



การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็น
วัสดุกำบังรังสีแกมมา

Development of Geopolymer Composite from Iron Sludge as a Gamma
Radiation Shielding Material

Chhayhong Kim

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Applied Physics

Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็น
วัสดุกำบังรังสีแกมมา

Development of Geopolymer Composite from Iron Sludge as a Gamma
Radiation Shielding Material

Chhayhong Kim

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Applied Physics
Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็น
วัสดุกำบังรังสีแกมมา

ผู้เขียน Mr. Chhayhong Kim

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม) (รองศาสตราจารย์ ดร.จวิฑ์ ชิตตระการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)

..... กรรมการ
(ดร.สมัญญา สงวนพรรค) (ดร.สมัญญา สงวนพรรค)

..... กรรมการ
(ดร.สุนารี นดีพงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(Mr. Chhayhong Kim)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(Mr. Chhayhong Kim)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา
ผู้เขียน	Mr. Chhayhong Kim
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสีแทนการใช้ปูนซีเมนต์ที่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง และทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการลดทอนรังสีของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ โดยในการทดลองใช้วัตถุดิบหลัก คือ ดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช สารละลายต่างเข้มข้นที่มีส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) คือ 2:1 โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 10 M และใช้กากตะกอนเหล็กที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยมวลของดินเหนียว ทำการผสมและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดจากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากผลการทดลอง พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพ จีโอพอลิเมอร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น โดยความหนาแน่นอยู่ที่ช่วง $2.026 - 2.207 \text{ g/cm}^3$ ส่วนร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11.7% ที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20% ในขณะที่ความทนต่อแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 80 MPa ที่ปริมาณกากตะกอนเหล็กเท่ากับ 20% เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าร้อยละการดูดซึมน้ำกับผล SEM ที่แสดงการกระจาย และแทรกตัวของกากตะกอนเหล็กในจีโอพอลิเมอร์ ส่วนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก และผลึกของแร่ควอตซ์ในดินเหนียวไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง ในทางตรงกันข้ามแร่กาโอลินไนต์ (Kaolinite) ได้เปลี่ยนโครงสร้าง นอกจากนี้ คุณสมบัติทางการลดทอนรังสี จีโอพอลิเมอร์ดินเหนียวผสมกากตะกอนเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ^{60}Co พบว่า สมบัติประสิทธิภาพการลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณกากตะกอนเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการลดทอนรังสีไม่ได้ขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุที่เป็นเนื้อหลักด้วยเช่นกัน โดยสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นมีค่าสูงสุดที่ปริมาณตะกอนเหล็ก 50 % มีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.8428 \pm 8.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ที่

(6)

ระดับพลังงาน 1.330 MeV และ $0.8285 \pm 2.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ สำหรับพลังงาน 1.172 MeV ส่วนความหนา (HVL) คือความหนาที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากตะกอนเหล็กเพิ่มขึ้น ในรูปร้อยละของรังสีที่ผ่านแผ่นกำบังรังสี พบว่าแผ่นจีโอพอลิเมอร์สามารถป้องกันรังสีได้ 35.5 – 64.5 %

จากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่า กากตะกอนเหล็กมีความสามารถป้องกันรังสีแกมมา และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้ จีโอพอลิเมอร์ได้

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์, ดินเหนียว, กากตะกอนเหล็ก, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติเชิงกล, สมบัติด้านการกำบังรังสี

content. However, the radiation resistance is not solely dependent on the density of the material. It also depends on the distribution of the filler in the material. The linear gamma attenuation coefficient was the highest at 50% iron sludge, which was $0.8428 \pm 8.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ at an energy level of 1.330 MeV and $0.8285 \pm 2.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ at the energy level 1.172 MeV. The half-thickness (HVL) is the thickness that halves the radiation intensity, which decreases as the iron sludge content increases. As the percentage of radiation that passes through the radiation shield, it was found that the geopolymer can block 35.5 - 64.5% of radiation.

From this research, it can be concluded that iron sludge has the ability to reduce gamma radiation. And it can also help strengthen the Geopolymer.

Keywords: Geopolymer, Clay, Iron Sludge, Physical Properties, Mechanical Properties, Radiation Shielding Properties

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณแหล่งทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ปี 2561

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พวงทิพย์ แก้วทับทิม และดร.สมัญญา สงวนพรรค ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และเสนอแนวทางในการศึกษาค้นคว้าด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่งตลอดมา ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง และความทุ่มเทของอาจารย์ทั้งสองท่านจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ดร.สุนารี บดีพงศ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำเพิ่มเติม จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ คุณวิทยา ทรงกิตติกุล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้แนวคิดและคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่คอย เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการศึกษาเสมอมา

คุณประโยชน์ใด ๆ อันพึงมีจากงานวิจัยฉบับนี้ผมขอมอบแต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนสถาบันการศึกษาที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ผมตลอดมา และขอมอบแต่ทุกท่านที่มีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จในการวิจัยฉบับนี้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	5
ABSTRACT	7
กิตติกรรมประกาศ.....	9
สารบัญ	10
สารบัญตาราง	13
สารบัญภาพประกอบ.....	14
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	6
2.1.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์	6
2.1.2 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization).....	7
2.2 ดัชนีรังสี.....	13
2.2.1 การกระทำของรังสีกับวัตถุ	13
2.2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา	14
2.3 หลักการทำงานของเครื่องต่าง ๆ	22
2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF).....	22
2.3.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD).....	23
2.3.3 การหาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาโดยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA). 24	24
2.3.4 ระบบหัววัดรังสีแกมมา.....	26
2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณ.....	26
2.4.1 ค่าความทนต่อแรงอัด	26
2.4.2 คำนวณหาค่าความหนาแน่น.....	27
2.4.3 ร้อยละการดูดซึมน้ำ.....	27
2.4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีแกมมา.....	27

บทที่ 3 วิธีการวิจัย.....	28
3.1 วัสดุดิบ สารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ทดสอบ	28
3.1.1 วัสดุดิบ คือ.....	28
3.1.2 สารเคมี คือ.....	29
3.1.3 วัสดุอุปกรณ์ คือ.....	30
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ทดสอบ คือ.....	30
3.2 การเตรียมชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์	33
3.2.1 การเตรียมวัสดุดิบที่เป็นดินเหนียว.....	33
3.2.2 การเตรียมวัสดุดิบที่เป็นกากตะกอนเหล็ก	33
3.2.3 การเตรียมสารละลาย	34
3.2.4 สัดส่วนของวัสดุดิบ และสารละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้	34
3.2.5 การผสมและขึ้นรูป.....	34
3.3 การวิเคราะห์ ทดสอบ.....	35
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้.....	35
3.3.2 การทดสอบความทนต่อแรงอัด.....	36
3.3.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี	36
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์.....	40
4.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก.....	40
4.1.1 ดินเหนียวนครศรีธรรมราช	40
4.1.2 กากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม	43
4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	44
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ.....	44
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัด	46
4.2.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วย (SEM).....	50
4.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านการลดทอนรังสีของจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก	53
4.3.1 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient)..	56
4.3.2 ผลการศึกษาค่าความหนาครึ่งค่า (Half-Value Layer).....	58
4.3.3 ผลการศึกษาอัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์.....	59
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุป	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63

บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	69
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณสูตรผสมในการทดลอง	78
ภาคผนวก ค มาตรฐาน ASTM C 192.....	80
ภาคผนวก ง มาตรฐาน มอก. 77 - 2545	87
ภาคผนวก จ การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สูตรผสมของตัวอย่างเพื่อการขึ้นรูป	34
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวนครศรีธรรมราช	42
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กก่อนเผาที่อุณหภูมิ 600 °C	44
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กหลังเผาที่อุณหภูมิ 600 °C	44
4.4 ความสัมพันธ์ของปริมาณกากตะกอนเหล็กในวัสดุอีโพลิเมอร์	51
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นโดยเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	55
4.6 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น	60

สารบัญภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 การเชื่อมต่อของโครงสร้าง Aluminosilicate และตัวกระตุ้นต่าง	9
2.2 การชะละลายของสารละลายแอลคาไลน์ในโครงสร้าง Aluminosilicate	10
2.3 โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และการแลกเปลี่ยนประจุด้วยตัวกระตุ้นต่าง	11
2.4 รูปแบบจำลองของสารอะลูมิโนซิลิเกตสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ร่วมกับสารละลายต่าง	12
2.5 การลดลงของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา	15
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล	18
2.7 การเกิดกระบวนการการผลิตคู่	19
2.8 การชนแบบคอมป์ตัน (การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน)	20
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบคอมป์ตันของโฟตอน	20
2.10 การเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	21
2.11 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	22
2.12 หลักการทำงานของเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	23
2.13 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	24
2.14 หลักการทำงานของเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	24
2.15 เครื่อง Differential Thermal Analysis	25
2.16 หลักการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง	25
2.17 เครื่องแกมมาสเปกโทรมิเตอร์ระบบหัววัด NaI (TL)	26
3.1 ดินเหนียว อำเภอนาทอง จัหวัดนครศรีธรรมราช	28
3.2 กากตะกอนเหล็กจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน	28
3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดเคมี 98%	29
3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)	29
3.5 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงอัดยี่ห้อ ELE international	30
3.6 เครื่อง X-Ray fluorescence spectrometer, PW2400, Philips, Netherlands	31
3.7 เครื่อง X-Ray Diffractometer, X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands	31
3.8 เครื่อง Differential Thermal Analyzer, DTA, Perkin Elmer, USA	32
3.9 หัววัดโซเดียมไอโอดด์ (NaI Detector)	32

3. 10 (a) ชิ้นตัวอย่างวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด	35
3.11 แผนผังกระบวนการทดลอง	37
3. 12 สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้มาจาก ^{60}Co	38
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจาก Co-60 และ Cs-137	38
3.14 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	39
4.1 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวนครศรีธรรมราชโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	41
4.2 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวโดยใช้เทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)	42
4.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	43
4.4 ความหนาแน่นของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์กับปริมาณกากตะกอนเหล็ก	45
4.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก	46
4.6 ค่าความแข็งแรงในรูปกำลังอัดของสำหรับวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์	47
4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	49
4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	52
4.9 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	52
4.10 สเปกตรัม ^{60}Co ที่วัดได้เมื่อทดลองแบบมีและไม่มีตัวอย่างกันรังสีแกมมา	53
4.11 การเปรียบเทียบสเปกตรัม ^{60}Co ที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่าง	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ย	56
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ย	57
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นจริงค่า กับปริมาณของกากตะกอนเหล็ก	59
4.15 อัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์หนา 1 เซนติเมตร	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการแพทย์ การเกษตร และในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่เนื่องจากรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง จัดเป็นรังสีก่อไอออน ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม หากผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีได้รับรังสีในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพ และร่างกาย เช่น ทำให้เกิดความเสียหายในการเกิดเซลล์มะเร็งเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหาวิธีป้องกันรังสีดังกล่าว โดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีสามารถป้องกัน และลดโอกาสที่จะได้รับรังสีได้ด้วยหลักการ “ALARA” หรือ As Low As Reasonable Achievable ซึ่งประกอบด้วยหลัก 3 ประการ คือ ระยะเวลาควรใช้ระยะเวลาในการปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสีให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ส่วนระยะทางควรใช้ระยะห่างในการปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสีให้มีระยะห่างมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากความเข้มของรังสีจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับอันตรายจากรังสีลดลงเมื่ออยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี และสุดท้ายการกำบังรังสีควรใช้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับงานทุกครั้ง เพื่อลดทอนปริมาณรังสีให้มากที่สุดก่อนถึงตัวผู้ปฏิบัติงาน (Akkurt, I., 2010) อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ งานที่ต้องปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสีอาจจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาปฏิบัติงานที่ยาวนาน หรือจำเป็นต้องอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดรังสี เพื่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน ดังนั้นการกำบังรังสีจึงเป็นวิธีการสำคัญอย่างยิ่งในการป้องกันอันตรายจากรังสี ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์กำบังรังสีมักจะมีอยู่ในรูปของแผ่นกำบังรังสีที่ผลิตจากธาตุหนักหรือสารประกอบของธาตุหนัก เช่น ตะกั่ว แต่เนื่องจากตะกั่วมีราคาแพง และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ และยังให้ความแข็งแรงไม่มากพอที่จะนำมาทำเป็นผนังอาคารได้ จึงได้มีการนำคอนกรีตมาทำเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาทดแทนการใช้ตะกั่ว แต่คอนกรีตมีวัตถุดิบหลักเป็นปูนซีเมนต์ในการสร้าง ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอย่างมาก ซึ่งทำให้อุณหภูมิบรรยากาศของโลกเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และสารกัมมันตรังสี มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาวัสดุประสานชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความแข็งแรง และสามารถกำบังรังสีได้ มาแทนการใช้ปูนซีเมนต์ และตะกั่ว นั่นคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมากหรืออาจไม่เกิดเลย โดยจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอไรเซชันของสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูงและออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ผสมทำ จีโอพอลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ดินขาว ดินขาวเผาแคลไซน์ และวัสดุของเหลือจำพวกเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ เป็นต้น นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสีแล้วยังสามารถนำวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาสร้างมูลค่าเพิ่ม และนำของเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ ซึ่งในต่างประเทศปัจจุบันเริ่มมีการนำจีโอพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และใช้ผสมเถ้าลอยในงานเทพื้นทางเดินในประเทศออสเตรเลีย เป็นต้น แต่สำหรับประเทศไทยจีโอพอลิเมอร์ยังคงเป็นเทคโนโลยีใหม่ ยังไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากยังอยู่ในช่วงการพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในอนาคต (ดวงฤดี, 2558)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวัสดุกำบังรังสีแกมมาจากจีโอพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช ผสมกับกากตะกอนเหล็ก ปัจจัยที่เลือกดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจากดินบริเวณนั้นมีปริมาณแร่เคโอลินิต (Kaolinite) และควอตซ์ (Quartz) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนเหล็กที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในกากตะกอนมีความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นสมบัติการป้องกันรังสีที่ดี ทำให้จีโอพอลิเมอร์ธรรมชาติสามารถป้องกันรังสีได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ตึก อาคารด้านรังสี เช่น โรงไฟฟ้าพลังปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค และโรงพยาบาลศูนย์ แทนปูนซีเมนต์ จึงเป็นทางเลือกใหม่ในอนาคตสำหรับแก้ปัญหาโลกร้อน พร้อมกับความสามารถป้องกันรังสีที่ดีด้วย

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ โดยจะถูกทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารอัลคาไลด์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ซึ่งจะใช้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการแข็งตัวได้เร็วยิ่งขึ้น โดยให้ความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ $60-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ตามวัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติ (Kumar, 2011) แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุตั้งต้นที่จะนำมาผลิตจีโอพอลิเมอร์ มักเตรียมขึ้นจากเถ้าลอย (Guo et al., 2009) และดินขาวเผา (Favier et al., 2013) เป็นหลัก

Ogundiran and Kumar (2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ลักษณะของจีโอพอลิเมอร์จากดิน Ikere ในประเทศไนจีเรีย ซึ่งเป็นดินที่สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้ โดยได้ศึกษาความสำคัญของการละลายต่อไฮโดรไลซิสที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาความเป็นต่างของดิน และการพัฒนา กำลังของจีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวไปเป็นดินขาวโดยการใช้ความร้อนเพื่อแปลงเป็น Metakaolin ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวทำละลาย จีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีความทนต่อแรงอัดสูงสุด 28.2 MPa โดยโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดกะทัดรัดจะมีความทนต่อแรงอัดที่ดีในขณะเดียวกันกับ (Aboulayt et al., 2017) ได้ศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผาผสมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกัน ทั้งในสถานะที่ยังไม่แข็งตัว และแข็งตัว แล้ว เมื่อนำจีโอพอลิเมอร์ไปวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณด้วยเทคนิค (XRF) และวิเคราะห์ทางแร่ด้วยเทคนิค (XRD) พบว่าดินขาวนี้มีส่วนประกอบของแร่ kaolinite ประมาณ 87 % และแสดงให้เห็นว่าดินขาวชนิดนี้มีความบริสุทธิ์สูง จากการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ 40 °C และยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงต่อแรงดัด และการบีบอัด มีค่าประมาณ 4.6 และ 26 MPa ตามลำดับ สำหรับจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีค่า เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 12 % โดยมวล ต่อมา (Olivia and Nikraz, 2011) ได้ออกแบบส่วนผสมของซีเถ้า ลอยจากคอนกรีต geopolymer เพื่อเพิ่มสมบัติของส่วนผสมโดยใช้ Taguchi method ในการศึกษาใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น 14 M และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5-2.5 โดยเก็บตัวอย่างคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิ 75 °C และระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าความทนต่ออัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 60 MPa ต่อมา (Selmani et al., 2017) ได้ทำการศึกษาต่อเกี่ยวกับความสามารถของการใช้ดินเหนียวตามธรรมชาติ ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินขาว โดยมีการศึกษาจากดินสามชนิดจากสถานที่ที่แตกต่างกัน ในประเทศตูนิเซีย พบว่าดินเหนียวตามธรรมชาติ และดินขาวเผา สามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ได้ แต่การเพิ่มปริมาณของดินเหนียวธรรมชาติจะลดแรงอัดของวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น Illite, Calcite, Iron แต่ถึงแม้ว่าดินจากทั้งสามที่มีปริมาณ Kaolinite ต่ำ ก็สามารถนำมาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ดี ในการใช้เป็นตัวแทนที่ดินขาวแทน

Danupon et al. (2008) ได้ประเมินคุณลักษณะของคอนกรีตกำบังรังสีผสมมวลรวมแบไรต์ และ เพอร์ไลต์ดิบเป็นแร่ผสมเพิ่ม ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเพอร์ไลต์ดิบแตกต่างกัน (10, 20 และ 30 % โดยปริมาตร) บ่ม 28 วัน ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และการฉายรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก ผลทดสอบแสดงว่าคอนกรีตแบไรต์มีความหนาแน่น 3,375 - 3,462 kg/m³ ร้อยละการดูดซึมน้ำ และยังมีค่ากำลังอัดคอนกรีตแบไรต์ซ้อนกันหนา 15 mm ได้ลดทอนรังสีแกมมาส่งผ่านได้มาก จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตกำบังรังสีที่ผสมด้วยแร่แบไรต์ และเพอร์ไลต์ สามารถลดทอนรังสีแกมมาส่งผ่านได้ และเนื่องจากรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาเป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เลยทำให้มีการค้นคว้าการกันรังสีของรังสีแกมมาเพิ่มเติม (Nastasia et al., 2018) ได้ศึกษาการผสมตะกั่วที่เข้าไปในมวลรวมคอนกรีต จะทำให้ความทนต่อแรงอัดลดลงเพิ่มความหนาแน่น และประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาสำหรับ ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co ซึ่งมีพลังงานรังสีเฉลี่ย 0.37, 0.662 และ 1.25 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม้แต่ตะกั่วที่นำไปสู่การลดความทนต่อแรงอัด แต่คอนกรีตยังมีค่าสูงกว่า 50 MPa ผ่านการทดสอบทั้งหมด การใช้ตะกั่วหลักสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตหนักได้ ในขณะเดียวกัน (สุชายาพร และสุชาติ, 2551) ได้ผลิตอิฐมอญที่มีคุณสมบัติในการกันรังสีเอ็กซ์เพื่อใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างผนังห้องเอกซเรย์สำหรับป้องกันรังสีกระเจิงให้แก่เจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานได้ผลิตอิฐมอญที่มีส่วนผสมของ BaSO₄ ในสัดส่วนต่าง ๆ (5-20 %) แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม และทดสอบคุณสมบัติในการกันรังสีเอ็กซ์โดยนำอิฐมอญที่มีส่วนผสมของ BaSO₄ แต่ละสัดส่วนมาก่อเป็นกำแพงจำลองแล้วนำวัดปริมาณรังสีเพื่อสำรวจอัตรารังสีกระเจิงที่ตำแหน่งหน้ากำแพง และหลังกำแพงที่ 50-100 kV และปรับเปลี่ยนค่ามิลลิวินาที เป็น 10, 20, 30 mC เพื่อหาค่าร้อยละการดูดกลืนรังสี ผลการทดสอบพบว่าอิฐมอญที่ผลิตจากเครื่องอัดแรงดันสามารถทนแรงอัดได้ดีกว่าอิฐมอญที่ผลิตจากแรงงานคน และอิฐมอญที่ผลิตจากแรงงานคนมีค่าร้อยละของการดูดกลืนน้ำสูงกว่าอิฐมอญที่ผลิตจากเครื่องอัดแรงดันผลการทดสอบการกันรังสีพบว่าอิฐมอญที่มีส่วนผสม BaSO₄ ในสัดส่วน 5-20 % เมื่อนำไปสร้างกำแพงให้มีความหนา 12 เซนติเมตร แล้วสามารถกันรังสีให้อัตรารังสีเอ็กซ์หลังกำแพงไม่เกินค่าระดับความปลอดภัยที่กำหนด (ICRP60) คือไม่เกิน 2 มิลลิเรินท์เกินต่อชั่วโมง ได้ทั้งสิ้น การวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าอิฐมอญที่มีส่วนผสม BaSO₄ ตั้งแต่ 5-20 % เมื่อนำไปใช้งานก่อกำแพงห้องเอกซเรย์แล้วสามารถกันรังสีเอ็กซ์ทั้งรังสีปฐมภูมิ และรังสีทุติยภูมิ ที่ระดับค่าพารามิเตอร์การให้ปริมาณรังสีไม่เกิน 100 kV 30 mC ต่อมา (กัลยาณี และคณะ, 2551) ได้ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติ STR 5L ผสมกับผงเพอร์ไรต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงาน และผงเขม่าดำในอัตราส่วนต่างกัน แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจาก 241 mC (พลังงาน

59.8 kV) โดยแปรค่าความหนาของแผ่นยาง 1-5 mm พบว่าประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาของผงเฟอร์ไรต์ และความหนาของแผ่นยางที่เพิ่มขึ้น ยาง STR 5L ผสมผงเขม่าดำ 20 phr และผงเฟอร์ไรต์ 100 phr มีค่า attenuation coefficient 2.31 cm^{-1}

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อการกันรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตรวมทั้งเป็นทางเลือกการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาครัฐและเอกชนในอนาคตอันใกล้นี้อย่างแน่นอน จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อประยุกต์การใช้กากของเสียที่เป็นโลหะหนักมาเป็นตัวกำบังรังสีในผนังจีโอพอลิเมอร์
- 1.3.2 เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กจากโรงงาน เพื่อประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์กำบังรังสี ทดแทนการใช้ตะกั่ว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

2.1.1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุสังเคราะห์อนินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาสารประกอบหลักอะลูมินาที่อยู่ในรูปของ Al_2O_3 และซิลิกาที่อยู่ในรูป SiO_2 ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายต่างเข้มข้น เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง จากคำจำกัดความ ข้างต้นทำให้สามารถจำแนกแหล่งวัตถุดิบของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.1.1.1 วัตถุดิบต้นกำเนิด (Primary Source) ได้แก่ กลุ่มแร่ดินเหนียวชนิด Kaolinite, Halloysite,rophyphyllite, Muscovite, Mica, Albite และ Chlorite

2.1.1.2 วัตถุดิบผลิตภัณฑ์ (Secondary Source) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม การเผาไหม้เชื้อเพลิง และถลุงสินแร่โลหะได้แก่ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) (Zhang et al., 2008) ซึ่งกลุ่มวัตถุดิบผลิตภัณฑ์จะมีความบริสุทธิ์ น้อยกว่ากลุ่มแรกเนื่องจากบางส่วนพบการปนเปื้อนของโลหะหนักจากกระบวนการผลิต ด้วยความ ได้เปรียบของกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีปริมาณมหาศาลบนพื้นโลก และเนื้อวัสดุมีความบริสุทธิ์มากกว่า อีกทั้งแร่ดินเหนียวที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนพบว่ามีสมบัติวัสดุที่เอื้อต่อการทำ ปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์สามารถแข็งตัว และให้กำลังอัดที่สูง (Deventer, 2003) จึงเป็น ข้อได้เปรียบทำให้แร่ดินเหนียวที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนได้รับความสนใจ และ นิยมนำมาสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์ตั้งแต่ยุคตั้งต้นดังปรากฏในผลงานการจดสิทธิบัตรของ Prof. Davidovits ใช้ชื่อ MK750 มีที่มาจาก การนำแร่เคโอลิน ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) มากระตุ้นผ่าน กระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง (Dehydration and Dehydroxylation) เพื่อเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้าง ใหม่เรียกชื่อว่า Metakaolinite (Calcined Caolinite Clay or Ehydroxylation Kaolinite) ด้วย การเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทำให้อนุภาค MK 750 เกิดการจัดเรียงอย่างไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ภายในโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนย้ายหมู่ฟังก์ชัน Hydroxyl (OH group) ออกจากโครงสร้างวัสดุหรือสูญเสียการดูดซับน้ำ (Montes, 2010) ดังนั้นระบบที่มีการสูญเสีย OH group จะส่งผลให้โครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบปรากฏเป็นส่วนโค้งหลังเต่า (Hump) นิยมเรียกว่าโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ดังปรากฏใน ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสี X-ray (XRD) ระหว่างมุม 15 -35 องศา (2 theta) ร่วมกับพีคของแร่มีสโคไวต์ (Muscovite) ที่มีความบริสุทธิ์น้อยกว่า และกระจายอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์ (Duxson et al., 2007) ดังนั้นการเผา

กลุ่มแร่ดินขาวที่อุณหภูมิ 750 °C จะส่งผลให้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตในแร่ดินเหนียวมีโครงสร้างที่สามารถเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันได้ดี และเป็นที่ยอมรับกันในกลุ่มนักวิจัย (Montes, 2010) ส่วนวัตถุดิบอื่น ๆ ที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นส่วนประกอบหลักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เช่นเดียวกัน ได้แก่ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน แต่พบปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักที่ต้องกำจัด และหน่วงการเกิดปฏิกิริยาจึงไม่ได้รับความนิยม (Zheng et al., 2010) เช่นเดียวกับหางแร่ (Mine tailings) (Deventer, 2003)

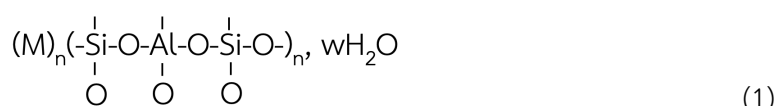
2.1.1.3 สารอัลคาไลไฮดรอกไซด์ จัดเป็นสารละลายที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพราะเป็นสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับวัสดุพอลิเมอร์ได้ดี มีการเลือกใช้สารเคมีอย่างหลากหลายโดยอัตราส่วนสารละลายต่างจะต้องมีปริมาณความเข้มข้นที่มากพอสำหรับการทำปฏิกิริยา สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความทนต่อแรงอัดได้ ซึ่งสารละลายทั้ง 2 ชนิดนี้ มีความเป็นด่างสูงแต่สามารถนำมาใช้งานได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะทำให้ จีโอพอลิเมอร์มีคุณภาพดีมากกว่า สำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะเป็นที่ยนิมมากกว่า เนื่องจาก ราคาไม่แพงและหาซื้อได้ง่าย

2.1.1.4 สารประกอบซิลิเกต จัดเป็นสารละลายประเภทตัวเชื่อมที่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ได้ สารประกอบซิลิเกตนิยมนำมาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมหลายชนิด เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความทนต่อแรงอัดได้ดี และยังเป็นการเพิ่มปริมาณซิลิกอนให้กับปฏิกิริยาด้วย นั่นคือสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate : Na_2SiO_3) ซึ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำมีคุณสมบัติเป็นด่าง และมีลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้ม

2.1.2 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชัน (Geopolymerization)

กล่าวโดยทั่วไปปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันจะเริ่มต้นเมื่อสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตสัมผัสกับสารละลายด่าง ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบอนินทรีย์ 2 ส่วน (An inorganic 2-component system) ส่วนแรกประกอบด้วย ส่วนประกอบของแข็งซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีจำนวนเพียงพอและอยู่ในรูปแบบที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น ทราย และดินเหนียวที่ผ่านการกระตุ่น ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของเหลวในรูปสารละลายด่าง ได้แก่ สารประกอบไฮดรอกไซด์ซิลิเกต อะลูมิเนียมคาร์บอเนต และซัลเฟตรวมกับน้ำ ผลของการผสมและการทำปฏิกิริยาได้เป็นวัสดุที่แข็งตัวจากโครงข่ายของอะลูมิเนียมซิลิเกตในรูปแบบของอสัณฐานหรือกึ่งผลึก (Semi-crystalline) (Buchwald et al., 2011)

โครงสร้างหลักของจีโอพอลิเมอร์จึงเกิดขึ้นจากองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และ ออกซิเจนรอบ ๆ อะตอมของซิลิกอนเชื่อมต่อกับอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม และอะตอมของ ออกซิเจนแต่ละอะตอมเชื่อมต่อกับอะตอมของซิลิกอน 2 อะตอมมีการแลกเปลี่ยนอะตอมตลอดทั้ง โครงสร้างเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์แบบมีขั้วระหว่างอะตอมของซิลิกอน และออกซิเจน ส่วนปฏิกิริยาเคมีเกิดจากการเชื่อมโยงของ Silico-Aluminate หรืออะลูมิโนซิลิเกตจับกันด้วยอะตอมซิลิกอน (Silicon) ในรูปของ SiO_4 และอะลูมิเนต (Aluminate) ในรูปของ AlO_4 Tetrahedral ซึ่งมีชื่อย่อ เรียกว่า sialate (Si-O-Al) เป็น Polymer Chain (Polymer sialate) ใช้ ออกซิเจนร่วมกัน และมี alkali ได้แก่ Sodium (Na) Potassium (K) Lithium (Li) และ Calcium (Ca) อย่างน้อย 1 ตัว เชื่อมต่อในโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.1 การจับตัวของอะลูมิโนซิลิเกตจะเกิดเป็นโครงสร้างลูกโซ่โมเลกุลใหญ่ (Macromolecular structure) มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ในสารตั้งต้น และมีชื่อเรียกเฉพาะตามอัตราส่วนของ Si : Al โดยอัตราส่วนของ Si : Al เท่ากับ 1 (Si-O-Al-O) เป็นผล ของปฏิกิริยา Polycondensation ของ Monomer Ortho-Sialate $(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al-}(\text{OH})_3$ ตามที่ Davidovits (2008) เสนอหน่วยโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปประกอบด้วยโมเลกุลของ จีโอพอลิเมอร์ที่เกิด จากการจับตัวในรูป poly (Sialates) ที่อัตราส่วนของ Si : Al เท่ากับ 1 สรุปเป็นสูตรอย่างง่ายดัง ปฏิกิริยาที่ 1 คือ



โดย M คือ a Monovalent cation เช่นธาตุแอลคาไลด์ K^+ หรือ Na^+

n คือ จำนวนโมเลกุลของการทำโมเลกุลลูกโซ่ A degree of polycondensation

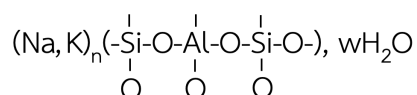
- คือ พันธะ (Bond)

Z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 (Siloxo) เท่ากับ 1 2 3 หรือมากกว่า 3

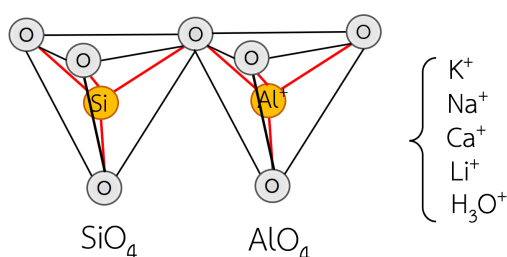
W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

หากจำนวนโมเลกุลของ SiO_2 (Siloxo) เท่ากับ 2 จะเรียกว่า poly (Sialate-siloxo) หรือ PSS และเมื่อผสมกับธาตุ แอลคาไลด์ K^+ หรือ Na^+ จะเรียกว่า (Sodium, Potassium) poly (Sialate -

siloxo) หรือ (Na, K) -PSS เขียนเป็นสูตรองค์ประกอบทางเคมีได้เป็น $1.1 \text{ Na}_2\text{O} : 4\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : 17\text{H}_2\text{O}$ ดังโครงสร้างต่อไปนี้



จีโอพอลิเมอร์เกิดได้ทั้งโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystalline) กึ่งผลึก (Semi-crystalline) และไม่เป็นผลึก (Non-crystalline: Amorphous) ซึ่งหากโครงสร้างผลึกของ Poly (Sialate) $(\text{Si-O-Al-O})_n$ และ Poly (Sialate-siloxo) $(\text{Si-O-Al-O-Si-O})_n$ ถูกกระตุ้นภายใต้เงื่อนไข Hydrothermal ใช้ความร้อนหรือมีความชื้นเพียงพอ และสารละลายต่างมีความเข้มข้นสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างคล้ายผลึกของซีโอไลต์ (Zeolite) ส่วนการก่อตัวที่อุณหภูมิห้องจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกคล้ายกับซีโอไลต์สำหรับบางกลุ่มได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นจุดเด่นของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์อีกประการหนึ่งที่ผลิตภัณฑ์สามารถแข็งตัว และเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิห้อง และให้สมบัติเชิงกลที่ดีเช่นเดียวกับซีเมนต์



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อของโครงสร้าง Aluminosilicate และตัวกระตุ้นต่าง

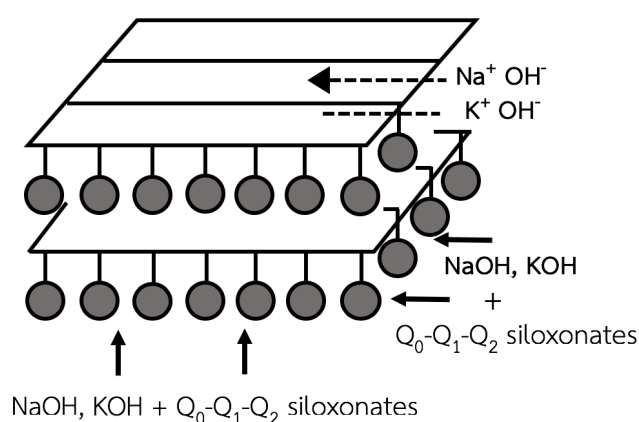
สรุปปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.1.2.1 การชะละลาย (Dissolution)

เริ่มจากวัสดุตั้งต้นผสมกับสารละลายแอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ เช่น NaOH และ KOH หรือสารละลายซิลิเกตเกิดการชะละลายของสารประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกอน และอะลูมิเนียมออกมาจากผิวซึ่งซิลิกอน และอะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเกิดการก่อตัวเป็นเจลขึ้นที่ผิวอนุภาค (อุบลลักษณ์ และปริญญา, 2552) หรือเรียกขั้นตอนนี้ว่า Alkaline activation เนื่องจากต่างมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาของซิลิกอน และอะลูมิเนียม (Buchwald et al., 2009) โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากด้านบน และด้านล่างของวัสดุตั้งต้นส่งผลให้

โมเลกุลถูกชะละลายด้วยสารละลายแอลคาไลน์ตามด้วยการฟองตัวภายในโครงสร้างระหว่างชั้นทำให้สารละลายแทรกซึมเข้าไปในอนุภาคแร่ดินเหนียว ตัวอย่างแสดงดัง รูปที่ 2.2

อนึ่งช่วงแรกที่มีการชะละลายซึ่งปฏิกิริยาต้องการน้ำอย่างเพียงพอเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวพาให้เกิดการกระจายในโครงสร้างคล้ายปฏิกิริยาไฮเดรชันในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Barbosa et al., 2000)



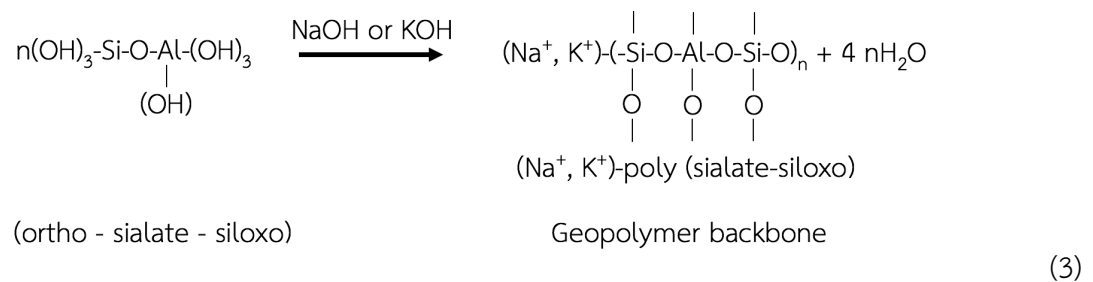
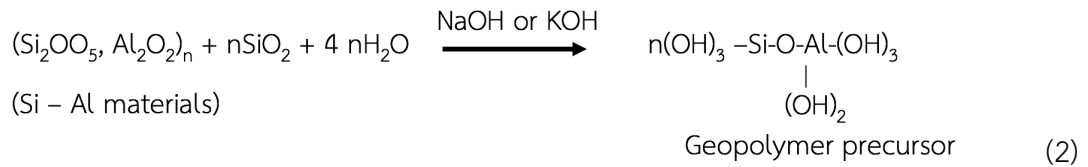
รูปที่ 2.2 การชะละลายของสารละลายแอลคาไลน์ในโครงสร้าง Aluminosilicate

(ที่มา: Barbosa et al., 2000)

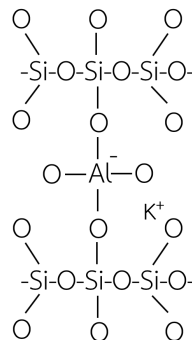
2.1.2.2 การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization)

ไอออนซิลิกอน และอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาเกิดการรวมตัวกับไอออนของออกซิเจนอยู่ในกรงเหลี่ยมสี่หน้า เกิดเป็นรูปปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^+ และ Al^+ ที่เกิดเป็นคอร์รอดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน เชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Si-O-A-O) หรือเรียกขั้นตอนนี้ว่า Condensation เกิดการรวมตัวของ Monomer และ Oligomers ได้โครงข่ายของอะลูมิโนซิลิเกตแสดงถึงกระบวนการทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification) (Buchwald et al., 2009) ช่วงต้นจะเป็นหน่วยกิ่งเสถียร เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเกิดการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์แบบสลับกัน (Cross link) หนาแน่น และมากขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่น และสามารถรับแรงอัดได้ ในปัจจุบันการอธิบายปฏิกิริยาพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ไม่ชัดเจนมากนัก เนื่องจากขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการแต่สามารถเขียนปฏิกิริยาหลักได้ดังปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 และแสดง ดังรูปที่ 2.3 ก และมีการจำลองรูปแบบโครงสร้างการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ด้วย

แอลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ในหน่วย Na-Polysialate polymer แสดงดังรูปที่ 2.4 และอ้างอิงโครงข่ายสามมิติของ K Polysialate polymer ดังรูปที่ 2.4 (Barbosa et al., 2000)



ก. โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ แบบ poly (sialate-siloxo)

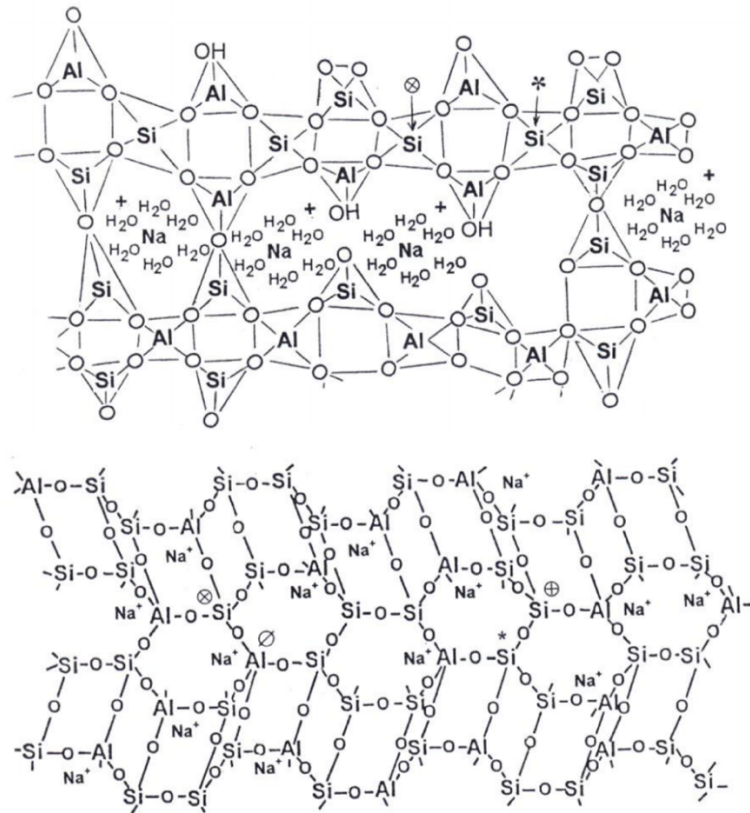


ข. การแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Al^- และ K^+

รูปที่ 2.3 โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และการแลกเปลี่ยนประจุด้วยตัวกระตุ้นต่าง ก. โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ แบบ poly (sialate-siloxo) และ ข. การแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Al^- และ K^+

ซิลิกอนเป็นธาตุในหมู่ 4A เลขอะตอม 14 วาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 เกิดเป็นพันธะ Coordinated กับออกซิเจนในลักษณะ Tetrahedral โดยมีซิลิกา 1 อะตอมจับกับออกซิเจน 4 อะตอม ส่วนอะลูมิเนียมเป็นธาตุในหมู่ 3A เลขอะตอม 13 วาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 3 สามารถเกิดพันธะไอออนิกกับออกซิเจน 3 อะตอม และเกิดพันธะ Coordinated กับออกซิเจน 4 อะตอม การเป็นเกิดพันธะ coordinated ทำให้อะลูมิเนียมแสดงประจุลบ ดังนั้นไอออนของธาตุแอลคาไลน์ในสารละลายต่าง

ที่แสดงประจวบที่จะไปเกาะกับอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.3 ข ส่งผลให้เกิดสภาวะสมดุลภายในก้อนแข็ง
 จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ (van Jaarsveld et al., 1997)



รูปที่ 2.4 รูปแบบจำลองของสารอะลูมิโนซิลิเกตสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ร่วมกับสารละลายต่าง

ก. โครงสร้าง Na-Polysialate polymer ข. โครงข่ายสามมิติอ้างอิงรูปแบบ K-Polysialate

(ที่มา: Barbosa et al., 2000)

ดังนั้นปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) จึงเป็นการรวมตัวของ
 Monomer sialate (Si-O-Al) เป็น Polymer chain เกิดเป็นโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ขึ้นเรียกว่า
 Poly (Sialate-siloxo) (Si-O-Al-O-Si-O)_n มี Polysialate type เท่ากับ 2 หรือเรียกว่า poly
 (Sialate-disiloxo) ซึ่งการรวมตัวขึ้นอยู่กับ poly-sialates (Alumino-silicates) เริ่มต้นก่อนการเกิด
 โพลิเมไรเซชัน (Polymerisation) ร่วมกับแอลคาไลน์ ผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ที่ได้จะมี
 morphology ระหว่างอสัณฐานถึงใกล้เคียงผลึก ซึ่งการปรากฏโครงสร้างอสัณฐานจะมีความสำคัญ
 มากในงานโครงสร้าง ผลจากการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาสามารถระบุผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ได้จาก
 ข้อมูลบ่งชี้ระดับโครงสร้างแบบอสัณฐานซึ่งไม่สามารถใช้เทคนิค XRD วิเคราะห์ และสรุปผลเพียง

อย่างเดียวได้ ดังนั้นการใช้เทคนิค FT-IR ร่วมกับ MAS-NMR จะสามารถระบุระดับการเกิดปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่า (Moster, 2010) ได้สรุปข้อบ่งชี้การเกิดจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ด้วย เทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ การใช้เทคนิค x-ray จะปรากฏที่มุม 2θ กระจายระหว่างมุม $27 - 29$ องศา การใช้เทคนิค FT-IR เกิดพันธะหลัก O-Si-Al ที่เลขคลื่นประมาณ $1,000$ ต่อหนึ่งเซนติเมตร ส่วน โคจรข่ายอื่น ๆ จะปรากฏ Si-O-Si หรือ Si-O-Al ที่เลขคลื่นระหว่าง $950 - 1250$ ต่อหนึ่งเซนติเมตร และ $420-500$ ต่อหนึ่งเซนติเมตร ตามลำดับ และ MAS-NMR เทคนิคสามารถกำหนดรูปแบบการเกิดหน่วย Al four-fold coordinated ได้

จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เกิดขึ้นในรูปแบบของ non-crystalline คล้ายโครงสร้างซีโอไลต์ (Zeolite) แต่สายโซ่สั้น (Short-range order) จุดสำคัญของจีโอพอลิเมอร์จะแสดงโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่ภายหลังการแข็งตัวหรือขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบและตัวกระตุ้นต่าง ทั้งชนิดและความเข้มข้นที่ประกอบกับเงื่อนไขของการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปัจจัยอุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่ม (Buchwald et al., 2009) ดังนั้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจึงเกี่ยวข้องกับ การชะละลาย การเคลื่อนย้าย (Migration) การก่อเจล (Gelation) การจัดเรียง (Reorganization) และการรวมตัวเป็นสารเกาะกลุ่ม (Polymerisation) ซึ่งการแข็งตัวของสารประกอบซิลิกา และอะลูมินาจะเกิดบริเวณผิวของอนุภาคปรากฏให้เห็นเป็นส่วนอนุภาคแข็งที่ไม่ละลายน้ำจากแหล่งอะลูมิโนซิลิเกตเจล (Galiano et al., 2011)

2.2 ด้านรังสี

โลหะผสม โลหะอัลลอยด์หรืออัลลอยด์ สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของโลหะเพื่อให้ได้สมบัติของโลหะผสมที่มีความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ดังนั้นจึงพบเห็นอัลลอยด์ได้ในชีวิตประจำวัน การประกอบอาชีพ หรืองานวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี เพราะเวเลนซ์อิเล็กตรอนของโลหะผสมสามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับโลหะทั่วไป สมบัติกายภาพของโลหะผสมที่สำคัญ ได้แก่ การนำไฟฟ้า ความจุความร้อน และการนำความร้อน ฯลฯ มีความคล้ายคลึงกับโลหะทั่วไปเนื่องจากอิเล็กตรอนเสรีในโลหะเกิดอันตรกิริยากับโฟตอนพลังงานสูง (รังสีแกมมา) โลหะจึงมีสมบัติทึบแสง ดังนั้นการศึกษาวិเคราะห์ และพัฒนาวัสดุกำบังรังสีแกมมาด้วยโลหะผสมหรืออัลลอยด์จึงมีความเป็นไปได้ทั้งเชิงทฤษฎี และการทดลอง

2.2.1 การกระทำของรังสีกับวัตถุ

สิ่งมีชีวิตอาจถูกทำลายได้ด้วยรังสี เมื่อรังสีที่มีพลังงานสูงพุ่งเข้าชน ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมที่ถูกระดม ทำให้อะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (Excitation) หรือเกิดการแตกตัว (Ionization) ถ้าความเสียหายมีมาก ร่างกายไม่สามารถซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพปกติได้ ร่างกายส่วนนั้นก็จะไม่

สามารถทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์เท่าเดิม เกิดความผิดปกติของร่างกายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษากระบวนการทางรังสีที่มีต่อวัตถุรังสี แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.2.1.1 รังสีที่มีมวล (Particulate radiation) เช่น รังสีบีตา รังสีแอลฟา โปรตอน และ นิวตรอน เป็นต้น

2.2.1.2 รังสีที่ไม่มีมวล เช่น รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น อันตรกิริยาของรังสีแบ่งออกเป็น 2 แบบ ประกอบด้วย

1) อันตรกิริยาแบบยืดหยุ่น (Elastic interaction) ไม่มีการสูญเสียพลังงาน กล่าวคือพลังงานจลน์ก่อนเกิดอันตรกิริยาเท่ากับพลังงานจลน์หลังเกิดอันตรกิริยา

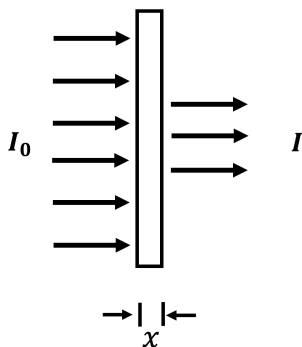
2) อันตรกิริยาแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic interaction) มีการสูญเสียพลังงาน กล่าวคือพลังงานจลน์จำนวนหนึ่งจะสูญเสียให้แก่นิวเคลียส ทำให้นิวเคลียสอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น

2.2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา

ปริมาณของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางจะมีจำนวนน้อยลง เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางด้วยกระบวนการต่าง ๆ หลายกระบวนการ ประกอบด้วยอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric interaction) และอันตรกิริยาคอมป์ตัน (Compton interaction) นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่สำคัญรองลงมาคือกระบวนการผลิตคู่ (Pair production) และกระบวนการโฟโตดีสอินทิเกรชัน (Photodisintegration)

2.2.2.1 รังสีแกมมา เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ (Nuclear transition) พลังงานของรังสีแกมมามีลักษณะเป็นโฟตอน มีพลังงานสูง เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในนิวเคลียสโดยรังสีแกมมาพลังงาน 1 MeV คือรังสีที่ประกอบด้วยโฟตอนพลังงาน 1 MeV พลังงานที่ถูกกระตุ้นทางนิวเคลียร์ (Nuclear excitation energy) มีขนาดพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 10 MeV ดังนั้นรังสีแกมมาที่ส่งผ่านออกมาจึงมีขนาดความยาวคลื่นที่หลากหลายขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ความยาวคลื่นของรังสีแกมมามีขนาดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 10^{-11} ถึง 10^{-13} เมตร

เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง และไม่มีประจุจึงไม่สามารถวัดได้โดยการเบนในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า เพราะรังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงมักวัดพลังงานโดยให้รังสีแกมมาผ่านสารตัวกลางการดูดกลืนรังสีแกมมา เมื่อลำแสงผ่านสารตัวกลางทำให้ความเข้มของรังสีลดลงกำหนดให้ลำรังสีแกมมาความเข้มตกกระทบแผ่นตัวกลางที่มีความหนา x แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การลดลงของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา

อัตราการลดลงของรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา ($\frac{dI}{dx}$) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความเข้มรังสี (I) ที่วิ่งผ่านตัวกลางนั้น

$$-\frac{dI}{dx} \propto I$$

เครื่องหมายลบ แสดงว่าความเข้มรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมามีขนาดลดลงเมื่อผ่านตัวกลางซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าตัวดูดกลืน (Absorber)

$$dI = -\mu I dx \quad (4)$$

สมการการดูดกลืนมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันที่ต้นกำเนิดรังสีแกมมาเกิดจากนิวเคลียส ส่วนรังสีเอ็กซ์เกิดจากการกระโดดของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอะตอมหรืออาจเกิดจากต้นกำเนิดที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เช่น จากหลอดคูลิตจ์ และหลอดรังสีเอ็กซ์ เป็นต้น รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำกว่าพลังงานของรังสีแกมมามากเรียกว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวกลาง (Attenuation coefficient) มีค่าคงตัวสำหรับตัวกลางแต่ละชนิด ดังนั้นจะเขียนได้ว่า

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (5)$$

ในการแก้สมการหาค่า I ซึ่งเป็นจำนวนโฟตอน (รังสีเอ็กซ์ และแกมมา) ที่วิ่งผ่านวัตถุ ความหนา x ภายใต้เงื่อนไข 2 เงื่อนไข คือ

- 1) โฟตอนทั้งหมดที่มีอยู่ในลำรังสีจะต้องมีพลังงานเท่ากัน (Monoenergetic beam)
- 2) โฟตอนถูกลดทอน (Attenuation) ภายใต้ภาวะที่ถูกต้อง (Good geometry) คือ ลำโฟตอนแคบ และไม่มีโฟตอนกระเจิง (Scattered photon) ปริพันธ์สมการข้างบนจะเขียนได้ว่า

$$\int_{I_0}^I dI = \int_0^x -\mu dx$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6)$$

เมื่อ I_0 เป็นจำนวนโฟตอนในลำรังสีก่อนที่จะผ่านตัวกลาง

กำหนดให้ I เป็นจำนวนโฟตอนที่ถูกลดทอนลง

$$\begin{aligned} I' &= I_0 - I \\ &= I_0 - I_0 e^{-\mu x} \\ &= I_0(1 - e^{-\mu x}) \end{aligned} \quad (7)$$

ตัวเลขยกกำลังของ e ไม่มีหน่วย ดังนั้นถ้าความหนา x มีหน่วยเป็นเซนติเมตร หน่วยของสัมประสิทธิ์การลดทอน μ จะเป็น 1/เซนติเมตร μ ที่มีหน่วยเป็น 1/ความยาว นี้มีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

เนื่องจาก $e^{-\mu x}$ เป็นจำนวนที่แสดงถึงประมาณโฟตอนที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลาง ถ้า $e^{-\mu x}$ มีค่าน้อยปริมาณโฟตอนที่วิ่งผ่านออกมาจากตัวกลางก็จะมีจำนวนน้อย ดังนั้น $e^{-\mu x}$ จึงเป็นตัวเลขที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดการกระทำ ซึ่งก็คือโอกาสในการเกิดกระบวนการต่าง ๆ ทั้งห้กระบวนการ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} e^{-\mu x} &= (e^{-wx})(e^{-\tau x})(e^{-\sigma x})(e^{-kx})(e^{-\pi x}) \\ &= e^{-(w+\tau+\sigma+k+\pi)x} \end{aligned}$$

เมื่อ w, τ, σ, k และ π เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ (Coherent scattering, w) โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric, τ) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering, σ) กระบวนการการผลิตคู่ (Pair production, k) และกระบวนการโฟโตดีสอินทีเกรชัน (Photodisintegration, π) ตามลำดับ ดังนั้นจะเขียนแสดงความสัมพันธ์

$$\mu = w + \tau + \sigma + k + \pi \quad (8)$$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น μ เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนของกระบวนการต่าง ๆ จึงอาจจะเรียก μ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม (Total linear attenuation coefficient) โดยทั่วไปจะไม่พิจารณากระบวนการโคฮีเรนต์ และกระบวนการโฟโตดิสอินทีเกรชันซึ่งเกิดขึ้นน้อยมากทำให้ประมาณค่า μ ได้ดังนี้

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \quad (9)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้จะแปรผันกับพลังงานของรังสี และเลขอะตอมของตัวกลาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลางอีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้สัมประสิทธิ์การลดทอนไม่มีค่าขึ้นกับความหนาแน่น จึงหารสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (สมการข้างบน) ด้วยความหนาแน่นของตัวกลาง เรียกชื่อใหม่สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นต่อความหนาแน่นว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) โดยเพิ่มอักษร m เป็นตัวห้อยไว้

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \pi_m = \frac{\pi}{\rho}, W_m = \frac{W}{\rho}, \tau_m = \frac{\tau}{\rho}, \sigma_m = \frac{\sigma}{\rho}, k_m = \frac{k}{\rho}, \pi_m = \frac{\pi}{\rho} \quad (10)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของตัวกลางสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีหน่วยเป็น g/cm^3 หรือ mg/cm^3 เมื่อเป็นเช่นนี้ความหนา x_m จะมีหน่วยเป็น g/cm^3 หรือ mg/cm^3

การดูดกลืนรังสีแกมมามีความแตกต่างจากการดูดกลืนของรังสีแอลฟาหรือรังสีบีตา ในขณะที่การดูดกลืนของรังสีทั้งสอง (รังสีแอลฟา และรังสีบีตา) กำหนดได้โดยค่าฟิสัยในเนื้อวัตถุ และจะถูกดูดกลืนหมดสิ้น แต่รังสีแกมมานั้น การดูดกลืนของตัวดูดกลืนทำได้เพียงแต่การลดความเข้มของลำรังสีลงมาเท่านั้น เมื่อความหนาแน่นของตัวดูดกลืนมีค่ามากขึ้น ตัวดูดกลืนไม่สามารถที่จะดูดกลืนรังสีแกมมาได้หมดในบางครั้งเพื่อความสะดวกอาจจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอะตอม (Atomic Absorption Coefficient, μ_a) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอะตอมเป็นค่าเศษส่วนของลำรังสีแกมมาที่ถูกดูดกลืนโดยอะตอมเดี่ยวอาจกล่าวได้ว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนอะตอม คือ ความน่าจะเป็นที่อะตอมของตัวดูดกลืนจะทำปฏิกิริยากับโฟตอน 1 ตัว ในลำรังสี ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอะตอมสามารถนิยามได้โดยสมการ

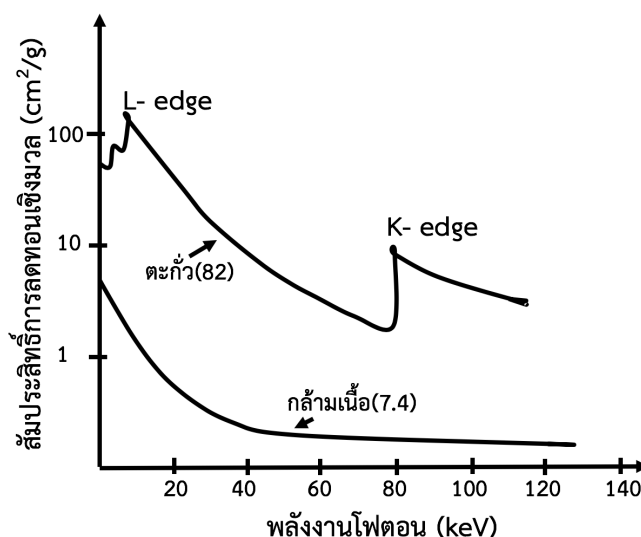
$$\mu_a = \frac{\mu_1}{N} \quad (11)$$

เมื่อ N จำนวนอะตอมของตัวดูดกลืน

การเปรียบเทียบการดูดกลืนรังสีแกมมาระหว่างตะกั่ว และอลูมิเนียมพบว่ารังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง ตะกั่วจะเป็นตัวดูดกลืนรังสีที่ดีกว่าวัสดุอื่น ๆ เพียงเล็กน้อย แต่ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานต่ำ ตะกั่วจะเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีแกมมาที่ดีกว่าอลูมิเนียมมาก

2.2.2.2 กระบวนการดูดกลืนของรังสีแกมมา มี 4 กระบวนการ ประกอบด้วย การดูดกลืนแบบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปฏิกิริยาโฟโตดีสอินทีเกรชัน (Photo disintegration) การเกิดการผลิตรู (Pair production) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) โดยกระบวนการดูดกลืนแบบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปฏิกิริยาโฟโตดีสอินทีเกรชัน จะเกิดกับอิเล็กตรอนในวงโคจรตัวดูดกลืน และจะเกิดได้ดีเมื่อพลังงานของโฟตอนไม่เกิน 1.02 MeV ถ้าพลังงานของโฟตอนสูงกว่านี้ กระบวนการที่ 3 จึงจะเกิดได้ดี ส่วนกระบวนการที่ 4 เกิดจากการที่โฟตอนพลังงานสูงมาก

1) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของพลังงานโฟโตอิเล็กทริก และพลังงานโฟตอน

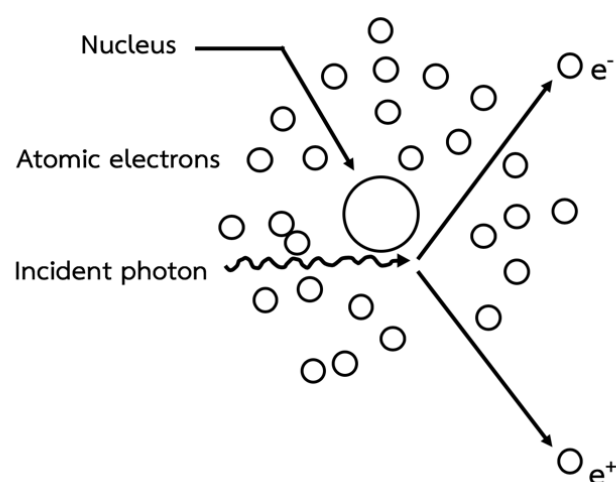
(ที่มา: Evans, 1955)

กระบวนการโฟโตอิเล็กทริกเกิดจากการที่โฟตอนหายไปโดยถูกอิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสดูดกลืนจนหมด โดยที่พลังงานของโฟตอนจะต้องมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนจะหายไปในตัวดูดกลืนโดยกระบวนการออกซิเดชัน และไอออนไนเซชัน โดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นกระบวนการ

ดูดกลืนอย่างแท้จริงพลังงานทั้งหมดของโฟตอนถูกดูดกลืนหมด ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดได้ดีเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ และตัวดูดกลืนมีเลขอะตอมมาก สำหรับตัวดูดกลืนที่มีเลขอะตอมมาก ๆ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะไม่ค่อยเกิดขึ้น โดยที่โอกาสในการเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกระบวนการโฟโตอิเล็กทริกจะแปรผันตาม $1/h\nu^3$ เมื่อ $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอน แสดงดังรูปที่ 2.6

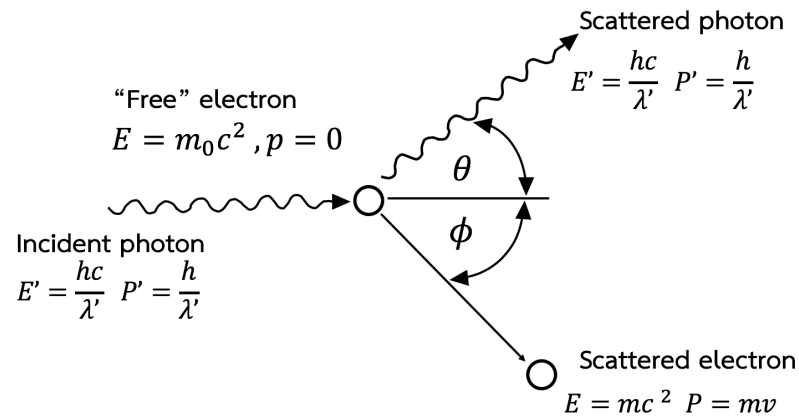
2) โฟโตดิสอินทีเกรชัน นิวเคลียสของตัวดูดกลืนจับรังสีแกมมา และจะปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมาอย่างทันทีทันใด โฟโตดิสอินทีเกรชันเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญมากในกรณีที่มีพลังงานสูงมากจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอน เช่น เครื่องเร่งอนุภาคบีตารอน (Betatron) หรือเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน (Synchrotron) เป็นต้น

3) กระบวนการผลิตคู่ เกิดจากรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV และรังสีแกมมาวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียส รังสีแกมมาจะสูญหายไปแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอน และโพสิตรอน มวลของอนุภาคทั้งสองมีค่า 0.51 MeV พลังงานจลน์ทั้งหมดเกือบเท่ากับ $hf - 2m_0c^2$ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกลายเป็นมวลนี้ รังสีแกมมาจะต้องเข้าใกล้อนุภาค เช่น นิวเคลียสค่าโมเมนตัมมีค่าคงตัวทั้งก่อนการชน และภายหลังการชน ส่วนพลังงานจลน์มีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นการสร้างอิเล็กตรอน และโพสิตรอนต้องการพลังงานไม่น้อยกว่า 1.02 MeV จึงจะเกิดกระบวนการผลิตคู่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.7



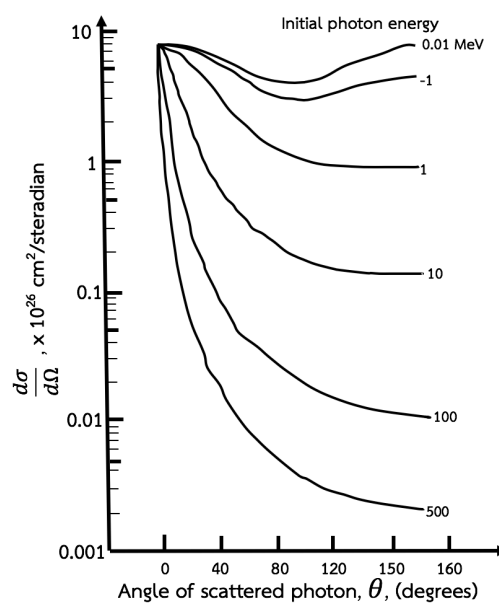
รูปที่ 2.7 การเกิดกระบวนการการผลิตคู่

4) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นการชนที่เรียกว่าการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) เป็นการชนกันระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนอิสระ (อิเล็กตรอนอิสระหมายถึง ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับอะตอมมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอน) แสดงดังรูปที่ 2.8



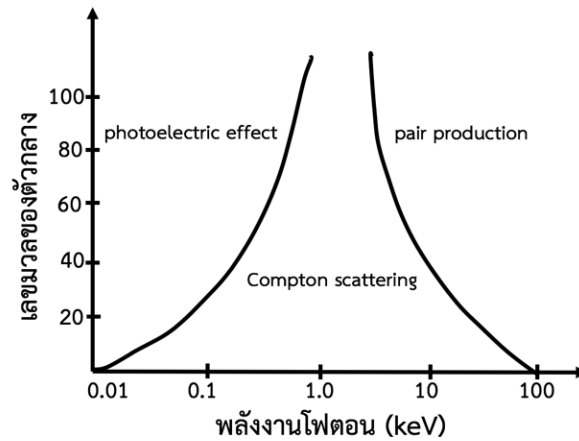
รูปที่ 2.8 การชนแบบคอมป์ตัน (การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน)

โอกาสของการเกิดการชนแบบคอมป์ตันมีค่าลดลง ถ้าพลังงานของรังสีแกมมาที่ชนอิเล็กตรอนมีพลังงานมากขึ้น และค่าเลขอะตอมของตัวดูดกลืนมีค่ามากขึ้นด้วย การชนแบบคอมป์ตันจึงจะเกิดได้ดีเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำ และตัวดูดกลืนมีเลขอะตอมต่ำแสดงดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 แสดงโอกาสในการเกิดกระบวนการต่าง ๆ



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบคอมป์ตันของโฟตอน

(ที่มา: Evans, 1955)



รูปที่ 2.10 การเกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และกระบวนการผลิตคูในตัวกลาง

(ที่มา: Evans, 1955)

2.2.2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\frac{\mu}{\rho}$ ของวัตถุสำหรับอนุภาคที่ทำให้เกิดการแตกตัวโดยอ้อม เป็นอัตราส่วนระหว่าง dN กับผลคูณของ ρ , N และ dI เมื่อ N เป็นจำนวนอนุภาคที่ตกกระทบวัตถุที่มีความหนาแน่น ρ และ dN เป็นจำนวนอนุภาคที่เกิดการกระทำขึ้น

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dI} \quad (12)$$

การกระทำ หมายถึง กระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานหรือทิศทางของอนุภาคที่ทำให้เกิดการแตกตัวโดยอ้อมโดยสมการ (13) แสดงสมการสำหรับรังสีเอ็กซ์หรือรังสีแกมมา

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{k}{\rho} \quad (13)$$

เมื่อ $\frac{\tau}{\rho}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก

$\frac{\sigma}{\rho}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกระบวนการคอมป์ตัน

$\frac{\sigma_{coh}}{\rho}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกระบวนการโคฮีเรนท์

$\frac{k}{\rho}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกระบวนการผลิตคู

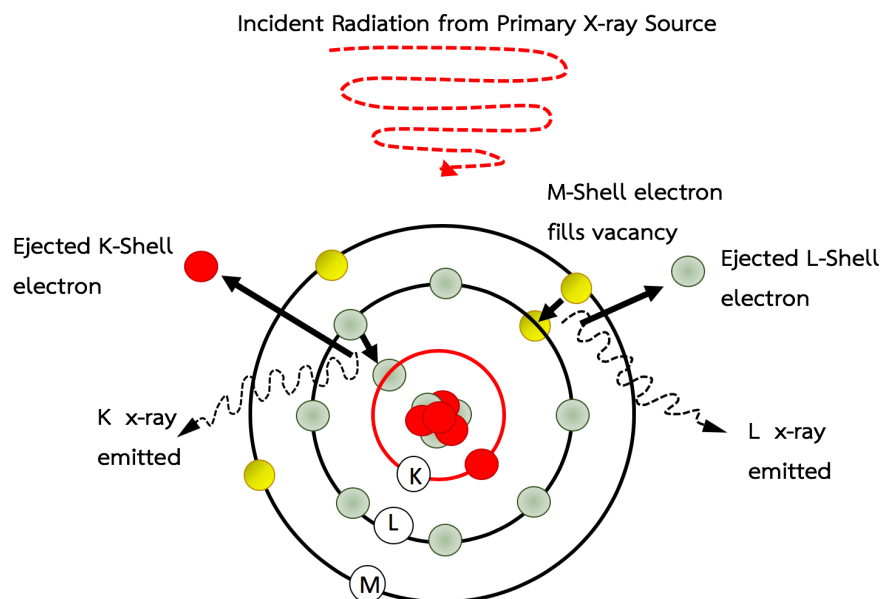
2.3 หลักการทำงานของเครื่องต่าง ๆ

2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF)

เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุ (Qualitative) และปริมาณธาตุ (Quantitative) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งของแข็ง และของเหลว เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมผิวมาก่อนได้ สามารถวิเคราะห์ ธาตุที่มีความเข้มข้นน้อย ๆ ที่ความเข้มข้นโดยประมาณ 5-500 ppm โดยชิ้นงานต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 mm และสูงไม่เกิน 50 mm ผิวหน้าชิ้นงานของแข็งต้องมีความเรียบ และผ่านการขัดเงาถ้าเป็นชนิดผงต้องหนักอย่างน้อย 1 g ใช้เวลาวิเคราะห์แต่ละครั้งประมาณ 15 นาที หลักการทำงานของเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 2.11 รังสีจากแหล่งกำเนิดภายในตัววงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในวัตถุนั้นหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้ อะตอมจะไม่เสถียร และอะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งพลังงานนั้นจะสะท้อนกลับมายังชุดหัววัด (Detector) ที่อยู่ในตัวเครื่องมือซึ่งจะตรวจวัดพลังงานที่สะท้อนกลับมา จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังชุดหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processor) ซึ่งจะทำการแปลง สัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้กับ CPU ทำการประมวลผลออกมา และแสดงผ่านทางหน้าจอแสดงผล และเก็บข้อมูลดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำภายในเครื่องมือ



รูปที่ 2.11 เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

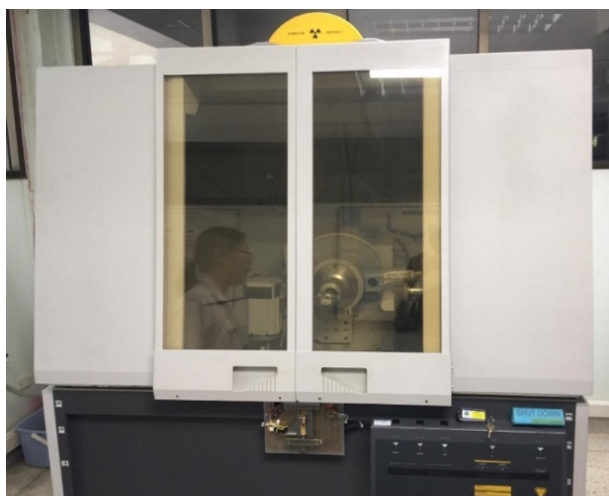


รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

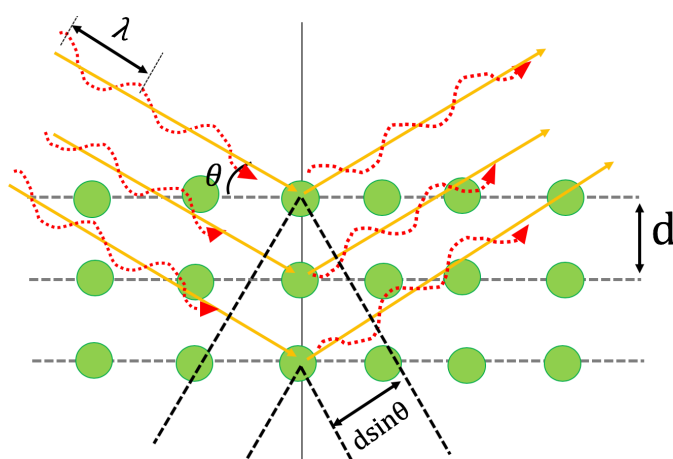
หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก. *FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS* (หน้า 10) โดย Khairi Mohammad Said Abdullah, 2014, Duhok: University of Duhok.

2.3.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้หัววัด (Detector) รับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบเครื่อง XRD ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่สามารถให้เครื่องมือ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่ % ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน



รูปที่ 2.13 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก. *FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS* (หน้า 6) โดย Khairi Mohammad Said Abdullah, 2014, Duhok: University of Duhok.

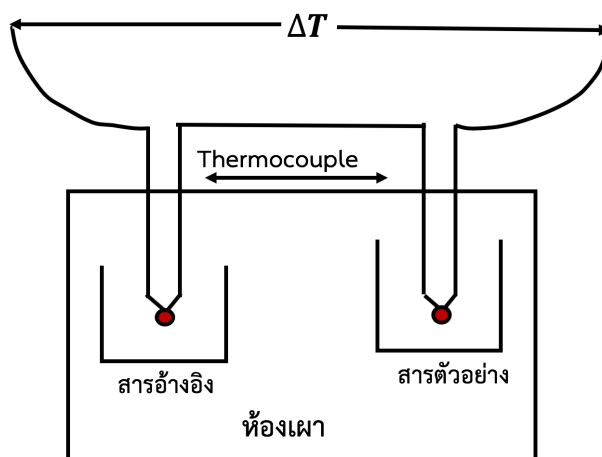
2.3.3 การหาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาโดยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง ในระหว่างให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูด (Endothermic) หรือการคายความร้อน (Exothermic) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (Enthalpic transition) เช่น จากการเปลี่ยนเฟส การละลาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

การเดือด การเผาไหม้ การระเหย การคายน้ำ การแตกตัว กระบวนการ Oxidation Reduction และ ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ (ไพจิตร, 2541)



รูปที่ 2.15 เครื่อง Differential Thermal Analysis



รูปที่ 2.16 หลักการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง
หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก. *FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS* (หน้า 32) โดย Khairi
Mohammad Said Abdullah, 2014, Duhok: University of Duhok.

2.3.4 ระบบหัววัดรังสีแกมมา

หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงประเภทของแข็งที่นิยมใช้ในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ได้แก่ ผลึก NaI(Tl) (Sodium Iodide Crystal activated with Thallium) BGO (Bismuth Germinate) LSO (Lutetium Oxyorthosilicate) เป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งผลึกเรืองแสงที่เหมาะสมที่จะนำมาทำหัววัดรังสีควรมีคุณสมบัติดังนี้

2.3.4.1 เปลี่ยนพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในผลึกให้เป็น Visible light ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.4.2 โฟตอนแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้

2.3.4.3 การเรืองแสงที่เกิดขึ้นควรเกิดระยะเวลาสั้นๆ เพื่อที่จะสามารถวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.17 เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ระบบหัววัด NaI (TL)

2.4 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.4.1 ค่าความทนต่อแรงอัด

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (15)$$

โดย σ คือ ความทนต่อแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ มีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ MPa

F คือ มวลกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้ มีหน่วยเป็น N

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับมวลกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ มีหน่วยเป็น mm^2

2.4.2 คำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (16)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น g/cm^3

M คือ มวลของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น g

V คือ ปริมาตรชิ้นตัวอย่าง มีหน่วยเป็น cm^3

2.4.3 ร้อยละการดูดซึมน้ำ

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100 \quad (17)$$

โดย M คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง มีหน่วยเป็น g

M_0 คือ มวลของชิ้นทดสอบแห้ง มีหน่วยเป็น g

2.4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีแกมมา

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (18)$$

$$\mu = \frac{\ln 2}{HVL} \quad (19)$$

โดย I_0 คือ ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนจะผ่านตัวกลาง

I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาหลังผ่านตัวกลาง

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวกลาง (Attenuation coefficient)

HVL คือ ความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุดิบ สารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ทดสอบ

3.1.1 วัสดุดิบ คือ

3.1.1.1 ดินเหนียวนครศรีธรรมราช



รูปที่ 3.1 ดินเหนียว อำเภอนาทาสาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.1.1.2 กากตะกอนของเสียที่มีเหล็กเป็นส่วนผสม



รูปที่ 3.2 กากตะกอนเหล็กจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

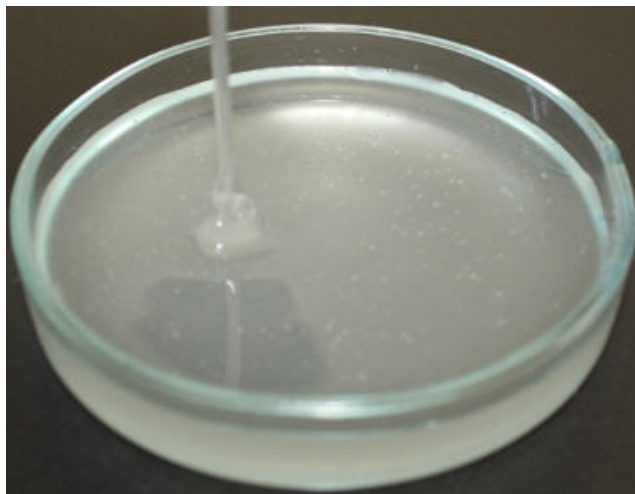
3.1.2 สารเคมี คือ

3.1.2.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)



รูปที่ 3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดเคมี 98%

3.1.2.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃)



รูปที่ 3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃)

3.1.3 วัสดุอุปกรณ์ คือ

3.1.3.1 โกร่งบด

3.1.3.2 ตะแกรงร่อน

3.1.3.3 อุปกรณ์วัดปริมาตร

3.1.3.4 ถ้วยกวนผสม

3.1.3.5 แม่พิมพ์ขึ้นรูป

3.1.3.6 บรรจุภัณฑ์ใส่ชิ้นงาน

3.1.3.7 ถุงมือป้องกันสารเคมี

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ทดสอบ คือ

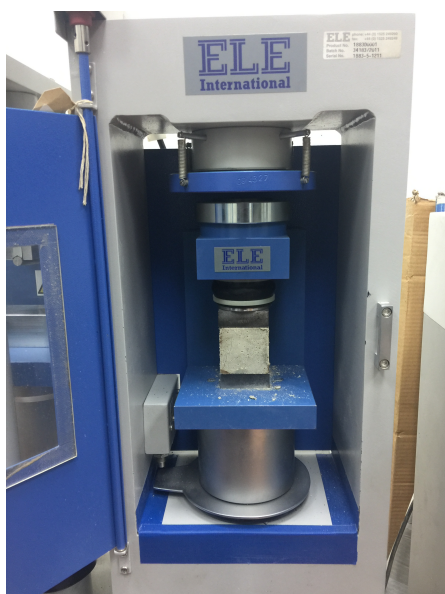
3.1.4.1 ตู้อบลมร้อน

3.1.4.2 เตาเผา ยี่ห้อ Nabertherm, HT16118

3.1.4.3 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.1 g

3.1.4.4 เครื่องชั่งวัดความหนาแน่น Electronic Densimeter MD-300S

3.1.4.5 เครื่อง Compressive strength



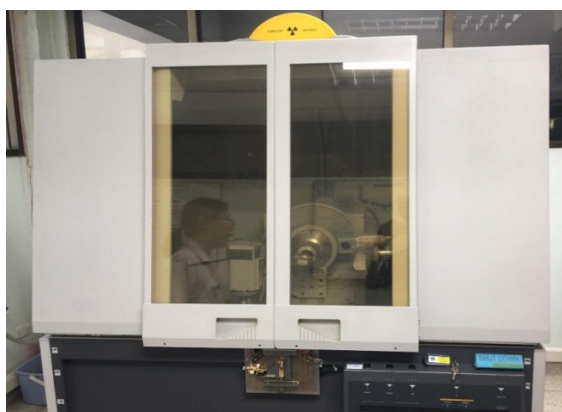
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงอัดยี่ห้อ ELE international

3.1.4.6 เครื่อง X-Ray fluorescence



รูปที่ 3.6 เครื่อง X-Ray fluorescence spectrometer, PW2400, Philips, Netherlands

3.1.4.7 เครื่อง X-Ray Diffractometer



รูปที่ 3.7 เครื่อง X-Ray Diffractometer, X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands

3.1.4.8 เครื่อง Differential Thermal Analyzer, DTA



รูปที่ 3.8 เครื่อง Differential Thermal Analyzer, DTA, Perkin Elmer, USA

3.1.4.9 หัววัดโซเดียมไอโอดัด (NaI Detector)



รูปที่ 3.9 หัววัดโซเดียมไอโอดัด (NaI Detector)

3.2 การเตรียมชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบที่เป็นดินเหนียว

3.2.1.1 เก็บตัวอย่างดินเหนียวจากอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.2.1.2 นำดินเหนียวมาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

3.2.1.3 นำดินเหนียวมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 120 μm เพื่อความละเอียดเสมอกัน จากนั้นนำตัวอย่างดินประมาณ 5 กรัม เพื่อทำการส่งวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของดิน

3.2.1.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อทราบปริมาณธาตุในดินโดยใช้วิธีการทดสอบตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002

3.2.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างของดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) โดยใช้วิธีการทดสอบตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001)

3.2.1.6 วิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินเหนียวเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกให้เป็นอสัณฐานด้วยเครื่อง DTA

3.2.1.7 นำดินเหนียวมาเผาตามอุณหภูมิที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA โดยพิจารณาได้จากกราฟผลการวิเคราะห์โดยเลือกอุณหภูมิสูงสุดในช่วงที่อุณหภูมิของตัวอย่างต่ำกว่าอุณหภูมิอ้างอิง เพราะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน ดินจะดูดความร้อนเข้าไปเพื่อเปลี่ยนพลังงานภายใน แล้วนำไปทำลายพันธะของผลึก แล้วเกิดการเรียงตัวใหม่ของอะตอม

3.2.2 การเตรียมวัตถุดิบที่เป็นกากตะกอนเหล็ก

3.2.2.1 เก็บกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม

3.2.2.2 นำกากตะกอนเหล็กอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

3.2.2.3 นำกากตะกอนเหล็กมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 120 μm เพื่อความละเอียดเสมอกัน

3.2.2.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อทราบปริมาณธาตุในกากตะกอนเหล็กโดยใช้วิธีการทดสอบตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002

3.2.2.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างของกากตะกอนเหล็กด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) โดยใช้วิธีการทดสอบตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001)

3.2.2.6 นำกากตะกอนเหล็กมาเผาตามอุณหภูมิเช่นเดียวกับดิน ซึ่งเป็นผลที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA

3.2.3 การเตรียมสารละลาย

3.2.3.1 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 M ที่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

3.2.3.2 ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 M กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เป็น 2 : 1 โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตนี้ได้ถูกกำหนดความเข้มข้นมาจากบริษัทผลิต

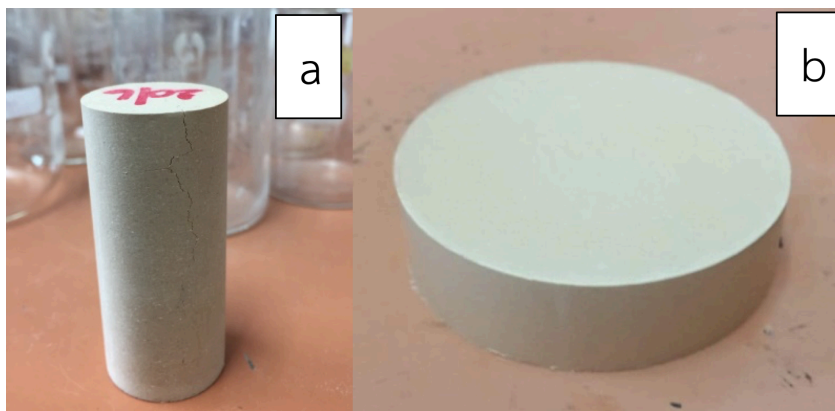
3.2.4 สัดส่วนของวัตถุดิบ และสารละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.1 สูตรผสมของตัวอย่างเพื่อการขึ้นรูป

สูตร	ปริมาณของสารเทียบกับดินเหนียว 100 ส่วน โดยมวล		
	ดินเหนียว	สารละลาย ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$)	ตะกอนเหล็ก
1	100	45	0
2	100	45	10
3	100	45	20
4	100	45	30
5	100	45	40
6	100	45	50

3.2.5 การผสมและขึ้นรูป

นำดินเผาผสมกับกากตะกอนตามด้วยสารละลายตามสูตร และขึ้นรูปด้วยการอัดที่ 2000 psi เป็นทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 mm ความสูงเท่ากับ 50 mm) ที่ทิ้งไว้ เพื่อทดสอบความทนต่อแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C192 ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ และขึ้นรูปเป็นแผ่นทรงกลมให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 70 mm หนา 10 mm เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างโดยการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออก แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วันที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3. 10 (a) ชิ้นตัวอย่างวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด
(b) ชิ้นตัวอย่างวัสดุจีโอพอลิเมอร์สำหรับทดสอบการลดทอนรังสี

3.3 การวิเคราะห์ ทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

3.3.1.1 อบชิ้นทดสอบให้มวลคงที่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 150 °C จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วหาค่ามวลของชิ้นทดสอบที่แห้งแล้ว (Dry mass, D)

3.3.1.2 ใส่ชิ้นทดสอบลงในอ่างซึ่งใส่น้ำกลั่นไว้ แช่ชิ้นทดสอบไว้ในน้ำ 24 ชั่วโมง

3.3.1.3 หลังจากชิ้นทดสอบชุ่มไปด้วยน้ำแล้วให้ชั่งมวลชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นในขณะที่แขวนลอยในน้ำบันทึกเป็นค่า S ใช้ ในการชั่งมวลทำได้โดยใส่ชิ้นทดสอบลงในเส้นลวดที่ขดเป็นวงหรือผูกชิ้นทดสอบกับเชือกที่คล้องได้หรือใส่ชิ้นทดสอบในตะกร้าแล้วจุ่มชิ้นทดสอบนี้ลงไปน้ำโดยชิ้นทดสอบที่แขวนลอยในน้ำนี้จะเกี่ยวข้องกับแขนข้างหนึ่งของเครื่องชั่งมวลจากนั้นทำการปรับเครื่องชั่งให้สมดุลทั้งสองข้างอ่านค่ามวลที่ได้เป็นค่า S ของชิ้นทดสอบที่ชั่งขณะแขวนลอยในน้ำถ้าต้องการหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพียงอย่างเดียวไม่ต้องชั่งมวลชิ้นทดสอบเมื่อแขวนลอยในน้ำ (S) นี้

3.3.1.4 หลังจากชั่งมวลชิ้นทดสอบชนิดแขวนลอยในน้ำเสร็จแล้วให้ใช้ผ้าลินินหรือผ้าฝ้ายชิ้นเล็ก ๆ ซับน้ำส่วนเกินบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบออกโดยการกลิ้งขึ้นงานเบา ๆ บนผ้าเปียกแล้วชั่งมวลของชิ้นทดสอบนั้นทันทีเพื่อเป็นการลด ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากชิ้นทดสอบให้น้อยที่สุด หลังจากนั้นบันทึกค่าที่ชั่งได้เป็นค่ามวลที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ โดยกำหนดเป็นค่า M ทำการชั่งที่ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.3.1.5 ในการคำนวณต่อไปนี้จะใช้สมมติฐานให้น้ำ 1 cm^3 มีมวลเท่ากับ 1 g

1) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption, A) ซึ่งเป็นค่า % ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของน้ำที่ถูกดูดซับต่อมวลแห้งของชิ้นทดสอบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = [(M - D)/D] \times 100$$

โดย A ค่าการดูดซึมน้ำคิดเป็น (%)

M มวลชิ้นทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำที่แช่ไว้ 24 ชั่วโมง คิดเป็น g

D มวลชิ้นทดสอบที่อบแห้ง คิดเป็น g

2) คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity, T) ของชิ้นทดสอบในส่วนที่น้ำซึมเข้าไปไม่ได้ดังนี้

$$T = D/(D - S)$$

โดย T ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ

S มวลชิ้นทดสอบที่ซึมน้ำขณะแขวนลอยในน้ำ คิดเป็น g

3.3.2 การทดสอบความทนต่อแรงอัด

นิยมใช้ทดสอบวัสดุที่มีคุณสมบัติเปราะ เช่น เหล็กหล่อ หรือคอนกรีต เพราะจะให้ผลการทดสอบถูกต้องแน่นอนกว่าการทดสอบกับโลหะเหนียว การทดสอบเริ่มจากเพิ่มแรงอัดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูป และแตกรูปร่างของชิ้นงานจะเป็น ทรงกระบอก หรือลูกบาศก์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

3.3.2.1 นำชิ้นตัวอย่างทรงกระบอกสูงมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณหาพื้นที่รับแรง

3.3.2.2 นำชิ้นตัวอย่างใส่ในเครื่องทดสอบ

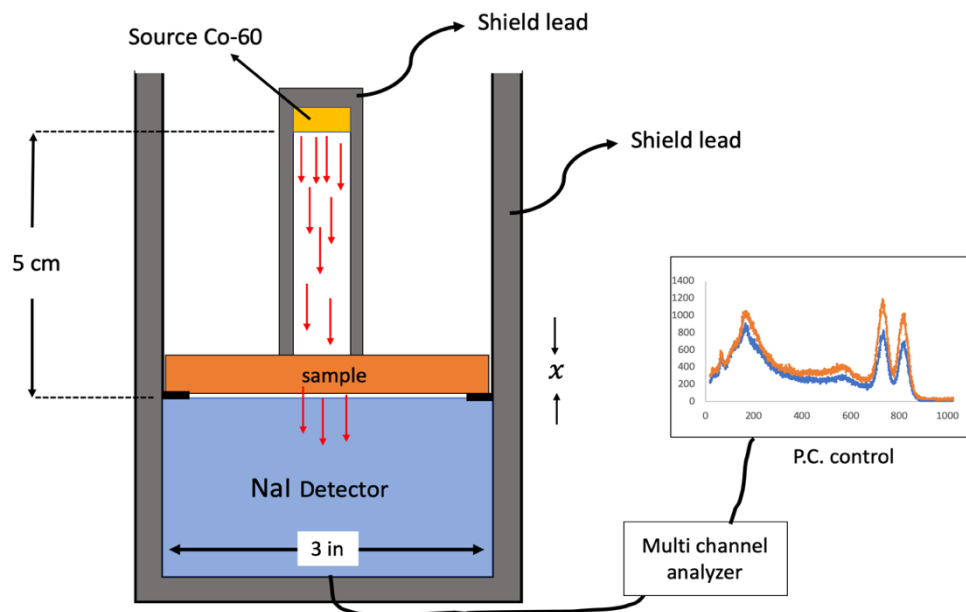
3.3.2.3 นำค่าแรงสูงสุดมาคำนวณหาความทนต่อแรงอัด

3.3.3 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี

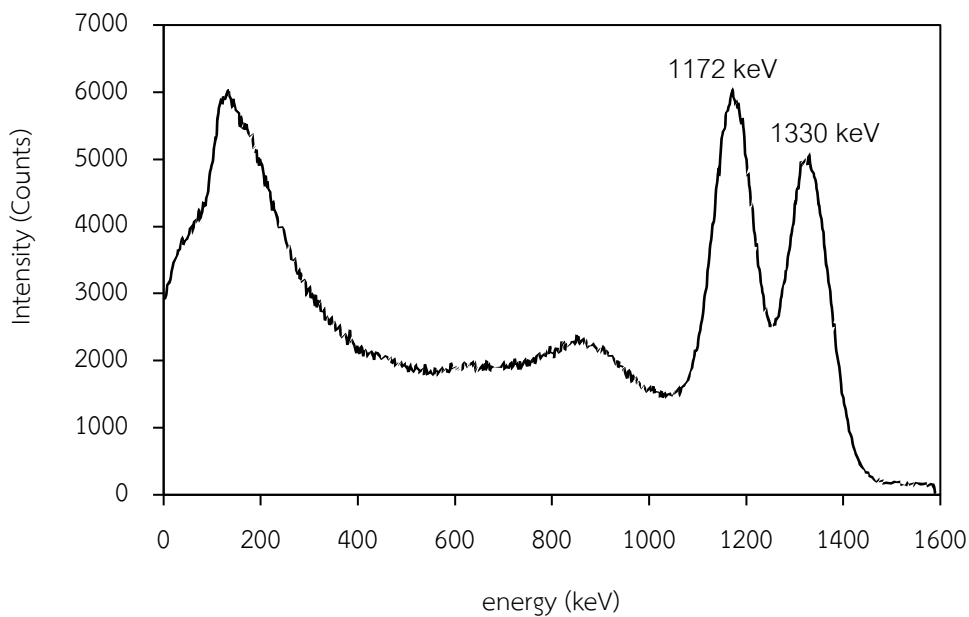
การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาได้ใช้แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ของเครื่องตรวจจับโซเดียมไอโอไดด์ NaI (TI) แบบเรืองแสง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว x 3 นิ้ว (Akkurt, I., 2009) พร้อมเครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (MCA) แล้วสเปกโตรมิเตอร์ถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ (PC) โดยซอฟต์แวร์ Genie2000 ส่วนแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาได้มาจากธาตุ โคบอลต์ 60 ที่ปล่อยพลังงานรังสีแกมมา 2 ช่วง คือ 1.172 และ 1.330 MeV ดังรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงแผนผังกระบวนการทดลอง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

3.3.3.1 ขั้นตอนที่แรก คือ ขั้นตอนการลดทอนที่ถูกตรวจสอบโดยการวัดอัตราส่วนของการแผ่รังสีที่ทะลุผ่านแผ่นตัวอย่าง และนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อให้ได้ความถูกต้องของการวัดและเพื่อรับรองความสม่ำเสมอในแต่ละตัวอย่าง

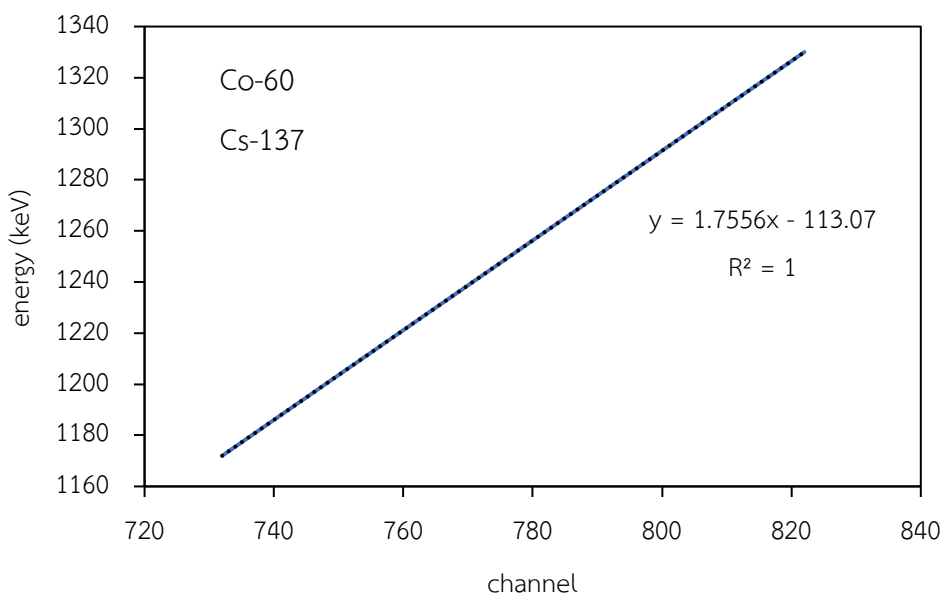
3.3.3.2 ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนการเพิ่มความหนาของแผ่นตัวอย่างให้มีความหนาแตกต่างกัน เพื่อเขียนความสัมพันธ์กับการลดทอนและเพื่อคำนวณ HVL สำหรับแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 แผนผังกระบวนการทดลอง

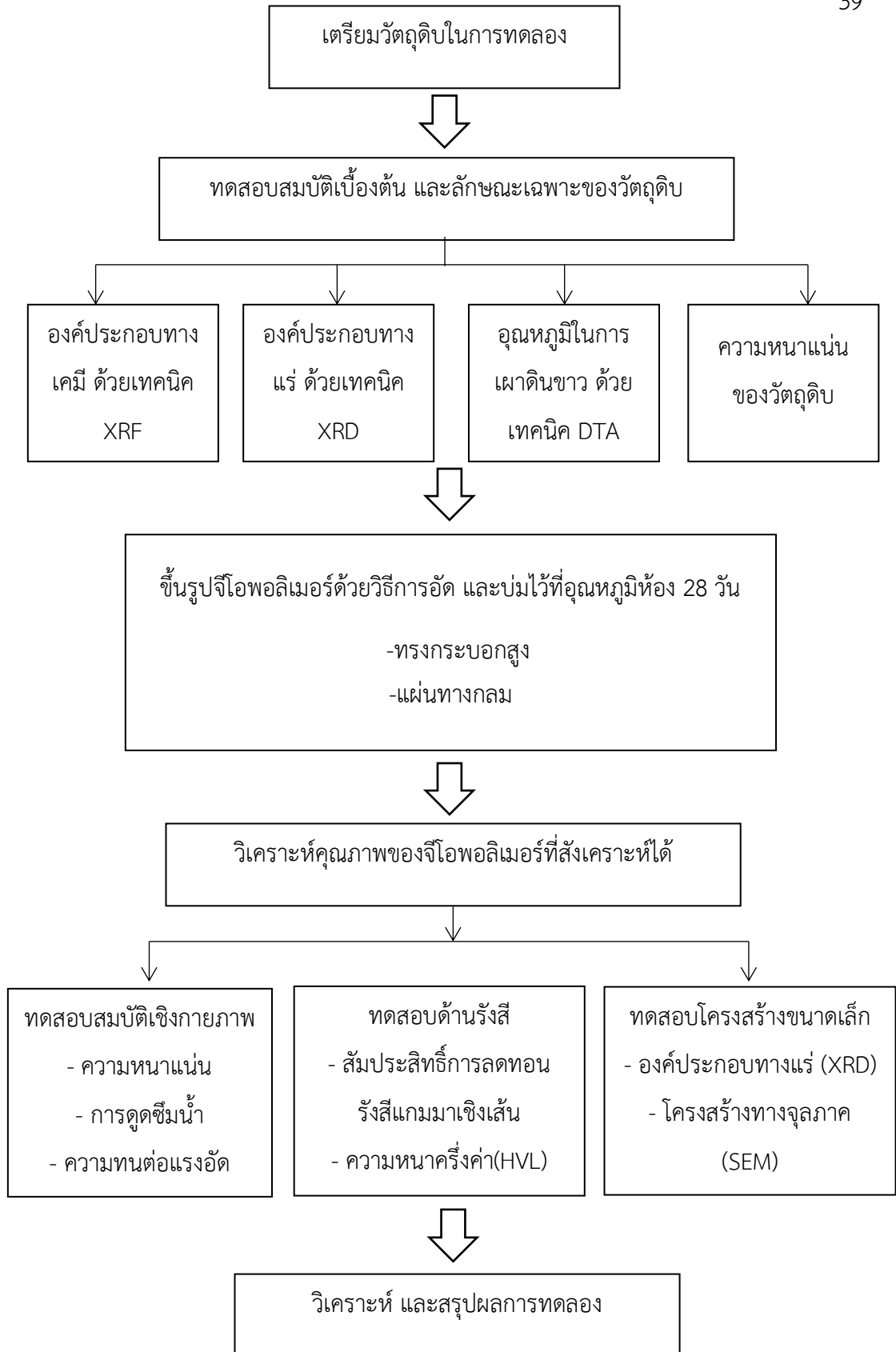


รูปที่ 3.12 สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาที่ได้มาจาก ⁶⁰Co



(ข)

รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจาก Co-60 และ Cs-137 กับช่องของ Multichannel Analyzer ของหัววัด NaI (TI) ที่มีช่องทั้งหมด 1024 ช่อง



รูปที่ 3.14 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวนครศรีธรรมราชร่วมกับกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตด้วย เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยา และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 28 วันก่อนการทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ ความแข็งแรง รวมถึงสมบัติด้านการกันรังสีของซีเมนต์จีโอพอลิเมอร์ที่ได้ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วน กล่าวคือ ส่วนที่ 1 คือ การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางความร้อนของดินเหนียวนครศรีธรรมราช และกากตะกอนเหล็กเพื่อออกแบบสภาวะที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของกากตะกอนเหล็กต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ค่าความแข็งแรงแบบอัดวิเคราะห์องค์ประกอบผลึก และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติด้านการกันรังสีของ จีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กที่สังเคราะห์ได้

4.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติทางความร้อนของดินเหนียวนครศรีธรรมราช และกากตะกอนเหล็กเพื่อออกแบบสภาวะที่ใช้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์

4.1.1 ดินเหนียวนครศรีธรรมราช

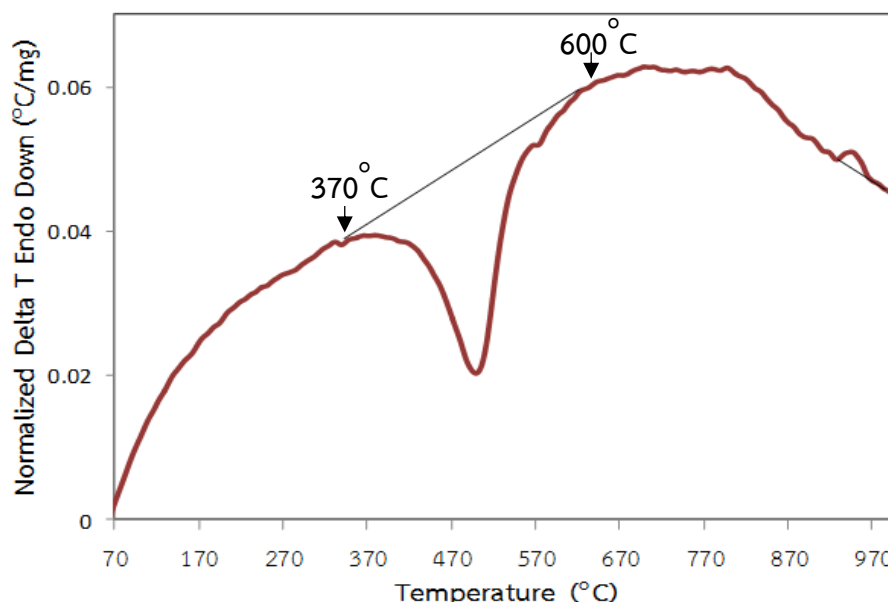
องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก รวมถึงปริมาณของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตในวัสดุดิบ มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากองค์ประกอบดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (Condensation Polymerization) และการจับตัวของพันธะทางเคมีภายในโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ รวมถึงสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ (Homme, et al., 2011) นอกจากนี้กระบวนการกระตุ้นอนุภาคด้วยความร้อนโดยวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงร่วมกับกระบวนการเชิงกลด้วยวิธีการบด เพื่อลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กลง เป็นวิธีการเตรียมวัสดุดิบกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่ง (Montes, 2010) เช่นเดียวกับวิธีการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงผ่านกระบวนการดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) ซึ่งเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ซึ่งการเคลื่อนย้ายและสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิลจะส่งผลต่อโครงสร้างของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต

ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวนครศรีธรรมราช

องค์ประกอบทางเคมี (%)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	ZrO ₂	L.O.I
ดินเหนียว	25.43	57.00	3.16	0.95	5.13	0.05	0.05	6.02

4.1.1.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของดินเหนียวนครศรีธรรมราชโดยใช้เทคนิค DTA แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าดินเหนียวมีช่วงอุณหภูมิที่เกิดการดูดความร้อนคือ 330-600 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเผาดินเหนียวเพื่อเปลี่ยนเฟสหรือเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของแร่เคลโอไลไนต์ให้เป็นอสังฐาน เนื่องจากความร้อนที่ดินเหนียวดูดเข้าไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานภายในแล้วส่งผลไปทำลายพันธะของผลึกและเกิดการเรียงตัวใหม่ของอะตอม ในขณะเดียวกันกระบวนการดังกล่าวทำให้อุณหภูมิของดินลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งอะตอมเรียงตัวไม่ทัน จึงทำให้โครงสร้างที่เรียงตัวออกมาใหม่ไม่เป็นระเบียบหรือเปลี่ยนเป็นโครงสร้างอสังฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดอุณหภูมิในการเผาเตรียมดินเหนียวนครศรีธรรมราชที่ 600 °C

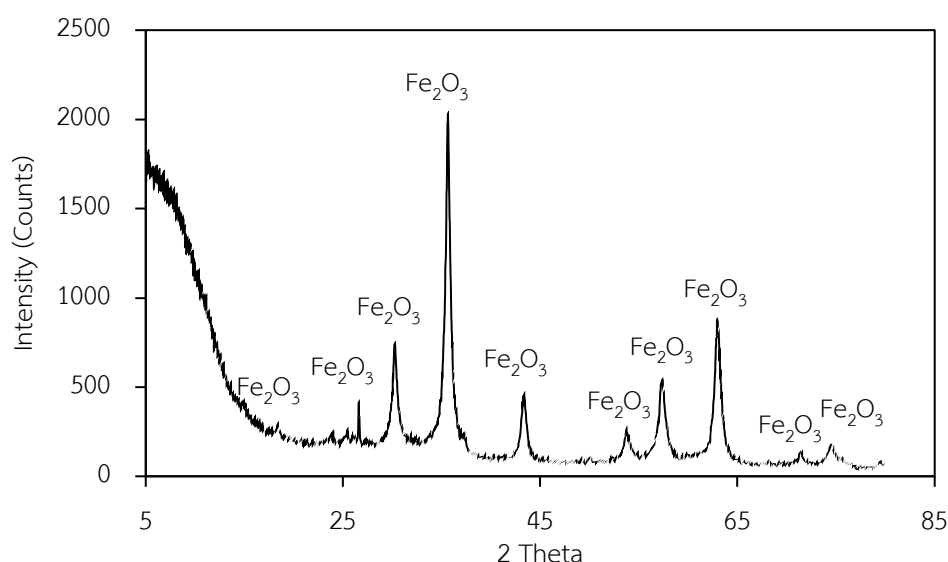


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวโดยใช้เทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)

4.1.2 กากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของกากตะกอนเหล็กโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่ากากตะกอนเหล็กมีโครงสร้างผลึกหลักเป็น ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3 , Hematite) ที่มี Fe 70% ลักษณะเนื้อสมานแน่นเป็นแผ่นซ้อนกันหรือรูปไต สีแดงเลือดหมูจนเกือบดำ และสีเทา สีมงละเอียดสีน้ำตาลแดง ความแข็ง 6.5 ความหนาแน่นอยู่ที่ช่วง 4.6 - 5.3 g/cm^3 จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการลดทอนรังสี



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กโดยใช้เทคนิค XRF พบว่า กากตะกอนเหล็กประกอบไปด้วยเหล็ก (III) ออกไซด์หรือเฟอร์ริกออกไซด์ Fe_2O_3 91.7 % และมีองค์ประกอบเคมีของออกไซด์อื่น ๆ เช่น ซิลิกา (SiO_2) 3.01 % และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 2.37 % ซึ่งน่าจะมาจากดินหรือสารเจือปนอื่น ๆ ที่อยู่ในกากตะกอนเหล็ก

โดยจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กพบว่า กากตะกอนเหล็กซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องนำไปกำจัด มีโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบเคมีหลักเป็นเหล็กออกไซด์ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุฉนวนโพลีเมอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันและการลดทอนรังสีต่อไป ซึ่งคล้ายกันกับงานวิจัย (Kahtan S., 2012) ที่

ได้ใช้หินธรรมชาติที่มีองค์ประกอบของแร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3 , Hematite) เข้าในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ ผลที่ได้คือเมื่อเพิ่มปริมาณหินธรรมชาติจะลดทอนรังสีได้ดี

ตารางที่ 4. 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กก่อนเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

องค์ประกอบทางเคมี (%)	SiO_2	Fe_2O_3	PO_2	CaO	K_2O	CuO	ZnO	LOI
กากตะกอนเหล็ก	2.53	89.71	1.15	2.11	0.22	0.20	0.56	13.15

ตารางที่ 4. 3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเหล็กหลังเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

องค์ประกอบทางเคมี (%)	SiO_2	Fe_2O_3	PO_2	CaO	K_2O	CuO	ZnO	LOI
กากตะกอนเหล็ก	3.01	91.7	1.31	2.37	0.22	0.20	0.49	5.01

หมายเหตุ ทดสอบที่ช่วงการวัด Oxygen ถึง Uranium

ธาตุปริมาณต่ำ : Na P S Ca Cr Mn Cu Y Nb ได้ถูก Normalize 100% โดยรวม CHNO จากการเผาตัวอย่าง

4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของกากตะกอนเหล็กต่าง ๆ

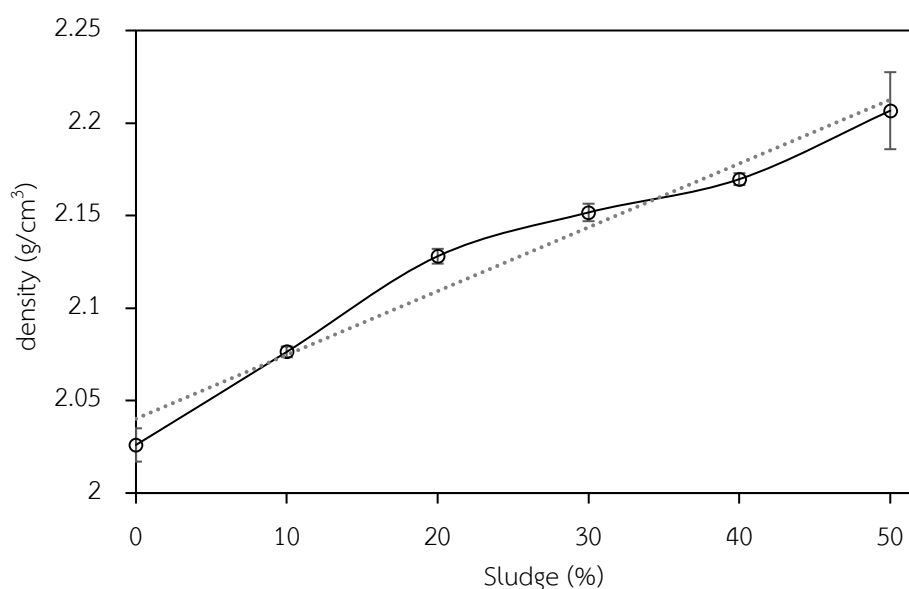
ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองนำดินเหนียวนครศรีธรรมราชที่ผ่านการเตรียมด้วยการบดและเผาที่อุณหภูมิ 600 °C มาผสมเข้ากับกากตะกอนเหล็กที่อัตราส่วน 0-50 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว จากนั้นทำการศึกษาผลของปริมาณกากตะกอนเหล็กที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ค่าความแข็งแรงในรูปกำลังอัด รวมถึงโครงสร้างผลึกและโครงสร้างทางจุลภาค)

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น เนื่องจากกากตะกอนเหล็กมีความหนาแน่นสูงกว่าดินเหนียว เมื่อผสมเข้ากับดินจะทำให้ความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์ที่

ได้ออกมามีค่าเพิ่มขึ้นตามกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว จะให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย เท่ากับ 2.026, 2.076, 2.128 2.152 2.170 และ 2.207 g/cm^3 ตามลำดับ กล่าวคือ วัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็กสูงสุด (50 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว) ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 2.207 g/cm^3 มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abdullah et al., 2017 ที่ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเพิ่มเส้นใยเหล็กตะขอลงในส่วนผสม ในปริมาณที่ 1%, 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเส้นใยเหล็กตะขอ โดยความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์มีค่าประมาณ 2.466 g/cm^3

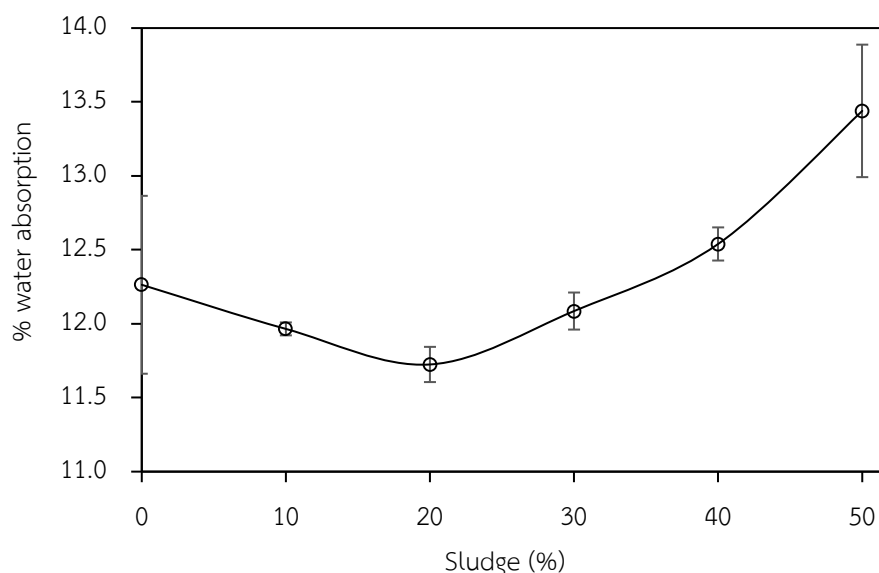


รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์กับปริมาณกากตะกอนเหล็ก

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กในรูปที่ 4.5 พบว่า การใช้กากตะกอนเหล็กเป็นส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ในปริมาณไม่เกิน 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว ส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มต่ำลง โดยค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11.7 % ที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว จากนั้นค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนเหล็กมากกว่า 20 % ขึ้นไป จากผลการทดลองสันนิษฐานว่าที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % เป็นสัดส่วนที่ทำให้ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์มีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กที่สุด และมีกระจายตัวสม่ำเสมอ จึงอาจส่งผลให้มี

โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรง แตกร้าวน้อยกว่าที่อัตราส่วนของกากตะกอนเหล็กอื่น ๆ และส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 11.7 %



รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังอัด

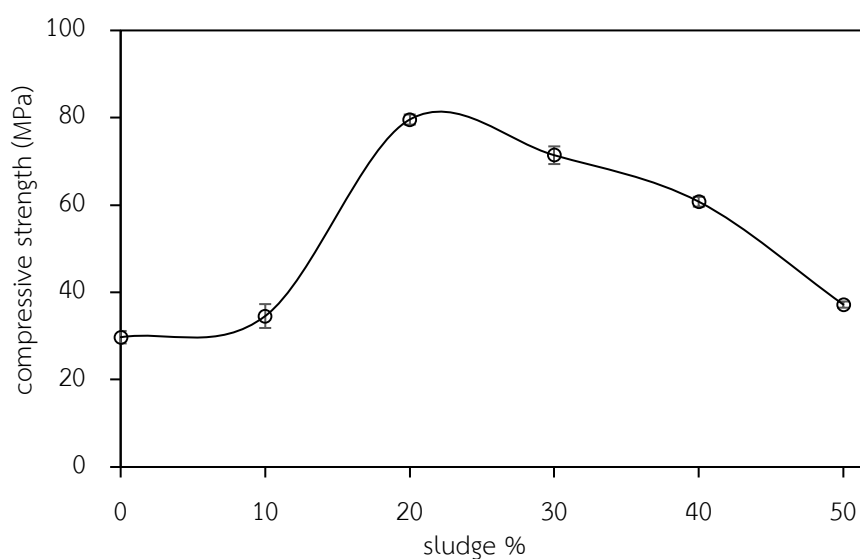
ผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กในรูปค่ากำลังอัด ที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 0% 10% 20% 30% 40% และ 50% โดยน้ำหนักของดินเหนียว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 พบว่า การเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กจาก 0% ถึง 20% ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจาก 30 MPa เป็น 80 MPa และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากกว่า 20 % (เพิ่มเป็น 30%-50%) พบว่า ค่ากำลังอัดของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัย (Noori และคณะ, 2018) ที่เขาได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากเหล็กในคอนกรีตที่ปริมาณ (6%, 12%, 18%, 24% และ 30%) จากผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มเศษเหล็กทำให้ค่อย ๆ ได้รับความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยปริมาณเศษเหล็ก 12% ให้กำลังอัดมากที่สุด และเมื่อเพิ่มเศษเหล็กมากกว่า 12% จะทำให้ความแข็งแรงลดลง

การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัดที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % อาจเป็นผลมาจากการขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอในชิ้นงาน รวมถึงโครงสร้างทางกายภาพภายในชิ้นงานที่แข็งแรง

กว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ ที่ได้พูดถึงในงานวิจัยของเขา (Ali, B. A, et al., 2013) เช่นเดียวกัน ที่ได้ศึกษา คอนกรีตที่เติมตะกรันเหล็กที่มีขนาดตั้งแต่เป็นผงจนถึงเป็นก้อน จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัด จะขึ้นอยู่กับขนาด และการกระจายตัวของตะกรันเหล็ก เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กจะทำให้ขึ้น ตัวอย่างลดยาว และแข็งแรง เป็นต้น

2. การเกิดพันธะทางเคมีระหว่างส่วนประกอบของจีโอโพลิเมอร์ เช่น SiO_2 Al_2O_3 ในดินเหนียว กับ Fe_2O_3 กากตะกอน

ซึ่งผลการทดสอบค่ากำลังอัดวัสดุเชิงประกอบจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก พบว่า มีความสอดคล้องกับผลการวัดค่าการดูดซึมน้ำในหัวข้อ 4.2.1 กล่าวคือ วัสดุเชิงประกอบจีโอโพลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 11.7 % จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนของกากตะกอนเหล็กที่ 20 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว เป็นอัตราส่วนเหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจีโอโพลิเมอร์ด้วยวิธีการอัด เนื่องจากให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด และให้ค่าความแข็งแรงในรูปกำลังอัดสูงสุดนั่นเอง

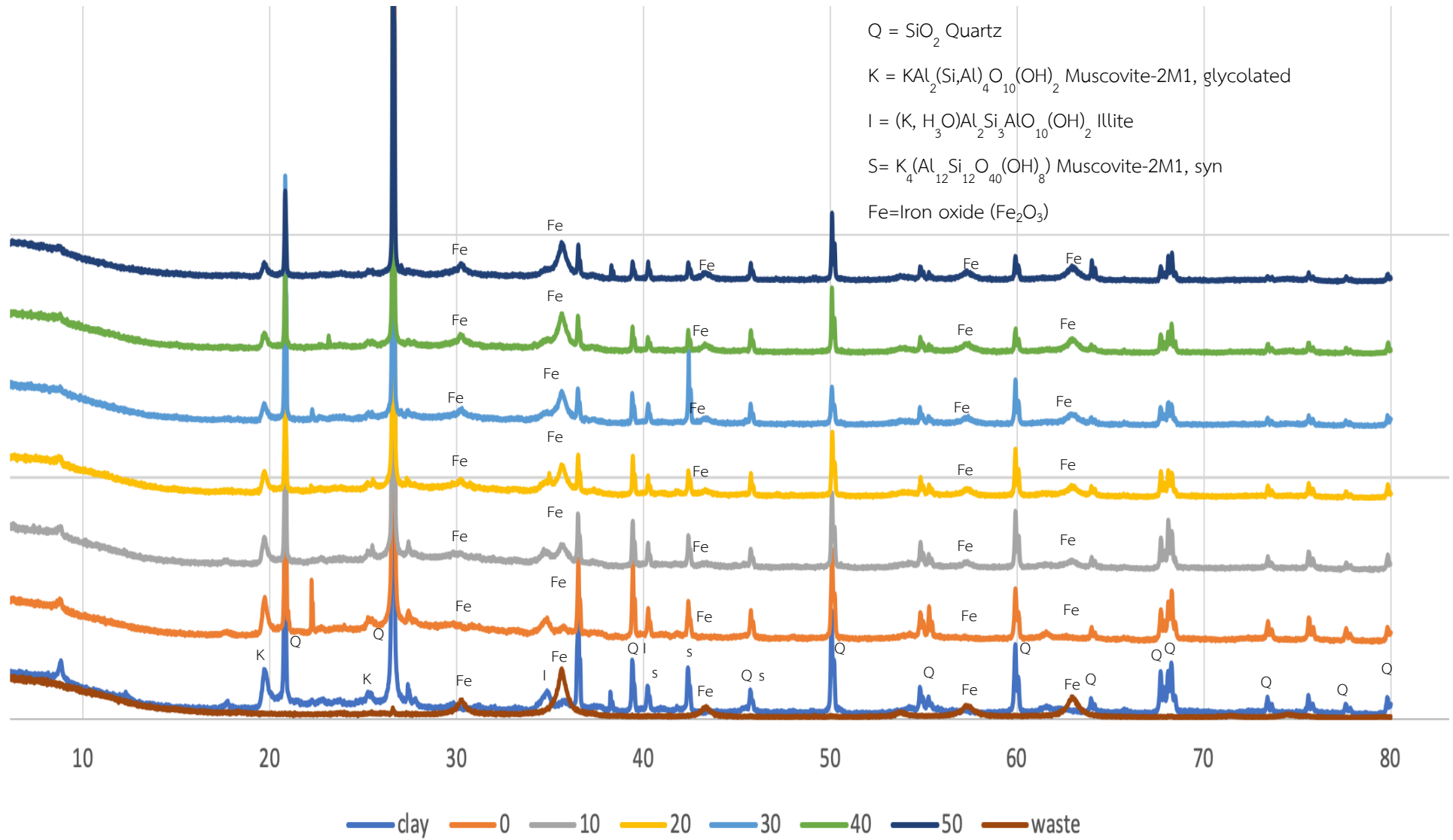


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงในรูปกำลังอัดของสำหรับวัสดุเชิงประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็ก 0-50 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว

4.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

จากผลการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกหลังเผาของดินเหนียวนครศรีธรรมราช และวัสดุเชิงประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็ก 0% 10% 20% 30% 40% และ 50% โดย

น้ำหนักของดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นระยะเวลา 28 วัน ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึก และมีโครงสร้างผลึกของควอตซ์ (Quartz; SiO_2) ซึ่งตำแหน่งพีคดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งเดียวกันในทุกอัตราส่วนของกากตะกอนเหล็ก แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแร่ควอตซ์ในดินเหนียวไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง ภายหลังจากทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ในทางตรงกันข้ามโครงสร้างผลึกของแร่กาไลนไนต์ (Kaolinite) ในดินเหนียวมี ความสูงของพีคลดลง อย่างชัดเจนภายหลังจากทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากกาไลนไนต์บางส่วนมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นเมตะกาไลน (Metakaolinite) ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 600°C จากนั้นเมตะกาไลนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเข้มข้น ส่งผลให้ปริมาณโครงสร้างผลึกกาไลนไนต์ลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณกากตะกอนเหล็ก จาก 0 ถึง 50 % ในวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแมกนีไทต์ในจีโอพอลิเมอร์มีปริมาณมากขึ้น และยังปรากฏยอดของเหล็กที่อยู่ในกากตะกอนเหล็ก (Fe_2O_3) ขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณกากตะกอนเหล็กที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ชัดว่าความเข้ม (Intensity) ของยอดเหล็กจะสูงตามไปด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีปริมาณกากตะกอนต่างกันด้วยเทคนิค XRD

4.2.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

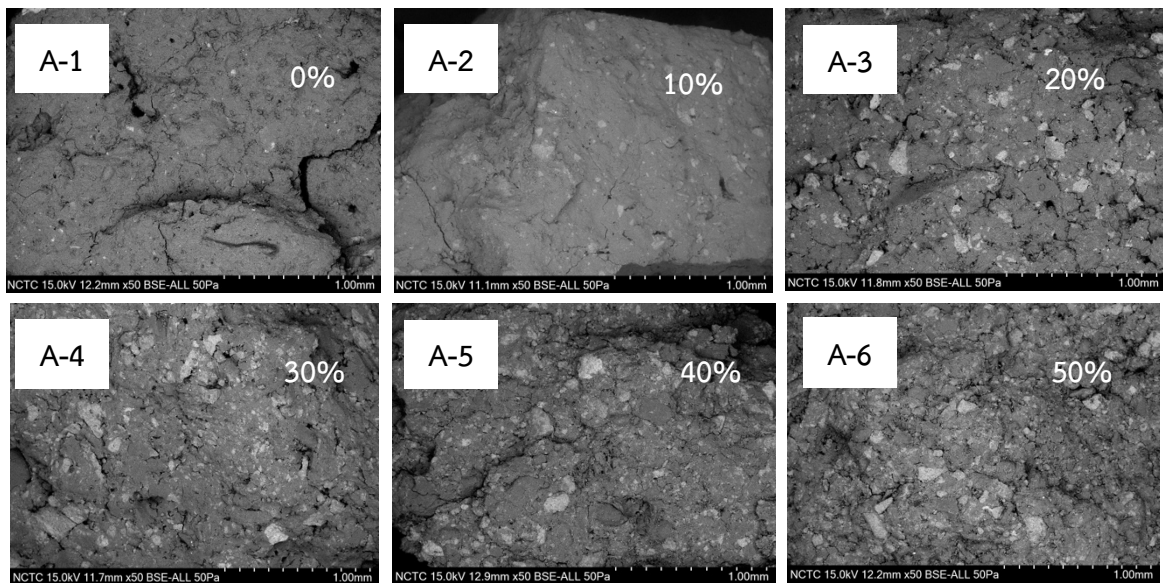
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ผสมกากตะกอนเหล็กที่ปริมาณ 0-50 % โดยน้ำหนักของดินเหนียว ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 50 และ 1500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากผลการวิเคราะห์ พบว่า วัสดุอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์จากดินเหนียวที่ไม่เติมกากตะกอนเหล็ก (รูปที่ 4.8 A1 และรูปที่ 4.9 B1) มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ และมีรอยแยกขนาดเล็กเกิดขึ้นกระจายในเนื้ออีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ สันนิษฐานว่าเกิดจากการใช้สารละลายต่างในปริมาณมากเกินไป ซึ่งโมเลกุลของน้ำบางส่วนอาจเกิดการระเหยออกจากโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดช่องว่างและการหดตัวภายในโครงสร้างของอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ที่ไม่สม่ำเสมอ

ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนเหล็ก 20 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.8 A3 และ 4.9 B3) มีการกระจายและแทรกตัวของกากตะกอนเหล็กในอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ได้ค่อนข้างดี มีความเป็นเนื้อเดียวกันในส่วนของวัสดุอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนมากกว่า 20 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.9 B4 B5 และ B6) พบว่ามีรูพรุนขนาดต่าง ๆ กระจายทั่วผิวหน้าชิ้นงานอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ นอกจากนี้ยังพบการจับกลุ่มของกากตะกอนเหล็กที่มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4.9 B4 B5 และ B6) กล่าวคือ ปริมาณกากตะกอนที่มากกว่า 20 % โดยน้ำหนัก ทำให้มีการแยกตัวของโครงสร้างกากตะกอนและวัสดุอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์มากขึ้นนั่นเอง ส่งผลให้เกิดรอยแยกเล็กเกิดขึ้นในส่วนของอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของวัสดุเชิงประกอบอีพ็อกซีโพลีเอสเตอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก

ตารางที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ของปริมาณกากตะกอนเหล็กในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และคุณสมบัติทางกายภาพ

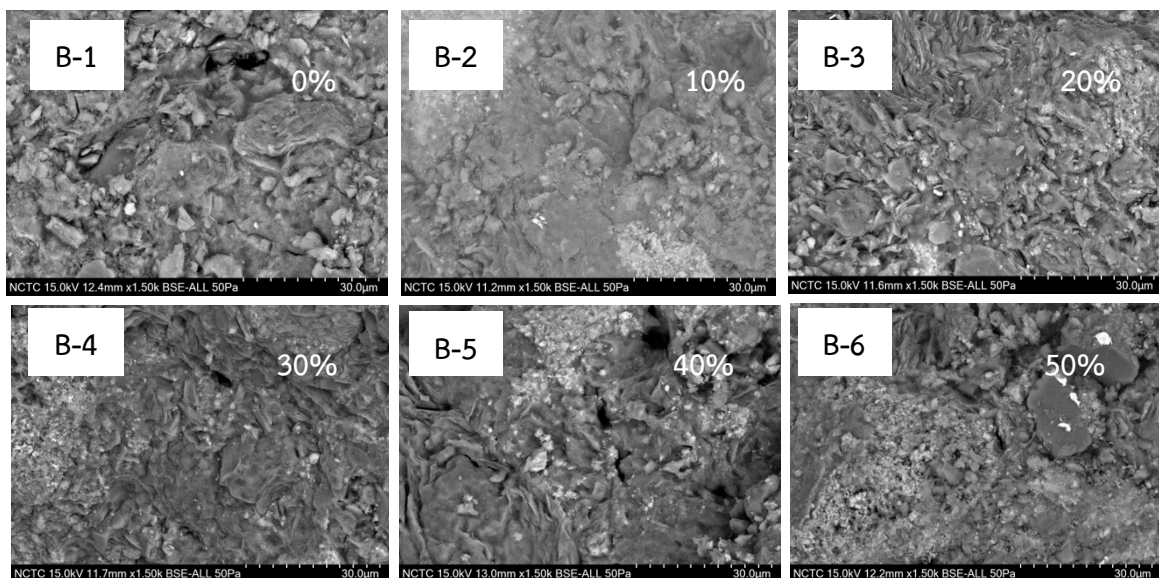
ปริมาณกากตะกอนเหล็ก (% โดยมวล ของดินเผา)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความทนต่อแรงอัด (MPa)	โครงสร้างทางจุลภาค
0	2.026	12.3	29.723	รูพรุน และรอยแยกขนาดเล็ก ๆ
10	2.076	12.0	34.577	รูพรุน และรอยแยกน้อยลง ตะกอนเหล็กเกาะตัวเป็นกลุ่ม
20	2.128	11.7	79.586	เนื้อเดียวกัน ตะกอนเหล็กกระจายตัวดี
30	2.152	12.1	71.417	เนื้อเดียวกัน แต่ตะกอนเหล็กกระจายตัวเริ่มเกาะตัว
40	2.170	12.5	60.763	เริ่มมีรอยแยกขนาด ตะกอนเหล็ก เกาะตัวเป็นกลุ่มกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ
50	2.201	13.4	37.199	รอยแยกขนาด ตะกอนเหล็ก กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ชัดว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยมวลของดิน สรุปลงได้ว่า ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็ก ส่วนร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้กากตะกอนเหล็กไม่เกิน 20% ซึ่ง สอดคล้องกับความทนต่อแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 79.586 MPa เมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนเหล็กเท่ากับ 20% เนื่องจากกากตะกอนเหล็กที่ใส่ในจีโอโพลิเมอร์ได้เข้าไปแทนที่รูพรุนทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำน้อยลงส่งผลความทนต่อแรงอัดสูงขึ้น และยังสอดคล้องกับผล SEM ที่แสดงการกระจาย และแทรกตัวของกากตะกอนเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ได้ดี (ไม่มีรูพรุน)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างอีพ็อกซีเรซิน ที่กำลังขยาย 50 เท่า

A-1 = จีโอฟอลิเมอร์ที่ไม่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก A-2 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 10%
 A-3 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 20% A-4 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 30%
 A-5 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 40% A-6 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 50%

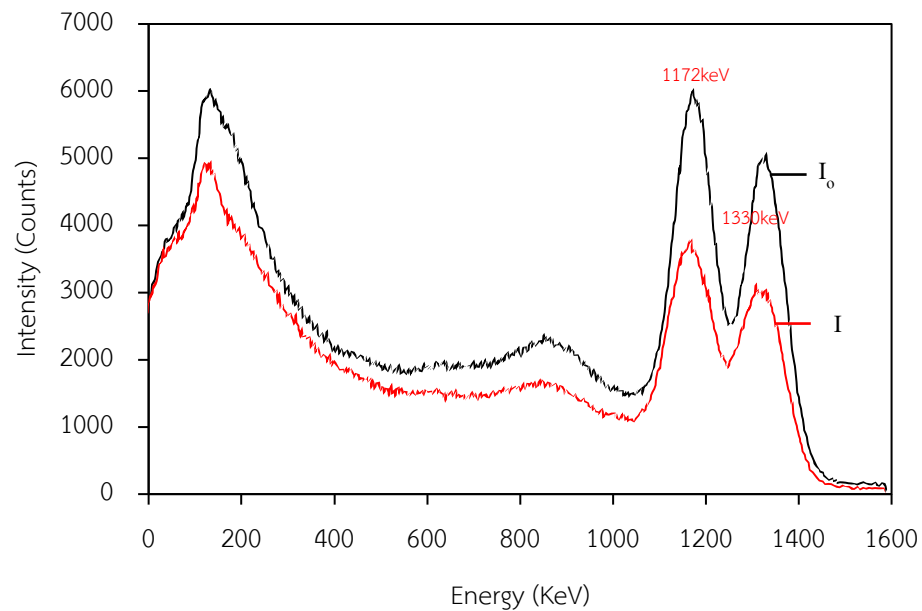


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างอีพ็อกซีเรซิน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

B-1 = จีโอฟอลิเมอร์ที่ไม่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก B-2 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 10%
 B-3 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 20% B-4 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 30%
 B-5 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 40% B-6 = จีโอฟอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 50%

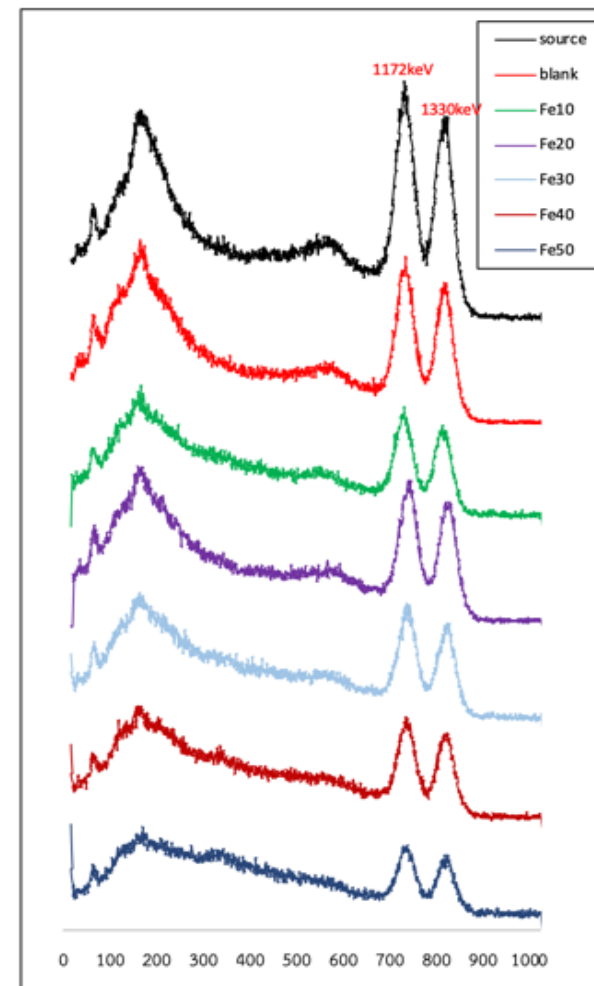
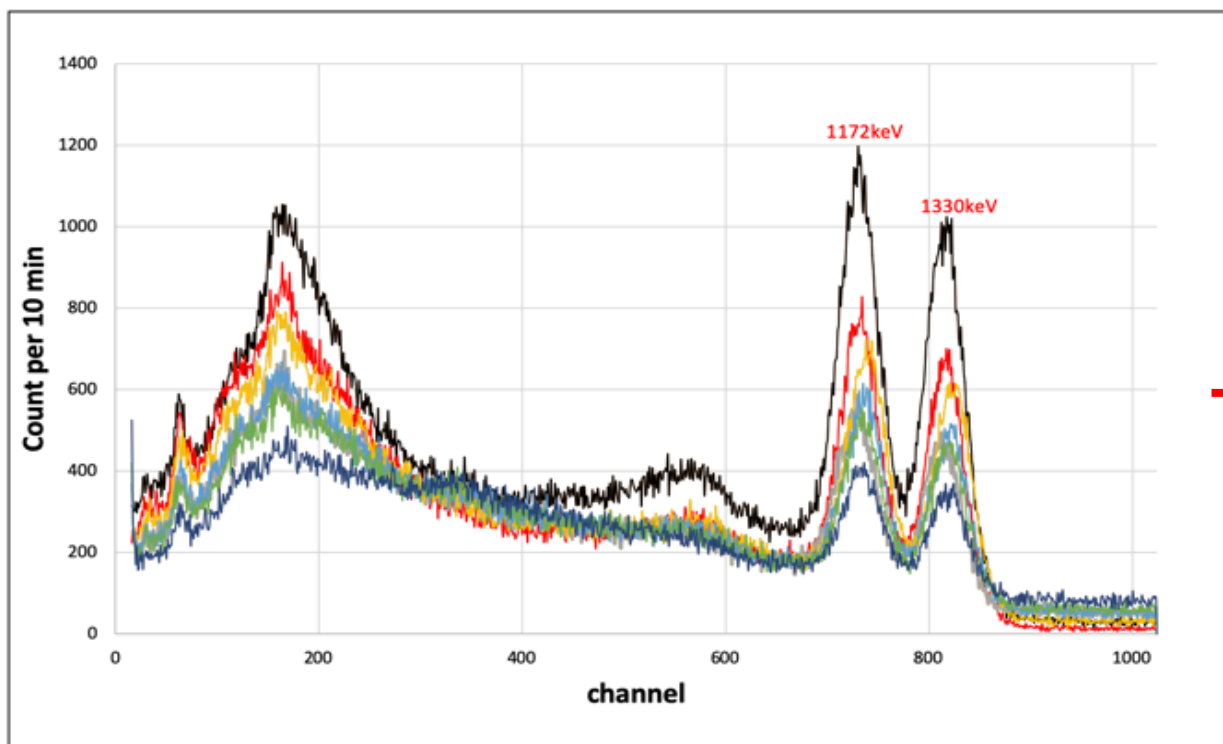
4.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านการลดทอนรังสีของจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก

จากการวัดสเปกตรัมของ ^{60}Co โดยมีการปล่อยรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 2 ช่วง คือ ที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยกำหนดให้ I_0 แทนค่าสเปกตรัมได้จากการวัดรังสีโดยไม่มีวัสดุกันรังสี และกำหนดให้ I แทนค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดรังสีเมื่อถูกกันด้วยวัสดุกันรังสีหรือแผ่นตัวอย่าง เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่างที่ปริมาณกากตะกอนแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของกากตะกอนมากขึ้นทำให้พีคเริ่มหายไปหรือความเข้มข้นของรังสีที่วัดได้มีค่าลดลง



รูปที่ 4.10 สเปกตรัม ^{60}Co ที่วัดได้เมื่อทดลองแบบมีและไม่มีตัวอย่างกันรังสีแกมมา

Spectrum from NaI detector



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบสเปกตรัม ^{60}Co ที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่างที่มีการเติมปริมาณกากตะกอนแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นโดยเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Radioactive source ^{60}Co	Sludge to cly wt. %	% Iron sludge by clay mass					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
1.330 MeV	$\bar{\mu}$ (cm^{-1}) and $\sigma(\bar{\mu})$	0.3152 \mp 0.0098	0.4511 \mp 0.0042	0.4783 \mp 0.08575	0.6376 \mp 0.0139	0.7370 \mp 0.0364	0.8428 \mp 0.0854
	HVL (cm)	2.1985 \mp 0.012	1.5364 \mp 0.009	1.4492 \mp 0.010	1.0870 \mp 0.013	0.9404 \mp 0.008	0.8225 \mp 0.008
1.172 MeV	$\bar{\mu}$ (cm^{-1}) and $\sigma(\bar{\mu})$	0.3671 \mp 0.0737	0.4770 \mp 0.0409	0.5447 \mp 0.0723	0.6446 \mp 0.0444	0.7352 \mp 0.0194	0.8285 \mp 0.0285
	HVL (cm)	1.8880 \mp 0.013	1.4531 \mp 0.018	1.2726 \mp 0.009	1.0752 \mp 0.007	0.9428 \mp 0.003	0.8367 \mp 0.003

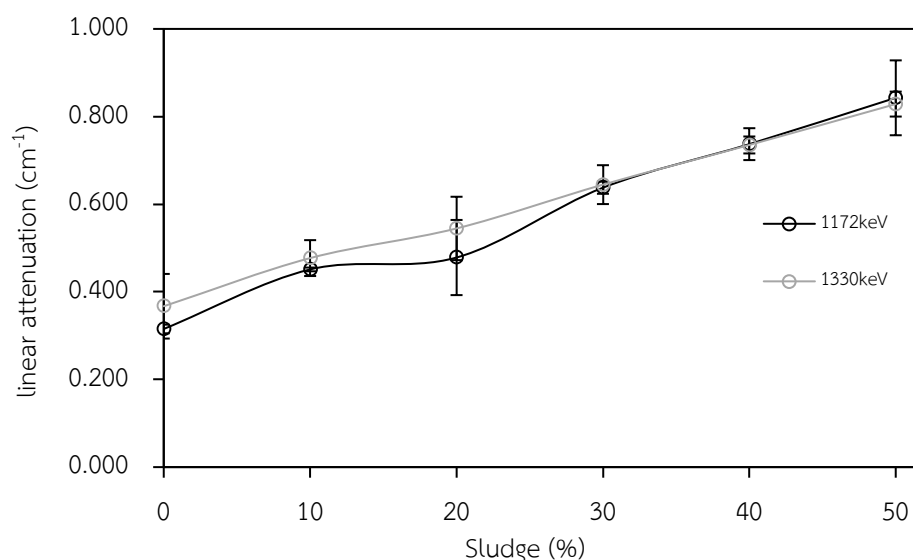
หมายเหตุ $\bar{\mu}$ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

σ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(HVL) ความหนาของวัสดุ ที่รังสีทะลุผ่านแล้วทำให้ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุนั้นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มที่ตกกระทบ

ผลการศึกษสมบัติด้านจีโอพอลิเมอร์ และสมบัติด้านการป้องกันรังสีจากตารางที่ 4.4 และ 4.5 สามารถเห็นได้ชัดว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณกากตะกอนเหล็กมากเกินไป (ตั้งแต่ 30% ถึง 50%) จะทำให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยลง แต่คุณสมบัติด้านการป้องกันรังสีสูงขึ้น และเมื่อดูจากผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นผลการลดทอนรังสีที่ได้ก็ต่ำกว่างานวิจัยอื่น อยู่ในเกณฑ์ที่งานวิจัยอื่น ๆ ได้ศึกษามา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านป้องกันรังสีได้ เช่นทำเป็นผนังกันรังสีแทนการใช้ปูนซีเมนต์ หรือถึงเก็บแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในการศึกษา หรือแทนถ้าตะกั่วของหัววัดรังสี เป็นต้น ซึ่งมีค่าความทนต่อแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 77 – 2545 อิฐก่อสร้างสามัญ

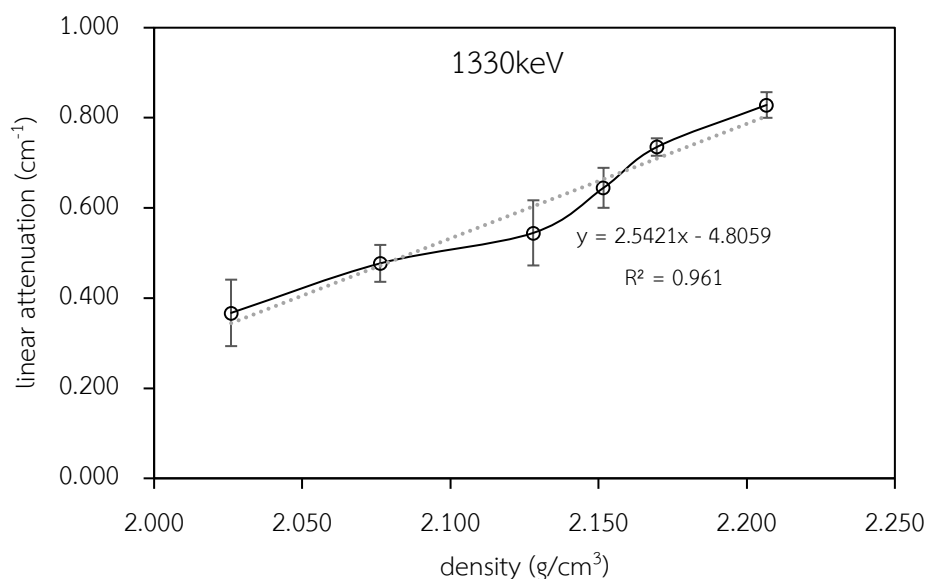
4.3.1 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ยที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV กับปริมาณของกากตะกอนเหล็ก

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นของจีโอพอลิเมอร์ดินเหนียวผสมกากตะกอนเหล็กขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ความหนา 1 cm โดยศึกษารังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ⁶⁰Co ดังรูปที่ 4.12 พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นมีค่าเพิ่มตามปริมาณกากตะกอนเหล็กที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ (Ali, B.A. *et al.*, 2013) ที่นำคอนกรีตผสมกับวัสดุเหลือใช้หลายชนิด เช่นอนุภาคเหล็ก ลูกเหล็กจากตลับลูกปืนที่ใช้แล้ว และตะกรันจากอุตสาหกรรมเหล็กเพื่อศึกษาการป้องกันรังสี พบว่าประสิทธิภาพการกันรังสีจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มอนุภาคเหล็ก หรือลูกเหล็กเข้าไป และสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของงานวิจัย

นี้ที่ระดับพลังงาน 1.172 MeV มีค่าเท่ากับ 0.3671 0.4770 0.5447 0.6446 0.7352 และ 0.8285 cm^{-1} และที่ระดับพลังงาน 1330 keV มีค่าเท่ากับ 0.3152, 0.4511, 0.4783 0.6376 0.7370 และ 0.8428 cm^{-1} ตามลำดับ และเมื่อกำบังด้วยแผ่นตะกั่วหนา 0.25 mm พบว่าปริมาณรังสีที่ผ่านไปได้รับ 20.60 % จะเห็นได้ว่าแผ่นตะกั่วสามารถกันรังสีได้มากถึง 80 % ส่วนแผ่นจีโอพอลิเมอร์สามารถกันรังสีได้ 35-65 % ถือว่าสามารถกันรังสีได้ระดับ โดยตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีกากตะกอนเหล็ก 50 % มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นรวมของตัวอย่างสูงสุด หรือเพราะในอัตราส่วนนี้มีปริมาณกากตะกอนเหล็กมากที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนรังสีได้ดีมากขึ้น มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัย (Ali Basheer Azee et al., 2013) ที่ศึกษาจีโอพอลิเมอร์รวมแบไรต์ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน (15% - 75%) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นมีค่า (0.177 - 0.316 cm^{-1}) เห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณแบไรต์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ยของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ต่อความหนาแน่นตัวอย่างของ ^{60}Co ที่ระดับพลังงาน 1330 keV

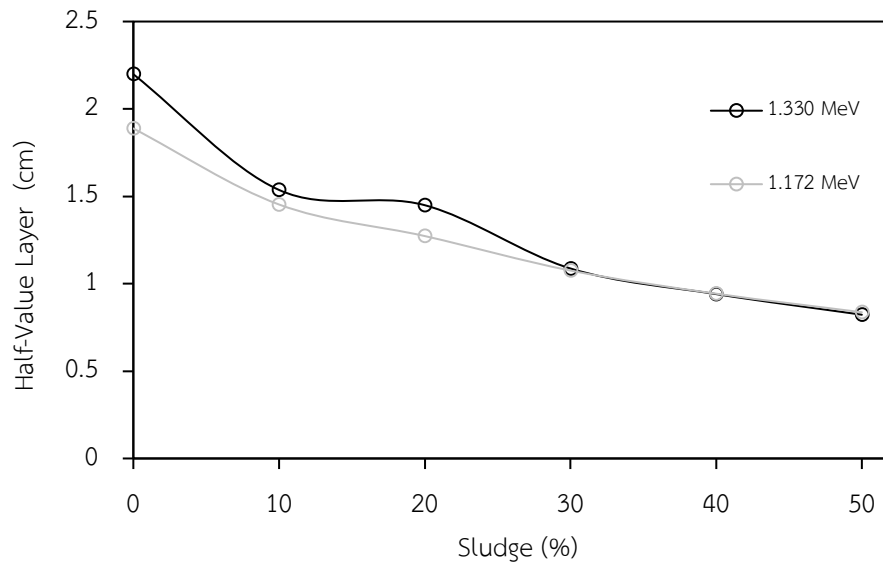
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้น หรือความสามารถในการป้องกันรังสีขึ้นอยู่กับ

กับความหนาแน่นของวัสดุและขนาดของอะตอมวัสดุ ถ้านิวเคลียสของอะตอมมีขนาดใหญ่ทำให้มีช่องว่างระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนน้อย ทำให้รังสีไม่สามารถทะลุผ่านนิวเคลียสได้จึงทำให้รังสีสะท้อนกลับไป เนื่องจากนิวเคลียสมีความหนาแน่นสูงมาก ดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น หรือ ความสามารถในการป้องกันรังสีขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ismail, 2012) ที่ได้ศึกษาผลความหนาแน่นของคอนกรีตผสมตะกรันตะกั่ว ที่มีผลต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา จากผลการทดสอบพบว่าความหนาแน่นคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก $(2.5-3.3\text{g/cm}^3)$ ส่งผลให้ค่าร้อยละการลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นเช่นกันจาก $(77.5\% - 89.0\%)$ และยังสามารถใช้กับงานของ อาลี และคณะ (2013) ได้ทดลองใช้โลหะหนักเพิ่มเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้มวลรวมของตัวอย่าง ซึ่งความหนาแน่นเป็นปัจจัยสำคัญในการลดทอนรังสี ดังนั้นการลดระดับความพรุนและการรวมอนุภาคของความถี่เฉพาะสูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดทอนของคอนกรีต โดย (Kahtan, 2013) ได้ใช้คอนกรีตผสมตะกรันเหล็กที่มีขนาดเป็นผงถึงก้อน จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการลดทอนรังสีแกมมาขึ้นอยู่กับขนาด และการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในชิ้นงาน และยังพบว่าการเพิ่มความหนาแน่นเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะพัฒนาวัสดุกำบังรังสีให้มีประสิทธิภาพ โดยการกระจายตัว และขนาดอนุภาค มีผลอย่างมากต่อการลดทอนรังสี เนื่องจากรังสีมีการปล่อยพลังงานแบบสุ่ม รังสีสามารถตกกระทบกับแผ่นกันรังสีได้ทั้งแผ่น การกระจายตัวที่สม่ำเสมอของกากตะกอนเหล็กจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนปริมาณรังสี โดยค่าที่แสดงถึงการกระจายตัวที่สม่ำเสมอคือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ย กำลังอัด และความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง กล่าวคือถ้าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานยิ่งน้อยส่งผลให้การกระจายตัวดี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ นี้ (Kahtan, 2013) ที่บ่งบอกการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของกากตะกอนเหล็กที่เติมลงไปชิ้นตัวอย่าง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่ามีการกระจายตัวได้ดี เนื่องจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉลี่ย กำลังอัด และความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างมีค่าน้อย จึงส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการกันรังสี

4.3.2 ผลการศึกษาค่าความหนาครึ่งค่า (Half-Value Layer)

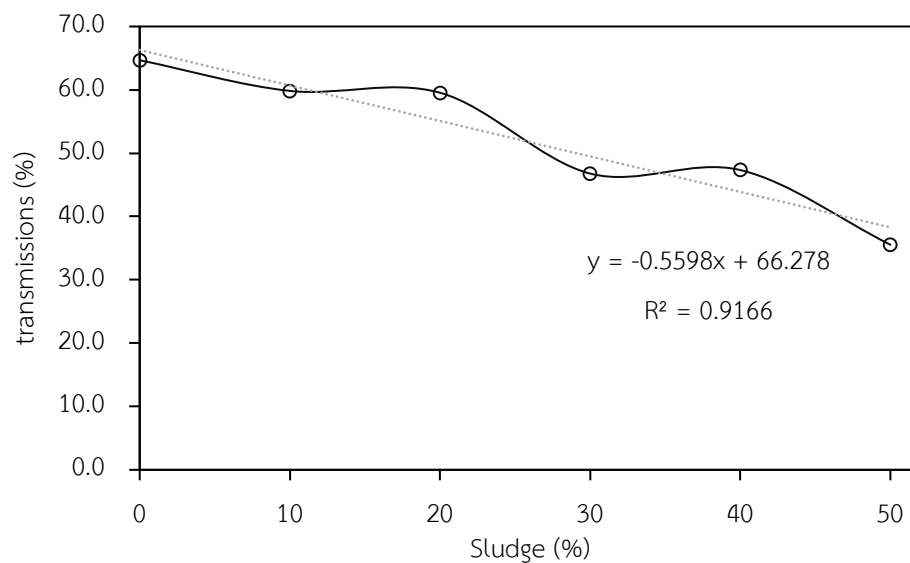
ความหนาครึ่งค่า (HVL) หมายถึง ความหนาของวัสดุที่รังสีทะลุผ่านแล้วทำให้ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุนั้นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มที่ตกกระทบ จากผลการศึกษาความหนาครึ่งค่าของจีโอพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.14 พบว่าค่าความหนาที่ทำให้ความเข้มของรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง (HVL) มีค่าลดลงขณะที่ปริมาณกากตะกอนเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อวัสดุมีศักยภาพในการดูดซับรังสีได้อย่างมากจะทำ

ให้ค่า HVL ลดลงอย่างมากเช่นกัน ซึ่งเป็นผลจากกากตะกอนเหล็กมีกลไกในการยับยั้งการทะลุผ่านของรังสีแกมมาได้ดี



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาครึ่งค่า กับปริมาณของกากตะกอนเหล็ก

4.3.3 ผลการศึกษาอัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์



รูปที่ 4.15 อัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์หนา 1cm เป็นฟังก์ชันกับปริมาณกากตะกอน (Sludge to cly wt. %)

จากรูปที่ 4.15 อัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์หนา 1 cm เป็นฟังก์ชันกับปริมาณกากตะกอน แสดงให้เห็นได้ว่ารังสีที่ผ่านอากาศโดยไม่มีแผ่นกำบังคิดเป็น 100% เมื่อกันรังสีด้วยแผ่นกำบังจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนา 1 cm เท่ากันทุกอัตราส่วน แต่เพิ่มกากตะกอนเหล็กมากขึ้นตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50% พบว่าปริมาณรังสีที่ผ่านไปได้คิดเป็น 59.8 59.5 46.8 47.3 และ 35.5 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแผ่นจีโอพอลิเมอร์สามารถกันรังสีได้ 35-65 % ถือว่าสามารถกันรังสีได้ปริมาณหนึ่ง และสำหรับสูตรที่เพิ่มกากตะกอนเหล็กเข้า 50% สามารถกันรังสีได้มากกว่าครึ่งของรังสีที่ปล่อยออก เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตะกั่ว หนา 1 mm มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นเท่ากับ 5.54 cm^{-1} พบว่าแผ่นตะกั่วสามารถกันรังสีได้มากถึงร้อยละ 100% ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์ที่ศึกษานี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำทำเป็นวัสดุกำบังรังสี แต่ควรเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นกำบังมากขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการกันรังสีได้มากขึ้นไปอีกระดับ

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นของจีโอพอลิเมอร์กับงานวิจัยอื่น

เรื่อง	รูปแบบการขึ้นรูป	วัสดุประสาท	สารตัวเติม	Co-60 1,172 keV		Co-60 1,330 keV	
				μ	HVL	μ	HVL
				(cm^{-1})	(cm)	(cm^{-1})	(cm)
Kahtan S. et al. 2012	Cast	จีโอพอลิเมอร์	แบไรต์ (BaSO ₄) 15 %	0.177	3.91	-	-
			30 %	0.183	3.78	-	-
			50 %	0.214	3.232	-	-
			75 %	0.316	2.193	-	-
Taban S, et al. 2018	Cast	จีโอพอลิเมอร์	แบไรต์ (BaSO ₄) 50 %	0.016	43.04	0.015	45.89
			100 %	0.017	40.76	0.016	43.04
			เศษเหล็ก	5%	0.88	0.787	-
Ali B. et al. 2013	Cast	คอนกรีต	10%	0.89	0.778	-	-
			15%	0.90	0.770	-	-

			20%	0.91	0.761		
			30%	0.92	0.753		
Olukotun S.F. 2018	Press	จีโอพอลิเมอร์	-	0.120	5.794	0.112	6.164
			กาก				
			ตะกอน				
			เหล็ก				
			0%	0.315	2.1985	0.3671	1.8880
This study	Press	จีโอพอลิเมอร์	10%	0.4511	1.5364	0.4770	1.4531
			20%	0.4783	1.4492	0.5447	1.2726
			30%	0.6376	1.0870	0.6446	1.0752
			40%	0.7370	0.9404	0.7352	0.9428
			50%	0.8428	0.8225	0.8285	0.8367

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวในจังหวัด นครศรีธรรมราชผสมกับกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสี พบว่า ดินเหนียวจากจังหวัดนครศรีธรรมราชมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ดินเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นอสัณฐาน ส่วนกากตะกอนเหล็กที่นำมาเติมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์ได้ใช้ที่ ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยมวลของดิน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกันรังสีแกมมา แล้วทำการผสมและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด และบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

จากการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของจีโอพอลิเมอร์สรุปได้ว่า ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณกากตะกอนเหล็ก โดยความหนาแน่นอยู่ที่ช่วง $2.026 - 2.207 \text{ g/cm}^3$ ส่วนร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้กากตะกอนเหล็กไม่เกิน 20% และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11.7% ที่ปริมาณกาก ตะกอนเหล็ก 20% หลังจากนั้นร้อยละการดูดซึมน้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนเหล็ก มากกว่า 20% ในขณะที่ความทนต่อแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 80 MPa ที่ปริมาณ กากตะกอนเหล็กเท่ากับ 20% เนื่องจากกากตะกอนเหล็กที่ใส่ในจีโอพอลิเมอร์ได้เข้าไปแทนที่รูพรุน ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำน้อยลงส่งผลความทนต่อแรงอัดสูงขึ้น และยังสอดคล้อง กับผล SEM ที่แสดงการกระจาย และแทรกตัวของกากตะกอนเหล็กในจีโอพอลิเมอร์ได้ดี (ไม่มีรูพรุน) ไม่มีรอยแตกร้าวหรือหลุม แล้วยังถูกเคลือบโดยเนื้อจีโอพอลิเมอร์ได้ดี จึงส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ ที่ผสมกากตะกอนเหล็ก 20% ให้ความทนต่อแรงอัดสูง ส่วนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ จีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้าง แบบกึ่งผลึก และผลึกของแร่ควอตซ์ในดินเหนียวไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง ในทางตรงกันข้าม แร่กาโอลินไนต์ (Kaolinite) เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของเครือข่าย อะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานสาม มิติ (Amorphous) หลังจากนั้นเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบ เจลของจีโอพอลิเมอร์จากอะลูมิเนียมและซิลิเกตในสารตั้งต้นกับสารละลายต่าง และสุดท้ายเกิดการคง รูป (Stabilization) โดยเครือข่ายของจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเจลขนาดเล็กถูกเปลี่ยนเป็น เครือข่ายขนาดใหญ่ จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น (Yip et al., 2005)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางการลดทอนรังสีของจีโอพอลิเมอร์ดินเหนียวผสมกากตะกอนเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ^{60}Co พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณกากตะกอนเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการกันรังสีไม่ได้ขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุที่เป็นเนื้อหลักด้วยเช่นกัน โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นมีค่าสูงสุดที่ปริมาณตะกอนเหล็ก 50 % มีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.8428 \pm 8.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ที่ระดับพลังงาน 1.330 MeV และ $0.8285 \pm 2.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ สำหรับพลังงาน 1.172 MeV ส่วนค่าความหนา (HVL) คือความหนาที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลงครึ่งหนึ่งซึ่งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณกากตะกอนเหล็กเพิ่มขึ้น ในรูปร้อยละของรังสีที่ผ่านแผ่นกำบังรังสี พบว่าแผ่นจีโอพอลิเมอร์สามารถป้องกันรังสีได้ 35–65 % ที่ความหนา 1 cm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตะกั่ว หนา 1 mm มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นเท่ากับ 5.54 cm^{-1} พบว่าแผ่นตะกั่วสามารถกันรังสีได้มากถึงร้อยละ 100%

จากงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า กากตะกอนเหล็กที่เป็นของเสียสามารถป้องกันรังสีแกมมา และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้ จีโอพอลิเมอร์ได้ ซึ่งเหมาะที่จะทำเป็นอิฐก่อสร้างสามัญเพื่อเป็นผนังกันรังสี เนื่องจากอิฐก่อสร้างสามัญคุณภาพ ก ต้องมีความทนต่อแรงอัดมากกว่า 17 MPa และการดูดกลืนน้ำสูงสุด 20.0% และในทุกอัตราส่วนของสูตรในงานวิจัยนี้ผ่านมาตรฐาน มอก. 77 – 2545 ทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษากรณีเพิ่มเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กในปริมาณที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันรังสี โดยยังคงมีสมบัติอยู่ในขอบเขตการใช้งานทางวิศวกรรมได้

5.2.2 ควรศึกษากรณีเพิ่มความหนาของตัวอย่างให้มากกว่า 1 cm เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันรังสี

5.2.3 ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคในแต่ละช่วงอายุของการบ่ม

บรรณานุกรม

- กัลยาณี คุกตานนท์, เล็ก สีคง, ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และสมพงษ์ นนทพันธ์. (2551). การใช้ยาง STR 5L ผสมเพอร์ไรต์ป้องกันรังสีแกมมา. *วารสารวิจัย มข.มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 13(2), 205-215.
- ธวัช ชิตตระการ. (2541). *การตรวจและการวัดรังสี*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พัชราภรณ์ ธรรมบำรุง. (2558). *การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาวเถ้าปาล์ม และของเสียกากซีเมนต์*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2541). เนื้อดินเซรามิก. *วารสารบริษัทบริษัท โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮ้าส์*, 247
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2545). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้าง* สามัญ มอก.77 - 2545. กรุงเทพฯ.
- สุชายาพร โจไรสง และสุชาติ เกียรติวัฒนเจริญ. (2551). อิฐกันรังสี. *Associated Medical Sciences*, 79.
- อุบลกัษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552). เถ้าแกลบในงานคอนกรีต โจเซฟ พลาสติคการ์ด (โคราช) แอนต์ปรินท์จำกัด. *SNRU Journal of Science and Technology*, 1(4), 143-150.
- Abdullah, K. M. (2014). *FUNDAMENTALS IN NUCLEAR PHYSICS*. Duhok: University of Duhok.
- Aboulayt, A., Riahi, M., Ouazzani, M., Hannache, H., Gomina, M. and Moussa, R. (2017). Properties of metakaolin based geopolymer incorporating calcium carbonate. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2393-2401.
- Akkurt, I. (2009). Effective atomic and electron numbers of some steels at different energies. *Ann. Nucl. Energy*, 36 (11e12), 1702e1705.
- Akkurt, I., Akyildirim, H., Akkurt, A., Mavi, B., Kilincarslan, S., and Basyigit, C. (2010). Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. *Progress in Nuclear Energy*, 1-4.
- Akkurt, I., Mavi, B., Akkurt, A., Basyigit, C., Kilincarslan, S., and Yalim, H. (2005). Study on Z-dependence of partial and total mass attenuation coefficients. *Quant Spectrosc Radiat*, 94, 379-385.

- Ali, B. A., Kahtan, S. M., Mohd Mustafa Al, B. A., Kamarudin, H., and Andrei Victor, S. a. (2013). The Effect of Various Waste Materials' Contents on the Attenuation Level of Anti-Radiation Shielding Concrete. *Materials*, 6, 4836-4846.
- Ali, B., Kahtan, S., Sandu, A., Abdullah, M., Hussin, K., and Ioan, G. (2013). Evaluation of Radiation Shielding Properties for Concrete with Different Aggregate Granule Sizes. *Rev. Chim*, 64, 899–903.
- American Society for Testing and Material. (2011). ASTM C109/C109M-11a standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standard*, 4(2), 2-6.
- ASTM C192/C 192M-06. (2013). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. *Annual Book of ASTM Standards*, 4(1), 1-8.
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-317.
- Bouzarjomehri, F., Bayat, T., Dashti-R, M., Ghisari, J., and Abdoli, N. (2006). ^{60}Co Gamma-Ray Attenuation Coefficient of Barite Concrete. *Iran. J. Radiat. Res*, 4, 71–75.
- Buchwald, A., Vicent, M., Kriegel, R., Kaps, C., Monzo, M. and Barba, A. (2009). Geopolymeric binders with different fine fillers-phase transformation at high temperatures. *Applied Clay Science*, 46, 190-195.
- Chang, E. (2009). *Shear and bond behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams*. australia: Curtin University of Technology.
- Danupon, T., Wichai, N. and Chitpon, I. (2008). Characteristics of gamma radiation shielding concrete containing barite aggregate and ground raw perlite. *Proceeding of the Sixth Conference Engineering Management* (pp. 97-102). Songkhla: Prince of Songkla University.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Materials Science*, 42(9), 2917-2933.
- Evans, R. (1955). The atomic nucleus. *McGraw-Hill book compny*, 300.

- Galiano, Y. L., Fernández, P. C. and Vale, J. (2011). Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash- based geopolymers. *Hazardous Materials*, 185(1), 373-381.
- Guo, X., Shi, H. and Dick, W.A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
- Ibrahim, K. M. (2018). Mechanical Properties of Concrete Using Iron Waste as a Partial Replacement of Sand. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, ISSN 2414-5629 (Print), ISSN 2414-5602 (Online).
- Kahtan, S. M., Ali, A. M., Mustafa, A. B., Kamarudin, H. and Azmi, B.R. (2012). The Effect of Barite Content on Anti Radiation Properties of Geopolymer Fly Ash Concrete Incorporated Natural Rock Ores of Hematite. *Science and Research (IJSR)*, 2319-7064.
- Khalid, O. (2011). Gamma-Ray radiation attenuated by barium sulfate–cement barrier. *Elixir Bio. Phys*, 34, 2502-2504.
- Noori, K. M. and Ibrahim, H. H. (2018). Mechanical Properties of Concrete Using Iron Waste as a Partial Replacement of Sand. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, ISSN 2414-5629 (Print), ISSN 2414-5602 (Online).
- Kumar, S. and Kumar, R. (2011). Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, 37(2), 533–541.
- Abdullah, M., Tahir, M. F., Tajudin, M. A., Ekaputri, J. J., Bayuaji, R. and Khatim, N. A. (2017). Study on The Geopolymer Concrete Properties Reinforced with Hooked Steel Fiber. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (p. 267). Surabaya, East Java: Materials Science and Engineering.
- Mingyu, H., Xiaomin, Z. and Fumei, L. (2009). Alkali -activated fly ash-based geopolymers with zaolite or bentonite as additives. *Cement and Concrete Composites*, 31(11), 762-768.

- Montes, C. (2010). *Development of a geopolymer-based cementitious coating for the rehabilitation of buried concrete infrastructure*. Baton Rouge: Louisiana Tech University.
- Mustaqqim A.R., Zuhayr M.G., Azizi A.M., Fazldiel A.I., Norlia M.I. and Izzati M.N. (2015). Study on The Geopolymer concrete properties reinforced with hooked steel fiber. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 754-755, 373-377.
- Nastasia, S., Lidia, R., Viorel, F., Maria, G. and Ionela, P. (2018). Composite materials with primary lead slag content: application in gamma radiation shielding and waste encapsulation fields. *Cleaner Production*, 179, 255-265.
- Olivia, M. and Nikraz, H.R. (2011). Strength, water penetrability of fly ash. *Engineering and Applied Sciences*, 6(7), 70-78.
- Riahi, S., Nazari, A., Zaarei, D., Khalaj, G., Bohlooli, H. and Kaykha, M.M. (2012). Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by taguchi method. *Materials and Design*, 37(2), 443-449.
- Selmani, S., Ali, S., Bouaziz, S., Joussein, E. and Rossignol, S. (2017). Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 146, 457-467.
- van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I, theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.
- Yip, C.K., Lukey, G.C. and Deventer, V.J.S.J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1688-1697.
- Yunsheng, Z., Wei, S., Qianli, C. and Lin, C. (2007). Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. *Hazardous Materials*, 143(1), 206-213.
- Zhang , Ai.Z., Kim, X., Y.H. and Yarlagaadda, P. (2011). Mix design and compressive strength of geopolymer concrete containing blended ash from agro-industrial wastes. *Advanced Materials Research*, 339(11), 452-457.

- Zhang, J., Provis, J.L., Feng, D. and van Deventer, J.S.J. (2008). Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺. *Hazardous Materials*, 157(2), 587-598.
- Zheng, L. W. (2010). The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer. *Chemosphere*, 79(6), 665-671.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ ผก.1 ความทนต่อแรงอัดสำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนต่างกัน

Sludge wt. %	ความทนต่อแรงอัด (MPa)				SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	28.31	29.70	31.16	29.72	1.42
10	37.13	31.70	34.89	34.57	2.73
20	80.46	80.00	78.28	79.58	1.14
30	71.60	69.30	73.33	71.41	2.02
40	61.95	60.60	59.73	60.76	1.11
50	37.30	36.44	37.85	37.19	0.70

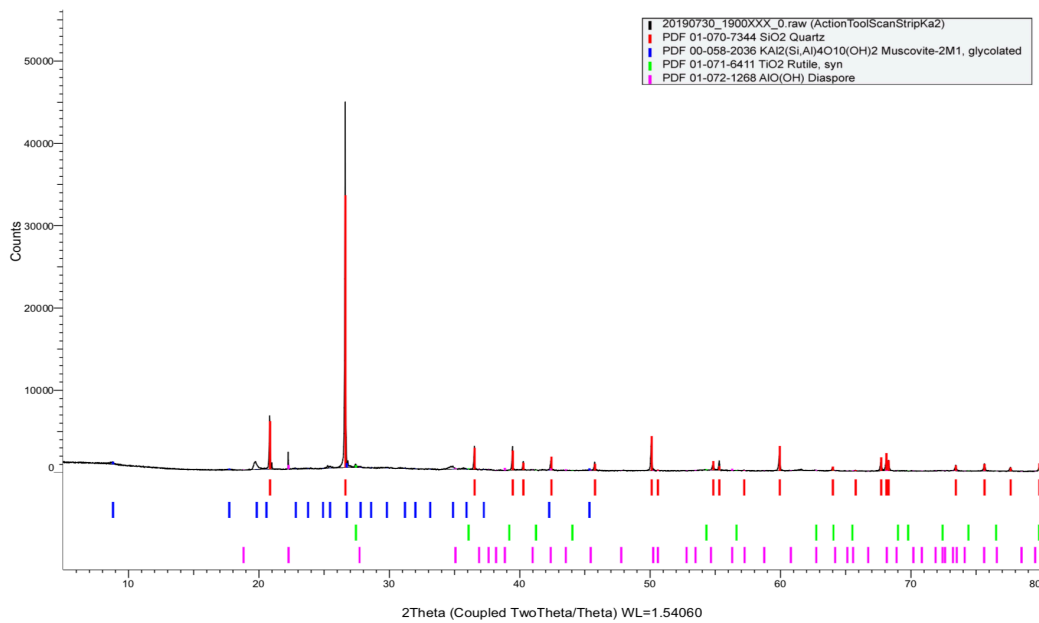
ตารางที่ ผก.2 ความหนาแน่นของตัวอย่างกับปริมาณ % กากตะกอน (Sludge to cly wt. %)

Sludge wt. %	ความหนาแน่น (g/cm ³)				SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2.017	2.035	2.026	2.026	0.009
10	2.078	2.078	2.073	2.076	0.003
20	2.128	2.132	2.124	2.128	0.004
30	2.157	2.148	2.150	2.152	0.005
40	2.171	2.166	2.172	2.170	0.003
50	2.200	2.190	2.23	2.207	0.021

ตารางที่ ผก.3 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์

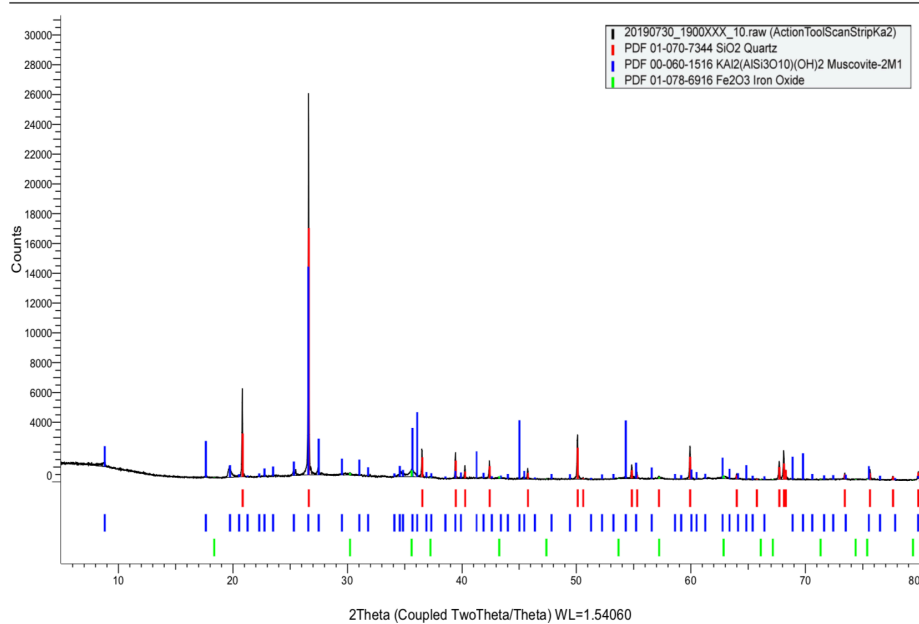
Formular	มวลอบแห้ง			มวลอบหลังแช่น้ำ			% water absorption				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average	SD
0	47.02	47.35	47.2	52.98	52.83	53.12	12.675	11.573	12.542	12.263	0.601
10	47.7	47.71	47.67	53.43	53.4	53.37	12.012	11.926	11.957	11.965	0.043
20	47.64	47.97	47.85	53.27	53.53	53.48	11.817	11.590	11.765	11.724	0.119
30	47.85	47.73	48.06	53.63	53.56	53.81	12.079	12.214	11.964	12.086	0.125
40	44.79	44.71	44.16	50.36	50.31	49.75	12.435	12.525	12.658	12.539	0.112
50	44.4	44.28	44.5	50.53	50.01	50.54	13.806	12.940	13.573	13.439	0.448

(Coupled TwoTheta/Theta)



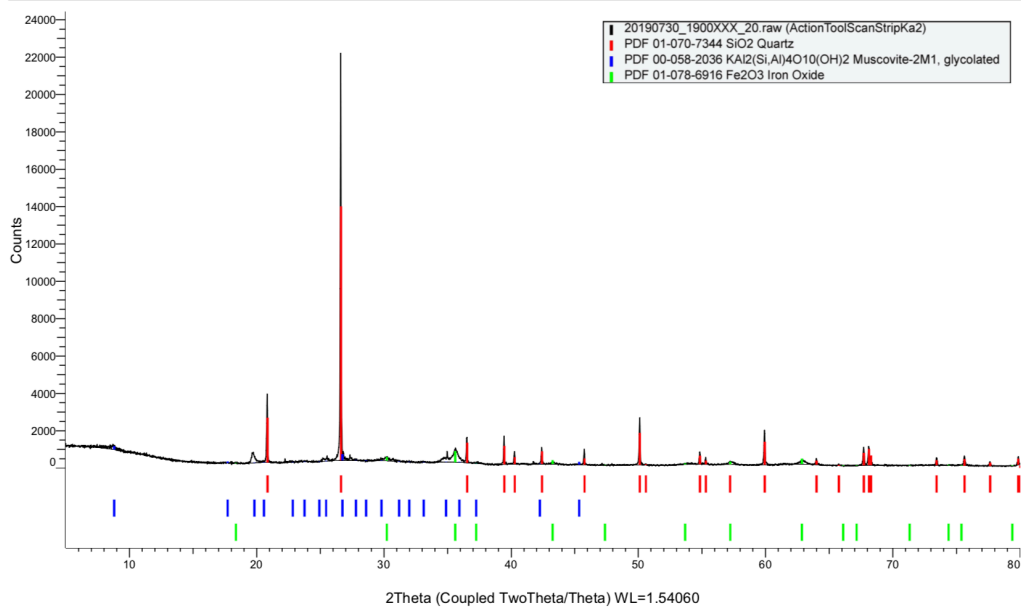
รูปที่ ผก.4 ผลการวิเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก 10% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction

(Coupled TwoTheta/Theta)



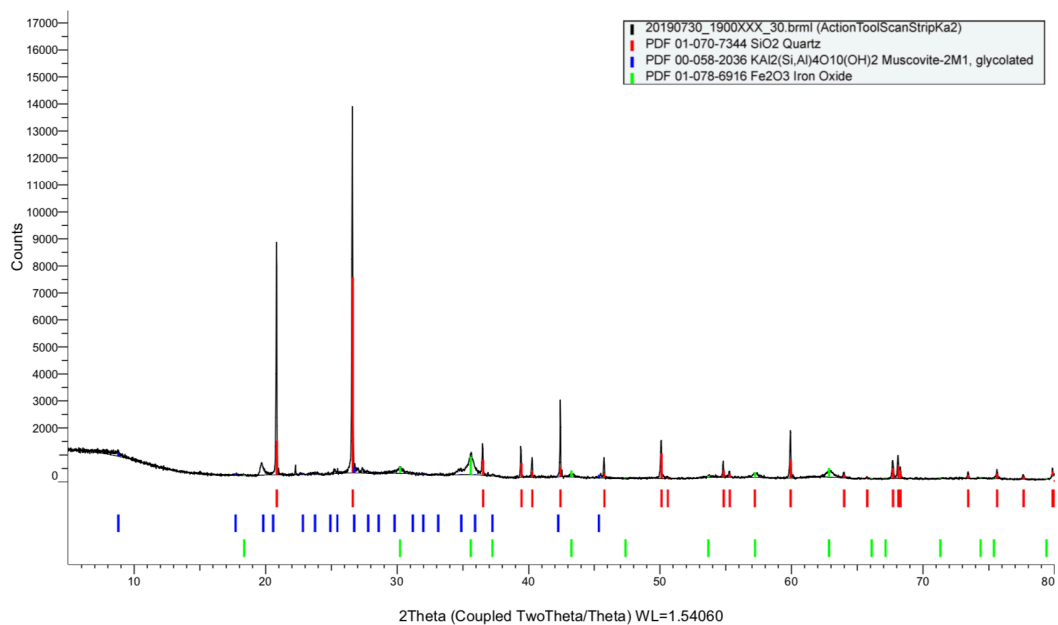
รูปที่ ผก.5 ผลการวิเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก 20% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

(Coupled TwoTheta/Theta)



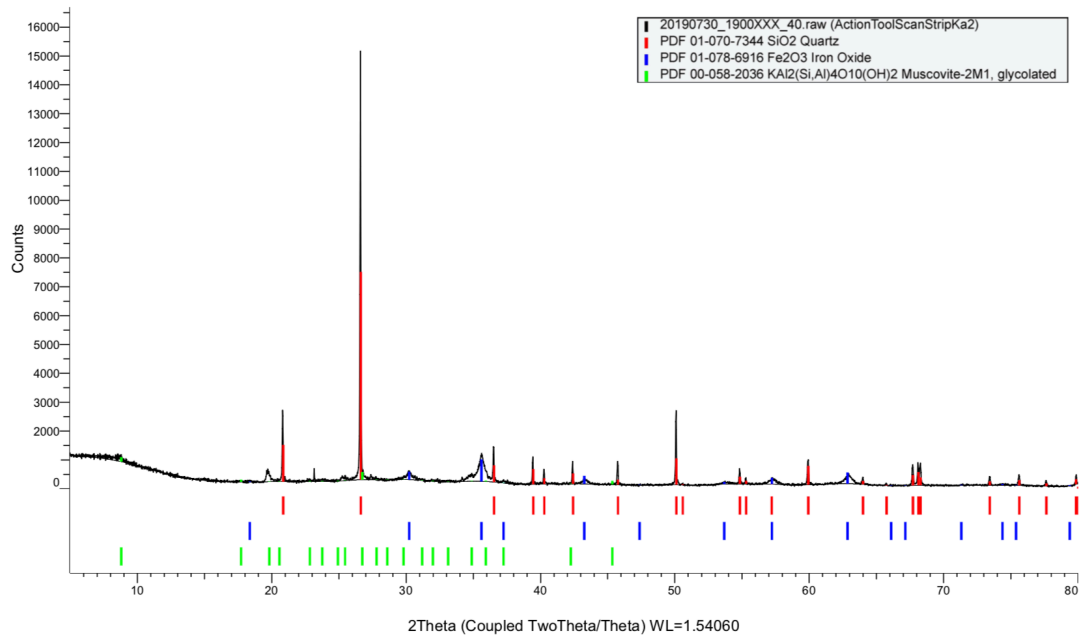
รูปที่ ผก.6 ผลการวิเคราะห์ซีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก 30% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction

(Coupled TwoTheta/Theta)



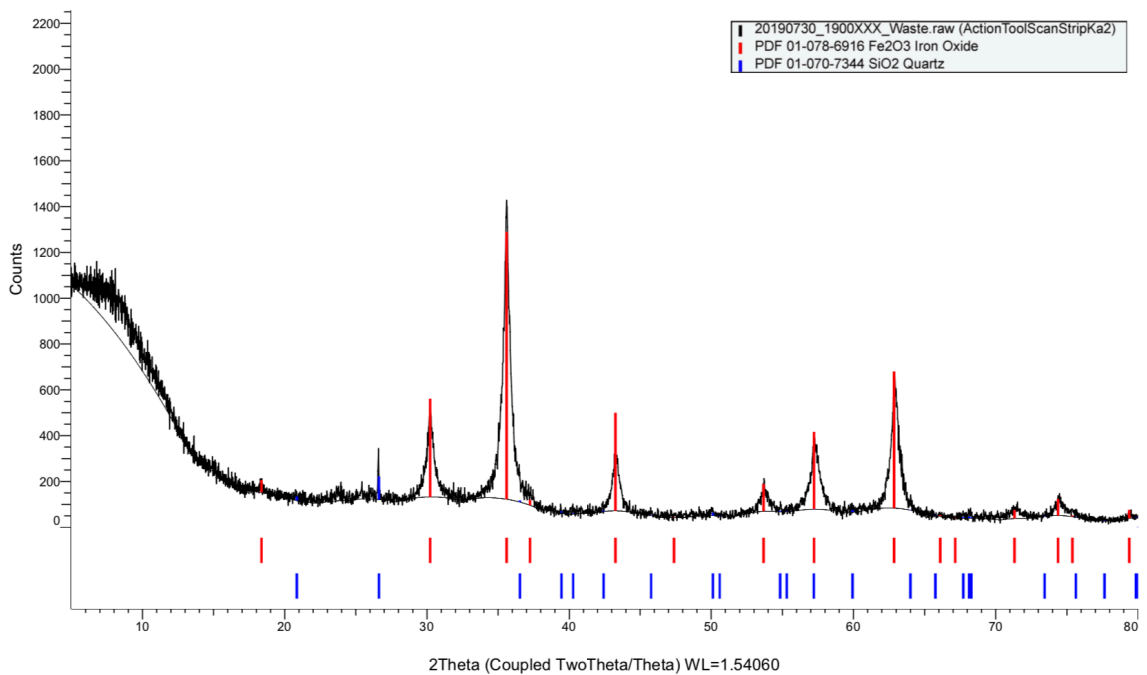
รูปที่ ผก.7 ผลการวิเคราะห์ซีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก 40% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

(Coupled TwoTheta/Theta)



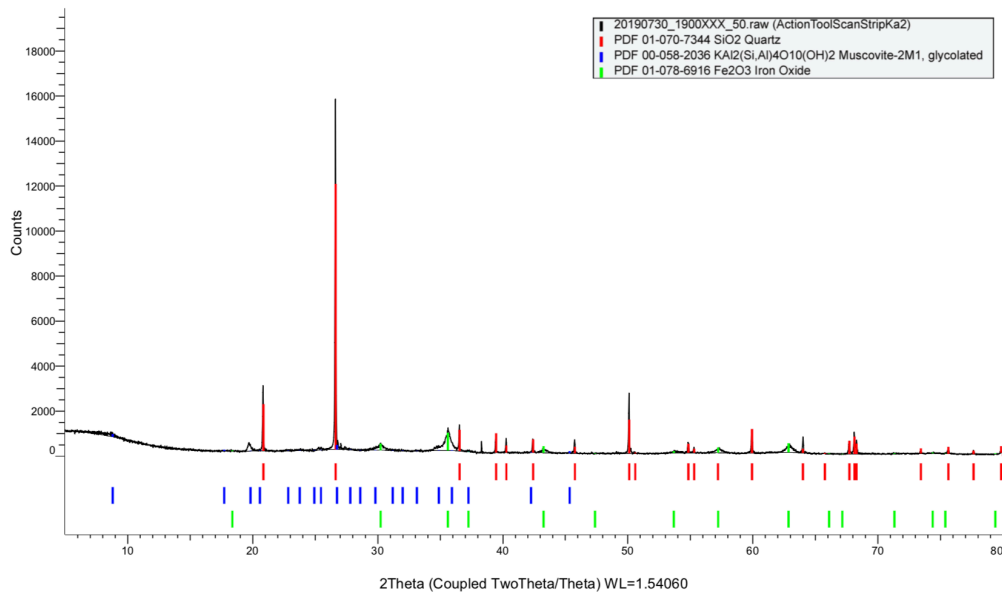
รูปที่ ผก.8 ผลการวิเคราะห์ซีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก 50% โดยใช้เทคนิค X-Ray
 Diffraction

(Coupled TwoTheta/Theta)



รูปที่ ผก.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของกากตะกอนเหล็กโดยใช้เทคนิค X-Ray
 Diffraction

(Coupled TwoTheta/Theta)

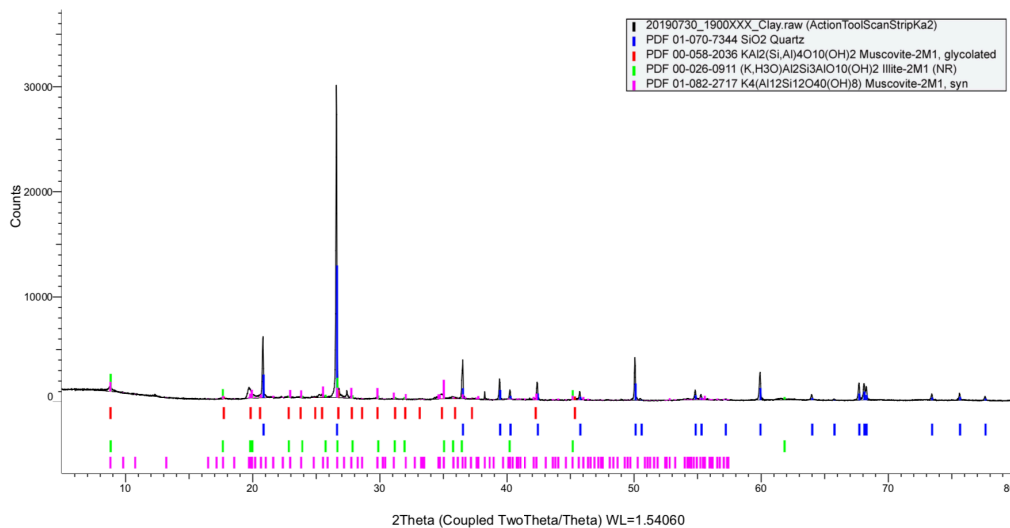


รูปที่ ผก.10 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวนครศรีธรรมราชก่อนเผา โดยใช้
เทคนิค X-Ray Diffraction

X-RAY DIFFRACTOMETER

7/30/2019

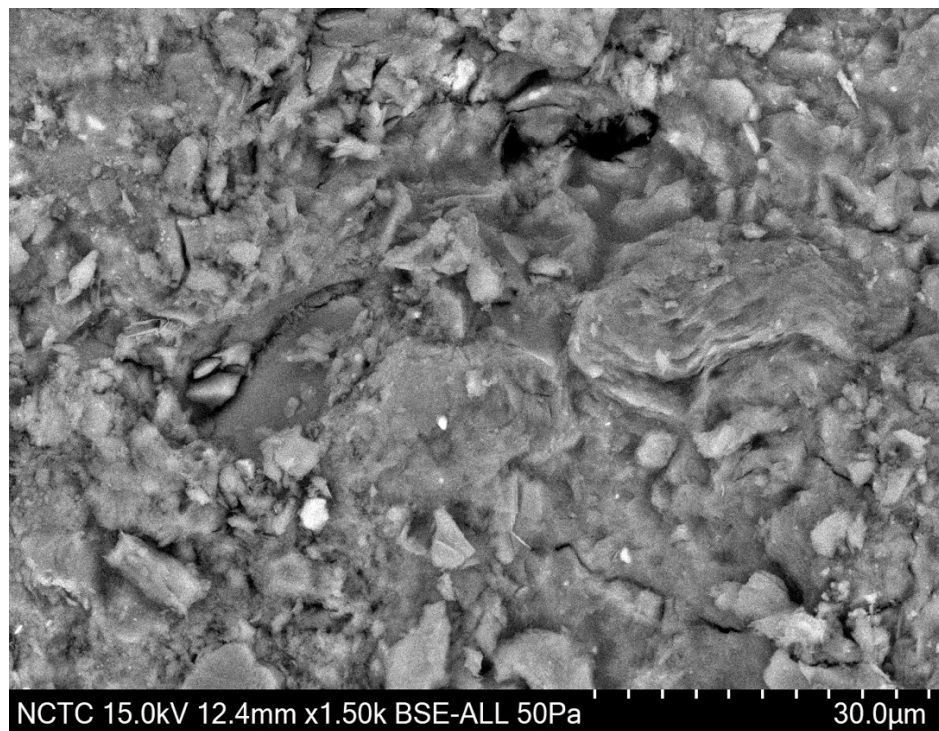
(Coupled TwoTheta/Theta)



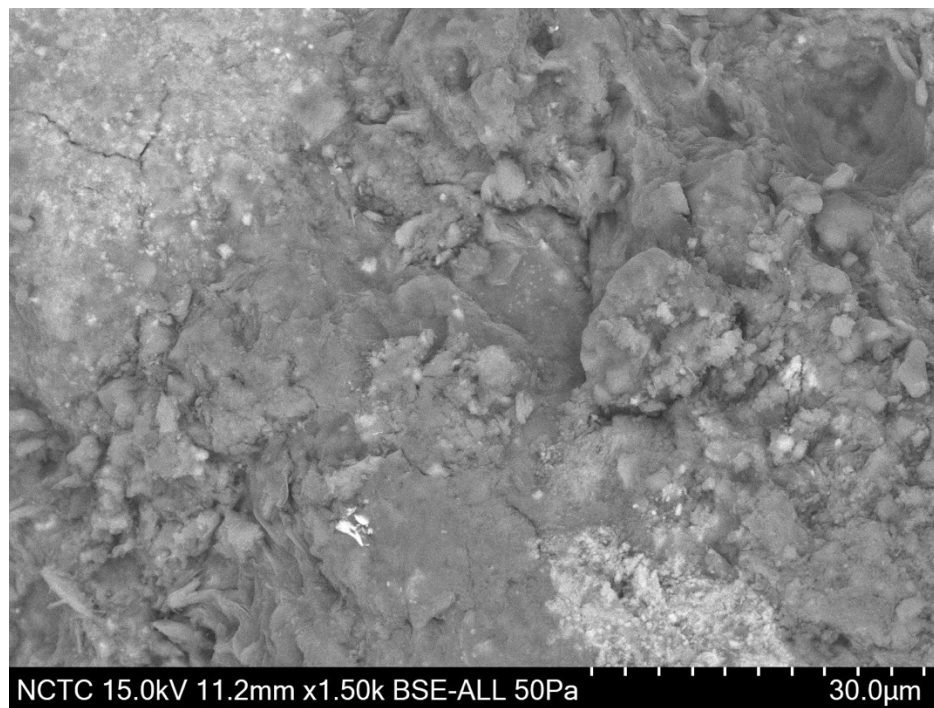
NSTDA Characterization and Testing Service Center

NSTDA Characterization and Testing Service Center

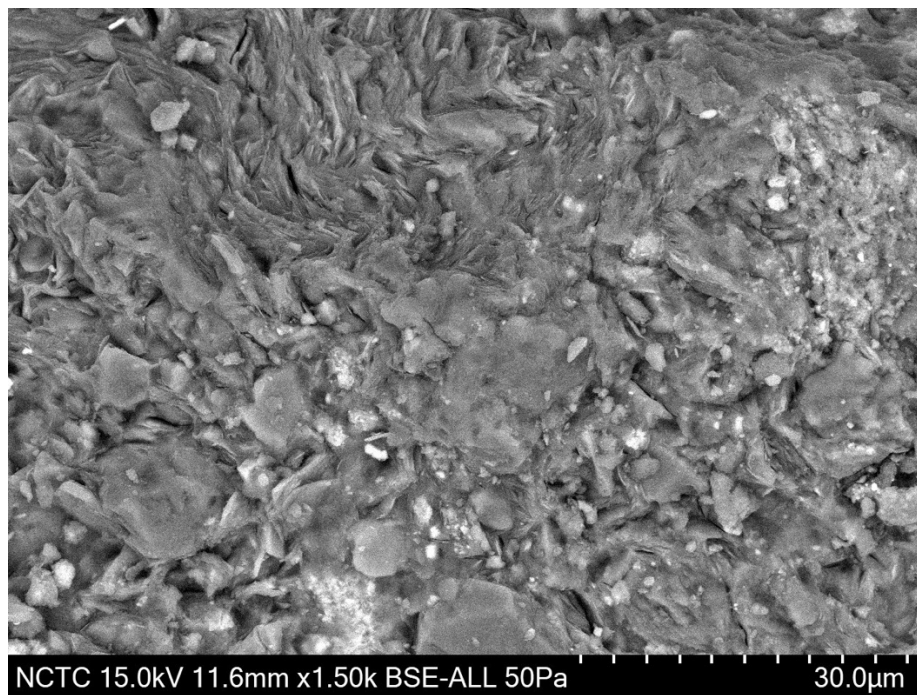
รูปที่ ผก.11 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวนครศรีธรรมราชหลังเผา โดยใช้
เทคนิค X-Ray Diffraction



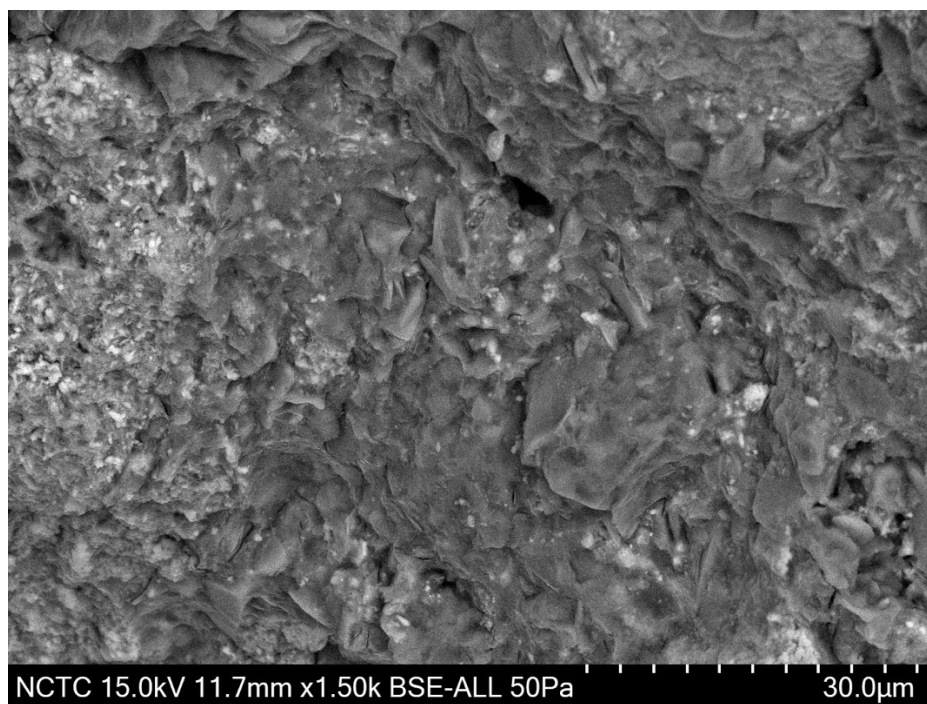
รูปที่ ผก.12 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก



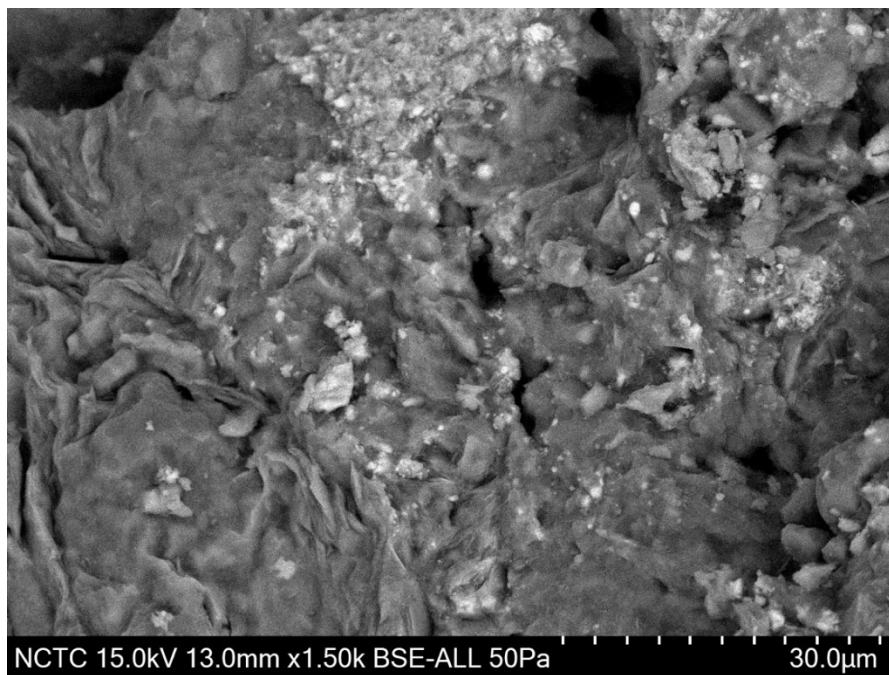
รูปที่ ผก.13 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 10%



รูปที่ ผก.14 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 20%



รูปที่ ผก.15 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ดินด้วยตะกอนเหล็ก 30%



รูปที่ ผก.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่คาร์บอนแบล็ก 40%



รูปที่ ผก.17 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค SEM ของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่คาร์บอนแบล็ก 50%

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณสูตรผสมในการทดลอง

ตารางที่ ผ.ข.1 สูตรผสมวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากดินเหนียวนครศรีธรรมราชผสมกากตะกอนเหล็กขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด (ปริมาณของสารเทียบกับดิน 100 ส่วนโดยมวล)

สูตร	ปริมาณของสารเทียบกับดินเหนียว 100 ส่วน โดยมวล		
	ดินเหนียว	สารละลาย ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$)	กากตะกอนเหล็ก
1	100	45	0
2	100	45	10
3	100	45	20
4	100	45	30
5	100	45	40
6	100	45	50

เมื่อมวลของขึ้นตัวอย่างขึ้นละ 50 g คำนวณปริมาณสารแต่ละอย่างเทียบกับดินเหนียวเผา 100 ส่วนได้ดังนี้

สูตรที่ 1 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และกากตะกอนเหล็ก 0 รวมทั้งหมด 145 คำนวณหา Multiplying Factor (M.F) หรือตัวคูณของแต่ละสูตร

จาก Multiplying Factor (M.F)

$$\text{M.F} = \text{มวลของขึ้นตัวอย่างแต่ละชิ้น} / \text{ปริมาณของสารเทียบกับดินเหนียว 100 ส่วน โดยมวล}$$

$$\text{ดังนั้น Multiplying Factor (M.F)} = 50/145 = 0.345$$

สูตรที่ 2 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และ กากตะกอนเหล็ก 10 รวมทั้งหมด 155 Multiplying Factor (M.F) = $50/155 = 0.322$

สูตรที่ 3 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และ กากตะกอนเหล็ก 20 รวมทั้งหมด 165

$$\text{Multiplying Factor (M.F)} = 50/165 = 0.303$$

สูตรที่ 4 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และ กากตะกอนเหล็ก 30 รวมทั้งหมด 175

$$\text{Multiplying Factor (M.F)} = 50/175 = 0.286$$

สูตรที่ 5 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และ กากตะกอนเหล็ก 40 รวมทั้งหมด 185

$$\text{Multiplying Factor (M.F)} = 50/185 = 0.270$$

สูตรที่ 6 ปริมาณสารดินเหนียวเผา 100 สารละลาย 45 และ กากตะกอนเหล็ก 50 รวมทั้งหมด 195

$$\text{Multiplying Factor (M.F)} = 50/195 = 0.256$$

คำนวณให้อยู่ในหน่วย g ได้โดยการ นำปริมาณสารคูณกับตัวคูณ (M.F.)
จะได้ค่าดังตารางผข.2

ตารางที่ ผข.ปริมาณมวลสารใช้ผสมวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์เหนียวนครศรีธรรมราชผสม

กากตะกอนเหล็กขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ในหน่วย g (g)

สูตร	ปริมาณของสาร (g)		
	ดินเหนียว	สารละลาย ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$)	กากตะกอนเหล็ก
1	34.5	15.5	0
2	32.2	14.5	3.2
3	30.3	13.6	6.1
4	28.6	12.8	8.6
5	27.0	12.2	10.8
6	25.6	11.5	12.8

ภาคผนวก ค

มาตรฐาน ASTM C 192



Designation: C 192/C 192M – 06

Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory¹

This standard is issued under the fixed designation C 192/C 192M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This practice covers procedures for making and curing test specimens of concrete in the laboratory under accurate control of materials and test conditions using concrete that can be consolidated by rodding or vibration as described herein.

1.2 The values stated in either inch-pound units or SI units shall be regarded separately as standard. The SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of each other. Combining values from the two systems may result in nonconformance.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to exposed skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C 70 Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate
- C 125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
- C 127 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- C 128 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate
- C 138/C 138M Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete

- C 143/C 143M Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
 - C 172 Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
 - C 173/C 173M Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
 - C 231 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
 - C 330 Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete
 - C 403/C 403M Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance
 - C 470/C 470M Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically
 - C 494/C 494M Specification for Chemical Admixtures for Concrete
 - C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes
 - C 566 Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
 - C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
 - C 1064/C 1064M Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete
 - C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation
- 2.2 *American Concrete Institute Publications:*⁴
- 211.3 Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete
 - 309 Guide for Concrete Consolidation

3. Significance and Use

3.1 This practice provides standardized requirements for preparation of materials, mixing concrete, and making and curing concrete test specimens under laboratory conditions.

3.2 If specimen preparation is controlled as stipulated herein, the specimens may be used to develop information for the following purposes:

⁴ Available from American Concrete Institute (ACI), P.O. Box 9094, Farmington Hills, MI 48333.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing for Strength.

Current edition approved June 1, 2006. Published June 2006. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 2005 as C 192/C 192M – 05.

² See section on Safety Precautions, *Manual of Aggregate and Concrete Testing, Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.



- 3.2.1 Mixture proportioning for project concrete,
- 3.2.2 Evaluation of different mixtures and materials,
- 3.2.3 Correlation with nondestructive tests, and
- 3.2.4 Providing specimens for research purposes.

NOTE 1—The concrete test results for concrete specimens made and cured using this practice are widely used. They may be the basis for acceptance testing for project concrete, research evaluations, and other studies. Careful and knowledgeable handling of materials, mixing concrete, molding test specimens, and curing test specimens is necessary. Many laboratories performing this important work are independently inspected or accredited. Practice C 1077 identifies and defines duties, responsibilities, including minimum responsibilities of the laboratory personnel and minimum technical requirements for laboratory equipment used. Many laboratories ensure qualified technicians by participating in national certification programs such as the American Concrete Institute Laboratory Technician Program or an equivalent program.

4. Apparatus

4.1 *Molds, General*—Molds for specimens or fastenings thereto in contact with the concrete shall be made of steel, cast iron, or other nonabsorbent material, nonreactive with concrete containing portland or other hydraulic cements. Molds shall conform to the dimensions and tolerances specified in the method for which the specimens are required. Molds shall hold their dimensions and shape under all conditions of use. Watertightness of molds during use shall be judged by their ability to hold water poured into them. Test procedures for watertightness are given in the section on Test Methods for Elongation, Absorption, and Watertightness of Specification C 470/C 470M. A suitable sealant, such as heavy grease, modeling clay, or microcrystalline wax, shall be used where necessary to prevent leakage through the joints. Positive means shall be provided to hold base plates firmly to the molds. Reusable molds shall be lightly coated with mineral oil or a suitable nonreactive release material before use.

4.2 *Cylinder Molds:*

4.2.1 *Molds for Casting Specimens Vertically* shall conform to the requirements of 4.1 and Specification C 470/C 470M.

4.2.2 *Horizontal Molds for Creep Test Cylinders* shall conform to the requirements of 4.1 and to the requirements for symmetry and dimensional tolerance in the section on General Requirements except for verticality requirements of Specification C 470/C 470M. The use of horizontal molds is intended only for creep specimens that contain axially embedded strain gages. Molds for creep cylinders to be filled while supported in a horizontal position shall have a filling slot parallel to the axis of the mold which extends the full length to receive the concrete. The width of the slot shall be one half the diameter of the specimen. If necessary the edges of the slot shall be reinforced to maintain dimensional stability. Unless specimens are to be capped or ground to produce plane ends, the molds shall be provided with two machined metal end plates at least 1 in. [25 mm] thick and the working surfaces shall comply with the requirements for planeness and surface roughness given in the section on Capping Plates of Practice C 617. Provision shall be made for fixing both end plates firmly to the mold. The inside surface of each end plate shall be provided with at least three lugs or studs approximately 1 in. [25 mm] long, firmly fastened to the plate for embedment in the concrete. One base plate shall be drilled from the inside at an angle to permit the

lead wire from the strain gage to exit the specimen through the edge of the plate. Provision shall be made for accurately positioning the strain gage. All necessary holes shall be as small as possible to minimize disturbance to subsequent strain measurements and shall be sealed to prevent leakage.

4.3 *Beam and Prism Molds* shall be rectangular in shape (unless otherwise specified) and of the dimensions required to produce the desired specimen size. The inside surfaces of the molds shall be smooth and free from indentations. The sides, bottom, and ends shall be at right angles to each other and shall be straight and true and free of warpage. Maximum variation from the nominal cross section shall not exceed $\frac{1}{8}$ in. [3 mm] for molds with depth or breadth of 6 in. [150 mm] or more, or $\frac{1}{16}$ in. [2 mm] for molds of smaller depth or breadth. Except for flexure specimens, molds shall not vary from the nominal length by more than $\frac{1}{16}$ in. [2 mm]. Flexure molds shall not be shorter than $\frac{1}{16}$ in. [2 mm] of the required length, but may exceed it by more than that amount.

4.4 *Tamping Rods*—Two sizes are specified in ASTM methods. Each shall be a round, straight steel rod with at least the tamping end rounded to a hemispherical tip of the same diameter as the rod. Both ends may be rounded, if preferred.

4.4.1 *Larger Rod*, $\frac{5}{8}$ in. [16 mm] in diameter and approximately 24 in. [600 mm] long.

4.4.2 *Smaller Rod*, $\frac{3}{8}$ in. [10 mm] in diameter and approximately 12 in. [300 mm] long.

4.5 *Mallets*—A mallet with a rubber or rawhide head weighing 1.25 ± 0.50 lb [0.6 ± 0.20 kg] shall be used.

4.6 *Vibrators:*

4.6.1 *Internal Vibrators*—The vibrator frequency shall be at least 7000 vibrations per minute [115 Hz] while the vibrator is operating in the concrete. The diameter of a round vibrator shall be no more than one fourth the diameter of the cylinder mold or one fourth the width of the beam or prism mold. Other shaped vibrators shall have a perimeter equivalent to the circumference of an appropriate round vibrator. The combined length of the vibrator shaft and vibrating element shall exceed the depth of the section being vibrated by at least 3 in. [75 mm].

NOTE 2—For information on size and frequency of various vibrators and method to periodically check vibrator frequency, see ACI 309.

4.6.2 *External Vibrators*—The two types of external vibrators permitted are either table or plank. The external vibrator frequency shall be 3600 vibrations per minute [60 Hz] or higher.

4.6.3 Provisions shall be made for clamping the mold securely to the apparatus for both types of vibrators.

NOTE 3—Vibratory impulses are frequently imparted to a table or plank vibrator through electromagnetic means, or by use of an eccentric weight on the shaft of an electric motor or on a separate shaft driven by a motor.

4.7 *Small Tools*—Tools and items such as shovels, pails, trowels, wood float, blunted trowels, straightedge, feeler gage, scoops, rulers, rubber gloves, and metal mixing bowls shall be provided.

4.8 *Slump Apparatus*—The apparatus for measurement of slump shall conform to the requirements of Test Method C 143/C 143M.


C 192/C 192M – 06

4.9 *Sampling and Mixing Pan*—The pan shall be flat-bottom and of heavy-gage metal, watertight, of convenient depth, and of sufficient capacity to allow easy mixing by shovel or trowel of the entire batch; or, if mixing is by machine, to receive the entire batch on discharge of the mixer and allow remixing in the pan by trowel or shovel.

4.10 *Wet-Sieving Equipment*—If wet-sieving is required, the equipment shall conform to the requirements of Practice C 172.

4.11 *Air Content Apparatus*—The apparatus for measuring air content shall conform to the requirements of either Test Methods C 231 or C 173.

4.12 *Scales*—Scales for determining the mass of batches of materials and concrete shall be accurate within 0.3 % of the test load at any point within the range of use.

NOTE 4—In general the mass of small quantities should not be determined on large capacity scales. In many applications the smallest mass determined on a scale should be greater than about 10 % of the maximum capacity of the scale; however, this will vary with the performance characteristics of the scale and the required accuracy of the determination. Acceptable scales used for determining the mass for concrete materials preferably should determine mass accurately to about 0.1 % of total capacity and the foregoing precaution is applicable. However, certain analytical and precision balances are exceptions to this rule and should weigh accurately to 0.001 %. Particular care must be exercised in measuring small quantities of material by determining the difference between two much larger masses.

4.13 *Temperature Measuring Device*—The temperature measuring device shall conform to the requirements of Test Method C 1064.

4.14 *Concrete Mixer*—A power-driven concrete mixer shall be a revolving drum, tilting mixer, or suitable revolving pan or revolving-paddle mixer capable of thoroughly mixing batches of the prescribed sizes at the required slump.

NOTE 5—A pan mixer is usually more suitable for mixing concrete with less than 1-in. [25 mm] slump than a revolving drum mixer. The rate of rotation, degree of tilt, and rated capacity of tilting mixers are not always suitable for laboratory mixed concrete. It may be found desirable to reduce the rate of rotation, decrease the angle of tilt from the horizontal, and use the mixer at somewhat less than the manufacturer's rated capacity.

5. Specimens

5.1 *Cylindrical Specimens*—Cylinder dimensions shall be as stipulated in the specification, test method or practice for the laboratory studies being performed and shall meet the requirements of 5.4. If dimensions are not stipulated in a specification, test method, or practice, the specimen selected shall have a length that is twice the diameter and meet the requirements of 5.4.

NOTE 6—The same cylinder size should be used for the reference (control) concrete mixture and test concrete mixtures when conducting comparative studies such as those required in Specification C 494/C 494M. For mixture proportioning of project concrete, it is preferable for the cylinder size in the laboratory to be the same as that specified for acceptance testing.

NOTE 7—When molds in SI units are required and not available, equivalent inch-pound unit size mold should be permitted.

5.1.1 Cylindrical specimens for tests other than creep shall be molded and allowed to harden with the axis of the cylinder vertical.

5.1.2 Cylindrical creep specimens may be cast with the cylindrical axis either vertical or horizontal and allowed to harden in the position in which cast.

5.2 *Prismatic Specimens*—Beams for flexural strength, prisms for freezing and thawing, bond, length change, volume change, etc., shall be formed with their long axes horizontal, unless otherwise required by the method of test in question, and shall conform in dimension to the requirements of the specific test method.

5.3 *Other Specimens*—Other shapes and sizes of specimens for particular tests may be molded as desired following the general procedures set forth in this practice.

5.4 *Specimen Size versus Aggregate Size*—The diameter of a cylindrical specimen or minimum cross-sectional dimension of a rectangular section shall be at least three times the nominal maximum size of the coarse aggregate in the concrete as defined in Terminology C 125. Occasional over-size aggregate particles (of a size not normally found in the average aggregate grading) shall be removed by hand picking during the molding of the specimens. When the concrete contains aggregate larger than that appropriate for the size of the molds or equipment to be used, wet-sieve the sample as described in Practice C 172.

5.5 *Number of Specimens*—The number of specimens and the number of test batches are dependent on established practice and the nature of the test program. Guidance is usually given in the test method or specification for which the specimens are made. Usually three or more specimens are molded for each test age and test condition unless otherwise specified (Note 8). Specimens involving a given variable should be made from three separate batches mixed on different days. An equal number of specimens for each variable should be made on any given day. When it is impossible to make at least one specimen for each variable on a given day, the mixing of the entire series of specimens should be completed in as few days as possible, and one of the mixtures should be repeated each day as a standard of comparison.

NOTE 8—Test ages often used are 7 and 28 days for compressive strength tests, or 14 and 28 days for flexural strength tests. Specimens containing Type III cement are often tested at 1, 3, 7, and 28 days. For later test ages, 3 months, 6 months, and 1 year are often used for both compressive and flexural strength tests. Other test ages may be required for other types of specimens.

6. Preparation of Materials

6.1 *Temperature*—Before mixing the concrete, bring the concrete materials to room temperature in the range from 68 to 86 °F [20 to 30 °C], except when the temperature of the concrete is stipulated. When a concrete temperature is stipulated, the method proposed to obtain the concrete temperature needs approval of the stipulator.

6.2 *Cement*—Store the cement in a dry place, in moisture-proof containers, preferably made of metal. The cement shall be thoroughly mixed to provide a uniform supply throughout the tests. It shall be passed through a 850- μm [No. 20] or finer sieve to remove all lumps, remixed on a plastic sheet, and returned to sample containers.


C 192/C 192M – 06

6.3 *Aggregates*—In order to preclude segregation of a coarse aggregate, separate into individual size fractions and for each batch recombine in the proper proportions to produce the desired grading.

NOTE 9—Only rarely is a coarse aggregate batched as a single size fraction. The number of size fractions will generally be between 2 and 5 for aggregate smaller than 2½ in. [60 mm]. When a size fraction to be batched is present in amounts in excess of 10 %, the ratio of the opening of the larger to the smaller sieve should not exceed 2.0. More closely sized groups are sometimes advisable.

6.3.1 Unless fine aggregate is separated into individual size fractions, maintain it in a damp condition or restore to a damp condition until use, to prevent segregation, unless material uniformly graded is subdivided into batch size lots using a sample splitter with proper size openings. If unusual gradings are being studied, the fine aggregate may need to be dried and separated into individual sizes. In this instance, if the total quantity of fine aggregate required is larger than can be efficiently blended in a single unit, then the individual size fractions should be determined in a mass required for each individual batch. When the total quantity of fine aggregate needed for the complete investigation is such that it can be thoroughly mixed, blended, and maintained in a damp condition, then it should be handled in that manner. Determine the specific gravity and absorption of aggregates in accordance with either Test Methods C 127 or C 128.

6.3.2 Before incorporating in concrete, prepare the aggregate to ensure a definite and uniform condition of moisture. Determine the weight of aggregate to be used in the batch by one of the following procedures:

6.3.2.1 Determine the mass of low-absorption aggregates (absorption less than 1.0 %) in the room-dry condition with allowance made for the amount of water that will be absorbed from the unset concrete (Note 10). This procedure is particularly useful for coarse aggregate which must be batched as individual sizes; because of the danger of segregation it can be used for fine aggregate only when the fine aggregate is separated into individual size fractions.

NOTE 10—When using aggregates with low absorption in room-dry condition the amount of water that will be absorbed by the aggregates before the concrete sets may be assumed to be 80 % of the difference between the 24-h absorption of the aggregates determined by Test Methods C 127 or C 128, and the amount of water in the pores of the aggregates in their room-dry state, as determined by Test Method C 566.

6.3.2.2 Individual size fractions of aggregate may be weighed separately, recombined into a tared container in the amounts required for the batch, and immersed in water for 24 h prior to use. After immersion the excess water is decanted and the combined weight of aggregate and mixing water determined. Allowance shall be made for the amount of water absorbed by the aggregate. The moisture content of the aggregates may be determined in accordance with Test Methods C 70 and C 566.

6.3.2.3 The aggregate may be brought to and maintained in a saturated condition, with surface moisture contained in sufficiently small amounts to preclude loss by draining, at least 24 h prior to use. When this method is used, the moisture content of the aggregate must be determined to permit calcu-

lation of proper quantities of the damp aggregate. The quantity of surface moisture present must be counted as a part of the required amount of mixing water. Surface moisture in fine aggregate may be determined in accordance with Test Methods C 70 and C 566, making due allowance for the amount of water absorbed. The method outlined here (moisture content slightly exceeding absorption) is particularly useful for fine aggregate. It is used less frequently for coarse aggregate because of the difficulty of accurately determining the moisture content, but if used, each size fraction must be handled separately to ensure that the proper grading is obtained.

6.3.2.4 Aggregates, fine or coarse, may be brought to and maintained in a saturated surface-dry condition until batched for use. This method is used primarily to prepare material for batches not exceeding ¼ ft³ [0.007 m³] in volume. Care must be taken to prevent drying during weighing and use.

6.4 *Lightweight Aggregates*—The procedures for specific gravity, absorption, and preparation of aggregates mentioned in this practice pertain to materials with normal absorption values. Lightweight aggregates, air-cooled slag, and certain highly porous or vesicular natural aggregate may be so absorptive as to be difficult to treat as described. The moisture content of lightweight aggregate at the time of mixing may have important effects on properties of freshly mixed and hardened concretes such as slump loss, compressive strength, and resistance to freezing and thawing.

6.5 *Admixtures*—Powdered admixtures that are entirely or largely insoluble, that do not contain hygroscopic salts and are to be added in small quantities, should be mixed with a portion of the cement before introduction into the batch in the mixer so as to ensure thorough distribution throughout the concrete. Essentially insoluble materials which are used in amounts exceeding 10 % by mass of cement, such as pozzolans, should be handled and added to the batch in the same manner as cement. Powdered admixtures which are largely insoluble but contain hygroscopic salts may cause balling of cement and should be mixed with the sand. Water-soluble and liquid admixtures should be added to the mixer in solution in the mixing water. The quantity of such solution used shall be included in the calculation of the water content of the concrete. Admixtures, incompatible in concentrated form, such as solutions of calcium chloride and certain air-entraining and set-retarding admixtures, should not be intermixed prior to their addition to concrete. The time, sequence, and method of adding some admixtures to a batch of concrete can have important effects on concrete properties such as time of set and air content. The method selected must remain unchanged from batch to batch.

NOTE 11—The mixing apparatus and accessories shall be thoroughly cleaned to ensure that chemical additions or admixtures used in dissimilar batches of concrete do not affect subsequent batches.

7. Procedure

7.1 *Mixing Concrete:*

7.1.1 *General*—Mix concrete in a suitable mixer or by hand in batches of such size as to leave about 10 % excess after molding the test specimens. Hand-mixing procedures are not applicable to air-entrained concrete or concrete with no measurable slump. Hand mixing should be limited to batches of ¼


C 192/C 192M – 06

ft³ [0.007 m³] volume or less. Mixing procedures are given in 7.1.2 and 7.1.3. However, other procedures may be used when it is desired to simulate special conditions or practices, or when the procedures specified are impracticable. A machine-mixing procedure suitable for drum-type mixers is described. It is important not to vary the mixing sequence and procedure from batch to batch unless the effect of such variation is under study.

7.1.2 Machine Mixing—Prior to starting rotation of the mixer add the coarse aggregate, some of the mixing water, and the solution of admixture, when required, in accordance with 6.5. When feasible, disperse the admixture in the mixing water before addition. Start the mixer, then add the fine aggregate, cement, and water with the mixer running. If it is impractical for a particular mixer or for a particular test to add the fine aggregate, cement, and water while the mixer is running, these components may be added to the stopped mixer after permitting it to turn a few revolutions following charging with coarse aggregate and some of the water (Note 12). Mix the concrete, after all ingredients are in the mixer, for 3 min followed by a 3-min rest, followed by a 2-min final mixing. Cover the open end or top of the mixer to prevent evaporation during the rest period. Take precautions to compensate for mortar retained by the mixer so that the discharged batch, as used, will be correctly proportioned (Note 13). To eliminate segregation, deposit machine-mixed concrete in the clean, damp mixing pan and remix by shovel or trowel until it appears to be uniform.

NOTE 12—An experienced operator may add water incrementally during mixing to adjust to the desired slump.

NOTE 13—It is difficult to recover all of the mortar from mixers. To compensate for this difficulty one of the following procedures may be used to ensure the correct final proportions in the batch:

(1) *“Buttering” the Mixer*—Just prior to mixing the test batch, the mixer is “battered” by mixing a batch proportioned to simulate closely the test batch. The mortar adhering to the mixer after discharging is intended to compensate for loss of mortar from the test batch.

(2) *“Over-Mortaring” the Mix*—The test mix is proportioned by the use of an excess mortar, the amount established in advance, to compensate for that which, on the average, adheres to the mixer. In this case the mixer is cleaned before mixing the test batch.

7.1.3 Hand Mixing—Mix the batch in a watertight, clean (Note 11), damp, metal pan or bowl, with a bricklayer’s blunted trowel, using the following procedure when aggregates have been prepared in accordance with 6.3.2.1, 6.3.2.3, and 6.3.2.4.

7.1.3.1 Mix the cement, powdered insoluble admixture, if used, and fine aggregate without addition of water until they are thoroughly blended.

7.1.3.2 Add the coarse aggregate and mix the entire batch without addition of water until the coarse aggregate is uniformly distributed throughout the batch.

7.1.3.3 Add water, and the admixture solution if used, and mix the mass until the concrete is homogeneous in appearance and has the desired consistency. If prolonged mixing is necessary because of the addition of water in increments while adjusting the consistency, discard the batch and make a new batch in which the mixing is not interrupted to make trial consistency tests.

7.1.4 Mixed Concrete—Select the portions of the batch of mixed concrete to be used in tests for molding specimens so as

to be representative of the actual proportions and condition of the concrete. When the concrete is not being remixed or sampled cover it to prevent evaporation.

7.2 Slump, Air Content, Yield, and Temperature:

7.2.1 Slump—Measure the slump of each batch of concrete immediately after mixing in accordance with Test Method C 143/C 143M.

NOTE 14—The slump test is unsuitable for concrete so dry that it slumps less than ¼ in. [6 mm]. No-slump concrete may be tested by one of several means described in ACI 211.3.

7.2.2 Air Content—Determine the air content, when required, in accordance with either Test Methods C 173 or C 231. Test Method C 231 should not be used with concretes made with lightweight aggregates, air-cooled blast-furnace slag, or aggregates of high porosity. Discard the concrete used for the determination of air content.

7.2.3 Yield—Determine the yield of each batch of concrete, if required, in accordance with Test Method C 138. Concrete used for slump and yield tests may be returned to the mixing pan and remixed into the batch.

7.2.4 Temperature—Determine the temperature of each batch of concrete in accordance with Test Method C 1064.

7.3 Making Specimens:

7.3.1 Place of Molding—Mold specimens as near as practicable to the place where they are to be stored during the first 24 h. If it is not practicable to mold the specimens where they will be stored, move them to the place of storage immediately after being struck off. Place molds on a rigid surface free from vibration and other disturbances. Avoid jarring, striking, tilting, or scarring of the surface of the specimens when moving the specimens to the storage place.

7.3.2 Placing—Place the concrete in the molds using a scoop, blunted trowel, or shovel. Select each scoopful, trowelful, or shovelful of concrete from the mixing pan to ensure that it is representative of the batch. It may be necessary to remix the concrete in the mixing pan with a shovel or trowel to prevent segregation during the molding of specimens. Move the scoop or trowel around the top edge of the mold as the concrete is discharged in order to ensure a symmetrical distribution of the concrete and to minimize segregation of coarse aggregate within the mold. Further distribute the concrete by use of a tamping rod prior to the start of consolidation. In placing the final layer the operator shall attempt to add an amount of concrete that will exactly fill the mold after compaction. Do not add nonrepresentative samples of concrete to an underfilled mold.

7.3.2.1 Number of Layers—Make specimens in layers as indicated in Table 1.

7.4 Consolidation:

7.4.1 Methods of Consolidation—Preparation of satisfactory specimens requires different methods of consolidation. The methods of consolidation are rodding, and internal or external vibration. Base the selection of the method on the slump, unless the method is stated in the specifications under which the work is being performed. Rod or vibrate concrete with slump greater than or equal to 1 in. [25 mm]. Vibrate concrete with slump less than 1 in. (Note 15). Do not use



TABLE 1 Number of Layers Required for Specimens

Specimen Type and Size	Mode of Consolidation	Numbers of Layers of Approximate Equal Depth
Cylinders:		
Diameter, in. [mm]		
3 or 4 [75 to 100]	rodding	2
6 [150]	rodding	3
9 [225]	rodding	4
up to 9 [225]	vibration	2
Prisms and horizontal creep		
Cylinders:		
Depth, in. [mm]		
up to 8 [200]	rodding	2
over 8 [200]	rodding	3 or more
up to 8 [200]	vibration	1
over 8 [200]	vibration	2 or more

internal vibration for cylinders with a diameter less than 4 in. [100 mm], and for beams or prisms with breadth or depth less than 4 in.

NOTE 15—Concrete of such low water content that it cannot be properly consolidated by the methods described herein is not covered by this practice. Provisions for specimens and methods of testing will be found in the standards concerned. There are concretes that can be consolidated by external vibration, but additional forces on the surface are required to embed the coarse aggregate thoroughly and consolidate the mixture. For such mixtures the following procedures may be followed: using external vibration fill 6 by 12-in. [150 by 300-mm] cylinder molds in 3 in. [75 mm] lifts using a 10-lb [4.5-kg] cylindrical surcharge, or 3 by 6-in. [75 by 150-mm] cylinder molds in 2 in. [50 mm] lifts using a 2.5-lb [1-kg] cylindrical surcharge. The surcharge should have a diameter $\frac{1}{4}$ in. [6 mm] less than the inside of the mold. Simultaneously each lift should be compacted by external vibration with the surcharge on the top surface of the concrete, until the mortar begins to ooze around the bottom of the surcharge.

7.4.2 *Rodding*—Place the concrete in the mold, in the required number of layers of approximately equal volume. Rod each layer with the rounded end of the rod using the number of strokes and size of rod specified in Table 2. Rod the bottom layer throughout its depth. Distribute the strokes uniformly over the cross section of the mold and for each upper layer allow the rod to penetrate through the layer being rodded and into the layer below approximately 1 in. [25 mm]. After each layer is rodded, tap the outsides of the mold lightly 10 to 15 times with the mallet to close any holes left by rodding and to release any large air bubbles that may have been trapped. Use

an open hand to tap light-gage single-use molds which are susceptible to damage if tapped with a mallet. After tapping, spade the concrete along the sides and ends of beam and prism molds with a trowel or other suitable tool.

7.4.3 *Vibration*—Maintain a uniform duration of vibration for the particular kind of concrete, vibrator, and specimen mold involved. The duration of vibration required will depend upon the workability of the concrete and the effectiveness of the vibrator. Usually sufficient vibration has been applied as soon as the surface of the concrete becomes relatively smooth and large air bubbles cease to break through the top surface. Continue vibration only long enough to achieve proper consolidation of the concrete (see Note 16). Overvibration may cause segregation. Fill the molds and vibrate in the required number of approximately equal layers (Table 2). Place all the concrete for each layer in the mold before starting vibration of that layer. When placing the final layer, avoid overfilling by more than $\frac{1}{4}$ in. [6 mm]. When the finish is applied after vibration, add only enough concrete with a trowel to overfill the mold about $\frac{1}{8}$ in. [3 mm], work it into the surface and then strike it off.

NOTE 16—Generally, no more than 5 s of vibration should be required for each insertion to adequately consolidate the concrete with a slump greater than 3 in. [75 mm]. Longer times may be required for lower slump concrete, but the vibration time should rarely have to exceed 10 s per insertion.

7.4.3.1 *Internal Vibration*—In compacting the specimen insert the vibrator slowly and do not allow the vibrator to rest on or touch the bottom or sides of the mold or strike embedded items such as strain meters. Slowly withdraw the vibrator so that no large air pockets are left in the specimen.

7.4.3.2 *Cylinders*—The number of insertions of the vibrator is given in Table 3. When more than one insertion per layer is required, distribute the insertions uniformly within each layer. Allow the vibrator to penetrate into the layer below approximately 1 in. [25 mm]. After each layer is vibrated, tap the outside of the mold at least 10 times with the mallet to close the holes that remain and to release entrapped air voids. Use an open hand to tap cardboard or single-use metal molds that are susceptible to damage if tapped with a mallet.

7.4.3.3 *Beams, Prisms, and Horizontal Creep Cylinders*—Insert the vibrator at intervals not exceeding 6 in. [150 mm] along the center line of the long dimension of the specimen, or along both sides but not in contact with the strain gage in the

TABLE 2 Diameter of Rod and Number of Roddings to be Used in Molding Test Specimens

Cylinders		
Diameter of Cylinder, in. [mm]	Diameter of Rod in. [mm]	Number of Strokes/Layer
2 [50] to <6 [150]	$\frac{3}{8}$ [10]	25
6 [150]	$\frac{5}{8}$ [16]	25
8 [200]	$\frac{5}{8}$ [16]	50
10 [250]	$\frac{5}{8}$ [16]	75
Beams and Prisms		
Top Surface Area of Specimen, in. ² [cm ²]	Diameter of Rod in. (mm)	Number of Roddings/Layer
25 [160] or less	$\frac{3}{8}$ [10]	25
26 to 49 [165 to 310]	$\frac{3}{8}$ [10]	one for each 1 in. ² [7 cm ²] of surface
50 [320] or more	$\frac{5}{8}$ [16]	one for each 2 in. ² [14 cm ²] of surface
Horizontal Creep Cylinders		
Diameter of Cylinder in. [mm]	Diameter of Rod in. [mm]	Number of Roddings/Layer
6 [150]	$\frac{5}{8}$ [16]	50 total, 25 along both sides of axis


C 192/C 192M – 06
TABLE 3 Number of Vibrator Insertions per Layer

Specimen Type and Size	Number of Insertions per Layer
Cylinder: Diameter, in. [mm]	
4 in. [200 mm]	1
6 in. [150 mm]	2
9 in. [225 mm]	4

case of creep cylinders. For specimens wider than 6 in. [150 mm], use alternating insertions along two lines. Allow the shaft of the vibrator to penetrate into the bottom layer approximately 1 in. [25 mm]. After each layer is vibrated, tap the outsides of the mold sharply at least 10 times with the mallet to close holes left by vibrating and to release entrapped air voids.

7.4.4 External Vibration—When external vibration is used, take care to ensure that the mold is rigidly attached to or securely held against the vibrating element or vibrating surface (Note 15).

7.5 Finishing—After consolidation by any of the methods, strike off the surface of the concrete and float or trowel it in accordance with the method concerned. If no finish is specified, finish the surface with a wood or magnesium float. Perform all finishing with the minimum manipulation necessary to produce a flat even surface that is level with the rim or edge of the mold and which has no depressions or projections larger than $\frac{1}{8}$ in. [3 mm].

7.5.1 Cylinders—After consolidation finish the top surfaces by striking them off with the tamping rod where the consistency of the concrete permits, or with a wood float or trowel. If desired, cap the top surface of freshly made cylinders with a thin layer of stiff portland cement paste which is permitted to harden and cure with the specimen. See the section on Capping Materials of Practice C 617.

7.5.2 Horizontally Cast Creep Cylinders—After consolidation strike off the specimen with a trowel or float, then trowel the minimum amount required to form the concrete in the opening concentrically with the rest of the specimen. Use a screed curved to the radius of the specimen to more precisely shape and finish the concrete in the opening.

8. Curing

8.1 Initial Curing—To prevent evaporation of water from unhardened concrete, cover the specimens immediately after finishing, preferably with a nonabsorptive, nonreactive plate or a sheet of tough, durable impervious plastic. Specimens shall be stored immediately after finishing until the removal of the molds to prevent loss of moisture from the specimens. Select an appropriate procedure or combination of procedures that will prevent moisture loss and is nonabsorptive and nonreactive with the concrete. When wet burlap is used for covering, the burlap must not be in contact with the fresh concrete surface and care must be exercised to keep the burlap wet until the specimens are removed from the molds. Placing a sheet of plastic over the burlap will facilitate keeping it wet. To prevent damage to specimens, protect the outside of cardboard molds from contact with wet burlap or other sources of water until the molds are removed. Record the maximum and minimum ambient temperatures during the initial curing.

8.2 Removal from Molds—Remove the specimens from the molds 24 ± 8 h after casting. For concrete with prolonged

setting time, molds shall not be removed until 20 ± 4 h after final set. If needed, determine the setting times in accordance with Test Method C 403/C 403M.

8.3 Curing Environment—Unless otherwise specified all specimens shall be moist cured at 73.5 ± 3.5 °F [23.0 ± 2.0 °C] from the time of molding until the moment of test (Note 17). Storage during the first 48 h of curing shall be in a vibration-free environment. As applied to the treatment of demolded specimens, moist curing means that the test specimens shall have free water maintained on the entire surface area at all times. This condition is met by using water storage tanks or a moist room in accordance with the requirements of Specification C 511. Cure structural lightweight concrete cylinders in accordance with Specification C 330.

NOTE 17—The temperature within damp sand and under wet burlap or similar materials will always be lower than the temperature in the surrounding atmosphere if evaporation takes place.

8.4 Flexural Strength Test Specimens—Cure the flexural strength test specimens in accordance with 8.1 and 8.2 except that while in storage for a minimum period of 20 h immediately prior to testing they shall be immersed in water saturated with calcium hydroxide at 73 ± 3 °F [23 ± 2 °C]. At the end of the curing period, between the time the specimen is removed from curing until testing is completed, drying of the surfaces shall be prevented.

NOTE 18—Relatively small amounts of drying of the surface of flexural strength specimens will induce tensile stresses in the extreme fibers that will markedly reduce the indicated flexural strength.

9. Precision and Bias

9.1 Data to establish precision statements for various testing required by this standard were obtained in the Concrete Proficiency Sample Program of the Cement and Concrete Reference Laboratory.

9.2 The single-operator standard deviations for slump, unit weight, air content, and 7-day compressive strength of trial batches have been found to be 0.7 in., 0.9 lb/ft³, 0.3 %, and 203 psi, respectively; therefore the results of properly conducted tests on two trial batches made in the same laboratory should not differ by more than 2.0 in., 2.5 lb/ft³, 0.8 %, and 574 psi, respectively. This precision statement is considered applicable to laboratory trial batches proportioned to contain prescribed quantities of materials and to have a constant water-cement ratio. The values should be used with caution for air-entrained concrete, concrete with slump less than 2 in. [50 mm] or over 6 in. [150 mm], or concrete made with other than normal weight aggregate or aggregate larger than 1 in. [25 mm] nominal maximum size.

9.3 The multilaboratory standard deviations for slump, unit weight, air content, and 7-day compressive strength of trial batches have been found to be 1.0 in., 1.4 lb/ft³, 0.4 %, and 347 psi, respectively; therefore, the results of properly conducted tests on single trial batches made in two different laboratories should not differ by more than 2.8 in., 4.0 lb/ft³, 1.1 %, and 981 psi, respectively. This precision statement is considered applicable to laboratory trial batches proportioned to contain prescribed quantities of materials and to have a prescribed water-cement ratio. The values should be used with caution for


C 192/C 192M – 06

air-entrained concrete, concrete with slump less than 2 in. [50 mm] or over 6 in. [150 mm], or concrete made with other than normal weight aggregate or aggregate larger than 1 in. [25 mm] nominal maximum size.

9.4 *Bias*—The procedures for the test methods in 9.3 have no bias because the values obtained from each of those test methods are defined only in terms of the test method.

10. Keywords

10.1 concrete; cylinders; laboratory; prisms; strength testing

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this practice since the last issue, C 192/C 192M – 05, that may impact the use of this practice. (Approved June 1, 2006)

(J) Revised 1.3.

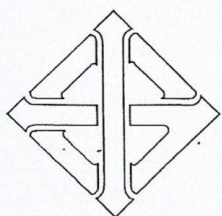
ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ภาคผนวก ง

มาตรฐาน มอก. 77 - 2545



มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 77-2545

อิฐก่อสร้างสามัญ

BUILDING BRICKS

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 91.100.20

ISBN 974-608-703-7

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
อิฐก่อสร้างสามัญ

มอก. 77-2545

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2202 3300

ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 120 ตอนที่ 83 ง
วันที่ 16 ตุลาคม พุทธศักราช 2546

คณะกรรมการวิชาการคณะที่ 122
มาตรฐานอีฐก่อสร้างสามัญ

ประธานกรรมการ	ผู้แทนสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
นายสุทธิศักดิ์ สำเร็จประสงค์	
กรรมการ	
นายวัลลภ สุวรรณสุนทร	ผู้แทนกรุงเทพมหานคร
นางวรรณภา ต.แสงจันทร์	ผู้แทนกรมวิทยาศาสตร์บริการ
นายบุญไชย สถิตมั่นในธรรม	ผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายบุรฉัตร ฉัตร์วีระ	ผู้แทนวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
นายนิติศักดิ์ ชอบดำรงธรรม	ผู้แทนสมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์
นายโสภณ วิชชุเกียรติไกร	ผู้แทนโรงงานเซ็งม่วยหลี
นางสุมาลี คหนุรักษ์	ผู้แทนโรงอิฐลาดตาล
กรรมการและเลขานุการ	
นายเสริมศักดิ์ ถาวรวิสุ	ผู้แทนสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ นี้ได้ประกาศใช้ครั้งแรก ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.77-2517 ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 91 ตอนที่ 62 วันที่ 10 เมษายน พุทธศักราช 2517 และแก้ไขครั้งที่ 1 ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.77-2531 ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 105 ตอนที่ 92 วันที่ 7 มิถุนายน พุทธศักราช 2531 ต่อมาได้พิจารณาเห็นเป็นการสมควรที่จะได้แก้ไขปรับปรุงให้เหมาะสมกับภาวะการณ์ในปัจจุบัน จึงได้แก้ไขปรับปรุงโดยยกเลิกมาตรฐานเดิมและกำหนดมาตรฐานนี้ขึ้นใหม่

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดขึ้นโดยใช้เอกสารต่อไปนี้เป็นแนวทาง

ASTM C 62-97a	Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale)
มอก.243-2520	วิธีชักตัวอย่างและทดสอบอิฐและอิฐกลวง
ภาคผนวก ก.	การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้ไว้เป็นเพียงข้อแนะนำ

คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้พิจารณามาตรฐานนี้แล้ว เห็นสมควรเสนอรัฐมนตรีประกาศตาม มาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511



ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม
ฉบับที่ 3160 (พ.ศ. 2546)
ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
พ.ศ. 2511
เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
อิฐก่อสร้างสามัญ

โดยที่เป็นการสมควรปรับปรุงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ มาตรฐานเลขที่ มอก.
77-2531

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511
รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศยกเลิกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 84 (พ.ศ.2517)
ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ ลงวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ.2517 และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1349
(พ.ศ.2531) เรื่อง แก้ไขมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ (แก้ไขครั้งที่ 1) ลงวันที่ 19
พฤษภาคม พ.ศ.2531 และออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ มาตรฐาน
เลขที่ มอก. 77-2545 ขึ้นใหม่ ดังมีรายการละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ให้มีผลเมื่อพ้นกำหนด 60 วัน นับแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2546

สมศักดิ์ เทพสุทิน

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม อิฐก่อสร้างสามัญ

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมเฉพาะอิฐที่ทำจากดิน มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น งานก่อผนังหรือกำแพง และต้องมีการฉาบปูน

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 2.1 อิฐก่อสร้างสามัญ หมายถึง อิฐที่ใช้ในงานโครงสร้างและไม่ใช้ในงานโครงสร้างโดยไม่มีวัตถุประสงค์จะเผชิญเนื้อหรือผิว อิฐทำจากดิน ดินดาน อาจมีส่วนผสมของวัสดุอื่น ต้องมีการเผาเพื่อให้เกิดความแข็งแรงและความทนทาน
- 2.2 ผิวร่อง หมายถึง ผิวหน้าของก้อนซึ่งทำเป็นร่องโดยแม่พิมพ์
- 2.3 ผิวรอยหวี หมายถึง ผิวหน้าของก้อนซึ่งทำเป็นรอยขีดหรือแนวคั่นข้างขนานกัน
- 2.4 ผิวหยาบ หมายถึง ผิวหน้าของก้อนมีลักษณะหยาบโดยแม่พิมพ์หรือโดยวิธีการ หรือโดยส่วนผสมของเนื้ออิฐ

3. ชั้นคุณภาพและสัญลักษณ์

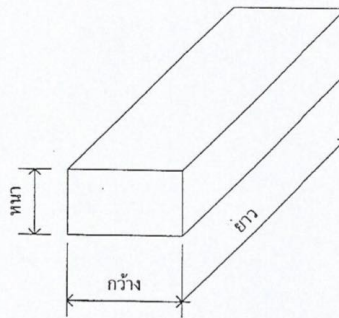
- 3.1 อิฐก่อสร้างสามัญแบ่งตามความต้านแรงอัด เป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ
- 3.1.1 ชั้นคุณภาพ ก ใช้สัญลักษณ์ ก
- 3.1.2 ชั้นคุณภาพ ข ใช้สัญลักษณ์ ข
- 3.1.3 ชั้นคุณภาพ ค ใช้สัญลักษณ์ ค

มอก. 77-2545

4. ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

- 4.1 ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญต้องเป็นไปตามตารางที่ 1 โดยแต่ละมิติจะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 2
การทดสอบให้ทำโดยการวัดด้วยเครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ
(ข้อ 4.1)



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ชั้นคุณภาพ	ขนาด (ยาว x กว้าง x หนา)
ก ข และ ค	140 x 65 x 40
	190 x 90 x 40
	190 x 90 x 65
	190 x 90 x 90

มอก. 77-2545

ตารางที่ 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมิติ
(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

มิติ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
40	± 2
65 ถึง 90	± 3
140 ถึง 190	± 5

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

5.1 ลักษณะทั่วไป

- 5.1.1 ต้องแข็งแรงปราศจากรอยร้าว หรือส่วนเสียอื่นใดที่เป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้างสามัญอย่างถูกต้อง หรือทำให้สิ่งก่อสร้างเสียกำลังหรือความคงทนถาวร
- 5.1.2 ต้องมีผิวร่อน ผิวรอยหิว หรือผิวหยาบ ในด้านที่มีการก่อหรือฉาบ
- 5.1.3 ต้องมีสี สลัดลย และ แบบ ไม่ผิดแผกไปจากตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทน
การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

5.2 ความต้านแรงอัด

ต้องเป็นไปตามตารางที่ 3

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก.243

5.3 การดูดกลืนน้ำ

ต้องเป็นไปตามตารางที่ 3

การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก.243

ตารางที่ 3 ความต้านแรงอัดและการดูดกลืนน้ำ
(ข้อ 5.2 และ 5.3)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัด ต่ำสุด MPa		การดูดกลืนน้ำ สูงสุด %	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
	ก	21.0	17.0	17.0
ข	17.0	15.0	22.0	25.0
ค	10.0	9.0	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

มอก. 77-2545

6. เครื่องหมายและฉลาก

- 6.1 ให้ทำเครื่องหมายและฉลากตามข้อ 6.1.1 หรือข้อ 6.1.2 ดังต่อไปนี้
- 6.1.1 ในกรณีที่ไม่มีการผูก/มัดอริฐเข้าเป็นหน่วยเดียวกัน ที่กองอริฐทุกกองอย่างน้อยต้องมีเอกสารกำกับแสดงเลขอักษรหรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน
- (1) ชั้นคุณภาพ
 - (2) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 6.1.2 ในกรณีที่มีการผูก/มัดอริฐเข้าด้วยกันเป็นหน่วยเดียวกัน และแต่ละหน่วยต้องขนย้ายได้ทั้งหน่วยโดยไม่แยกจากกัน ให้ทำเครื่องหมายและฉลากตามข้อ 6.1.2.1 และข้อ 6.1.2.2 ดังต่อไปนี้
- 6.1.2.1 ที่แถบวัสดุที่ใช้ผูก/มัดเข้าด้วยกัน อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมาย แจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน
- (1) ชั้นคุณภาพ
 - (2) ความยาว x ความกว้าง x ความหนา เป็นมิลลิเมตร x มิลลิเมตร x มิลลิเมตร
 - (3) จำนวน
 - (4) รหัสรุ่นที่ทำ
 - (5) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 6.1.2.2 ที่อริฐซึ่งอยู่ด้านข้างทุกด้าน อย่างน้อย 1 ก้อน จะต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน
- (1) ชั้นคุณภาพ
 - (2) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 6.2 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

มอก. 77-2545

ภาคผนวก ก.

การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- ก.1 รุ่น ในที่นี้หมายถึง อีรูก่อสร้างสามัญ ชั้นคุณภาพ และขนาดเดียวกันที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน
- ก.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้
- ก.2.1 การชักตัวอย่าง
ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 10 ก้อน จากทุก ๆ 250 000 ก้อน หรือเศษของ 250 000 ก้อน
- ก.2.2 เกณฑ์ตัดสิน
ตัวอย่างอีรูก่อสร้างสามัญต้องเป็นไปตามข้อ 4. และข้อ 5. จึงจะถือว่า อีรูก่อสร้างสามัญรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ในกรณีที่มีตัวอย่างใดไม่เป็นไปตามข้อ 4. ข้อ 5.1 ข้อ 5.2 ข้อ 5.3 รายการใดรายการหนึ่งให้ชักตัวอย่างจากรุ่นเดียวกันจำนวน 2 ชุดตัวอย่างมาทดสอบซ้ำในรายการนั้น ผลการทดสอบซ้ำ ตัวอย่างทั้ง 2 ชุดตัวอย่าง ต้องเป็นไปตามข้อ 4. ข้อ 5.1 ข้อ 5.2 ข้อ 5.3 แล้วแต่กรณี จึงจะถือว่าอีรูก่อสร้างสามัญ รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ภาคผนวก จ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา

Development of Geopolymer Composite from Iron Sludge as a Gamma Radiation Shielding Material

ชายหงส์ กิม¹ สมัญญา สงวนพรรค² พงทิพย์ แก้วทับทิม¹ สมชาย กอพูนพัฒน์¹

Chhayhong Kim¹, Samunya Sanguanpak², Pungtip Kaewtubtim¹, Somchai Kopoontip¹

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา และศึกษาอิทธิพลของกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรม มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการลดทอนรังสี โดยใช้วัตถุดิบหลัก คือ ดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช สารละลายต่างเข้มข้นที่มีส่วนผสม 2:1 ของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 M และใช้กากตะกอนเหล็กที่ปริมาณ 50 % โดยน้ำหนัก ทำการผสมและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด จากผลการทดลอง พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปค่ากำลังอัดค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น 25 % จากเดิมนอกจากนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นที่ระดับพลังงาน 1.330 MeV และ มีค่าเพิ่มตามปริมาณ กากตะกอนเหล็กที่เพิ่มลงไป หรือ 167 % ส่วนอัตราการส่งผ่านของรังสีมีค่าลดลงเมื่อความหนาของตัวอย่างหนาขึ้น จากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่ากากตะกอนเหล็กมีความสามารถป้องกันรังสีแกมมา และช่วยเสริมความแข็งแรงให้จีโอพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ กากตะกอนเหล็ก สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น รังสีแกมมา อัตราการส่งผ่านรังสี

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Science Faculty of Science and Technology Prince of Songkla University

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

National Metal and Materials Technology Center National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

Abstract

In this study, a geopolymer composite material from iron sludge was developed as a gamma-ray shielding material and to study the influence of iron sludge from industrial plants It has on physical properties and radiation attenuation. The main raw material was Nakhon Si Thammarat clay, a concentrated alkaline solution containing 2:1 of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solution at a concentration of 10 M. And iron sludge at 50 % by weight was mixed and formed by compression method. From the results of the experiment, it was found that the physical properties, density, water absorption, and strength of the composite geopolymer in compressive strength increased when iron sludge was added, its strength was increased by 25 %. Also, it was found that the linear gamma attenuation coefficient at 1330 MeV power level was increased with the added iron sludge amount or a 167% increase. The radiation transmission rate decreased when the sample thickness was thicker.

From this research It can be concluded that the iron sludge has the ability to block gamma rays and increase the strength of the geopolymer as well.

Keyword : geopolymer, iron sludge, linear attenuation coefficient, gamma-ray, transmission

E-mail : chhayhong2537@gmail.com

คำนำ

การป้องกันรังสีในแต่ละวันกลายเป็นหัวข้อที่มีความสำคัญมากขึ้นในการตรวจสอบทางวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ การป้องกันจากรังสีแกมมาที่มากกว่ารังสีอื่น รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง จัดเป็นรังสีก่อไอออนที่ ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม หากผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีได้รับรังสีในปริมาณมากเกินไป อาจส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพ และร่างกาย เนื่องจากโฟตอนของรังสีไม่มีมวลและประจุสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในสสารได้ (Akkurt, I., 2005) โดยการป้องกันรังสีขึ้นอยู่กับกลไกการลดทอนรังสี ซึ่งสามารถทำได้โดยกลไกสามข้อหลัก ได้แก่ เวลา ระยะทางและวัสดุกำบัง หมายถึงความเข้มของรังสีจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับอันตรายจากรังสีลดลงเมื่ออยู่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี และสุดท้ายการกำบังรังสีควรใช้วัสดุกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับงานทุกครั้ง เพื่อลดทอนปริมาณรังสีให้มากที่สุดก่อนถึงตัวผู้ปฏิบัติงาน (Akkurt, I., 2010) อย่างไรก็ตามในหลาย ๆ งานที่ต้องปฏิบัติงานกับต้นกำเนิดรังสีอาจจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาปฏิบัติงานที่ยาวนาน หรือจำเป็นต้องอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดรังสี เพื่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน ดังนั้นการกำบังรังสีจึงเป็นวิธีการสำคัญอย่างยิ่งในการป้องกันอันตรายจากรังสี ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์กำบังรังสีมักจะอยู่ในรูปของแผ่นกำบังรังสีที่ผลิตจากธาตุหนักหรือสารประกอบของธาตุหนัก เช่น ตะกั่ว แต่เนื่องจากตะกั่วมีราคาแพง และอาจส่งผล

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ และยังให้ความแข็งแรงไม่มากพอที่จะนำมาทำเป็นผนังอาคารได้ จึงได้มีการนำคอนกรีตมาทำเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาทดแทนการใช้ตะกั่ว แต่คอนกรีตมีวัตถุดิบหลักเป็นปูนซีเมนต์ในการสร้าง ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอย่างมาก ซึ่งทำให้อุณหภูมิบรรยากาศของโลกเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และสารกำมันตรังสี มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาวัสดุประสานชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความแข็งแรง และสามารถกำบังรังสีได้ มาแทนการใช้ปูนซีเมนต์และตะกั่ว นั่นคือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นทางเลือกสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมากหรืออาจไม่เกิดเลย โดยจีโอพอลิเมอร์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันของสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงและออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียมกลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ทำ จีโอพอลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ดินขาว ดินขาวเผาแคลไซต์ และวัสดุของเหลือจากพวกเตาจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย และเถ้ากลบ เป็นต้น นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสีแล้วยังสามารถนำวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาสร้างมูลค่าเพิ่ม และนำของเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ (ดวงฤดี, 2558)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวัสดุกำบังรังสีแกมมาจากจีโอพอลิเมอร์ ที่ประกอบด้วยดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช ผสมกับกากตะกอนเหล็ก บั๊จจัยที่เหล็กดินเหนียวจังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจากดินบริเวณนี้มีปริมาณแร่เคลอิไนต์ (Kaolinite) และควอตซ์ (Quartz) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในกากตะกอนมีความหนาแน่นสูงซึ่งมีสมบัติในการป้องกันรังสีที่ดี ทำให้จีโอพอลิเมอร์ธรรมดาสามารถกันรังสีได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ตึก อาคารด้านรังสี เช่น โรงไฟฟ้าพลังปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค และโรงพยาบาล ศูนย์ แทนปูนซีเมนต์ จึงเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในอนาคตสำหรับการแก้ปัญหาโลกร้อน พร้อมกับความสามารถป้องกันรังสีได้ด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

ในการศึกษาวัสดุหลักที่ใช้ในการทำจีโอพอลิเมอร์ คือดินเหนียวจากจังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นของแร่เป็นควอตซ์ (Quartz; SiO_2) เกาลินไนท์ (Kaolinite; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) และซิลิไซด์ สอดคล้องกับการศึกษาของอัครเดช และองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงใน Table 1 จากการวิเคราะห์ XRF พบว่าในดินประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 คือ 57.00, 25.43, และ 5.13 wt % ตามลำดับ และมวลรวมที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างในการศึกษานี้คือ กากตะกอนเหล็กที่อุดมด้วยธาตุเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแมกนีไทต์ (Magnetite) และองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องนำไปกำจัดจาก

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

บ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม แสดงใน Table 2 จากการศึกษาองค์ประกอบหลักพบว่าเป็นไปได้โดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุซีโอพอลิเมอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันและการลดทอนรังสีต่อไปได้ โดยเผาที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงพร้อมกับดินเหนียว ซีโอพอลิเมอร์ดินเหนียวเสริมด้วยกากตะกอนเหล็ก มีแอคคาไลน์อัลคาไลน์ของโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M (NaOH) ความเข้มข้นนี้ส่งผลให้กำลังอัดที่สูง ซึ่งนักวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษามาแล้ว (A. M. Mustata Al Bakri, H., 2012)

Table 1 XRF Analysis data of Nakhon Si Thammarat Clay composition

Component	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	ZrO ₂
Clay (%)	25.43	57.00	3.16	0.95	5.13	0.05	0.05

Table 2 XRF Analysis data of iron sludge composition

Component	Si	Fe	P	Ca	K	Cu	Zn
Iron sludge (%)	3.01	91.7	1.31	2.37	0.22	0.20	0.49

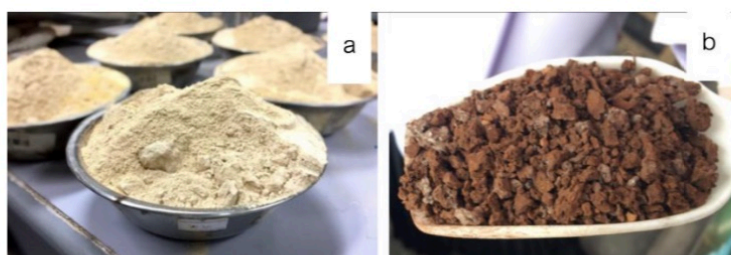


Figure 1 (a) Clay from Tha Sala District Nakhon Si Thammarat Province

(b) Iron sludge from the wastewater treatment pond of the factory

ส่วนผสมของสารละลายคือสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) คือ 2:1 โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 10 M และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

2.2 ออกแบบส่วนผสม และการผสมและขึ้นรูป

Table 3 Mixing and forming formulas

No.	The amount of substance compared to 100 parts clay by mass		
	Clay	solution	Iron sludge
1	100	45	0
2	100	45	50

นำดินเผาผสมกับกากตะกอนตามด้วยสารละลายตามสูตร และขึ้นรูปด้วยการอัดที่ 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 50 มิลลิเมตร) ทิ้งไว้ เพื่อ

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

ทดสอบความทนต่อแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C192 ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ และขึ้นรูปเป็นแผ่นทรงกลมให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 70 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างโดยการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออก แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 28 วันที่อุณหภูมิห้อง

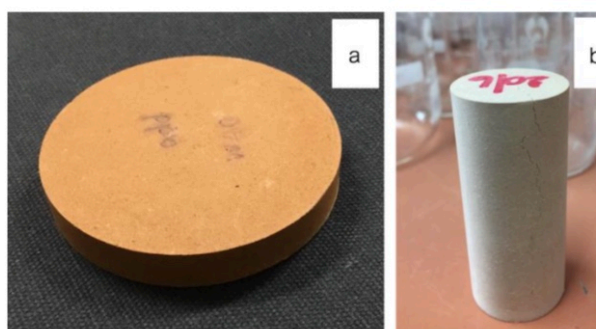


Figure 2 The molded samples used in this study (a) testing the radiation attenuation coefficient (b) testing physical properties.

2.3 การทดสอบ

2.3.1 การทดสอบความทนต่อแรงอัด โดยการเพิ่มแรงอัดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นงานเสียรูป และแตก โดยมีขั้นตอนการทดสอบตั้งแต่นำชิ้นตัวอย่างทรงกระบอกสูงมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณหาพื้นที่รับแรง แล้วนำชิ้นตัวอย่างใส่ในเครื่องทดสอบ นำค่าแรงสูงสุดมาคำนวณหาความทนต่อแรงอัด

2.3.2 การทดสอบ และการคำนวณความหนาแน่นกับการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 1 และที่ 2 ทำการทดสอบโดยการแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำนั้น คือ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในแต่ละตัวอย่าง

$$A = [(M-D)/D] \times 100 \quad (1)$$

โดย A ค่าการดูดซึมน้ำคิดเป็น (%) M มวลชิ้นทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำที่แช่ไว้ 24 hr คิดเป็น g และ D มวลชิ้นทดสอบที่อบแห้ง คิดเป็น g

$$\text{ความหนาแน่น} = \text{มวลตัวอย่าง} / \text{ปริมาตรตัวอย่าง} \quad (2)$$

2.3.3 การทดสอบ และคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาโดยใช้แกมมาสเปกโตรมิเตอร์ของเครื่องตรวจจذبโซเดียมไอโอดีน NaI (TI) แบบเรืองแสง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว x 3 นิ้ว (Akkurt, I., 2009) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาจากธาตุโคบอลต์ 60 ที่ปล่อยพลังงานรังสีแกมมา 2 ช่วง คือ 1.172 และ 1.330 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์และทำการทดสอบ Figure 3 เป็นการแสดงแผนผังกระบวนการทดลอง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

2.3.3.1 ขั้นตอนแรก คือ ขั้นตอนการลดทอนที่ถูกตรวจสอบโดยการวัดอัตราส่วนของการแผ่รังสีที่ทะลุผ่านแผ่นตัวอย่าง และนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อให้ได้ความถูกต้องของการวัดและเพื่อรับรองความสม่ำเสมอในแต่ละตัวอย่าง

2.3.3.2 ขั้นตอนที่สอง คือ ขั้นตอนการเพิ่มความหนาของแผ่นตัวอย่างให้มีความหนาแตกต่างกัน เพื่อเขียนความสัมพันธ์กับการลดทอน

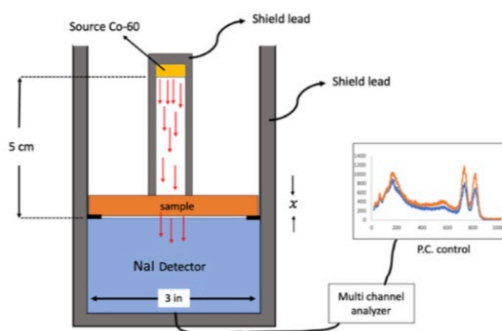


Figure 3 Schematic representation of the setup of the measurements.

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของรังสีแกมมา

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

โดย I_0 คือ ความเข้มของรังสีแกมมาก่อนจะผ่านตัวกลาง

I คือ ความเข้มของรังสีแกมมาหลังจากผ่านตัวกลาง

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวกลางคิดเป็น cm^{-1}

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุซีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของกากตะกอนเหล็กต่าง ๆ

Table 4: The average values of linear attenuation coefficient with standard deviation, the compressive strength, density and water absorption for the geopolymer were tested

Iron sludge	Compressive strength (MPa)	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	Linear attenuation coefficient (cm^{-1})	Transmission(thickness)				
					1cm	2cm	3cm	4cm	5cm
0%	29.73	2.026	12.3	0.3152+0.0098					
50%	37.20	2.210	13.4	0.8428+0.0854	62.2	60.2	49.8	47.0	30.0

ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบซีโอพอลิเมอร์ไม่ผสมกากตะกอนเหล็กมีค่าเท่ากับ 2.026 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อผสมกากตะกอนเหล็ก 50% มีค่าเท่ากับ 2.207 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น เนื่องจากกากตะกอนเหล็กมีความหนาแน่นสูงกว่าดินเหนียว เมื่อ

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

ผสมเข้ากับดินจะทำให้ความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ออกมามีค่าเพิ่มขึ้นตาม และค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Bouzarjomehri et al., 2006) เมื่อปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น โดยค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น 9% เมื่อเทียบกับที่ไม่มีกากตะกอนเหล็ก

ผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็กในรูปค่ากำลังอัด ที่ปริมาณกากตะกอนเหล็ก 0 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินเหนียว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังใน Table 4 พบว่า การเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจาก 29.73 เป็น 37.20 เมกะปาสคาล ถ้าคิดเปอร์เซ็นต์กำลังอัดเพิ่มขึ้น 25%) การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังอัด อาจเป็นผลมาจาก 1. ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอในชิ้นงาน รวมถึงโครงสร้างทางกายภาพภายในชิ้นงานที่แข็งแรงกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ (Ali, B. A., et al., 2013; Kahtan S. M., et al., 2012) 2. การเกิดพันธะทางเคมีระหว่างส่วนประกอบของจีโอพอลิเมอร์ เช่น SiO_2 Al_2O_3 ในดินเหนียว กับ Fe_2O_3 กากตะกอน

4.2 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของรังสีแกมมา

จากการวัดสเปกตรัมของ ^{60}Co โดยมีการปล่อยรังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 2 ช่วง คือ ที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ Figure 4 โดยกำหนดให้ I_0 แทนค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดรังสีโดยไม่มีวัสดุกันรังสี และกำหนดให้ I แทนค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดรังสีเมื่อถูกกันด้วยวัสดุกำบังรังสีหรือแผ่นตัวอย่าง เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่างที่ปริมาณกากตะกอนแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของกากตะกอนมากขึ้นทำให้พีคเริ่มหายไปหรือความเข้มข้นของรังสีที่วัดได้มีค่าลดลง

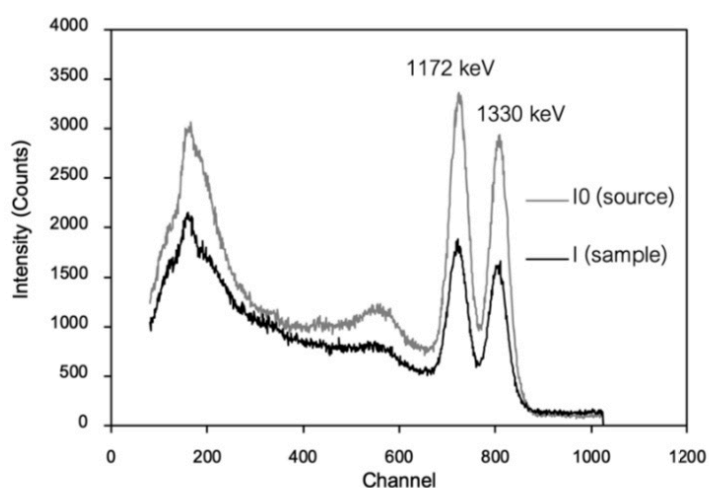


Figure 4 Gamma ray spectrum obtained from ^{60}Co source

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นของจีโอพอลิเมอร์ดินเหนียวผสมกากตะกอนเหล็กขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ความหนา 1 เซนติเมตร โดยศึกษารังสีแกมมาที่ระดับพลังงาน 1.172 และ 1.330 MeV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ^{60}Co Table 4 พบว่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นมีค่าเพิ่มตามปริมาณกากตะกอนเหล็กที่เพิ่มขึ้น (Ali, B.A. et al., 2013) โดยสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่ระดับพลังงาน 1.330 MeV

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

มีค่าเท่ากับ 0.3152 cm^{-1} สำหรับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีกากตะกอนเหล็ก มีค่าเท่ากับ 0.8428 cm^{-1} สำหรับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีกากตะกอนเหล็ก 50% หรือเพิ่มขึ้น 167% ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นรวมของตัวอย่างสูงสุด (Khalid, O., 2011) ดังนั้นสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการททอนรังสีได้ดีมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัย Ali Basheer Azee *et al.*, 2013

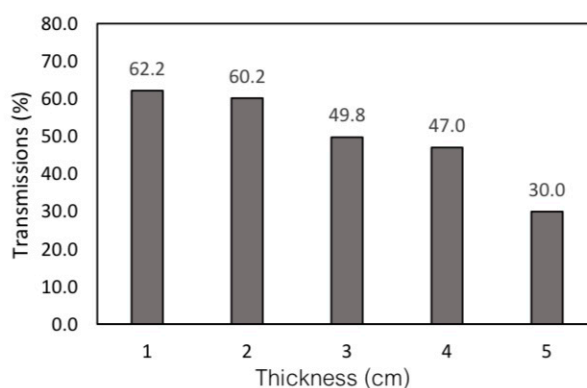


Figure 5 The transmission rate of geopolymer with 50% sludge content as a function of thickness

Figure 5 อัตราการส่งผ่านรังสีของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอน 50% เป็นฟังก์ชันกับความหนาของตัวอย่างแสดงให้เห็นได้ว่าอัตราการส่งผ่านรังสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนามากขึ้น (Akkurt, I. *et al.*, 2010) และอัตราการส่งผ่านรังสีที่มีความหนาตั้งแต่ 1 2 3 4 และ 5 cm มีค่าเท่ากับ 62.2 60.2 49.8 47.0 30.0 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแผ่นจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนา 5 cm สามารถกันรังสีได้มากที่สุดคือ 70% เพราะมีอัตราการส่งผ่านแค่ 30% ดังนั้นสามารถสรุปจีโอพอลิเมอร์ที่ศึกษานี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาเป็นวัสดุกำบังรังสีเมื่อมีปริมาณกากตะกอนเหล็ก และยิ่งกันรังสีได้ดีเมื่อเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นกำบังมากขึ้น

สรุปผลและเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกากตะกอนเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อสมบัติการกันรังสีของจีโอพอลิเมอร์ผสมกากตะกอนเหล็ก โดยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์อย่างเช่น ดินเหนียวจากจังหวัดนครศรีธรรมราชที่ประกอบไปด้วย SiO_2 และ Al_2O_3 เมาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นอสัณฐาน ส่วนกากตะกอนเหล็กที่นำมาเติมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกันรังสี

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนเหล็กมากขึ้น โดยความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น 9% เมื่อเทียบกับที่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีกากตะกอนเหล็ก ส่วนค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น 25%

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นที่ระดับพลังงาน 1.330 MeV มีค่าเพิ่มตามปริมาณกากตะกอนเหล็กที่เพิ่มลงไป หรือ 167 % จากตัวอย่างที่ไม่ใส่กากตะกอนเหล็ก ส่วนอัตราการส่งผ่านของรังสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของตัวอย่างหนาขึ้น โดยแผ่นจีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนา 5 cm สามารถกันรังสีได้มากที่สุดคือ 70% เพราะมีอัตราการส่งผ่านแค่ 30% ดังนั้นสามารถสรุปจีโอพอลิเมอร์ที่ศึกษานี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำทำเป็นวัสดุกำบังรังสีเมื่อเพิ่มกากตะกอนเหล็ก และยิ่งกันรังสีได้ดีมากขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นตัวอย่าง

ดังนั้นสรุปได้ว่า กากตะกอนเหล็กมีความสามารถป้องกันรังสีแกมมา และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้จีโอพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณแหล่งทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ปี 2561

เอกสารอ้างอิง

- ดวงฤดี ฉายสุวรรณ. 2558. **จีโอพอลิเมอร์ คอนกรีตสีเขียว วัสดุก่อสร้างชนิดใหม่**. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มก.
- A. M. Mustata Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, A. R. Rafiza, and y. Zarlina. 2012. Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratios and NaOH Molarities on Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer. *MATERuALS*. 109(5), pp. 503-508.
- Akkurt, I., 2009. **Effective atomic and electron numbers of some steels at different energies**. *Ann. Nucl. Energy* 36 (11e12), 1702e1705.
- Akkurt, I.; Akyildirim, H.; Akkurt, A.; Mavi, B.; Kilincarslan, S; Basyigit, C. **Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies**. *J. Progress in Nuclear Energy. Transf.* 2010, 1–4.
- Akkurt, I.; Mavi, B.; Akkurt, A.; Basyigit, C.; Kilincarslan, S.; Yalim, H. 2005. Study on Z-dependence of partial and total mass attenuation coefficients. *J. Quant Spectrosc Radiat. Transf.* 94, 379–385.
- Ali, B. A.; Kahtan, S. M.; Mohd Mustafa Al, B. A.; Kamarudin, H.; Andrei Victor, S. and Rafiza A. R. 2013. **The Effect of Various Waste Materials' Contents on the Attenuation Level of Anti-Radiation Shielding Concrete**. *Materials*. 6, 4836-4846.
- Ali, B.A.; Kahtan, S.M.; Sandu, A.V.; Abdullah, M.M.; Hussin, K.; Ioan, G.S. 2013. **Evaluation of Radiation Shielding Properties for Concrete with Different Aggregate Granule Sizes**. *Rev. Chim.* 64, 899–903.
- ASTM C192/C 192M-06. 2013. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. *Annual Book of ASTM Standards*. 4(1), 1-8.

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

Bouzarjomehri, F.; Bayat, T.; Dashti-R, M.H.; Ghisari, J.; Abdoli, N. 2016. **^{60}Co Gamma-Ray Attenuation Coefficient of Barite Concrete.** *Iran. J. Radiat. Res.* 4, 71–75.

Kahtan S. M., Ali Basheer Azeez A. M. Mustafa Al Bakri , Kamarudin H., Azmi B.R. 2012. The Effect of Barite Content on Anti Radiation Properties of Geopolymer Fly Ash Concrete Incorporated Natural Rock Ores of Hematite. *Science and Research (IJSR)*. 2319-7064.

Khalid, O. 2011. **Gamma-Ray radiation attenuated by barium sulfate–cement barrier.** *Elixir Bio. Phys.* 34, 2502-2504.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล Mr. Chhayhong Kim

รหัสนักศึกษา 6120320803

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ.(ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2561

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โครงการ
ทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ปี 2561

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชายหงส์ กิม สมัญญา สงวนพรรค พวงทิพย์ แก้วทับทิม สมชาย กอพูนพัฒน์ . 2563. การพัฒนาวัสดุ
เชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนเหล็กเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมา. การประชุม
วิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 17. 2-3
ธันวาคม 2562. หน้า 2950 – 2959