การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยปูนซีเมนต์ผสมผงตะกรันเหล็กและเถ้าชีวมวลจากโรงงานผลิตกระดาษ

วฤธ รัตนรุ่งโรจน์ , ศุภกิจ นนทนานันท์ และ อัครชัย เรืองแสงทอง[3]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

*

เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดความต้องการหาวัสดุทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ลง เช่น การใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปผลิตคอนกรีต [2] เสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ [3] การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว [4]

ตะกรันเหล็ก (Iron Slag, IS) จากเตาหลอมเหล็กผลิตผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กในการหลอมเศษเหล็กเพื่อนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่ จัดเป็นขยะโรงงานอุตสาหกรรมและตะกรันเหล็กส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอสโซลาน และสามารถใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตได้ ซึ่งคุณภาพของตะกรันเหล็กขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ส่วนผสมทางเคมี อัตราการเย็นตัว วิธีการหลอม เป็นต้น [5]

เถ้าชีวมวล (Biomass Ash, BA) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยการเผาวัสดุชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งในแต่ละปีจะมีเถ้าชีวมวลเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งสูง ดังนั้นการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างนอกจากจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเพิ่มขึ้นของขยะแล้ว ยังเป็นการเสาะแสวงหาแหล่งวัตถุดิบใหม่อีกด้วย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยควรมีการแสวงหาแหล่งวัตถุดิบตั้งต้นใหม่จากกากอุตสาหกรรมที่สอดคล้องกับหลักการวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดนำดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปะเภทที่ 1 ผสมตะกรันเหล็กจากกระบวนการหลอมเหล็ก และเถ้าชีวมวลจากอุตสาหกรรมโรงงานกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมที่ยังไม่มีผู้ศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย มาปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งนอกจากจะเป็นการแก้ไขปัญหาเรื่องการจัดการกากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีแล้วยังเป็นการเสาะแสวงหาแหล่งวัตถุดิบใหม่อีกด้วย

2. วัสดุในงานวิจัย

ดินเหนียวอ่อน เก็บที่ความลึก 5-10 เมตร บริเวณศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าสายสีส้ม เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ รูปที่ 1 แสดงลักษณะของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ซึ่งการเก็บตัวอย่างมีการป้องกันการสูญเสียความชื้น โดยมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 15.40 kN/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.70 มีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับร้อยละ 95.83 มีค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 32.09 มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติกเท่ากับร้อยละ 63.73 เป็นดินที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) เมื่อจำแนกโดยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) [6] โดยมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่า 14.51 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 20 และมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว 15.69 kN/m^2 เป็นค่า Baseline ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ [7] องค์ประกอบทางเคมีของดินเมื่อวิเคราะห์โดย X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ตะกรันเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก จ. ปราจีนบุรี มีลักษณะเป็นก้อนผลึกแข็งที่มีรูพรุน เมื่อผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่อง Los Angeles และผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะมีลักษณะเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 2 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยกระบวนการทดสอบ XRF ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าผลรวมของ $SiO_2 + AL_2O_3 + Fe_2O_3$ มีค่ามากกว่าร้อยละ 70 จึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอสโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังคุณภาพต่ำเพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง เมื่อผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม [9]



รูปที่ 2 ผงตะกรันเหล็ก

เถ้าชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ จ. ปราจีนบุรี มีลักษณะเป็นผงแป้งเนื้อละเอียด ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยกระบวนการ (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3 เถ้าชีวมวล

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยเป็น Portland cement Type 1 (PC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [10] ดังรูปที่ 4 มีองค์ประกอบทางเคมีที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วย XRF แสดงแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ผงตะกรันเหล็ก และเถ้าชีวมวล

องค์ประกอบทางเคมี	ชนิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
SiO_2	56.08	14.94	40.78	35
Al_2O_3	14.75	3.56	9.14	14.13
Na_2O	0.74	0.17	0.27	0.76
MgO	2.17	1.10	0.76	3.32
P_2O_5	0.11	0.07	-	0.76
SO_3	2.41	3.93	0.22	6
Cl	0.40	0.06	0.07	0.42
K_2O	2.44	0.53	0.49	3.17
CaO	2.61	66.78	4.85	14.61
TiO_2	1.00	0.29	1.20	0.82
MnO	0.15	0.06	19.70	0.42
Fe_2O_3	8.08	3.33	20.77	12.92
SrO	0.02	0.04	0.06	0.12
BaO	0.03	0.04	-	0.13
ZrO_2	0.04	0.05	0.04	0.02
LOI	8.96	8.96	-	7.37

3. การทดสอบ

3.1 การทดสอบหาสัดส่วนสารเชื่อมประสานที่เหมาะสม

การออกแบบหาสัดส่วนเชื่อมประสานที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้เกณฑ์ความสามารถในการแข็งตัวได้ (Self-hardening properties) ของวัสดุเชื่อมประสาน (Hydration Modulus) ที่เสนอโดย Kamon and Nontananandh [11] โดยการทดลองใช้ PC : IS : BA ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485 ที่อายุการบ่ม 3 วันตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด (11,767.98 kN/m^2) ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 3 ผลการทดสอบเพื่อพิจารณาเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด พบว่า BA มีความเป็นวัสดุปอซโซลานมากกว่า IS อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้ กากอุตสาหกรรมที่หลากหลายให้เกิดประโยชน์ โดยมีปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์รวม (SO_3) อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (21,503.04 kN/m^2) ค่าสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกสัดส่วนผสม M4 ซึ่งมีอัตราส่วน PC : IS : BA เท่ากับ 75 : 12.5 : 12.5 สำหรับปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพต่อไป

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ ผงตะกรันเหล็ก เถ้าชีวมล

สัญลักษณ์			
1	100	-	-
2	75	25	-
3	75	18.75	6.25
4	75	12.5	12.5
5	75	6.25	18.75
6	75	-	25

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของซีเมนต์มอร์ต้าที่อายุการบ่ม 3 วัน

สัญลักษณ์		กำลังรับแรงอัด ^{2}
1	100 : 0 : 0	256.73
2	75 : 25 : 0	164.60
3	75 : 18.75 : 6.25	178.59
4	75 : 12.5 : 12.5	215.03
5	75 : 6.25 : 18.75	168.64
6	75 : 0 : 25	214.55

3.2 การทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยสารเชื่อมประสาน

3.2.1 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสม

นำสัดส่วนผสมของสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมดังกล่าวไปผสมกับดินเหนียวอ่อนตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการอบด้วยความร้อน และย่อยให้มีขนาดเล็กร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานต่อ

ดินเหนียวอ่อน เท่ากับ 150, 200 และ 250 kg/m^3 (CSA150, CSA200 และ CSA250 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่แนะนำสำหรับการปรับปรุงชั้นดินอ่อนในงานก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยกรมทางหลวง [13] จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 698 [14] โดยใช้แบบทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.16 cm และมีความสูง 11.64 cm โดยเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาความชื้นเหมาะสมสำหรับนำไปทดสอบ CBR (California Bearing Ratio)

3.2.2 การทดสอบ CBR (California Bearing Ratio)

นำตัวอย่างดินซีเมนต์ตามสัดส่วนผสมดังกล่าวทดสอบหาค่า CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883-99 [15] โดยทดสอบทั้งแบบแช่น้ำ (Soaked) และแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าร้อยละ CBR, การบวมตัว และการสูญเสียกำลังภายใต้สภาวะเปียก

3.2.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

นำดินเหนียวอ่อนที่ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (w_n = 71.96 %) ผสมสารเชื่อมประสานที่ได้คัดเลือกแล้ว (M4) ที่อัตราส่วน 150, 200 และ 250 kg/m^3 ด้วยเครื่องผสม Hobart Mixer นำไปหล่อในแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.6 cm สูง 7.2 cm แล้วทำการหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น เพื่อนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตามมาตรฐาน ASTM D2166 [16] โดยทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

3.2.4 การทดสอบด้านเคมีกายภาพ (Physico chemical property)

ภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ได้เก็บตัวอย่างดินบริเวณระนาบที่เกิดการพังทลาย เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้น Tricalcium Silicate Hydrate (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลัก (Bouque's compound) ในปูนซีเมนต์และสารผลิตภัณฑ์ Calcium silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อายุการบ่มต่างๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ส่องกราดตัวอย่างที่มุม 2θ ในช่วง 5 – 90 องศา และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารตั้งต้นที่ลดลง สารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับกำลังที่เพิ่มขึ้น เพื่อใช้อธิบายกลไกปฏิกิริยาการพัฒนากำลัง

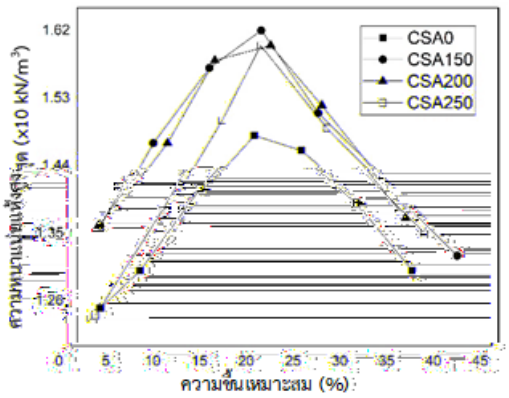
4. ผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความหนาแน่นแบบมาตรฐาน พบว่าดินเหนียวอ่อนที่ผสมวัสดุเชื่อมประสานหลังผสมทันทีทุกสัดส่วนผสมมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 15.70 – 15.90 kN/m^3 โดยมีค่าความชื้นเหมาะสมลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 19.00 – 19.68 เมื่อสัดส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงตารางที่ 4 และในรูปที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบ CBR ที่อายุการบ่ม 28 วัน และรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารเชื่อมประสานกับ unsoaked และ soaked CBR ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนสารเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่า CBR แบบไม่แช่น้ำมากกว่าแบบแช่น้ำในทุกอัตราส่วนผสม การสูญเสียกำลัง (Strength loss) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจาก 150 เป็น 200 kg/m^3 อย่างไรก็ตามการสูญเสียกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นเป็น 250 kg/m^3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการบวมตัว (Swelling) ของ CBR แบบแช่น้ำที่อัตราส่วน CSA150, CSA200, และ CSA250 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.05,0.03 และ 0.055 ทั้งนี้ในสัดส่วนผสมที่มีค่าการบวมตัวไม่เกินร้อยละ 4 สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุคันทางได้ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 102/2532

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสม

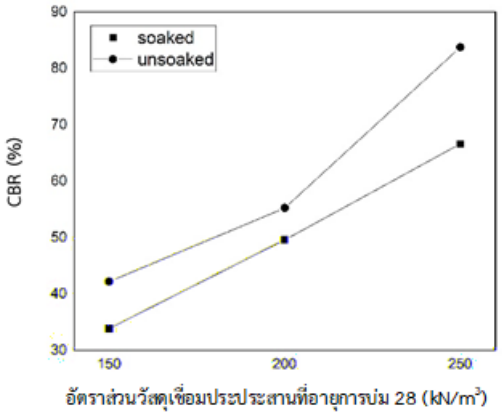
อัตราส่วนสารเชื่อมประสาน	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (	ความชื้นเหมาะสม (%)
150	1.59	19.68
200	1.57	19.33
250	1.57	19.00



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสม (%)

ตารางที่ 5 CBR (%) แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ และการสูญเสียกำลัง

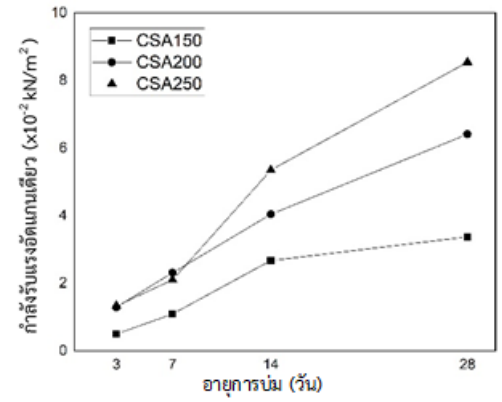
อัตราส่วนสารเชื่อมประสาน	ที่อายุการบ่ม 28 วัน		
	แบบไม่แช่น้ำ	แบบแช่น้ำ	การสูญเสียกำลัง
150	42.18	33.84	19.77
200	55.25	49.59	10.25
250	83.74	66.59	20.48



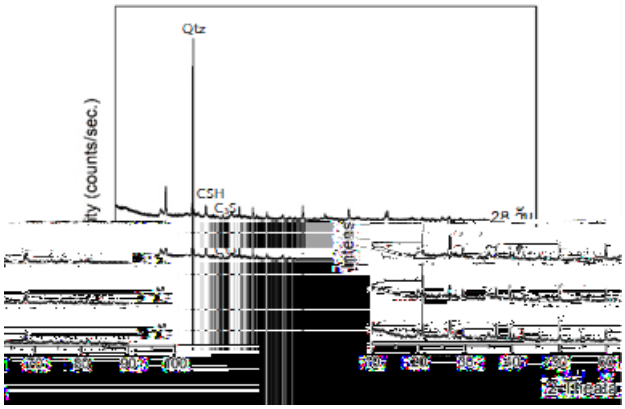
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR (%) และอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสาน

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและอายุการบ่ม

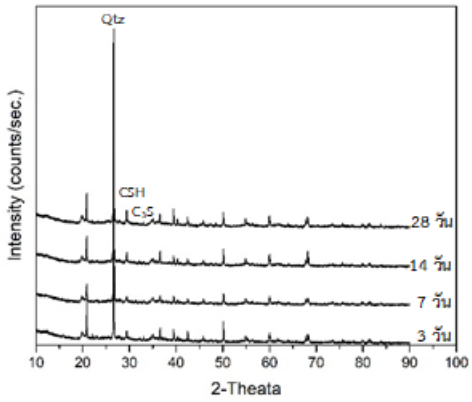
อัตราส่วนสารเชื่อมประสาน	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว)			
	วัน	วัน	วัน	วัน
CSA150	0.47	1.06	2.61	3.30
CSA200	1.26	2.26	3.96	6.28
CSA250	1.30	2.05	5.24	8.37



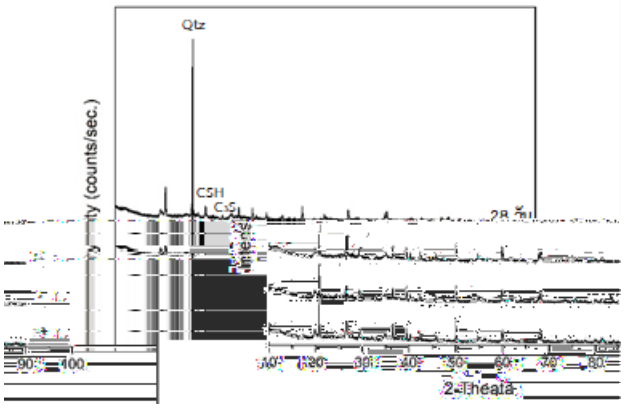
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม



(ก) CSA150



(ข) CSA200

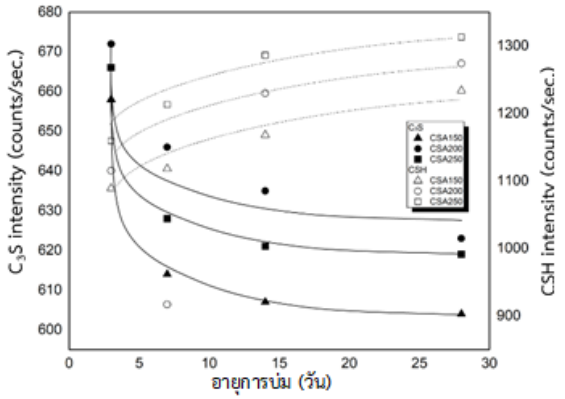


(ค) CSA250

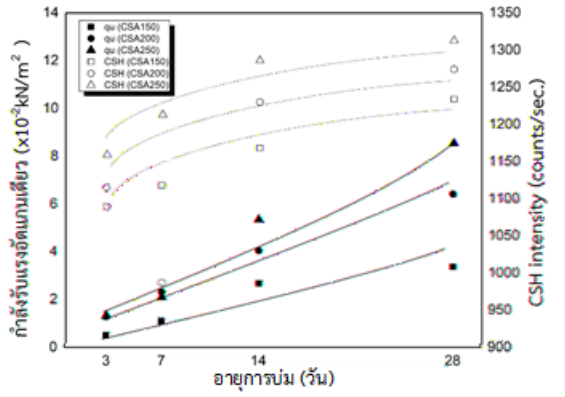
รูปที่ 8 ผลการทดสอบ XRD ของ ก) CSA150 ข) CSA200 ค) CSA250 ที่อายุการบ่ม 3,7,14 และ 28 วัน

ตารางที่ 7 ปริมาณสารประกอบ C_3S และ CSH จากการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

ตัวอย่าง								
	วัน	วัน	วัน	วัน	วัน	วัน	วัน	วัน
	658	614	607	604	1089	1118	1168	1234
	672	646	635	623	1115	987	1230	1274
	666	628	621	619	1159	1213	1286	1313



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบ C_3S และ CSH ที่อายุการบ่มต่างๆ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับสารประกอบ CSH ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มที่ทุกอัตราส่วนผสม พบว่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม ทั้งนี้อัตราการเพิ่มของกำลังในช่วงต้น (1 - 14 วัน) จะสูงกว่าในช่วงอายุการบ่มหลัง 14 วัน ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนที่ผสมวัสดุเชื่อมประสาน CSA200 และ CSA250 มีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วัน เท่ากับ 396.18 kN/m^2, 628.60kN/m^2 และ 524.65kN/m^2, 837.48 kN/m^2 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์การนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบ Dry Mixing ตามคู่มือการก่อสร้างทางหลวงเล่มที่ 2 [13]

รูปที่ 8 (ก), (ข) และ (ค) แสดงผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) ที่อัตราส่วนสารเชื่อมประสานที่ CSA150, CSA200 และ CSA250, ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน งานวิจัยนี้จำแนกสารผลิตพันธ์ CSH ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 29.43 องศา และสารตั้งต้น C_3S ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 33.31 องศา

ตารางที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์สารประกอบตั้งต้น C3S และสารผลิตภัณฑ์ CSH จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของทุกสัดส่วนผสมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน จากการทดสอบพบว่าปริมาณสารตั้งต้น C3S มีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่ม โดยมีอัตราการลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 1 – 3 วัน และค่อยๆลดลงจนใกล้ค่าคงที่เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ในขณะที่สารประกอบ CSH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 9 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10 อย่างไรก็ตามดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารเชื่อมประสานหลังอายุการบ่ม 28 วัน ยังมีแนวโน้มการพัฒนากำลังต่อไปได้อีกเล็กน้อย ซึ่งจะต้องมีการทดสอบเพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวต่อไป ผลการทดสอบ XRD ของดินเหนียวอ่อนที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน CSA200 ที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่ามีค่าไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบที่อายุการบ่มอื่นๆ ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรม จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความถี่ในการสุ่มเก็บตัวอย่างต่อไป

5. บทสรุป

จากผลการศึกษาวิจัยพบว่าปูนซีเมนต์ผสมผงตะกรันเหล็ก และเถ้าชีวมวลที่สัดส่วนผสมเหมาะสม (0.75 : 0.125 : 0.125) ที่อัตราส่วนผสม 150 – 250 kg/m^3 สามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้ เมื่อพิจารณาจากค่าเปอร์เซนต์ CBR และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม กำลังของดินเหนียวที่ผสมสารเชื่อมประสานมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและมีอัตราที่ลดลงหลังอายุการบ่ม 14 วัน ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพ โดยการวิเคราะห์ XRD พบว่า สารผลิตภัณฑ์ CSH มีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่สารตั้งต้น C_3S มีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่ม สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ซึ่งแสดงศักยภาพของการใช้ผงตะกรันเหล็กและเถ้าชีวมวลผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุทางเลือกในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เพื่อใช้ในด้านวิศวกรรมการทางได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และขอขอบคุณศูนย์บริการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการอนุเคราะห์ช่วยทดสอบชิ้นตัวอย่างดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ X-ray diffraction analysis (XRD)

เอกสารอ้างอิง

[1] สมมาตร์ สวัสดิ์, สราวุธ จริตงาม, ดนุพล ตันนโยภาส, พิพัฒน์ ทองฉิม (2551). การปรับปรุงดินคันทางด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจังหวัดสงขลาและสตูล. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, หน้า 74-79.

[2] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, พิชัย นิมิตยงสกุล (2538). การออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 3, เล่มที่ 2, หน้าที่ 24-45.

[3] ปริญญา คูณมี, วัชร ส่งเสริม, ธีรเดช วุฒิพรพันธ์ (2557). การใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 24, ฉบับที่ 1, หน้าที่ 103 – 110.

[4] ชยานนท์ ศรีเจริญ, รุ้งลาวัลย์ ราชัน (2557).การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 37, ฉบับที่ 2, หน้าที่ 151-164.

[5] วุฒินันท์ เหล่ามะลอ (2554). การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียว โดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[6] American Society for Testing and Materials (2011). ASTM D 2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM International.

[7] วรรณวรางค์ รัตนานิคม, สยาม ยิ้มศิริ (2560). กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ. วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 98, ปีที่ 29, หน้าที่ 9-22.

[8] American Society for Testing and Materials (2015). ASTM C 618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International.

[9] อภิชาติ วงษา, ศุภกิจ นนทนานันท์, สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว, อัครชัย เรืองแสงทอง (2563). การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังคุณภาพต่ำโดยตะกรันเตาหลอมเหล็กและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 58, เล่มที่ 2, หน้าที่ 370-379

[10] American Society for Testing and Materials (2005). ASTM C150 , Standard Specification for Portland Cement. ASTM International

[11] Kamon and Nontananandh (1991) Combining Industrial Waste with Lime for Soil Stabilization. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 117, no. 1

[12] American Society for Testing and Materials (2002). ASTM C109.. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International

[13] กรมทางหลวง (2550). การควบคุมงานก่อสร้างทาง. คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง เล่มที่ 2

[14] American Society for Testing and Materials (2000). ASTM D 698 - 00 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort ASTM International

[15] American Society for Testing and Materials (1999). ASTM D 1883 - 99. Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory Compacted Soils. ASTM International

[16] American Society for Testing and Materials (2011). ASTM D 2166. Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils. ASTM International.