

รายงานวิจัย

โครงการกำกับดูแลความปลอดภัยการจัดการกากกัมมันตรังสีในอุตสาหกรรมเศษโลหะ

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๕

สนับสนุนงบประมาณวิจัย โดย

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๕

รายงานวิจัย

โครงการกำกับดูแลความปลอดภัยการจัดการกากกัมมันตรังสีในอุตสาหกรรมเศษโลหะ

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๕

คณะผู้วิจัย

นางชัชฎา อัสวภูไชย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

นายวิมล กลับสงเคราะห์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

สนับสนุนงบประมาณวิจัย โดย

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๕

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก นายชาญณรงค์ ไวยพจน์ และ ดร.กนกอร หั่นเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยจากศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร (Cbit) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมไปถึงนายธนภัทร ยุติยงค์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ Cbit ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการปฏิบัติงานทดลองด้านวิศวกรรมโยธานานรอก ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชนิศ รัตนพงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ตรวจวัดค่าปริมาณรังสีในตัวอย่างฝุ่นเหล็กปนเปื้อนรังสี และตัวอย่างน้ำปนเปื้อนรังสี รวมไปถึงนางสาวธัญญพร จรูญรัตนสรรค์ และนายรัฐภูมิ คำแก้ว นักศึกษาฝึกงานจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยปฏิบัติงานทดลองด้านวิศวกรรมโยธานานรอกและการตรวจวัดค่าปริมาณรังสีในตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลงไปด้วยดี

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

มกราคม ๒๕๖๖

บทคัดย่อ

เนื่องจากอุบัติเหตุจากการประกอบธุรกิจด้านอุตสาหกรรมเชื้อเพลิง ทำให้เกิดการผลิตกากกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสีเพิ่มปริมาณมากขึ้นจนเกินกำลังการจัดกากกัมมันตรังสีโดยผู้ประกอบการเองและการจัดการกากกัมมันตรังสีโดยภาครัฐบาล งานวิจัยนี้ภายใต้การดำเนินงานของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติซึ่งเป็นผู้กำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสีจึงค้นหาแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยทดลองนำกากกัมมันตรังสีผสมกับมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำกลั่น) เพื่อหาปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตเป็นคอนกรีตฐานราก นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบความปลอดภัยทางรังสีของตัวอย่างที่ได้อีกทางหนึ่งด้วย

ผลการทดลองพบว่า สูตรกากที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ 500 กรัม ทราย 687.5 กรัม น้ำกลั่น 200 กรัม และ กากกัมมันตรังสี 723.8 กรัม จะทำให้ค่าการต้านทานแรงอัดของตัวอย่าง มีค่า 36.97 ksc ซึ่งมากกว่าค่าการต้านทานแรงอัดของสูตรชุดควบคุม อยู่ร้อยละ 20 หมายความว่า สามารถนำสัดส่วนการผสมระหว่างมอร์ตาร์และกากกัมมันตรังสีนี้ ไปพัฒนาเป็นคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างฐานรากได้ สำหรับการทดสอบความปลอดภัยทางรังสี พบว่า ตัวอย่างจากสูตรกากที่ 5 มีค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (Specific Activity) $1.512 \pm 0.195 \text{ Bq/mg}$ ($1,512 \pm 0.195 \text{ Bq/g}$) และน้ำที่แช่ตัวอย่างสูตรกากที่ 5 มีค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ $0.855 \pm 0.200 \text{ Bq/mg}$ ($855 \pm 0.200 \text{ Bq/g}$) ซึ่งมากกว่าระดับค่ากัมมันตภาพจากเกณฑ์การยกเว้น (exempt activity concentrations) ในเอกสาร Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic, Safety Standards, General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3) ค่าเท่ากับ 0.1 Bq/g นอกจากนี้ ค่าการนำไฟฟ้าของสูตรกาก 5 ก็ยังมีค่าเกือบสูงสุด ซึ่งหมายถึง มีปริมาณเกลือ Cs-137 ที่ละลายอยู่ในน้ำมากกว่าสูตรอื่น ๆ

ดังนั้น ยังคงจำเป็นต้องพัฒนางานวิจัยเพื่อค้นหาสูตรการผสมมอร์ตาร์และกากกัมมันตรังสีเพื่อให้ได้สูตรที่สามารถพัฒนานำไปทำคอนกรีตฐานรากและมีความปลอดภัยทางรังสีมากขึ้น โดยอาจเลือกใช้การเพิ่มปริมาตรของปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ แทนการลดปริมาตรของกากกัมมันตรังสี แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องตรวจสอบค่าความต้านทานแรงอัดอีกครั้งหนึ่ง และต้องหาวิธีการลดการชะล้างของเกลือ Cs-137 เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำจนกลายเป็นกากกัมมันตรังสี และเพิ่มโอกาสในการเกิดสนิมของโครงสร้างงานฐานรากต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการจากการวิจัย	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การทดสอบหาค่าความชันเหลวกติของซีเมนต์	11
3.2 การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคต	12
3.3 การทดสอบค่าแรงอัดของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมปูนแดง	13
ไม่เปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมกากกัมมันตรังสี	
3.4 การทดสอบค่าปริมาณรังสีในวัตถุตัวอย่างและน้ำแขวนวัตถุตัวอย่าง	17
3.5 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า	
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านงานก่อสร้างฐานราก	20
4.2 ผลการทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี	26
บทที่ 5 บทวิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	28
เอกสารอ้างอิง	29

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%	6
ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนปริมาณน้ำกลั่นที่แปรผันตั้งแต่ 24 – 30 % ของปริมาณปูนซีเมนต์	12
ตารางที่ 3 สูตรการผสมก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ สูตรควบคุม สูตรฝุ่น และ สูตรกาก	16
ตารางที่ 4 ปริมาณปูนซีเมนต์ ประเภทไฮดรอลิก รุ่น M 299 และน้ำกลั่น	20
ตารางที่ 5 ข้อมูลผลการทดลองการทดสอบความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์	20
ตารางที่ 6 ข้อมูลผลการทดลองการหาค่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 1	21
ตารางที่ 7 ข้อมูลผลการทดลองการหาค่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 2	22
ตารางที่ 8 ข้อมูลผลการทดลองการหาค่าการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 3	22
ตารางที่ 9 ผลการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์	24
ตารางที่ 10 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างฝุ่นโลหะ	25
ตารางที่ 11 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของก้อนวัตถุตัวอย่าง	25
ตารางที่ 12 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างน้ำ	26
ตารางที่ 13 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ	27

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต	4
ภาพที่ 2 ภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	5
ภาพที่ 3 (ก) ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A (ข) ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite	6
ภาพที่ 4 ภาพรวมขั้นตอนดำเนินการวิจัย	9
ภาพที่ 5 ก่อนวัตถุตัวอย่างสำหรับส่งวัดปริมาณรังสี	17
ภาพที่ 6 ตัวอย่างน้ำสำหรับการตรวจวัดปริมาณรังสี	17
ภาพที่ 7 ระบบวัดรังสีแกมมาสเปกโตรมิเตอร์	18
ภาพที่ 8 การตรวจวัดค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า	19
ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์การทดสอบความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์	21
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลการทดลองการหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	23
ภาพที่ 11 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์	24

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตามพระราชบัญญัตินิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 (ฉบับแก้ไขเพิ่มเติมใหม่ล่าสุด พ.ศ. 2562) หมวด 6 มาตรา 82 ผู้รับใบอนุญาตฯ ที่เลิกใช้วัสดุกัมมันตรังสี ต้องจัดการวัสดุกัมมันตรังสีนั้นเช่นเดียวกับการจัดการกากกัมมันตรังสี ดังนั้น Cs-137 บริสุทธิ์ในรูปของแข็งที่สกัดออกมา หรือ โลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 จึงต้องถูกนำไปจัดเป็นกากกัมมันตรังสีตามกฎหมาย ที่ผ่านมาเศษโลหะที่ปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสีถูกพบในตู้สินค้านำเข้าและส่งออก รวมถึงการหลอมละลายวัสดุกัมมันตรังสีในอุตสาหกรรมหลอมโลหะเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดกากกัมมันตรังสีจำนวนมากกว่า 720 ตัน ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการกากฯ กิโลกรัมละ 300 บาท หรือประมาณ 270 ล้านบาท ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าการเก็บรักษากากกัมมันตรังสีระยะยาวกว่า 300 ปี เพื่อให้ระดับรังสีลดลงใกล้เคียงระดับธรรมชาติ ที่หน่วยงานภาครัฐต้องรับผิดชอบอีกในราคาที่เหมาะสมไม่ได้ แต่ถ้าสามารถนำโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 กลับมาใช้ประโยชน์ในงานอื่นได้ เช่นนำมาเป็นส่วนผสมของงานคอนกรีต เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ประเภทส่วนที่อยู่ใต้ดิน เช่น เสาเข็ม ฐานราก ตอม่อ และถนนคอนกรีต ย่อมมีประโยชน์มากกว่า

โดยปกติแล้วส่วนผสมของตอม่อมีองค์ประกอบคือ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ในการดำเนินการวิจัยนี้จึงมีแนวทางนำโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 ที่มีปริมาณเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากมาผสมในปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการที่จะพัฒนาเป็นตอม่อ โดยนำโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 มาผสมเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ ทดแทนทราย และศึกษาสมบัติการต้านทานแรงอัดของปริมาณโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 ที่ใส่ลงในซีเมนต์เพสต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ในแต่ละตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ นับเป็นแนวทางในการลดปริมาณของเหลือทิ้งประเภทโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี Cs-137 ที่ต้องใช้พื้นที่มาก ค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลาในการกำจัดนาน มาศึกษาทดลองเป็นส่วนผสมในซีเมนต์เพสต์ เพื่อนำไปต่อยอดถึงการใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต นอกจากนี้การดำเนินการดังกล่าวยังถือเป็นการเพิ่มมูลค่าของกากกัมมันตรังสีในทางการค้าให้มากขึ้นได้และลดค่าใช้จ่ายในการจัดการกากกัมมันตรังสีของหน่วยงานภาครัฐได้อย่างมหาศาล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อค้นหาแนวทางการนำกากกัมมันตรังสีกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด
- 1.2.2 เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดการกากกัมมันตรังสีของผู้ประกอบการภาคเอกชน และลดภาระค่าการเก็บรักษากากกัมมันตรังสีของหน่วยงานภาครัฐ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุตัวอย่างให้เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมก่อสร้างฐานราก
- 1.3.2 ทดสอบความปลอดภัยทางรังสีของวัสดุตัวอย่างให้มีความปลอดภัยทางรังสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของการวิจัย

มีแนวทางในการนำกากกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดการกากกัมมันตรังสีของผู้ประกอบการภาคเอกชน และลดภาระค่าการเก็บรักษากากกัมมันตรังสีของหน่วยงานภาครัฐ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปูนซีเมนต์ หรือ ซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์มีชื่อเต็มว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา ใช้เป็นส่วนสำคัญในการทำคอนกรีต ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง เช่น หิน ทราย และ เหล็ก ให้เกิดเป็นชิ้นเดียวกัน มีส่วนผสมหลักคือ หินปูนและดินเหนียว และมีผสมอื่นเช่น ซิลิกา อลูมินา สีนแร่เหล็ก ยิปซัม และสารเพิ่มพิเศษอื่น ๆ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

- 1) Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- 2) Argillaceous Materials ได้แก่ ซิลิกา อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay)

และดินดาน (Shale)

- 3) Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือ ศิลาแรง (Laterite)

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM ของประเทศสหรัฐอเมริกา แบ่งเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland) เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ฝัองถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีข้อเสียคือ ไม่ทนต่อสารที่เป็นด่าง จึงไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องสัมผัสกับด่างจากดินหรือน้ำ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเคมี การดำเนินงานวิจัยนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ประเภทนี้เมื่อผสมกับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่าประเภทธรรมดา และมีความต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้บ้าง เหมาะสำหรับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดินในบริเวณที่ถูกระคายเคืองเป็นครั้งคราว

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High - Early Portland Cement) ประเภทนี้มีความละเอียดมากกว่า เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงนิยมนำไปใช้กับงานเร่งด่วนที่ต้องแข่งกับเวลา หรือในกรณีที่ต้องการถอดหรือรื้อแบบเร็วกว่าปกติ

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low - Heat Portland Cement) เหมาะกับงานที่ต้องการควบคุมทั้งปริมาณและอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะไปอย่างช้า ๆ จึงนิยมใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งหากมีความร้อนอย่างร้ายแรงต่อตัวเขื่อนจะทำให้เกิดการแตกหรือร้าวได้

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนเกลือซัลเฟตได้สูง (Sulfate - Resistant Portland Cement) มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารที่เป็นด่างได้สูง จึงเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่ต้องสัมผัสกับด่าง เช่น ในบริเวณที่ดินมีความเป็นด่างสูงหรือน้ำทะเล ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะช้ากว่าประเภทอื่น ๆ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- 1) ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 รวมประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์
- 2) ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม

การดำเนินงานวิจัยนี้ จะใช้วัตถุดิบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland)

2.1.2 มวลรวม หรือวัสดุผสม (aggregate)

มวลรวม คือ วัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน กรวด ทราย ที่เป็นส่วนผสมที่มีความสำคัญกับคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70 - 80% ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นมวลรวมจึงมีผลอย่างมากต่อสมบัติของคอนกรีต มวลรวมสามารถแบ่งออกเป็นขนาดต่างกันได้โดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น

- แบ่งออกได้ตามแหล่งกำเนิด หรือ
- แบ่งตามความหนาแน่นหรือน้ำหนัก หรือ
- แบ่งตามขนาดของมวลรวม โดยในการดำเนินการวิจัยนี้เราเลือกใช้ **มวลรวมแบบแบ่งตาม**

ขนาด ซึ่งมวลรวมหยาบ (coarse aggregate) คือ มวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า ตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ หิน และกรวด สำหรับมวลรวมละเอียด (fine aggregate) คือ มวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า ตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ ทราย และหินบดละเอียด

ในการดำเนินการวิจัยนี้เราเลือกใช้ มวลรวมละเอียด **ประเภททราย** ที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงร่อนเบอร์ 4 โดยใช้ทรายที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 30 และ เบอร์ 50 มาผสมรวมกันเพื่อเป็นส่วนผสมในชุดควบคุม control

ส่วนมวลรวมละเอียด **ประเภทเถ้าโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกำมะถันตรังสี Cs-137** ที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงร่อนเบอร์ 4 เช่นกัน แต่ใช้เถ้าโลหะที่ยังปนเปื้อนวัสดุกำมะถันตรังสี Cs-137 ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 20, 30 และเบอร์ 50 มาผสมรวมกันเพื่อเป็นส่วนผสมในซีเมนต์เพสต์เป็นกรณีศึกษา การใช้มวลรวมละเอียดที่มีขนาดคละกันผสมในซีเมนต์เพสต์จะทำให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและผสมกันได้สม่ำเสมอ

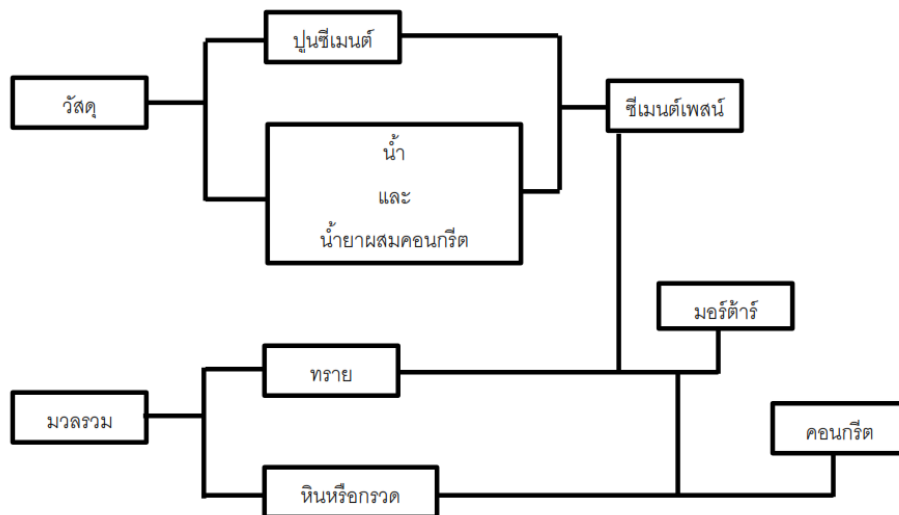
2.1.3 น้ำ (water)

น้ำมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตตามความใสหรือปริมาณสารแขวนลอยที่ปนอยู่ในน้ำ น้ำขุ่นหรือน้ำที่สารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตต่ำลง เป็นไปตามปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น โดยในการผสมน้ำกับซีเมนต์นั้น น้ำมีหน้าที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ และสร้างการหล่อลื่นเพื่อให้ส่วนผสมทุกชนิดอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทออกจากโถผสมได้ และที่สำคัญคือการเคลือบหิน ทราย ให้เปียก เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะได้โดยรอบและในการดำเนินการวิจัยนี้ใช้ **น้ำกลั่น**

2.1.4 คอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ โดยเมื่อนำส่วนผสมเหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste)
- ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทรายเรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar)
- มอร์ตาร์ผสมกับหินหรือกรวดเรียกว่า คอนกรีต (Concrete)



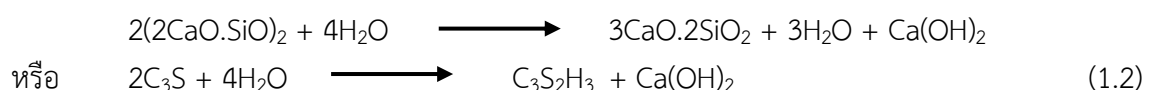
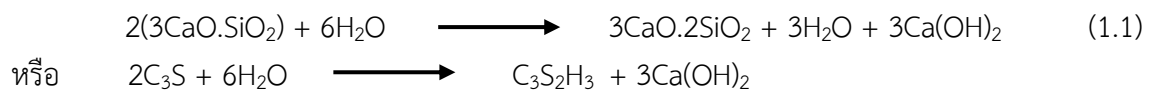
ภาพที่ 1: การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต

2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

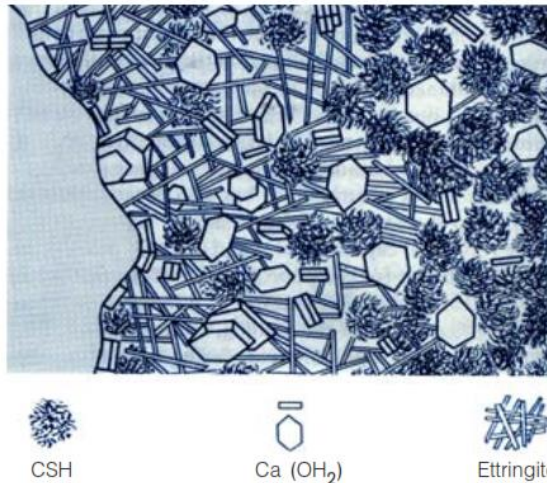
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังสมการที่ (1.1) และ (1.2) โดยมีลักษณะดังภาพที่ 2



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมีค่า pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี



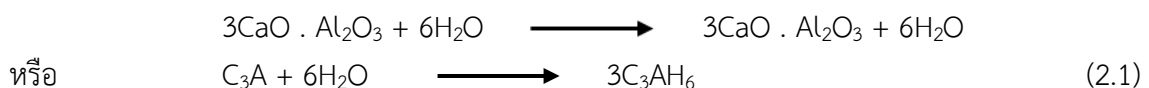
ที่มา: Concrete Technology, The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd.

ภาพที่ 2: ภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต

ภาพแสดงว่า CSH อยู่ในสภาพของอนุภาคเล็ก ๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 μm) มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกต (C/S) ใน CSH จะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ที่แสดงอัตราส่วนนั้นเป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมินาและยิปซัม

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมินา (C_3A) จะเกิดขึ้นทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัว อย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (2.1)



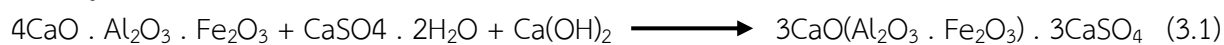
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนเม็ด สารยิปซัมจะเข้าทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของเอ็ทริงไกต์ (Ettringite) ในภาพที่ 3 บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ (2.2)



ชั้นของเอ็ทริงไกต์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวขึ้น ในช่วงแรกนี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate (ภาพที่ 3)

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) นี้ จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มทองของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) ดังสมการ 3.1

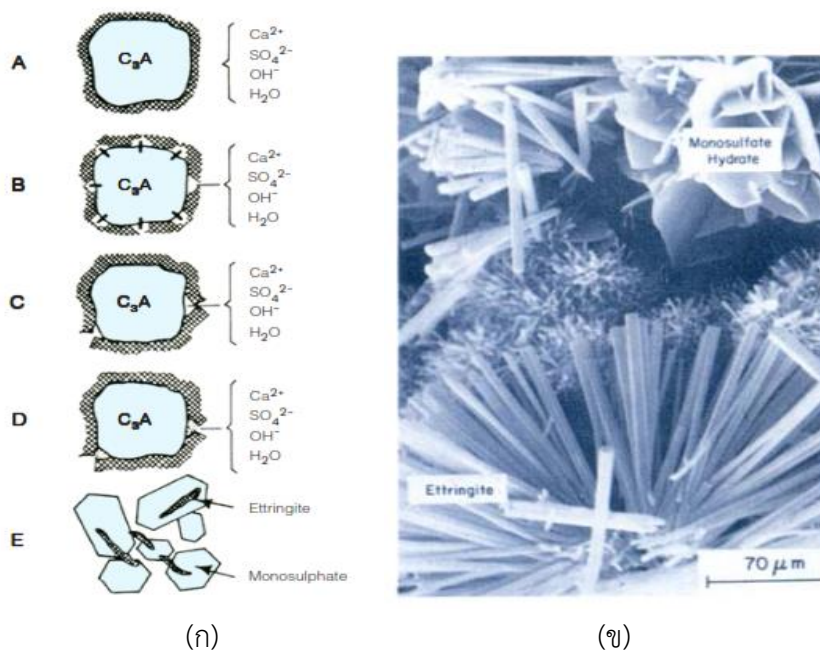


เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุ 80% ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้งสี่ส่วนผสม แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

ที่มา: Concrete Technology, The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd



ที่มา: Concrete Technology, The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd.
ภาพที่ 3: ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A (ก), ภาพขยาย Monosulphate และ Ettringite (ข)

2.1.6 กากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม 137 (Cs-137)

ซีเซียม-137 (Cs-137) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุซีเซียม ซึ่งเป็นผลผลิตฟิชชันที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30.17 ปี ประมาณ 95% สลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีบีต้า แล้วกลายเป็นแบเรียม-137m (barium-137m) ซึ่งเป็นไอโซโทปกึ่งเสถียร (metastable) หรือไอโซเมอร์ของแบเรียม-137 (Ba-137m) ส่วนอีก 5% สลายตัวไปเป็นไอโซโทปเสถียรโดยตรง แบเรียม-137m (Ba-137m) สลายตัวให้รังสีแกมมา โดยมีครึ่งชีวิต 2.55 นาที ซีเซียม-137 ปริมาณ 1 กรัม มีกัมมันตภาพรังสี 3.215 เทราเบคเคอเรล (terabecquerel, TBq)

โฟตอนจากไอโซโทปรังสีแบเรียม-137m มีพลังงาน 662 keV สามารถใช้ประโยชน์ในการฉายรังสีอาหาร (food irradiation) ใช้ในด้านรังสีรักษา (radiotherapy) สำหรับผู้ป่วยมะเร็ง มีการใช้ซีเซียม-137 สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีทางอุตสาหกรรมไม่มากนัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี แก๊สของซีเซียมละลายน้ำได้ดีทำให้ควบคุมความปลอดภัยได้ยาก จึงมีการใช้โคบอลต์-60 (Cobalt-60) ในงานด้านการถ่ายภาพด้วยรังสีมากกว่า นอกจากจะเป็นโลหะที่ไวต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าแล้ว ยังให้รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า การนำมาใช้งานเราจะพบซีเซียม-137 ได้ในอุปกรณ์วัดความชื้น เครื่องวัดอัตราการไหลหรืออุปกรณ์ตรวจวัดชนิดอื่นที่ใช้หลักการทำงานคล้ายกัน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติศานต์ กร้ามาตร (2557) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ศึกษาคือเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ผลการทดลองพบว่า วัสดุกากอุตสาหกรรมคือเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คุณสมบัติด้านกำลังยังมีย่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอนั้นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมในส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวที่ต่ำในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงและผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

สารปอซโซลาน (Pozzolan) หรือ วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติ ร่วมกับความชื้น ก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)

ฤทัยรัตน์ บุญครองชีพ อาสมะ แม่เห และประสงค์ เกษราธิคุณ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ (^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th) ในตัวอย่างข้าวสารไทยบรรจุถุง จำนวน 30 ตัวอย่าง โดยใช้หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe detector) และระบบการวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ณ ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์นิวเคลียร์และวัสดุ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th ในตัวอย่างข้าวสาร พบว่า มีค่าความแรงรังสีจำเพาะอยู่ในช่วง 129.44–1361.09 Bq/kg, 2.78–9.63 Bq/kg และ

48.50–107.14 Bq/kg โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 462.75 ± 144.03 Bq/kg, 5.53 ± 2.54 Bq/kg และ 75.17 ± 39.39 Bq/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้นี้กับค่าที่ตรวจวัดได้ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติและข้อมูลของกลุ่มนักวิจัยในประเทศไทย

ซูไบหย๊ะ กะเด็ง และ พวงทิพย์ แก้วทับทิม ได้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการตกตะกอนในอ่าวปัตตานี โดยวิธีการวิเคราะห์ไอโซโทปรังสี Cs-137 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่ากัมมันตรังสี Cs-137 ในชั้นตะกอนดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ และศึกษาอัตราการตกตะกอนในอ่าวปัตตานี ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนดินทั้งหมด 6 สถานี ดังนี้ สถานีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สถานีแหลมตาชี สถานีบ้านบุติ สถานีดาโต๊ะ สถานีตะโล๊ะสะมิแล และ สถานีแหลมนก โดยวิเคราะห์ค่ากัมมันตรังสีของ Cs-137 ด้วยหัววัด HPGe และศึกษาอัตราการตกตะกอนในอ่าวปัตตานี โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ไอโซโทปรังสี Cs-137 ผลการศึกษาพบว่าค่ากัมมันตรังสี Cs-137 ในแต่ละระดับความลึกของทุกสถานีมีค่าแตกต่างกัน ส่วนอัตราการตกตะกอนในอ่าวปัตตานีมีค่าอยู่ในช่วง 0.69 ถึง 1.06 เซนติเมตรต่อปี โดยอัตราการตกตะกอนเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 0.88 ± 0.14 เซนติเมตรต่อปี สถานีที่มีอัตราการตกตะกอนสูงสุด คือ สถานีบ้านบุติ จากการศึกษาจะสามารถคาดคะเนได้ว่าอ่าวปัตตานีจะตื้นเขินกลายเป็นผืนดินทั้งหมดภายใน 133 ปีข้างหน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุตัวอย่างแยกออกเป็นสองส่วน คือ การทดสอบคุณสมบัติด้านงานก่อสร้างฐานราก จำนวน 3 การทดสอบ และ การทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี จำนวน 2 การทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่กล่าวว่า วัสดุตัวอย่างต้องมีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือเทียบเท่าวัสดุก่อสร้างฐานรากและต้องมีความปลอดภัยทางรังสีเป็นไปตามประกาศกฎกระทรวงเกณฑ์ความปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561

การทดสอบคุณสมบัติด้านงานก่อสร้างฐานราก จำนวน 3 การทดสอบ

- 3.1 การทดสอบค่าความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์
- 3.2 การทดสอบค่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์
- 3.3 การทดสอบค่าแรงอัดของตัวอย่าง

การทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี จำนวน 3 การทดสอบ

- 3.4 การทดสอบค่าปริมาณรังสีในวัสดุตัวอย่าง
- 3.5 การทดสอบค่าปริมาณรังสีในน้ำแช่ตัวอย่าง
- 3.6 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 4 ภาพรวมขั้นตอนดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ ประกอบด้วยรายการ ดังนี้

1) เครื่องผสมปูนซีเมนต์ (Mixer) ขนาด 10 ลิตร มอเตอร์ 500 วัตต์ ปรับความเร็วผ่านระบบเฟืองเกียร์และสายพาน สามารถปรับระดับความเร็วได้ 2 ระดับ

2) ใบพาย (Paddle) ทำด้วยสแตนเลส สามารถถอดเข้าออกได้

3) โถผสม (Mixing Bowl) ขนาด 10 ลิตร ทำด้วยสแตนเลส สามารถปรับขึ้นลงได้

4) เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve shaker) รุ่น Endecotts EFL 300

5) เครื่องมือทดสอบระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ (Vicat Consistency Apparatus)

รุ่น H-3085

6) เครื่องทดสอบกำลังต้านทานแรงกดอัด (Universal Testing Machine, UTM) รุ่น

CY-6040A4

7) ชุดการวัดปริมาณรังสีแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

8) เครื่องวัดความเหนียวไฟฟ้า

9) ตะแกรงร่อนแยกขนาด เบอร์ 4,10,16,20,30,50,100 และ Pan

10) เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 1 ตำแหน่ง

11) เครื่องชั่งแบบดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง

12) กระบอกตวง ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

13) ทัพพีด้ามยาว

14) แท่งกระทุ้ง

15) ปีกเกอร์ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

16) ถาดผสมปูน

17) ถังน้ำพลาสติก

18) ถุงมือไนโตร ขนาด M และ L

19) หน้ากากอนามัย สำหรับกันฝุ่นละออง

20) ถุงพลาสติก ขนาด 45 x 60 นิ้ว และ ขนาด 8 x 12 นิ้ว

21) เกรียงเหล็กโปวี่ ขนาด 2 นิ้ว

22) เกรียงเหล็กใบโพธิ์

23) น้ำยาล้างเครื่องแก้ว

24) ผ้าสำหรับทำความสะอาด

25) ฟองน้ำล้างเครื่องแก้ว

26) อุปกรณ์สำนักงาน เช่น มีดคัตเตอร์ กรรไกร เทปกาว ปลั๊กไฟ กระดาษจดบันทึก ปากกา คอมพิวเตอร์ กระดาษทิชชู

27) อุปกรณ์สำหรับการชำระล้างการปนเปื้อนรังสี เช่น กระดาษทิชชูแบบหนา แอลกอฮอล์ความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 75% ถุงสำหรับแยกเศษวัสดุปนเปื้อนกากกัมมันตรังสี ถุงมือไนโตร เป็นต้น

การทดสอบคุณสมบัติด้านงานก่อสร้างฐานราก จำนวน 3 การทดสอบ ประกอบด้วย

3.1 การทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์

ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของซีเมนต์ที่ได้มาตรฐานนั้นปริมาณน้ำที่นำไปผสมกับซีเมนต์จะต้องเป็นปริมาณที่เหมาะสมและตรงตามมาตรฐาน มิเช่นนั้นแล้วผลของการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้ย่อมไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกันได้

ปริมาณน้ำที่พอเหมาะหรือเหมาะสมนั้นหมายถึงปริมาณน้ำ (คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักของซีเมนต์) ที่เมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) สภาพความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์หมายถึงสภาพที่เมื่อปล่อยเข็มมาตรฐานไวแคต (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม.) แล้วเข็มนี้จะจมลงไปในซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ในระยะเวลา 30 วินาที กล่าวโดยสรุป การทดสอบเรื่องนี้เป็น การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ของซีเมนต์ต่อไปนั่นเอง

ครั้งที่ 3.1.1

วัตถุดิบ

- 1) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก รุ่น M 299 ปริมาณ 650 กรัม จำนวน 1 ชุด
- 2) น้ำกลั่น ปริมาณ 162.53 กรัม จำนวน 1 ชุด (25% ของปริมาณปูนซีเมนต์)

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ตักปูนซีเมนต์ใส่ในภาตผสมปูนในปริมาณมากพอสมควร แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนปูนจำนวน 1 รอบ แยกปูนที่ร่อนแล้วไปใช้งานต่อไป ส่วนเศษปูนที่ไม่ต้องการให้ทิ้งรวมไว้ในถุงพลาสติก
- 2) ชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก รุ่น M 299 ที่ผ่านการร่อนแล้ว ปริมาณ 650 กรัม จำนวน 1 ชุด
- 3) ชั่งน้ำหนักน้ำกลั่น ปริมาณ 162.53 กรัม จำนวน 1 ชุด (25% ของปริมาณปูนซีเมนต์)
- 4) เกลี่ยปูนซีเมนต์ให้มีลักษณะเป็นกรวยภูเขาไฟ แล้วเทน้ำกลั่นตามปริมาณที่เตรียมไว้ ขณะที่เทน้ำให้ใช้เกรียงเหล็กใบโพธิ์เกลี่ยปูนซีเมนต์ด้านนอกเข้าไปด้านในเพื่อกันการระเหยของน้ำ โดยต้องเทน้ำให้หมดภายในระยะเวลา 30 วินาที
- 5) พักไว้ 30 วินาที ให้ปูนซีเมนต์ดูดซึมน้ำ หลังจากนั้นให้ใช้มือผสมปูนซีเมนต์เข้ากับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างรวดเร็ว ภายในเวลา 90 วินาที
- 6) ปั้นซีเมนต์เพสต์ให้เป็นก้อนกลม ๆ แล้วโยนจากมือซ้ายไปยังมือขวา หรือจากมือขวาไปยังมือซ้าย จำนวน 6 ครั้ง โดยนับครั้งที่ 1 จากการโยนครั้งแรก ทั้งนี้มือทั้งสองข้างต้องห่างกัน 15 เซนติเมตร
- 7) ใช้แรงกดก้อนซีเมนต์เพสต์ใส่เข้าไปทางด้านใหญ่ (หรือด้านล่าง) ในแบบวงแหวนรูปกรวยของเครื่องทดสอบแบบเข็มไวแคต ออกแรงดันซีเมนต์เพสต์จนกระทั่งทะลุไปอีกด้านหนึ่ง (ด้านเล็ก/ด้านบน) จากนั้นนำไปวางบนแผ่นกระจกใสของเครื่องทดสอบแบบเข็มไวแคต แล้วออกแรงกดอีกครั้งจนซีเมนต์เพสต์ส่วนที่เกินจากแบบวงแหวนทะลักออกมาทางด้านล่าง ส่วนด้านบนให้ใช้เกรียงเหล็กใบโพธิ์ ตัด 90 องศา ตรงกลางวงแหวน แล้วปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนที่เกินจากแบบวงแหวนออก พร้อมกับตกแต่งผิวหน้าที่เรียบร้อย โดยใช้ปลายเกรียงเหล็กใบโพธิ์ปาดเบา ๆ เท่านั้น ห้ามออกแรงอัดซีเมนต์เพสต์ลงในแบบวงแหวนเพิ่มเติมอีก นำปูนส่วนที่เกินทั้งจากด้านบนและด้านล่างทิ้งในถุงพลาสติกที่เตรียมไว้
- 8) วางซีเมนต์เพสต์ให้อยู่ใต้เข็มไวแคต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ทั้งนี้ควรตรวจสอบเข็มก่อนว่าสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่างสม่ำเสมอ
- 9) เลื่อนปลายเข็มให้แตะกับผิวของซีเมนต์เพสต์ตรงกลางแบบจากนั้นอ่านสเกลหน้าปิดบันทึกค่ามิลลิเมตร ตั้งเป็นเวลา 0 แล้วปล่อยเข็มไวแคตจับเวลา 30 วินาที บันทึกค่าผลต่างมิลลิเมตรที่อ่านได้

10) ทำซ้ำเช่นนี้ จนกระทั่งค่าผลต่างมิลลิเมตร ได้เข้าใกล้ 0 มิลลิเมตร

ครั้งที่ 3.1.2

วัตถุประสงค์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (วันผลิต 06/02/65) ปริมาณ 500 กรัม จำนวน 5 ชุด
2. น้ำกลั่น จำนวน 5 ชุด โดยให้มีค่าตั้งแต่ 24 – 30 % ของปริมาณปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนปริมาณน้ำกลั่นที่แปรผันตั้งแต่ 24 – 30 % ของปริมาณปูนซีเมนต์

ครั้งที่ผสม	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปริมาณน้ำกลั่น (กรัม)	% น้ำกลั่น/ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)
1	502.3	151.5	30.16
2	502.1	142.3	28.34
3	502.8	131.7	26.19
4	502.4	126.8	25.23
5	502.4	122.1	24.30

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (วันผลิต 06/02/65) และน้ำกลั่น ในปริมาณตามตารางด้านบน จำนวน 5 ตัวอย่าง
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 3.1.1 กับทั้ง 5 ตัวอย่าง แต่ให้เปลี่ยนมาใช้เครื่องผสมปูนซีเมนต์แทนการผสมด้วยมือ ลำดับขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้
 - เทปูนซีเมนต์และน้ำกลั่นตามปริมาณที่เตรียมไว้ ในโถผสม ปิดไว้ 15 วินาที ($t = 15 \text{ sec}$)
 - เปิดเครื่องผสมปูนซีเมนต์ ความแรงระดับ 1 ใช้พายหัวสามเหลี่ยม ให้เครื่องผสมทำงานนาน 30 วินาที ($t = 45 \text{ sec}$) จากนั้นให้หยุดเครื่องผสมฯ ตะล่อมปูนซีเมนต์และน้ำกลั่นให้รวมกันที่ก้นโถผสมภายใน 15 วินาที ($t = 1 \text{ min}$) แล้วเปิดเครื่องผสมฯ อีกครั้ง ใช้ความแรงระดับ 2 พายหัวสามเหลี่ยมเช่นเดิมปล่อยให้เครื่องผสมฯ ทำงาน 60 วินาที ($t = 2 \text{ min}$)
 - ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1.1 ข้อ 6) – 10)
- 3) บันทึกข้อมูลผลต่างค่ามิลลิเมตรสำหรับแต่ละตัวอย่าง
- 4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างมิลลิเมตรกับปริมาณน้ำกลั่น โดยหาค่าปริมาณน้ำกลั่นที่จุดตัดค่าผลต่างมิลลิเมตรเท่ากับ 10 มิลลิเมตร
- 5) นำค่าปริมาณน้ำกลั่นไปใช้กับการทดลองครั้งต่อไป โดยกำหนดเป็นค่าปริมาณน้ำกลั่นมาตรฐาน

3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคต

ระยะเวลาก่อตัว (Time of Setting) ของซีเมนต์ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งของซีเมนต์ หากซีเมนต์ที่ใช้งานก่อตัวเร็วเกินไปแล้ว เมื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ผู้ดำเนินงานก็อาจจะไม่มีเวลาเพียงพอในการนำคอนกรีตไปเทลงแบบได้อย่างสมบูรณ์ ซีเมนต์อาจก่อตัวก่อน ซึ่งหมายความว่าหลังจากเวลานั้นแล้วเราไม่ควรจะเคลื่อนย้ายคอนกรีตสดอีกต่อไป เพราะอาจทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพได้ อย่างไรก็ตามหากระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตนานมากเกินไปจนเกินไป ก็อาจมีอุปสรรคต่อการก่อสร้างได้ เช่น ทำให้ถอดแบบได้ช้า การถอดแบบได้ช้าทำให้เสียเวลา

ก่อสร้าง เป็นต้น โดยทั่ว ๆ ไปเกณฑ์กำหนดระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทุกประเภท โดยวิธีนี้จะต้องไม่ต่ำกว่า 45 นาที

การหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคตนั้น หมายถึงระยะเวลา (นับตั้งแต่เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จ) ที่เมื่อนำเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. ปลอยลงไปบนซีเมนต์เพสต์ที่ผสมน้ำ และมีความชื้นเหลวปกติแล้ว เข็มนี้จะจมลงไป 25 มม. หลังจากเมื่อปลอยเข็มได้ 30 วินาที

วัตถุดิบ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (วันผลิต 06/02/65) ปริมาณ 500 กรัม จำนวน 1 ชุด
- 2) น้ำกลั่น ปริมาณ 133 กรัม จำนวน 1 ชุด

ขั้นตอนดำเนินการ

- 1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 3.1.2 แต่การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแบบเข็มไวแคต ให้เปลี่ยนหัวเข็มจากขนาด 10 มิลลิเมตร เป็น 1 มิลลิเมตร
- 2) วางซีเมนต์เพสต์ให้อยู่ใต้เข็มไวแคต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ควรตรวจสอบเข็มก่อนว่าสามารถเลื่อนขึ้นลงได้อย่างสม่ำเสมอ และตั้งเข็มให้เริ่มต้นอยู่ที่ 0 มิลลิเมตร
- 3) ปลอยเข็มให้จมลงในซีเมนต์เพสต์แล้วอ่านค่าระยะเวลาการจมของเข็มหลังจากปลอยแล้ว 30 วินาที
- 4) ทำซ้ำข้อ 3 อีกครั้งเมื่อครบ 15 นาที 10 นาที และ 5 นาที จนกว่าจะได้ระยะเข็มจมเท่ากับ 25 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่า ทั้งนี้ระหว่างรอในแต่ละช่วงต้องหุ้มซีเมนต์เพสต์ด้วยผ้าดิบเปียกเพื่อลดปฏิกิริยา Heat hydration และรักษาความชื้นให้คงที่
- 5) การปลอยเข็มแต่ละครั้ง ปลายเข็มจะต้องอยู่ห่างจากรอยเข็มเดิมไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และห่างจากขอบแบบวงแหวน ไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงเวลาที่เข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์ที่ 25 มิลลิเมตร คือค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time)

3.3 การทดสอบค่าแรงอัดของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้า ซีเมนต์มอร์ต้าผสมปูนแดงไม่เปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี และซีเมนต์มอร์ต้าผสมกากกัมมันตรังสี

ถึงแม้ว่าการทดลองนี้จะดำเนินการถึงเพียงแค่มอร์ต้า แต่ค่าแรงอัดของมอร์ต้านั้นแปรผันตรงกับค่าแรงอัดของคอนกรีต นอกจากนี้ค่าแรงอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต เนื่องจากการออกแบบคอนกรีตส่วนมากมักจะออกแบบให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดอย่างเดียว

ค่าแรงอัดของคอนกรีต (f_c) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ อายุ การบ่ม และอื่น ๆ หมายถึงค่าแรงอัดที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่างมาตรฐานรูปลูกบาศก์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. ที่อายุ 28 วัน ค่าแรงอัดสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f_c = P_u / A$$

โดย

f_c = ความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, kg/cm^2

P_u = น้ำหนักกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้, kg .

A = พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, cm^2

และคำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนักของขึ้นตัวอย่างจากสูตร

$$WC = W / V$$

โดย

WC = ความแน่นของขึ้นตัวอย่างทดสอบ, kg/m^3

W = น้ำหนักของขึ้นตัวอย่างทดสอบ, kg

V = ปริมาตรของขึ้นตัวอย่างทดสอบ, m^3

อ้างอิงการทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ที่ห้องปฏิบัติการภายในศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร (Cbit) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างทดสอบ ที่ $23 \pm 2^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างทดสอบ ที่ $50 \pm 5\% \text{RH}$

วัตถุดิบ

สูตรตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยมีทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่

- 1) สูตรควบคุม ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ เป็นมอร์ตาร์ชุดควบคุม (control)
- 2) สูตรฝุ่น ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย ฝุ่นไม่ปนเปื้อน และน้ำ เป็นมอร์ตาร์ผสมฝุ่นแดง ไม่ปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี
- 3) สูตรกาก ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย กากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137 และน้ำ เป็นมอร์ตาร์ผสมกากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137

โดยในสูตรฝุ่น และ สูตรกาก จะมีอัตราส่วนผสมของปริมาณที่ใส่ในตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ ของฝุ่นแดงไม่ปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี และกากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137 มาทำการศึกษาแยกย่อยตามตารางที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการ

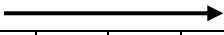
- 1) **สูตรควบคุม** ประกอบไปด้วยส่วนผสม คือ ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ เป็นมอร์ตาร์ชุดควบคุม (control)

น้ำหนักของส่วนผสม	ปูนซีเมนต์	500 กรัม
	ทราย	1,375 กรัม
	น้ำกลั่น	133 กรัม

วิธีการผสมเพื่อทำก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์

- เทน้ำกลั่นปริมาณ 133 กรัม ลงในโถผสมของเครื่องผสมแบบ Batch Mixer เป็นลำดับแรกหลังจากนั้นเทปูนซีเมนต์น้ำหนัก 500 กรัม เป็นลำดับต่อไป แล้วทิ้งให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นเวลา 15 วินาที โดยใช้นาฬิกาจับเวลา
- เปิดเครื่องผสมปูนซีเมนต์ ความเร็วรอบระดับ 1 ให้เครื่องผสมฯ ทำงานเป็นเวลา 30 วินาที
- หยุดเครื่องผสมฯ ใช้พายกว่วนส่วนผสมในโถผสมให้คลุกเคล้ากัน แล้วใส่ทราย น้ำหนัก 1,375 กรัม ลงในโถผสมเป็นลำดับต่อไป
- เปิดเครื่องฯ อีกครั้ง แต่ในครั้งนี้ใช้ความเร็วรอบระดับ 2 (ปานกลาง) เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นหยุดเครื่องผสมฯ เพื่อใช้พายกว่วนตะล่อมส่วนผสมในโถผสมให้คลุกเคล้ากัน โดยเฉพาะในบริเวณด้านล่างของโถผสมที่มักจะมีการติดแน่นของส่วนผสม แล้วเปิดเครื่องผสมฯ อีกครั้ง โดยใช้ความเร็วรอบระดับ 2 เช่นเดิม จับเวลาทำงานของเครื่องผสมฯ ให้ทำงานต่ออีก 30 วินาที จนครบเวลาแล้วปิดเครื่องผสมฯ

- นำส่วนผสมในโถผสมใส่ในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งในแบบหล่อ 1 ชุดจะมีทั้งหมด 5 ช่อง โดยให้มีปริมาณเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน และทำการตาด้วยแท่งกระทุ้ง ในความแรงที่เท่า ๆ กัน ในแต่ละชั้น จำนวน 4 รอบ 32 ครั้ง โดยมีทิศทางการตาดำ ตามภาพ จนครบ 3 ชั้น



1	2	3	4
5	6	7	8

รอบที่ 1 และ รอบที่ 3



1	5
2	6
3	7
4	8

รอบที่ 2 และ รอบที่ 4

- ใช้เกรียงใบโพธิ์ปาดผิวหน้าก่อนตัวอย่างทั้งหมดในแต่ละชุดของแบบหล่อให้เรียบ
- นำก้อนตัวอย่างทั้งหมดในแบบหล่อมารวมทำการบ่มด้วยการคลุมด้วยผ้าชุบน้ำบิดหมาด ให้คลุมทั้งหมด แล้วนำไปใส่ในถุงพลาสติกอีกชั้นหนึ่ง และปิดให้มิดชิดทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- หลังจาก 24 ชั่วโมงแล้ว นำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อรูปลูกบาศก์ แล้วทำการบ่มต่อ ด้วยการคลุมด้วยผ้าชุบน้ำบิดหมาด เช่นเดิม แล้วนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัด หรือแรงอัด ด้วยเครื่องทดสอบ กำลังต้านทานแรงกดอัด ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน นับจากวันที่ขึ้นรูปตัวอย่าง

2) สูตรฝุ่น (ฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกันมันตรังสี) ประกอบไปด้วยส่วนผสม คือ ปูนซีเมนต์ ทราย ฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกันมันตรังสี และน้ำ เป็นมอร์ตาร์สูตรฝุ่น

สูตรฝุ่น จะประกอบด้วยสูตรผสมที่ทำการศึกษทั้งหมด 3 สูตรการผสม ดังตารางที่ 3

วิธีการผสมเพื่อทำก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์กับฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกันมันตรังสี

- นำปูนซีเมนต์ตามน้ำหนักมาผสมกับฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกันมันตรังสีตามน้ำหนัก ในแต่ละสูตร ให้เข้ากัน
- เทน้ำกลั่นปริมาณตามสูตรฝุ่น ลงในโถผสมของเครื่องผสมฯ เป็นลำดับแรก หลังจากนั้นเทปูนซีเมนต์ที่ผสมกับฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกันมันตรังสีที่ได้คลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วลงไปโถผสม เป็นลำดับต่อไป แล้วทิ้งให้ส่วนผสมทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นเวลา 15 วินาที โดยใช้นาฬิกาจับเวลา
- เปิดเครื่องผสมฯ และทำการทดลองตามลำดับ เช่นเดียวกับสูตรควบคุม

3) สูตรกาก (กากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137) ประกอบไปด้วยส่วนผสม คือ ปูนซีเมนต์ทราย กากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137 และน้ำ เป็นมอร์ตาร์สูตรกาก

สูตรกาก จะประกอบด้วยสูตรผสมที่ทำการศึกษทั้งหมด 5 สูตรการผสม ดังตารางที่ 3

วิธีการผสมเพื่อทำก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์กับกากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137

- นำทรายตามน้ำหนักมาผสมกับกากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีเซียม-137 ตามน้ำหนักในแต่ละสูตร คลุกเคล้าให้เข้ากัน

- เทน้ำกลั่นปริมาณตามสูตรกาก ลงในโถผสมของเครื่องผสมฯ เป็นลำดับแรก หลังจากนั้นเทปูนซีเมนต์เป็นลำดับต่อไป แล้วทิ้งให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นเวลา 15 วินาที โดยใช้นาฬิกาจับเวลา

- เปิดเครื่องผสมฯ และทำการทดลองตามลำดับ เช่นเดียวกับสูตรควบคุม

ตารางที่ 3 สูตรการผสมก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ สูตรควบคุม สูตรฝุ่น และ สูตรกาก

สูตร	ปูนซีเมนต์ (C)	ทราย (S)	ฝุ่น ไม่ปนเปื้อน (P)	กาก กัมมันตรังสี ปนเปื้อน ซีเซียม-137 (Cs)	น้ำ (W)	อัตราส่วน C : S : P : Cs : W
สูตรควบคุม	500	1375	-	-	133	1 : 2.75 : 0 : 0 : 0.27
สูตรฝุ่น9	500	916.67	499.92	-	160	1 : 1.83 : 0.99 : 0 : 0.32
สูตรฝุ่น10	500	916.67	499.92	-	170	1 : 1.83 : 0.99 : 0 : 0.34
สูตรฝุ่น11	500	916.67	499.92	-	180	1 : 1.83 : 0.99 : 0 : 0.36
สูตรกาก 1	250	-	-	687.50	133	1 : 0 : 0 : 2.75 : 0.53
สูตรกาก 2	250	343.75	-	361.90	133	1 : 1.37 : 0 : 1.45 : 0.53
สูตรกาก 3	250	343.75	-	361.90	66.5	1 : 1.37 : 0 : 1.45 : 0.27
สูตรกาก 4	500	687.50	-	723.80	163	1 : 1.37 : 0 : 1.45 : 0.33
สูตรกาก 5	500	687.50	-	723.80	200	1 : 1.37 : 0 : 1.45 : 0.40

การทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี จำนวน 2 การทดสอบ ได้แก่

3.4. การทดสอบค่าปริมาณรังสีในวัตถุตัวอย่างและน้ำแขวนวัตถุตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ ยังได้ทำการทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี โดยการหาปริมาณรังสีจากตัวอย่างกากกัมมันตรังสีที่ผสมกับมอร์ตาร์และอัดขึ้นรูปเป็นทรงลูกบาศก์ และการหาปริมาณรังสีในน้ำที่นำก้อนวัตถุตัวอย่างไปแช่ไว้ในจำนวนเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากก้อนวัตถุตัวอย่าง อีกทั้งด้วยขอบเขตของงานวิจัยที่ต้องการนำไปใช้เพื่องานก่อสร้างฐานราก ซึ่งหมายถึงงานเสาเข็ม งานตอม่อ จำเป็นต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลานานอย่างน้อย 30-50 ปี ทำให้การนำน้ำที่แช่ตัวอย่างมาตรวจสอบปริมาณรังสี จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อทดสอบว่ามีการละลายของกากกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือไม่ จึงได้นำตัวอย่างน้ำมาวัดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการละลายของไอออนบวกลบที่ปะปนอยู่ในน้ำ เพื่อการยืนยันผลของการสลายตัวของกากกัมมันตรังสีในน้ำ

การเตรียมตัวอย่างทางรังสี

1) ก้อนวัตถุตัวอย่าง

นำกากกัมมันตรังสีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน มาผสมกับปูนซีเมนต์ น้ำกลั่น และทราย ตามตารางที่ 3 ทำการเตรียมตัวอย่างตามการทดลองของสูตรกาก จนกระทั่งได้ก้อนตัวอย่างที่แข็งตัวแล้ว



ภาพที่ 5 ก้อนวัตถุตัวอย่างสำหรับส่งวัดปริมาณรังสี

2) ตัวอย่างน้ำที่แช่วัตถุตัวอย่าง

นำก้อนวัตถุตัวอย่างที่ได้รับจากการตรวจวัดรังสี ไปแช่ในน้ำกลั่น โดยทุกตัวอย่างจะแบ่งการแช่น้ำ เป็น 3 ช่วง คือ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 6 ตัวอย่างน้ำสำหรับการตรวจวัดปริมาณรังสี

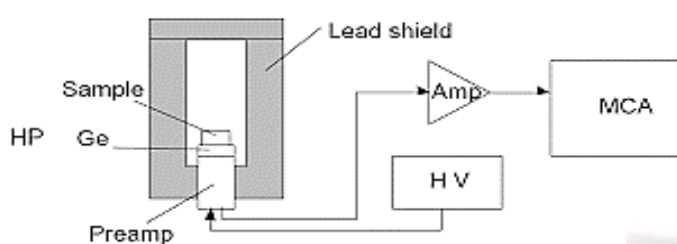
การตรวจวัดปริมาณรังสี

การตรวจวัดปริมาณรังสีในวัตถุตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้ชุดเครื่องวัดรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรี (Gamma spectrometry) ซึ่งเป็นหัววัดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High-purity germanium detectors, HPGe) หัววัดชนิดนี้เป็นหัววัดประเภทสารกึ่งตัวนำ เมื่อรังสีตกกระทบสารกึ่งตัวนำ จะเกิดจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นจำนวนมาก อิเล็กตรอนจากผลิกชนิดเอ็นจะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลิกชนิดพี และโฮลจากผลิกชนิดพี จะเคลื่อนกระจายผ่านรอยต่อไปในผลิกชนิดเอ็น เกิดเป็นแนวขั้วไฟฟ้าบวกในผลิกชนิดเอ็น และแนวขั้วไฟฟ้าลบ ในผลิกชนิดพี โดยมีรอยต่ออยู่ตรงกลาง P-N junction จนมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจากแนวขั้วบวกไปยังแนวขั้วลบ ตรงบริเวณระหว่างแนวขั้วไฟฟ้าจะไม่มีตัวนำประจุเหลืออยู่เลย เรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) ซึ่งทำหน้าที่นำพาข้อมูลของพลังงานรังสีแกมมา ค่าเฉลี่ยพลังงานต่อการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล มีค่าประมาณ 3 eV

งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างกากกัมมันตรังสีไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของกัมมันตรังสีเริ่มต้น (initial activity) ก่อนกระบวนการสร้างก้อนวัตถุตัวอย่าง (Cube) ที่ผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 6 เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัตถุตัวอย่างในแต่ละรอบ โดยตัวอย่างทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์จากพลังงานของรังสีแกมมาที่ 662 keV ซึ่งปลดปล่อยจาก Cs-137 ด้วยเครื่อง HPGe Gamma spectrometry

ขั้นตอนดำเนินการ

เตรียมตัวอย่างทางรังสีตามภาพที่ 5 และ 6 ไปทำการวัดหาขนาดกัมมันตภาพรังสีจากชุดเครื่องวัดรังสีแกมมาสเปกโตรเมตรี ของบริษัท CANBERRA รุ่น GR2519 โดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง 2,000 โวลต์ ให้กับหัววัดที่ถูกกำบังรังสีด้วยตะกั่วรูปทรงกระบอก และทำการวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) โดยระบบการวัดดังภาพที่ 6 โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการวัดรังสีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่ง Full width at Half-Maximum (FWHM) ของหัววัดขนาด 1.82 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่พลังงาน 1.33 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ต่อกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณชนิดหลายช่อง (Multichannel Analyzer : MCA) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ Gamma Acquisition & Analysis ในการวิเคราะห์สเปกตรัม



ภาพที่ 7 ระบบวัดรังสีแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

3.5 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำคือความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า เกลือ หรือสารเคมีอื่น ๆ ที่ละลายในน้ำ ซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกและลบได้เพราะไอออนอิสระเหล่านี้สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ในน้ำ ดังนั้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน ซึ่งที่มาของไอออนเหล่านี้มาจากความเค็มและของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS) สารเคมีและโลหะหนักที่เจือปนในน้ำทำให้น้ำสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งทั้งหมดนี้ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ ซึ่งช่วยในการระบุความบริสุทธิ์ของน้ำ ยิ่งน้ำบริสุทธิ์ ค่าการนำไฟฟ้ายิ่งต่ำ (น้ำบริสุทธิ์ค่า conductivity เป็น 0) เช่น น้ำกลั่น มีค่าการนำไฟฟ้าเกือบเท่ากับศูนย์หรืออาจกล่าวได้ว่าเกือบเป็นฉนวนไฟฟ้า ในขณะที่น้ำเค็มสามารถนำไฟฟ้าได้ดี

ตามระบบหน่วย SI (International Systems of Units) หน่วยของค่าการนำไฟฟ้าคือ ซีเมนส์ต่อเมตร (S/m) ทั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าจะแปรผันได้ง่ายต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงควรบันทึกที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ 25°C



ภาพที่ 8 การตรวจวัดค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านงานก่อสร้างฐานราก

4.1.1 การทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์

ในการทำครั้งที่ 3.1.1 เลือกใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก รุ่น M 299 เนื่องจากตั้งสมมุติฐานไว้ว่า ต้องการให้เป็นปูนซีเมนต์ที่ช่างก่อสร้างใช้ในงานก่อสร้างจริงและสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด แต่ผลการทดลองที่ได้ทำให้เห็นว่าไม่สามารถใช้ปูนชนิดนี้ได้ เพราะมีการผสมสารเคมีอื่น ๆ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของปูน อีกทั้งผู้วิจัยและผู้ช่วยวิจัยยังไม่ชำนาญในการผสมปูนและการใช้เครื่องมือต่าง ๆ จึงทำให้ผลการทดลองเกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 4 ปริมาณปูนซีเมนต์ ประเภทไฮดรอลิก รุ่น M 299 และน้ำกลั่น

ครั้งที่	ชนิดปูนซีเมนต์	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปริมาณ น้ำกลั่น(กรัม)	นาฬิกา	ผลต่าง มิลลิเมตร
1	ไฮดรอลิก รุ่น M 299 (24 ธันวาคม 2564)	650.62	162.53	0	1.5
				15	

สำหรับการทดลองครั้งที่ 3.1.2 เปลี่ยนชนิดปูนซีเมนต์เป็น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ทดแทน ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก รุ่น M 299 ทั้งนี้ได้ควบคุมน้ำหนักของปูนซีเมนต์และน้ำกลั่นอย่างเคร่งครัด รวมถึงอุณหภูมิและความชื้นขณะทำการทดลองด้วย

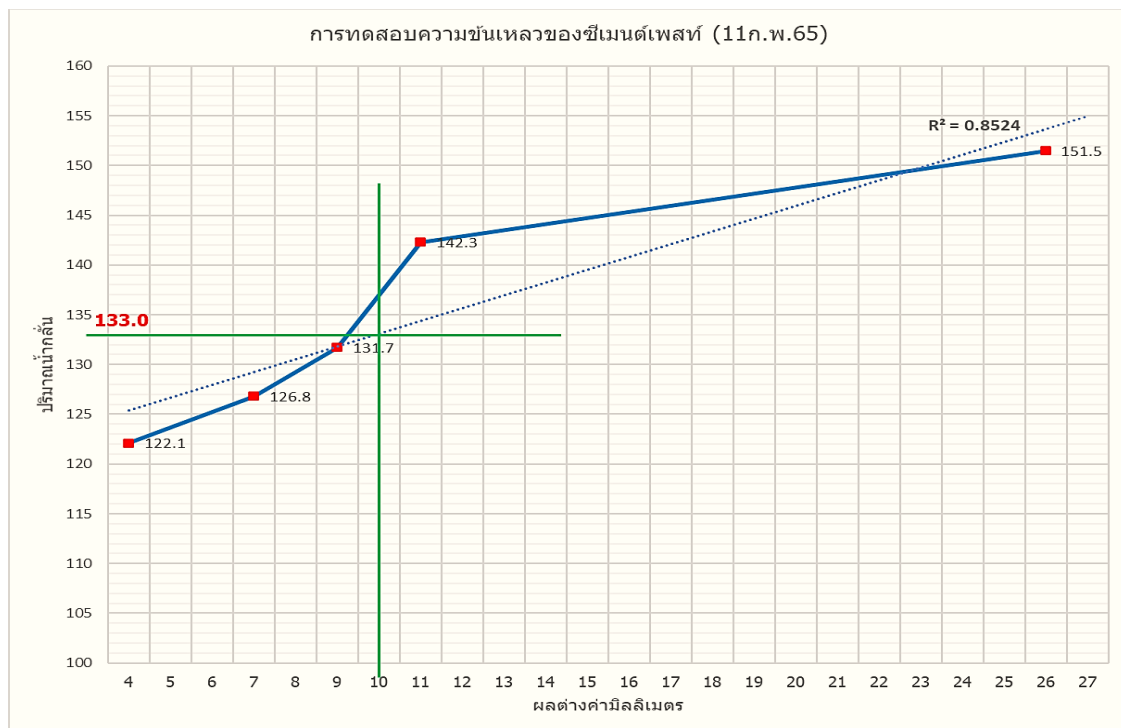
น้ำหนักถุงพลาสติกใส ขนาด 7 x 11 นิ้ว น้ำหนัก 3.2 กรัม และขนาด 6 x 9 นิ้ว น้ำหนัก 1.8 กรัม

น้ำหนักปิกเกอร์ ขนาด 200 ml น้ำหนัก 196.2 กรัม

อุณหภูมิห้อง 32 °C

ตารางที่ 5 ข้อมูลผลการทดลองการทดสอบความชื้นเหลือของซีเมนต์เพสต์

ครั้งที่	ชนิดปูนซีเมนต์	ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปริมาณน้ำกลั่น (กรัม)	นาฬิกาที่	ผลต่าง มิลลิเมตร
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (6 กุมภาพันธ์ 2565)	502.3	151.5	0	26
				30	
2		502.1	142.3	0	11
				30	
3		502.8	131.7	0	9
				30	
4		502.4	126.8	0	7
				30	
5		502.4	122.1	0	4
				30	



ภาพที่ 9 กราฟความสัมพันธ์การทดสอบความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์

ผลจากเส้นตัดกราฟที่ค่าผลต่างมิลลิเมตรเท่ากับ 10 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับปริมาณน้ำกลั่น 133 กรัม ดังนั้น ปริมาณน้ำกลั่นที่ต้องใช้เพื่อนำไปทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ คือ 133 กรัม ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 500 กรัม

4.1.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคต

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Initial Setting Time) โดยนำข้อมูลจากผลการทดสอบความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์ คือ ปูนซีเมนต์ น้ำหนัก 500 กรัม และน้ำกลั่น 133 กรัม เป็นปริมาณตั้งต้น

ตารางที่ 6 ข้อมูลผลการทดลองการหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 1

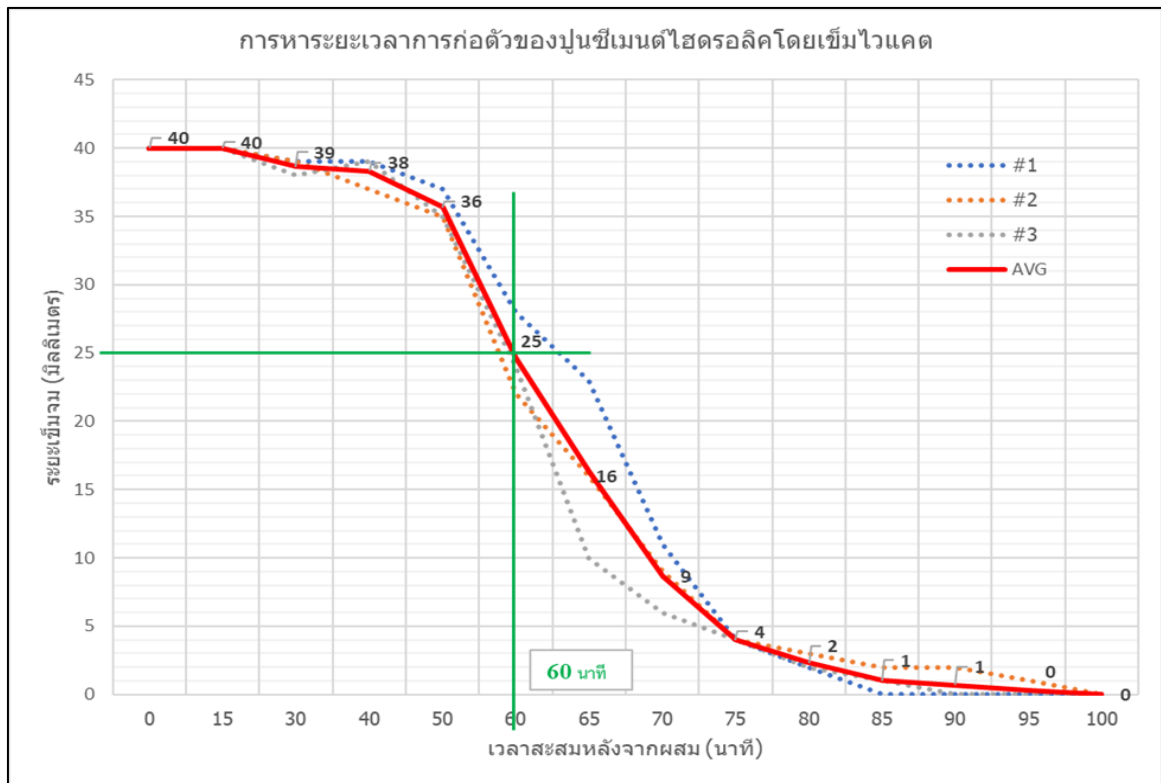
เวลาเริ่มผสม	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาปล่อยเข็ม	ค่าต่างเวลาการปล่อยเข็ม (นาท)	เวลาสะสมหลังจากผสม (นาท)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
14.05	79	29.1	14.07	0	0	40
	79	29.1	14.22	15	15	40
	79	29.1	14.37	15	30	39
	79	29.1	14.47	10	40	39
	76	29	14.57	10	50	37
	76	29	15.07	10	60	28
	74	30	15.12	5	65	23
	74	30	15.17	5	70	11
	74	30.2	15.22	5	75	4
	74	30.2	15.27	5	80	2
	74	30.2	15.33	5	85	0

ตารางที่ 7 ข้อมูลผลการทดลองการหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 2

เวลา เริ่มผสม	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา ปล่อยเข็ม	ค่าต่างเวลาการ ปล่อยเข็ม (นาทีก)	เวลาสะสม หลังจากผสม (นาทีก)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
15.35	72	30.1	15.37	0	0	40
	72	30.1	15.52	15	15	40
	71	30.1	16.07	15	30	39
	72	29	16.17	10	40	37
	72	29	16.27	10	50	35
	74	28	16.37	10	60	22
	74	28	16.42	5	65	16
	74	28	16.47	5	70	9
	75	28.5	16.52	5	75	4
	75	28.5	16.57	5	80	3
	77	28.2	17.02	5	85	2
	77	28.2	17.07	5	90	2
	77	28.2	17.12	5	95	1
	77	28.2	17.17	5	100	0

ตารางที่ 8 ข้อมูลผลการทดลองการหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ รอบที่ 3

เวลา เริ่มผสม	ความชื้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา ปล่อยเข็ม	ค่าต่างเวลาการ ปล่อยเข็ม (นาทีก)	เวลาสะสม หลังจากผสม (นาทีก)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
17.19	79	28.3	17.21	0	0	40
	79	28.3	17.36	15	15	40
	79	28.3	17.51	15	30	38
	81	28.2	18.01	10	40	39
	81	28.2	18.11	10	50	35
	81	28.2	18.21	10	60	24
	81	28.2	18.26	5	65	10
	79	28.2	18.31	5	70	6
	79	28.2	18.36	5	75	4
	79	28.2	18.41	5	80	2
	79	28.2	18.46	5	85	1
	80	27	18.51	5	90	0



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบผลการทดลองการหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า จุดตัดระยะเข็มจม ที่ 25 มิลลิเมตร อ่านค่าเวลาสะสมหลังจากการผสมได้เท่ากับ 60 นาที ซึ่งหมายความว่า ในการทดลองครั้งต่อ ๆ ไป หากใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณ 500 กรัม น้ำกลั่น 133 กรัม จะมีเวลาให้ 60 นาที ก่อนที่ปูนจะแข็งตัว

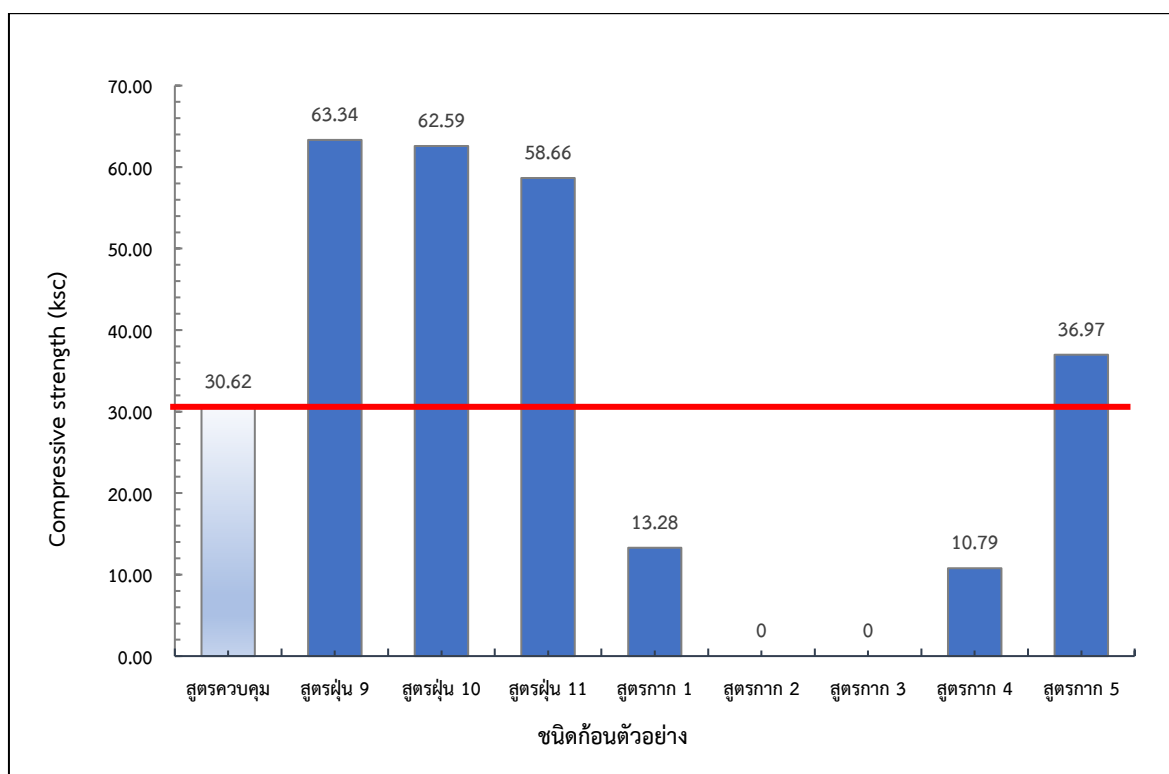
4.1.3 การทดสอบค่าแรงอัดของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมฝุ่นแดงไม่เปื้อนวัสดุกัมมันตรังสี และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมกากกัมมันตรังสี

ผลการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ ประกอบด้วย

- สูตรควบคุม เป็นมอร์ตาร์
- สูตรฝุ่น เป็นมอร์ตาร์ผสมฝุ่นไม่ปนเปื้อน
 - สูตรฝุ่น 9
 - สูตรฝุ่น 10 และ
 - สูตรฝุ่น 11
- สูตรกาก เป็นมอร์ตาร์ผสมกากกัมมันตรังสีปนเปื้อนซีซีเอ็ม-137
 - สูตรกาก 1
 - สูตรกาก 2
 - สูตรกาก 3
 - สูตรกาก 4 และ
 - สูตรกาก 5

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์

สูตร	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
สูตรควบคุม	12.17	9.73	29.01	64.48	56.79	30.62
สูตรฝุ่น 9	-	-	-	-	-	63.34
สูตรฝุ่น 10	-	-	-	9.00	-	62.59
สูตรฝุ่น 11	-	-	-	7.76	-	58.66
สูตรราก 1	4.31	9.33	16.41	-	18.51	13.28
สูตรราก 2	5.89	-	-	-	-	-
สูตรราก 3	2.12	-	-	-	-	-
สูตรราก 4	2.63	-	-	3.88	8.78	10.79
สูตรราก 5	1.60	4.44	8.39	46.51	50.28	36.97



ภาพที่ 11 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงอัดของก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์

จากผลการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรควบคุม สูตรฝุ่น และสูตรกาก พบว่า ก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรฝุ่น ทั้ง 3 สูตร มีค่าแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรควบคุม เนื่องจาก ฝุ่นแดงไม่ปนเปื้อนวัสดุกัมมันตรังสีมีขนาดเล็ก ทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้ดี จนทำให้ลักษณะของก้อนตัวอย่างมีความแน่นมากขึ้น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จึงสูงกว่าสูตรควบคุม ในขณะที่ตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรกาก ทั้ง 5 สูตร มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยในสูตรกาก 2 และ 3 ไม่แข็งตัว สูตรกาก 1 และ 4 มีค่าแรงอัดของก้อนตัวอย่างน้อยกว่า ตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรควบคุม แต่มีสูตรกาก 5 มีค่าแรงอัดของก้อนตัวอย่างสูงกว่าสูตรควบคุม คิดเป็น 20%

4.2 ผลการทดสอบด้านความปลอดภัยทางรังสี

4.2.1 การทดสอบค่าปริมาณรังสีในวัตถุตัวอย่าง

1) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Specific activity: S.A.) ของตัวอย่างฝุ่นโลหะ ก่อนนำไปผสมตามสูตรการทดลองต่าง ๆ โดยเป็นการคำนวณจากผลการเส้นตรงที่ได้จากการปรับเทียบมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary Standard Calibration Method)

ตารางที่ 10 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างฝุ่นโลหะ

Sample ID	Weight sample (g)	S.A. (Bq/g)
A-0	300.065	0.815 ± 0.196

2) ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของก้อนวัตถุตัวอย่าง ตามสูตรควบคุมและสูตรกาก ซึ่งค่า S.A. ที่ตรวจวัดได้ ถือเป็นค่ากัมมันตภาพจำเพาะโดยรวมของก้อนวัตถุตัวอย่างทั้งก้อน โดยมีค่าเฉลี่ย $MDA = 0.003 \text{ Bq/g}$

ตารางที่ 11 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของก้อนวัตถุตัวอย่าง

Sample ID	Sample Weight (g)	Waste Weight (g)	S.A. (Bq/g)
ชุดควบคุม	299.463	0	N/A
สูตรกาก 1	303.63	687.5	1.377 ± 0.208
สูตรกาก 2	302.20	361.9	0.502 ± 0.191
สูตรกาก 3	248.17	361.9	0.523 ± 0.200
สูตรกาก 4	239.77	723.8	1.474 ± 0.200
สูตรกาก 5	277.80	723.8	1.512 ± 0.195
32%	350.25	160	0.021 ± 0.200
44%	314.49	220	0.122 ± 0.194
51%	320.26	255	0.216 ± 0.200

หมายเหตุ LLD หมายถึง Low limit of detection และ N/A หมายถึง ไม่พบพลังงานของนิวไคลด์ที่ต้องการ

4.2.2 การทดสอบค่าปริมาณรังสีในน้ำแขวนตะกอนตัวอย่าง

ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างน้ำ โดยเป็นการคำนวณเทียบกับสารมาตรฐาน (Multi-nuclides standard) ในปริมาณของตัวอย่างที่หน่วยมิลลิลิตร

ตารางที่ 12 ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของตัวอย่างน้ำ

Sample ID	Liquid Sample Weight (g)	S.A. (Bq/ml)
ชุดควบคุม	227.8	N/A
สูตรกาก 1	237.9	0.322 ± 0.205
สูตรกาก 2	203.7	LLD
สูตรกาก 3	300.5	LLD
สูตรกาก 4	278.6	0.861 ± 0.202
สูตรกาก 5	193.3	0.855 ± 0.200
32%	166.4	LLD
44%	307.3	LLD
51%	375.1	LLD

หมายเหตุ LLD หมายถึง Low limit of detection และ N/A หมายถึง ไม่พบพลังงานของนิวไคลด์ที่ต้องการ

4.2.3 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้า

การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นส่วนผสม เพราะน้ำกลั่นมีค่าการนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าที่อ่านได้หลังจากนำก้อนวัตถุตัวอย่างมาทำการทดลอง จึงแสดงถึงปริมาณเกลือ Cs-137 ที่ละลายออกมาจากก้อนวัตถุตัวอย่าง จากผลการทดลองทำให้ทราบได้ว่าปริมาณค่าการนำไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยหลังจากการทดลองครั้งที่ 1 ซึ่งแช่น้ำไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับในกระบวนการทดลองครั้งที่ 2 (3 ชั่วโมง) และ 3 (24 ชั่วโมง) แสดงว่าค่าการนำไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับเวลาที่ทำการแช่น้ำไว้

ตารางที่ 13 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

น้ำหลังการสกัดจากก้อนวัตถุตัวอย่าง	ค่าการนำไฟฟ้า (mS)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	3.28	5.46	9.08
สูตรผสมกากกัมมันตรังสี 1	4.25	6.71	12.50
สูตรผสมกากกัมมันตรังสี 2	3.55	5.35	10.77
สูตรผสมกากกัมมันตรังสี 3	3.35	5.89	12.47
สูตรผสมกากกัมมันตรังสี 4	5.20	8.04	13.87
สูตรผสมกากกัมมันตรังสี 5	5.95	8.38	14.09
32%	3.35	5.89	12.47
44%	4.15	6.82	14.10
51%	5.20	8.04	13.87

บทที่ 5 บทวิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่จะนำไปใช้ในการผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ตลอดงานวิจัย จากผลการศึกษาและทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ที่ปริมาณ 133 กรัม

และจากผลการศึกษาหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ได้ระยะเวลา ก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ที่เวลา 60 นาที ก่อนที่ปูนจะแข็งตัว

ดังนั้น จากผลการศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่ได้ จึงมีแนวทางขั้นพื้นฐานในการนำไปใช้ศึกษาในส่วนของการผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ที่จะมีการใส่ปริมาณกากกัมมันตรังสีปนเปื้อน Cs-137 ทดแทนปริมาณทรายต่อไป

การดำเนินงานขั้นต่อมา คือการศึกษาการจัดทำสูตรตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ โดยแบ่งออกเป็น 3 สูตรหลัก คือ สูตรควบคุม สูตรฝุ่น และสูตรกาก จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ก้อนตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์ สูตรกาก 5 ที่มีอัตราส่วนของสูตรผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากกัมมันตรังสีปนเปื้อน Cs-137 : น้ำ เท่ากับ 1: 1.37: 1.45: 0.40 นั้น มีค่าแรงอัดสูงกว่าสูตรตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรควบคุมที่มีอัตราส่วนของสูตรผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : กากกัมมันตรังสีปนเปื้อน Cs-137 : น้ำ เท่ากับ 1: 2.75: 0: 0.27 ประมาณ 20% โดยสูตรตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรควบคุมมีค่าแรงอัด 30.62 ksc ในขณะที่สูตรตัวอย่างผสมซีเมนต์เพสต์สูตรกาก 5 มีค่าแรงอัด 36.97 ksc

การตรวจสอบความปลอดภัยทางรังสีในก้อนวัตถุตัวอย่างและตัวอย่างน้ำ เริ่มจากการนำตัวอย่าง กากกัมมันตรังสีที่ปนเปื้อนอยู่ในเศษโลหะ ปริมาตร 300.065 กรัม มาหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Specific activity: S.A.) ก่อนทำการทดลอง ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.815 ± 0.196 Bq/g เมื่อนำกากกัมมันตรังสีมาผสมกับมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ น้ำ และทราย) ตามสูตรผสมต่าง ๆ แล้วนำไปหาค่ากัมมันตภาพจำเพาะซ้ำ พบว่าก้อนวัตถุตัวอย่างตามสูตรผสมกาก 2 มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะน้อยที่สุด คือ 0.502 ± 0.194 Bq/g และก้อนวัตถุตัวอย่างตามสูตรผสมกาก 5 มีค่ากัมมันตภาพจำเพาะมากที่สุด คือ 1.512 ± 0.195 Bq/g สำหรับตัวอย่างน้ำพบว่าค่ากัมมันตภาพจำเพาะ เป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการวัดจากก้อนวัตถุตัวอย่าง คือ ค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง LLD (Low limit of detection) และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.855 ± 0.200 Bq/g

เมื่อนำผลค่ากัมมันตภาพจำเพาะมาเทียบกับระดับค่ากัมมันตภาพจากเกณฑ์การยกเว้น (exempt activity concentrations) จากเอกสาร Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic, Safety Standards, General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3) สำหรับ Cs-137 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 Bq/g นั้นแสดงว่า หากต้องการนำกากกัมมันตรังสีมาใช้ในการก่อสร้างฐานรากอย่างปลอดภัยทางรังสี จำเป็นต้องลดปริมาณ กากกัมมันตรังสีที่ผสมในงานก่อสร้าง ให้อยู่ในช่วง 32% - 44% ซึ่งจะทำให้ได้ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ เท่ากับ 0.021 ± 0.200 Bq/g - 0.122 ± 0.194 Bq/g หรืออาจเลือกใช้การเพิ่มปริมาตรของปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ แทนการลดปริมาตรของกากกัมมันตรังสีแทน แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องตรวจสอบค่าความต้านทานแรงอัดอีกครั้งหนึ่งด้วย

ค่าการนำไฟฟ้า แสดงผลให้เห็นชัดเจนว่า เมื่อนำก้อนวัตถุตัวอย่างแช่ไว้ในน้ำกลั่นในเวลาที่นานขึ้น จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น หมายถึงมีการละลายของเกลือ Cs-137 ออกมาจากก้อนวัตถุตัวอย่างมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาวิธีการลดการชะล้างของเกลือ Cs-137 เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำจนกลายเป็นกากกัมมันตรังสี และโอกาสการเกิดสนิมของโครงสร้างงานฐานราก

เอกสารอ้างอิง

- ชูโบหย๊ะ กะเต็ง, และ พวงทิพย์ แก้วทับทิม. (2556). อัตราการตกตะกอนในอ่าวปัตตานีโดยวิธีการวิเคราะห์ไอโซโทปรังสี Cs-137 (The Sedimentation Rate in Pattani Bay by Isotope Analysis Cs-137 Methods). การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มสธ. ครั้งที่ 3. อาคารสัมมนา 1-2 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. 3-4 กันยายน 2556.
- สุริชาติ เจนจิระปัญญา, และ ปิตินันต์ กร้ามาตร. (2557). การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสาน ที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม. The Journal of Industrial Technology. Vol. 12 No. 2: May - August 2016.
- มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม, สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, และ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคต (Test for Normal Consistency and Time of Setting of Cement by Vicat Apparatus). แหล่งข้อมูล: <https://civil.eng.cmu.ac.th/courses/materials-testing/c1>. 18 พฤศจิกายน 2565.
- บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ซีเซียม-137 (Caesium-137). แหล่งข้อมูล: <https://www.nst.or.th/article/article54/article54-004.html>. 18 พฤศจิกายน 2565.
- IAEA Safety Standards Series. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic, Safety Standards, General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3). Austria. July 2014.