สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
ABSTRACT	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำและที่มาความสำคัญ	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ขอบเขตการศึกษา	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	10
2.1 ปูนซีเมนต์	10
2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	16
2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials)	22
2.4 เถ้าลอยชีวมวล	26
2.5 คอนกรีต (Concrete)	29
2.6 การทดสอบการวิเคราะห์รูปร่างและผลึกของเถ้าลอยชีวมวล	38
2.7 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X - ray Fluorescence (XRF)	41
2.8 การวิเคราะห์การถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS	42
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	46
3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพเถ้าลอยชีวมวล	46
3.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF)	51
3.3 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์	53
3.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	57

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์กำลังอัดของมอร์ตาร์ด้วยโปรแกรม SPSS	67
บทที่ 4 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	69
4.1 อัตราส่วนชีวมวล	69
4.2 ขนาดคละและความถ่วงจำเพาะ	73
4.3 ผลการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)	74
4.4 การทดสอบความเป็นผลึก โดยวิธี X – Ray Diffraction (XRD)	78
4.5 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence (XRF)	79
4.6 ผลทดสอบของมอร์ตาร์	80
4.7 ผลการทดสอบคอนกรีต	87
4.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชีวมวลโดยโปรแกรม SPSS	94
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	107
5.1 สรุปผลการทดลอง	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	108
บรรณานุกรม	109
ภาคผนวก	112
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุ	113
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดสอบคอนกรีต	155
ภาคผนวก ค ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุ	241
ประวัติผู้เขียน	255

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
ตารางที่ 2.2	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	14
ตารางที่ 4.1	ชื่อตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลและอัตราส่วนของชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง	71
ตารางที่ 4.2	ปริมาณการเกิดเถ้าชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง	72
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชีวมวล	81
ตารางที่ 4.4	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ทดลอง	87
ตารางที่ 4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณ (B) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS	96
ตารางที่ 4.6	ข้อมูลชีวมวลของตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA6	97

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การพัฒนากำลังอัดของ C3S C2S C3A และ C4AF	14
รูปที่ 2.2	ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C3A	18
รูปที่ 2.3	แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	22
รูปที่ 2.4	อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	23
รูปที่ 2.5	กำลังอัดของคอนกรีตรูปลูกบาศก์ที่ใช้ขนาดต่าง ๆ กัน	33
รูปที่ 2.6	กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้ขนาดต่าง ๆ กัน	34
รูปที่ 2.7	การแตกของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก	34
รูปที่ 2.8	การแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้อง	35
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง W/C ratio และกำลังอัด	35
รูปที่ 2.10	การล็อกจับระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีรูปทรง (ก) เหลี่ยมมุมและ (ข) กลม	37
รูปที่ 2.11	ความสามารถในการชะลอการเคลื่อนที่ของรอยร้าวของมวลรวมที่มีรูปร่างต่างกัน	37
รูปที่ 2.12	รูปร่างเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากโรงไฟฟ้า	39
รูปที่ 2.13	ผลทดสอบ XRD ของเถ้าแกลบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	40
รูปที่ 2.14	กระบวนการทดสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยวิธีX-ray fluorescence (XRF)	42
รูปที่ 3.1	ลักษณะการป้ายยาทาเล็บลงบน Stub	47
รูปที่ 3.2	การโรยตัวอย่างด้วยไม้พันสำลี	47
รูปที่ 3.3	แท่ง Stub ที่โรยผงเถ้าลอยชีวมวล	48
รูปที่ 3.4	ภาพระหว่างการฉายรังสีลงบนแผ่นตัวอย่าง	49
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)	49
รูปที่ 3.6	หลักการทำงานของเครื่อง SEM	50
รูปที่ 3.7	เพลทใส่ผงเถ้าลอยชีวมวลเตรียมนำเข้าเครื่อง Diffractometer	51
รูปที่ 3.8	เครื่องทดสอบ Diffractometer	51
รูปที่ 3.9	ตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลที่ใช้ทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF)	52
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF)	52
รูปที่ 3.11	เครื่องผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ	53

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 3.12	แบบหล่อมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ	54
รูปที่ 3.13	มอร์ตาร์ที่บ่มและอายุ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบกำลังอัด	54
รูปที่ 3.14	โต๊ะทดสอบการไหลแผ่มอร์ตาร์	55
รูปที่ 3.15	เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine	57
รูปที่ 3.16	แผนภาพออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา	61
รูปที่ 3.17	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ชั่งตวงเตรียมไว้	62
รูปที่ 3.18	เครื่องโม่ผสมคอนกรีต	62
รูปที่ 3.19	คอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว	62
รูปที่ 3.20	อุปกรณ์ทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต	64
รูปที่ 3.21	การวัดค่ายุบตัวของคอนกรีต	64
รูปที่ 3.22	แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่ใช้	65
รูปที่ 3.23	คอนกรีตที่เต็มแบบหล่อทรงกระบอกเรียบร้อยแล้ว	65
รูปที่ 3.24	คอนกรีตทรงกระบอกที่แข็งตัวแล้ว	65
รูปที่ 3.25	เครื่องทดสอบกำลังอัดก้อนคอนกรีต	66
รูปที่ 3.26	ทดสอบก้อนกตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด	67
รูปที่ 3.27	ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังอัดด้วยโปรแกรม SPSS	68
รูปที่ 4.1	ไม้สับที่ใช้เผาในห้องทดลอง	69
รูปที่ 4.2	แกลบใช้เผาในห้องทดลอง	70
รูปที่ 4.3	ซังข้าวโพดใช้เผาในห้องทดลอง	70
รูปที่ 4.4	การเผาชีวมวลในห้องทดลอง	70
รูปที่ 4.5	เถ้าลอยชีวมวลชนิดที่ BMA (ก) และเถ้าลอยชีวมวลชนิดที่ WRHC (ข)	71
รูปที่ 4.6	ขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวล BMA	73
รูปที่ 4.7	ขนาดคละของเถ้าลอยชีวมวล WRHC	74
รูปที่ 4.8	SEM ของเถ้าลอยชีวมวลจากโรงไฟฟ้าชีวมวล (BMA)	74
รูปที่ 4.9	ผล EDX ของเถ้าลอยชีวมวล BMA	75
รูปที่ 4.10	SEM ของเถ้าลอยชีวมวลที่เผาในห้องทดลอง (WRHC)	76
รูปที่ 4.11	ผล EDX ของเถ้าลอยชีวมวล WRHC	76

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 4.12	SEM ของเถ้าซังข้าวโพดที่เผาในห้องทดลอง	77
รูปที่ 4.13	จุด (g) ผล EDX ของเถ้าเข้าโพด	77
รูปที่ 4.14	ผล XRD ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA	78
รูปที่ 4.15	ผล XRD ของเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC	79
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวล (BMA) แทนที่ปูนซีเมนต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	81
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวล WRHC แทนที่ปูนซีเมนต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	82
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ของเถ้าไม้ เถ้าแกลบและเถ้าซังข้าวโพด ที่อายุ 28 วัน กับกำลังอัดมอร์ตาร์	83
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ของเถ้าชนิด BMA กับกำลังอัดมอร์ตาร์	84
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ของเถ้าชนิด WRHC กับกำลังอัดมอร์ตาร์	85
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ของเถ้าชนิด BMA6 กับ WRHC3-WRHC6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์	85
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุมอร์ตาร์ของเถ้าชนิด BMA6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์	86
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุมอร์ตาร์ของเถ้าชนิด WRHC6 กับกำลังอัดมอร์ตาร์	86
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์อัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ กับค่าการยุบตัวของคอนกรีต ที่กำลังอัดออกแบบ 200 ksc	88
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 200 ksc ที่อายุ 28 วัน	89
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 250 ksc ที่อายุ 28 วัน	90
รูปที่ 4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนทีปูนซีเมนต์ กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 300 ksc ที่อายุ 28 วัน	90

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าลอยชีวมวลแทนที่ปูนซีเมนต์ กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 350 ksc ที่อายุ 28 วัน 91

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 200 ksc ที่อายุ 28 วัน 91

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 250 ksc ที่อายุ 28 วัน 92

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 300 ksc ที่อายุ 28 วัน 92

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชีวมวลร้อยละ 10 กับกำลังอัดคอนกรีต ที่กำลังอัดคอนกรีตออกแบบ 350 ksc ที่อายุ 28 วัน 93

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA1 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 99

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA2 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 100

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA3 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 100

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA4 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 101

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA5 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 101

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด BMA6 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 102

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC1 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 102

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC2 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 103

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC3 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 103

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC4 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 104

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC5 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 104

รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเถ้าชนิด WRHC6 แทนที่ปูนซีเมนต์กับกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการทำนายกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 105

รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์จริงและกำลังที่คำนวณจากสมการของตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลชนิด BMA 105

รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์จริงและกำลังที่คำนวณจากสมการของตัวอย่างเถ้าลอยชีวมวลชนิด WRHC 106

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved