

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพด และผงหินปูนขาว

อัครชัย เรืองแสงทอง¹ สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว^{2*} ศุภกิจ นนทนนันท์³ อภิชาติ วงษา¹
คณินพงษ์ ว่องไววิวัฒน์กุล⁴ เมธาวีฉวี ท่องอยู่⁴ อานนท์ ศรีพุทธเกียรติ⁴ และ ธนธรณ์ ลอวีระอมรพันธุ์⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพด้วยกากวัสดุจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวมาผสมกับปูนซีเมนต์โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและการวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นสำหรับทำสารเชื่อมประสานจากวัสดุดังกล่าวคือใช้ปูนซีเมนต์ : เถ้าซังข้าวโพด : ผงหินปูนขาวเท่ากับ 65:20:15 เมื่อนำสารเชื่อมประสานดังกล่าวผสมกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยวิธีการบดอัดโดยการควบคุมความหนาแน่นของดินในอัตราส่วน 10%, 12% และ 14% โดยน้ำหนักเปียกเพื่อปรับปรุงคุณภาพพบว่าดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวมีกำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสานและอายุการบ่ม และนอกจากนี้ยังศึกษาการพัฒนากำลังโดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าสารผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ได้แคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกตมีค่าลดลง จากการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้สารเชื่อมประสานที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวในปริมาณที่เหมาะสมมีศักยภาพในการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนได้

คำสำคัญ: เถ้าซังข้าวโพด, ผงหินปูนขาว, แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต, เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รับพิจารณา: 10 เมษายน 2563

แก้ไข: 23 เมษายน 2563

ตอบรับ: 12 พฤษภาคม 2563

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้มีพันธะประสานงาน โทร. +668 0024 7883 อีเมล: fengssck@ku.ac.th



Improvement of Soft Bangkok Clay by Cement Mixed with Corncob Ash and Limestone Powder

Akkarachai Ruangsangthong¹ Susit Chaiprakaikeow^{2*} Supakij Nontananandh³ Apichart Wongsa¹
Kaninphong Wongwaivattanaku⁴ Metawat Thongyoo⁴ Arnon Sripruekiat⁴
and Thanathorn Loweeraamornpan⁴

Abstract

This research aims to study quality improvement of soft Bangkok clay by mixing cement with industrial wastes, corncob ash and limestone powder using Unconfined Compression and X-Ray Diffraction (XRD) tests. The study showed that the optimum ratio of the compounds which from preliminary test, cement : corncob ash : limestone powder is 65:20:15. After mixing the binder with soft Bangkok clay through density controlled compaction at the ratio of 10%, 12%, and 14% by wet unit weight for quality improvement, it was found that the unconfined compressive strength of soil-cement mixed with corncob ash and limestone rises in accordance with the increasing amounts of cementitious materials and curing time. Also investigated was the strength development mechanism by means of XRD. The result revealed that Calcium Silicate Hydrate (CSH) increases while Dicalcium silicate (C₂S) and Tricalcium Silicate (C₃S) decrease. In conclusion, this study showed that the appropriate amount of the binder, the mixture of cement, corncob ash and limestone powder, has the potential to improve the strength quality of soft clay.

Keywords: Corncob Ash, Limestone Powder, Calcium Silicate Hydrate, X-ray Diffraction (XRD)

Received: April 10, 2020

Revised: April 23, 2020

Accepted: May 12, 2020

¹ Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kasetsart University

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kasetsart University

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kasetsart University

⁴ Bachelor student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kasetsart University

* Corresponding Author, Tel. +668 0024 7883 e-mail: fengssck@ku.ac.th

1. บทนำ

ดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุที่รับกำลังได้น้อยและมีการทรุดตัวสูงที่สามารถพบได้ทั่วไป 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 เถ้าลอยลิกไนต์ 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) ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออนในปฏิกิริยาปอซโซลานิคได้อีกด้วย [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 เถ้าซังข้าวโพดซึ่งเป็นซีเถ้าจากเชื้อเพลิงผลิตพลังงานความร้อนให้กับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม 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./ซม.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./ซม.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./ซม.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)

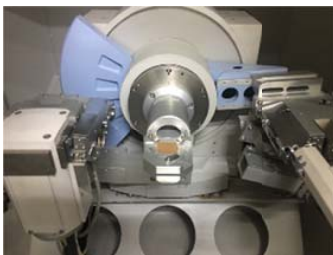


(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างดิน

ก) ค้อนสำหรับอัดดิน, ข) แบบหล่อ

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



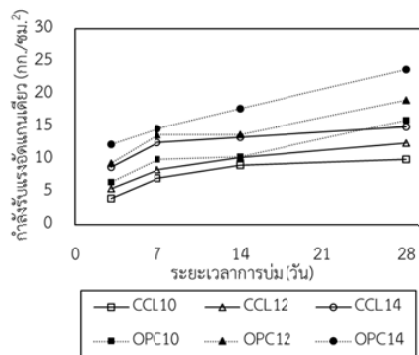
รูปที่ 2 เครื่อง XRD

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาว

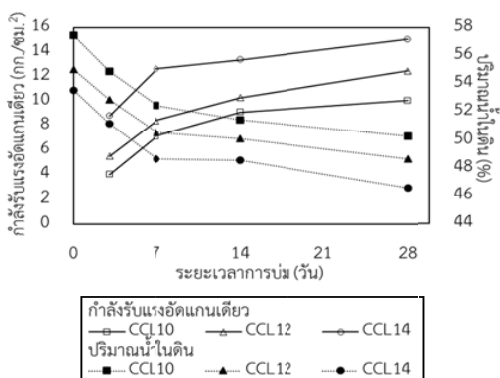
การพัฒนา q_u ของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ เถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวตามอายุการบ่มแสดงไว้ดังรูปที่ 3 (ค่าที่แสดงในรูปเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสานทำให้ q_u ของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น โดย q_u จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้เพียงปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงคุณภาพ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

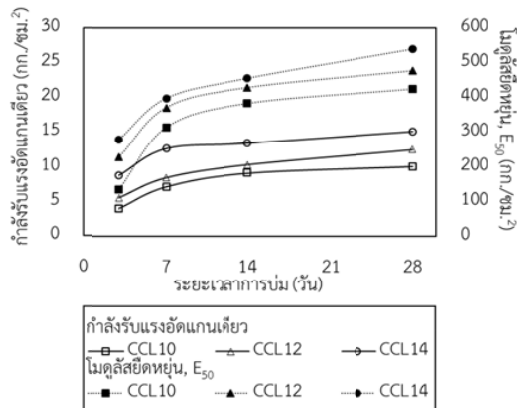
รูปที่ 4 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u และปริมาณน้ำในดิน พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดแปรผกผันกับปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเป็นผลจากการที่น้ำในมวลดินถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตั้งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ดังนั้นน้ำในดินจึงมีปริมาณลดลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ q_u

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

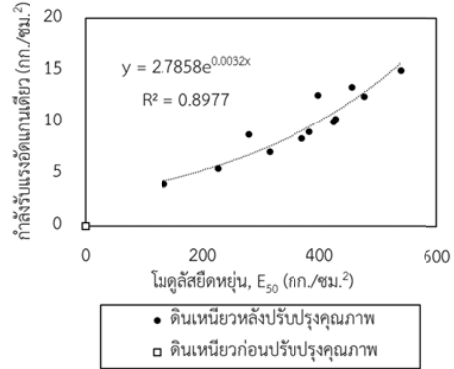
โมดูลัสยืดหยุ่นที่ค่ากำลังเท่ากับ 50% (E_{50}) ของดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าซังข้าวโพดและผงหินปูนขาวในอัตราส่วน 10% (CCL10), 12% (CCL12) และ 14% (CCL14) โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ดังรูปที่ 5 โดยพบว่าค่า E_{50} 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

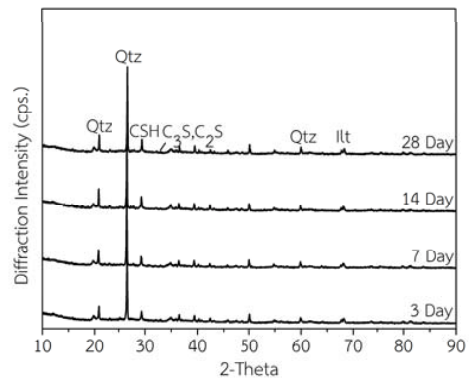


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

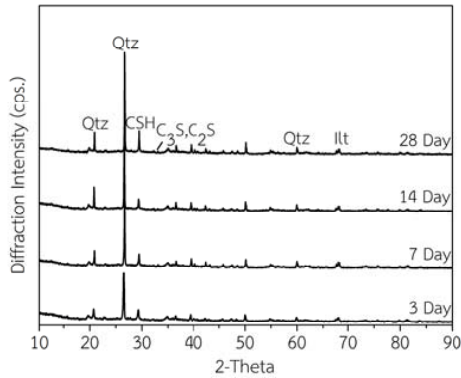
4.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบหลักต่อการพัฒนากำลัง

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

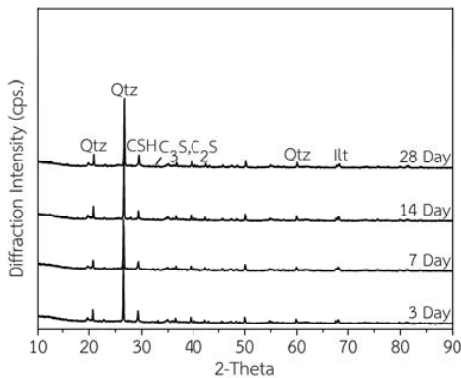
โดยผลการทดสอบปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักจำพวก C_2S (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 33.10) C_3S (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 32.69) และ CSH (ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.38) ของตัวอย่าง CCL10, CCL12 และ CCL14 ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 7 (ก)-(ค) และตารางที่ 5 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

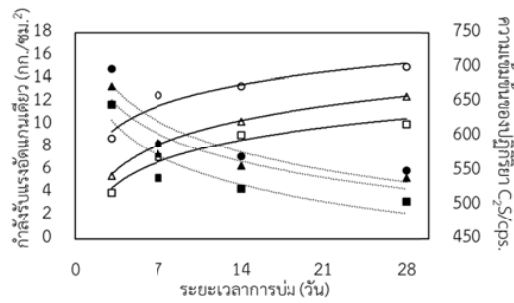
รูปที่ 7 ผลการทดสอบ XRD ของ ก) CCL10 ข) CCL1 และ ค) CCL14 ในแต่ละอายุการบ่ม

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบหลัก C₂S, C₃S และ CSH

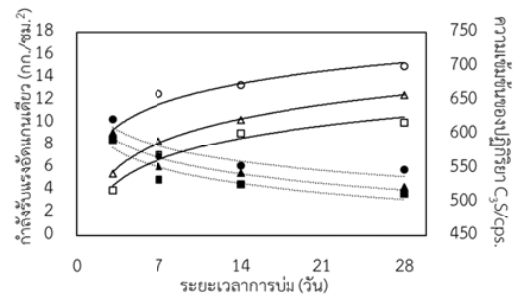
Mixture	C ₂ S ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	14	28
CCL10	646	538	522	503
CCL12	673	574	556	538
CCL14	698	589	570	549
Mixture	C ₃ S ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	14	28
CCL10	592	532	525	511
CCL12	602	552	542	521
CCL14	622	567	553	547
Mixture	CSH ที่ระยะเวลาการบ่ม (วัน) / cps.			
	3	7	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]

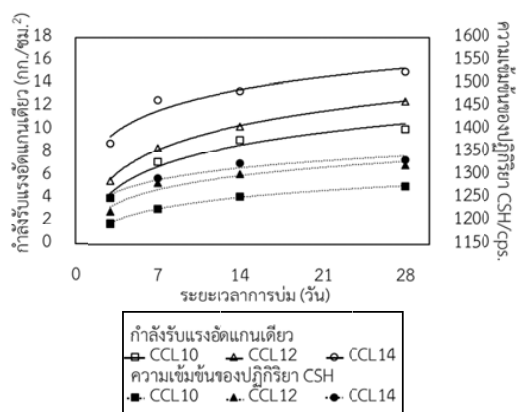
นอกเหนือจากการลดลงของสาร C₂S และ C₃S พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH จะเพิ่มสูงขึ้นตาม q_u ของดินซีเมนต์ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย [14] ทั้งนี้ในการศึกษานี้พบว่า การเกิด CSH ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา (สองสัปดาห์แรก) จะมีอัตราสูงกว่าอัตราการเกิดในระยะยาวซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักตั้งต้น 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 ซีเมนต์:เถ้าซังข้าวโพด: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. Nontananandh, 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.