บทที่ 7

อิทธิพลของปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบการส่องกวาด (Scanning Electron microscope, SEM) การทดสอบหาการกระจายตัวของช่องว่าง (Porosimeter test) และการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry analysis, TGA) เนื่องจากการศึกษาในอดีตจะกล่าวถึงเฉพาะอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่างๆ (อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์, ปริมาณความชื้น, อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสม, อายุบ่ม และประมาณสารเชื่อมประสาน) ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติทางกลของดินซีเมนต์ โดยปราศจากการอธิบายการเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค การศึกษาการเปลี่ยนแปลงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวแปรควบคุม อันจะนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดินด้วยซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพทั้งทางด้านหลักวิชาการและด้านเศรษฐศาสตร์

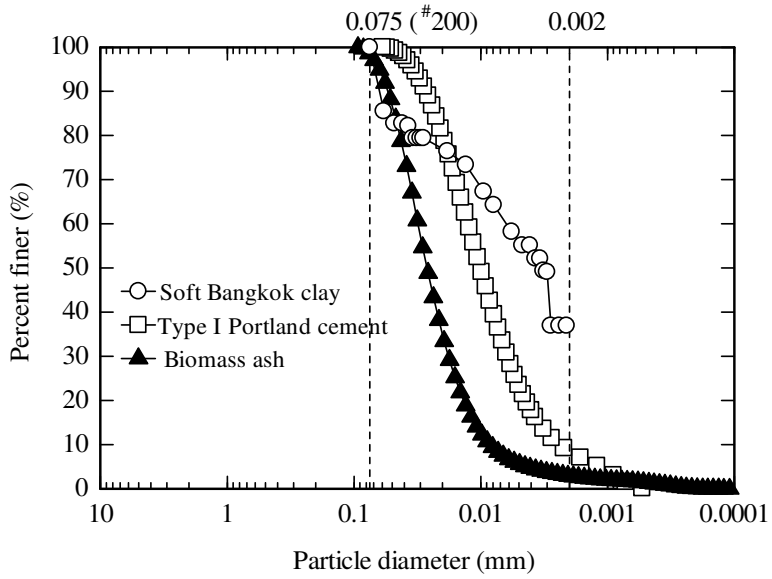
อีกทั้งปัจจุบันงานวิจัยด้านคอนกรีตเทคโนโลยี (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุลและคณะ, 2540; ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547; Owens, 1979; Mitsui, et al., 1994 ; Mindess, 1996; Igarashi et al., 1996; Ollivier and Massat, 1996; Jaturapitakkul, 1999; Chindaprasirt et al. 2001; Yang and Su, 2002; Chindaprasirt et al. 2004 และ Thumasujarit and Tangtermsirikul, 2004) ได้ประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์บางส่วน ทั้งนี้เพราะวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย silica, alumina และ ferric oxide เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะช่วยทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เมื่อรวมกับปูนซีเมนต์และน้ำ

ทั้งนี้มีงานวิจัยในอดีต (Kawasaki et al, 1981) ได้ทำการวิจัยนำเถ้าลอยมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างและพวกเขาพบว่า วัสดุเถ้าลอยมีความสามารถช่วยลดการบวมตัวและเพิ่มกำลังอัดให้กับดินที่ถูกปรับปรุง ดังนั้นเถ้าลอยที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์อาจมีส่วนช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์และมีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ด้านกำลัง การอัดตัวและการซึมผ่าน

แต่ทั้งนี้ในปัจจุบัน บทบาทของเถ้าลอยต่อการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรมจากโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

วัสดุทดสอบและวิธีการศึกษา

ดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตรจากผิวดินภายในบริเวณสถานที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษ (วงแหวนรอบนอกตะวันออก) บริเวณลำลูกกา เส้นบางพลี-ธัญบุรี จังหวัดกรุงเทพ ฯ ค่าพิกัดอัตเตอร์เบอร์กหาได้จากวิธี Fall cone ตามมาตรฐาน BS: 1377- part II, 1990 ค่าขีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 103.38 และ 31.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับและปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ เท่ากับ 95.3 เปอร์เซ็นต์ ความถ่วงจำเพาะของดินเท่ากับ 2.71 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) ด้วยระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unifined Soil Classification System, USCS) ผลการทดสอบการบวมตัวอิสระ (Free swelling ratio, FSR) ที่เสนอโดย Prakash and Sridharan (2004) เท่ากับ 1.27 ซึ่งจัดอยู่ในดินที่มีการบวมตัวต่ำ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยเพาเวอร์โอเปอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ หมู่ 3 ตำบลเขาหินซ้อน อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเถ้าชีวมวลนี้ได้จากการเผาวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เปลือกไม้ ไม้บอร์ด ไม้ยูคาลิปตัสสับละเอียดและแกลบอัดเม็ด เถ้าชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ C และ F ตามมาตรฐานของ ASTM C 618 ได้ เถ้าชีวมวลนี้นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (เถ้าละเอียด) ขนาดอนุภาคของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis เถ้าชีวมวลมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.95 และผลรวมของส่วนผสมหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าชีวมวลละเอียดมีปริมาณเท่ากับ 75.57 เปอร์เซ็นต์ องค์ประกอบทางเคมีและกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุทดสอบแสดงดังในภาพที่ 7.1 และตารางที่ 7.1 ตามลำดับ



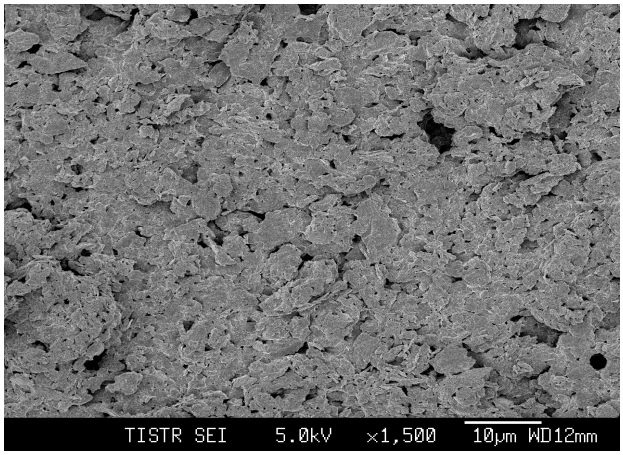
ภาพที่ 7.1 การกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าชีวมวล

ตารางที่ 7.1

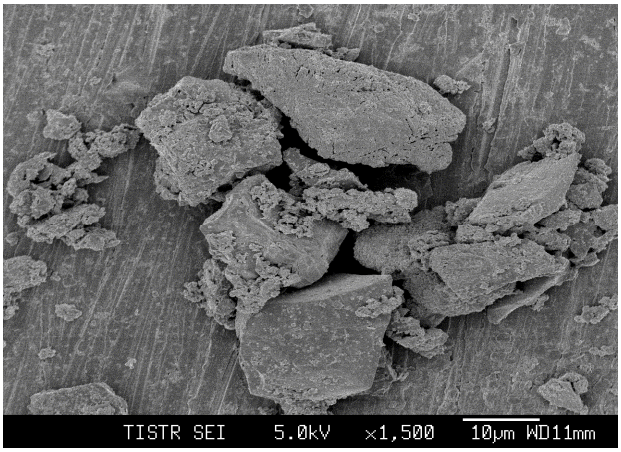
คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และเถ้าชีวมวล

Chemical Compounds	Portland Cement Type I	Biomass ash	Soft Bangkok clay
$\%SiO_2$	20.90	74.12	63.83
$\%Al_2O_3$	4.76	0.57	21.34
$\%Fe_2O_3$	3.41	0.88	8.41
$\%MgO$	1.25	1.54	1.54
$\%CaO$	65.41	5.91	0.94
$\%Na_2O$	0.24	3.33	0.28
$\%K_2O$	0.35	1.71	2.45
$\%SO_3$	2.71	0.50	1.22

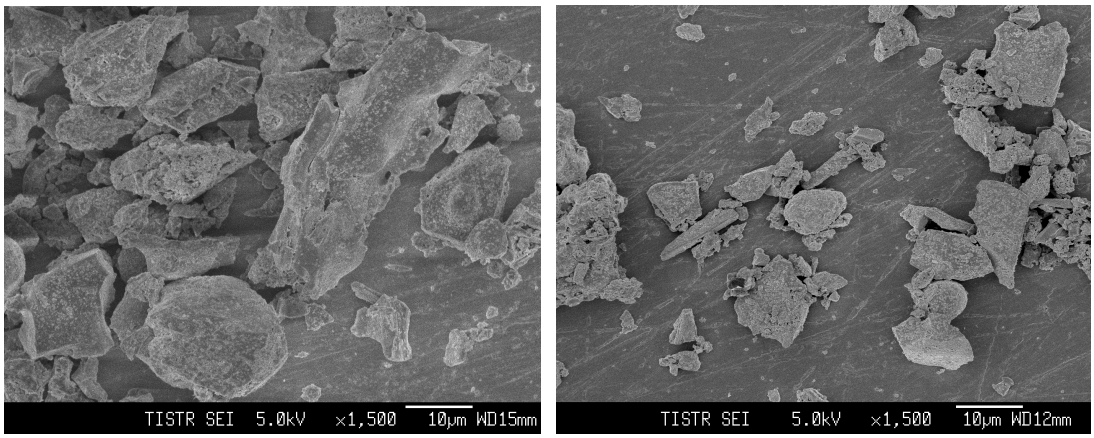
ภาพถ่ายขยายขนาดที่ 1500 เท่าของปูนซีเมนต์ เถ้าชีวมวลและดินตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 7.2 จะเห็นว่าอนุภาคของดินเหนียวตัวอย่างมีลักษณะเป็นกลุ่มเม็ดเล็ก ๆ จับกันเป็นแผ่นก้อนหนาทึบและยึดติดกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อพิจารณาขนาดแต่ละอนุภาคจะเห็นว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายตัวในภาพที่ 7.1 ในขณะที่อนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมและอนุภาคของเถ้าชีวมวลมีลักษณะเป็นทั้งแบบเหลี่ยม ลักษณะแบบเหลี่ยมยาวและกลมบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะเถ้าชีวมวลนี้ได้มาจากการเผาวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่แกลบ แกลบอัดเม็ด เปลือกไม้ ไม้บอร์ดและไม้ยูคาลิปตัส แต่จะเห็นว่ามีลักษณะรูปร่างคล้ายกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีลักษณะเหมือนมวลรวมหยาบ



ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ



ข) ปูนซีเมนต์



ค) เถ้าชีวมวล (ช่วงอนุภาคขนาดใหญ่) ง) เถ้าชีวมวล (ช่วงอนุภาคขนาดเล็ก)

ภาพที่ 7.2 ภาพถ่ายกำลังขยายของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และเถ้าชีวมวลที่กำลังขยายเท่ากับ 1500 เท่า

ดินเหนียวกรุงเทพจะถูกนำมาเก็บหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวล) โดยน้ำหนักดินแห้ง และกำหนดปริมาณความชื้นในการผสมเท่ากับ 1 เท่าของค่าดัชนีเหลวซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณความชื้นไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ มีเพียงตัวแปรของอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม (*Clay-water/Binder ratio*, W_c/B) เท่านั้น (ผลทดสอบจากบทที่ 4) ในที่นี้กำหนดที่อัตราส่วนผสมของปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณส่วนผสม เท่ากับ 3 และอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล (C:BioF) เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 90:0, 80:0 และ 70:0 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์หลังจากการผสมด้วยเครื่องผสมจนวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 5 ถึง 10 นาที แล้วนำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตรและความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร หลังจากตัวอย่างถูกถอดจากแบบหล่อ ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหาร และเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นจนได้ 28 และ 60 วัน เมื่อได้อายุบ่มตามต้องการแล้ว นำตัวอย่างมาทำการทดสอบแรงอัดแกนเดียวด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละอายุบ่ม ปริมาณส่วนผสม เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของผลทดสอบ และเก็บตัวอย่างบริเวณกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบเพื่อนำไปทดสอบในส่วนโครงสร้างจุลภาค ซึ่งได้แก่การถ่ายภาพกำลังขยาย (Scanning electron

microscope, SEM) การทดสอบการกระจายขนาดโพรง (Mercury intrusion porosimetry, MIP) และการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry analysis, TGA)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนั้น ทำโดยอาศัยผลทดสอบที่ได้จากกล้องขยายกำลังสูง (Scanning electron microscope, SEM) ด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscope (FE SEM) รุ่น Jeol, JSM-6340F เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (Mercury intrusion porosimetry, MIP) ด้วยเครื่องรุ่น Mercury porosimetry analyzer (PoreMaster) และเครื่องวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry analysis, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851^{e} ดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่ความชื้น 103.38 เปอร์เซ็นต์ (1LI) และที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน ถูกทำให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ สำหรับดินตัวอย่างทดสอบกล้องขยายกำลังสูงและการทดสอบการกระจายขนาดโพรงนั้นถูกเตรียมเพื่อระงับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยนำไปทำให้เย็นและแห้ง โดยการจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 วัน และดูดด้วยความดัน 0.5 ปาสคาล ที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน (Miura et al., 1999 และ Yamadera, 1999) ตัวอย่างทดสอบจากกล้องขยายกำลังสูงจะต้องถูกเคลือบด้วยทองก่อนเข้ากล้องส่องขยายกำลังสูง (รุ่นJOEL JSM-6400)

การวัดการกระจายตัวขนาดโพรงในมวลดินกระทำโดยใช้เครื่องวัดขนาดโพรงด้วยปรอท (MIP) ที่ความดันในช่วง 0 ถึง 288 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถวัดโพรงที่ขนาดเล็กถึง 0.0057 ไมครอน ชิ้นตัวอย่างทดสอบ MIP ได้จากการกระเทาะดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าลอยอย่างระมัดระวังด้วยเครื่องตัดเพชร จนมีขนาด 3-6 มิลลิเมตรและหนักประมาณ 1 ถึง 1.5 กรัม ขนาดโพรงสามารถประมาณได้จากสมการของ Washburn (1921) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน P และขนาดช่องว่าง d_p ดังสมการที่ 7.1

$$d_p = -\frac{4\gamma \cos\theta}{P} \tag{7.1}$$

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

การวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermal gravity analysis, TGA) เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการประมาณผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ซึ่งประกอบด้วยคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) คัลเซียมอลูมิเนต (CAH) คัลเซียมอลูมิน่าซิลิเกต (CASH) Ettringite และอื่น ๆ (Midgley, 1979) CSH, CAH, CASH รวมเรียกผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious product) ปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักที่สูญเสียในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 580 องศาเซลเซียส (El-Jazairi and Illston, 1977, 1980 และ Wang et al., 2004) เมื่อเผาดินซีเมนต์หรือดินซีเมนต์เถ้าลอยที่อุณหภูมิดังกล่าว คัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเปลี่ยนสภาพเป็นคัลเซียมออกไซด์ (CaO) และน้ำ ดังสมการที่ 7.2

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO + H_2O \qquad (7.2)$$

ปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้น้ำหนักของดินตัวอย่างลดลง ปริมาณของคัลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถประมาณได้จากน้ำหนักของน้ำที่สูญเสียดังสมการที่ 7.2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.11 คูณด้วยปริมาณน้ำที่สูญเสีย (El-Jazairi and Illston, 1977 และ 1980) การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น

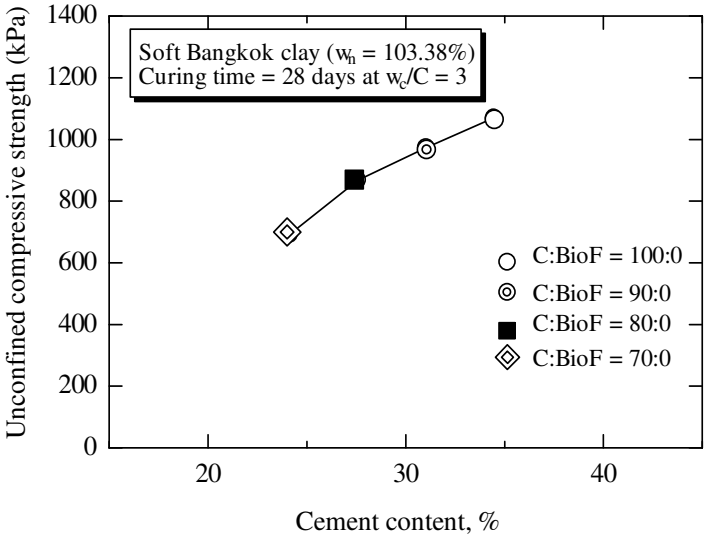
ดินซีเมนต์และดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลหลังจากได้อายุบ่มที่ต้องการแล้วจะถูกกะเทาะจนมีขนาดเล็ก ก่อนที่จะทำการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (TGA) ตัวอย่างอบแห้งจะถูกบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีน้ำหนักประมาณ 10-20 มิลลิกรัม และถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ผลการวิเคราะห์การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์จากผลทางโครงสร้างจุลภาค

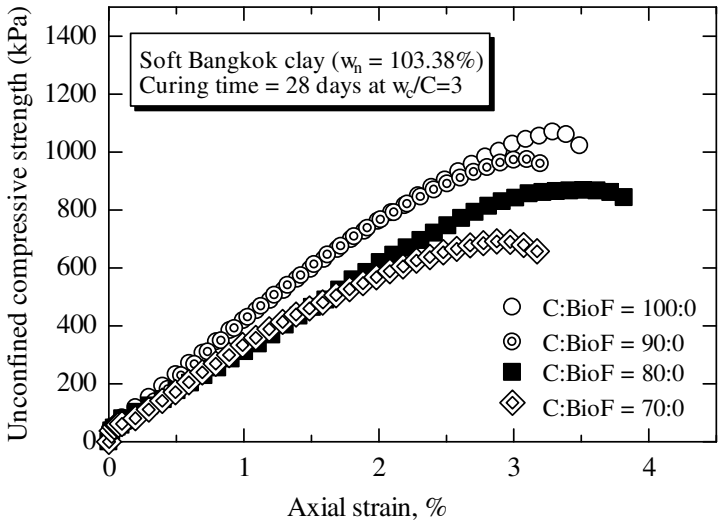
1. ผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 7.3 แสดงอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 103.38 เปอร์เซ็นต์ (1LI) ที่อายุบ่ม 28 วัน ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล (C:BioF) เท่ากับ 100:0, 90:0, 80:0 และ70:0 จะพบว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง C:BioF เท่ากับ 70:0 ถึง 100:0 ซึ่งจัดอยู่ในโซนแอคทีพ (Active zone) กล่าวคือเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซีเมนต์เจลที่จุดสัมผัสจะมีมากขึ้น และเมื่อซีเมนต์เจลแข็งตัว พันธะเชื่อมประสานที่จุดสัมผัสก็จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์กับความเครียดดังภาพที่ 7.4



ภาพที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและความเครียดของดินซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วัน