

บทที่ 4

ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อัตราส่วนชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ไม้สับร้อยละ 60-80 แกลบร้อยละ 10-40 และขังข้าวโพด ร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก โดยลักษณะของชีวมวลของไม้สับ แกลบและขังข้าวโพด แสดงในรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมชีวมวลที่ใช้เผาเพื่อให้ได้เถ้าลอยชีวมวลแสดง ในตารางที่ 4.1

เถ้าลอยชีวมวลที่ใช้แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 คือเถ้าลอยชีวมวลที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล (BMA) ใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 550-650 °C ชนิดที่ 2 คือ เถ้าลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง (WRHC) แสดงในรูปที่ 4.4 ใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 600 °C ใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 3 °C/นาที่ เผาที่อุณหภูมิคงที่นาน 6 ชั่วโมง ปริมาณเถ้าชีวมวลของไม้สับ แกลบและขังข้าวโพด ที่ได้จากการเผาในห้องทดลองแสดงใน ลักษณะเถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิด แสดงในรูปที่ 4.5 และปริมาณเถ้าชีวมวลที่ได้จากการเผาในห้องทดลองและปริมาณเถ้าชีวมวลที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แสดงใน ตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ไม้สับที่ใช้เผาในห้องทดลอง



รูปที่ 4.2 แกลบใช้เผาในห้องทดลอง



รูปที่ 4.3 ชั่งข้าวโพดใช้เผาในห้องทดลอง



รูปที่ 4.4 การเผาชีวมวลในห้องทดลอง

ตารางที่ 4.1 ชื่อตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลและอัตราส่วนของชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเถ้า	น้ำหนัก, kg			อุณหภูมิในการเผา, °C	วันที่เก็บตัวอย่าง
	ไม้สับ	แกลบ	ซังข้าวโพด		
BMA1	66.3	20.3	13.4	550-650	31-ต.ค.-55
BMA2	75.0	17.7	7.3	550-650	4-ธ.ค.-55
BMA3	71.0	19.6	9.4	550-650	5-ก.พ.-56
BMA4	72.5	20.0	7.5	550-650	5-เม.ย.-56
BMA5	70.5	21.5	8.0	550-650	7-มิ.ย.-56
BMA6	73.0	22.0	5.0	550-650	8-ส.ค.-56
WRHC1	80	10	10	600	2-พ.ย.-56
WRHC2	80	20	0	600	2-พ.ย.-56
WRHC3	70	20	10	600	2-พ.ย.-56
WRHC4	70	30	0	600	2-พ.ย.-56
WRHC5	60	30	10	600	2-พ.ย.-56
WRHC6	60	40	0	600	2-พ.ย.-56



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 เถ้าลอยชีวมวลชนิดที่ BMA (ก) และเถ้าลอยชีวมวลชนิดที่ WRHC (ข)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณการเกิดเถ้าชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง

ชนิด ชีวมวล	ที่	ปริมาณเถ้าชีวมวล				ปริมาณเถ้าชีวมวลร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200			
		น้ำหนัก ชีวมวล (g)	น้ำหนัก เถ้า (g)	ร้อยละ	ร้อยละ เฉลี่ย	น้ำหนัก เถ้า (g)	น้ำหนักร่อน ผ่านตะแกรง เบอร์ 200 (g)	ร้อยละ	ร้อยละ เฉลี่ย
Wood	1	500	15	3.00	2.47	100	82	82	81.67
	2	500	13	2.60		100	90	90	
	3	500	9	1.80		100	73	73	
Rice Husk	1	500	73	14.60	15.27	100	65	65	67.67
	2	500	76	15.20		100	72	72	
	3	500	80	16.00		100	66	66	
Corn cob	1	500	11	2.20	3.07	100	28	28	27.33
	2	500	20	4.00		100	30	30	
	3	500	15	3.00		100	24	24	

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าเถ้าลอยชีวมวล BMA (ก) มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีสีเทาเข้ม และ WRHC (ข) มีลักษณะเป็นผงละเอียดเช่นกันแต่มีสีเทา คือเถ้าทั้ง 2 ชนิดมีสีที่ไม่เหมือนกัน สาเหตุที่เถ้ามีสีเข้มหรือสีดำเกิดจากการเผาไหม้ของชีวมวลไม่สมบูรณ์ อุณหภูมิในการเผาไม่คงที่ มีอากาศไม่เพียงพอและระยะเวลาเผาไม่นานพอ คือ ตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวล BMA ได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้เตาเผาขนาดใหญ่ทำให้การควบคุมปัจจัยเรื่อง อุณหภูมิ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาและระยะเวลาในการเผาชีวมวลได้ยาก ทำให้เถ้าลอยชีวมวลที่ได้มีสีเข้มกว่าเถ้าลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง WRHC ตัวอย่างเช่น เถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบเทาขาวที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย เถ้าแกลบเทาขาวได้มาจากการเผาที่นานและที่มีอากาศพอเพียง ส่วนเถ้าแกลบดำได้จากการเผาที่มีอากาศไม่พอเพียงและมีเวลาในการเผาสั้น เป็นต้น ซึ่งระยะเวลาในการเผา อุณหภูมิและอากาศที่ใช้ในการเผาจะส่งผลถึงความเป็นผลึกและค่า LOI อีกด้วย คือ เถ้าที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะพบว่ามีค่า LOI สูงกว่าเถ้าที่เผาไหม้สมบูรณ์

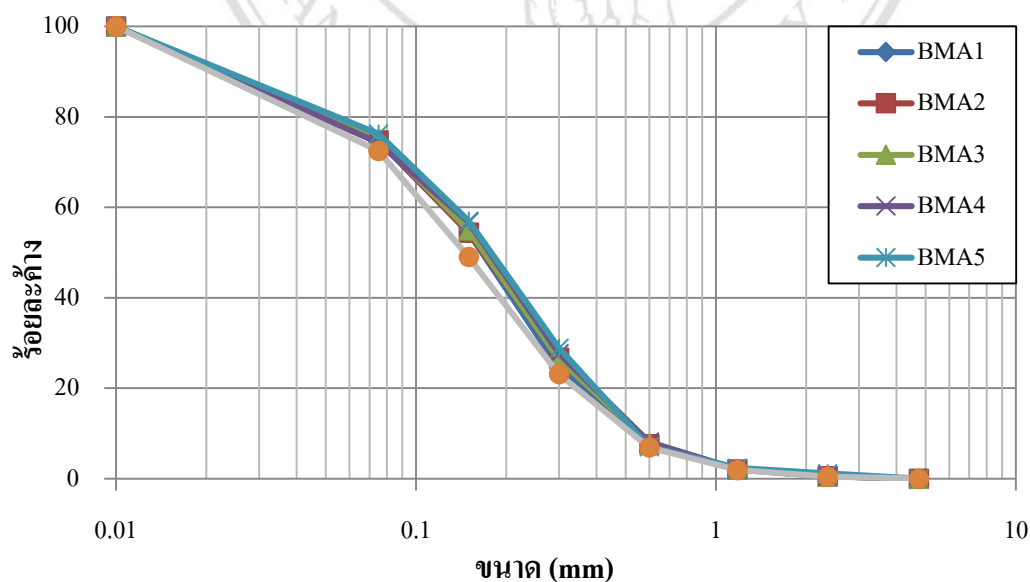
จากตารางที่ 4.2 ปริมาณการเกิดเถ้าชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง ทำให้ทราบว่าปริมาณเถ้าที่ได้จากชีวมวลเรียงจากมากไปหาน้อย คือ แกลบ ชังข้าวโพดและไม้สับ แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เถ้าที่มีความละเอียดเรียงจากมากไปหาน้อย คือ เถ้าไม้สับ เถ้าแกลบ และเถ้าชังข้าวโพด

ค่าปริมาณเถ้าที่ได้จากการเผาในห้องทดลองนี้ บ่งบอกถึงค่าปริมาณเถ้าของชีวมวลที่สามารถคำนวณได้ว่าในชีวมวลแต่ละอัตราส่วนเมื่อเผาไหม้เสร็จแล้วจะได้เถ้าของชีวมวลอะไรในปริมาณเท่าไร

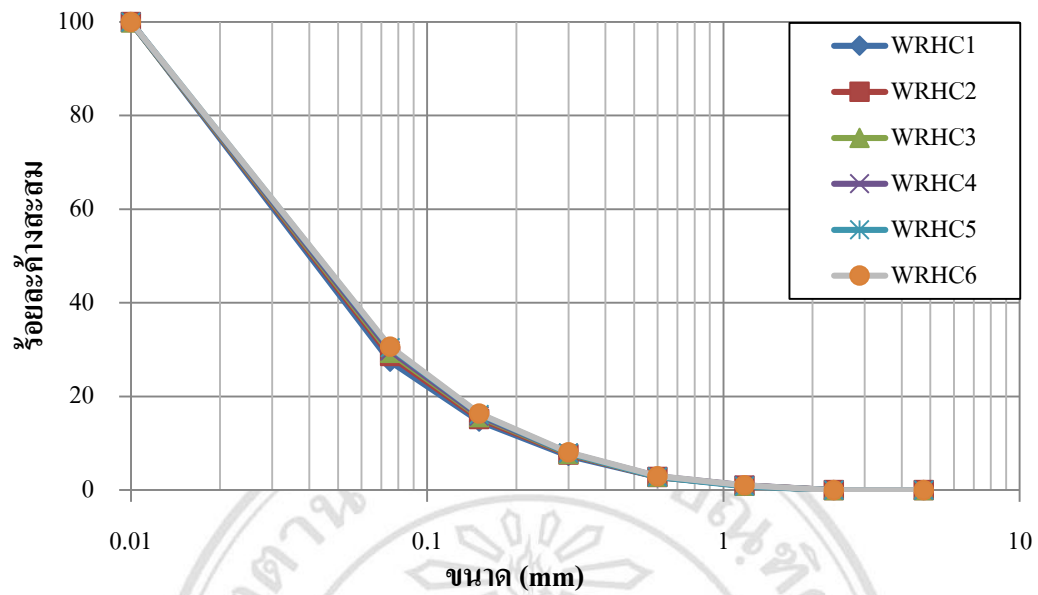
4.2 ขนาดคละและความถ่วงจำเพาะ

ขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวลที่ได้มาจากโรงไฟฟ้า (BMA) และเถ้าลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง (WRHC) ข้อมูลรายละเอียดแสดงในตารางที่ ก-1 แผนภูมิแสดงขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวลแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิดแสดงในตารางที่ ก-2 มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.00-2.30

จากผลการทดสอบขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวลด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานและแผนภูมิร้อยละค้ำงสะสมของเถ้าลอยชีวมวลเทียบกับขนาดเม็ดเถ้า พบว่าเถ้าลอยชีวมวล BMA มีส่วนละเอียดน้อยกว่าเถ้าลอยชีวมวล WRHC ดูจากปริมาณเถ้าที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ คือเถ้าลอยชีวมวล BMA มีค่าเท่ากับประมาณร้อยละ 25 และเถ้าลอยชีวมวล WRHC มีค่าประมาณร้อยละ 70 ความละเอียดของเถ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าลอยชีวมวล เพราะยังมีความละเอียดสูงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมีค่ามากขึ้นตาม และยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากปริมาณการเกิดปฏิกิริยาก็จะมากตามไปด้วย



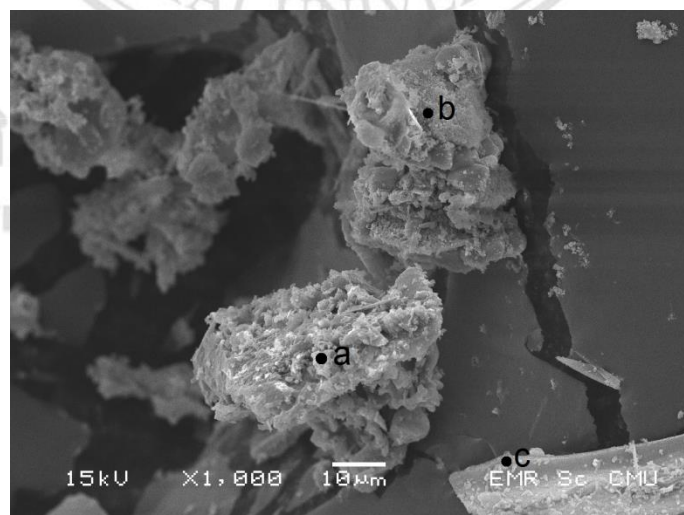
รูปที่ 4.6 ขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวล BMA



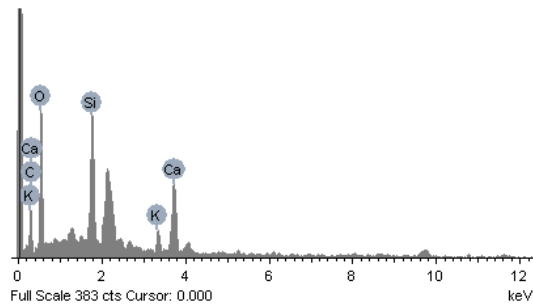
รูปที่ 4.7 ขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวล WRHC

4.3 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

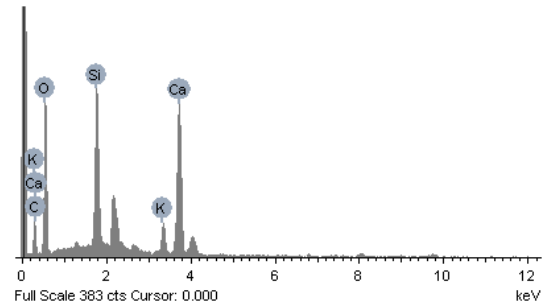
ผลทดสอบ SEM ทำให้เราเห็นถึงลักษณะของเม็ดของเถ้าลอยชีวมวล โดยรูปถ่าย SEM ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA และ WRHC แสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 ส่วนผลของการทดสอบ EDX ของเถ้าลอยชีวมวล BMA และเถ้าลอยชีวมวล WRHC แสดงในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.11 ตามลำดับ ส่วนเถ้าซังข้าวโพดผลของภาพ SEM และผล EDX แสดงรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 ตามลำดับ



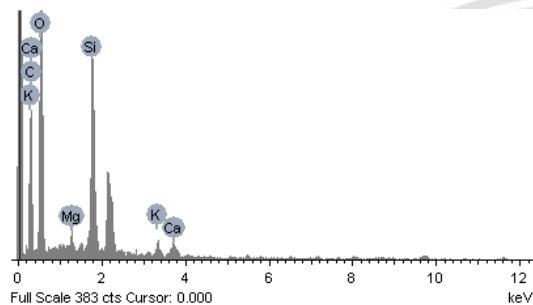
รูปที่ 4.8 SEM ของเถ้าลอยชีวมวลจากโรงไฟฟ้าชีวมวล (BMA)



(a)



(b)

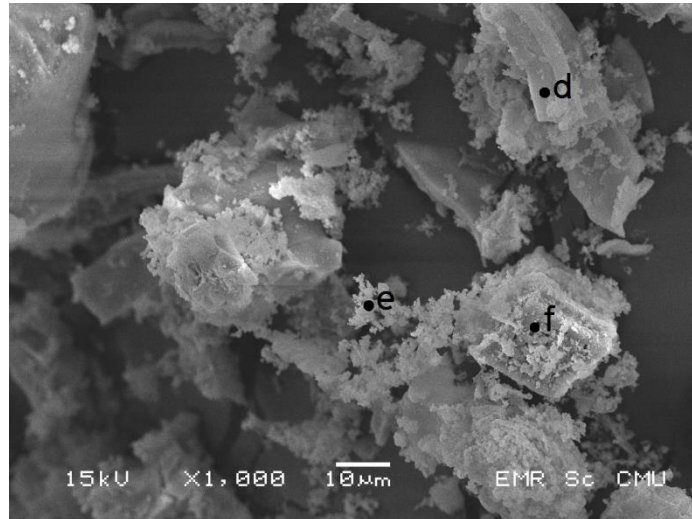


(c)

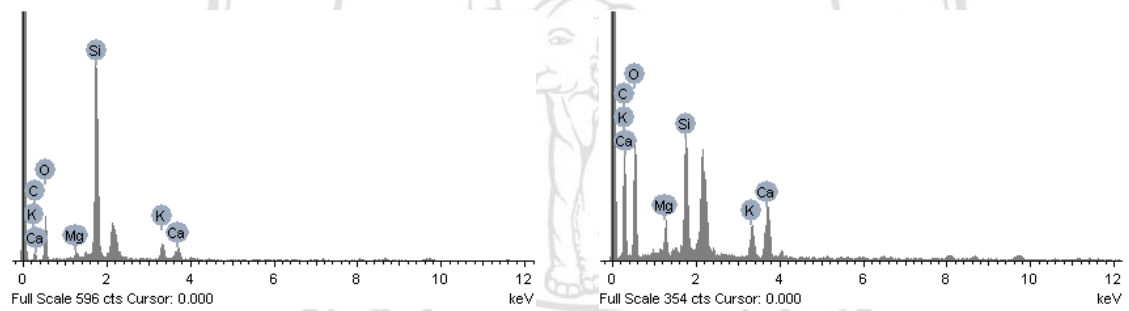
รูปที่ 4.9 ผล EDX ของเถาลอยชีวมวล BMA

จากภาพถ่าย SEM ของเถาลอยชีวมวล BMA ดังรูปที่ 4.8 พบว่ามีลักษณะเป็นก้อนมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีทั้งลักษณะที่เป็นเป็นแท่ง เป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดเล็ก ภายในเม็ดเถาขนาดใหญ่มีช่องว่างหรือ รูพรุนจำนวนมาก ผลการทดสอบด้วย EDX ของเถาลอยชีวมวล BMA แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าที่จุด a และ b มีจุดยอดของปริมาณธาตุของ แคลเซียม ซิลิกาและโพแทสเซียม เป็นส่วนมาก ทั้ง 2 จุดนี้คือ ก้อนเม็ดเถาของไม้ เพราะไม่มีปริมาณแคลเซียมสูงกว่าแคลบและ ช้างข้าวโพด ส่วนที่จุด c มีจุดยอดของปริมาณธาตุซิลิกาสูงอย่างเห็นได้ชัด จุดนี้คือเม็ดของเถาแคลบ เพราะเถาแคลบมีปริมาณของซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก

ผลของภาพถ่าย SEM ของเถาลอยชีวมวล WRHC ดังรูปที่ 4.9 พบว่ามีลักษณะของเถาค่อนข้างกับเถาลอยชีวมวล BMA คือ มีรูปร่างไม่แน่นอน มีความพรุนในก้อนเถา ผลการทดสอบ EDX ของเถาลอยชีวมวล WRHC แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าที่จุด d และ f มีค่าปริมาณของซิลิกาสูงมาก แสดงว่าก้อนเถาทั้ง 2 จุด คือ เถาแคลบ และที่จุด f มีปริมาณของธาตุแคลเซียม โพแทสเซียม ซิลิกาและแมกนีเซียม จุดนี้น่าจะเป็นเถาไม้

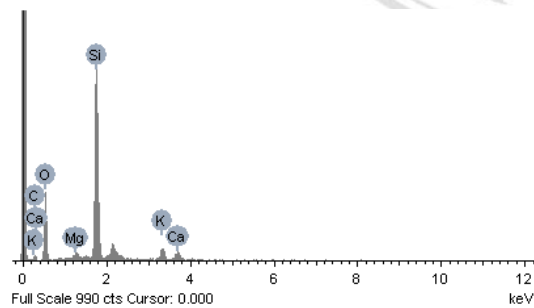


รูปที่ 4.10 SEM ของถ้ำลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง (WRHC)



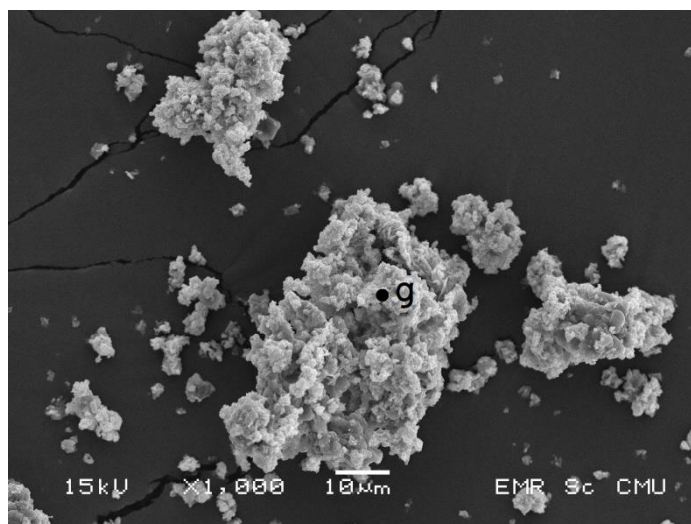
(d)

(e)

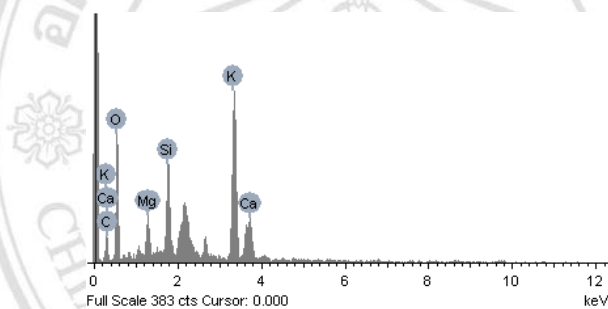


(f)

รูปที่ 4.11 ผล EDX ของถ้ำลอยชีวมวล WRHC



รูปที่ 4.12 SEM ของง่างข้าวโพดที่เผาในห้องทดลอง



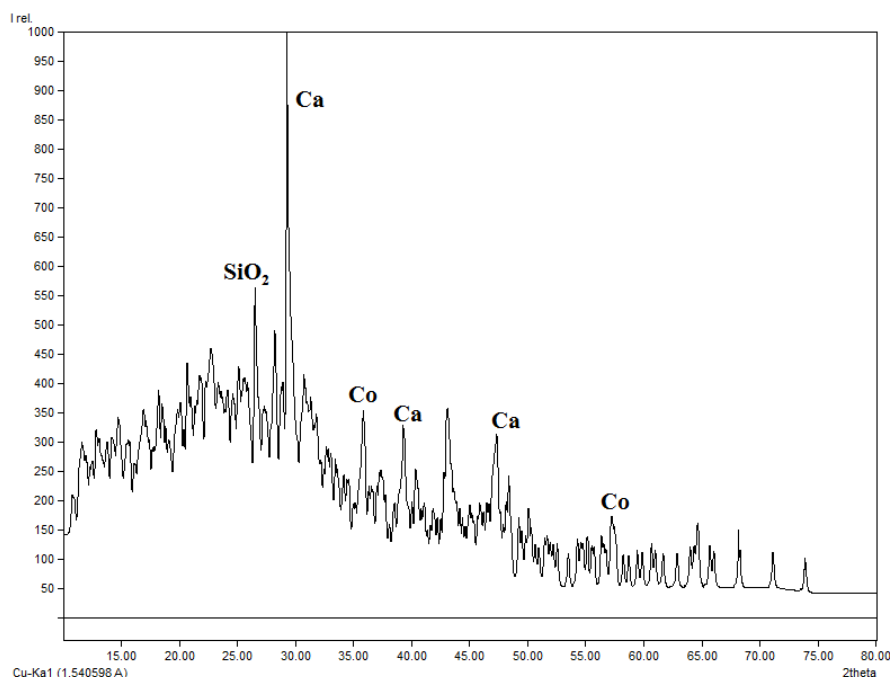
รูปที่ 4.13 จุด (g) ผล EDX ของง่างข้าวโพด

ส่วนภาพถ่าย SEM ของง่างข้าวโพดนั้นแสดงรูปที่ 4.12 ที่ถ่ายภาพแยกออกมานั้น เพราะว่าในกลุ่มทดสอบง่างลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ตรวจไม่พบเมล็ดง่างที่น่าจะเป็นง่างข้าวโพด สาเหตุจากปริมาณของง่างข้าวโพดที่เผามีน้อย คือไม่เกินร้อยละ 10 ลักษณะของเมล็ดง่างข้าวโพดมีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนติดกันรวมเป็นก้อนและภายในก้อนนั้นยังมีช่องว่างอยู่ด้วย และผล EDX ของง่างข้าวโพดที่จุด g พบว่าธาตุประกอบที่พบคือ โพแทสเซียม ซิลิกา แมกนีเซียมและแคลเซียม ซึ่งโพแทสเซียมจะมีค่าจุดยอดที่สูงอย่างชัดเจนแสดงว่าง่างข้าวโพดมีธาตุโพแทสเซียมเป็นหลัก

จากผลการทดสอบ SEM ของง่างลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิดนี้ พบว่าลักษณะของเมล็ดง่างลอยชีวมวลไม่มีรูปร่างที่แน่นอน มีทั้งเป็นกลุ่มก้อน เป็นแท่ง เป็นเม็ดเล็ก ๆ และมีความพรุนอยู่ในตัวเมล็ดง่าง และจากผล EDX ทำให้เราสรุปได้ว่า ง่างไม้ซบจะมีปริมาณแคลเซียมที่สูง ง่างกลบมีปริมาณซิลิกาเป็นธาตุประกอบหลัก และง่างข้าวโพดจะพบธาตุโพแทสเซียมในปริมาณสูง

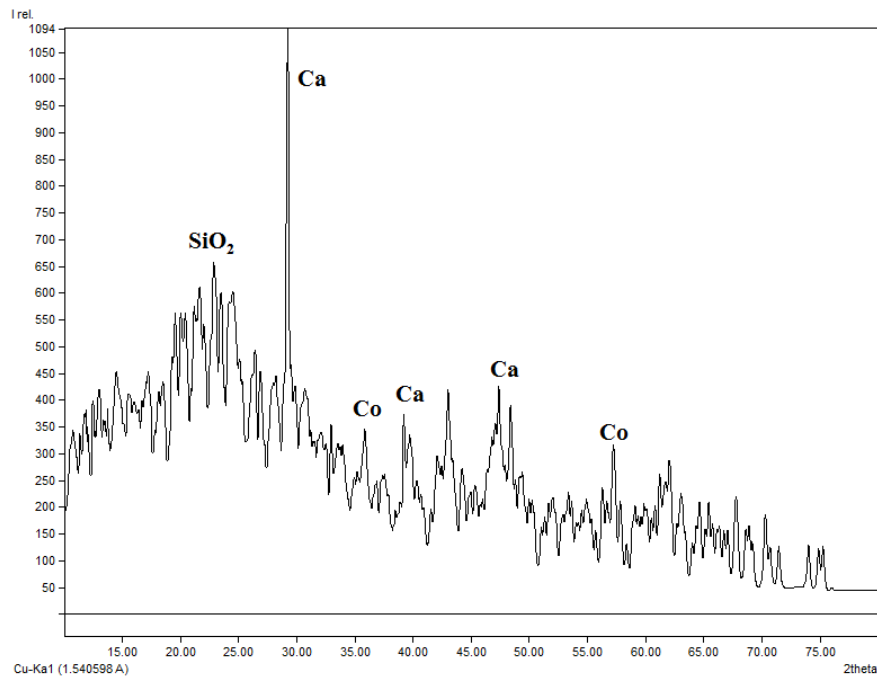
4.4 การทดสอบความเป็นผลึก โดยวิธี X – Ray Diffraction (XRD)

ผลการทดสอบ XRD ให้ผลอยู่ในรูปแผนภูมิของยอดคลื่นตามค่ามุม 2theta โดยในแต่ละธาตุจะให้ค่าจุดยอดคลื่นที่แตกต่างกันแล้วแต่ค่า 2theta ผลการทดสอบของเถ้าลอยชีวมวล BMA และ WRHC แสดงในรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ผล XRD ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยวิธี XRD ของเถ้าชีวมวล BMA และ WRHC แสดงรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 ตามลำดับ พบว่ามีเถ้าชีวมวล BMA คือช่วงค่า 2-theta ประมาณ 27 องศา พบจุดยอดของกราฟเป็นของซิลิกา (SiO₂) ส่วนเถ้าชีวมวล WRHC ที่ 2-theta ประมาณ 22 องศาพบจุดยอดของกราฟของซิลิกาเช่นกัน จุดยอดกราฟที่ไม่สูงมากแสดงว่าเป็นผลึกแบบมีควอตซ์ต่ำ (Quartz low) และลักษณะเป็นจุดยอดของกราฟแบบกว้าง แสดงถึงความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนจุดยอดของกราฟที่เหลือมีความคล้ายกันคือ เป็นจุดยอดของกราฟของผลึกแคลไซต์ (CCaO₃) และคอร์ันดัม (Al₂O₃) สรุปได้ว่าเถ้าชีวมวลทั้งสองตัวอย่างมีธาตุซิลิกาที่มีลักษณะเป็นอสัณฐานประกอบอยู่ ซึ่งการที่เถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิดมีธาตุซิลิกาที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน แสดงว่าซิลิกาที่มีอยู่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ เมื่อนำมาทดสอบผสมลงในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตจะให้ผลกำลังอัดที่สูงขึ้นในระยะยาว



รูปที่ 4.15 ผล XRD ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC

4.5 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence (XRF)

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชีวมวลทั้งชนิด BMA และ WRHC แสดงในตารางที่ 4.6 โดยจะประกอบไปด้วยผลทดสอบของ เถ้าไม้ (Wood Ash) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เถ้าซังข้าวโพด (Corncob Ash) เถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA1 ถึง BMA6 และเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC1 ถึง WRHC 6

จากผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิด พบว่าเถ้าลอยชีวมวล BMA และ WRHC มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก เถ้าลอยชีวมวลมีปริมาณซิลิกาอยู่ที่ประมาณร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอยชีวมวล WRHC2 ถึง WRHC6 มีซิลิกาประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 59 – 75 ส่วน WRHC1 มีซิลิกาอยู่เพียง ร้อยละ 45 เท่านั้น เมื่อสังเกตดูปริมาณซิลิกาของแต่ละตัวอย่าง เถ้าลอยชีวมวลแล้วนำไปเปรียบเทียบกับอัตราส่วนชีวมวลของแต่ละตัวอย่าง จะพบว่าปริมาณซิลิกานี้น้อยกว่าปริมาณแกลบ เพราะดูจากองค์ประกอบของเถ้าแกลบที่มีซิลิกาอยู่ร้อยละ 90 ซึ่งทำให้ยังมีส่วนของแกลบมากปริมาณซิลิกาก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนเถ้าไม้มีปริมาณ ซิลิกาเพียง ร้อยละ 7 แต่มีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) คือมีร้อยละ 39.67 และเถ้าซังข้าวโพดมีซิลิกาอยู่ร้อยละ 23.55 และมีโพแทสเซียม (K_2O) เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณอยู่ร้อยละ 47.79 ซึ่งปริมาณของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นสารประกอบที่สำคัญของสาร

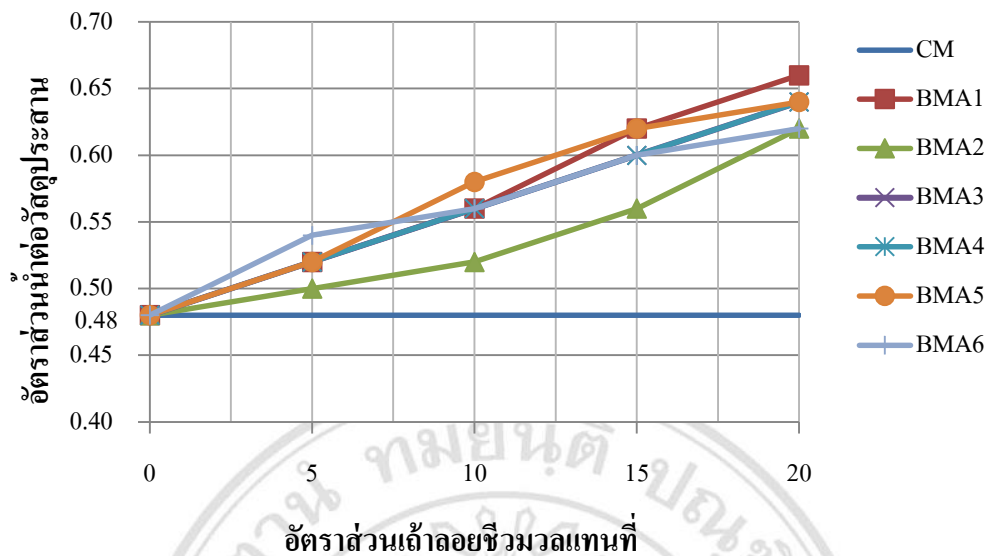
ปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถแบ่งประเภทของเถ้าลอยชีวมวลได้ว่า เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ ซิลิกา อลูมินาและเฟอริกออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 50 จัดเป็นเถ้าลอย Class C นั้นก็คือ BMA1 ถึง BMA6 WRHC2 และ WRHC3 ส่วนที่มีค่าผลรวมมากกว่าร้อยละ 70 จัดเป็นเถ้าลอย Class F คือ เถ้าลอยชีวมวล WRHC4 WRHC5 และ WRHC6 ซึ่งสารประกอบทั้ง 3 ตัวนี้เป็นสารที่สำคัญต่อการทำปฏิกิริยาปอชโซลานที่จะทำให้กำลังของตัวซีเมนต์เพสนั้นเพิ่มขึ้น

ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss on ignition, LOI) ของเถ้าลอยชีวมวลพบว่า เถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 13.38-15.50 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.32-9.14 ค่า LOI ของเถ้าลอยชีวมวลนั้นเป็นค่าที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพส เพราะส่วนที่เป็น LOI นั้นคือ ส่วนที่มีธาตุคาร์บอนและคาร์บอนเอนโดอยู่สูง โดยทั่วไปเถ้าลอยที่มีแคลเซียมน้ำจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ และเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูงจะมีคาร์บอนสูง ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เนื่องจากเถ้าลอยที่มีค่า LOI สูงจะมีคาร์บอนสูงและมีรูพรุน (cellular) สูงตามไปด้วย ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นและทำให้ดูดน้ำได้มาก ส่งผลให้ความต้องการน้ำในการผสมของเถ้าลอยสูงขึ้น ความสามารถเทได้ของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยนั้นจะลดลง และส่งผลถึงกำลังอัดลดลงอีกด้วย เพราะคาร์บอนเป็นธาตุที่โครงสร้างไม่แข็งแรงรับน้ำหนักได้ต่ำ

4.6 ผลทดสอบของมอร์ตาร์

4.6.1 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

ผลค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1437 ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ ก-3 และเมื่อนำค่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA และ WRHC แสดงในรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 ตามลำดับ มอร์ตาร์ควบคุมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ที่ 0.48 ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยชีวมวลมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นแปรผันตรงตามปริมาณร้อยละการแทนที่เถ้าลอยชีวมวลในปูนซีเมนต์ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดคือ เถ้า BMA1 WRHC2 และ WRHC5 เท่ากับ 0.66 0.62 และ 0.62 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุแทนที่ (BMA) แทนที่ปูนซีเมนต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

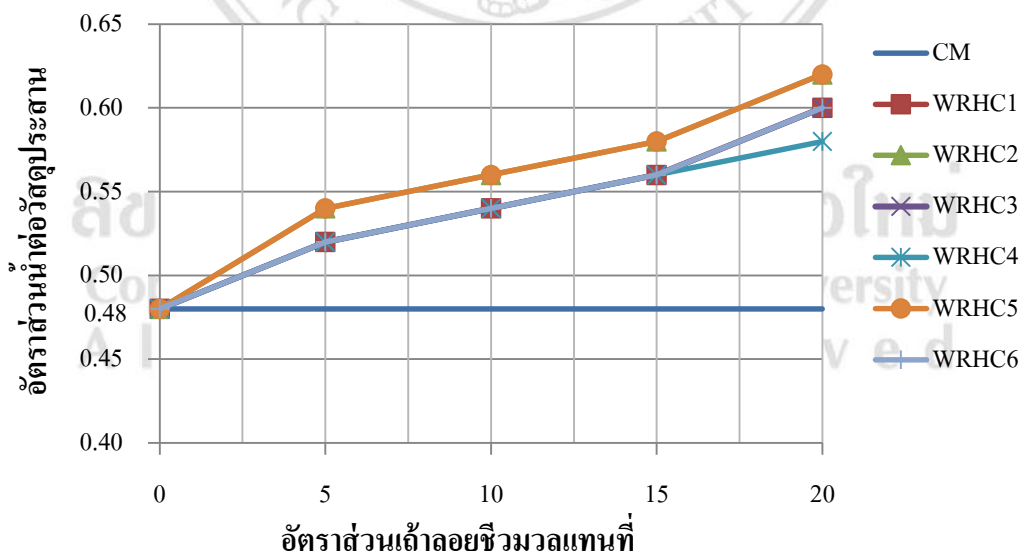
จากผลทดสอบการไหลเพิ่มอัตราพบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิดลงไป มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แสดงว่าเถ้าลอยชีวมวลเพิ่มความต้องการของน้ำมากขึ้น สาเหตุเกิดจากรูปร่างของเม็ดเถ้าที่มีรูพรุนจำนวนมาก เกิดการดูดน้ำเก็บไว้ในช่องว่าง ซึ่งความต้องการน้ำในการผสมที่มากขึ้นจะส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ลดลง และมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชีวมวลที่จะลดลงตามปริมาณที่ใส่เถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชีวมวล

องค์ประกอบทางเคมี	PC Type I	Wood Ash	RH Ash	Cc Ash	BMA1	BMA2	BMA3	BMA4
SiO ₂	20.5	7.04	90.44	23.55	57.49	58.48	56.38	55.37
Al ₂ O ₃	5.4	1.28	0.84	1.64	2.33	2.58	1.30	1.33
Fe ₂ O ₃	2.6	0.48	0.17	0.40	1.03	1.13	0.56	0.64
CaO	63.9	39.67	1.87	2.47	14.44	14.45	15.82	16.26
MgO	2.1	4.88	0.39	2.65	2.20	1.95	2.29	2.28
Na ₂ O	0.61	0.56	0.08	0.50	0.42	0.57	0.08	0.07
K ₂ O		13.44	2.74	47.79	3.09	2.88	7.40	7.37
P ₂ O ₅		3.29	0.95	5.14	4.11	2.77	2.35	2.36
MnO		0.24	0.13	0.07	0.12	0.12	0.13	0.13
TiO ₂		0.06	0.03	0.03	0.14	0.17	0.12	0.13

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชีวมวล (ต่อ)

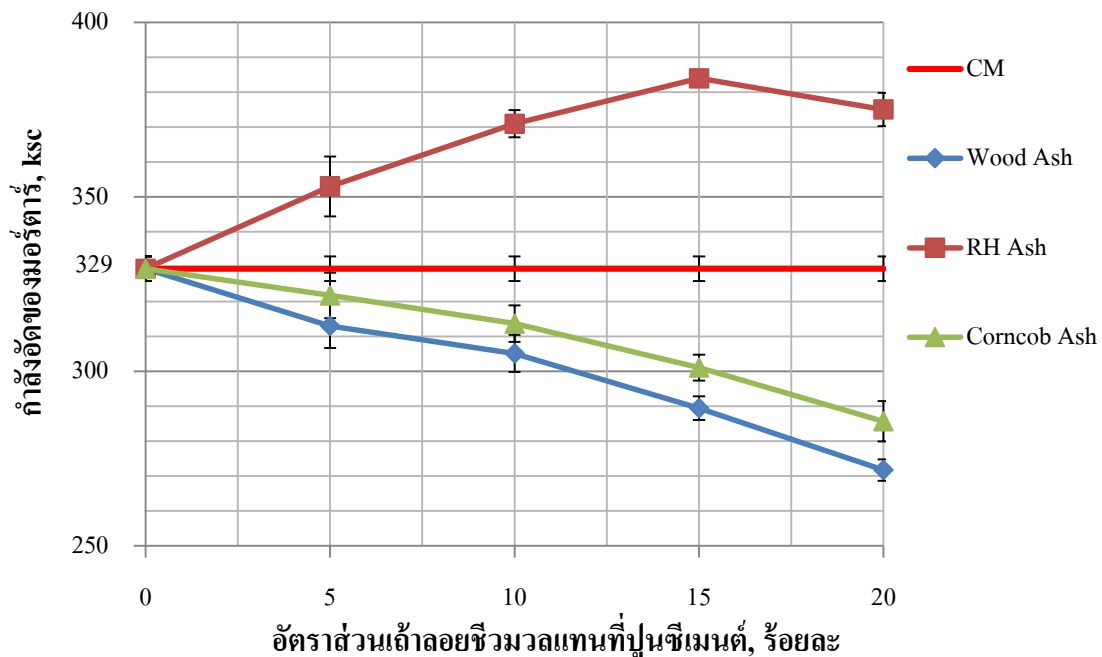
องค์ประกอบทางเคมี	BMA5	BMA6	WRHC1	WRHC2	WRHC3	WRHC4	WRHC5	WRHC6
SO ₃	3							
Loss on Ignition (LOI)		15.20	1.90	15.50	14.78	15.08	13.38	14.49
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		8.79	91.46	25.58	60.84	62.18	58.24	57.34
Fe ₂ O ₃	0.60	0.59	0.34	0.29	0.28	0.25	0.24	0.23
CaO	16.73	16.35	22.27	15.93	14.72	11.57	10.48	8.74
MgO	2.42	2.37	2.82	2.06	1.93	1.54	1.42	1.21
Na ₂ O	0.09	0.10	0.34	0.26	0.24	0.20	0.19	0.17
K ₂ O	7.52	7.34	8.73	6.72	6.53	5.48	5.30	4.68
P ₂ O ₅	2.50	2.43	2.23	1.82	1.76	1.55	1.49	1.38
MnO	0.13	0.13	0.19	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15
TiO ₂	0.14	0.13	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SO ₃								
Loss on Ignition (LOI)	13.88	13.87	9.14	6.85	6.47	5.31	4.97	4.32
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	56.79	57.60	46.54	60.72	63.12	70.24	72.45	76.44



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวล WRHC แทนที่ปูนซีเมนต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

4.6.2 ผลกำลังอัดของมอร์ตาร์

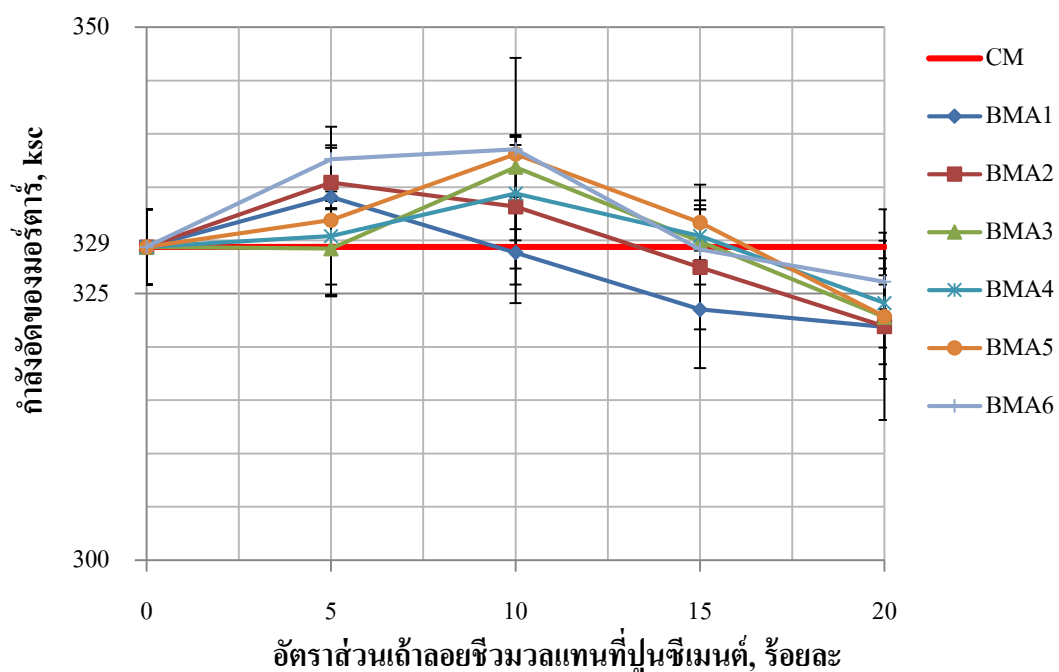
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C109 ในการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 มอร์ตาร์ผสมเถ้าไม้สับ เถ้าแกลบและเถ้าซังข้าวโพด กลุ่มที่ 2 มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA และกลุ่มที่ 3 มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุตัวอย่าง 7 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ ก-4 ถึง ก-6 กำลังอัดมอร์ตาร์กับอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของแต่ละกลุ่มที่อายุตัวอย่าง 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.18 – รูปที่ 4.21 และความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดมอร์ตาร์กับอายุมอร์ตาร์ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA6 และ WRHC6 แสดงในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ



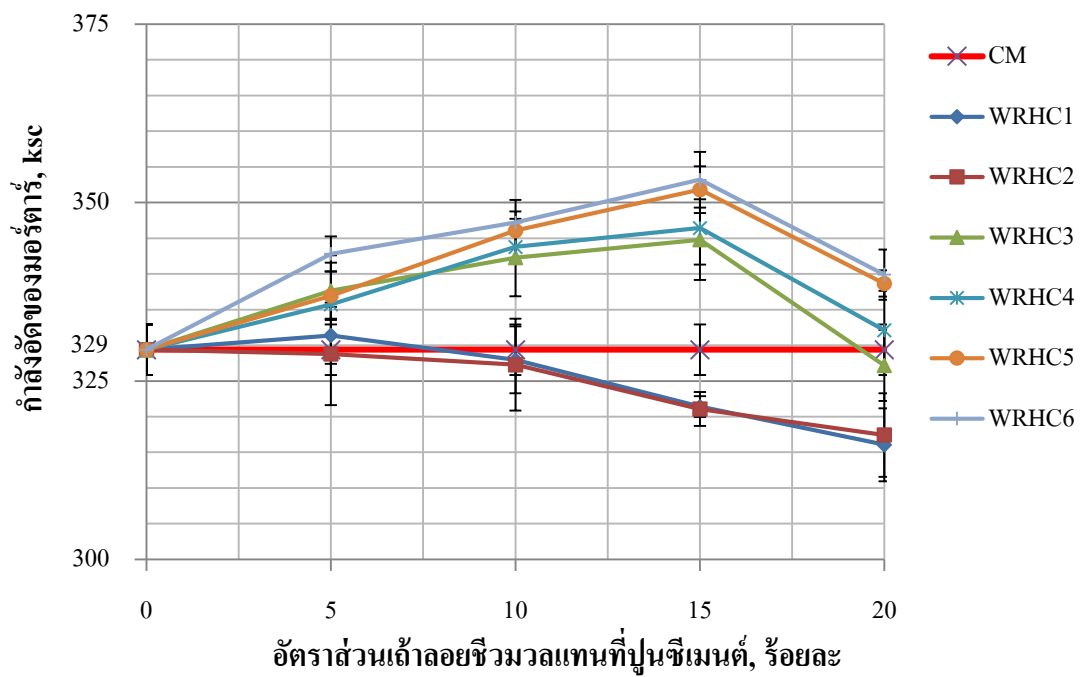
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าไม้ เถ้าแกลบและเถ้าซังข้าวโพด ที่อายุ 28 วัน กับกำลังอัดมอร์ตาร์

จากรูปที่ 4.18 พบว่ากำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุมมีค่าเท่ากับ 329 ksc และเถ้าแกลบให้ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์สูงสุดที่อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 384 ksc คิดเป็นร้อยละ 117 ของกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม และเถ้าแกลบให้ผลกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในทุกอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าไม้สับและเถ้าซังข้าวโพดให้กำลังอัดที่ต่ำ

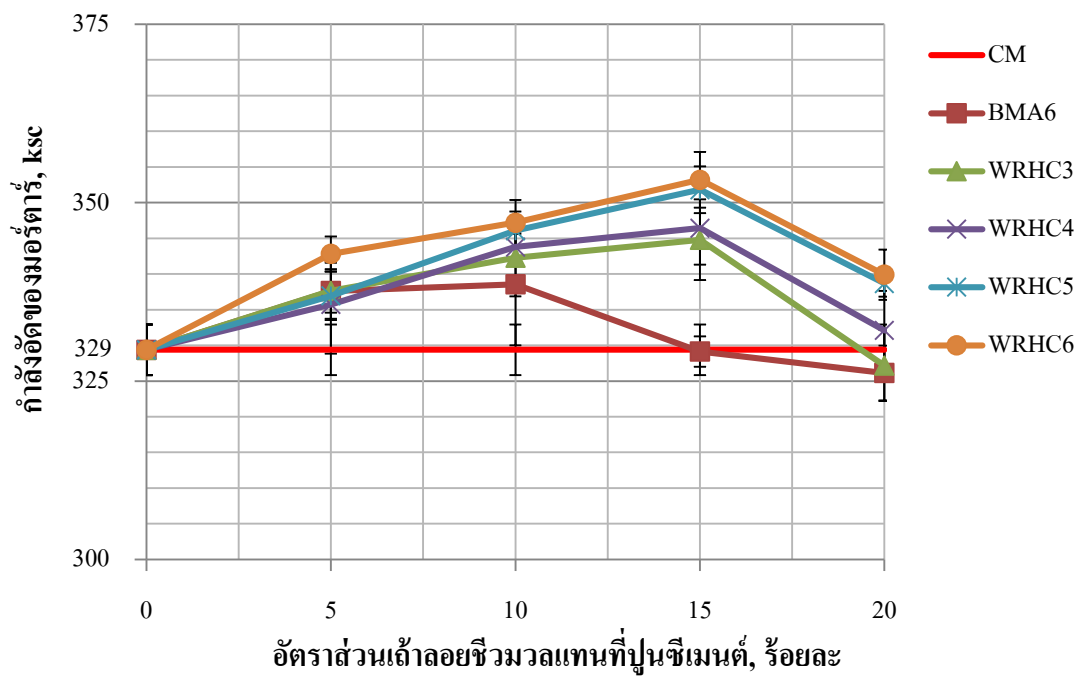
กว่ามอร์ตาร์คความ ให้ค่าต่ำสุดที่อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 มีกำลังอัดเท่ากับ 272 และ 286 ksc คิดเป็นร้อยละ 82 และ 87 ของกำลังอัดมอร์ตาร์คความ ตามลำดับ โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์คความลดลงตามปริมาณร้อยละแทนที่ที่มากขึ้น ในรูปที่ 4.19 -4.21 แสดงถึงแนวโน้มของมวลที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดคือ ชนิด BMA6 ที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 เท่ากับ 337 ksc คิดเป็นร้อยละ 102 และ WRHC6 อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 15 เท่ากับ 353 ksc คิดเป็นร้อยละ 107 และจากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 พบว่าการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์คผสมเถ้าลอยชีวมวลมีการพัฒนากำลังอัดได้ช้าในส่วนแรกคือ 7 – 14 วัน และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มขึ้น มีค่าใกล้เคียงและสูงกว่ามอร์ตาร์คความที่อายุ 28 วัน และมีแนวโน้มที่จะพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมอร์ตาร์คเพิ่มขึ้น



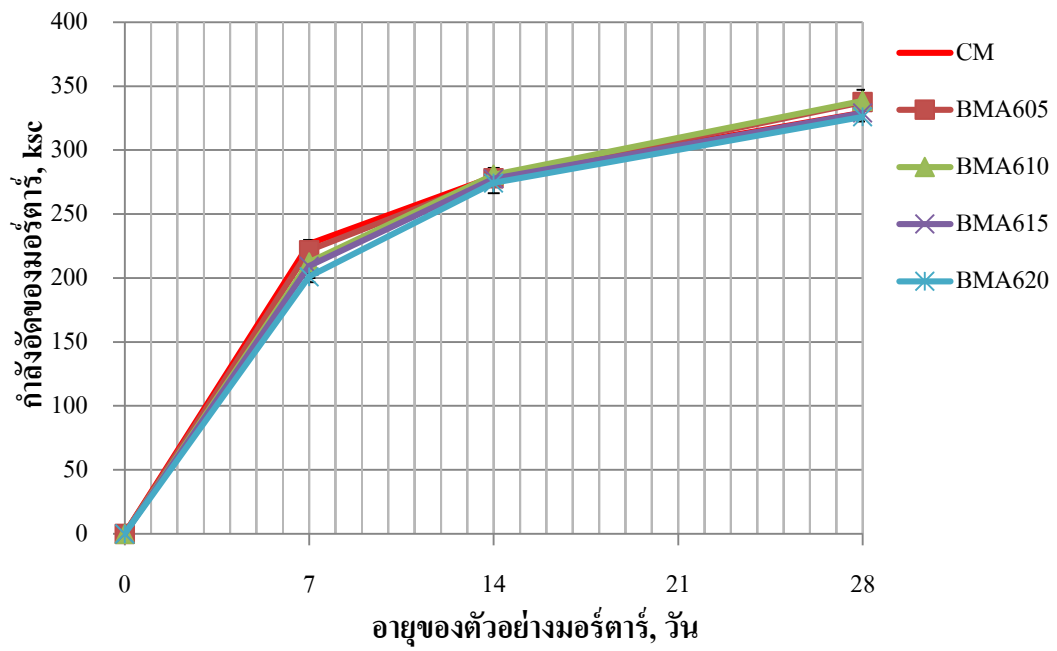
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าชนิด BMA กับ กำลังอัดมอร์ตาร์ค



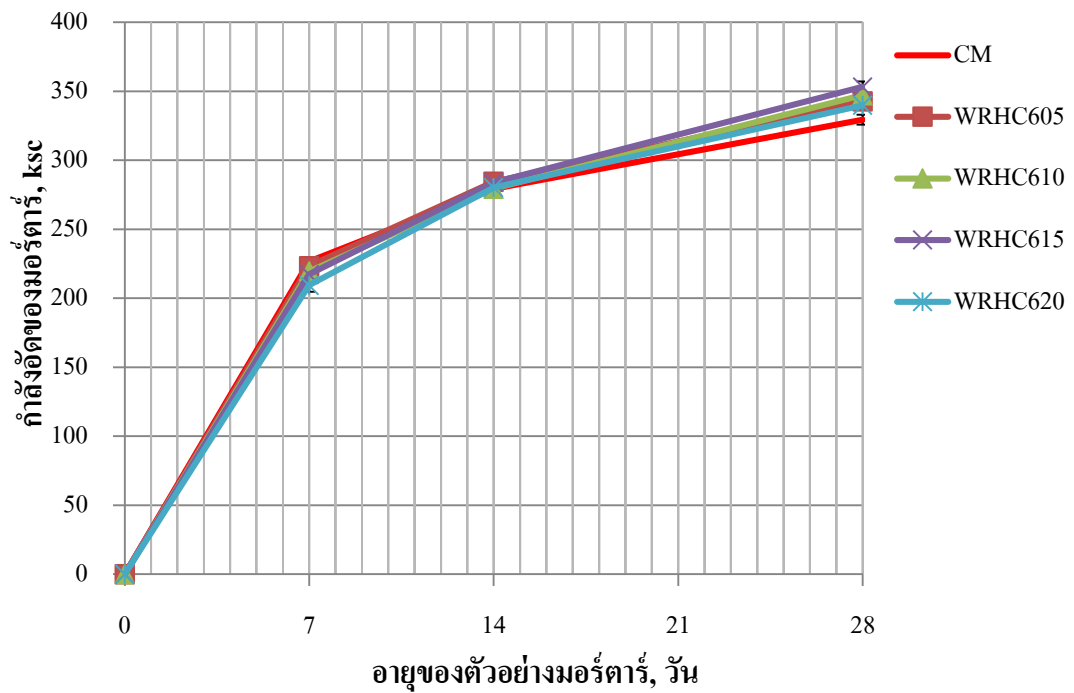
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของถ้ำชนิด WRHC กับกำลังอัดมอร์ตาร์



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของถ้ำชนิด BMA6 กับ WRHC3-WRHC6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุมอร์ตาร์ของเถาชนิด BMA6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุมอร์ตาร์ของเถาชนิด WRHC6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์

จากผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลพบว่าเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าชนิด BMA มีกำลังอัดสูงสุดและอัตราส่วนแทนที่ที่สูงกว่า คือ เถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC3 ถึง WRHC6 มีอัตราส่วนแทนที่สูงสุดร้อยละ 15 ส่วนเถ้าลอยชีวมวล BMA สามารถใส่แทนที่ปูนซีเมนต์ได้สูงสุดร้อยละ 5-10 เท่านั้น สาเหตุเกิดจากอัตราส่วนชีวมวลที่ใช้เผา คือ เถ้าลอยชีวมวลที่มีซิลิกาสูงคือ เถ้าแกลบ ในเถ้า WRH4 ถึง WRH6 มีปริมาณแกลบสูงกว่าเถ้า BMA ทั้งหมด ทำให้เถ้าที่เผาในห้องทดลองมีสารปอซโซลานที่มากกว่า และกระบวนการเผา เถ้าลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิที่ดี ปริมาณอากาศเพียงพอในการเผา ทำให้ได้เถ้าลอยชีวมวลที่มีสมบัติปอซโซลานที่ดีกว่าเถ้าลอยชีวมวลที่เผาจากโรงไฟฟ้า ส่วนอัตราการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันคือ การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นจะน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่ที่อายุการบ่มนานขึ้นกำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นและสูงกว่า มอร์ตาร์ควบคุม

4.7 ผลการทดสอบคอนกรีต

4.7.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

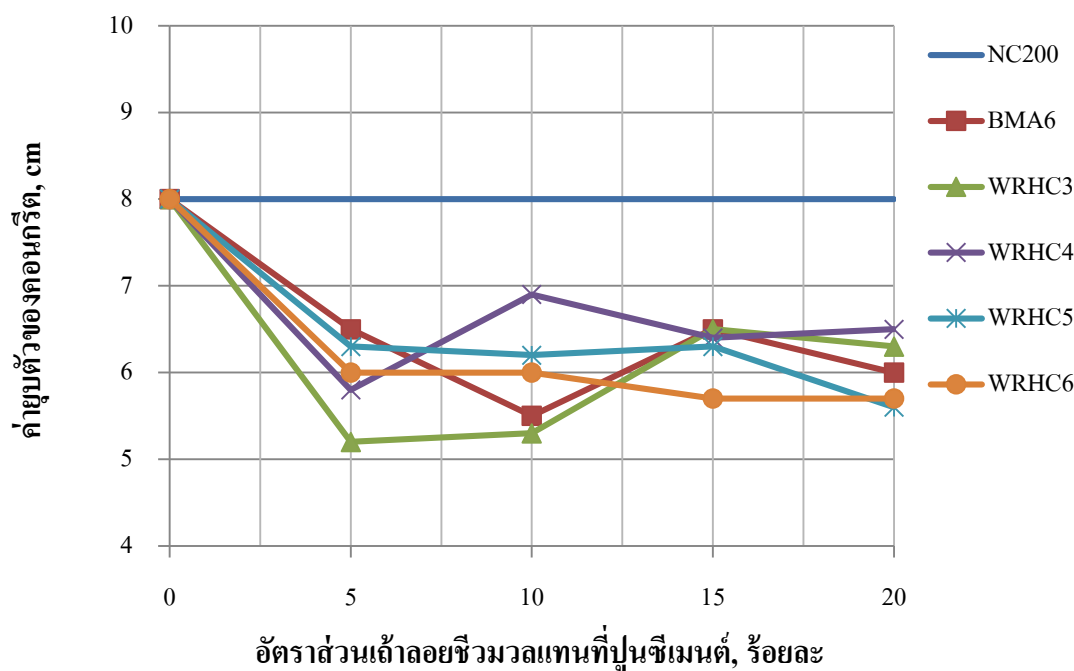
อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา โดยใช้ข้อมูลออกแบบของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด แสดงในตารางที่ ข-8 ถึง ข-13 โดยแบ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตเป็น 4 แบบตามกำลังอัด คือ 200 250 300 และ 350 ksc ค่าการยุบตัวของคอนกรีตออกแบบที่ 7.5 ± 2.5 cm ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตควบคุมแสดงในตารางที่ 4.4 และอัตราส่วนผสมคอนกรีตทั้งหมดแสดงในตารางที่ ข-14 ถึง ข-17

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดลอง

อัตราส่วนผสมคอนกรีต, kg/m ³	กำลังอัดของคอนกรีต, ksc				ค่ายุบตัวออกแบบ
	200	250	300	350	
ปูนซีเมนต์	322	364	417	465	7.5 ± 2.5
น้ำ	217	216	216	215	7.5 ± 2.5
มวลรวมหยาบ	987	987	987	987	7.5 ± 2.5
มวลรวมละเอียด	852	816	770	728	7.5 ± 2.5

4.7.2 ค่าการยุบตัว

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถเทได้ของคอนกรีต โดยค่าการยุบตัวที่ใช้ออกแบบเท่ากับ 7.5 ± 2.5 cm ผลค่าการยุบตัวของคอนกรีตทั้งหมดแสดงในตารางที่ ข-14 ถึง ข-17 และตัวอย่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ที่กำลังอัดออกแบบ 200 ksc แสดงในรูปที่ 4.24

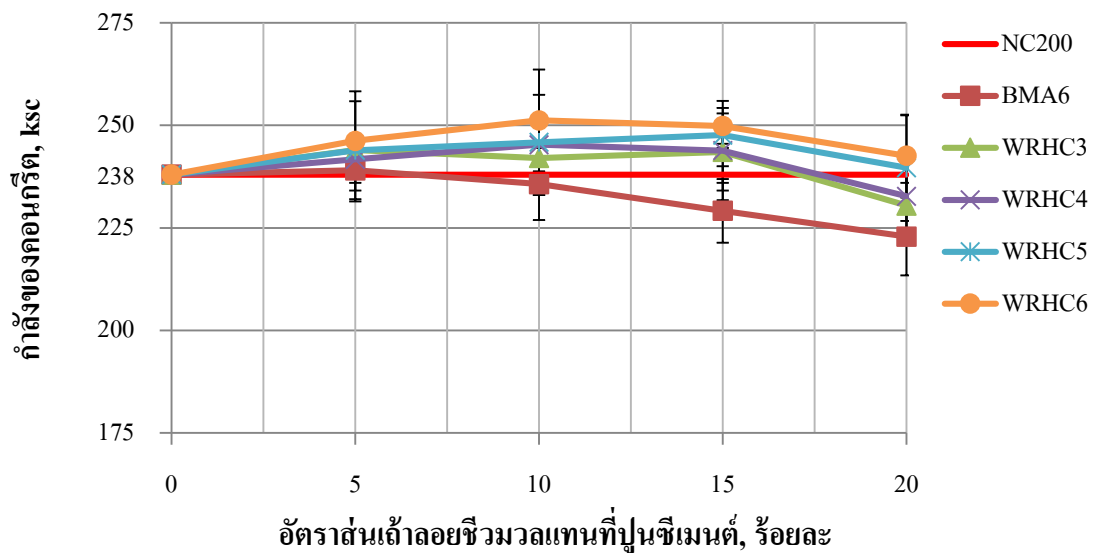


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์อัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ กับค่าการยุบตัวของคอนกรีต ที่กำลังอัดออกแบบ 200 ksc

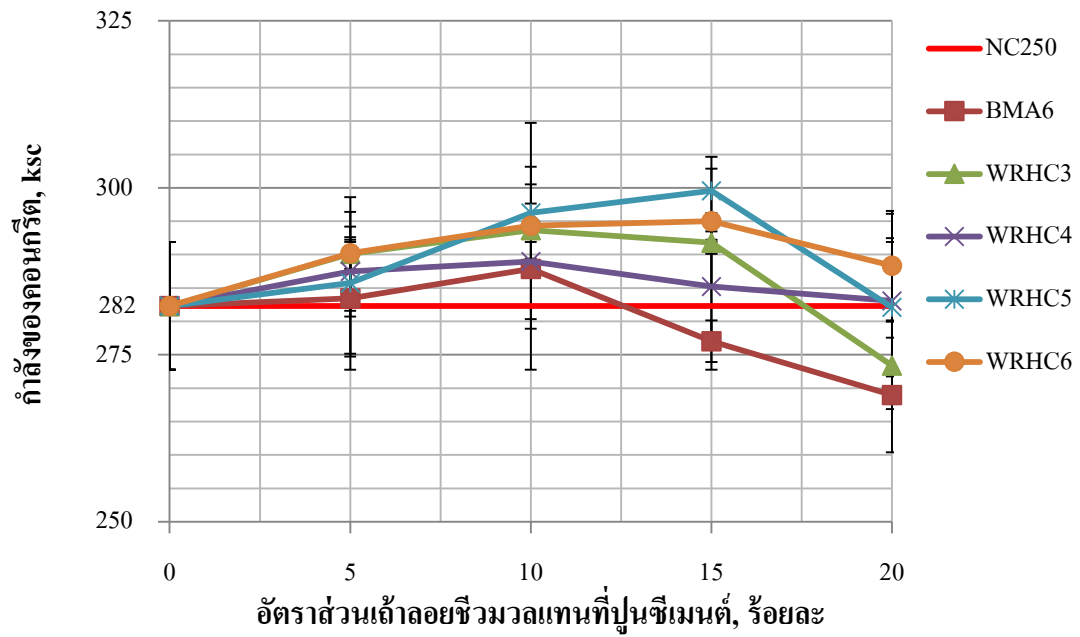
4.7.3 ผลกำลังอัดของคอนกรีต

ผลกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 โดยขนาดตัวอย่างที่ใช้คือ ก้อนทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 mm ความสูง 200 mm โดยเลือกเถ้าลอยชีวมวลที่ใช้คือ BMA6 WRHC3 WRHC4 WRHC 5 และ WRHC 6 ผลกำลังอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ของกำลังออกแบบ 200 250 300 และ 350 ksc ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.25-รูปที่ 4.28 ตามลำดับ

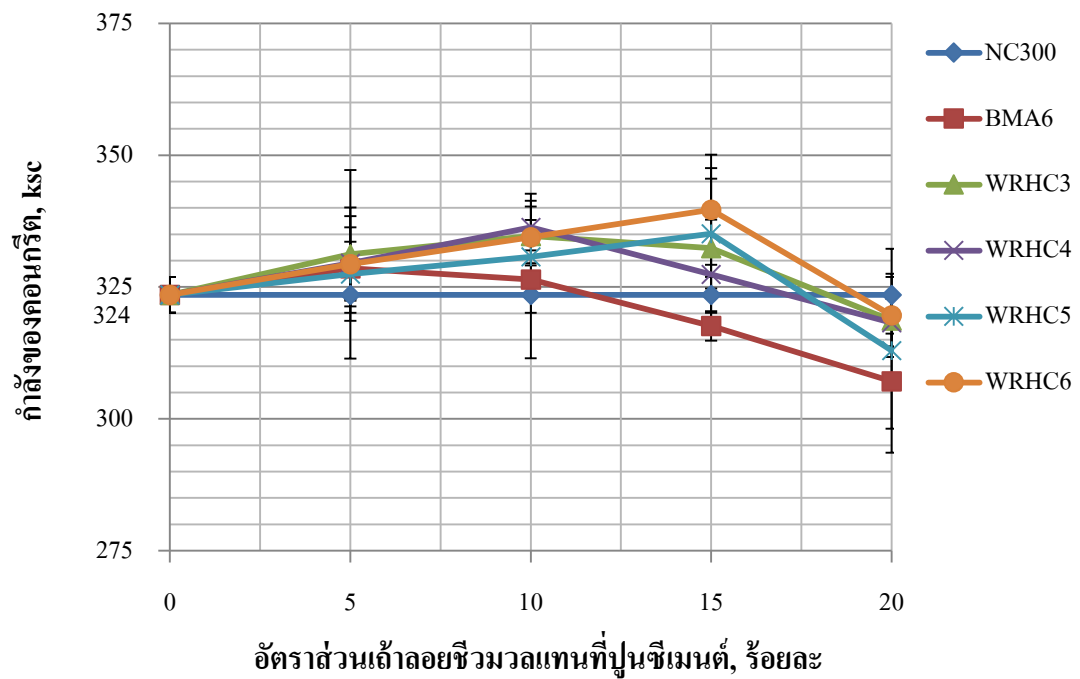
จากรูปที่ 4.25 คอนกรีตกำลังอัดออกแบบเท่ากับ 200 ksc พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 238 ksc คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA6 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 5 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 238 ksc มีกำลังอัดใกล้เคียงคอนกรีตควบคุม ส่วนเถ้า WRHC6 คือเถ้าที่มีกำลังอัดสูงสุดที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 251 ksc คิดเป็นร้อยละ 105 ของคอนกรีตควบคุม จากรูปที่ 4.26 - รูปที่ 4.28 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของคอนกรีตออกแบบ 250 300 และ 350 ksc พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมเท่ากับ 282 324 และ 357 ksc เถ้าชนิด BMA6 ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงสุดที่อัตราส่วนแทนที่เท่ากับร้อยละ 5 ได้กำลังอัดเท่ากับ 283 329 และ 362 ksc คิดเป็นร้อยละ 100 102 และ 101 ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าชนิด WRHC ที่ให้กำลังอัดคอนกรีตสูงสุดมีอัตราส่วนแทนที่เท่ากับร้อยละ 15 คือ คอนกรีตออกแบบ 250 ksc เถ้า WRHC5 ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 300 ksc คิดเป็นร้อยละ 106 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม คอนกรีตออกแบบ 300 และ 350 ksc เถ้า WRHC6 ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 340 และ 378 ksc คิดเป็นร้อยละ 105 และ 106 ของกำลังอัดคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ส่วนการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตของกำลังอัดออกแบบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.29 - รูปที่ 4.32 พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจะมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุมและจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อมีอายุ 28 วันจะมีกำลังอัดใกล้เคียงและสูงกว่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุม โดยแนวโน้มของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลจะเพิ่มขึ้นและสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน



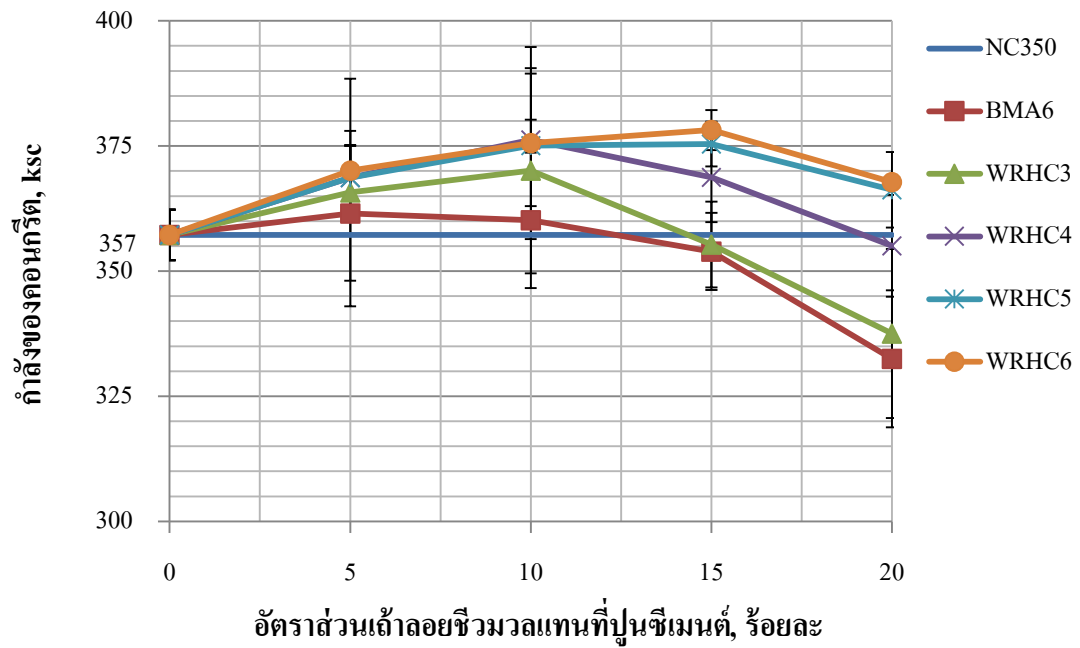
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีต ออกแบบ 200 ksc ที่อายุ 28 วัน



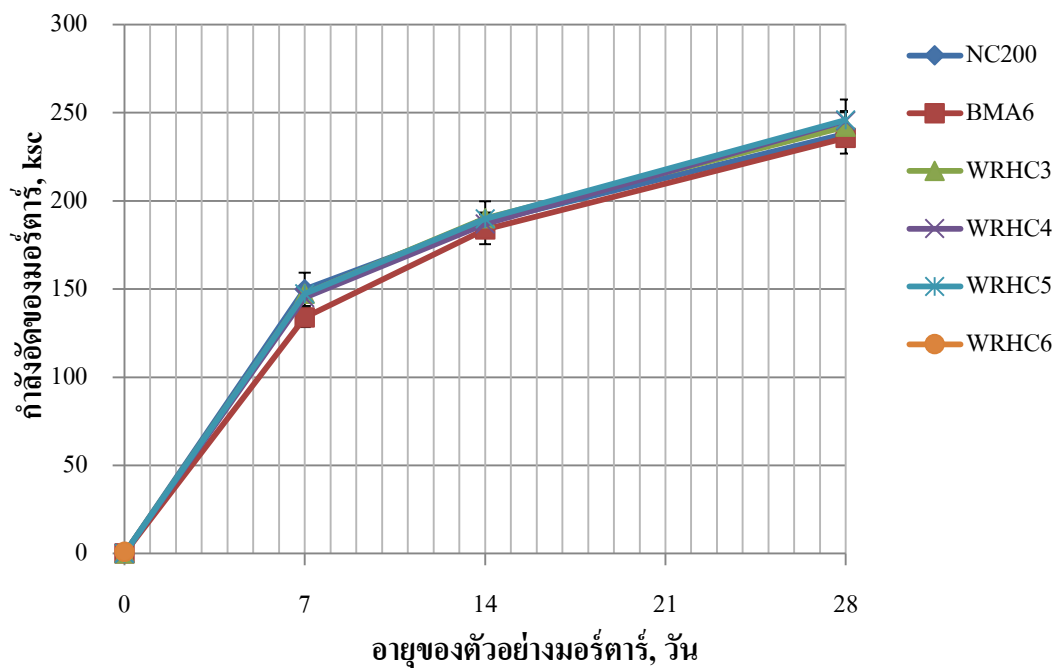
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดคอนกรีต
ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 250 ksc ที่อายุ 28 วัน



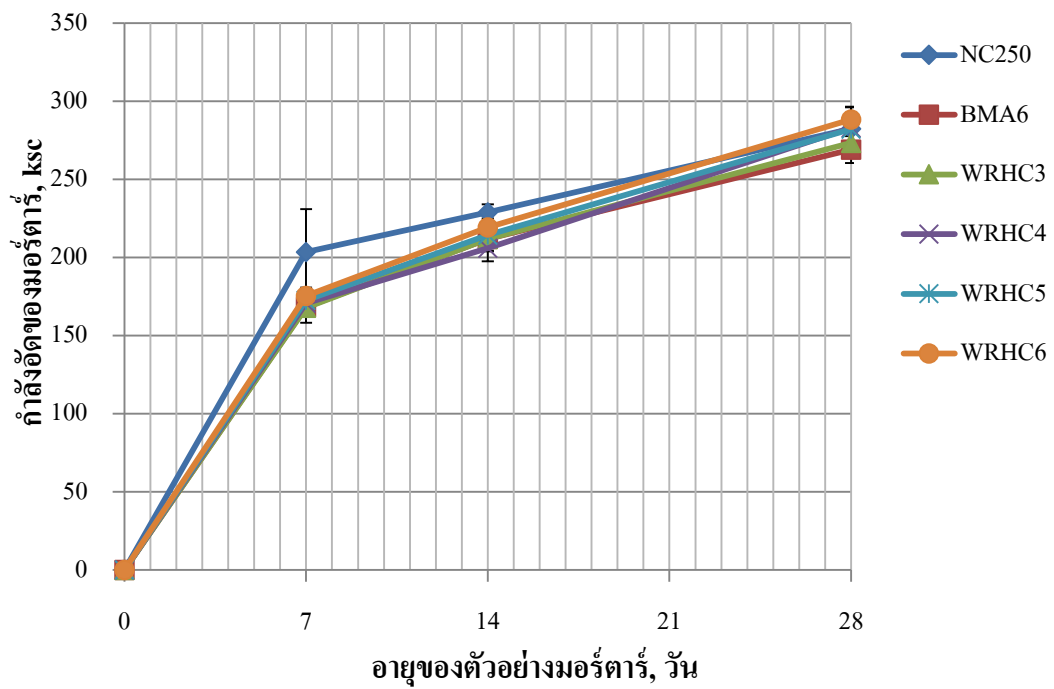
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดคอนกรีต
กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 300 ksc ที่อายุ 28 วัน



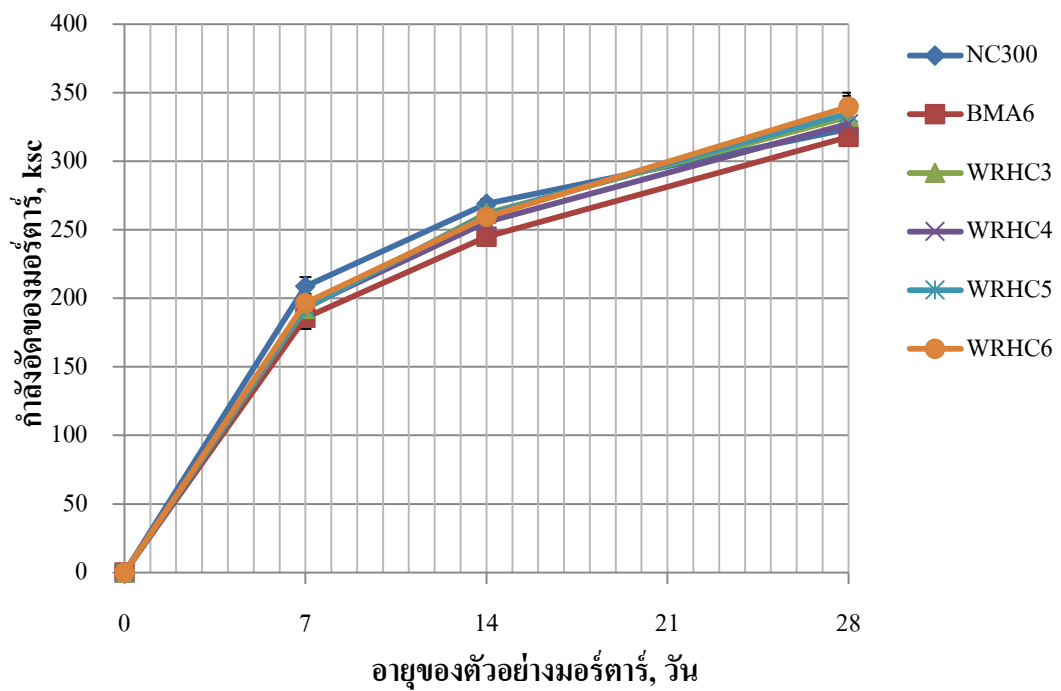
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในปูนซีเมนต์กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 350 ksc ที่อายุ 28 วัน



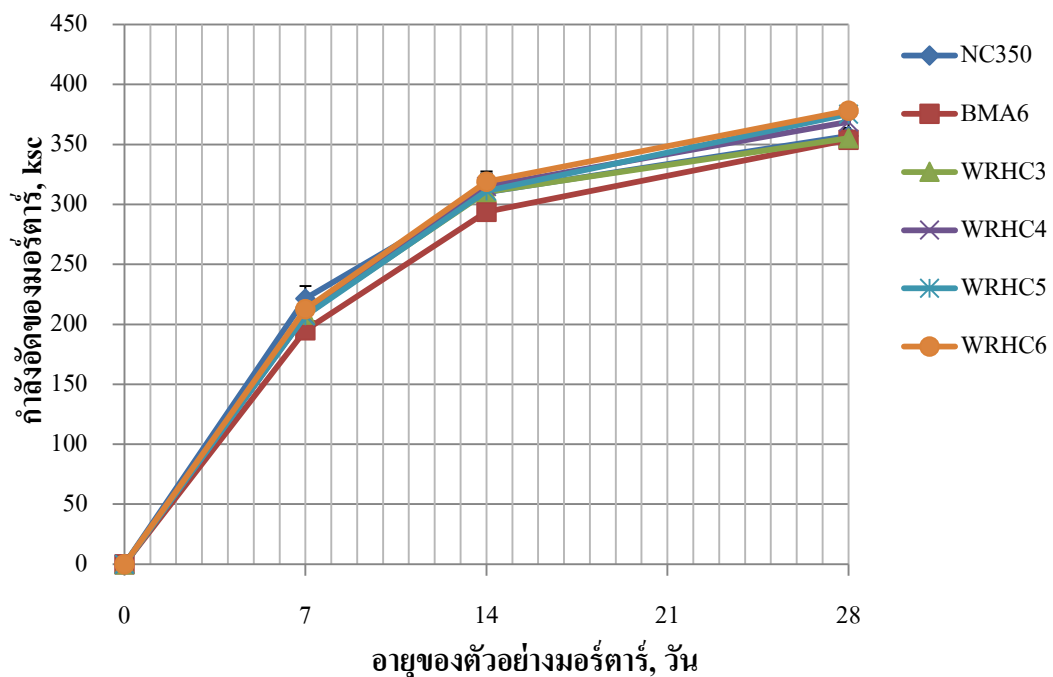
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมน้ำต่อซีเมนต์ร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 200 ksc ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต
ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 250 ksc ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต
ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 300 ksc ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.32ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีตที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 350 ksc ที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA6 WRHC3 WRHC4 WRHC5 และ WRHC6 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าชนิด WRHC ให้กำลังอัดที่ดีกว่าชนิด BMA คือ เถ้า WRHC5 และ WRHC6 มีอัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15 ซึ่งมากกว่าเถ้าชนิด BMA6 มีอัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 5 ปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าชนิด WRHC5 และ WRHC6 มีค่ามากกว่าเถ้าชนิด BMA6 เพราะเถ้า WRHC 6 ว่างปริมาณชีวมวลในส่วนของการผสมมากกว่าเถ้าชนิดอื่น ๆ และกระบวนการเผาเถ้าลอยชีวมวลที่แตกต่างกัน ซึ่งมีเหตุผลเหมือนผลทดสอบมอร์ตาร์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยชีวมวลจะมีค่าที่น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม เพราะตัวเถ้ามีความพรุนอยู่ในตัวทำให้มีช่องว่างที่ดูดซับน้ำไว้และลักษณะของเม็ดเถ้าที่เป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน ทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตนั้นลดลง ยิ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยลงยิ่งทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตลดลง คือ ไม่นำผสมเถ้าลอยชีวมวลในคอนกรีตกำลังสูงหรืออัตราส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลโดยโปรแกรม SPSS

การวิเคราะห์ทางสถิติโดยโปรแกรม SPSS เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลที่อัตราส่วนชีวมวลแตกต่างกัน การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วิเคราะห์เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าไม้สับ แกลบและซังข้าวโพดเพียงอย่างเดียว และวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนชีวมวลแตกต่างกัน โดยมีข้อกำหนดในการวิเคราะห์ในส่วนนี้คือ สมการที่ใช้เป็นสมการอย่างง่ายและเป็นสมการเชิงเส้นตรงอัตราส่วนชีวมวลที่ใช้คือ ไม้สับ ร้อยละ 60 – 80 แกลบร้อยละ 10-40 และซังข้าวโพดร้อยละ 0-10 โดยน้ำหนัก ส่วนที่หนึ่งใช้สมการเส้นตรงในการวิเคราะห์แสดงในสมการที่ 4.4

$$Y = mR + Constant \quad (4.4)$$

จากรูปที่ 4.18 พบว่าเส้นกราฟของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลช่วงอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเส้นตรงทั้ง 3 ชนิดเถ้า เราจึงนำข้อมูลในช่วงนี้มาวิเคราะห์ คือ สมการที่ได้จะใช้ได้กับอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนัก เมื่อนำข้อมูลกำลังอัดและอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ ก-1 ถึง ก-3 ผลที่ได้คือ สมการที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ซึ่งประกอบด้วยสมการทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าไม้สับ แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ

$$StrX_1 = -2.56R + 328.2 \quad (4.5)$$

$$StrX_2 = 3.66R + 331.8 \quad (4.6)$$

$$StrX_3 = -1.84R + 330.3 \quad (4.7)$$

การวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการเส้นตรงทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลที่มีอัตราส่วนชีวมวลแตกต่างกัน ใช้สมการถดถอยพหุคูณ คือ มีตัวแปรตามหนึ่งตัว และมีตัวแปรอิสระหลายตัว มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงในที่นี้ใช้สมการที่ 4.8 โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ข้อมูลของเถ้าลอยชีวมวลชนิดต่าง ๆ คือ ร้อยละของเถ้าที่ได้จากการเผาชีวมวลแต่ละชนิด ร้อยละปริมาณร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตามตารางที่ 4.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิดที่ละอย่างเดียว ชนิด BMA และ WRHC ที่อายุ 28 วัน ตามตารางที่ ก-6 อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนัก วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS โดยใช้ข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าคงที่ (Constant) และค่าสัมประสิทธิ์การคูณ คือ B_1 B_2 และ B_3 ซึ่งในการวิเคราะห์สามารถสรุปกระบวนการคิดเป็นรูปแบบสมการที่ 4.9 และสมการย่อยสมการที่ 4.10

โดยการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการกำหนดให้ตัวแปรตามที่ได้คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวล และตัวแปรอิสระคือ อัตราส่วนชีวมวลที่ใช้ในการเผา โดยสรุปสมการอย่างง่ายออกเป็น 2 ชุด คือ สมการของถ้ำชนิด BMA และถ้ำชนิด WRHC และแบ่งย่อยเป็นสมการของอัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก อีกชุดละ 3 สมการ รวมทั้งหมดมี 6 สมการ

$$Y = B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + Constant \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} StrMortar = & B_1 \left(\frac{A_1S_1X_1}{\sum_{i=1}^{n=3} A_iS_iX_i} \right) (StrX_1 - CMR) + B_2 \left(\frac{A_2S_2X_2}{\sum_{i=1}^{n=3} A_iS_iX_i} \right) (StrX_2 - CMR) \\ & + B_3 \left(\frac{A_3S_3X_3}{\sum_{i=1}^{n=3} A_iS_iX_i} \right) (StrX_3 - CMR) + Constant \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$CMR = \frac{100-R}{100} \times CM \quad (4.10)$$

เมื่อกำหนดให้

StrMortar

คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวล, ksc

StrX₁, StrX₂, StrX₃

คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าไม้สับ แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ, ksc

X₁, X₂, X₃

คือ ร้อยละปริมาณชีวมวลของไม้สับ แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ

B₁, B₂, B₃

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวล ชนิด BMA และ WRHC

A₁, A₂, A₃

คือ ร้อยละปริมาณเถ้าที่ได้จากการเผาของไม้สับ แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ

S₁, S₂, S₃

คือ ร้อยละปริมาณร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ของไม้สับ แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ

Constant

คือ ค่าคงที่ของกำลังอัดของมอร์ตาร์, ksc

R

คือ ร้อยละปริมาณเถ้าลอยชีวมวลการแทนที่ปูนซีเมนต์

CM	คือ กำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม, ksc
CMR	คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์, ksc
m	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวล

จากผลการวิเคราะห์ค่า Correlation จากโปรแกรม SPSS แสดงดังตารางที่ ค-4 ถึง ค-7 พบว่าค่า Correlation ของซังข้าวโพดเทียบกับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ มีค่าน้อยที่สุดและปริมาณที่ใช้ในการเผา มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับชีวมวลไม้สับ และแกลบ จึงสามารถตัดตัวแปรของซังข้าวโพดออกได้ เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น และเมื่อแทนค่าข้อมูลต่าง ๆ ในสมการที่ 4.9 และ 4.10 แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลของค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณแสดงในตารางที่ ค-8 ถึง ค-13 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 และเมื่อนำค่าของข้อมูลที่มีแทนที่ในสมการ 4.9 และ 4.10 ผลของสมการที่ได้แสดงในสมการที่ 4.11 ถึง 4.16 และตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (B) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS

ชื่อสมการ	B1	B2	B3	Constant	R Square
BMA05	-3.526	0.744	0.000	321.700	0.923
BMA10	-2.353	0.694	0.000	314.100	0.939
BMA15	-2.084	0.652	0.000	300.300	0.924
WRHC05	-3.101	0.750	0.000	322.100	0.938
WRHC10	-2.058	0.699	0.000	314.400	0.943
WRHC15	-1.673	0.708	0.000	301.300	0.947

เถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA

$$BMA\ 5\% = \frac{-0.203X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{+2.887X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 321.7 \quad (4.11)$$

$$BMA\ 10\% = \frac{-0.309X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{5.185X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 314.1 \quad (4.12)$$

$$BMA\ 15\% = \frac{-0.427X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{7.212X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 300.6 \quad (4.13)$$

แก้ลอจซีวมวลชนิด WRHC

$$WRHC\ 5\% = \frac{-0.178X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{2.910X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 322.1 \quad (4.14)$$

$$WRHC\ 10\% = \frac{-0.270X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{0.522X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 314.4 \quad (4.15)$$

$$WRHC\ 15\% = \frac{-0.343X_1}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + \frac{7.832X_2}{0.020X_1+0.103X_2+0.009X_3} + 301.3 \quad (4.16)$$

ตัวอย่างการคำนวณกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้ลอจซีวมวลชนิด BMA6 มีข้อมูลดังตารางที่ 4.6 ใช้อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับ 329 ksc

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลซีวมวลของตัวอย่างแก้ลอจซีวมวลชนิด BMA6

ซีวมวล	ปริมาณร้อยละ (X)	ร้อยละเถ้า (A)	ร้อยละร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 200 (S)
ไม้สับ	73	2.47	81.67
เกลบ	22	15.27	67.67
ซังข้าวโพด	5	3.07	27.33

วิธีทำ

- 1) คำนวณกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมแก้ลอจซีวมวลของเถ้าไม้ เถ้าเกลบและเถ้าซังข้าวโพด จากสมการที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ใช้อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15

$$\text{Str}X_1 = (-2.56) \times 15 + 328.2 = 289.8 \text{ ksc}$$

$$\text{Str}X_2 = 3.66 \times 15 + 331.8 = 386.7 \text{ ksc}$$

$$\text{Str}X_3 = (-1.84) \times 15 + 330.3 = 302.7 \text{ ksc}$$

- 2) คำนวณค่า CMR ด้วยสมการที่ 4.10 โดยอัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับ 329 ksc

$$\text{CMR} = (100 - 15) / 100 \times 329 = 279.6 \text{ ksc}$$

- 3) แทนค่าข้อมูลร้อยละปริมาณเถ้า (A_i) ร้อยละร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (S_i) และกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลแต่ละชนิด ($StrX_i$) ในสมการที่ 4.9

StrMortar 15%

$$\begin{aligned}
 &= B_1 \times \left(\frac{0.0247 \times 0.8167 \times X_1}{(0.0247 \times 0.8167 \times X_1) + (0.1527 \times 0.6767 \times X_2) + (0.0307 \times 0.2733 \times X_3)} \right) \times (289.8 - 279.6) \\
 &+ B_2 \times \left(\frac{0.1527 \times 0.6767 \times X_2}{(0.0247 \times 0.8167 \times X_1) + (0.1527 \times 0.6767 \times X_2) + (0.0307 \times 0.2733 \times X_3)} \right) \times (386.7 - 279.6) \\
 &+ B_3 \times \left(\frac{0.0307 \times 0.2733 \times X_3}{(0.0247 \times 0.8167 \times X_1) + (0.1527 \times 0.6767 \times X_2) + (0.0307 \times 0.2733 \times X_3)} \right) \times (302.7 - 279.6) \\
 &+ Constant \\
 &= B_1 \left(\frac{0.204X_1}{0.02X_1 + 0.103X_2 + 0.008X_3} \right) + B_2 \left(\frac{11.062X_2}{0.02X_1 + 0.103X_2 + 0.008X_3} \right) \\
 &+ B_3 \left(\frac{0.193X_3}{0.02X_1 + 0.103X_2 + 0.008X_3} \right) + Constant \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

- 4) ใช้ข้อมูลอัตราส่วนชีวมวลของตัวอย่าง BMA และกำลังอัดที่ทดสอบจริงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA ที่อัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 และใช้สมการที่ 4.17 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ผลการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ ค-10 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (B) และค่าคงที่ (Constant) ดังนี้

$$B_1 = -2.084$$

$$B_2 = 0.652$$

$$B_3 = 0$$

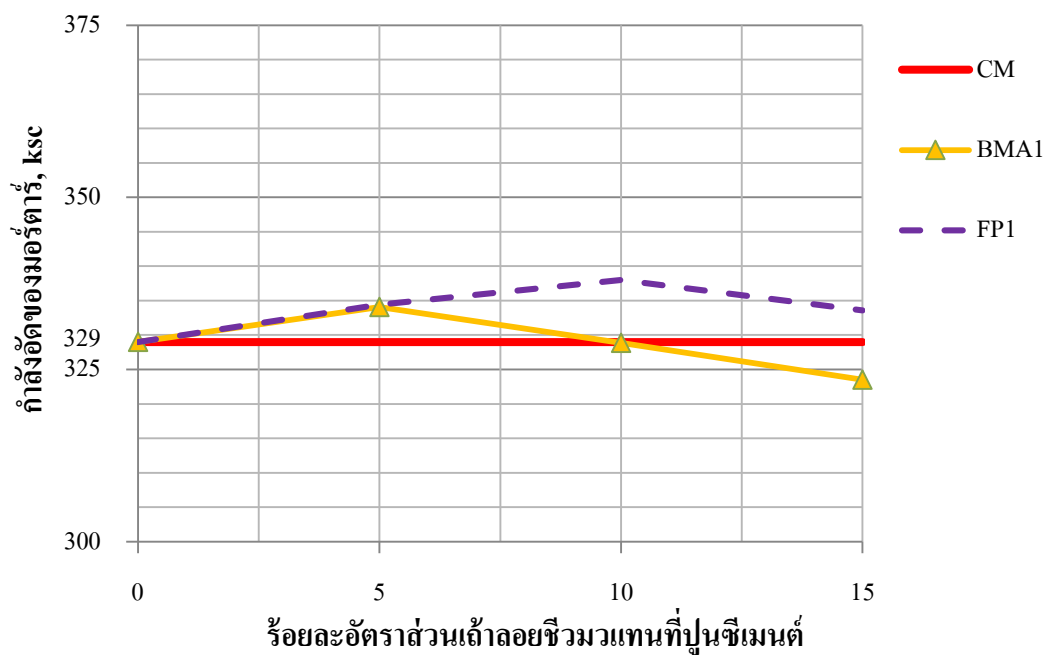
$$Constant = 300.6 \text{ ksc}$$

- 5) แทนค่าของค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณและค่าคงที่ในสมการที่ 4.17 จะได้เป็นสมการที่ 4.13 และเมื่อใช้ข้อมูลอัตราส่วนชีวมวลของเถ้าลอยชนิด BMA6 มาแทนค่าลงในสมการที่ 4.13 จะได้ว่า

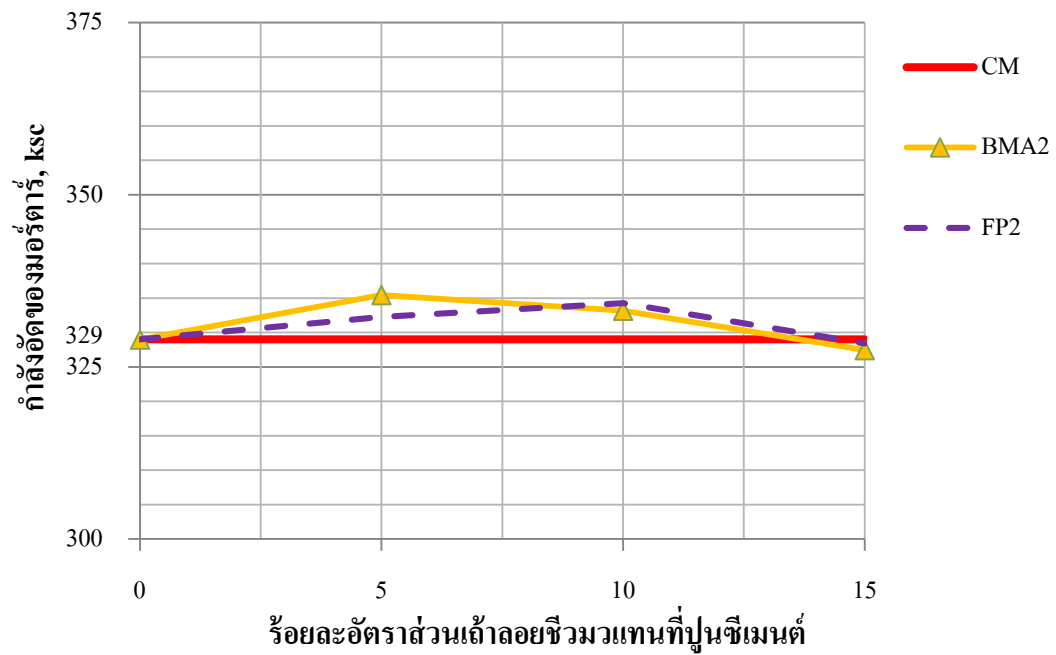
$$\begin{aligned}
 BMA \ 15\% &= \frac{-0.427(73)}{0.020(73) + 0.103(22) + 0.009(5)} + \frac{+7.212(22)}{0.020(73) + 0.103(22) + 0.009(5)} + 300.6 \\
 &= 334.4 \text{ ksc}
 \end{aligned}$$

เมื่อนำกำลังอัดที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ทดสอบได้จริง คือ 338 ksc ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันถือว่าสมการนี้นำไปใช้งานได้

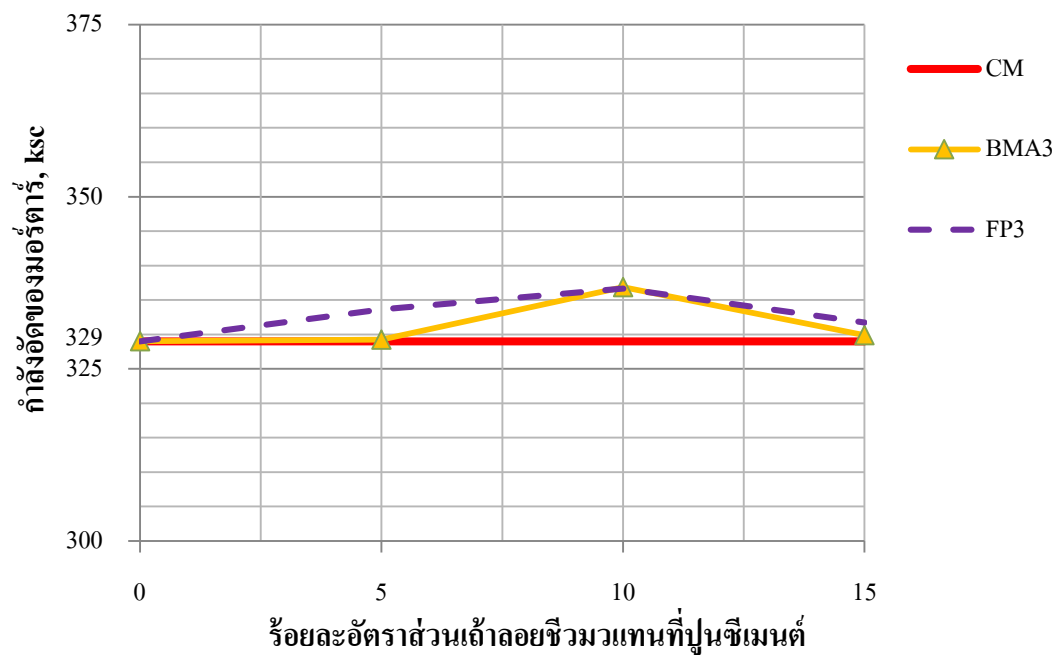
เมื่อนำกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่คำนวณได้จากสมการทำนายกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวล แสดงในรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.44 โดยข้อมูล FP1 ถึง FP6 คือ กำลังอัดที่คำนวณจากสมการของเถ้าชนิด BMA และข้อมูล FL1 ถึง FL6 คือ กำลังอัดที่คำนวณจากสมการของเถ้าชนิด WRHC พบว่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดจริง สมการอย่างง่ายที่สร้างขึ้นนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบส่วนผสมชีวมวลที่ใช้เผาได้ เพื่อให้ทราบว่าอัตราส่วนชีวมวลแต่ละอัตราส่วนสามารถให้ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์เท่าใดของการใช้เถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 – 15 โดยน้ำหนัก และสมการที่ 4.8 ถึง 4.10 สามารถนำไปใช้คำนวณเพื่อทำนายกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน ชีวมวลที่แตกต่างกันได้ แต่ต้องมีข้อมูลต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ ส่วนของสมการที่ 4.11 ถึง 4.16 ใช้ได้สำหรับข้อมูลที่อยู่ในงานวิจัยนี้เท่านั้น



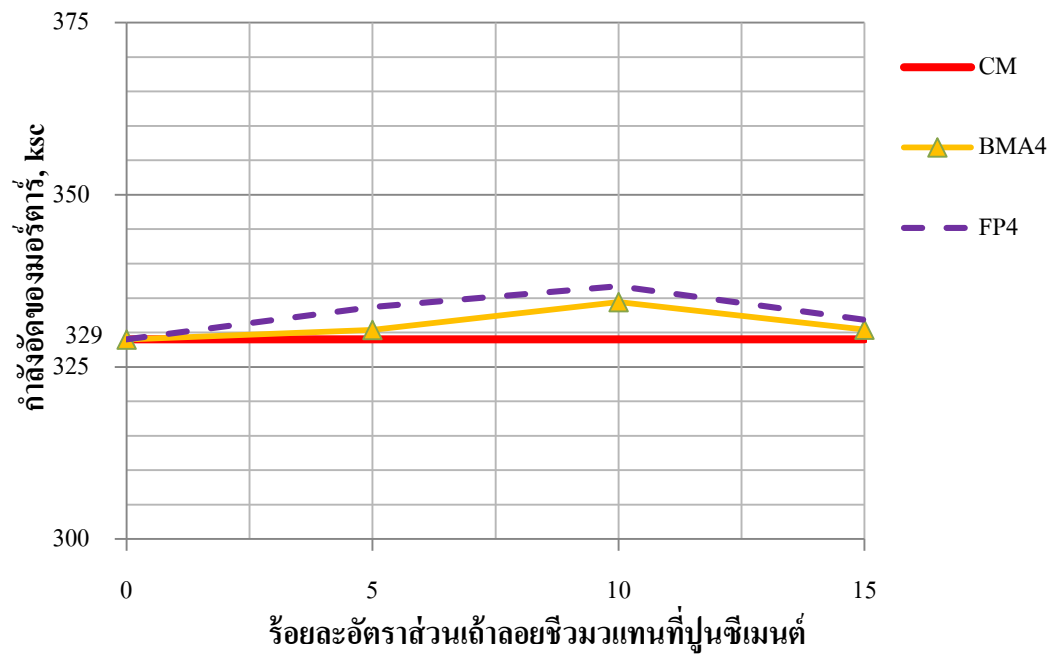
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA1 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัด มอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



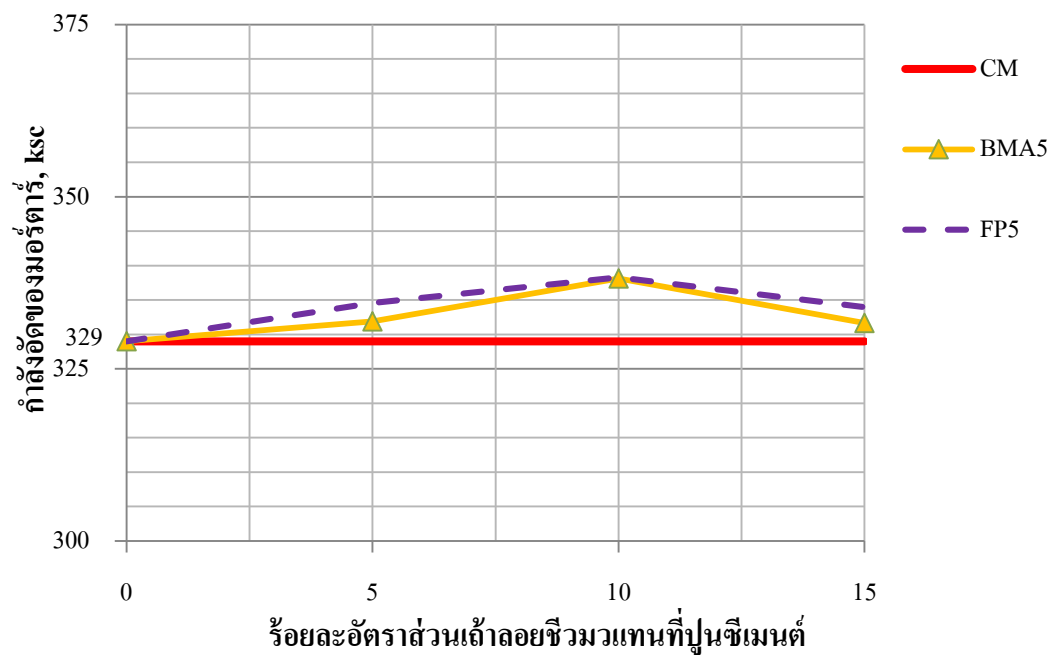
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA2 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



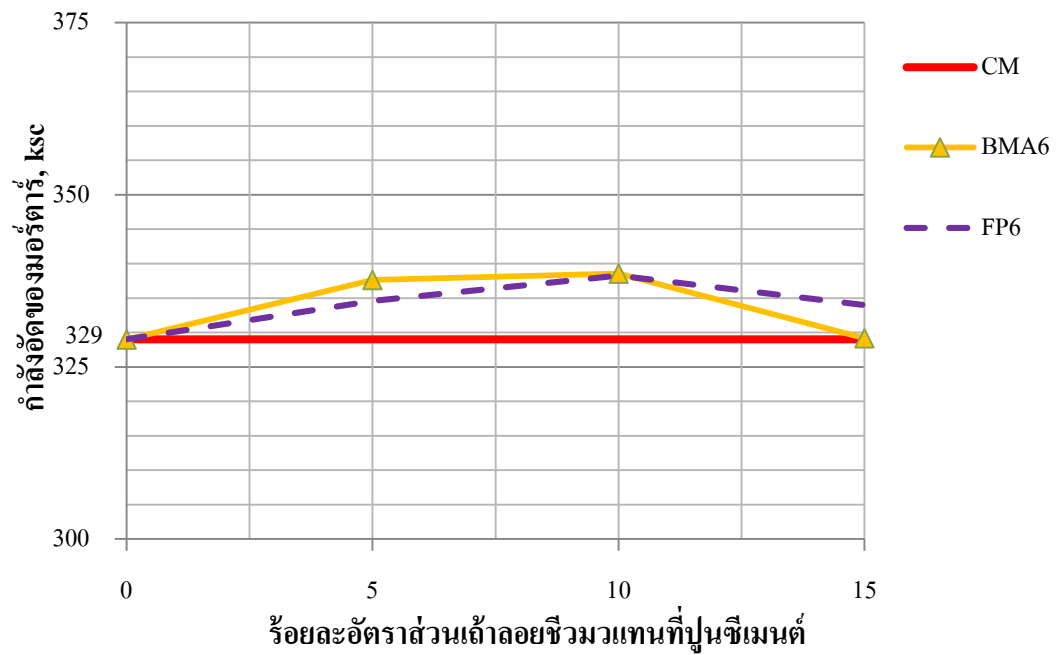
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA3 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



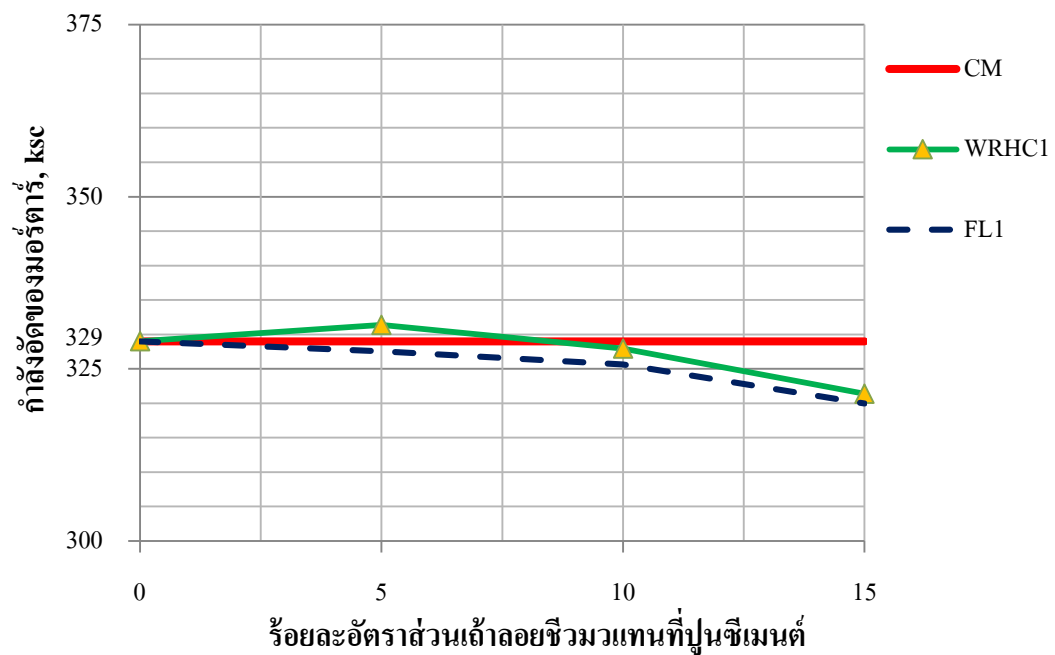
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA4 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



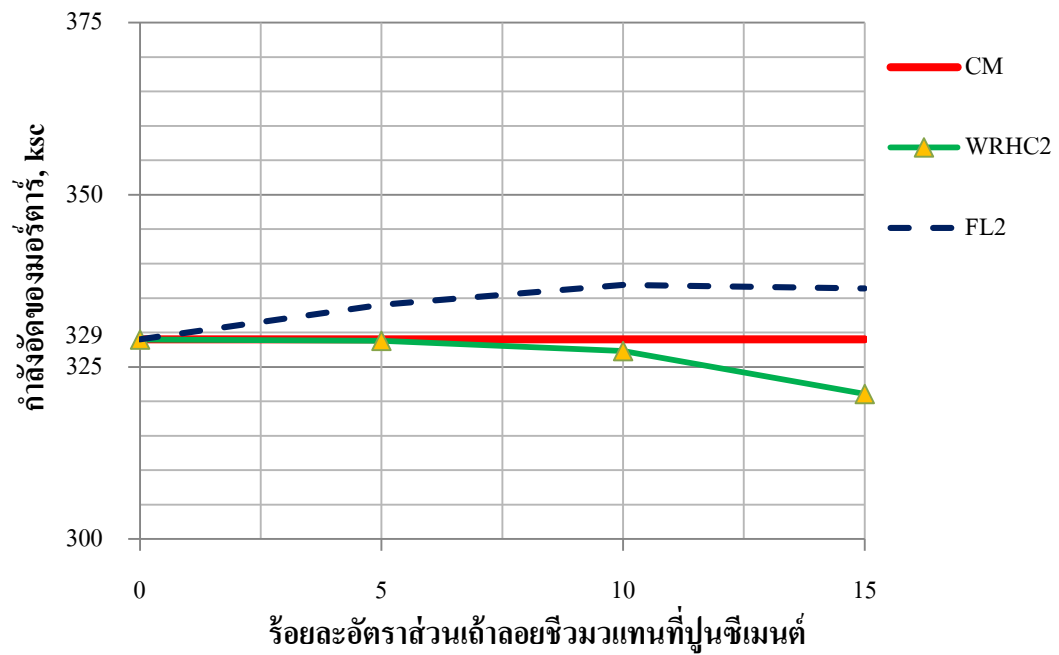
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA5 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



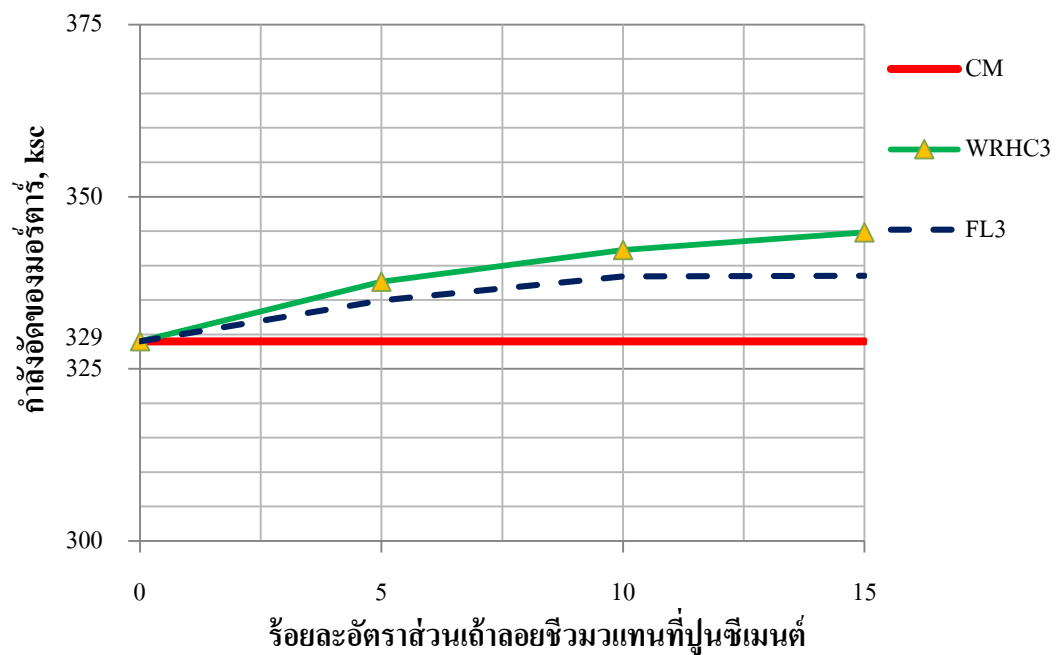
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA6 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



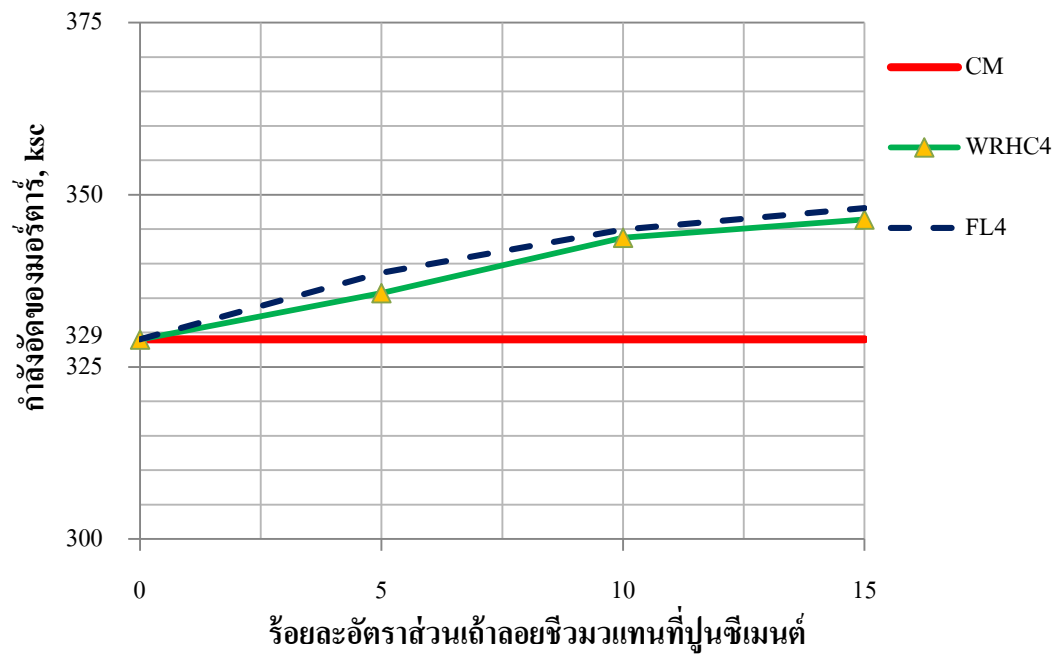
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC1 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



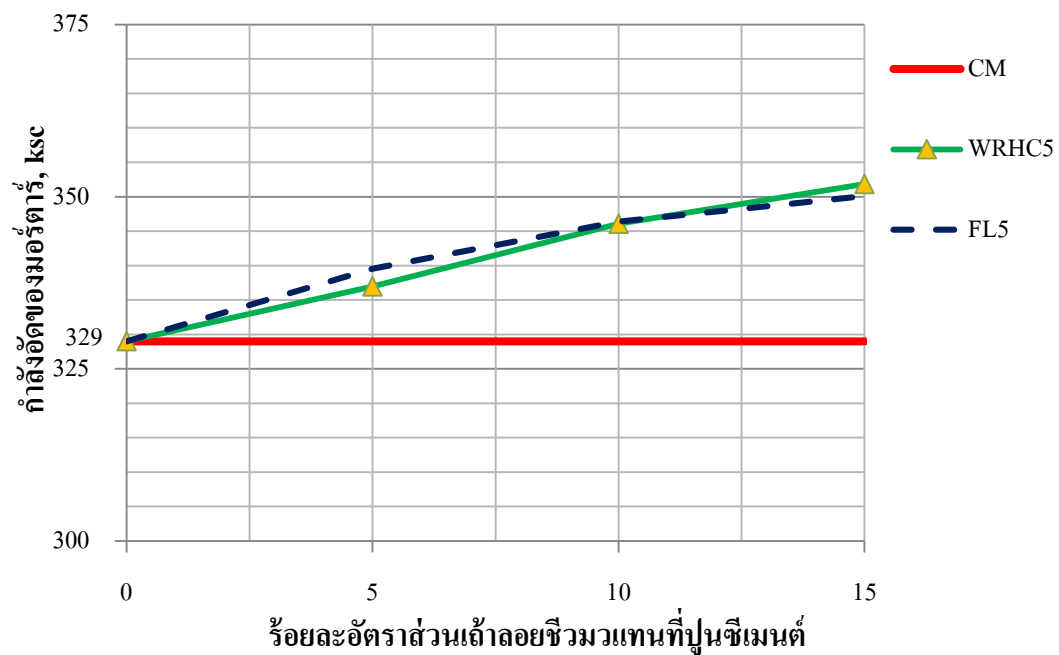
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC2 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



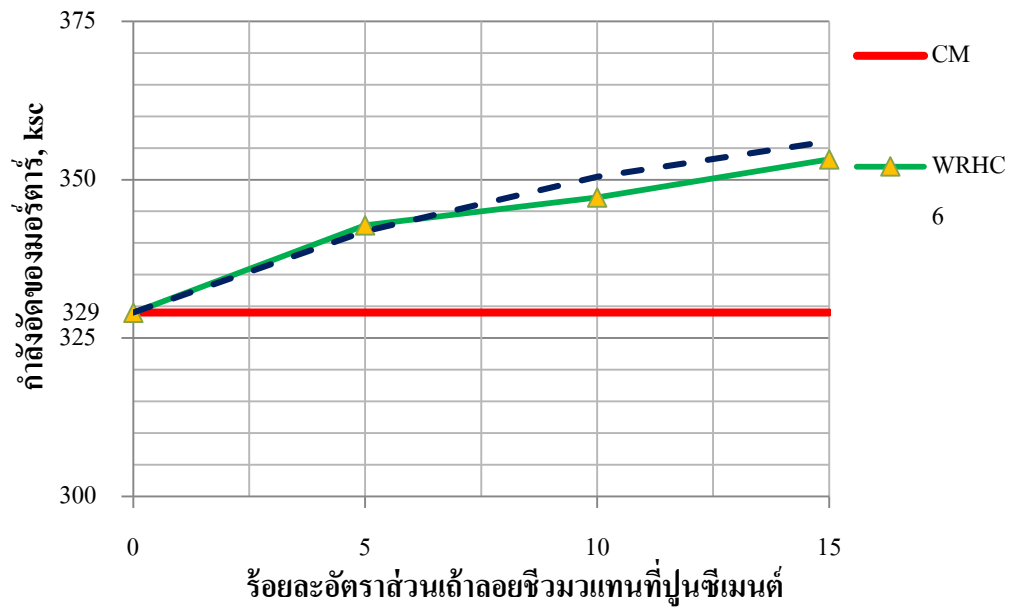
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC3 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



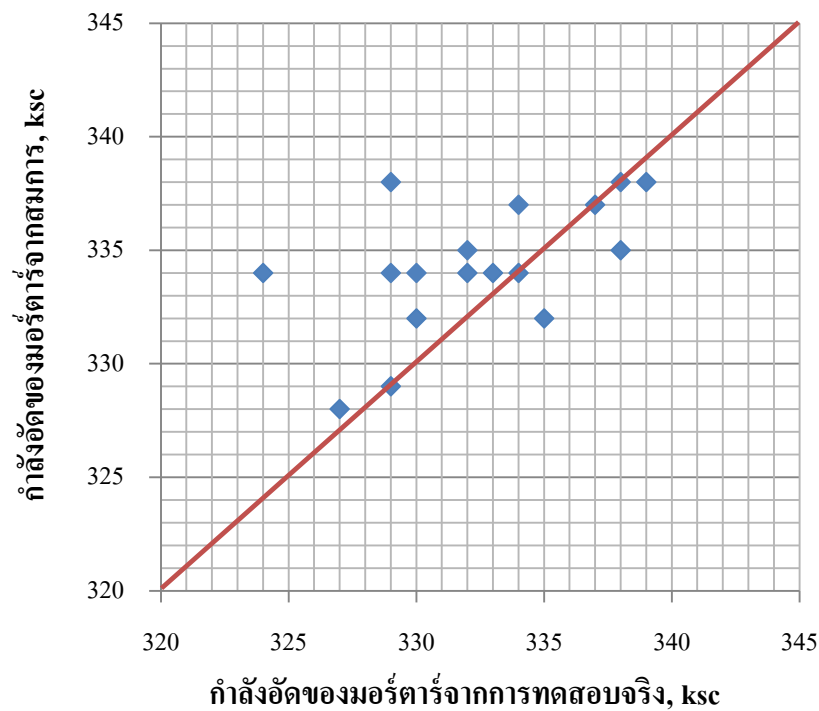
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC4 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC5 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

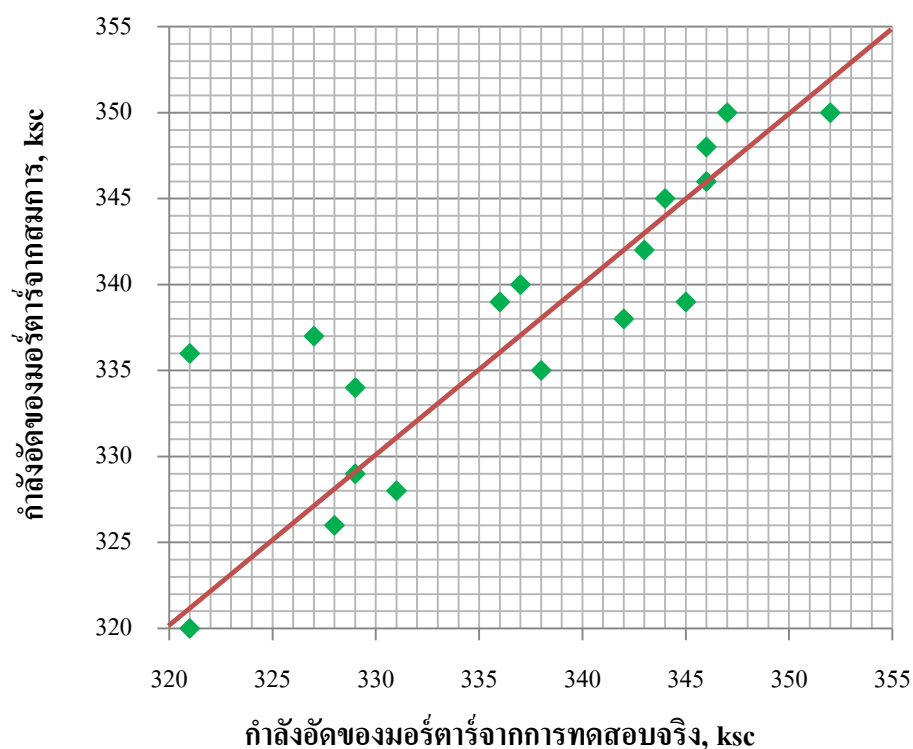


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC6 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์จริงและกำลังที่คำนวณจากสมการของตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA

เมื่อนำกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA และ WRHC ที่ทดสอบได้จริงมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่คำนวณได้จากสมการทำนายกำลังอัดมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลแสดงดังรูปที่ 4.45 และ รูปที่ 4.46 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลส่วนใหญ่ของทั้งสองชนิดมีลักษณะที่เกาะกลุ่มกันและอยู่ใกล้กับเส้นทแยงมุม 45 องศา (Line of Equality) แสดงว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีการกระจายตัวอย่างเท่าเทียมกันหรือกำลังอัดที่ทดสอบจริงกับกำลังอัดที่คำนวณได้จากสมการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์จริงและกำลังที่คำนวณจากสมการของตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC