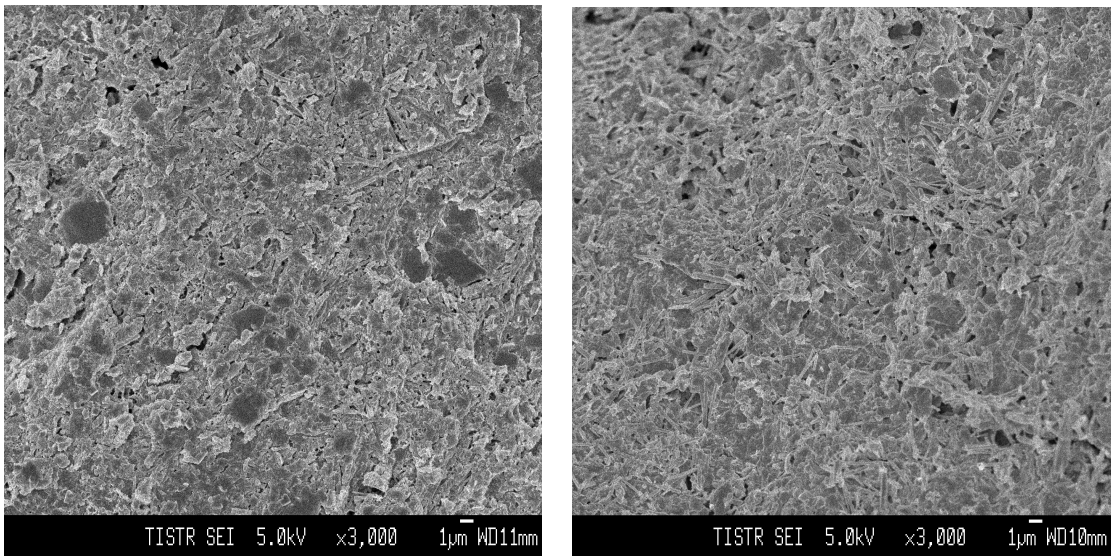


ค) C:BioF = 80:20 ง) C:BioF = 70:30

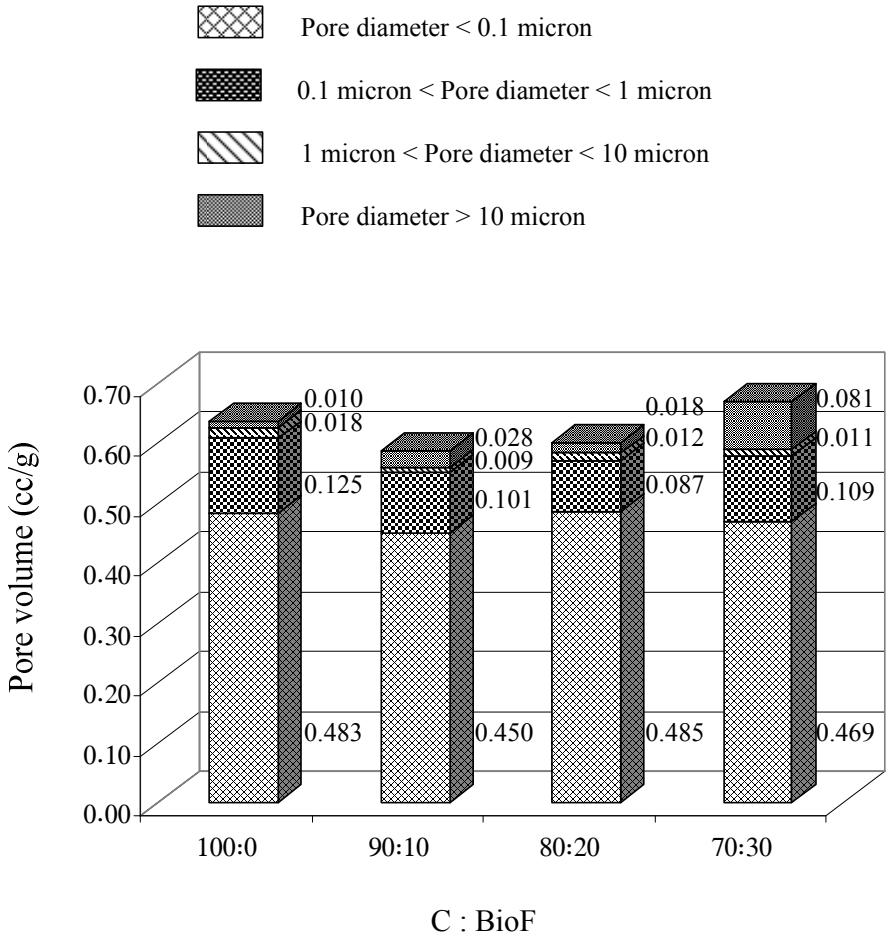
ภาพที่ 7.11 ภาพถ่ายขยายที่ 3000 เท่าของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล
ที่ปริมาณความชื้นค่าหนึ่ง ที่อายุบ่ม 60 วัน

2. การกระจายขนาดโพรง

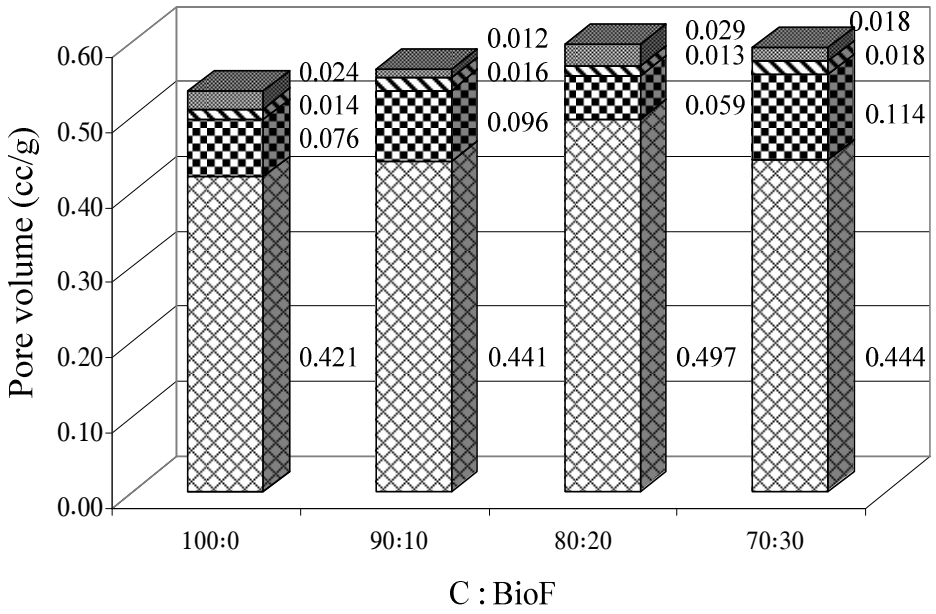
ภาพที่ 7.12 แสดงการกระจายปริมาตรโพรงในแต่ละช่วงขนาดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน พบว่าที่อายุบ่ม 28 วันนั้น เมื่อใส่เถ้าชีวมวลลงไปจะทำให้ปริมาตรทั้งหมดลดลง (ที่10 – 20%) แต่เมื่อใส่ในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ปริมาตรรวมเพิ่มขึ้น (ที่ 30%) ที่อัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาตรโพรงทั้งหมดมากที่สุดทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใส่เถ้าชีวมวลที่มากเกินไปจะเป็นการเพิ่มมวลหยาบ ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโพรง แต่เมื่ออายุบ่มมากขึ้นปริมาตรโพรงทั้งหมดและความพรุนรวมมีค่าลดลง ดังแสดงค่าในตารางที่ 7.6 แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ทั้งที่อายุบ่ม 28 และ 60 วันนั้นจะมีปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) มากที่สุด

ในที่นี่เราจะทำการจำแนกช่วงขนาดของโพรงในมวลดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลเป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (>10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ (10-0.1 ไมครอน) และโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ที่อายุบ่ม 28 วันเราพบว่าแม้ว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วน

การแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์มีปริมาตรโพรงทั้งหมดน้อยที่สุดแต่มิได้ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวมากที่สุด และที่อายุบ่ม 60 วันนั้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากที่สุดแต่ให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดมากที่สุด และไม่ได้มีค่าความพรุนน้อยที่สุดทั้ง ๆ ที่เป็นสภาวะที่ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมากที่สุดดังแสดงผลในตารางที่ 7.6 สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยมิได้แปรผันตามการกระจายขนาดโพรงและค่าความพรุน แต่อย่างไรก็ตาม การกระจายขนาดโพรงอาจมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและค่าความคงทน ซึ่งควรจะนำไปศึกษาวิจัยต่อในอนาคต



ก) อายุบ่ม 28 วัน



ข) อายุบ่ม 60 วัน

ภาพที่ 7.12 การกระจายปริมาตรโพรงในแต่ละช่วงขนาดของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

เมื่ออายุบ่มมากขึ้น ปริมาตรโพรงทั้งหมดและความพรุนรวมมีค่าลดลง ขณะที่โพรงขนาดเล็ก (<0.1ไมครอน) มีปริมาณเพิ่มขึ้นดังในตารางที่ 7.6 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นอุดโพรงในมวลดิน และในขณะเดียวกันโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลง และสิ่งหนึ่งที่พบคือเมื่ออายุบ่มมากขึ้น (60 วัน) โพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลมีปริมาตรสูงกว่าดินซีเมนต์ (ดังภาพที่ 7.12) นั้นหมายถึงการใส่เถ้าชีวมวลจะเป็นการช่วยทำให้กลุ่มดินซีเมนต์ที่มีโพรงขนาดใหญ่ (>0.1 ไมครอน) มีปริมาณลดลงและส่งผลให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้น แสดงผลชัดเจนดังในตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.6

ความพรุนทั้งหมด ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดและปริมาณขนาดช่องว่างขนาดเล็ก (<0.1 ไมครอน) ช่องว่างขนาดใหญ่ (0.1-10 ไมครอน) และช่องว่างอากาศ (> 10 ไมครอน) ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

Curing time	(C:BioF)	Total Porosity	Total Pore volume	Pore volume/Total pore volume, %		
(days)		(%)	(cc/g)	<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

3. การทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง

ตารางที่ 7.7 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ของคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่ปริมาณความชื้น 1 เท่าของดัชนีเหลว (103.38 เปอร์เซ็นต์) ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน จะเห็นว่าที่อายุบ่มหนึ่ง ปริมาณ $Ca(OH)_2$ จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าชีวมวลถึงระดับหนึ่ง (อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์) และลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่มากเกินกว่าค่า ๆ หนึ่ง (อัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งให้ผลทดสอบแตกต่างจากงานด้านคอนกรีตเทคโนโลยี กล่าวคือในงานคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย (Berry et al.,1994 ; Sybertz and Wiens, 1991; Harris

et al., 1987; and Chindapasirt, 2005 and 2006) เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่สำหรับงานวิจัยของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนี้มีปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์มากที่สุดทั้งที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน และเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชีวมวลเพิ่มมากขึ้นปริมาณ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยามีค่าลดลง และพบว่าปริมาณ $Ca(OH)_2$ที่อัตราส่วนการแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและที่อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ก็มีค่ามากที่สุดเช่นกัน อีกทั้งที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ก็มีปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นสูงกว่าเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นเป็นตัวควบคุมการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอย

ปริมาณ $Ca(OH)_2$ เนื่องจากอิทธิพลร่วมสามารถหาได้โดยตรงจากปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์เถ้าลอย ในทำนองเดียวกันปริมาณ $Ca(OH)_2$ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสามารถหาได้จากการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วงของดินซีเมนต์ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันกับของดินซีเมนต์เถ้าลอย (ที่อัตราส่วนการแทนที่ 0 เปอร์เซ็นต์) ดังผลของดินซีเมนต์ในตารางที่ 7.4 ซึ่งผลของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ($Ca(OH)_2$) ของดินซีเมนต์มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ที่มากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต (Sinsiri et al., 2006)

จากภาพถ่ายขยาย การกระจายขนาดโพรงและการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง เราสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าชีวมวลเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่กระจายกลุ่มของอนุภาคดินซีเมนต์ที่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกับน้ำให้แตกตัวออกเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ($Ca(OH)_2$) มีปริมาณมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 7.7 ที่ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่อิทธิพลการกระจายตัวนี้ (Dispersion effect) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าชีวมวล

Sinsiri et al., 2006 ได้ทำการศึกษาและแสดงให้เห็นว่าปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า $Ca(OH)_2$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไฮเดรชั่นเสมอเนื่องจากการใช้ $Ca(OH)_2$ ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป แต่ในกรณีของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนั้นจะเห็นว่า $Ca(OH)_2$ เนื่องจากอิทธิพลร่วม (ผลทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง) มีค่าสูงกว่าของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (ดินซีเมนต์) สำหรับทุกอัตราส่วนการแทนที่และอายุบ่ม และพบว่า $Ca(OH)_2$ ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 7.7) เนื่องจากการกระจายตัวจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการแทนที่ สำหรับทุกอายุบ่ม (28 และ 60วัน)

ตารางที่ 7.7

ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อัตราส่วนการแทนที่ต่าง ๆ ที่ปริมาณความชื้น 103.38 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุบ่ม 28 และ 60 วัน

Curing time (days)	(C:BioF)	$Ca(OH)_2$(%)		
		Test	Hydration from cemented clay (Table 7.4)	Induced (Dispersion effect)
28	100:0	7.93	7.93	0
	90:10	8.20	7.69 (C:BioF=90:0)	0.51
	80:20	8.34	7.15 (C:BioF=80:0)	1.19
	70:30	7.89	6.58 (C:BioF=70:0)	1.31
60	100:0	8.38	8.38	0
	90:10	8.47	8.34 (C:BioF=90:0)	0.13
	80:20	8.67	7.85 (C:BioF=80:0)	0.82
	70:30	8.55	7.56 (C:BioF=70:0)	0.99

สรุปและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค

1. ดินซีเมนต์

จากผลทดสอบทั้งหมดโพรงในมวลดินซีเมนต์สามารถจำแนกออกได้เป็นสามประเภท ได้แก่ โพรงอากาศ (> 10 ไมครอน) โพรงขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มดินซีเมนต์ (10-0.1 ไมครอน) และโพรงขนาดเล็กภายในอนุภาคเม็ดดินซีเมนต์ (< 0.1 ไมครอน) จากผลทดสอบโพรงขนาดเล็กจะมีปริมาณประมาณ 75 – 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด และมีโพรงขนาดใหญ่ประมาณ 20-22 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรโพรงทั้งหมด และพบว่าในช่วงแรกโพรงขนาดใหญ่จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวก่อตัวของกลุ่มดินซีเมนต์ ในขณะที่ซีเมนต์เจล (ซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ) ลดโพรงขนาดเล็ก (< 0.1

ไมครอน) เมื่อแข็งตัวที่อายุบ่มมากขึ้น โพรงขนาดใหญ่ (> 0.1 ไมครอน) ถูกอุดด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ส่งผลให้ปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (< 0.1 ไมครอน) เพิ่มขึ้นและปริมาตรทั้งหมดลดลง ให้ผลสอดคล้องกับงานศึกษาในอดีต (Nagaraj et al., 1990 and Horpibulsuk et al., 2009)

2. ดินซีเมนต์เถ้าชีวมวล

ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และดินต่างเป็นวัสดุอนุภาค (Particulate material) ซึ่งวัสดุอนุภาคนี้จะสามารถทำหรือไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ สำหรับดินเหนียวและปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้นอนุภาคของดินซีเมนต์จะรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคใหญ่ เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่สามารถกระจายกลุ่มของอนุภาคดินและซีเมนต์ให้เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นดีขึ้น จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลขึ้นกับอิทธิพลร่วมของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอิทธิพลของการกระจายตัว อิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นถูกควบคุมด้วยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าลอย (อัตราส่วนการแทนที่) ที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีอิทธิพลการกระจายตัวน้อยที่สุด ผลการวิจัยนี้จะแตกต่างจากผลการศึกษาด้านคอนกรีตเทคโนโลยี กล่าวคืออิทธิพลของปฏิกิริยาปอซโซลานจะเห็นได้ชัดเจนจากรอยกัดตามผิวของเถ้าลอย (Fraay et al., 1989; Berry et al.,1994 ; and Xu and Sarker, 1994; Chindapasirt, 2005) และการลดลงของปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมีปริมาณสูงมากพอที่จะผลิตคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขั้นที่สองหรือเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป ดังนั้นจากผลการศึกษาดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลนี้สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานแทบจะไม่มีบทบาทต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2009)

ดังนั้นการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในรูปแบบของวัสดุแทนที่ (Replacement material) แล้วก็นำเถ้าลอยไปใช้ในรูปแบบวัสดุช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีเมนต์ (Dispersing material) ที่เติมผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเพิ่มกำลังอัดแกนเดียว ทั้งนี้การศึกษาถึงอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมสำหรับเถ้าลอยประเภทต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไป