฉัยโรค รังสีเอกซ์มักถูกนำมาใช้ในการตรวจหาสภาพทางพยาธิวิทยาของกระดูกและสามารถหาความผิดปกติของโรคบางโรคที่เป็นที่เนื้อเยื่อทั่วไปได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป เช่นการถ่ายภาพปอด ซึ่งสามารถบอกถึงความผิดปกติได้หลายโรค เช่น โรคปอดบวม (pneumonia) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) หรือน้ำท่วมปอด (pulmonary edema) รวมถึงการถ่ายภาพช่องท้องเช่น การตรวจภาวะอุดตันในลำไส้เล็ก ภาวะลมหรือของเหลวคั่งในช่องท้อง ในบางครั้งยังใช้ในการตรวจหามันในถุงน้ำดี หรือนิวไนกระเพาะปัสสาวะได้ รวมทั้งในบางกรณีสามารถใช้ในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อบางชนิด เช่น สมองและกล้ามเนื้อ (เขาวโซติ วิชาญศิริ, 2560)

2.4.2 ผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต (เชาว์โชติ วิชญาศิริ (2560))

เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในระบบของสิ่งมีชีวิตจะทำให้เกิดกระบวนการหลายอย่างตามมา ซึ่งสามารถแยกกระบวนการเหล่านี้ออกเป็นหมวดหมู่ได้ตามเวลาดังนี้

1. ฟิสิกส์คอลเฟส (physical phase) เริ่มตั้งแต่การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค ประจุและอะตอมของสารประกอบของเนื้อเยื่อ อิเล็กตรอนใช้เวลาประมาณ 10 – 18 วินาที เพื่อเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารพันธุกรรม (DNA) และประมาณ 10 - 14 วินาที เพื่อเคลื่อนผ่านเซลล์ การถ่ายเทพลังงานในระยจะนี้เป็นได้ 2 แบบ

1) ไอออนไนเซชัน (ionization) คือ การเกิดอันตรกิริยาทำให้เกิดการแตกตัว และอิเล็กตรอนในวงโคจร (orbital electrons) หลุดออกมา

2) เอกไซต์เทชัน (excitation) คือ การทำให้อิเล็กตรอนมีระดับพลังงานสูงขึ้น

2. เคมีคอลเฟส (chemical phase) เป็นระยะที่อะตอมหรือโมเลกุลที่เสียหาย เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับองค์ประกอบภายในเซลล์ การเกิดไอออนไนเซชันและเอกไซต์เทชันทำให้อิเล็กตรอนเสียหายเนื่องจากพันธะเคมีถูกทำลายเกิดเป็นอนุมูลอิสระ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 10^{-6} วินาที

3. ไบโโอลจิคคอลเฟส (biological phase) เป็นขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา หลังจากเกิดการเสียหายของโมเลกุลที่สำคัญ คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างและหน้าที่ของโมเลกุล ปกติร่างกายจะมีกระบวนการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้น แต่ถ้าความเสียหายนั้นมีมากเกินไปที่จะซ่อมแซมได้หรือมีการซ่อมแซมแบบผิด ๆ จะทำให้โมเลกุลนั้นไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ผลที่ตามมาคือจะเกิดการตายของเซลล์หรือเนื้อเยื่อ หรือเกิดการผ่าเหล่า ซึ่งอาจจะใช้เวลานานเป็นปี ๆ จึงจะสังเกตผลได้ ดังนั้นระยะเวลาของขั้นตอนนี้จึงไม่แน่นอน อาจใช้เวลาเป็น นาที ชั่วโมง หรือชั่วอายุ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลที่ศึกษา

ตารางที่ 2.5 แสดงการรับปริมาณกัมมันตภาพรังสีและผลกระทบต่อร่างกาย (สัจจพล พงษ์ภมร, 2554)

ปริมาณกัมมันตภาพรังสี	ผลกระทบต่อร่างกาย
20 Sv	มีผลต่อประสาทรับรู้ และเกิดอาการอ่อนอย่างรุนแรงจากนั้นจะเสียชีวิตภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังรับรังสี
10 Sv	ทำลายอวัยวะภายใน เลือดออกภายใน ความเสี่ยงที่จะเสียชีวิตในเวลาเป็นวันหรือประมาณ 2 สัปดาห์
6 Sv	เจ้าหน้าที่ที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เซอร์โนบิลได้รับและเสียชีวิตภายใน 1 เดือน

ตารางที่ 2.5 แสดงการรับปริมาณกัมมันตภาพรังสีและผลกระทบต่อร่างกาย (ต่อ)

ปริมาณกัมมันตภาพรังสี	ผลกระทบต่อร่างกาย
5 Sv	ถ้าได้รับรังสีอย่างเฉียบพลันเพียงครั้งเดียว ส่งผลให้พิการไปครึ่งร่าง
1 Sv	เกิดการเจ็บป่วยอันเนื่องมาจากรังสี และมีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในโอกาสหลัง แต่ไม่ถึงขั้นเสียชีวิต
750 mSv	ผมร่วงภายใน 2 สัปดาห์หลังจากได้รับรังสี
700 mSv	อาเจียนภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังจากได้รับรังสี
400 mSv	เป็นอัตรารังสีต่อชั่วโมงที่มากที่สุดตรวจวัดได้ที่โรงไฟฟ้าฟูกูชิมะ เมื่อวันที่ 14 มี.ค. 2554
350 mSv	อัตรารังสีที่เมืองเชอร์โนบิลได้รับก่อนอพยพออกจากเมือง
100 mSv	อัตรารังสีที่กำหนดสำหรับคนทำงานด้านรังสีที่ให้สะสมได้ไม่เกิน 5 ปี โดยถ้าได้รับเฉียบพลันมีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งในภายหลัง
10 mSv	รังสีที่ได้รับจากการทำซีทีสแกน 1 ครั้ง
9 mSv	รังสีที่ถูกหรือสายการบินที่บินผ่านขั้วโลกเหนือเส้นทางระหว่างนิวยอร์กซิตีและโตเกียวได้รับในแต่ละปี
2 mSv	รังสีธรรมชาติที่เราได้รับเฉลี่ยต่อปี
1.02 mSv	อัตรารังสีต่อชั่วโมงที่ตรวจพบบริเวณโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะ เมื่อวันที่ 12 มี.ค.2554
0.4 mSv	รังสีที่ได้รับจากเอกซเรย์เต้านมแบบแมมโมแกรม
0.01 mSv	รังสีที่ได้รับจากการเอกซเรย์ฟัน

2.5 การหาค่าการกำบังรังสี

2.5.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โฟตอนจะเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ กับตัวกลาง โดยโฟตอนบางส่วนเกิดการดูดกลืนพลังงานที่ถ่ายเทให้กับตัวกลาง บางส่วนเกิดการกระเจิงในขณะที่เกิดอันตรกิริยา หรือบางส่วนอาจเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ โดยโฟตอนที่ถูกดูดกลืนพลังงาน หรือเกิดการกระเจิงส่งผลให้ปริมาณโฟตอนลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เรียกว่า การลดทอนปริมาณโฟตอน (Attenuation) หรือการลดทอนรังสีซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของตัวกลาง กล่าวคือ เมื่อความหนาของตัวกลางเพิ่มมากขึ้นปริมาณของโฟตอนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะยิ่งลดลง เนื่องจากมีระยะทางให้เกิดการดูดกลืนพลังงาน หรือเกิดการกระเจิงของโฟตอนมากขึ้น สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.1

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\frac{I_0}{I} = \mu x \quad (2.2)$$

เมื่อ	I	คือ	ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุ มีหน่วยเป็น counts per minute (cpm)
	I_0	คือ	ความเข้มของรังสีตกกระทบ มีหน่วยเป็น counts per minute (cpm)
	μ	คือ	สัมประสิทธิ์ของการลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear absorption coefficient) มีหน่วยเป็น (cm^{-1})
	x	คือ	ความหนาของวัสดุ มีหน่วยเป็น cm

ความหนาของแผ่นกำบังรังสีที่ทำให้พลังงานของรังสีลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง (HVL) หาได้จาก

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2.3)$$

เมื่อ $x_{1/2}$ คือ ความหนาครึ่งค่าของวัสดุ มีหน่วยเป็น cm

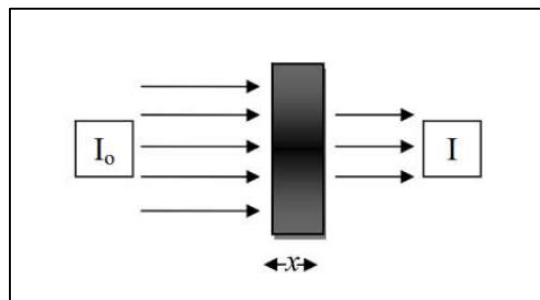
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนอาจแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (mass attenuation coefficient) μ_m ได้ว่า

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

เมื่อ μ_m คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (cm^2/g)
 ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (g/cm^3)

เปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีหาได้จาก

$$X\text{-ray attenuation} = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100 \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.6 การลดทอนของรังสี (จรรยาภรณ์ รักษ์แก้ว, 2563)

2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.6.1 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Specific gravity)

ความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จัดเป็นสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถใช้แปลงจากค่ามวลไปสู่ปริมาตรหรือจากปริมาตรไปสู่มวลได้ สูตรที่ใช้ในการคำนวณนั้นยังสามารถนำไปสู่การหาค่าความพรุนของวัสดุได้อีกด้วย (วีระศักดิ์, 2543)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ หมายถึง ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (kg/m^3)
 m หมายถึง มวลของชิ้นทดสอบ (kg)
 V หมายถึง ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (m^3)

ค่าความถ่วงจำเพาะของสารหรือเรียกว่า เป็นปริมาณที่บอกค่าเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของสารใด ๆ กับค่าความหนาแน่นของน้ำหรืออาจเรียกได้อีกอย่างว่า ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{ความหนาแน่นของสาร}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}} \quad (2.6)$$

2.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบสมบัติแรงดึงนั้น (tensile properties) เป็นการให้แรงกระทำเพื่อดีงตัวอย่างให้ยืดออกในแนวตั้งและวัดผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อใช้แรงดึงด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เครื่องมือทดสอบสมบัติความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเรียกว่าเครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบอัตโนมัติที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและจัดเก็บข้อมูล โดยส่วนใหญ่แล้วการเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐานจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbbell) (รังสิมา, 2552)

ความเค้น (Stress) หมายถึงแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปจากเดิมแรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุแล้วจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น 3 แบบคือความเค้นดึง (tensile stress) ความเค้นอัด (compressive stress) และความเค้นเฉือน (shear stress) (มณฑล, 2540)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

เมื่อ σ หมายถึง ความเค้น มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa)

F หมายถึง แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A หมายถึง พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ในทางวิศวกรรมนิยมนระบุส่วนยืดหรือส่วนหดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการยืดหรือการหดต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำและเรียกอัตราส่วนนี้ว่า "ความเครียด" (มณฑล ฉายอรุณ, 2540)

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.8)$$

เมื่อ ε หมายถึง ความเครียด

L_0 หมายถึง ความยาวเดิมหรือความยาวพักตัวของวัสดุ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

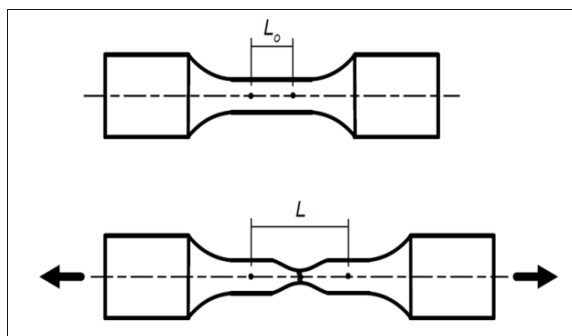
L หมายถึง ความยาวใหม่หลังที่ได้รับแรงภายนอกมากระทำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

ระดับของพฤติกรรมแบบเปราะ-เหนียว สามารถแสดงได้ด้วยค่าการยืดตัวก่อนแตกหัก (Elongation หรือ Ductility) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดออก} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ L_0 คือ ระยะเกจที่ใช้ในการคำนวณ Elongation โดยทำเครื่องหมายลงบนส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด

L คือ ระยะเกจหลักเกิดการแตกหัก โดยนำพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบมาสัมผัสกัน แล้ววัดระยะห่างจากเครื่องหมายข้างต้น ดังภาพ 2.6 (มณฑล, 2540)



ภาพที่ 2.7 แสดงการหาความเครียดของวัสดุ

(ที่มา : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สืบค้นเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2564 จาก <http://somsak.me.engr.tu.ac.th/download/Tensile%20Test.pdf>)

2. ความแข็ง

ความแข็งคือความสามารถของวัสดุที่สามารถต้านทานการเกิดรอยแหว่งหรือบุบสลาย (Indentation) หรือคือความสามารถของวัสดุที่สามารถต้านทานต่อการขีดข่วน (Scratch) ความสามารถทั้งสองนี้จะไม่เหมือนกันโดยค่าความแข็งของวัสดุถูกกำหนดเป็นจำนวนตัวเลขของการทดสอบมาตรฐานแบบต่างๆ (บุญธรรม ภัทรจารุกุล, 2560) โดยจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ทำการวัดความแข็งแบบ Shore Durometer ใช้หัวกดชุบแข็ง สปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 มม.จากผิวของฐานตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่ใช้ชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแนบติดผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆ จุดของ Shore มีค่าเท่ากับ ระยะกด 0.025 อ้างอิงจากมาตรฐาน ISO 868

ค่าความแข็งของยางและพลาสติกจะถูกวัดค่าเป็นหน่วย Shore A หรือ Shore D มีค่าเป็น 0 -100 สเกล A หรือ D พลาสติกที่อ่อนและมีความยืดหยุ่นสูงให้วัดด้วยสเกล A (Shore A) เช่น ยาง อีลาสโตเมอร์ ไวนิล ส่วนยางหรือพลาสติกที่แข็งกว่าจะวัดค่าด้วยสเกล D ตามมาตรฐาน ISO ถ้าวัดยางในสเกล A ได้มากกว่า 90 ให้เปลี่ยนไปใช้สเกล D (เนื่องจากยางอาจจะแข็งไปเมื่อวัดด้วย สเกล A) และในทางกลับกันถ้าวัดด้วยสเกล D ได้น้อยกว่า 20 ให้เปลี่ยนไปใช้สเกล A แทน (วีระชัย, 2550)

2.6.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology studies)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นการศึกษาถึงรูปแบบ โครงสร้างของชิ้นทดสอบ ซึ่งอาจนำไปสู่การทำนายสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ โดยทั่วไปจะศึกษาลักษณะของพื้นผิวของชิ้นทดสอบ และโครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบ การสังเกตโครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบอาจพิจารณาจากบริเวณรอยแตกหัก (Fracture surface) ของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง หรือแรงกระแทก เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์สมบัติทางกล เช่น หากรอยแตกหักของชิ้นทดสอบมีลักษณะที่ค่อนข้างราบเรียบ เนื่องจากเป็นการแตกหักอย่างฉับพลัน สามารถอธิบายได้ว่าชิ้นทดสอบนั้นมีการแตกหักแบบเปราะ (Brittle) และหากรอยแตกหักของชิ้นทดสอบมีลักษณะที่ค่อนข้างขรุขระ เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวกันภายในเนื้อวัสดุที่ต้านการแตกหัก สามารถอธิบายได้ว่าชิ้นทดสอบนั้นมีการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) ทั้งนี้การพิจารณาโครงสร้างภายในอาจบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ (Compatibility) ภายในเนื้อวัสดุผสม รวมไปถึงสามารถบ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างของเซลล์ และรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยภายในเมทริกซ์ (Matrix) อีกด้วย (มลสุดา, 2556)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากวัสดุกำบังรังสี เช่น ตะกั่ว (Pb) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) มีข้อด้อยในเรื่องของความยืดหยุ่นต่ำ ดังนั้นจึงต้องผสมวัสดุกำบังรังสีเหล่านี้กับพอลิเมอร์ เช่นงานวิจัยต่อไปนี้

Kumar, *et.al.*, (2020). ทำการเตรียมคอมโพสิตโพลีเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสำหรับป้องกันรังสีเอกซ์จากยางโพลีไดเมทิลซิลอกเซน อนุภาคนาโนแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และปรับสภาพพื้นผิวโดยใช้ 3-Aminopropyl trimethoxysilane เตรียมด้วยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลาย ผลการวิจัยพบว่าการปรับสภาพพื้นผิวของสารตัวเติมช่วยปรับปรุงการกระจายตัว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์ การศึกษาด้านรังสีเอกซ์ยืนยันว่าการสมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ของโพลีไดเมทิลซิลอกเซนอีลาสโตเมอร์สูงขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโน 3 % w/w

Cherkasov, *et.al.*, (2020). เตรียมวัสดุคอมโพสิตจากเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนโมโนเมอร์ (EPDM) น้ำมันอุตสาหกรรม (IO) เรซินอัลคิลฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (PF) โดยเติมแบไรท์ 52 % ลงใน

วัสดุคอมโพสิต พบว่าการเติม PF ถึง 20 % ในวัสดุคอมโพสิต EPDM/PF นำไปสู่การเพิ่มความแข็งแรง โดยความเข้มข้นของน้ำมันที่เหมาะสมที่สุดในวัสดุคอมโพสิต EPDM/PF/IO จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 45 ถึง 55 % จากการตรวจสอบสมบัติด้านรังสีพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีสมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ที่สูงขึ้น

Plangpleng, *et.al.*, (2020). พัฒนาวัสดุป้องกันรังสีแกมมาจากยางธรรมชาติกับแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) และนาโนคอมโพสิตแบเรียมซัลเฟต ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 50 phr สมบัติการป้องกันรังสีแกมมาถูกวัดด้วยแหล่งกำเนิด ^{57}Co (122.06 keV) และ ^{133}Ba (356.02 keV) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (μ) ค่าการลดทอนมวล (μ_m) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของ $BaSO_4$ ขณะที่ความหนาครึ่งค่า (HVL) ลดลงเมื่ออนุภาคนาโน $BaSO_4$ และ $BaSO_4$ เพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบสมบัติการกำบังระหว่างยางธรรมชาติที่มีอนุภาคนาโน $BaSO_4$ กับ $BaSO_4$ ขนาดธรรมดาพบว่า ยางธรรมชาติที่มีอนุภาคนาโน $BaSO_4$ ให้การกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่า เนื่องจากพื้นผิวต่อปริมาตรของนาโนคอมโพสิตขนาดใหญ่

Fang, *et.al.*, (2020). ทำการเตรียมนาโนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ที่กระจายตัวได้ดี โปร่งใสและเสถียร มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กประมาณ 10 ถึง 17 nm โดยใช้วิธีการตกตะกอนและใช้กรดสเตียริกตัดปปลง จากนั้นเตรียมฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากแบเรียมซัลเฟตและโพลีไวนิลบิวทีเรลแบบโปร่งใส พบว่าฟิล์มมีประสิทธิภาพการป้องกันรังสีเอกซ์ที่ดี

Mungpayaban, *et.al.*, (2022). เตรียมวัสดุคอมโพสิตจากแบเรียมซัลเฟต/อสังฐานเซลลูโลส (Ba/AC) โดยผสมเข้ากับยางธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุป้องกันเอกซ์เรย์ Ba/AC เซลลูโลสอสังฐานได้จากเยื่อคาลิปต์สและเศษกระดาษ พบว่า วัสดุคอมโพสิตที่ผสมเยื่อกระดาษและเยื่อคาลิปต์สมีสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตจากแบเรียมซัลเฟตและยางธรรมชาติ เนื่องจากเซลลูโลสอสังฐานที่ล้อมรอบแบเรียมซัลเฟตช่วยในการกระจายและลดการรวมตัวของอนุภาคแบเรียมซัลเฟต ส่งผลให้ลำแสงเอกซ์เรย์ส่วนใหญ่ถูกดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพ

Mungpayaban, *et.al.*, (2023). การศึกษาส่วนผสมของแบเรียมซัลเฟตและเซลลูโลสอสังฐาน (Ba/AC) สำหรับการลดทอนรังสีเอกซ์ เซลลูโลสอสังฐานได้จากเยื่อคาลิปต์ส จากนั้นใช้สารประกอบแบเรียม (แบเรียมคลอไรด์และสารแขวนลอยแบเรียมซัลเฟต) เพื่อให้ได้ตัวอย่าง Ba/AC ($Ba/AC-BaCl_2$ และ $Ba/AC-BaSO_4$ ตามลำดับ) แล้วศึกษาการลดทอนด้วยรังสีเอกซ์โดยการผสม Ba/AC 20% w/w กับยางซิลิโคน 80% w/w เคลือบส่วนผสมบนผ้าฝ้าย และเปรียบเทียบกับแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) โดยทำการทดลองกับรังสีเอกซ์ที่แรงดันไฟฟ้าของหลอด 30 kV, 40 kV และ 60 kV พบว่าผ้าที่เคลือบด้วย Ba/AC มีประสิทธิภาพการป้องกันรังสีเอกซ์สูงกว่าผ้าที่มี $BaSO_4$ เนื่องจากเซลลูโลสอสังฐานใน Ba/AC ช่วยในการกระจายอนุภาคแบเรียมซัลเฟตทำให้ช่องว่างบน

พื้นผิวผ้าลดลงกว่าเมื่อใช้ BaSO_4 เพียงอย่างเดียว ดังนั้น คอมโพลีต Ba/AC จึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับป้องกันรังสีเอกซ์ได้

ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล และคณะ (2560). ผลิตัวสดุดทอนรังสีเอกซ์ทดแทนโลหะตะกั่วที่มีความยืดหยุ่นโดยใช้พอลิยูรีเทน (PU) อีลาสโตเมอร์เกรดความแข็งซอร์เท่ากับ 60 ผสมกับแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์ขึ้นกับปริมาณสารดูดกลืนรังสีเอกซ์ ความหนาของแผ่นคอมโพลีตและพลังงานของรังสีเอกซ์ จากการทดลองพบว่า ณ พลังงานของรังสีเอกซ์ 60 kV สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงมวลของแผ่นคอมโพลีต PU/BaSO ที่มี BaSO, 50 phr มีค่าเท่ากับ 3.289 cm^{-1} และ $2.401 \text{ cm}^2/\text{g}$ ตามลำดับ

เชาวโชติ วิชญาศิริ (2560). ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยแบเรียมซัลเฟต โดยผงแบเรียมซัลเฟตถูกนำมาผสมกับสารขึ้นและสารยึดติดผ้า โดยใช้แบเรียมซัลเฟต 10 – 50 %w/w ต่อสารขึ้นและสารยึดติด ทำการทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์ที่ระดับพลังงานสูงสุด 50 – 100 kV โดยใช้ผ้าที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน นามาทดสอบภายใต้รังสีเอกซ์ พบว่า ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบแบเรียมซัลเฟตกันรังสีได้ เมื่ออัตราส่วนของแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (μ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อพลังงานสูงสุดของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยแบเรียมซัลเฟตความเข้มข้น 50% w/w สามารถใช้เป็นวัสดุป้องกันรังสีเอกซ์ได้ โดยมีค่าความหนาที่ทำให้รังสีเอกซ์ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้น เท่ากับ 0.1439 0.1502 0.1582 และ 0.1780 cm และ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น เท่ากับ 4.8146 4.6135 4.3813 และ 3.8943 ที่พลังงานรังสีเอกซ์สูงสุด 50 70 80 และ 100 kV ตามลำดับ

เสาวภาคย์ ภูศิริ และคณะ (2562). ทำการประดิษฐ์แผ่นป้องกันรังสีที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติและบิสมัทปริมาณสูง โดยทำการเตรียมตัวอย่างแผ่นยางจากสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัททั้งหมด 6 สูตร คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 phr ตัวอย่างแผ่นยางมีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 5 mm ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนปริมาณรังสีที่ 50 ถึง 120 kVp จากผลการทดลองพบว่าร้อยละการลดทอนปริมาณรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของบิสมัทที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่มีสมมูลตะกั่ว 0.5 mm พบว่าแผ่นยางสูตรที่ผสมตะกั่ว 300 phr ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร มีค่าร้อยละการลดทอนปริมาณรังสีเท่ากับ 97.33 ที่ 100 kVp ซึ่งใกล้เคียงกับกับอุปกรณ์ป้องกันรังสีที่มีความหนาสมมูลตะกั่ว 0.5 mm และเมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทเป็น 400 และ 500 phr ประสิทธิภาพการลดทอนปริมาณรังสีได้ดีกว่าอุปกรณ์เปรียบเทียบที่มีความหนา 3 mm

จริยาภรณ์ รักษ์แก้ว (2563). ศึกษาผลของอัตราส่วนพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride : PVC) ผงไม้และบิสมัทคลอไรด์ (Bismuth chloride: BiCl_3) โดยทำการปรับสภาพผงไม้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M และกรดซิตริก ความเข้มข้น 1 M ร่วมกับบิสมัทคลอไรด์

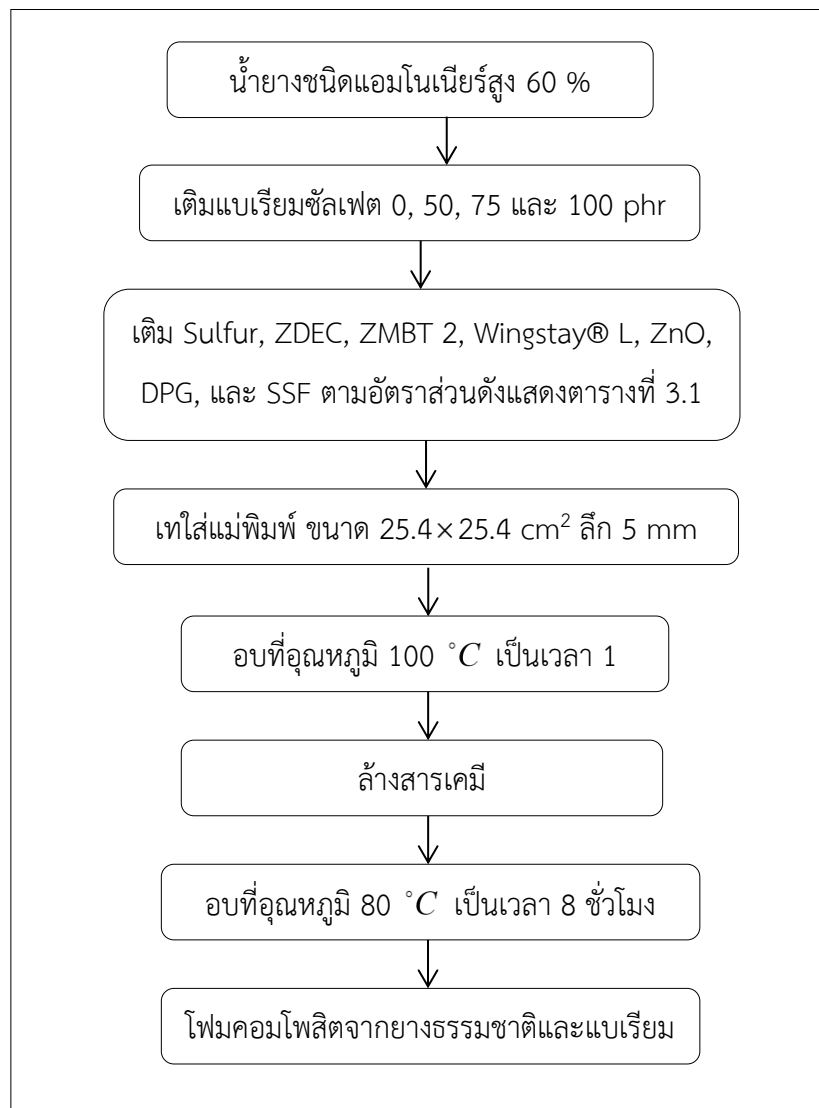
ในอะซิโตนปริมาตร 700 ml และทดสอบสมบัติการป้องกันรังสีแกมมา พบว่าการเติมสารบิสมัทคลอไรด์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา

ศิริลักษณ์ อินต้อม. (2562). เตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีโดยพบว่าสถานะที่เหมาะสมคือ การใช้ยางธรรมชาติผสมกับบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 phr ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ที่ดีซึ่งโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี เลขอะตอมยังผล (Zer) ความหนาแน่นอิเล็กตรอน ความหนาแน่นครีงค่า (HVL) และความหนาแน่นเทียบเท่าตะกั่ว และเมื่อเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่น ๆ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ และมีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์

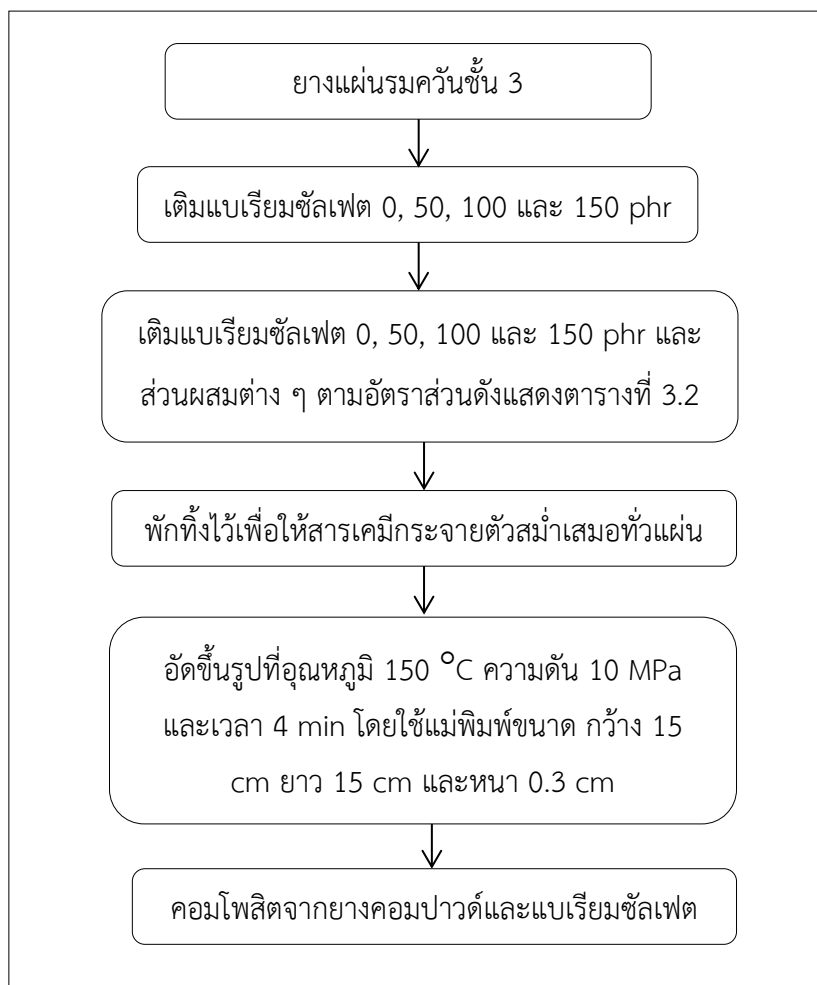
ผกามาศ ลิ้มอรุณ และเอกชัย วิมลมาลา (2562). พัฒนาวัสดุกำบังรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เกรด STR 5L ผสมร่วมกับสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, ADC) และ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide, OBSH) ที่ปริมาณ 0, 8 และ 16 phr และมีการผสมสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) ที่ปริมาณ 0, 100, 300 และ 500 phr ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารทำให้เกิดฟองส่งผลทำให้สมบัติการกำบังรังสีของวัสดุลดลง แต่เมื่อเติมสารบิสมัทออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าวัสดุมีความสามารถในการกำบังรังสีสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างวัสดุที่มีการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่า การเติมสาร ADC ส่งผลให้มีสมบัติโดยรวมดีกว่าวัสดุที่มีการเติมสารชนิด OBSH

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเพื่อเตรียมวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟต มีสาระสำคัญเกี่ยวกับกระบวนการทำงานทั้งหมดตั้งแต่กระบวนการการขึ้นรูปโฟม กระบวนการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน และการสร้างต้นแบบวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ที่ยืดหยุ่นได้ปราศจากสารตะกั่วที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลัก โดยได้ทำการวิจัยดังขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 3.2 แผนผังแสดงกระบวนการเตรียมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซิลิเฟต

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 น้ำยางชั้น 60% ชนิดแอมโนเนียร์สูง และยางอแผ่นรมควันชั้น 3 เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตโฟมคอมโพสิต จากศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยียางเพื่อชุมชน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

3.1.1.2 แบเรียมซิลิเฟต เป็นตัวเติมในการผลิตโฟมคอมโพสิต จากบริษัทวิโรฒวิทยา ภัณฑ์จำกัด

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องผสมอาหารซาร์ป รุ่น EMS-52 มีกำลังไฟฟ้า 320 วัตต์ ผลิตโดยบริษัท
กรุงไทยการไฟฟ้า จำกัด

3.1.2.2 เครื่องบดตัวอย่างรุ่น SK300 ยี่ห้อ Retsch ผลิตโดยบริษัทไซแอนติฟิก
โปรโมชัน

3.1.2.3 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ผลิตโดยบริษัทเพอร์เคม จำกัด

3.1.2.4 เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น GX-02 ยี่ห้อ TECLOCK ผลิตโดยบริษัทเพอร์เคม
จำกัด

3.1.2.5 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ รุ่น BSA Series ยี่ห้อ Sartorius ผลิตโดยบริษัท
เพอร์เคม จำกัด

3.1.2.6 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน รุ่น SV-20 ผลิตโดยบริษัทหงส์ยาวไทย จำกัด

3.1.2.7 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (StereoOptical Microscope) รุ่น SZ40 ยี่ห้อ
OLYMPUS

3.1.2.8 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ BINDER

3.1.2.9 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ผลิตโดยบริษัทหงส์ยาวไทย จำกัด

3.1.2.10 เครื่องนำหนังกัดจิตอล 2 ตำแหน่ง

3.1.2.11 ไดอัลเกจวัดความหนา รุ่น SM-112 ผลิตโดยบริษัท เพอร์เคม จำกัด

3.1.2.12 แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 25.4×25.4 cm² ความหนา 2, 6, และ 15 mm

3.1.2.13 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมวัตถุดิบ เช่น กรรไกร คัตเตอร์ ปีกเกอร์ กะละมัง
ถาดอะลูมิเนียม เป็นต้น

3.1.2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta
450 FEG

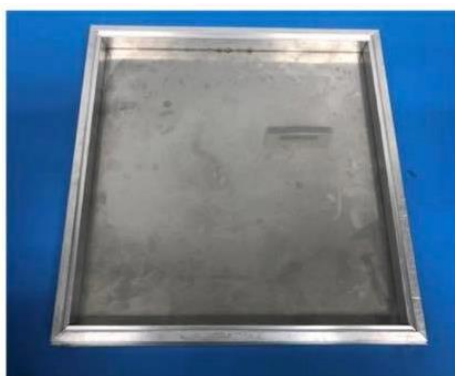
3.1.2.15 เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป (General X-ray Machine) ยี่ห้อ CANON รุ่น
MRAD-A32Sและเครื่องวัดปริมาณรังสียี่ห้อ Unfors RaySafe รุ่น RaySafe X2



ภาพที่ 3.3 เครื่องผสมอาหาร



ภาพที่ 3.4 ตู้อบลมร้อน



ภาพที่ 3.5 แผ่พิมพ์ขนาด $25.4 \times 25.4 \text{ cm}^2$ ลึก 5 mm



ภาพที่ 3.6 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง



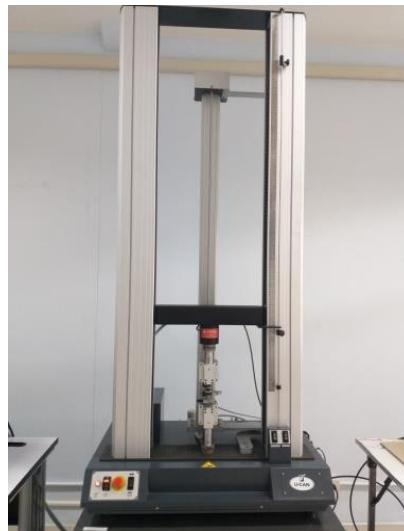
ภาพที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปรีออน



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง



ภาพที่ 3.11 เครื่องวัดความหนา



ภาพที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



ภาพที่ 3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบ 2 ตำแหน่ง



ภาพที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 3.15 เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป



ภาพที่ 3.16 เครื่องวัดปริมาณรังสี

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.3.1 กำมะถัน (Sulfur dispersion) 50% เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป

3.1.3.2 ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc diethyldithiocarbamate dispersion, ZDEC) 50% เป็นสารตัวเร่งให้ยางสุก

3.1.3.3 ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Zinc 2-mercaptobenzthiozolate, ZMBT) 50% เป็นสารตัวเร่งให้ยางสุก

3.1.3.4 ออกซิเดชันวังก์สเตอร์ แอล (Wingstay® L antioxidant dispersion) 50% เป็นสารกันยางเสื่อม

3.1.3.5 โพแทสเซียม (Potassium oleate) 20% เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง

3.1.3.6 ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) 30% เป็นสารตัวเร่งให้ยางสุก

3.1.3.7 โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) 20% เป็นสารที่ช่วยให้เกิดฟองจับตัว

3.1.3.8 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) 50% เป็นสารกระตุ้นตัวเร่ง

3.1.3.9 กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมปาวด์

3.1.3.10 น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) ช่วยให้ส่วนผสมของวัตถุดิบให้เข้ากันได้ง่าย

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติผสมแบเรียมซิลิเกต

การเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติผสมแบเรียมซิลิเกต ประกอบไปด้วยการศึกษาปริมาณสารแบเรียมซิลิเกตที่มีต่อสมบัติทางกาย และสมบัติเชิงกลของโฟมคอมโพสิต ซึ่งเตรียมโดยใช้สัดส่วนตามตาราง 3.1 ดังนี้

1. นำน้ำยางข้น 60% มากวนด้วยเครื่องผสมอาหารเพื่อไล่แอมโมเนียเป็นเวลา 2 นาที
2. เติมสาร Potassium oleate 20% 2 phr ผสมแบเรียมซิลิเกต ปริมาณ 0, 50, 75 และ 100 phr ตามลำดับ ลงไปผสมในส่วนผสมซ้ำ ๆ และทำการกวนส่วนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาที (ปริมาตรเริ่มต้น)
3. เติมสาร Sulfur 50% ปริมาณ 2 phr และ ZDEC 50% 2.5 phr ลงไปในน้ำยางข้นแล้วทำการกวนด้วยเครื่องผสมอาหารเป็นเวลา 2 นาที (กวนเพื่อให้สารเคมีกระจายและทำให้เกิดฟอง)
4. จากนั้นเติมสาร ZMBT 50% ปริมาณ 2 phr ลงไปในส่วนผสมอย่างช้า ๆ แล้วกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที (กวนเพื่อให้สารเคมีกระจายและทำให้เกิดฟอง)
5. เติมสาร Wingstay® L 50% 1 phr กรั่มลงไปในส่วนผสมแล้วกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จะทำให้เกิดฟองที่ปริมาตร 3 เท่าของปริมาตรเริ่มต้น
6. เติมสาร ZnO 50% ปริมาณ 5 phr และ DPG 40% ปริมาณ 2 phr ลงในส่วนผสมแล้วกวนต่ออีก 2 นาที
7. จากนั้นเติมสาร SSF 20% ปริมาณ 0.5 phr ลงในส่วนผสมแล้วทำการกวนเป็นเวลา 30 วินาที จนได้เป็นโฟมเหลว

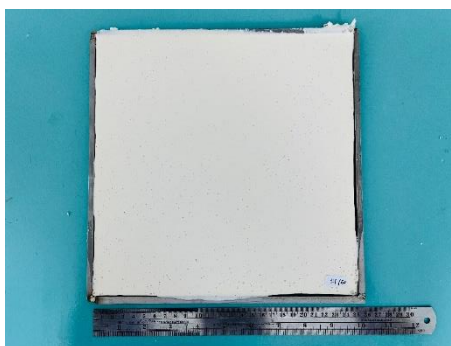
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมในการเตรียมโคมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

Ingredients	Total solid content (%)	Dry weight (phr)
HA latex	60	100
S	50	2
ZDEC	50	2.5
ZMBT	50	2
Wingstay® L	50	1
ZnO	50	5
DPG	40	2
SSF	20	0.5
BaSO₄ (phr)	0 , 50 ,75, 100	

8. นำโคมเหลวมาเทใส่แม่พิมพ์ แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เมื่อครบเวลาวางแม่พิมพ์ไว้ในตู้ 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกมาให้เย็นตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาทีแล้วจึงนำแผ่นโคมออกจากแม่พิมพ์)

9. หลังจากนั้นนำโคมมาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนให้สะอาดเพื่อกำจัดสารเคมีที่ตกค้างอยู่

10. นำโคมที่ล้างสะอาดแล้วมาอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำโคมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล



ภาพที่ 3.17 โคมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟต

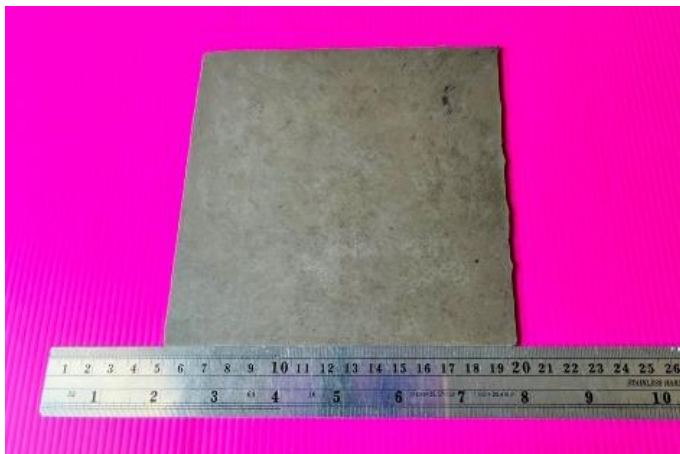
3.2.2 การเตรียมแผ่นยางคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟต

แผ่นยางคอมโพสิตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟตเตรียมจากยางคอมปาวด์ผสมกับแบเรียมซัลเฟตปริมาณ 0, 50, 100 และ 150 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. บดผสมยางธรรมชาติกับผงแบเรียมซัลเฟตและสารเคมีอื่น ๆ ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) 20 นาที
2. รีดยางคอมโพสิตเป็นแผ่นพักทิ้งไว้เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วแผ่นยาง
3. นำแผ่นยางคอมโพสิตมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 10 MPa และเวลา 4 min. โดยใช้แม่พิมพ์ขนาด กว้าง 15 cm ยาว 15 cm และหนา 0.3 cm เมื่อขึ้นรูปเสร็จได้ตัวอย่างแผ่นยางคอมโพสิตดังแสดงในภาพที่ 3.18 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการเตรียมโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

Ingredients	Dry weight (phr)
RSS#3	100
ZnO	5
Stearic acid	1
Wingstay® L	1
Paraffinic oil	5
S	2
ZMBT	1
ZDEC	0.25
BaSO₄ (phr)	0 , 50 ,100, 150



ภาพที่ 3.18 ตัวอย่างแผ่นยางคอมโพลีตจากยางธรรมชาติผสมแบเรียมซัลเฟตเตรียม

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของโพล

1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่น

การทดสอบความถ่วงจำเพาะจำทำการตัดตัวอย่างที่ขนาดกว้าง 2 cm x 2 cm และความหนา 5 mm โดยจะใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ ซึ่งทำโดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ โดยทำการทดลองสุตรละ อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง การทดสอบหาความหนาแน่นจะทำโดยการหาความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำมาใช้สูตรในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ 1

2. การศึกษาสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุจะศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Stereo Optical Microscope) โดยตรวจสอบภาพผิวหน้าและภาพตัดขวางของตัวอย่าง โดยทำการตัดชิ้นงานให้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีความกว้างเท่ากับ 2 cm และถ่ายภาพที่กำลังขยายต่าง ๆ กัน

3. การทดสอบความแข็ง

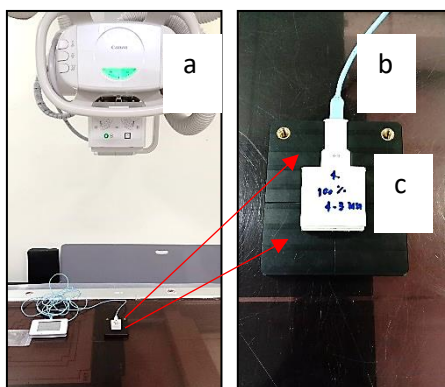
ทดสอบความแข็งของชิ้นงาน มาตรฐาน ASTM D 2240 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ shore A ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ shore A โดยตัดชิ้นงานขนาดประมาณ 2x3 cm² ความหนาประมาณ 5 mm จากนั้นให้หวักดกดยางค้างไว้ 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็งที่ได้ โดยทำการวัดความแข็งและหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 3 ตำแหน่งจาก 3 ตัวอย่าง

4. การทดสอบแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด

เตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM 412 โดยนำตัวอย่างมาตัดเป็นรูปดัมเบล โดยใช้มีดตัดแบบ die C แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึงที่อัตราการดึง 500 mm/min ที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบสมบัติแรงดึงเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) โดยทำการหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 5 ตัวอย่างในแต่ละตัวอย่าง

5. การทดสอบสมบัติด้านรังสีเอกซ์

สมบัติด้านรังสีเอกซ์ทดสอบ ณ. โรงพยาบาลไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยใช้เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป ยี่ห้อ CANON รุ่น MRAD-A32S ที่ความต่างศักย์ 60-100 kVp ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ใช้ด้านรังสีวินิจฉัย และใช้กระแสไฟฟ้า 200 mA ทำการฉายรังสีเอกซ์แก่ตัวอย่างเป็นเวลา 0.05 s แล้ววัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัดอุปกรณ์วัดปริมาณรังสี ยี่ห้อ Unfors RaySafe รุ่น RaySafe X2 ยี่ห้อ RAYSAFE รุ่น X2 หมายเลขเครื่อง 249560 ขณะทำการทดลองตัวอย่างวางห่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ 1 m ดังภาพ



ภาพที่ 3.19 การทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์ (a) เครื่องเอกซเรย์วินิจฉัยทั่วไป , (b) เครื่องวัดอุปกรณ์วัดปริมาณรังสี และปริมาณรังสีเอกซ์, (c) ตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนรังสีเชิงเส้น สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ความหนาครึ่งค่า และเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ คำนวณได้จากสมการ (2.2) (2.4) (2.3) และ (2.5) ตามลำดับ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุกำบังรังสีเอกซ์ปลอดสารตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติ ผสมกับแบเรียมซัลเฟตโดยใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุ 2 ชนิด คือน้ำยางธรรมชาติและยางคอมปาวด์ สำหรับน้ำยางธรรมชาติจะถูกนำมาผสมกับแบเรียมซัลเฟตและขึ้นรูปเป็นโฟมยางด้วยวิธีการดันลอป (Dunlop Process) ขณะที่ยางคอมปาวด์จะถูกนำมาผสมกับแบเรียมซัลเฟตและขึ้นรูปเป็นแผ่นยาง ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบ 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ลักษณะ สันฐานวิทยาและสมบัติด้านรังสีของวัสดุคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต ผลการ ทดสอบและวิเคราะห์ผลแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์โฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต โดย การขึ้นรูปเป็นโฟมคอมโพสิตขนาด $25.4 \times 25.4 \text{ cm}^2$ หนา 0.5 cm จำนวน 4 สูตร คือ ที่ปริมาณ แบเรียมซัลเฟต เป็น 0, 50, 75, และ 100 phr จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการ ทดสอบเป็นดังนี้

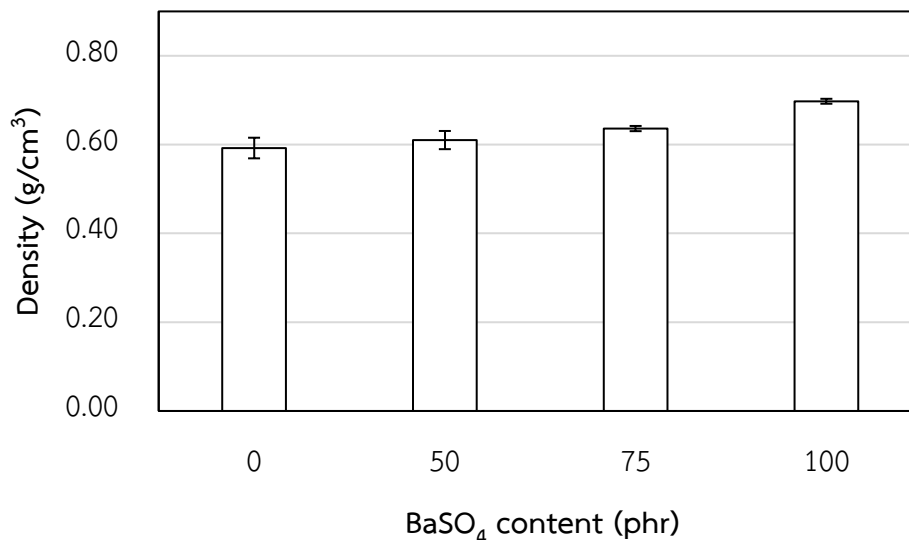
4.1.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยาง ธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง โดยนำตัวอย่าง มาชั่งน้ำหนักในอากาศและชั่งน้ำหนักในน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ จากนั้น คำนวณความหนาแน่นของตัวอย่างโดยทำการทดลองซ้ำสูตรละ 3 ตัวอย่าง ผลของปริมาณแบเรียม ซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของโฟมคอมโพสิตจากน้ำ ยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความหนาแน่นของตัวอย่าง (g/cm^3)
0	0.59 ± 0.02
50	0.61 ± 0.02
100	0.64 ± 0.01
150	0.70 ± 0.01

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

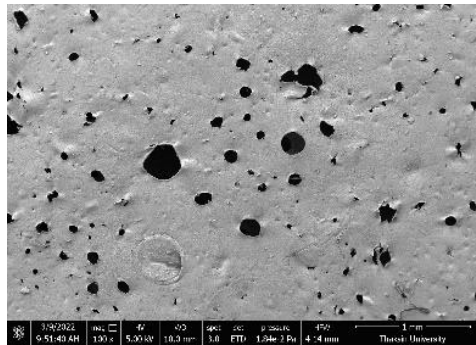


ภาพที่ 4.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

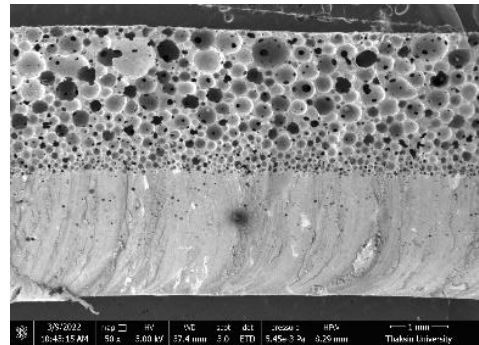
จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต พบว่า ความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตมีค่าอยู่ในช่วง 0.59-0.70 g/cm³ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อเติมแบเรียมซัลเฟต 100 phr คือ 0.70 g/cm³ เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตมีความหนาแน่นมากกว่ายาง เมื่อเพิ่มแบเรียมซัลเฟตเข้าไปในส่วนผสมแบเรียมซัลเฟตจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างภายในเนื้อโพลี ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

4.1.2 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา

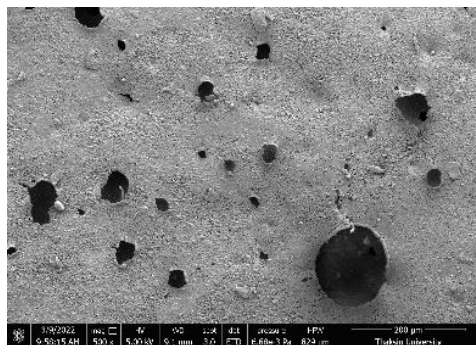
ลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของวัสดุจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น เช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด ลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตรวจสอบทั้งบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของตัวอย่าง ลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของโพลีคอมโพสิต แสดงดังภาพที่ 4.2



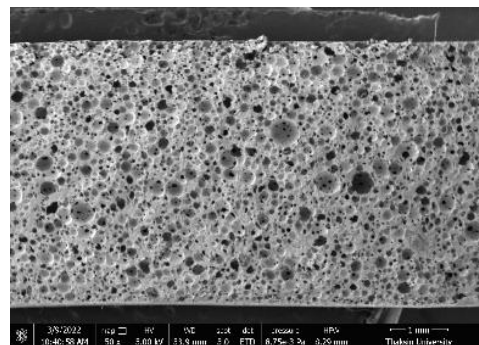
(ก)



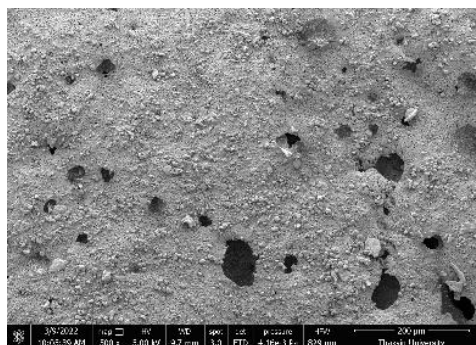
(ข)



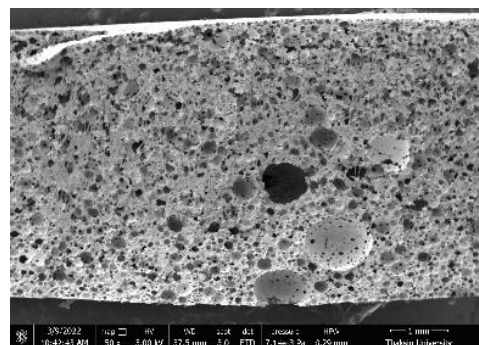
(ค)



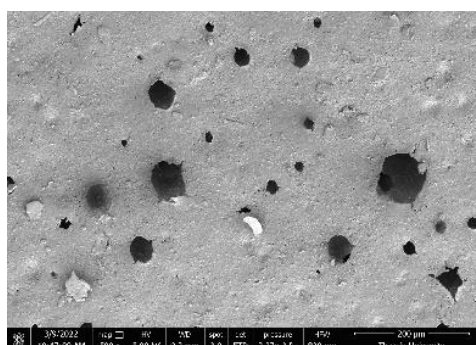
(ง)



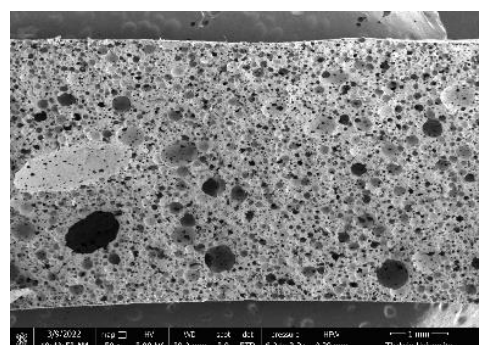
(จ)



(ฉ)



(ช)



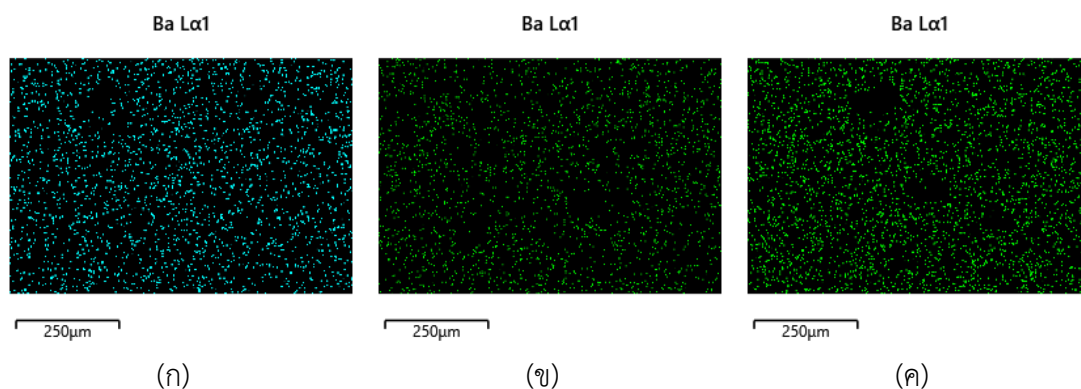
(ซ)

ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้า (ซ้าย) และภาคตัดขวาง (ขวา) ของโฟมคอมโพสิต จากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซิลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซิลเฟต (ก), (ข) 0 phr ; (ค), (ง) 50 phr ; (จ), (ฉ) 75 phr และ (ช), (ซ) 100 phr.

จากภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะสัมพันธ์วิทยาระหว่างผิวหน้าและภาคตัดขวางของโคมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต พบว่าเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นรูพรุนขนาดเล็กบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างลดลงแต่รูขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ขณะที่โครงสร้างภายในเป็นแบบเซลล์เปิดโดยช่องว่างขนาดเล็กลดลงแต่ช่องว่างใหญ่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย การมีแบเรียมซัลเฟตในเนื้อวัสดุปริมาณมากส่งผลให้โคมเหลวจับตัวเป็นของแข็งเร็วขึ้นและเนื้อวัสดุมีลักษณะแน่นขึ้น การที่กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลบริเวณที่มีอากาศอยู่ภายในระเหยออกไม่ทันจึงเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่แน่นขึ้นและมีช่องว่างขนาดใหญ่กระจายอยู่ในวัสดุเล็กน้อยส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น และยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง

4.1.3 ผลของการแปรปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อการกระจายตัวและปริมาณการกระจายตัวของธาตุของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

การกระจายตัวของสารในวัสดุคอมโพสิตส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต เพราะถ้าวัสดุมีการกระจายตัวของสารที่ดีเมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุจะทำให้เกิดการส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้วัสดุรับแรงได้ดี ซึ่งการกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อการกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.3 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในโคมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่างกัน (ก) 50 phr (ข) 75 phr และ (ค) 100 phr.

ตารางที่ 4.2 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตโพลีเอทิลีนที่มียางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตต่างกัน

องค์ประกอบ	ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)			
	0	50	75	100
C	83.07	84.02	71.27	76.41
Ba	-	6.82	8.78	9.33
O	6.66	4.78	15.98	9.61
S	1.37	2.96	2.79	3.45
Zn	3.18	1.16	0.84	1.21
อื่น ๆ	5.71	0.26	0.34	-

ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า เมื่อปริมาณของแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกระจายตัวของสารจะลดลง เนื่องจากปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การผสมสารเข้ากับยางธรรมชาติได้ยากขึ้นและทำให้แบเรียมซัลเฟตเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง (Agglomeration) มากกว่าที่จะกระจายตัวในยางธรรมชาติซึ่งบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติลดลง ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรปริมาณของแบเรียมซัลเฟต จากตารางจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณของแบเรียมซัลเฟตในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณแบเรียมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแบเรียมส่งผลต่อสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์เนื่องจากแบเรียมสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานในช่วงของรังสีเอกซ์ ดังนั้นเมื่อปริมาณแบเรียมที่เพิ่มขึ้นตัวอย่างจึงลดทอนรังสีเอกซ์ได้มากขึ้น

4.1.4 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

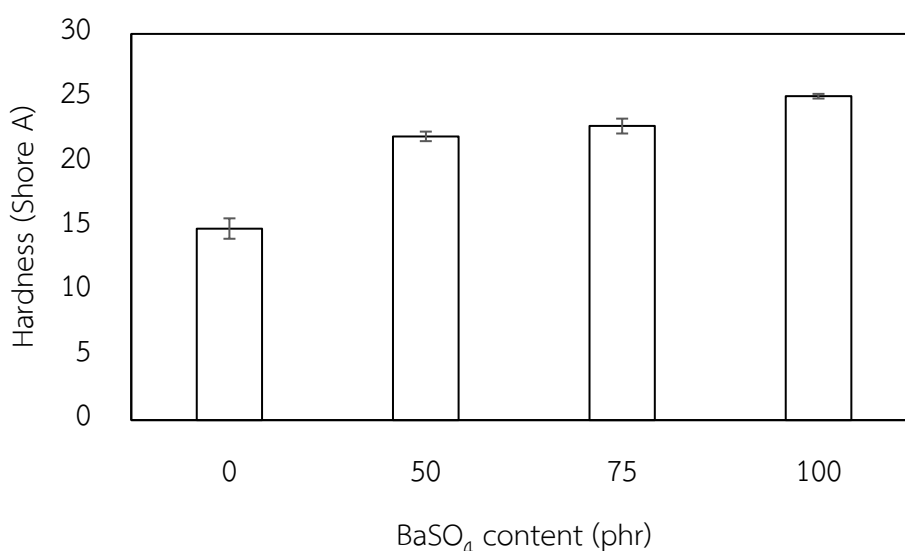
4.1.4.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและสารแบเรียมซัลเฟต โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งยาง (Shore Durometer) ชนิด Shore A โดยทำการวัดความแข็งและหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 5 ตำแหน่งจาก 3 ตัวอย่างในแต่ละสูตร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความแข็ง (Shore A)
0	14.88 ± 0.08
50	22.04 ± 0.04
100	22.84 ± 0.06
150	25.16 ± 0.02

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต พบว่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตมีค่าอยู่ระหว่าง 14.88-25.16 Shore A เห็นได้ว่าคุณค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณสารเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความแข็งจะมากที่สุดที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 100 phr คือ 25.16 Shore A เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตเป็นสารที่มีอนุภาคแข็งจึงช่วยเพิ่มการเชื่อมขวางภายในโพลีคอมโพสิต (Zhao *et al.*, 2011) และส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกเคลื่อนที่ได้ลดลง (ศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562) ทำให้ความหนาแน่นและความแข็งของโพลีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kalkornsurapranee *et al.*, 2021 และ Toyen *et al.*, 2018)

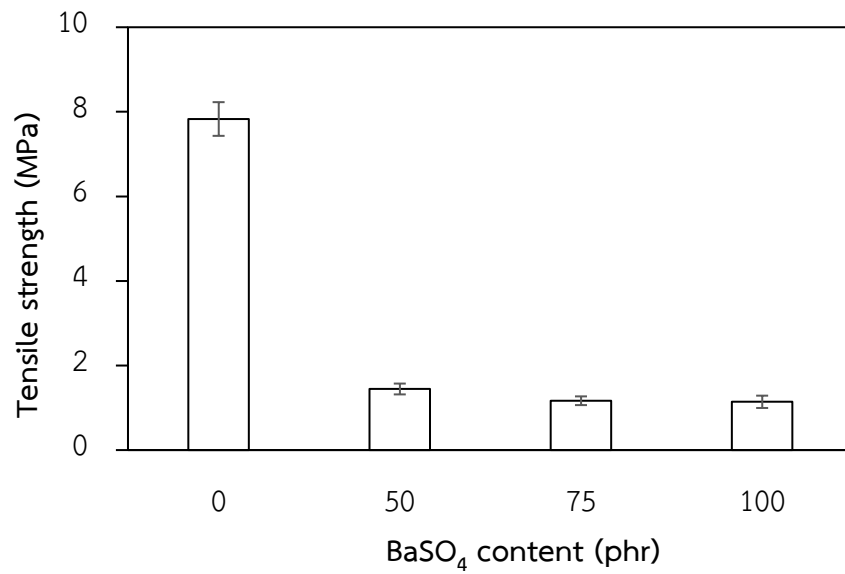
4.1.4.2 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด

ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด วัดด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine) โดยทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวตาม ณ จุดขาด มาตรฐาน ISO37-1 และทดสอบความต้านทานการฉีกขาดตามมาตรฐาน ISO30-1 ทำการทดลองซ้ำ 3 ตัวอย่างในแต่ละตัวอย่าง แสดงผลดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 - 4.6

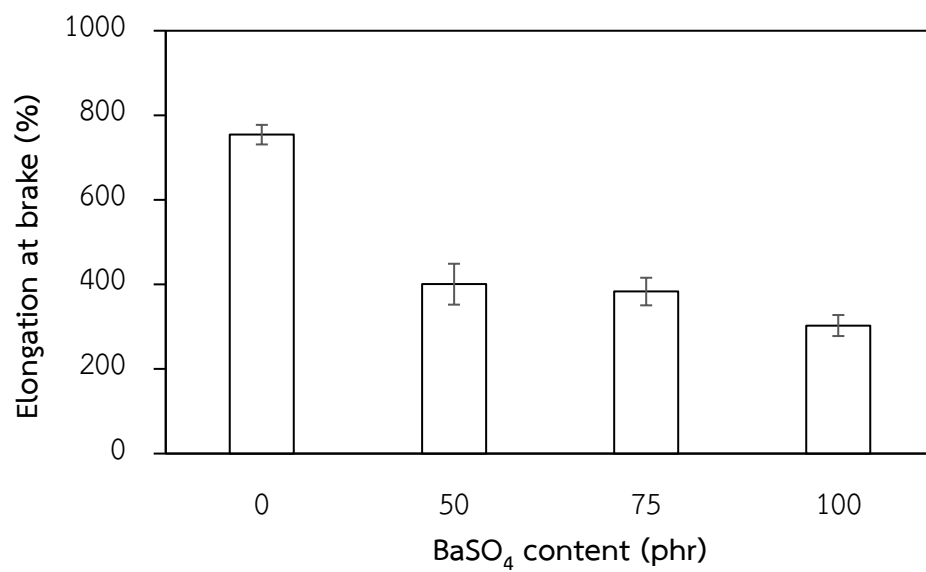
ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความต้านทานการฉีกขาด (kN/m)
0	7.8 ± 0.4	754 ± 23	7.4 ± 0.4
50	1.4 ± 0.1	401 ± 48	5.4 ± 0.2
75	1.2 ± 0.1	383 ± 33	5.2 ± 0.4
100	1.1 ± 0.1	303 ± 25	5.2 ± 0.7

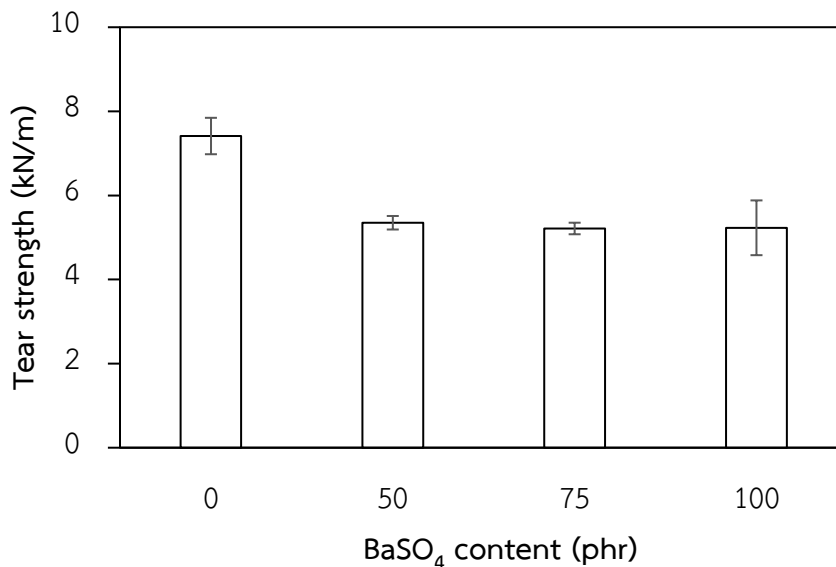
หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.5 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.6 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อการยืดตัว ณ จุดขาดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

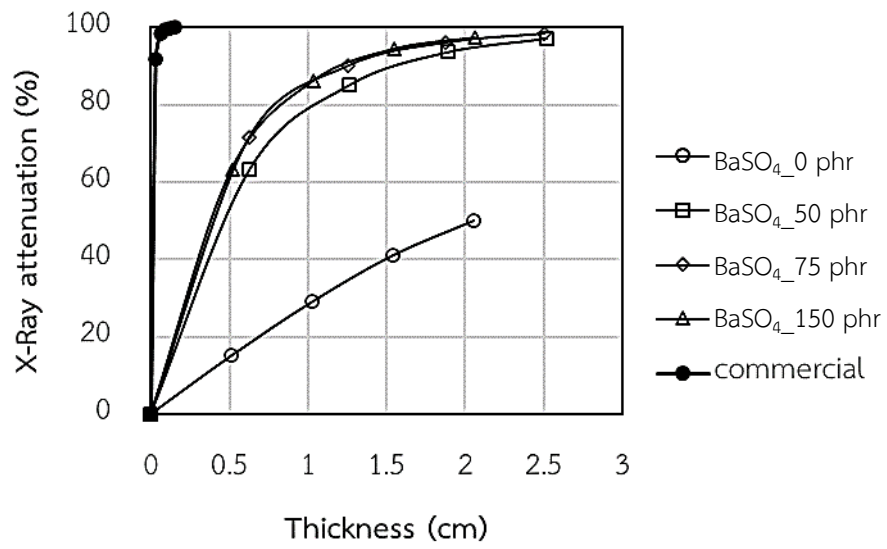


ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานการฉีกขาดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

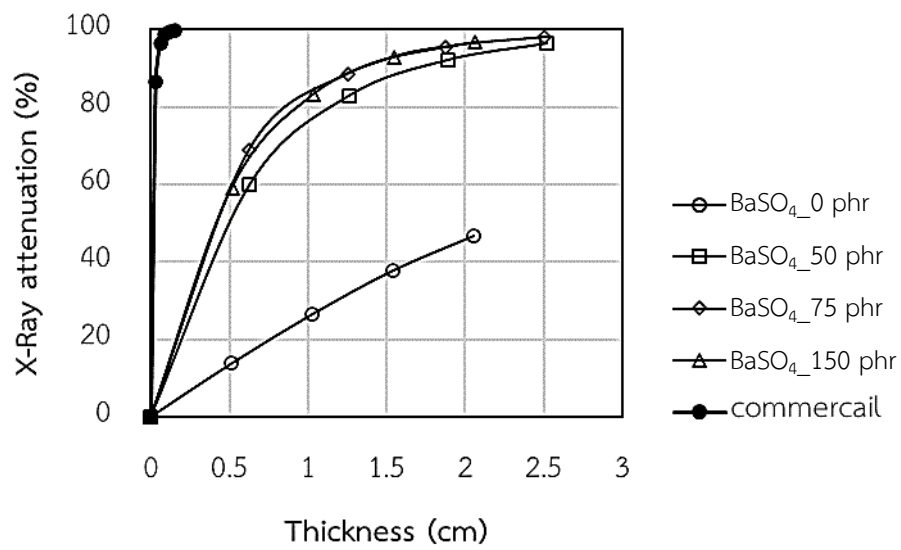
จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4-4.6 แสดงผลของการเติมแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด พบว่า สมบัติเชิงกลทั้ง 3 ชนิดของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต เนื่องจากการเพิ่มอนุภาคแบเรียมซัลเฟตส่งผลให้การกระจายตัวของสารในเนื้อวัสดุน้อยลง ทำให้การส่งผ่านแรงเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่อง บริเวณที่มีการรวมตัวกันของสารจะเป็นบริเวณที่เกิดช่องว่างและไม่สามารถรับแรงได้ วัสดุจึงเกิดการแตกหักหรือฉีกขาดได้ง่ายจึงส่งผลให้ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดลง (ศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562) (Poltabtim *et.al.*, 2018)

4.1.5 ผลของการทดสอบสมบัติทางด้านรังสีของโพลีคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

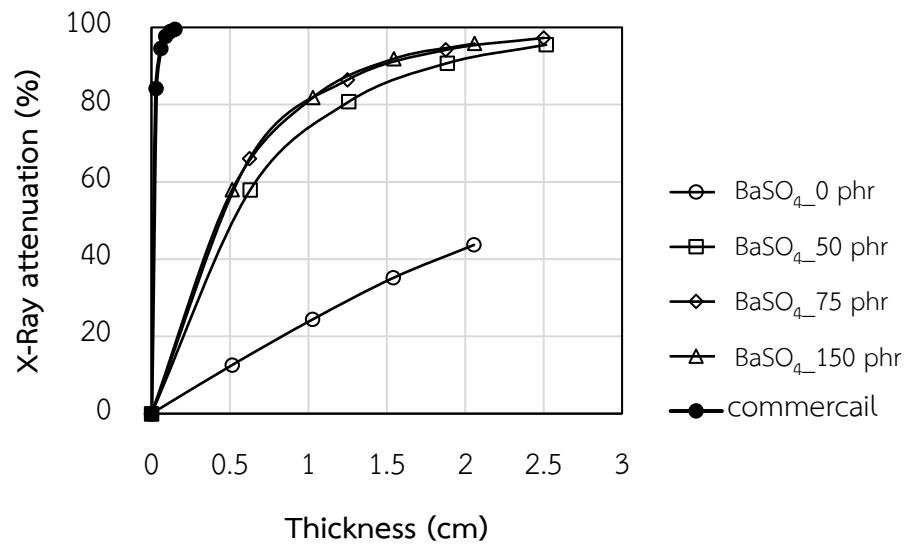
รังสีเอ็กซ์ (X-ray) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยรังสีเอ็กซ์สามารถก่ออันตรายแก่ผู้ใช้งานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีความระมัดระวังในการกำบังรังสีเอ็กซ์ เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีพลังงานในช่วง 60-100 kVp ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในภาพที่ 4.8 - 4.11



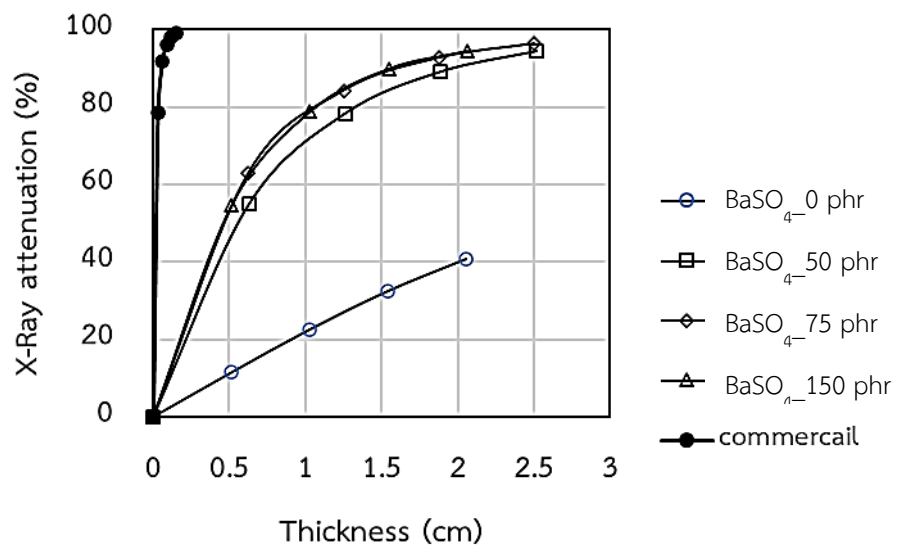
(n)



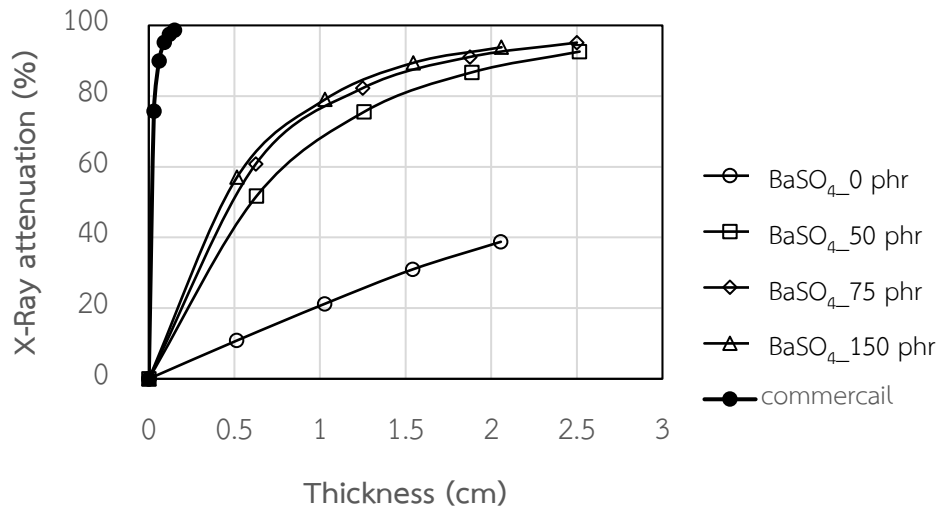
(o)



(a)



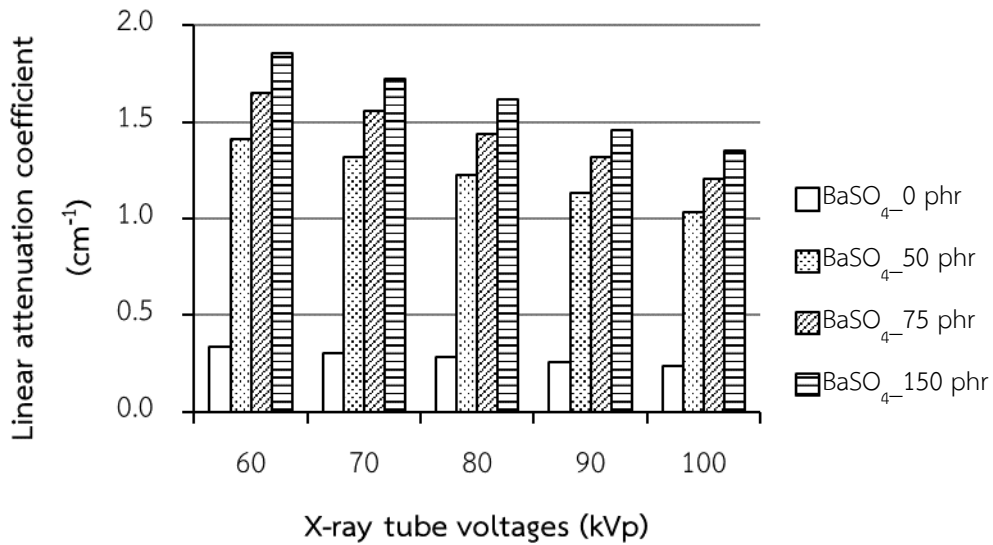
(b)



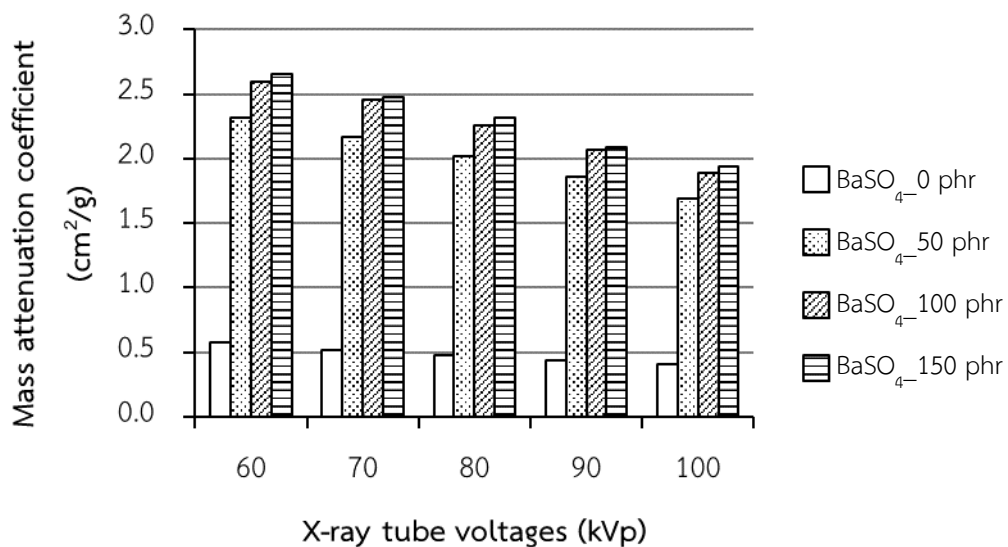
(จ)

ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต (ก) 60 kVp (ข) 70 kVp (ค) 80 kVp (ง) 90 kVp และ (จ) 100 kVp

ภาพที่ 4.8 (ก-จ) แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตที่พลังงานช่วง 60 -100 kVp พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตและความหนาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตสามารถดูดกลืนหรือลดทอนรังสีเอกซ์ได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ลดลงเล็กน้อยเมื่อพลังงานของรังสีเพิ่มขึ้น



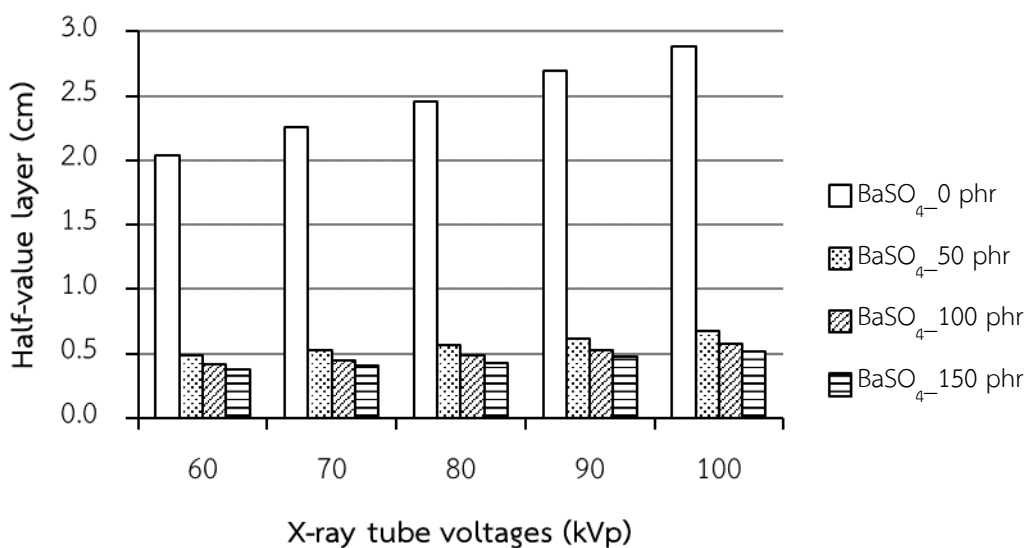
ภาพที่ 4.9 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.10 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.9-4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและ

สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดทอนรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมล้อมนิวเคลียสของตัวกลาง หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นสามารถดูดกลืนหรือลดทอนปริมาณของรังสีเอกซ์ได้มากขึ้น การลดทอนปริมาณรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ (ศิริลักษณ์ อินต่อม, 2562) และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารก้ำบั้งรังสี กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแบเรียมซัลเฟต ดังนั้นอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอนจึงมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น ส่วนสำคัญที่สามารถดูดกลืนหรือลดทอนรังสีได้ดีคือแบเรียมส่งผลให้ยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลลดลงเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีที่มีพลังงานสูงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง



ภาพที่ 4.11 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าครึ่งความหนาของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

รูปที่ 4.11 แสดงค่าความหนาครึ่งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่แตกต่างกันที่ จากผลการทดลองค่าความหนาครึ่งค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถลดทอนปริมาณของรังสีเอกซ์ได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงานของรังสีเดิม โดยใช้ความหนาที่ลดลง นั่นหมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น สามารถลดทอน หรือก้ำบั้งรังสีได้ดีขึ้น

4.2 ผลการวิเคราะห์คอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต โดยการขึ้นรูปเป็นแผ่นยางขนาด $15 \times 15 \text{ cm}^2$ หนา 0.24 cm จำนวน 4 สูตร คือ ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต เป็น 0, 50, 100, และ 150 phr จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นดังนี้

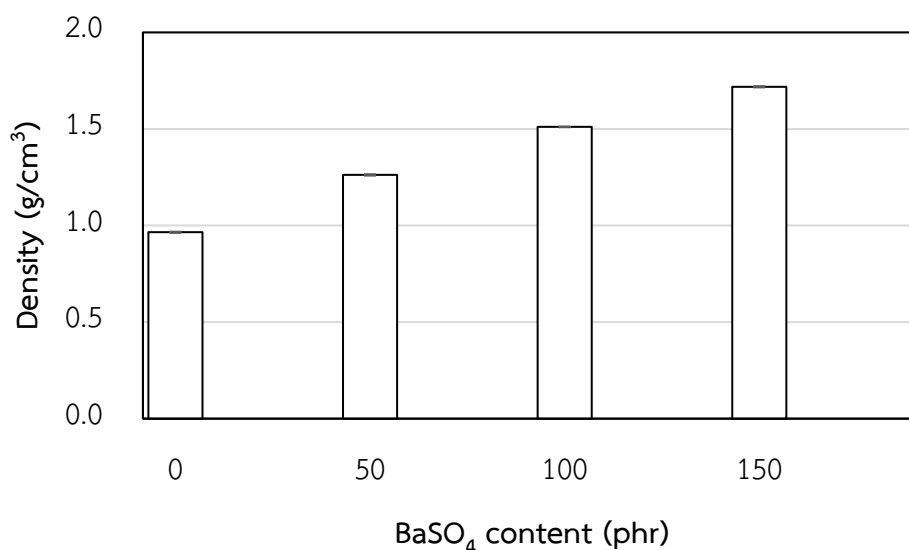
4.2.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ โดยนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในอากาศและชั่งน้ำหนักในน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของตัวอย่างจากความถ่วงจำเพาะ ซึ่งทำการทดลองซ้ำสูตรละ 3 ตัวอย่าง ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความหนาแน่นของตัวอย่าง (g/cm^3)
0	0.963 ± 0.003
50	1.262 ± 0.003
100	1.510 ± 0.002
150	1.718 ± 0.003

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

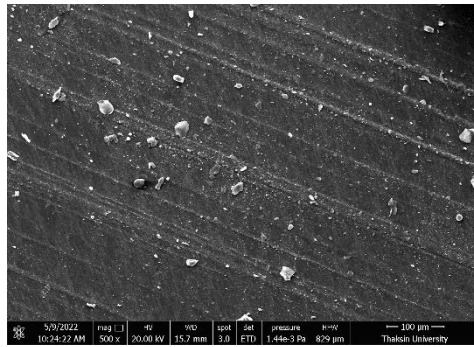


ภาพที่ 4.12 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

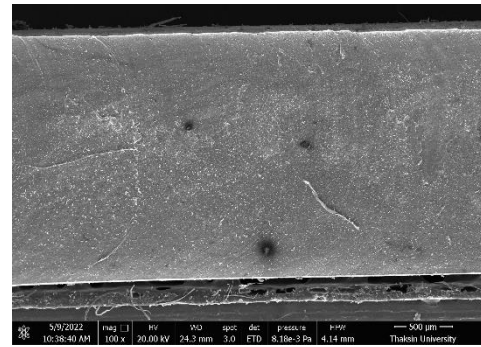
จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.12 แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาแน่นของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตทำให้ค่าความหนาแน่นของยางคอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดยมีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อเติมแบเรียมซัลเฟต 150 phr คือ 1.718 g/cm^3 เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตมีความหนาแน่นมากกว่ายาง เมื่อเพิ่มแบเรียมซัลเฟตเข้าไปในส่วนผสมจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

4.2.2 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อลักษณะสัญญาณวิทยา

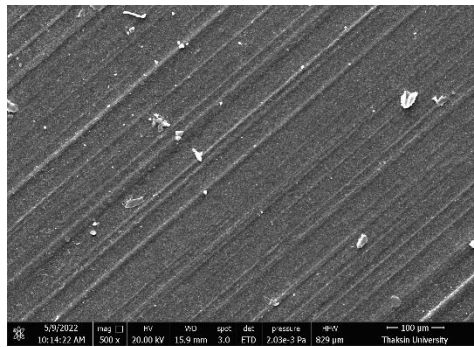
ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทั้งบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของตัวอย่าง ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของยางคอมโพสิต แสดงดังภาพที่ 4.13



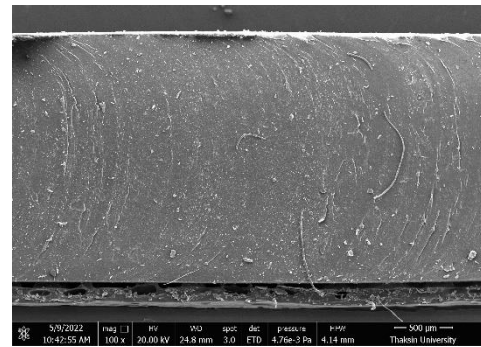
(ก)



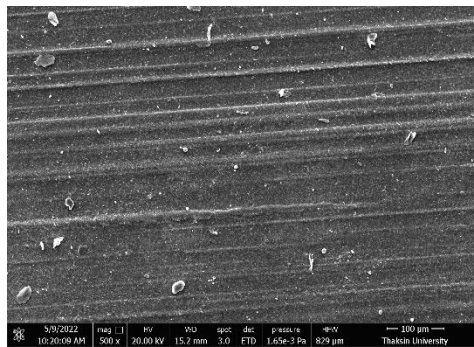
(ข)



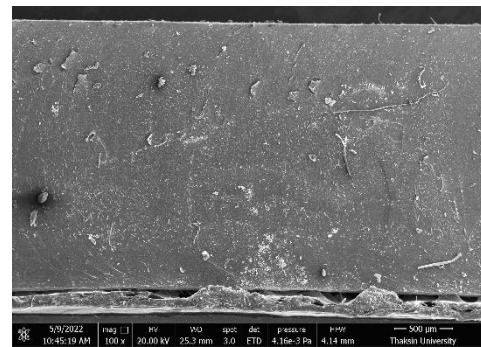
(ค)



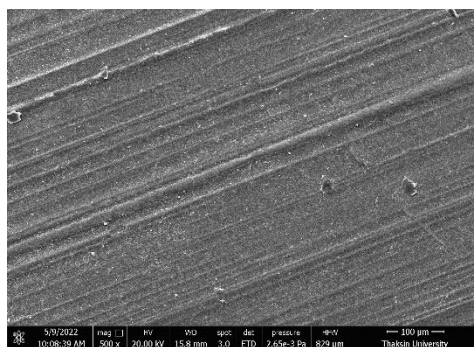
(ง)



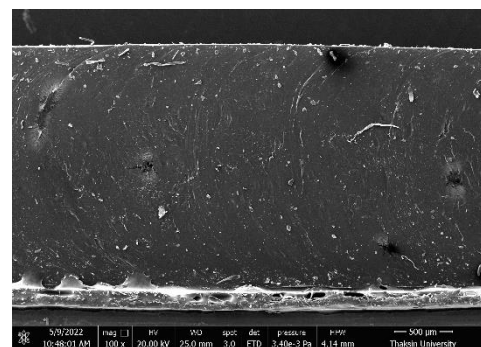
(จ)



(ฉ)



(ช)



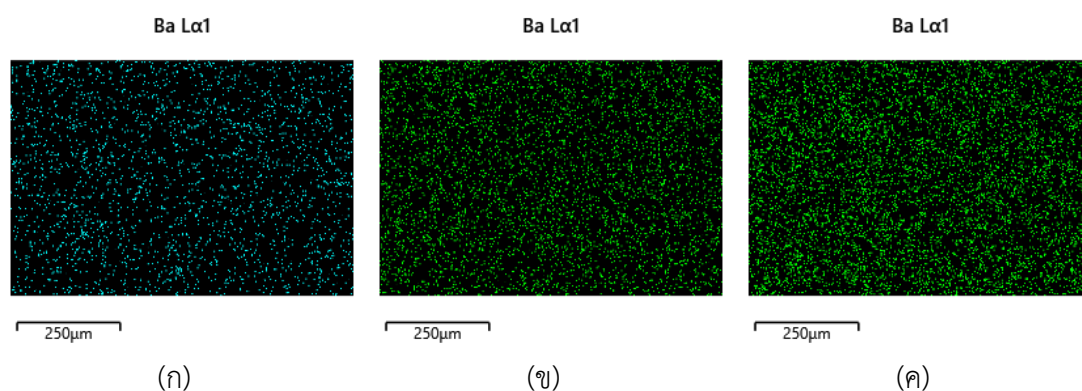
(ซ)

ภาพที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้า (ซ้าย) และภาคตัดขวาง (ขวา) ของโพลีโพรพิลีน จากยางคอมปาวด์และแบเรียมซิลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซิลเฟต (ก), (ข) 0 phr ; (ค), (ง) 50 phr ; (จ), (ฉ) 100 phr และ (ช), (ซ) 150 phr.

จากภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของคอมโพสิตยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต พบว่าบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของตัวอย่างค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอเหมือนกันทุกเงื่อนไข ซึ่งแสดงว่าการเตรียมยางด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบ 2 ลูกกลิ้งทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมได้ดี

4.2.3 ผลของการแปรปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อการกระจายตัวและปริมาณการกระจายตัวของธาตุของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ต่อการกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์แสดงในรูปที่ 4.14 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์แสดงในตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่างกัน (ก) 50 phr (ข) 100 phr และ (ค) 150 phr.

ตารางที่ 4.6 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตต่างกัน

องค์ประกอบ	ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)			
	0	50	100	150
C	87.28	75.95	64.25	62.52
Ba	-	10.28	17.57	18.6
O	7.94	8.62	11.95	12.55
S	1.56	3.31	4.78	5.17
Zn	3.22	1.85	1.46	1.17

ภาพที่ 4.14 แสดงการกระจายตัวของแบเรียมซัลเฟตในคอมโพลีเมอร์ของยางคอมปาวด์ที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า ความสามารถในการกระจายตัวของแบเรียมในตัวอย่างลดลง เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวในยางคอมปาวด์ซึ่งการเกาะกลุ่มกันของสารส่งผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ของยางคอมปาวด์ จากตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพลีเมอร์ของยางคอมปาวด์ที่มีการแปรปริมาณของแบเรียมซัลเฟต เห็นได้ว่า เมื่อปริมาณแบเรียมในตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแบเรียมซัลเฟต ซึ่งส่งผลให้สมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากแบเรียมสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานในช่วงของรังสีเอกซ์ นอกจากนี้เมื่อเทียบกับโพลีเมอร์จากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแบเรียมซัลเฟตพบว่าแผ่นคอมโพลีเมอร์ของยางคอมปาวด์ผสมกับแบเรียมซัลเฟตที่มีปริมาณของแบเรียมสูงกว่า ดังนั้นคอมโพลีเมอร์ของยางคอมปาวด์ผสมกับแบเรียมซัลเฟตจึงมีสมบัติการลดทอนรังสีสูงกว่า

4.2.4 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์จากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

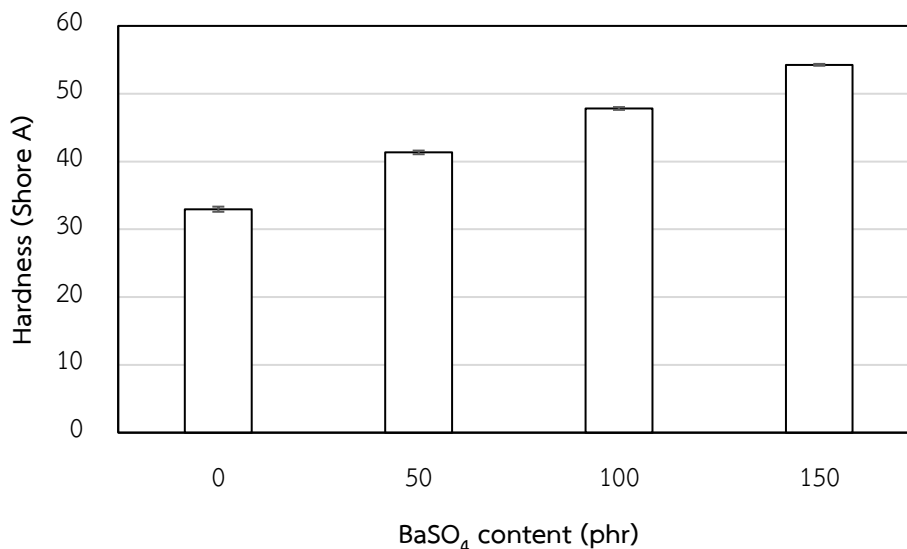
4.2.4.1 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความแข็งของคอมโพลีเมอร์จากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความแข็งของคอมโพลีเมอร์จากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต โดยทำการวัดความแข็งและหาค่าเฉลี่ยตัวอย่างละ 5 ตำแหน่งจาก 3 ตัวอย่างในแต่ละสูตร ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโพลีเมอร์จากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความแข็ง (Shore A)
0	33.0 ± 0.4
50	41.3 ± 0.3
100	47.8 ± 0.2
150	54.3 ± 0.1

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

จากภาพที่ 4.15 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความแข็งของคอมโพสิตจากน้ำยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต พบว่าความแข็งของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตมีค่าอยู่ระหว่าง 33.0–54.3 Shore A เห็นได้ว่าค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมปริมาณสารเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความแข็งจะมากที่สุดที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 150 phr คือ 54.3 Shore A เนื่องจากแบเรียมซัลเฟตเป็นสารที่มีอนุภาคแข็งจึงช่วยเพิ่มการเชื่อมขวางภายในโพลีคอมโพสิต (Zhao *et al.*, 2011) และส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ลดลง (ศิริลักษณ์ อินต้อม, 2562) ทำให้ความหนาแน่นและความแข็งของโพลีคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kalkornsurapranee *et.al.*, 2021 และ Toyen *et.al.*, 2018)

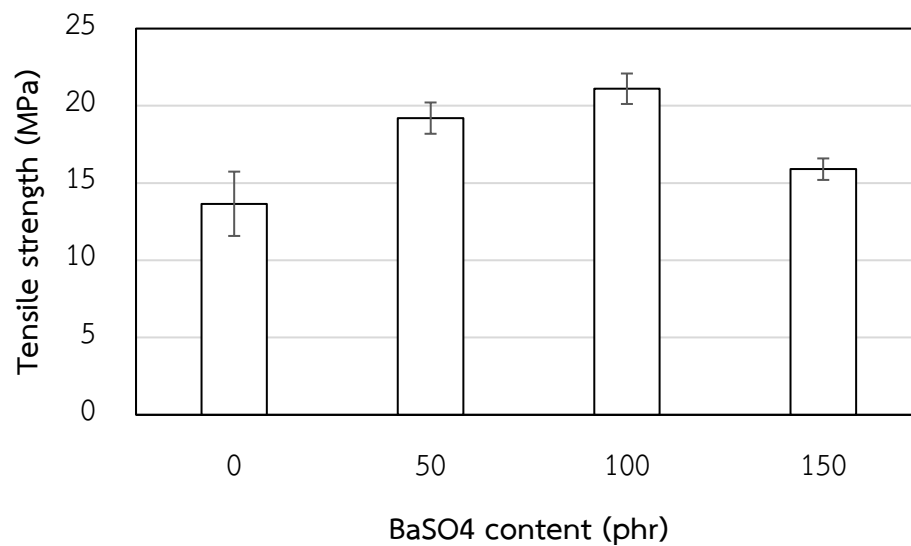
4.2.4.2 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด

ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาด วัดด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine) โดยทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวตาม ณ จุดขาด มาตรฐาน ISO37-1 และทดสอบความต้านทานการฉีกขาดตามมาตรฐาน ISO30-1 ทำการทดลองซ้ำ 3 ตัวอย่างในแต่ละตัวอย่าง แสดงผลดังตารางที่ 4.8 ภาพที่ 4.16 - 4.18

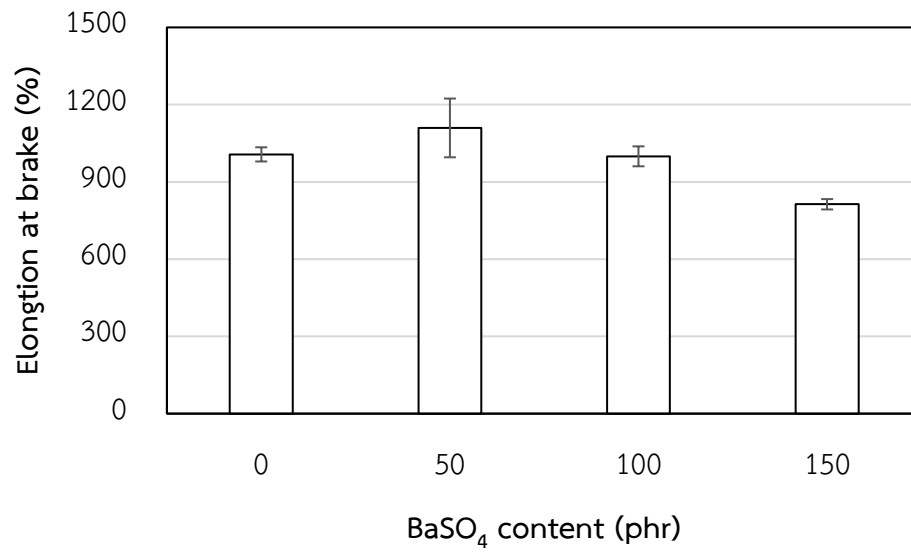
ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณสารแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

ปริมาณแบเรียมซัลเฟต (phr)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความต้านทานการฉีกขาด (kN/m)
0	14 ± 2	1007 ± 28	31 ± 1
50	19 ± 1	1110 ± 114	36 ± 1
100	21 ± 1	999 ± 39	42 ± 1
150	16 ± 1	813 ± 20	40 ± 2

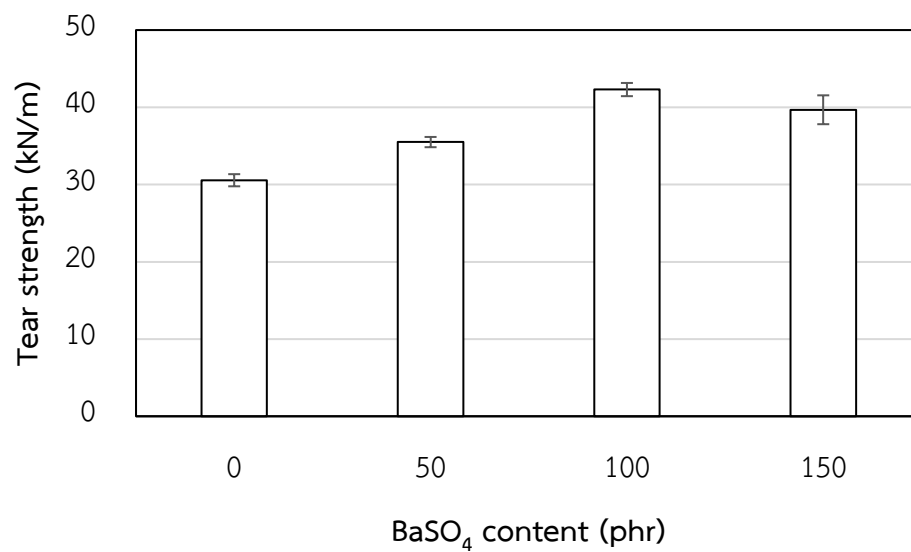
หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 4.16 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.17 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

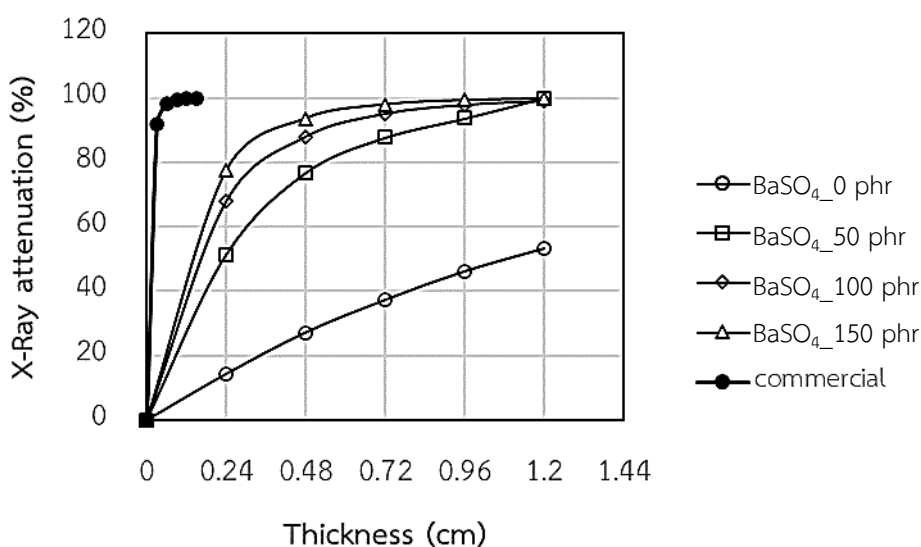


ภาพที่ 4.18 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

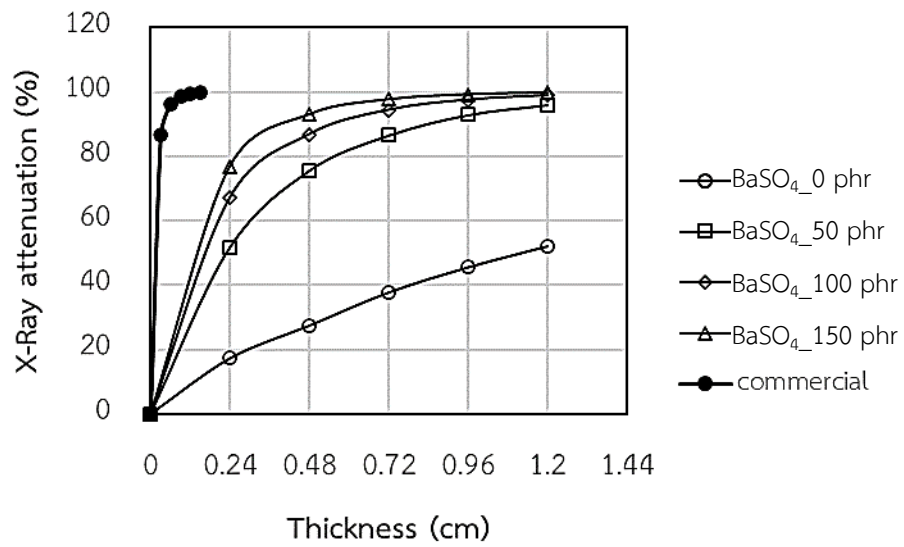
จากตารางที่ 4.8 ภาพที่ 4.16 - 4.18 แสดงผลของการเติมแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านการฉีกขาด พบว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 21 MPa ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 100 phr การยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด 1110% ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 50 phr และความต้านการฉีกขาดสูงสุด 42 kN/m ที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 150 phr การเพิ่มขึ้นของต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านการฉีกขาด ตามปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกเกิดจากแบเรียมซัลเฟตซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารกำบังรังสีแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระตุ้น (co-auditor) ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วนำไปสู่สมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อไปสมบัติเชิงกลจะลดลงซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นไปจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ในเมทริกซ์ยาง (Plangpleng *et.al.*, 2022) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kalkornsurapranee *et.al.*, 2021 Toyen *et.al.*, 2561 และ Plangpleng *et.al.*, 2022).

4.2.5 ผลของการทดสอบสมบัติทางด้านรังสีของโพลีคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

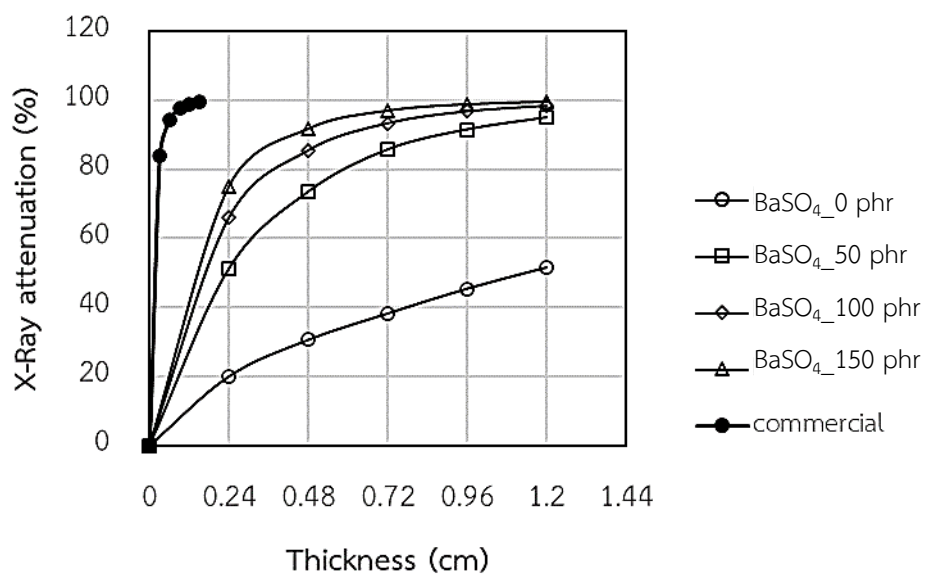
ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีพลังงานในช่วง 60-100 kVp ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางคอมปาวด์แสดงในภาพที่ 4.19 - 4.22



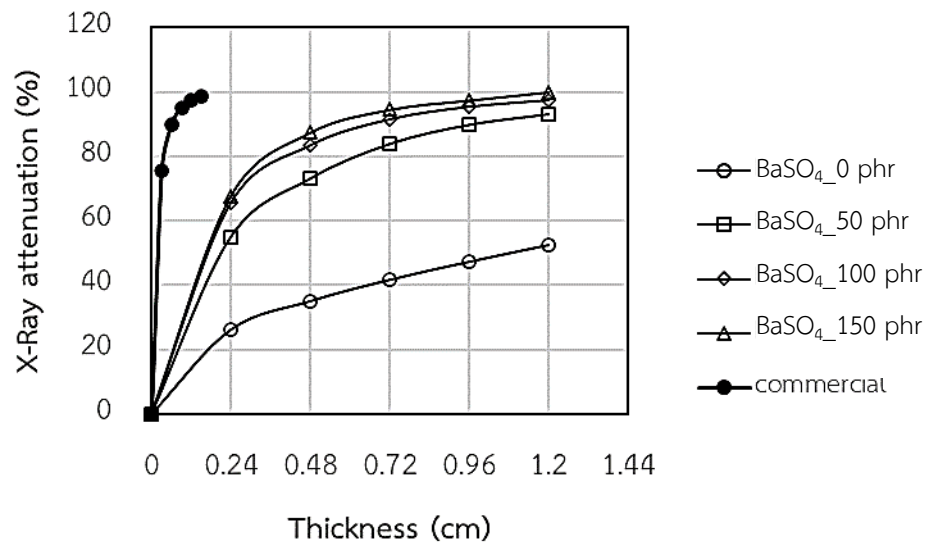
(ก)



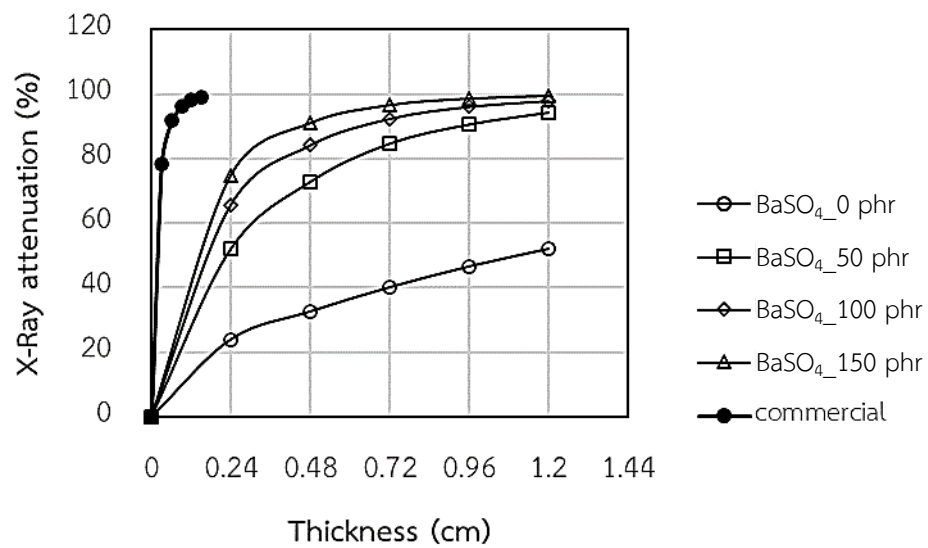
(a)



(b)



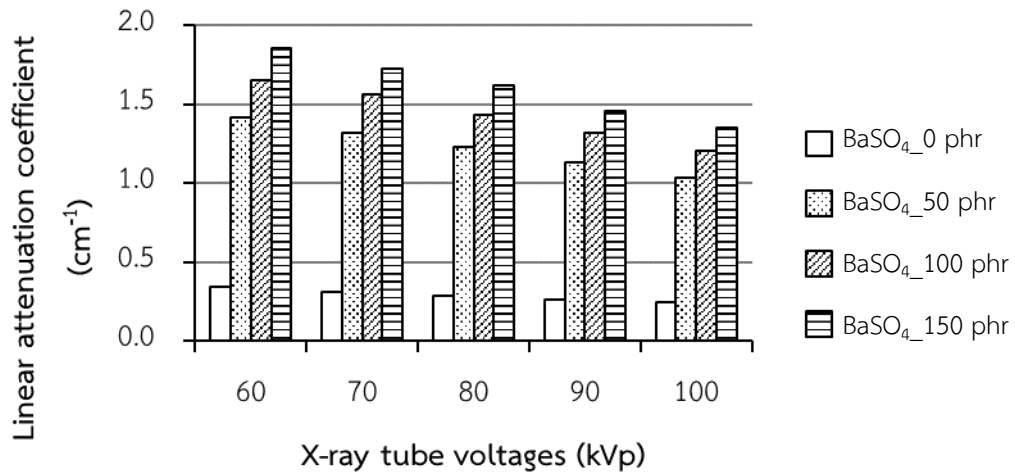
(ง)



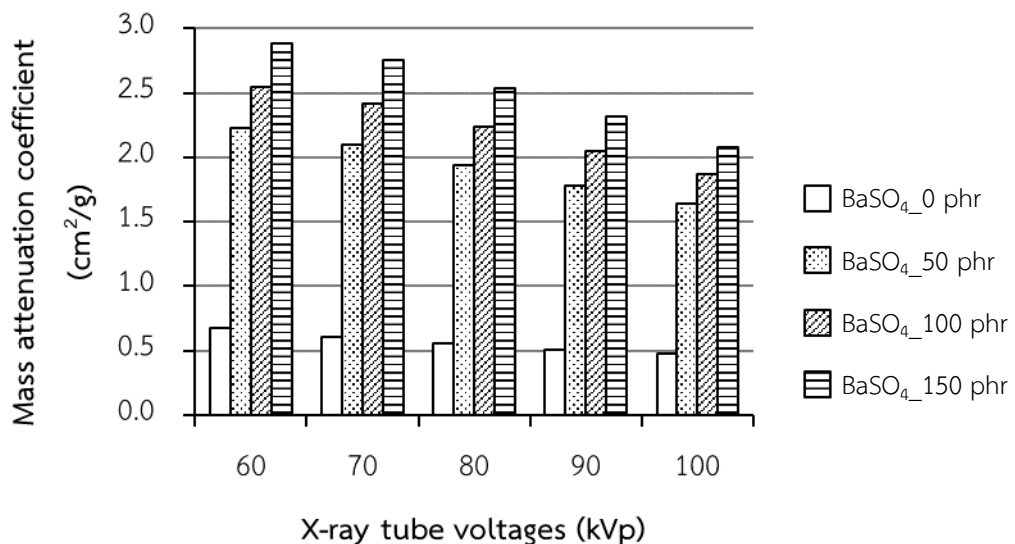
(จ)

ภาพที่ 4.19 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต (ก) 60 kVp (ข) 70 kVp (ค) 80 kVp (ง) 90 kVp และ (จ) 100 kVp

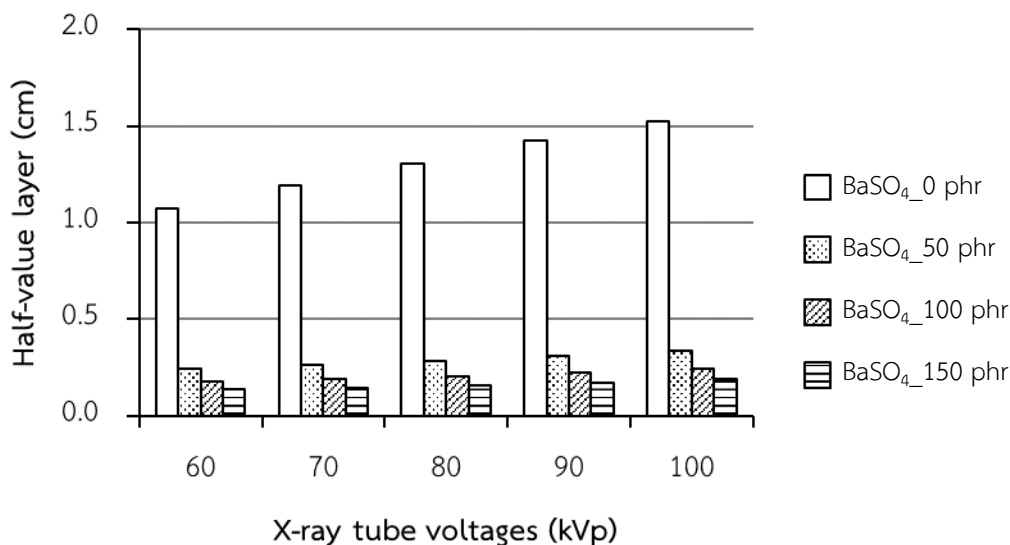
ภาพที่ 4.16 (ก-จ) แสดงผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตที่พลังงานช่วง 60 -100 kVp พบว่าเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น และพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีเอกซ์ลดลงเล็กน้อยเมื่อพลังงานของรังสีเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.20 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.21 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.22 ผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความหนาครึ่งค่าของแผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

จากภาพที่ 4.17-4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่ต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดทอนรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมล้อมนิวเคลียสของตัวกลาง นั้นหมายความว่า การเติมแบเรียมซัลเฟตเป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนในอะตอมส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอนในอะตอมเพิ่มมากขึ้น คอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นสามารถลดทอนหรือกำบังรังสีเอกซ์ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ลดลงเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น ภาพที่ 4.19 แสดงค่าความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณของแบเรียมซัลเฟตที่ต่างกันที่ จากผลการทดลองค่าความหนาครึ่งค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟตแสดงว่าคอมโพสิตของยางคอมปาวด์สามารถลดทอนปริมาณของรังสีเอกซ์ได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงานของรังสีเดิมโดยใช้ความหนาที่ลดลง นั้นหมายความว่า คอมโพสิตของยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น สามารถลดทอนหรือกำบังรังสีได้ดีขึ้น นอกจากนี้หากเทียบกับโฟมคอมโพสิตของยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต พบว่าคอมโพสิตของยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตสามารถลดทอนรังสีได้ดีกว่า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 อภิปรายผลสรุป

5.1.1 โฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต เป็น 0, 50, 75, และ 100 phr จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1) ความหนาแน่นของโฟมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.59-0.70 g/cm³ โดยปริมาณแบเรียมซัลเฟต 100 phr ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด

2) ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของโฟมคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นรูพรุนขนาดเล็กบริเวณผิวหน้าของตัวอย่างลดลงแต่รูขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น โครงสร้างภายในเป็นแบบเซลล์เปิดโดยช่องว่างขนาดเล็กลดลงแต่ช่องว่างใหญ่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากผลของปริมาณแบเรียมซัลเฟตที่มีต่อความแข็งของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต

3) ความแข็งของโฟมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต ความแข็งมีค่าอยู่ระหว่าง 14.88 - 25.16 Shore A โดยค่าความแข็งมากที่สุดที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 100 phr

4) ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของโฟมคอมโพสิตจากน้ำยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟต ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต

5) สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ได้แก่ ค่าร้อยละการลดทอนรังสี สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ_l) และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของโฟมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต และความหนาแน่นของวัสดุ โดยค่าการลดทอนรังสีสูงสุดคือ 94% ที่แบเรียมซัลเฟต 100 phr ขณะที่ค่าครึ่งความหนา (HVL) ลดลงตามปริมาณแบเรียมซัลเฟต นอกจากนี้สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ลดลงเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลการวิเคราะห์แผ่นยางคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟต

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมโฟมคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต เป็น 0, 50, 100, และ 150 phr จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

1) ความหนาแน่นของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.963 -1.718 g/cm³ โดยปริมาณแบเรียมซัลเฟต 150 phr ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด

2) ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของคอมโพสิตยางคอมปาวด์ และแบเรียมซัลเฟตแสดงบริเวณผิวหน้าและภาคตัดขวางของตัวอย่างค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอเหมือนกันทุกตัวอย่าง

3) ความแข็งของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์และแบเรียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต มีค่าอยู่ระหว่าง 33.0–54.3 Shore A โดยค่าความแข็งจะมากที่สุดที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 150 phr

4) ความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดของโคมโพสิตจากน้ำยาธรรมชาติและแบเรียมซัลเฟตมีค่าสูงสุดที่ปริมาณแบเรียมซัลเฟต 100 phr 50 phr และ 100 phr ตามลำดับ

5) สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ได้แก่ ค่าร้อยละการลดทอนรังสี สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ_l) และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของคอมโพสิตจากยางคอมปาวด์ และแบเรียมซัลเฟตสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณแบเรียมซัลเฟต และความหนาของวัสดุ โดยค่าการลดทอนรังสีสูงสุดคือ 99% ที่แบเรียมซัลเฟต 150 phr ขณะที่ค่าครึ่งความหนา (HVL) ลดลงตามปริมาณแบเรียมซัลเฟต นอกจากนี้สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ลดลงเมื่อพลังงานของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล และวัลลภ หาญณรงค์ชัย. (2558). “การผลิตวัสดุดูดซับเสียงจากวัสดุผสมยางโฟมธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ”. งานวิจัยฉบับสมบูรณ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- จริยาภรณ์ รักษ์แก้ว. (2563). “การผลิตแผ่นป้องกันรังสีเอ็กซ์จากวัสดุเชิงประกอบบิสมัทคลอไรด์ผสมผงไม้และพอลิไวนิลคลอไรด์”. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เจริญยุทธ เดชวายุภู วิริยะ ทองเรือง พิษณุ บุญนวล และวรวิฑูร์ วิสุทธิ์เมธางกูร. (2552). “วิธีการขึ้นรูปโฟมยางจากธรรมชาติ”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เชาวโชติ วิชญาศิริ (2560). “การพัฒนาผ้าทอที่มีสมบัติป้องกันรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในทางการแพทย์”. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- ดาริกา จาเอาะและอาบีดิน ตะแซสาเมาะ. (2554). “วัสดุดูดซับเสียงจากน้ำยางธรรมชาติผสมใยมะพร้าว”, มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล นพวรรณ ชนัญพานิช วิฑิต ผึ้งกัน และชลดา สุวรรณบุรณ์. (2560). “สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นคอมโพสิต PU/BaSO”. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 27 (1), 159-168.
- ผกามาศ ลิ้มอรุณ และเอกชัย วิมลมาลา. (2562). “การผลิตแผ่นยางฟองปลอดสารตะกั่วกาบังรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์”. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, วันที่ 15 มีนาคม 2562 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 418-427.
- ปราโมทย์ วีรานุกูล อธิธิ วีรานุกูล และกิตติพงษ์ สุวิโร. (2561). “การใช้ยางธรรมชาติผสมขุยมะพร้าวสำหรับขึ้นรูปแผ่นผนังป้องกันเสียงและความร้อนภายในอาคาร”. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- วิทวัส เขวงชัยยง. (2548). “การสร้างวัสดุป้องกันรังสี”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- ศิริลักษณ์ อินต้อม. (2562). “การเตรียมอีลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุดา วรรณประสาท. (2565) “ยาต้านพิษ1:พิษจากสารตะกั่ว”. ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 57-68. https://www.rama.mahidol.ac.th/poisoncenter/sites/default/files/public/pdf/books/Antidote_book1-11_LEAD-POISONING.pdf. สืบค้น เมื่อวันที่ 13 มกราคม 2665.
- สุภารัตน์ รัชชสิทธิ์. (2561). “การใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตจากพอลิเอทิลีน/แบเรียมซัลเฟต”. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เสาวภาคย์ ภูศิริ แสงเขาว์ ทองสินุช สุมาตี สายโสม และ นิจวรีย์ จันทรมณี. (2562). “การประดิษฐ์ อุปกรณ์ป้องกันรังสีจากยางธรรมชาติผสมบิสมัทปริมาณสูงสำหรับงานรังสีวินิจฉัย”. วารสาร รังสีเทคนิค. 44, 1, 8-14.
- Cherkasov, V., Yurkin, Y., Avdinin, V., and Suntsov, D. (2020). “Self-adhesion X-ray Shielding Composite Material of EPDM Rubber with Barite : Mechanical Properties”. *Materiale Plastice*, 57 (1), 28-36.
- Fang L., Sun, Q., Duan, Y.H., Zhai, J., Wang, D., Wang, J.X. (2021). “Preparation of transparent BaSO₄ nanodispersions by high-gravity reactive precipitation combined with surface modification for transparent X-ray shielding nanocomposite films”. *Front. Chem. Sci. Eng.*, 15(4), 902–912.
- Kalkornsurapranee, E., Kothan, S., Intom, S., Johns, J., Kaewjaeng, S., Kedkaew, C., Chaiphaksa, W., Sareein, T. and Kaewkhao, J. (2021). “Wearable and flexible radiation shielding natural rubber composites: Effect of different radiation shielding fillers” *Radiation Physics and Chemistry*, 179. 1-8.
- Khalaf, M. A., Cheah, C.B., Ramli, M., Ahmed, N.M., Al-Asady, A.M.A., Ali, A.M.A., Al-Shwaiter, A. and Tangchirapat., W. (2021). “Engineering and gamma-ray attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete with nano calcium carbonate and silica”. *Construction and Building Materials*, 267, 1-17.
- Kim, S.C., & Cho, S.H. (2019). “Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films”. *Applied Sciences*, 9 (9), 1-9.

- Kumar, P., Niranjana Prabhu, T. and Jineesh, A.G. (2018) "BaSO₄ and Fe₂O₃ Filled Polydimethylsiloxane Elastomer Nanocomposite as X-ray Radiation Resistant Material". *RUAS-SASTech Journal*, 17 (1), 1-5.
- Lim-aroon, P., Wimolmala, E., Sombatsompop, N., & Saenboonruang, K. (2019). "Manufacturing process and properties of lead-free natural rubber sponge for use in X-ray and gamma ray shielding applications". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 526, 1-4.
- Mungpayaban, H., Rueanngoan, A., Rindhatayathon, P., Ninlaphruk, S. Ekgasit, S. and Pengprecha, S. (2023). "Barium sulphate–amorphous cellulose composite as innovative X-ray shielding substrate". *Materials research innovation*, 27 (1), 45–54.
- Plangpleng, N., Charoenphun, P., Polpanich, D., Sakulkaew, K., Buasuwan, N., Onjun, O., Chuamsaamarkkee, K. (2022) "Flexible gamma ray shielding based on natural Rubber/BaSO₄ nanocomposites". *Radiation Physics and Chemistry*, 199, 1-8.
- Poltabtim, W., Wimolmala, E., Markpin, T., Sombatsompop, N., Rosarpitak, V. and Saenboonruang, K. (2021). "X-ray Shielding, Mechanical, Physical, and Water Absorption Properties of Wood/PVC Composites Containing Bismuth Oxide". *Polymers*, 3-16.
- Soylu, H. M., Lambrecht, F. Y. and Ersoz, O. A. (2015). "Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material". *J Radioanal Nucl Chem*, 305, 529–534.
- Sutthisa Konruang, Arnon Srisook, Pornpana Buaphet, Fadeelah Tayeh and Weerawut Naebpetch. (2022). "Preparation of Lead-Free X-Ray Shielding Materials Based on Natural Rubber/Barium Sulfate Composites". *ASEAN J. Sci. Tech. Report.*, 25(2), 59-66.
- Toyen, D., Rittirong, A., Poltabtim, W., & Saenboonruang, K. (2018). "Flexible, lead-free, gamma shielding materials based on natural rubber/metal oxide composites". *Iranian Polymer Journal*, 27, 33-41.
- Toyen, D., and Saenboonruang, K. (2020). "Comparative X-ray shielding properties of bismuth oxide/natural rubber composites using a Monte Carlo code of PHITS". *Materials Science and Engineering*, 773, 1-4.

Toyen, D., Wimolmala, E., Sombatsompop, N., Markpinb, T., Saenboonruanga, K. (2019).
“Sm₂O₃/UHMWPE composites for radiation shielding applications : Mechanical and dielectric properties under gamma irradiation and thermal neutron shielding”. Radiation Physics and Chemistry, 164. 1-8.

ภาคผนวก

ผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

Sutthisa Konruang, Arnon Srisook, Pornpana Buaphet. Fadeelah Tayeh and Weerawut Naebpetch. (2022). “Preparation of Lead-Free X-Ray Shielding Materials Based on Natural Rubber/Barium Sulfate Composites”, ASEAN J. Sci. Tech. Report. 25(2), 59-66.



Preparation of Lead-Free X-Ray Shielding Materials Based on Natural Rubber/Barium Sulfate Composites

Sutthisa Konruang^{1*} Arnon Srisook² Pornpana Buaphet³ Fadeelah Tayeh⁴
 Weerawut Naebpetch⁵

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand; sutthisa@tsu.ac.th

² Regional Medical Sciences Center 11 Suratthani, Surat Thani, 84100, Thailand; arnon.s@dmsc.mail.go.th

³ Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand; pornpana@tsu.ac.th

⁴ Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand; 612021200@tsu.ac.th

⁵ Center of rubber technology for community, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung, 93210, Thailand; Berm_lif@hotmail.com

*Correspondence: e-mail ; sutthisa@tsu.ac.th

Citation:

Konruang, S.; Srisook, A.; Buaphet, P.; Tayeh, F.; Naebpetch, W. Preparation of Lead-Free X-Ray Shielding Materials Based on Natural Rubber/Barium Sulfate Composites. *ASEAN J. Sci. Tech. Report.* 2022, 25(2), 59-66. <https://doi.org/10.55164/ajstr.v25i2.246574>.

Article history:

Received: May 2, 2021
 Revised: June 24, 2022
 Accepted: June 24, 2022
 Available online: June 26, 2022

Publisher's Note:

This article is published and distributed under the terms of the Thaksin University.

Abstract: This work prepared the lead-free X-ray shielding materials based on natural rubber (NR) mixed with BaSO₄ particles at different BaSO₄ contents (0–100 phr) and different material thicknesses (0.5–2.5 cm). The X-ray shielding properties of NR/BaSO₄ composites were tested using a 100-kV X-ray generator. The results suggested that the increases in the BaSO₄ contents improved the x-ray shielding properties of the NR/BaSO₄ composites, such as linear attenuation coefficient (μ_l), mass attenuation coefficient (μ_m), and half-value layer (HVL). The highest X-ray attenuation was 94 % in 100 phr BaSO₄. In terms of mechanical properties, it was found that the density and hardness (Shore A) increased with increasing BaSO₄ contents. In contrast, the increases in BaSO₄ resulted in decreased tensile strength, elongation at break and tear strength. In summary, the overall properties suggest that these NR/ BaSO₄ composites could be developed as an effective X-ray shielding material instead of lead.

Keywords: Natural rubber; Barium sulfate; X-ray shielding; Composite materials

1. Introduction

X-ray is a relatively high-energy electromagnetic wave that plays important roles in various applications such as agriculture, food preservation, industry, and especially in medical fields for diagnosis and therapy [1]. However, exposure to X-rays could potentially lead to fatal health hazards in radiation workers and users and cause symptoms such as skin burns and vomiting within hours. It can also result in long-term health effects such as memory loss, cancer, and cardiovascular disease [2]. Therefore, effective shielding materials were important to prevent excessive X-ray exposure. It is known that the materials composed of high-atomic-number (Z) and high-density elements are commonly used as shielding materials, such as lead (Pb) [3-5].

However, lead is considered a hazardous chemical [6]. Recently, the radiation shielding materials with the addition of fillers such as tungsten oxide (W_2O_3) [7-8], bismuth oxide (Bi_2O_3) [8-10], and barium sulfate ($BaSO_4$) [7,11-12] were studied for replacement of lead (Pb). Among these materials, $BaSO_4$ is an exciting filler since it is environmentally friendly, safe, and highly effective in X-ray attenuation [12]. Previous investigations reported that it could be improved the radiation shielding properties of concrete [13] and it is also found that a shielding film prepared from $BaSO_4$ and polymeric silicon has higher tensile strength and X-ray shielding performance [7]. In addition, a polymeric composition consisting of ethylene propylene diene monomer (EPDM), industrial oil (IO), and alkyl phenol-formaldehyde resin (PF) with the addition of $BaSO_4$ can be applied to manufactured material for protection from radiation in offices of radiation therapy and diagnostics [12].

In this work, we aimed to develop flexible and lead-free X-ray-shielding materials that are safe and environmental-friendly based on NR/ $BaSO_4$ composites. Dunlop method is used for NR/ $BaSO_4$ composites foam production. This method is widely used because it is simple, convenient, reliable, cost-effective, and energy-efficient [14-15]. The X-Ray shielding properties are tested based on the thicknesses and $BaSO_4$ contents of NR/ $BaSO_4$ composites, such as X-ray transmission ratio, X-ray attenuation, linear attenuation coefficient (μ_l), mass attenuation coefficient (μ_m), and half-value layer (HVL). Furthermore, the mechanical properties of the composites were also investigated.

2. Materials and Methods

1. Materials

NR latex with 60 wt% dry rubber was acquired from the Center of rubber technology for community, Faculty of engineering, Thaksin University, Phatthalung, Thailand. Barium Sulfate was purchased from Scitradar Co, Ltd. (Thailand). Sulfur (S), zinc diethyldithiocarbamate (ZDEC), zinc 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT), Wingstay®-L, zinc oxide (ZnO), Diphenylguanidine (DPG), and Sodium silicofluoride (SSF) was purchased from VPK Supply Co, Ltd. (Thailand). All chemicals were used in an aqueous dispersion form, prepared in the laboratory (Table 1).

2. Preparation of NR/ $BaSO_4$ composites

NR/ $BaSO_4$ composites were fabricated using the chemical proportions given in Table 1. First, NR latex was filtered and agitated by a whisk and bowl mixer for 3 min to liberate dissolved ammonia before foam preparation. After that, $BaSO_4$, S, ZDEC, ZMBT, Wingstay® L, ZnO, DPG and SSF were slowly added to the mixture and stirred for about 1 min. Then, the NR/ $BaSO_4$ foam was poured into a mold ($25 \times 25 \times 0.5$ cm³) to begin the gelling process. Finally, NR/ $BaSO_4$ was vulcanized at 100 °C for 1 h in an oven (ED 56, BINDER). The non-reactive reagents were removed by washing the solid foam with distilled water. After washing, the cured NR/ $BaSO_4$ was evenly dried in a hot air oven at 80°C for 24 h.

Table 1. Material formulations for Natural Rubber/Barium Sulfate Composites preparation

Ingredients	Total solid content (%)	Dry weight (phr [*])	Wet weight (g)
HA latex	60	100	167
S	50	2	4
ZDEC	50	2.5	5
ZMBT	50	2	4
Wingstay® L	50	1	2
ZnO	50	5	10
DPG	40	2	5
SSF	20	0.5	2.5
$BaSO_4$ (phr)		0, 50, 75, 100	

* phr is the ratio unit of weight part of chemicals to 100 wt parts of rubber

3. Characterizations

3.1. Density and morphology studies

For all NR/BaSO₄ composites, the density was measured by comparative measurement of each sample mass in air and water using a digital scale (BSA Series, Sartorius). The experimental setup showed in Figure 1. The samples with dimensions of 20 × 20 × 5 mm³ were placed in the balance pan and recorded their dry weight. Next, the samples were placed under the submersed basket. Finally, the specific gravity was calculated by a digital scale. The specific gravity of the sample was multiplied by water density to obtain the density of the sample, as shown in Eq (1).

$$\text{specific gravity} = \frac{\text{density of the object}}{\text{density of the water}} \quad (1)$$

For the study of morphology, the samples were investigated using a scanning electron microscope (SEM; FEI / FEG Quanta 450), operating at 5 kV. Dried foams were vacuum-coated with gold before SEM investigation.

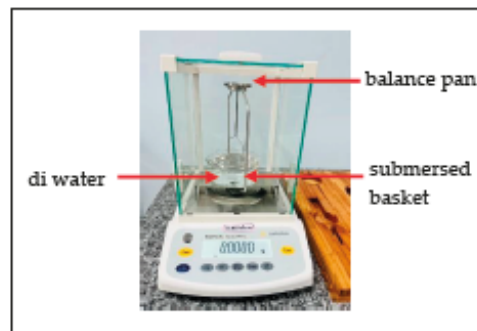


Figure 1. Setup for Density measurement.

2.2. Mechanical properties

Tensile and tear tests were conducted following ISO37-1 and ISO30-1, respectively, to characterize the mechanical properties of the NR/BaSO₄ composites. The tests were performed on a universal testing machine (Purchem Co., Ltd.) with a crosshead speed of 50 cm/min. Ultimate tensile strength, elongation at break and tear strength were determined. The hardness for all NR/BaSO₄ was tested using an automatic hardness tester (GX-02, Teclock).

2.3. X-Ray shielding properties

The X-Ray shielding properties of NR/BaSO₄ composites were performed at the Chaiya Hospital, Surat Thani Province, using the General X-ray Machine (MRAD-A32S, CANON) at 100 kV and the X-ray test equipment (X2, RAYSAFE) was used as the detector. All samples used in the experiment were 2 cm × 2 cm. The X-Ray shielding properties test was carried out on the different material thicknesses (0.5-2.5 cm). The narrow beam X-ray source was located 1 m from the surface of NR/BaSO₄ composites. The independent 0.05 s tests were performed and were recorded for each sample. The experimental setup is shown in Figure 2. From the experiment, the X-Ray shielding properties included X-ray attenuation [2], linear attenuation coefficient (μ_l), mass attenuation coefficient (μ_m), and half-value layer (HVL) [7] could be calculated using equation (2)–(5)



Figure 2. Setup for X-ray shielding measurement.

$$X\text{-ray attenuation} = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100 \quad (2)$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho} \quad (4)$$

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu_l} \quad (5)$$

Where I , I_0 , μ_l , μ_m , ρ , HVL, and x was the intensity of transmitted X-rays, the intensity of incident X-rays, linear attenuation coefficient, mass attenuation coefficient, density, half-value layer, and thickness of the samples, respectively.

3. Results and Discussion

3.1 Density and morphology studies

The density of NR/BaSO₄ composites is shown in Figure 3. It was found that the densities of NR/BaSO₄ composites increased with BaSO₄ content mainly due to the much higher density of BaSO₄ particles. It was known that increased material density could improve the mass attenuation coefficient according to equation 4.

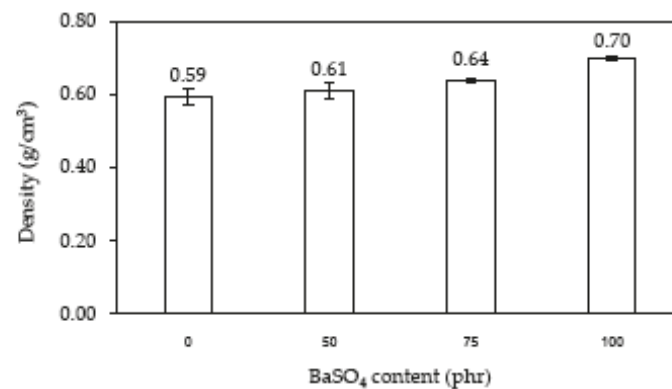


Figure 3. The densities of NR/BaSO₄ composites with varying contents of BaSO₄.

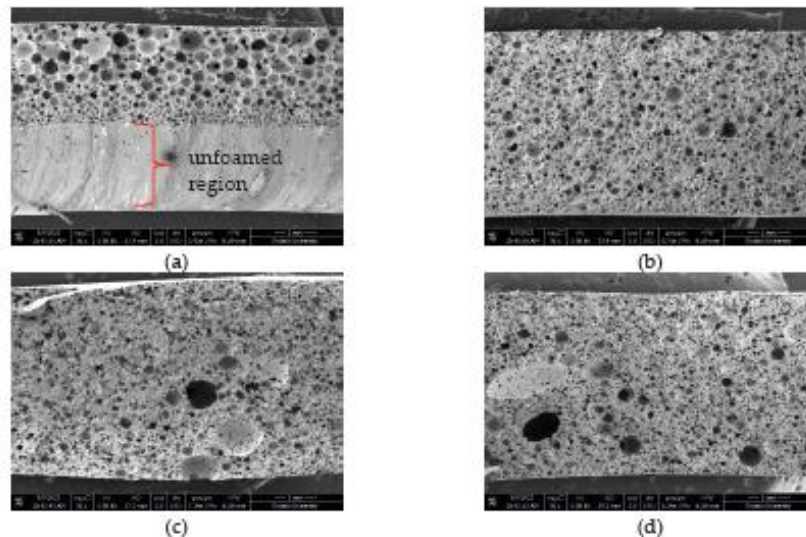


Figure 4. Cross-sectional microstructures of NR/BaSO₄ composites with varying contents of BaSO₄ (a), 0 phr, (b) 50 phr, (c) 75 phr, and (d) 100 phr.

Figure 4. represents the influence of BaSO₄ on morphologies of NR/BaSO₄ composites. From cross-sectional microstructures, All samples showed small open-cell structures inside NR/BaSO₄ composites from cross-sectional microstructures. However, NR/BaSO₄ composites had non-uniform cell structures. The composites without BaSO₄ consisted of large foam cells on the top, the tiny foam cells in the middle, and the non-foamed region on the bottom (Figure 3 (a)). Due to foams transforming into solid-state foams slowly, it is easier to diffuse gas into the top of the sample, which leads to foam collapse and increased density on the bottom [14]. On the other hand, samples with increasing BaSO₄ contents showed increasing large voids since foams transformed to solid-state foams rapidly. Gas phases decrease tensile strength, elongation at break, and tear strength [3].

3.2 Mechanical properties

As shown in Figure 5, the tensile strength, elongation at break, and tear strength decreased with increasing BaSO₄ content. These were due to more BaSO₄ content being added to the composites, leading to an agglomeration of BaSO₄ particles and worse particle dispersion[16]. On the other hand, hardness (Shore A) increased with increasing BaSO₄ contents. The increases in hardness could have been due to the high rigidity of the BaSO₄ particles. This result was consistent with Lim-aroon et al. (2019) [16], which prepared X-ray and gamma-ray shielding from NR/Bi₂O₃ composites.

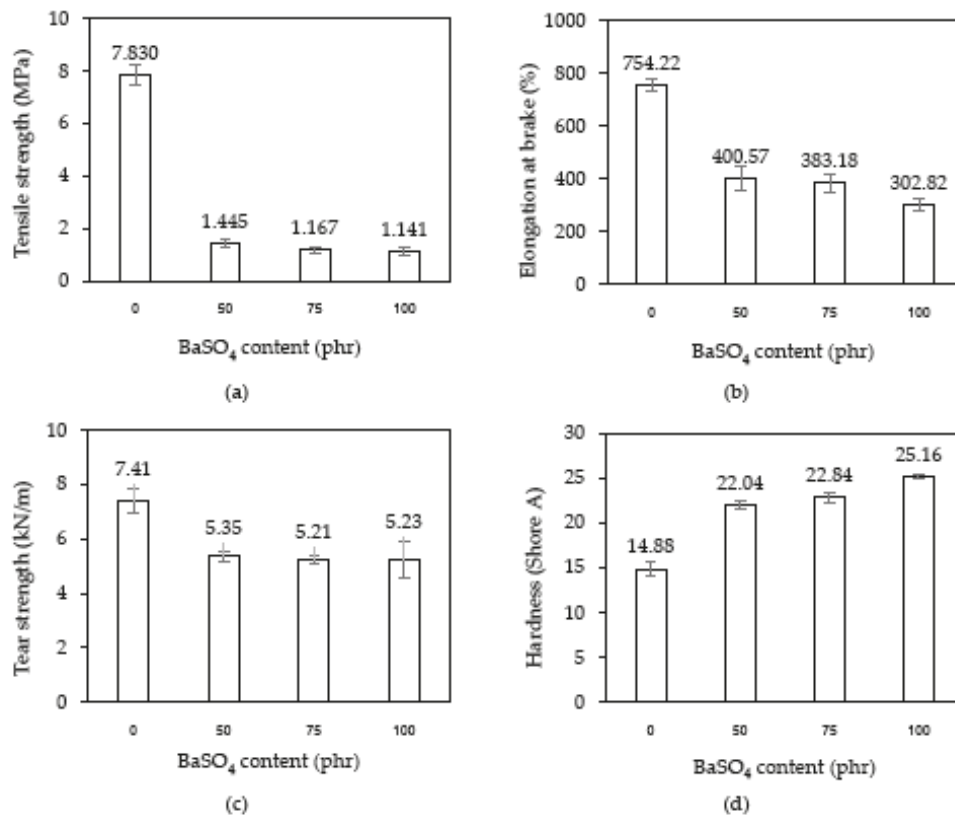


Figure 5. The mechanical properties of NR/BaSO₄ composites with varying contents of BaSO₄: (a) tensile strength, (b) elongation at break, (c) tear strength, and (d) hardness.

3.3 X-Ray shielding properties

Figure 6 shows the X-ray attenuation as a function of thickness for NR/BaSO₄ composites. It can be seen that the X-ray attenuation is higher compared to a pure NR. In addition, the X-ray attenuation increases with BaSO₄ content and thickness of samples due to the more remarkable ability of X-ray interaction and the impact of the photoelectric effect or Compton scattering with bismuth atoms in the material to attenuate and reduce X-ray energies and intensities [2]. For 2 cm thickness, the X-ray attenuation is highest at about 94% in 100 BaSO₄. From this result, it was possible to develop for actual use.

X-ray shielding properties of NR/BaSO₄ composites are shown in Table 2. The results showed that μ_1 and μ_m increased, while HVL decreased with increasing BaSO₄ content. Causes may include the high Z number material (BaSO₄) [11], periodically distributed in the Na/BaSO₄ composites, which can act as an X-ray moderator resulting in μ_1 improved HVL. At 100 phr of BaSO₄ content, the highest μ_1 , μ_m , and the lowest HVL were 1.342 cm⁻¹, 1.923 cm²/g, and 0.517 cm, respectively. These results confirm that increasing the contents of BaSO₄ could improve the radiation shielding properties of NR/BaSO₄ composites.

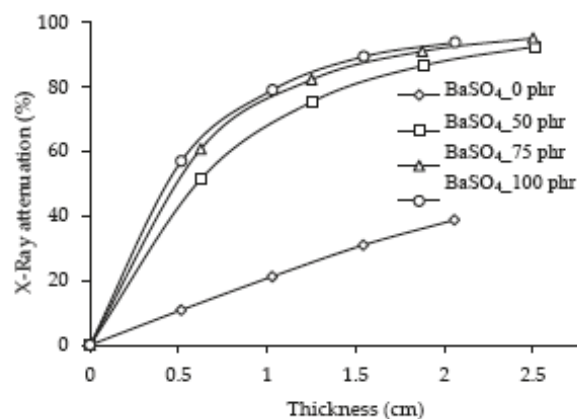


Figure 6. X-ray attenuation (%) of NR/BaSO₄ composites with varying contents of BaSO₄.

Table 2. The linear attenuation coefficient, mass attenuation coefficient and half-value layer of NR/BaSO₄ composites.

BaSO ₄ content (phr)	Linear attenuation coefficient; μ_l (cm ⁻¹)	Mass attenuation coefficient; μ_m (cm ² /g)	Half value layer; HVL (cm)
0	0.241	0.406	2.880
50	1.092	1.79	0.635
75	1.203	1.891	0.576
100	1.342	1.923	0.517

4. Conclusions

This work developed flexibility, lead-free, X-ray shielding materials based on NR/BaSO₄ composites with the contents varied BaSO₄ from 0 to 50, 75, and 100 phr. The results showed that BaSO₄ worked effectively as active fillers to shield X-rays. The NR/BaSO₄ composites had a higher linear attenuation coefficient (μ_l) and mass attenuation coefficient (μ_m) with increasing BaSO₄, while the HVL was decreased. Furthermore, it was found that the X-ray attenuation property improved with increasing BaSO₄ content and material thickness. The results also indicated that the increasing BaSO₄ increased the density and hardness of NR/BaSO₄ composites.

5. Acknowledgements

This work was supported by National Higher Education, Science, Research and Innovation Policy Council, Thaksin University (Research project grant) Fiscal Year 2022.

Author Contributions: Conceptualization, S. K. and A. S.; designed the experiments, S. K. and A. S.; performed the experiments, S. K., A. S., F. T. and W. N.; analysis and investigation, S. K. and P. B.; writing—review and editing, S. K. and P. B.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Funding: This research was funded by National Higher Education, Science, Research and Innovation Policy Council and Thaksin University (Research project grant) Fiscal Year 2022.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- [1] Shepp, L. A.; Kruskal J. B. Computerized Tomography: The New Medical X-Ray Technology. *The American Mathematical Monthly*, 1978; 85(6), 420-439.
- [2] Toyen, D.; Saenboonruang, K. Comparative X-ray shielding properties of bismuth oxide/natural rubber composites using a Monte Carlo code of PHITS. *Materials Science and Engineering*, 2020, 773; 1-4.
- [3] Onjun, O.; Buasuwan, N.; Rungseesumran, T.; Kamwang, N.; Channuie, J. Natural rubber block as gamma radiation shielding for medical applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1285; 1-8.
- [4] Mirzaei, M.; Zarrebini, M.; Shirani, A.; Shanbeh, M.; Borhani, S. X-ray shielding by a novel garment woven with melt-spun monofilament weft yarn containing lead and tin particles. *Textile Research Journal*, 2019, 89(1); 63-75.
- [5] Khatib, A. M. E.; Doma, A. S.; Badawi, M. S. Rayan, A. E. A.; Aly, N. S.; Alzahrani, J. S.; Abbas, M. I. Conductive natural and waste rubbers composites-loaded with lead powder as environmental flexible gamma radiation shielding material. *Materials Research Express*, 2020; 7, 1-16.
- [6] Kim, S.C.; Cho, S.H. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Applied Sciences*, 2019; 9(9), 1-9.
- [7] Poltabtim, W.; Wimolmala, E.; Saenboonruang, K. Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018; 153, 1-9.
- [8] Poltabtim, W.; Wimolmala, E.; Markpin, T.; Sombatsompop, N.; Rosarpitak, V.; Saenboonruang, K. X-ray Shielding, Mechanical, Physical, and Water Absorption Properties of Wood/PVC Composites Containing Bismuth Oxide. *Polymers*, 2021; 13, 1-16.
- [9] Toyen, D.; Rittirong, A.; Poltabtim, W.; Saenboonruang, K. Flexible, lead-free, gamma shielding materials based on natural rubber/metal oxide composites. *Iranian Polymer Journal*, 2018; 27, 33-41.
- [10] Poltabtim, W.; Wimolmala, E.; Markpin, T.; Sombatsompop, N.; Rosarpitak, V.; Saenboonruang, K. X-ray Shielding, Mechanical, Physical, and Water Absorption Properties of Wood/PVC Composites Containing Bismuth Oxide. *Polymers*, 2021; 13, 1-16.
- [11] Zhang, X.; Yang, M.; Zhang, X.; Wu, H.; Guo, S.; Wang, Y. Enhancing the neutron shielding ability of polyethylene composites with an alternating multi-layered structure. *Composites Science and Technology*, 2017; 150, 16-23.
- [12] Cherkasov, V.; Yurkin, Y.; Avdinin, V.; Sunstov, D. Self-adhesion X-ray Shielding Composite Material of EPDM Rubber with Barite: Mechanical Properties. *Materiale Plastice*, 2020; 57(1), 28-36.
- [13] Akkurt, I.; Akyildirm, H.; Mavi, B.; Kilincarslan, S.; Basyigit, C. Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. *Annals of Nuclear Energy*, 2010; 37, 910-914.
- [14] Sukkaneewat, B.; Utara, S. Ultrasonic-assisted Dunlop method for natural rubber latex foam production: Effects of irradiation time on morphology and physico-mechanical properties of the foam. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022; 82, 1-11.
- [15] Phomrak, S.; Nimpai boon, A.; Zhang Newby, B. Natural Rubber Latex Foam Reinforced with Micro and Nanofibrillated Cellulose via Dunlop Method. *Polymer*, 2020; 12, 1-16.
- [16] Lim-aroon, P.; Wimolmala, E.; Sombatsompop, N.; Saenboonruang, K. Manufacturing process and properties of lead-free natural rubber sponge for use in X-ray and gamma ray shielding applications. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019; 526, 1-4.
- [17] Atichatkul, T.; Chanunpanich, N.; Pungkun V.; Suwanboon, C. X-ray Attenuation Coefficient of PU/BaSO₄ Composite Sheet. *The Journal of KMITNB*, 2017; 27(1), 159-168.