

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คอนกรีต.....	4
2.2 ประเภทของคอนกรีต.....	6
2.3 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต.....	6
2.3.1 กรรมวิธีการผลิต.....	6
2.3.2 ประโยชน์และการใช้งาน.....	8
2.4 จีโอโพลิเมอร์.....	10
2.4.1 ผลิตผลจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Products).....	14
2.4.2 คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	16
2.5 กำลังอัดคอนกรีต.....	23
2.5.1 กำลังอัดมอร์ตาร์.....	23
2.5.2 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม.....	24
2.5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์.....	24

	หน้า
2.6 ปูนซีเมนต์.....	24
2.6.1 ชนิดของปูนซีเมนต์.....	25
2.6.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์.....	28
2.6.3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	30
2.7 ของเสียซิลิกา.....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.8.1 ด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีต.....	37
2.8.2 ด้านจีโอโพลิเมอร์.....	40
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.1.1 วัสดุดิบ.....	51
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	51
3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง.....	54
3.2.1 ตัวแปรอิสระ.....	54
3.2.2 ตัวแปรตาม.....	54
3.2.3 ตัวแปรควบคุม.....	54
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	55
3.3.1 การทดลองตอนที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย.....	55
3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุดิบ.....	55
3.3.1.2 การออกแบบส่วนผสม.....	55
3.3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม.....	55
3.3.2 การทดลองตอนที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐาน ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	55
3.3.2.1 ทดสอบการชะละลายโลหะหนัก.....	55
3.3.2.2 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุ.....	56
3.3.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ.....	56

3.3.3 การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	56
3.3.4 การทดลองตอนที่ 4 การทดลองการชะละลายของโลหะหนัก.....	58
3.3.5 การทดลองตอนที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	58
3.4 ผังสรุปงานวิจัย.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	60
4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	60
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	60
4.1.2 ผลการศึกษการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	65
4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	65
4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	66
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการผลิตโดยใช้ของเสียซีลิกา.....	73
4.4 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของของเสียซีลิกาในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ.....	90
ภาคผนวก ก.1 การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	91
ภาคผนวก ก.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (มาตรฐาน ASTM C109-07, 2008).....	92
ภาคผนวก ข การทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค.....	94

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์และ เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	96
ภาคผนวก ง การคำนวณความถ่วงจำเพาะและการคำนวณสัดส่วนของมอร์ตาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	99
ภาคผนวก จ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนต่างๆ และการ แปรหน่วยกำลังรับแรงอัด	102
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการวิเคราะห์โลหะหนัก.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคนกรีต.....	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ ในงานจีโอโพลิเมอร์.....	20
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์.....	22
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	29
ตารางที่ 3.1 การหาอัตราส่วนปริมาณของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์.....	57
ตารางที่ 3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสถานะต่างๆ.....	57
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนปริมาณอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด.....	57
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกา.....	61
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุ.....	62
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลึกของของเสียซิลิกา (หลังบด) และ อะลูมินาบริสุทธิ์.....	64
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐาน.....	65
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในอัตราส่วน A1 (60:20:20), B2 (70:10:20) และมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุม ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน.....	70
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่น.....	72
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของของเสียซิลิกา.....	73
ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซิลิกา (บาท/ ก้อน).....	76
ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายพลังงานของเสียซิลิกาและทราย (บาท/กก.).....	77
ตารางที่ ผ1 การหาค่ากำลังรับแรงอัดให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนยอมรับได้.....	93
ตารางที่ ผ2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลึกของของเสียซิลิกา (หลังบด) และ อะลูมินาบริสุทธิ์.....	95
ตารางที่ ผ3 ผลวิเคราะห์หาปริมาณปริมาตรของของเสียซิลิกา.....	97
ตารางที่ ผ4 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของของเสียซิลิกา.....	100
ตารางที่ ผ5 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อก้อน.....	101

ตารางที่ ๘6.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20).....	103
ตารางที่ ๘6.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20) ต่อ.....	104
ตารางที่ ๘7.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน B2 (70:10:20).....	105
ตารางที่ ๘7.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน B2 (70:10:20) ต่อ.....	106
ตารางที่ ๘8.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถ รับกำลังรับแรงอัดได้ 180 กก./ซม ²	107
ตารางที่ ๘8.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถ รับกำลังรับแรงอัดได้ 180 กก./ซม ² ต่อ.....	108
ตารางที่ ๘9 แสดงค่าความเข้มข้นต่ำสุดของธาตุสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และ ทองแดง (Cu) ของเครื่องอินดักทีฟลิ้นเปิดพลาสติก.....	113
ตารางที่ ๘10 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของของเสียซิลิกา.....	114
ตารางที่ ๘11 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	114

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	12
ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยา Geopolymerization.....	13
ภาพที่ 2.3 แสดงภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	13
ภาพที่ 2.4 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีของเสียซิลิกา.....	13
ภาพที่ 2.5 ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	14
ภาพที่ 2.6 อิฐทนไฟ ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	15
ภาพที่ 2.7 นำไปประยุกต์ใช้ในการทำฟิวส์ไฟฟ้าผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	15
ภาพที่ 2.8 วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	16
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไฮอะเลต.....	18
ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไฮอะเลต.....	19
ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของไฮเดียมโพลิไฮอะเลต.....	19
ภาพที่ 2.12 แสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	31
ภาพที่ 2.13 กระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชัน.....	33
ภาพที่ 2.14 โครงสร้างสารประกอบซิลิโคน (Silicone).....	34
ภาพที่ 2.15 แสดงปริมาณวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลกากของเสีย.....	36
ภาพที่ 3.1 ทราแยมน้ำละเอียด.....	53
ภาพที่ 3.2 ของเสียซิลิกา.....	53
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างอะลูมินาบริสุทธิ์ (Al ₂ O ₃).....	53
ภาพที่ 3.4 เครื่องบดขนาดเล็ก.....	53
ภาพที่ 3.5 เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด.....	54
ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	54
ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักมอร์ตาร์.....	54
ภาพที่ 3.8 แบบหล่อก่อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	
ภาพที่ 3.9 ผังสรุปงานวิจัย.....	59

ภาพที่ 4.1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซีลิกา.....	63
	หน้า
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซีลิกา (หลังบด).....	64
ภาพที่ 4.3 ผลการกระจายขนาดคละของอะลูมินาบริสุทธิ์.....	64
ภาพที่ 4.4 ภาพของของเสียซีลิกาขยาย 5000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกน.....	66
ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 30:30 และ 35:35 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 45:15 และ 53:17 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 40:20 และ 47:23 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A2 (60:10:20) และ (ข) อัตราส่วน B1 (70:20:10).....	69
ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	69
ภาพที่ 4.10 ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุม อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	69
ภาพที่ 4.11 แสดงกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง.....	71
ภาพที่ 4.12 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคขยาย 2500 เท่าของ (ก) มอร์ตาร์อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) มอร์ตาร์อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	74
ภาพที่ 4.13 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคขยาย 5000 เท่าของ (ก) มอร์ตาร์อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) มอร์ตาร์อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	74
ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียซีลิกา (ก่อนบด).....	95
ภาพที่ ผ2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของอะลูมินาบริสุทธิ์.....	95
ภาพที่ ผ3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซีลิกา.....	98
ภาพที่ ผ4 กราฟการเทียบกำลังรับแรงอัดจากรูปทรงกระบอกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ในหน่วย	

กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc).....	111
--------------------------------------	-----

ภาพที่ ๕5 กราฟแสดงค่ามาตรฐานความเข้มข้นของธาตุโครเมียม (Calibration Curve)...	113
---	-----