

อิทธิพลของเถาชีวมวลต่อการพัฒนากำล้างและโครงสร้างจุลภาค ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถาชีวมวล

รุ่งลาวัลย์ ราชัน¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

บทคัดย่อ

งานศึกษาวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของเถาชีวมวลต่อการพัฒนากำล้างและโครงสร้างทางจุลภาคในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถาชีวมวล โดยวัดค่ากำลังของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถาชีวมวลจากผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ลักษณะโครงสร้างจุลภาคอธิบายได้โดยอาศัยผลทดสอบการวัดการกระจายขนาดโพรงด้วยปรอทและการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง การศึกษานี้พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถาชีวมวลจะแปรผันกับปริมาณผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน ซึ่งเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลของการกระจายกลุ่มดินซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลงและกำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และพบว่าเถาชีวมวลนี้จะทำหน้าที่กระจายกลุ่มดินซีเมนต์ทำให้ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเกิดขึ้นได้มากขึ้น การกระจายกลุ่มดินซีเมนต์นี้จะแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนการแทนที่

คำสำคัญ : เถาชีวมวล / โครงสร้างจุลภาค / กำลังอัดแกนเดียว / ดินซีเมนต์

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

The Influence of Biomass Ash on Strength Development and Microstructure of Blended Cement Admixed Soft Bangkok Clay

Runglawan Rachan ¹

Mahanakorn University, Nong Chok, Bangkok 10530, THAILAND

Abstract

This paper presents the influence of biomass ash on strength development and microstructure of blended cement admixed soft Bangkok clay. Its strength was examined by unconfined compression test. The study on microstructure was carried out using a mercury intrusion pore size distribution measurement and thermalgravimetry analysis. It was found that the strength development in blended cement admixed clay was dependent upon cementitious products due to combined effect (hydration and dispersion). The amount of cementitious products increased with time, resulting in the reduction in total pore volume and increasing in unconfined compressive strength. This biomass ash is a material dispersing clay-cement clusters when interacted with water. The dispersing effect increases the amount of cementitious products, and is dependent upon replacement ratio.

Keywords : Biomass Ash / Microstructure / Unconfined Compressive Strength / Cemented Clay

¹ Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรม แปรเปลี่ยนไปตามสภาพพื้นที่และลักษณะการกำเนิด สำหรับงานก่อสร้างโดยทั่วไปปัญหาของงานด้านฐานรากมักก่อให้เกิดปัญหาและอุปสรรคแก่วิศวกรมากกว่าสิ่งอื่น ซึ่งในบางครั้งอาจจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโดยการเปลี่ยนสถานที่ก่อสร้าง แต่หากไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้และจำเป็นจะต้องแก้ปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของดินแล้ว วิศวกรอาจใช้เทคนิคการปรับปรุงสมบัติของดินตามความเหมาะสม การปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อนด้วยวัสดุเชื่อมประสานเป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ภายในระยะเวลาอันสั้น วัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันคือปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงดินในปริมาณที่มากจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง การลดปริมาณซีเมนต์ด้วยการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีราคาต่ำกว่า จึงเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยเพิ่มกำลังอัดแล้วยังช่วยเพิ่มความคงทน (Durability) ให้กับดินซีเมนต์ด้วย

วัสดุปอซโซลานที่เป็นที่ยอมรับในงานโครงสร้างของประเทศ ได้แก่ แกลลวยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ แต่ถ้ามีการนำวัสดุเหลือใช้ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์มาช่วยทดแทนปูนซีเมนต์ดังกล่าวก็จะช่วยลดปริมาณการใช้ทรัพยากรที่เหลืออยู่น้อยได้อีกวิธีหนึ่ง อีกทั้งปัจจุบันงานวิจัยด้านคอนกรีตเทคโนโลยี [1-12] ได้ประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์บางส่วน ทั้งนี้เพราะวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบซึ่งจะช่วยทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เมื่อทำปฏิกิริยากับผลผลิตของปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ แต่เนื่องจากการศึกษาในอดีตจะกล่าวถึงเฉพาะอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่างๆ (อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์, อายุบ่ม, ปริมาณความชื้นและปริมาณสารเชื่อมประสาน) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ โดยปราศจาก

การอธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวแปรควบคุม อันจะนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพทั้งทางด้านหลักวิชาการและด้านเศรษฐศาสตร์

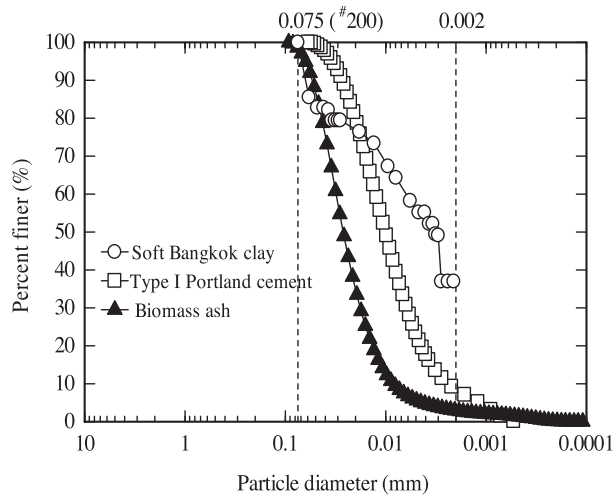
งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบหาการกระจายตัวของช่องว่าง (Porosimeter test) และการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry analysis, TGA) ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของแกลลวยในการช่วยในการปรับปรุง ทั้งนี้ในการศึกษาถึงเหตุผลของการพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมแกลลวยจากผลทางโครงสร้างจุลภาคยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยแกลลวยที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นแกลลวยที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิงจากวัสดุธรรมชาติ ในที่นี้เรียกแกลลวยประเภทนี้ว่า แกลลวยมวล แกลลวยประเภทนี้เป็นวัสดุเหลือใช้และยังไม่มีมูลค่า ซึ่งหากได้ผลที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้งานได้จะเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. วัสดุทดสอบ

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตรจากผิวดินภายในบริเวณสถานที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษ (วงแหวนรอบนอกตะวันออก) บริเวณเขตลำลูกกา เส้นบางพลี-ธัญบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ ค่าพิกัดอัตราเบอร์กรหาได้จากวิธี Fall cone ตามมาตรฐาน BS: 1377- part II, 1990 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับร้อยละ 103 และ 32 ตามลำดับ และปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 95 ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.71 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ด้วยระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) ผลการทดสอบการบวมตัวอิสระ (Free swelling ratio, FSR) ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan [13] เท่ากับ 1.27 ซึ่งจัดอยู่ในดินที่มีการบวมตัวต่ำ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเพอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอนมสาร จังหัดฉะเชิงเทรา เถ้าชีวมวลนี้ได้จากการเผาวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เปลือกไม้ ไม้บอร์ค ไม้ยูคาลิปตัสลัลละเอียด และแกลบอัดเม็ด เถ้าชีวมวลนี้ไม่สามารถจัดเป็นเถ้าลอยในชั้น

คุณภาพ C และ F ตามมาตรฐานของ ASTM C 618 ได้เถ้าชีวมวลนี้นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (เถ้าละเอียด) ขนาดอนุภาคของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis เถ้าชีวมวลมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.95 โดยองค์ประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุทดสอบแสดงดังในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ตามลำดับ



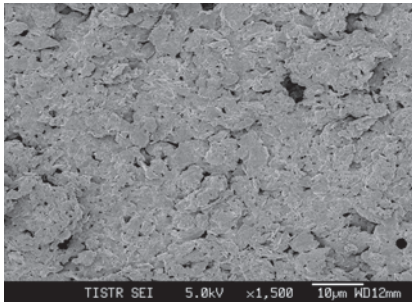
รูปที่ 1 การกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชีวมวล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชีวมวล

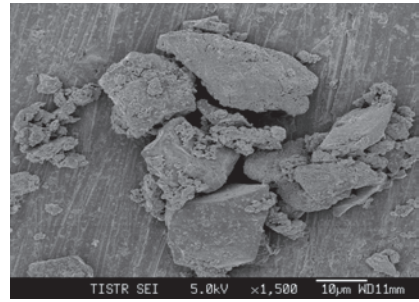
Chemical Compounds	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าชีวมวล
%SiO ₂	63.83	20.90	74.12
%Al ₂ O ₃	21.34	4.76	0.57
%Fe ₂ O ₃	8.41	3.41	0.88
%MgO	1.54	1.25	1.54
%CaO	0.94	65.41	5.91
%Na ₂ O	0.28	0.24	3.33
%K ₂ O	2.45	0.35	1.71
%SO ₃	1.22	2.71	0.50

ภาพถ่ายกำลังขยายที่ 1,500 เท่าของปูนซีเมนต์
 ฝ้าซีวมวลและดินตัวอย่างแสดงดังในรูปที่ 2 จะเห็นว่า
 อนุภาคของดินเหนียวตัวอย่างมีลักษณะเป็นกลุ่มเม็ดเล็ก ๆ
 จับกันเป็นแผ่นก่อนหนาที่บและยึดติดกันระหว่างอนุภาค
 แต่เมื่อพิจารณาขนาดแต่ละอนุภาคจะเห็นว่าอนุภาค
 ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์และฝ้าซีวมวลซึ่ง
 สอดคล้องกับผลการกระจายตัวในรูปที่ 1 ในขณะที่อนุภาค

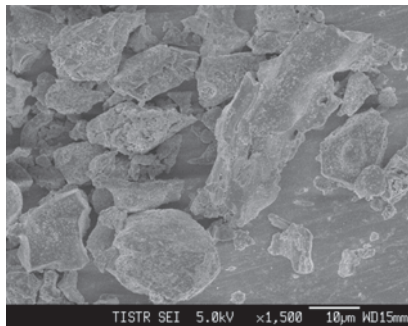
ของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและอนุภาคของ
 ฝ้าซีวมวลมีลักษณะเป็นแบบเหลี่ยมซึ่งมีลักษณะคล้าย
 อนุภาคของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพราะฝ้าซีวมวลนี้ได้มาจาก
 การเผาวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่ แกลบ แกลบ
 อัดเม็ด เปลือกไม้ ไม้บอร์ดและไม้ยูคาลิปตัส แต่จะเห็นว่า
 มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับปูนซีเมนต์กล่าวคือมีลักษณะ
 เหมือนมวลรวมหยาบ



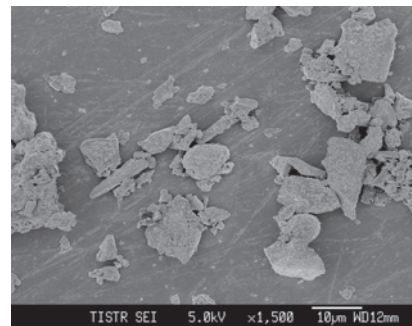
ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ



ข) ปูนซีเมนต์



ค) ฝ้าซีวมวล (ช่วงอนุภาคขนาดใหญ่)



ง) ฝ้าซีวมวล (ช่วงอนุภาคขนาดเล็ก)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยาย 1,500 เท่า ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และฝ้าซีวมวล

3. วิธีการทดสอบ

นำดินเหนียวกรุงเทพมหานครมาหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล) โดยน้ำหนักดินแห้ง และกำหนดปริมาณความชื้นในการผสมเท่ากับ 1 เท่าของค่าดัชนีเหลว (ร้อยละ 103) ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณความชื้นไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ มีเพียงตัวแปรของอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม (Clay-water/Binder ratio, W_w/B) เท่านั้น [14] ในที่นี้กำหนดอัตราส่วนผสมของความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสมเท่ากับ 3 สำหรับดินซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนผสมร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล (Cement content : Biomass ash content, C:BA) เท่ากับ 100:0, 90:0, 80:0 และ 70:0 โดยน้ำหนักดินแห้งและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลเท่ากับร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (Cement content : Biomass ash content, C:BA) เท่ากับ 90:10, 80:20, 70:30) หลังจากการผสมด้วยเครื่องผสมจนวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 5 ถึง 10 นาที นำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ซม. และความสูงประมาณ 10 ซม. หลังจากตัวอย่างถูกถอดจากแบบหล่อห่อด้วยพลาสติกกันความชื้นและเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) จนครบระยะเวลาบ่ม 28 และ 60 วัน เมื่อได้อายุบ่มตามต้องการแล้ว นำตัวอย่างมาทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตรา 1 มม./นาที โดยใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละอายุบ่ม ปริมาณส่วนผสม เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบและเก็บตัวอย่างบริเวณกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบเพื่อนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งได้แก่ การทดสอบการกระจายขนาดโพรงด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimetry, MIP) และการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermal gravimetry analysis, TGA) การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอทรุ่น Mercury porosimetry analyzer และเครื่องวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงรุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851° นำดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่มีความชื้นร้อยละ 103 (1L) และที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

มาทำให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ การทดสอบการกระจายขนาดโพรงนั้นตัวอย่างจะถูกเตรียมพิเศษเพื่อรองรับปฏิกิริยาไฮดรเจนโดยนำไปทำให้เย็นและแห้ง โดยการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 วันและดูดด้วยความดัน 0.5 ปาสคาลที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน [15-16]

การวัดการกระจายตัวขนาดโพรงในมวลดินกระทำโดยใช้เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (MIP) ที่ความดันในช่วง 0 ถึง 288 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถวัดโพรงที่ขนาดเล็กถึง 0.0057 ไมครอน การทดสอบ MIP กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครได้จากงานวิจัยในอดีตของ Horpibulsuk. et al. [17-18] หรือแม้แต่งานศึกษากับดินที่ประเทศญี่ปุ่นโดย Miura. et al. [15] และ Yamadera, A. [16] พบว่าผลการศึกษาเป็นที่ยอมรับในงานด้านธรณีเทคนิค ขึ้นตัวอย่างทดสอบ MIP ได้จากการกระแทะดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลอย่างระมัดระวังด้วยเครื่องตัดเพชร จนมีขนาด 3 ถึง 6 มม. และหนักประมาณ 1 ถึง 1.5 กรัม ขนาดโพรงสามารถประมาณได้จากสมการของ Washburn, E. W. [19] ซึ่งได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน P และขนาดช่องว่าง d_p ดังสมการที่ 1

$$d_p = -\frac{4\gamma \cos \theta}{P} \quad (1)$$

เมื่อ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่าง (ไมครอน) และ P คือความดัน (เมกกะปาสคาล)

การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (TGA) เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการประมาณผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนซึ่งประกอบด้วย Ettringite แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิเนต (CAH) แคลเซียมอลูมินาซึลิกไฮดรต (CASH) และอื่นๆ [20] รวมเรียกผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious product) ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักที่สูญเสียในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 580 องศาเซลเซียส [21-23] เมื่อเผาดินซีเมนต์หรือดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลที่อุณหภูมิดังกล่าว แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และน้ำ ดังสมการที่ 2

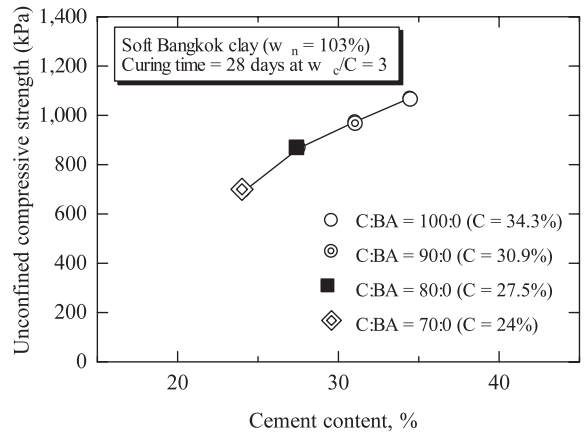


ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้น้ำหนักของดินตัวอย่างลดลง ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักของน้ำที่สูญเสียดังสมการที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 คูณด้วยปริมาณน้ำที่สูญเสีย [21-22] การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน

หลังจากดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีอายุบ่มตามที่ต้องการแล้วจะถูกกะเทาะจนมีขนาดเล็ก ก่อนที่จะทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (TGA) ตัวอย่างอบแห้งจะถูกบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีน้ำหนักประมาณ 10 ถึง 20 มก. และถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที

4. ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 103 (1LI) ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล (C:BA) เท่ากับ 100:0, 90:0, 80:0 และ 70:0 โดยน้ำหนักดินแห้ง พบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง C:BA เท่ากับ 70:0 ถึง 100:0 ซึ่งจัดอยู่ในโซนแอคทีฟ (Active zone) กล่าวคือเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซีเมนต์เจล (Cement Gel) ในที่นี้หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ที่จุดสัมผัสจะมีมากขึ้น และเมื่อซีเมนต์เจลแข็งตัว พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสก็จะมีมากขึ้นด้วย



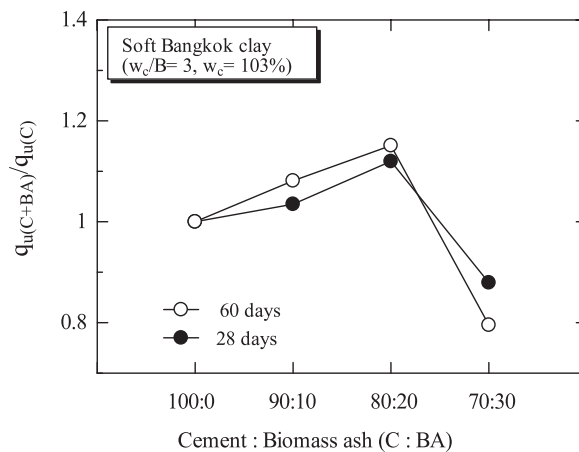
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน

อิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชีวมวลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล แสดงดังในตารางที่ 2 พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 20 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าดินซีเมนต์ (อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0) ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ร้อยละ 30 จะให้ค่ากำลังต่ำสุดและที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ผลทดสอบนี้มีความแตกต่างจากผลทดสอบในงานคอนกรีตผสมเถ้าลอย กล่าวคือในงานด้านคอนกรีต ใช้วัสดุเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานจะเริ่มมีบทบาทด้านกำลังที่อายุบ่มสูงๆ (โดยทั่วไปที่อายุบ่มมากกว่า 28 วัน) นั่นคือกำลังอัดแกนเดียวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีค่ามากกว่ากำลังอัดแกนเดียวของคอนกรีตที่ปราศจากเถ้าลอยเมื่ออายุบ่มเกินกว่า 28 วัน และผลทดสอบในตารางที่ 2 และรูปที่ 4 แสดงชัดเจนว่าเถ้าชีวมวลนี้เริ่มเข้ามามีบทบาทตั้งแต่ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยมีอัตราการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมากกว่าดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนการแทนที่ไม่มากกว่าร้อยละ 20

ตารางที่ 2 กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ($w_c/Binder = 3$ และ $w_c = 103\%$) ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

อายุบ่ม (วัน)	Unconfined compressive strength (kPa)			
	C:BA = 100:0	C:BA= 90:10	C:BA= 80:20	C:BA= 70:30
28	1,070	1,107	1,198	941
60	1,560	1,686	1,795	1,240

หมายเหตุ: C:BA = ร้อยละปริมาณปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวลโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์



รูปที่ 4 อัตราการพัฒนา กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ต่อดินซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

5. ผลทดสอบและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค





5.1 ดินซีเมนต์

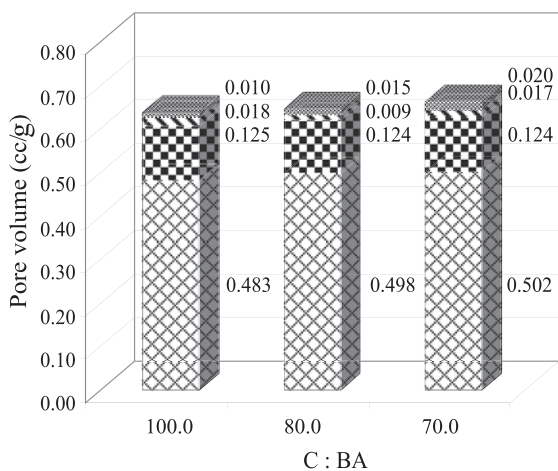
ตารางที่ 3 แสดงค่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน พบว่าดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากันแต่มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าจะมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นมากกว่า และเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นผลึกแข็งฝังตัวอยู่ในดิน พงปูนซีเมนต์ (Cement particles) จะเชื่อมเม็ดปูนซีเมนต์ (Cement grains) ที่

อยู่ติดกันเข้าด้วยกันระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และก่อตัวเป็นโครงผลึกที่แข็ง เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นในโซนแอคทีฟนั้น ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานในโพรงมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังในรูปที่ 5 แสดงชัดเจนว่าปริมาตรของโพรงช่องว่างลดลงที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น แสดงว่าผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานไม่เพียงแต่เพิ่มแรงยึดระหว่างกลุ่มดิน แต่ยังช่วยลดปริมาตรโพรงในดินซีเมนต์และส่งผลให้ดินซีเมนต์มีกำลังสูงขึ้น

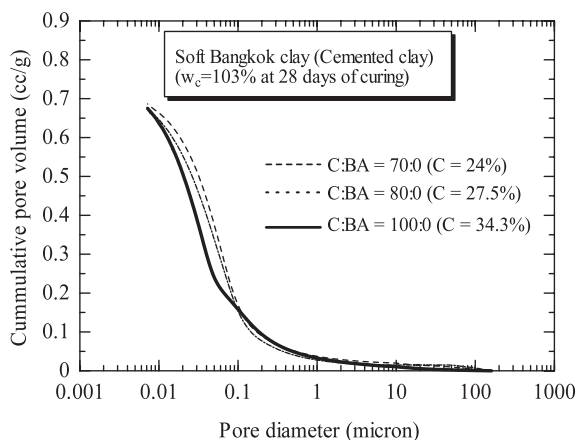
ตารางที่ 3 ปริมาณปูนซีเมนต์ น้ำหนักน้ำที่หายไปและปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นของดินซีเมนต์ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ (C:BA =100:0, 90:0, 80:0, 70:0) ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 103 ที่อายุบ่ม 28 วัน

ซีเมนต์ : etailีวมวล (C:BA)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสี (%)	Ca(OH)_2 (%)
70:0	24.0	1.60	6.58
80:0	27.5	1.74	7.15
90:0	30.9	1.87	7.69
100:0	34.3	1.93	7.93

-  Pore diameter < 0.1 micron
-  0.1 micron < Pore diameter < 1 micron
-  1 micron < Pore diameter < 10 micron
-  Pore diameter > 10 micron



ก) ปริมาตรโพรงในแต่ละช่วงขนาด



ข) ปริมาตรโพรงทั้งหมด

รูปที่ 5 การกระจายขนาดโพรงของดินซีเมนต์ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ (C:BA =100:0, 80:0, 70:0) ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 103 ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าจะส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของมวลดินซีเมนต์ลดลงจึงส่งผลให้มีค่ากำลังที่สูงกว่า และพบว่าปริมาณปูนซีเมนต์นอกจากจะส่งเสริมในเรื่องของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแล้วยังช่วยลดปริมาตรโพรงในดินเนื่องจากปริมาตรโพรงขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนมีปริมาตรลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลง (ปริมาตรโพรงขนาดเล็กนี้

มีอยู่ปริมาณมากซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 75 ถึง 80 ของปริมาตรโพรงทั้งหมด)

อิทธิพลของระยะเวลาของปริมาณผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันแสดงดังในตารางที่ 4 พบว่า ที่อายุบ่มมากขึ้นดินซีเมนต์จะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้ดินซีเมนต์มีกำลังสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่ม

ตารางที่ 4 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ (C:BA =100:0, 90:0, 80:0, 70:0) ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 103 ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

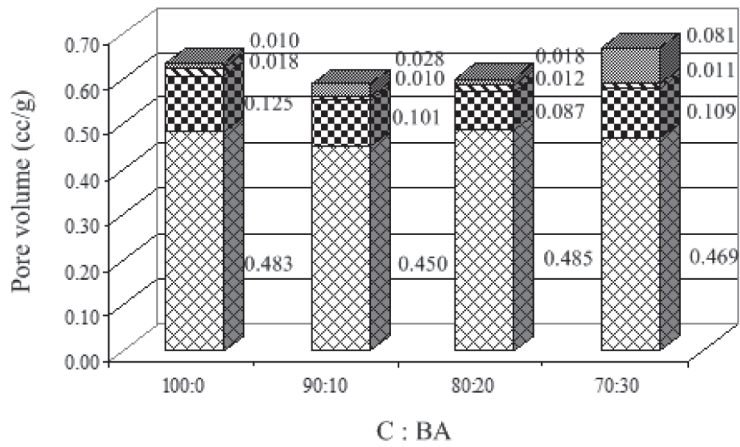
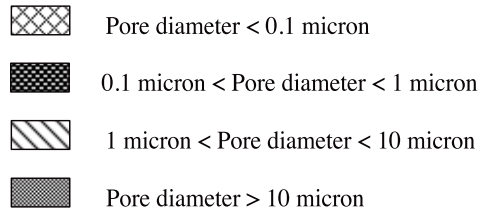
ซีเมนต์ : เถ้าชีวมวล (C:BA)	อายุบ่ม (วัน)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	Ca(OH)_2 (%)
70:0	28	24.0	1.60	6.58
	60		1.84	7.56
80:0	28	27.5	1.74	7.15
	60		1.91	7.85
90:0	28	30.9	1.87	7.69
	60		2.03	8.34
100:0	28	34.3	1.93	7.93
	60		2.04	8.38

5.2 ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล

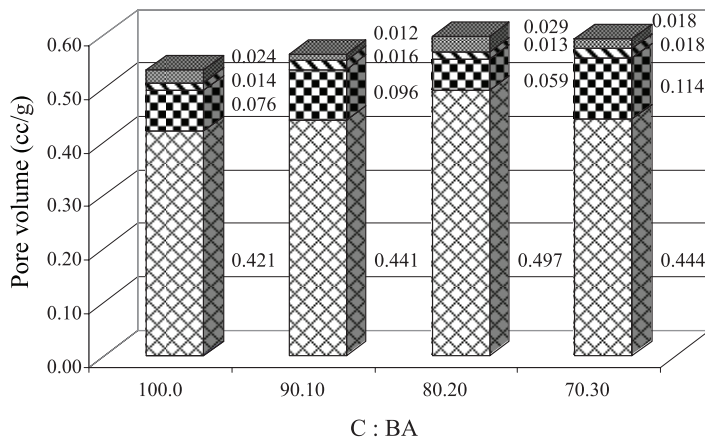
5.2.1 การกระจายขนาดโพรง

รูปที่ 6 แสดงการกระจายปริมาตรโพรงในแต่ละช่วงขนาดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ปริมาณความชื้นในดินเท่ากัน (ร้อยละ 103) และที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 30 ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน นั้นเมื่อผสมเถ้าชีวมวลลงไปจะทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลง (ที่ร้อยละ 10) แต่เมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาตรโพรงรวม

เพิ่มขึ้น (ที่ร้อยละ 20 - 30) และพบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 จะมีปริมาตรโพรงทั้งหมดมากที่สุด ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการผสมเถ้าชีวมวลที่มากขึ้นไปจะเป็นการเพิ่มมวลหยาบ ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโพรง แต่เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ปริมาตรโพรงทั้งหมดและความพรุนรวมมีค่าลดลง ดังแสดงค่าในตารางที่ 5 แต่อย่างไรก็ตามที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 เป็นอัตราส่วนการแทนที่ที่ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงที่สุด และมีปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มากที่สุด



ก) อายุบ่ม 28 วัน



ข) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 6 การกระจายปริมาตรโพรงในแต่ละช่วงขนาดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

ในที่นี้ได้ทำการจำแนกช่วงขนาดของโพรงในมวลดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลเป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ (10-0.1 ไมครอน) โดยจัดขนาดของโพรงทั้งสองประเภทนี้เป็นโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ตารางที่ 5 แสดงปริมาณและปริมาตรของขนาดโพรงต่างๆ พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน แม้ว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 มีปริมาตรโพรงทั้งหมดน้อยที่สุด แต่มีได้ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมากที่สุด และที่อายุบ่ม 60 วัน ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่ามากที่สุด แต่ยังมีปริมาตรโพรงทั้งหมดมากที่สุดเช่นกัน และไม่ได้มีค่าความพรุนน้อยที่สุดทั้งๆ ที่เป็นสภาวะที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมากที่สุด สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมิได้แปรผันตามการกระจายขนาดโพรงและค่าความพรุน

แต่อย่างไรก็ตามการกระจายขนาดโพรงอาจมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและค่าความคงทน ซึ่งควรจะนำไปศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

อิทธิพลของเวลาสามารถอธิบายได้จากผลทดสอบในตารางที่ 5 กล่าวคือเมื่ออายุบ่มมากขึ้นปริมาตรโพรงทั้งหมดและความพรุนรวมมีค่าลดลง ขณะที่โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์โพรงในมวลดิน และในขณะเดียวกันโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลง และสิ่งหนึ่งที่พบจากรูปที่ 6(ข) คือเมื่ออายุบ่มมากขึ้น (60 วัน) โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีปริมาตรสูงกว่าดินซีเมนต์ นั่นหมายถึงการใส่เถ้าชีวมวลจะเป็นการช่วยทำให้กลุ่มดินซีเมนต์ที่มีโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลงและส่งผลให้ปริมาตรของโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้น แสดงผลชัดเจนดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความพรุนทั้งหมด ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดและปริมาณขนาดช่องว่างขนาดต่างๆ ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

อายุบ่ม (วัน)	C:BA	Total porosity (%)	Total pore volume (cc/g)	Pore volume/Total pore volume (%)		
				<0.1 micron	0.1-10 micron	>10 micron
28	100:0	62.90	0.637	75.85	22.51	1.63
	90:10	61.65	0.588	76.46	18.84	4.69
	80:20	61.03	0.601	80.70	16.35	2.94
	70:30	67.18	0.670	70.02	17.96	12.02
60	100:0	59.77	0.535	78.71	16.88	4.41
	90:10	57.58	0.565	78.07	19.89	2.04
	80:20	58.70	0.598	83.15	12.00	4.85
	70:30	60.82	0.594	74.77	22.18	3.05

5.2.2 การทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ โดยมีปริมาณความชื้น 1 เท่าของดัชนีเหลว (ร้อยละ 103) ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน จะเห็นว่าที่อายุบ่มหนึ่ง ปริมาณ Ca(OH)_2 จะเพิ่มขึ้น

ตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชีวมวลถึงระดับหนึ่ง (อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20) และลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มากเกินไปกว่าค่าๆ หนึ่ง (อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30) ซึ่งให้ผลทดสอบแตกต่างจากงานด้านคอนกรีตเทคโนโลยี [24-28] กล่าวคือในงานคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีปริมาณ Ca(OH)_2 ลดลงอย่าง

เห็นได้ชัดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่สำหรับงานวิจัยของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนี้มีปริมาณ Ca(OH)_2 ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 มากที่สุด ทั้งที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลเพิ่มมากขึ้นปริมาณ Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยามีค่าลดลง และพบว่าปริมาณ Ca(OH)_2 ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 20 ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ปริมาณ Ca(OH)_2 ก็มีค่ามากที่สุดเช่นกัน อีกทั้งที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 ก็มีปริมาณ Ca(OH)_2 ที่เกิดขึ้นสูงกว่าเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันเป็นตัวควบคุมการพัฒนา กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล ปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถหาได้โดยตรงจากปริมาณ Ca(OH)_2 ที่ได้จากผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล ในทำนองเดียวกัน ปริมาณ Ca(OH)_2 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล (ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 ดังผลในตารางที่ 4) ซึ่งผลของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Ca(OH)_2)

ของดินซีเมนต์มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ที่มากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [17]

จากผลการกระจายขนาดโพรงและการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าชีวมวลเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่กระจายกลุ่มอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน (Ca(OH)_2) มีปริมาณมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 ที่ปริมาณ Ca(OH)_2 มีค่าอิทธิพลการกระจายตัว (Dispersion effect) เพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าชีวมวล

Sinsiri et al. [29] ได้ทำการศึกษาและแสดงให้เห็นว่าปริมาณ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์เถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไฮเดรชันเสมอเนื่องจากการใช้ Ca(OH)_2 ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป แต่ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนี้จะเห็นว่า Ca(OH)_2 เนื่องจากอิทธิพลร่วม (ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง) มีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ดินซีเมนต์) สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม และพบว่า Ca(OH)_2 ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 6) เนื่องจากการกระจายตัวจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ สำหรับทุกอายุบ่ม (28 และ 60 วัน)

ตารางที่ 6 ปริมาณ Ca(OH)_2 ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆ ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 103 ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

อายุบ่ม (วัน)	C:BA	Ca(OH)_2 (%)		
		Test (Combined effect)	Hydration Effect (Table 5)	Induced (Dispersion effect)
28	100:0	7.93	7.93	0
	90:10	8.20	7.69	0.51
	80:20	8.34	7.15	1.19
	70:30	7.89	6.58	1.31
60	100:0	8.38	8.38	0
	90:10	8.47	8.34	0.13
	80:20	8.67	7.85	0.82
	70:30	8.55	7.56	0.99

6. สรุปผลงานวิจัย

6.1 ดินซีเมนต์

จากผลทดสอบพบว่าปริมาณของโพรงขนาดเล็ก (< 0.1 ไมครอน) จะมีประมาณร้อยละ 75 ถึง 80 ของปริมาณโพรงทั้งหมด และมีปริมาณของโพรงขนาดใหญ่ (> 0.1 ไมครอน) ประมาณร้อยละ 20 ถึง 22 ของปริมาณโพรงทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงแรกโพรงขนาดใหญ่จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวและก่อตัวของกลุ่มดินซีเมนต์ ในขณะที่ซีเมนต์เจล (ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์) จะลดโพรงขนาดเล็กเมื่อแข็งตัวที่อายุมากขึ้น โพรงขนาดใหญ่ถูกอุดด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ส่งผลให้ปริมาตรโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและปริมาตรทั้งหมดลดลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานศึกษาในอดีต [17, 30]

6.2 ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลขึ้นกับอิทธิพลร่วมของปฏิกิริยาไฮเดรชันและอิทธิพลของการกระจายตัว อิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกควบคุมด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าชีวมวล (อัตราส่วนการแทนที่) ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 จะมีอิทธิพลการกระจายตัวน้อยที่สุด เถ้าชีวมวลเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่สามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดินและซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นดีขึ้น ผลการวิจัยนี้จะแตกต่างจากผลการศึกษาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี กล่าวคืออิทธิพลของปฏิกิริยาปอซโซลานจะเห็นได้ชัดเจนจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขั้นที่สองหรือเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป ดังนั้นจากผลการศึกษาดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนี้สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานแทบจะไม่มีบทบาทต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. [17] ซึ่งได้ทดสอบกับเถ้าลอยถ่านหินจากแม่เมาะ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติในการอนุเคราะห์ช่วยเหลือการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

8. เอกสารอ้างอิง

1. สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, บุรฉัตร ฉัตรวีระ, กรรณิการ์ พหลพิพัฒน์ และ ชาติชาย เสงวาณิชย์, 2540, "การศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสของซีเมนต์เพสผสมเถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาด" *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4*, กรุงเทพฯ.
2. ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547, *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*, สมาคมคอนกรีตไทย, หน้า 109.
3. Owens, P.L., 1979, "Fly ash and its usage in concrete", *Concrete, the Journal of Concrete Society*, Vol. 13, pp. 21-26.
4. Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A., and Shah, D.P., 1994, "Relation between microstructure and mechanical properties of the paste-aggregate interface", *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 1, pp. 30-39.
5. Mindess, S., 1996, "Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone", *J.C. Maso ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 48-63.
6. Igarashi, S., Bentur, A., and Mindess, S., 1996, "Microhardness testing of cementations materials", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 4, pp. 48-57.
7. Ollivier, J.P. and Massat, M., 1996, "The effect of the transition zone on transfer properties of concrete", *J.C. Maso ed., RILEM Technical Committee 108-ICC Report*, E&FN SPON, pp. 118-131.
8. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichkorn, A., and Kuchorn, T., 1999, "Strength activity index of single size fly ash mixed with Portland cement type I and Type III", *Proceedings of 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering*

and Construction, Kochi, Japan.

9. Chindaprasirt, P., Ruangsiriyaku, S., Cao, H.T., and Bucea, L., 2001, "Influence of Mae Moh fly ash fineness on characteristics, strength and drying shrinkage development of blended cement mortars", *Proceedings of 8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, p. 6.

10. Yang, C.C. and Su, J.K., 2002, "Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar", *Cement and Concrete research*, Vol. 32, pp. 1559-1565.

11. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V., 2004, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1087-1092.

12. Thumasujarit, K., and Tangtermsirikul, S., 2004, "Bleeding model for fly ash concrete", *Proceedings of 9th National Convention on Civil Engineering*, pp. MAT184-MAT189.

13. Prakash, K., and Sridharan, A., 2004, "Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 27, No. 2, pp. 220-225.

14. Rachan, R., Chim-oye, W., and Horpibulsuk, S., 2009, "Application of biomass fly ash as a pozzolanic material for stabilization of low swelling clay", *Journal of Lowland Technology International*, Vol. 11, No. 1, pp. 11-19.

15. Miura, N., Yamadera, A., and Hino, T. (1999), "Consideration on compression properties of marine clay based on the pore size distribution measurement", *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE. 624III-47.

16. Yamadera, A., 1999, "Microstructural Study of Geotechnical Characteristics of Marine Clays",

Ph.D. Dissertation, Saga University, Japan.

17. Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Rakchachon, Y., 2009, "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", *Soils and Foundations*, Vol. 49, No 1., pp. 85-98.

18. Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A. and Rakchachon, Y., 2010, "Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2010-2021.

19. Washburn, E.W., 1921, "Note on method of determining the distribution of pore size in porous material", *Proceedings of the Nation Academy of Science*, USA, Vol. 7, No. 4, pp. 115-116.

20. Midgley, H.G., 1979, "The determination of calcium hydroxide in set Portland cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 9, pp. 77-82.

21. El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1977, "A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement plates", *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, pp. 247-258.

22. El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1980, "The hydration of cement plate using the semi isothermal method of thermogravimetry", *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, pp. 361-366.

23. Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y. and Tzeng, B.Y., 2004, "The hydration characteristic when C2S is present in MSWI fly ash slag", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 323-330.

24. Berry, E.E., Hemmings, R.T., Zhang, M.H., Cornelious, B.J. and Golden, D.M., 1994, "Hydration in high-volume fly ash binders", *ACI Material Journal*, Vol. 91, pp. 382-389.

25. Sybertz, F. and Weins, U., 1991, "Effect of fly ash finesses on hydration characteristic and strength development", *International Conference on*

Blended Cements in Construction, Sheffield, 9-12 September: pp. 152-165.

26. Harris, H.A., Thompson, J.L., and Murphy, T.E., 1987, "Factor affecting the reactivity of fly ash from western coals", *Cement and Concrete Aggregate*, Vol. 9, pp. 34-37.

27. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 425-428.

28. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., 2006, "Effect of Fly Ash Fineness on

Microstructure Development of Blended Cement Paste", *Construction and Building Materials*.

29. Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P., 2006, "Influence of fly ash fineness on calcium hydroxide in blended cement paste", *Proceedings of Technology and Innovation for Sustainable Development Conference*, TISD2006, Khon Kaen University, Thailand.

30. Nagaraj, T.S., Miura, N. and Yamadera, A., 1990, "Re-examination of classification soft clay deposits", *Proceeding International Geotechnical Conference*, Vadodara, India, pp. 431-434.