

1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุที่รับกำลังได้ต่ำและมีการทรุดตัวสูงที่สามารถพบได้ทั่วไป แต่เมื่อจำเป็นต้องทำการก่อสร้างบนชั้นดินดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมโดยแนวความคิดพื้นฐานที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินประกอบไปด้วย การทำให้แน่น การเชื่อมประสาน การเสริมแรง และการระบายน้ำทั้งนี้การเชื่อมประสานคือการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เพื่อให้วัสดุมีความแข็งหรือกำลังที่สูงขึ้น ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมโยธา อาทิเช่น งานเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ในบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ [1] งานเสาเข็มดิน-ซีเมนต์เพื่อใช้ในระบบกำแพงกันดินสำหรับอาคารจอดรถของห้างสรรพสินค้า อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี [2] การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยวิธีเทคนิคการผสมลิกไนต์ในสนามโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ [3] ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวในการปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อให้มีเกณฑ์คุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานดังกล่าว

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงมีแนวความคิดในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้กากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม เช่น การนำกากตะกอนยางพาราจากตะกอนจากโรงงานน้ำตาล กากตะกอนเบียร์ และตะกอนสนิมมาเป็นวัสดุตั้งต้นทดแทนปูนขาวบางส่วนในการปรับปรุงคุณภาพดินให้ดียิ่งขึ้น [4] หรือการใช้กากดินขาว เถ้าลอย ลิกไนต์ เปลือกหอยแครง และผงหินปูนขาวในการพัฒนาซีเมนต์สังเคราะห์ เพื่อนำไปใช้เป็นปูนซีเมนต์ทางเลือกสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน [5] ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวความคิดทางด้านวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม [6] เช่นกัน

เถ้าซังข้าวโพด (Corn cob Ash, CCA) เป็นกากของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากการนำซังข้าวโพดมาทำเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทย ซึ่งปริมาณของเถ้าซังข้าวโพดนั้นเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ทำให้เกิดปัญหาในด้านการกำจัดของเสียหรือมลภาวะที่เกิดจากของเสียดังกล่าว จึงมีการศึกษาเพื่อนำเถ้าซังข้าวโพดมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยพบว่าเถ้าซังข้าวโพดที่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

4 ชั่วโมง จะมีปริมาณสารประกอบ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันได้ 72% ซึ่งจัดเป็นสารประกอบบอซโซลานชั้นคุณภาพชั้น N ตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ได้ [7]

ผงหินปูนขาว (Limestone Powder, LSP) เป็นวัสดุที่ได้จากการย่อยหินปูนเพื่อไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยอนุภาคของผงหินปูนขาวจะมีอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีแนวคิดที่จะนำผงหินปูนขาวมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยได้ทำการทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของผงหินปูนขาวด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Florescence Spectrometry หรือ XRF) จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบที่เป็นจุดเด่นของผงหินปูนขาวคือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออนในปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อีกด้วย [8]

งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวผสมปูนซีเมนต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนให้เป็นไปตามเกณฑ์ [6] โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังนี้ 1) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้เถ้าซังข้าวโพด ผงหินปูนขาว และซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน 2) เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าซังข้าวโพด ผงหินปูนขาว และซีเมนต์ 3) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุดังกล่าว

2. คุณสมบัติของวัสดุและสารทดสอบ

ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างดินแบบรบกวนที่เก็บจากเขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ ที่ระดับความลึก 4-7 ม. จากผิวดิน ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในห้องปฏิบัติการพบว่ามีปริมาณความชื้นในธรรมชาติเท่ากับ 72% ชิดจำกัดเหลว 79% ชิดจำกัดพลาสติก 28% ดัชนีพลาสติก 51% และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 จัดเป็นดินเหนียวประเภทดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (CH) ตามวิธีจำแนกดินระบบ Unified Soil Classification โดยมีกำลังรับแรงอัด

แกนเดี่ยวประมาณ 0.08-0.1 กก./ชม.² และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่ากำลังเท่ากับ 50% (E₅₀) ประมาณ 6-7 กก./ชม.²

ปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [9] ในขณะที่กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาใช้ประกอบไปด้วย เถ้าซังข้าวโพดซึ่งเป็นขี้เถ้าจากเชื้อเพลิงผลิตพลังงานความร้อนให้กับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัด นครราชสีมา และผงหินปูนขาวเป็นกากอุตสาหกรรมที่ได้จากการผลิตปูนซีเมนต์ในจังหวัดสระบุรี โดยองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนปูนซีเมนต์ เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาว ที่ได้จากการทดสอบทางองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสารผสมเพิ่ม

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	C	OPC	CCA	LSP
SiO ₂	56.08	14.94	59.54	0.3
Al ₂ O ₃	14.75	3.56	3.08	0.11
Fe ₂ O ₃	8.08	3.33	2.15	0.05
CaO	2.61	66.78	3.81	56.36
K ₂ O	2.44	0.53	13.65	-
MgO	2.17	1.1	3.17	0.47
SO ₃	2.41	3.93	2.45	-
Na ₂ O	0.74	0.17	1.28	-
LOI	8.96	5.05	6.28	42.68
รวม (%)	98.24	99.39	95.41	99.97

3. วิธีการและขั้นตอนการวิจัย

3.1 การออกแบบส่วนผสมสารเชื่อมประสาน

ขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้นจากการออกแบบส่วนผสมสารเชื่อมประสานที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยการออกแบบนั้นมีแนวคิดที่จะใช้ส่วนประกอบที่เป็นเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวให้ได้มากที่สุด รวมทั้งมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (q_u) และไฮเดรชันมอดูลัส (HM) ที่เหมาะสมที่สุด โดยค่า HM สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนสารประกอบทางเคมีดังสมการที่ 1 และ

ควรมีค่าอยู่ในช่วง 1.7-2.4 จึงจะทำให้สารเชื่อมประสานมีคุณภาพดี [4]

$$\text{Hydration Modulus} = \frac{\text{CaO}}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (1)$$

ทั้งนี้การออกแบบส่วนผสมเริ่มต้นจากการตั้งสมมติฐานโดยผสมปูนซีเมนต์และเถ้าซังข้าวโพดที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยคำนึงถึงค่า HM ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่ามีเพียงค่า HM ของอัตราส่วนผสม OPC:CCA เท่ากับ 90:10 และ 80:20 เท่านั้นที่มีค่าระหว่าง 1.7-2.4 ซึ่งเป็นเกณฑ์แนะนำโดย [4] ในขณะที่ค่า HM ของอัตราส่วนผสม OPC:CCA เท่ากับ 70:30, 60:40, 50:50 ล้วนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จึงได้ทำการเลือกใช้อัตราส่วน OPC:CCA เท่ากับ 80:20 เป็นอัตราส่วนผสมเริ่มต้นเนื่องจากมีการใช้ประโยชน์จากเถ้าซังข้าวโพดที่มากที่สุดทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาคุณภาพต่อได้เช่นกัน

ตารางที่ 2 ค่า HM และ q_u ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผสมของ	HM	q _u (กก./ชม.2)
OPC:CCA		
100:00:00	3.06	273.54
90:10:00	2.32	220.62
80:20:00	1.78	164.58
70:30:00	1.38	111.8
60:40:00	1.07	56.83
50:50:00	0.82	28.26

ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้มีค่า HM ผ่านเกณฑ์แนะนำเพียงเล็กน้อยและมีค่ากำลังต่ำกว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC:CCA เท่ากับ 100:00) ก่อนข้างมาก จึงได้มีแนวคิดในการนำกากอุตสาหกรรมจำพวกผงหินปูนขาวมาใช้ผสมเพิ่มเพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดและการที่นำส่วนผสมของผงหินปูนขาวไปทดแทนซีเมนต์ที่อัตราส่วนตั้งแต่วัยละ 10-30 เพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาปอซโซลานิก [8] ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า HM และกำลังของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 3 โดยพบว่าสารเชื่อมประสานที่ประกอบไปด้วยซีเมนต์ เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวในทุกอัตราส่วนมีค่า HM เพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงเกณฑ์แนะนำ และ



เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] แล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุการบ่ม 3 วัน ที่ต้องมีค่า q_u มากกว่า 120 กก./ชม.² (ASTM C150, [9]) พบว่าสารเชื่อมประสานที่มีอัตราส่วนผสม OPC:CCA:LSP เท่ากับ 70:20:10, 65:20:15 และ 60:20:20 ล้วนแล้วแต่มีค่า q_u สูงกว่ามาตรฐานทั้งสิ้น จึงได้ทำการคัดเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ OPC:CCA:LSP เท่ากับ 65:20:15 ซึ่งมีค่า q_u สูงที่สุดคือ 229.63 กก./ชม.² และมีค่า HM เป็นไปตามเกณฑ์แนะนำคือ 1.93 ทั้งนี้ค่า HM ของสารเชื่อมประสานที่อัตราส่วนดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 เมื่อ

คิดปริมาณสารประกอบตามอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานแต่ละชนิด ดังแสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4 ตารางที่ 3 ค่า HM และ q_u ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผสมของ OPC:CCA:LSP	HM	q_u (กก./ชม.2)
70:20:10	1.88	179.11
65:20:15	1.93	229.63
60:20:20	1.99	164.68
55:20:25	2.06	103.38
50:20:30	2.13	88.17

ตารางที่ 4 การคำนวณค่า HM ของสารเชื่อมประสานที่มีอัตราส่วน OPC:CCA:LSP เท่ากับ 65:20:15

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
OPC	9.71 (14.94x65/100)	2.31 (3.56x65/100)	2.16 (3.33x65/100)	43.41 (66.78x65/100)
CCA	11.99 (59.54x20/100)	0.62 (3.08x20/100)	0.43 (2.15x20/100)	0.76 (3.81x20/100)
LSP	0.05 (0.3x15/100)	0.02 (0.11x15/100)	0.01 (0.05x15/100)	8.45 (56.36x15/100)
รวม	21.75	2.95	2.60	52.62

หมายเหตุ: Hydration modulus (HM) = 52.62/(21.75+2.95+2.60) = 1.93

3.2 การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยสารเชื่อมประสาน

เมื่อได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมตามข้อ 3.1 แล้ว จึงนำสารเชื่อมประสานนั้นไปผสมกับดินเหนียวอ่อนในอัตราส่วน 10% (CCL10), 12% (CCL12) และ 14% (CCL14) โดยน้ำหนักเปียก โดยทำการควบคุมปริมาณความชื้นดินให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% จากปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (72%) ซึ่งวิธีการผสมจะทำการผสมดินเหนียวอ่อนกับสารเชื่อมประสาน ด้วยเครื่องผสม Hobart Mixer แล้วจึงนำดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วบรรจุลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอตามมาตรฐาน JSF T821-1990 [11] จากนั้นหุ้มตัวอย่างในแบบหล่อด้วยพลาสติกใสเป็นระยะเวลา 24 ชม. จึงนำตัวอย่างออกจาก

แบบหล่อ ทำการหุ้มตัวอย่างซ้ำด้วยแผ่นพลาสติกใสและบรรจุในภาชนะปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นเมื่อครบอายุการบ่มที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบค่า q_u โดยจะทำการเตรียม 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสมต่อระยะ เวลาบ่มรวมจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 36 ตัวอย่าง (3 ตัวอย่าง/อัตราส่วนผสม/ระยะเวลาบ่ม x 3 อัตราส่วนผสม x 4 ระยะเวลาบ่ม) นอกเหนือจากนี้แล้วยังทำการผสมดินเหนียวอ่อนเข้ากับปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 (OPC10), 12 (OPC12) และ 14 (OPC14) ด้วยวิธีเดียวกันอีก 36 ตัวอย่าง เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงกำลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเชื่อมประสานที่พัฒนาขึ้นกับปูนซีเมนต์ทั่วไป



(ก)

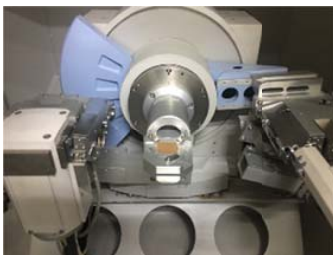


(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างดิน

ก) ค้อนสำหรับอัดดิน, ข) แบบหล่อ

ภายหลังการทดสอบค่า q_u แล้วนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บริเวณระนาบที่ดินพังทลายเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้น ไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลัก [12] ในปูนซีเมนต์และสารผลิตภัณฑ์ ไคแคลเซียมซิลิเกต-ไฮดรต (CSH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรชันที่อายุการบ่มต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ส่องกราดตัวอย่างที่มุม 2θ ในช่วง 10-90 องศา เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารตั้งต้นและปริมาณสารผลิตภัณฑ์ และอธิบายกลไกปฏิกิริยาการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาว



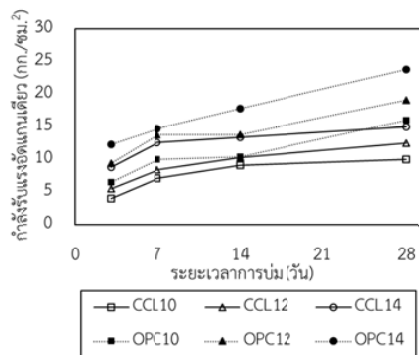
รูปที่ 2 เครื่อง XRD

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาว

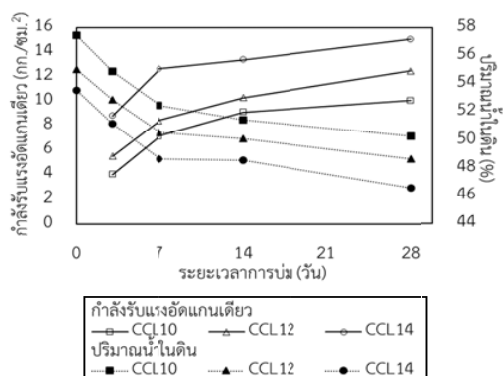
การพัฒนา q_u ของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวตามอายุการบ่มแสดงไว้ดังรูปที่ 3 (ค่าที่แสดงในรูปเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานทำให้ q_u ของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น โดย q_u จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้เพียงปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อน

ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าเมื่อใส่สารเชื่อมประสานปริมาณ 10%, 12% และ 14% q_u ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 100, 120 และ 150 เท่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเชื่อมประสานนี้กับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียวพบว่าที่อายุการบ่มเดียวกัน q_u มีค่าลดลงประมาณ 10-40%

รูปที่ 3 การพัฒนา q_u ของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวผสมซีเมนต์

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับปริมาณน้ำในดิน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวแสดงไว้ดังรูปที่ 4 โดยพบว่าปริมาณน้ำในดินมีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ตัวอย่าง CCL14 มีปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ต่ำที่สุด ส่วนตัวอย่าง CCL12 และ CCL10 มีปริมาณน้ำมากขึ้นตามอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานที่ลดลง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดินที่อายุการบ่มต่างๆ

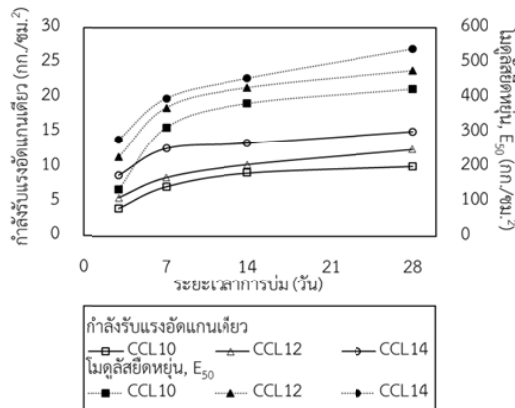
รูปที่ 4 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และปริมาณน้ำในดิน พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแปรผกผันกับปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเป็นผลจากการที่น้ำในมวลดินถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตั้งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ดังนั้นน้ำในดินจึงมีปริมาณลดลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ q_u

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

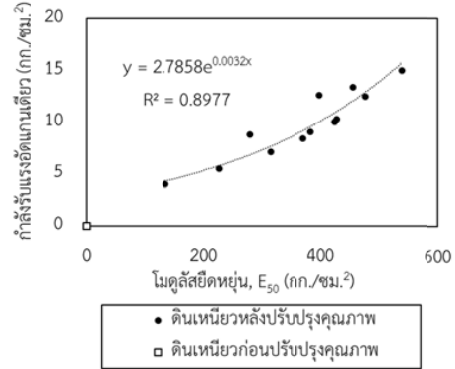
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่ากำลังเท่ากับ 50% (E_{50}) ของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวในอัตราส่วน 10% (CCL10), 12% (CCL12) และ 14% (CCL14) โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ดังรูปที่ 5 โดยพบว่าค่า E_{50} มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น และมีลักษณะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า q_u เช่นกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับ q_u ของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเชื่อมประสาน 10-14% แสดงไว้ดังรูปที่ 6 และสมการที่ (2)

$$E_{50} = 2.7858e^{0.0032q_u} \quad (2)$$

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า E_{50} ของดินเหนียวอ่อนที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพกับตัวอย่าง CCL14 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าค่า E_{50} มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 70 เท่า แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมของสารเชื่อมประสานส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุการบ่มต่างๆ

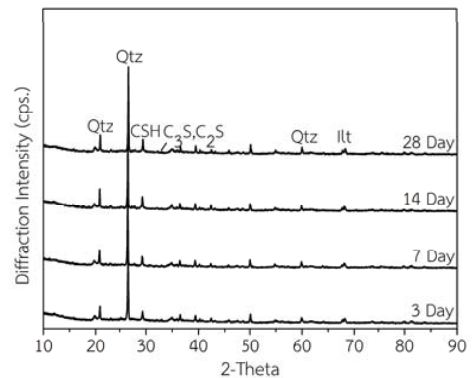


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

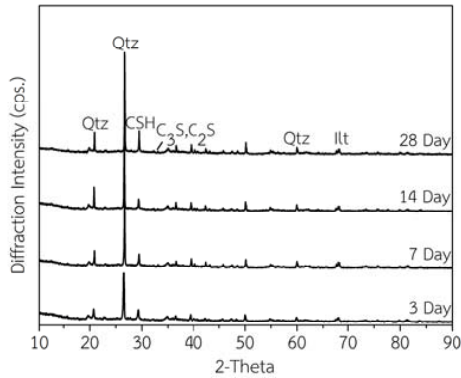
4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบหลักต่อการพัฒนากำลัง

การพัฒนา กำลังของดินซีเมนต์นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตั้งต้นทั้ง C_2S และ C_3S รวมทั้งสารผลิตภัณฑ์ CSH ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ โดยในการศึกษานี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบหลักเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารเชื่อมประสานที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวโดยวิธีวิเคราะห์ XRD เปรียบเทียบกับ q_u

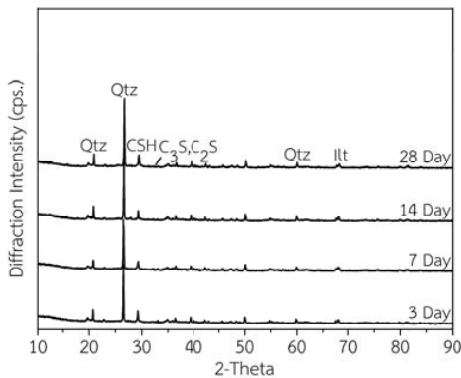
โดยผลการทดสอบปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักจำพวก C_2S (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 33.10) C_3S (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 32.69) และ CSH (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.38) ของตัวอย่าง CCL10, CCL12 และ CCL14 ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 7 (ก)-(ค) และตารางที่ 5 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

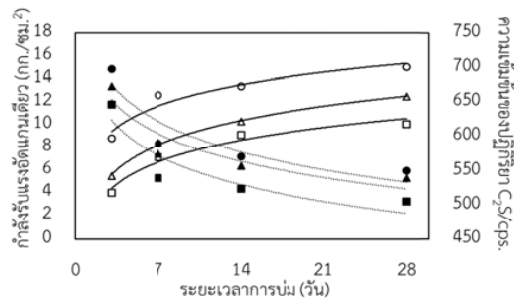
รูปที่ 7 ผลการทดสอบ XRD ของ ก) CCL10 ข) CCL1 และ ค) CCL14 ในแต่ละอายุการบ่ม

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบหลัก C₂S, C₃S และ CSH

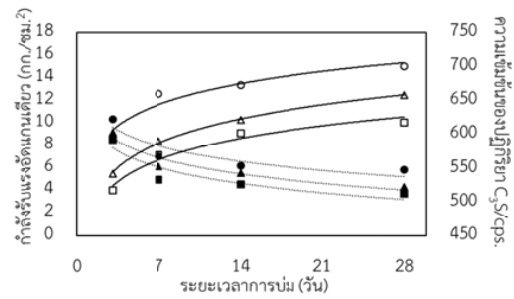
Mixture	C ₂ S ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	14	28
CCL10	646	538	522	503
CCL12	673	574	556	538
CCL14	698	589	570	549
Mixture	C ₃ S ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	14	28
CCL10	592	532	525	511
CCL12	602	552	542	521
CCL14	622	567	553	547
Mixture	CSH ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	14	28
CCL10	1195	1225	1253	1275
CCL12	1220	1282	1302	1321
CCL14	1251	1293	1325	1333

ทั้งนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสาร C₂S และ C₃S มีอัตราการลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้น C₂S และ C₃S จะคงเหลืออยู่ในดินน้อยลงมาก เป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในระยะยาวในอัตราที่ลดลง ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบหลักตั้งต้น C₂S และ C₃S ของดินซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสมที่อายุการบ่มต่าง ๆ โดยแนวโน้มอัตราการลดลงของ C₂S และ C₃S สอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย [13]

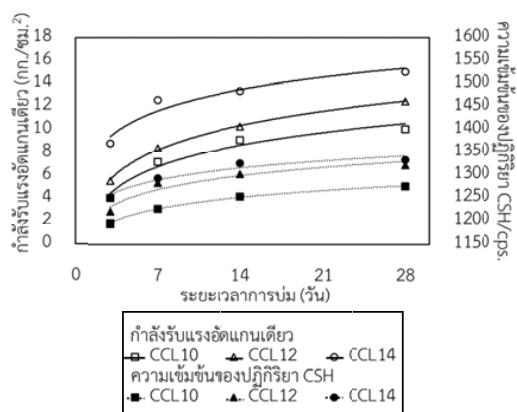
นอกเหนือจากการลดลงของสาร C₂S และ C₃S พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH จะเพิ่มสูงขึ้นตาม q_u ของดินซีเมนต์ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย [14] ทั้งนี้ในการศึกษานี้พบว่า การเกิด CSH ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา (สองสัปดาห์แรก) จะมีอัตราสูงกว่าอัตราการเกิดในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักตั้งต้น แสดงไว้ในรูปที่ 8 (ก)-(ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับปริมาณ C_2S , C_3S และ CSH ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยเป็นการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า 1) อัตราส่วนสารเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษานี้คือ ซีเมนต์เถ้าซังข้าวโพด:ผงหินปูนขาว เท่ากับ 65:20:15 2) เมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้น วัสดุดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวมีค่า q_u มากขึ้น ปริมาณน้ำในมวลดินลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ CSH และการลดลงของ C_2S และ C_3S ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน 3) เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารเชื่อมประสานในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกับการใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียวพบว่า q_u มีค่าลดลงประมาณ 10-40% อย่างไรก็ตาม การใช้สารเชื่อมประสานที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวในปริมาณที่เหมาะสมมีศักยภาพในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินกำลังของดินเหนียวอ่อนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ที.เอช.แพลเล็ท จำกัด อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ในการอนุเคราะห์เถ้าซังข้าวโพด ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัย

เกษตรศาสตร์ ที่ให้การอนุเคราะห์อุดหนุนเงินทุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Sompong, "Soil Properties Effect on Construction of Soil-Cement Column: Case Study on Drainage System Suvarnabhumi International Airport Project," M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2009. (in Thai)
- [2] P. Rattanasuwan, "Analysis and Design of Soil Cement Columns for Retaining Wall System at Impact Arena Muang Thong Thani Parking Building," Research and Development Journal, vol. 23, no. 2, 2012.
- [3] C. Sricharoen, "Strength Development in Soil Cement Column and Soil Fly ash-Cement Column in Soft Bangkok Clay Deposit," KMUTT Research and Development Journal, vol. 37, no. 2, 2014. (in Thai)
- [4] M. Kamon and S. Nontananandh, "Combining Industrial Waste with Lime for Soil Stabilization," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 117, no. 1, 1991.
- [5] P. Sripanich, "Utilization of Kaolin Waste to Produce Cement for Soft Clay Stabilization," M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2013. (in Thai)
- [6] S. Nontananadh, M. Kamon and T. Seishi, "Environment Geotechnology for Potential waste Utilization," in Proceeding of 9 Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, 1991. (in Thai)
- [7] P. Suwanmaneechot, "Improvement Characterization and Use of Waste Corncob Ash in Cement-Based Materials," in 4 Global Conference on Materials Science and Engineering, 2015. (in Thai)



- [8] S. Nontananandh, P. Sripanich and N. Yoobanpot, "Preliminary Study on the Cement Clinkerization Produced from Kaolin Waste and Lignite Fly Ash," in the 51 Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, 2013. (in Thai)
- [9] Standard Specification for Portland Cement, ASTM C150 - 04.
- [10] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM C109.
- [11] Practice of Making and Curing Non-Compacted Stabilized Soil Specimens, JSF T821-1990, 1990.
- [12] R. Bouge, The Chemistry of Portland Cement, Reinhold, 1995.
- [13] S. Nontananandh and M. Kamon, "Contribution of Stainless-Steel Slag to the Development of Strength for Seabed Hedoro," Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 30, no. 4, pp. 63-72, 1990.
- [14] N. Yoobanpot, P. Jamsawang and S. Horpibulsuk, "Strength Behavior and Microstructural Characteristics of Soft Clay Stabilized with Cement Kiln Dust and Fly Ash Residue," Applied Clay Science, vol. 141, pp. 146-156, 2017.