

การประยุกต์ใช้เก้าอี้และกากคอนกรีตในการผลิตนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF FLY ASH AND CONCRETE WASTE IN PRODUCTION OF  
THERMAL INSULATION AND NOISE BARRIER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เถ้าลอยและกากคอนกรีตในการผลิตฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียง
โดย	นายชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชดชนก อัทธมพงศ์)	

ชัชพงศ์ ฌ ป้อมเพชร : การประยุกต์ใช้เถ้าลอยและกากคอนกรีตในการผลิตฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียง. ( UTILIZATION OF FLY ASH AND CONCRETE WASTE IN PRODUCTION OF THERMAL INSULATION AND NOISE BARRIER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ในลักษณะของการแทนที่ปูนซีเมนต์ และแทนที่มวลรวมละเอียดตามลำดับ โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ส่วนกากคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาคือกากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากคอนกรีต รวมถึงสมบัติเพื่อนำมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ การรับแรงอัด สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์ สำหรับเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบได้ศึกษาการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedures (TCLP) วิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) และวิธี Waste Extraction Test (WET) เพิ่มเติม จากการศึกษาพบว่าเพื่อให้ได้มอร์ตาร์ที่มีความต้านแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59-2561 จะสามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ร้อยละ 25 - 50 สำหรับกากคอนกรีตสามารถใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้ถึงร้อยละ 100 ในด้านสมบัติเชิงความร้อนพบว่าผลิตภัณฑ์มีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.08 – 0.33 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งถือว่ามีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี แต่ในด้านสมบัติเชิงเสียงพบว่าผลิตภัณฑ์ยังมีสมบัติไม่ถึงเกณฑ์ของกำแพงกันเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยกำหนด สำหรับการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยพบว่าโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินมาตรฐานยกเว้นปริมาณตะกั่ว (Pb) และสารหนู (As) ในเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP และเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ชะละลายด้วยวิธี WET ตามลำดับ แต่เมื่อนำเถ้าลอยขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์พบว่าผลิตภัณฑ์มีปริมาณโลหะหนักโดยส่วนใหญ่ลดลงและมีค่าไม่เกินมาตรฐาน

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970140921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Lignite coal fly ash, Bituminous coal fly ash, Municipal solid waste incineration fly ash, Thermal conductivity, Acoustical properties, Leaching of heavy metal

Chatpong Na Pombhejara : UTILIZATION OF FLY ASH AND CONCRETE WASTE IN PRODUCTION OF THERMAL INSULATION AND NOISE BARRIER.

Advisor: Asst. Prof. DAO SUWANSANG JANJAROEN, Ph.D.

This research investigated fly ashes and concrete waste use in the production of mortar. Fly ashes were used to partially replace Portland cement, and concrete waste was used as fine aggregate. In this study, three types of fly ash have been studied: Lignite coal fly ash (LFA), Bituminous coal fly ash (BFA), and Municipal solid waste incineration fly ash (MFA). Concrete waste (CW) was a residual from the concrete production. Physical and chemical properties of fly ash and concrete waste were investigated, as well as some properties including compressive strength, thermal properties, and acoustical properties. For the fly ash powder and mortar with fly ash, leaching of heavy metals was investigated with the method of TCLP, SPLP, and WET. Results showed that 25% - 50% of fly ashes, and 100% of CW could be used in cement-solidification reaching the standard TISI 59-2561. For the thermal testing, the results showed that the thermal conductivity of mortars were around 0.08 – 0.33 W/mK. It was good as insulator material. For the acoustical testing, it showed that the acoustical properties were not reached the noise barrier criteria of the Expressway Authority of Thailand. For the leaching test, among all types of fly ashes, Pb and As in leaching from MFA by TCLP and LFA by WET were found to be higher than the standard. On the other hand, all types of fly ash mortars were not found any heavy metals higher than the standard.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ ที่กรุณาให้โอกาสในการทำวิจัยในหัวข้อนี้ อีกทั้งยังกรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำในการดำเนินการทดลองอย่างละเอียด ตลอดจนกรุณาช่วยแก้ไขตรวจทานจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชตชนก อัทธพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่กรุณาสับสนุนทั้งเงินทุนและอุปกรณ์ รวมถึงกรุณาช่วยดำเนินการในการขอความอนุเคราะห์เฝ้าล่อยจากแหล่งต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่นอกจากกรุณาให้คำปรึกษาในการวิจัย ยังกรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ และให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือรวมทั้งบริการงานทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท จีไอโนยซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อทั้งอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงเสียง อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการทดสอบสมบัติเชิงเสียงตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา กำลังทรัพย์ และให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

ชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เตาเผาขยะชุมชน.....	4
2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเถ้าลอย.....	5
2.2.1 เถ้าลอย (fly ash).....	5
2.2.1.1 สมบัติทางด้านกายภาพของเถ้าลอย.....	7
2.2.1.2 สมบัติทางด้านเคมีของเถ้าลอย.....	7
2.2.2 สารปอซโซลาน (pozzolan).....	9
2.2.3 วัสดุเชื่อมประสาน (cementitious material).....	10
2.3 เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash).....	10

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน .....	11
2.3.2 สัณฐานวิทยาของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน .....	12
2.4 โรงงานผลิตคอนกรีต.....	12
2.5 กากคอนกรีต.....	13
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต .....	14
2.6 คอนกรีต.....	15
2.6.1 การออกแบบคอนกรีตแบบทั่วไป .....	17
2.6.2 การออกแบบคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม .....	18
2.6.3 มอร์ตาร์.....	19
2.6.4 มาตรฐานกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	20
2.6.4 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตวัสดุคอนกรีตและวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็น องค์ประกอบ .....	20
2.7 วัสดุฉนวนกันความร้อน.....	22
2.7.1 สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุฉนวนกันความร้อน.....	23
2.8 กำแพงกั้นเสียง (noise barrier).....	25
2.8.1 สมบัติเชิงเสียงของกำแพงกั้นเสียง (noise barrier).....	27
2.8.1.1 การดูดกลืนเสียง (sound absorption).....	27
2.8.1.2 การสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) .....	30
2.9 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนักและการชะละลาย.....	34
2.9.1 โลหะหนัก.....	34
2.9.2 การชะละลาย .....	35
2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	36
2.10.1 ข้อมูลการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอย.....	36
2.10.2 ข้อมูลปริมาณกัมมันตภาพรังสีของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอย.....	38



2.10.3 ข้อมูลการประยุกต์ใช้เก้าอี้กับงานวิศวกรรม.....	38
2.10.3.1 ข้อมูลการประยุกต์ใช้คอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน .....	38
2.10.3.2 ข้อมูลการประยุกต์ใช้คอนกรีตเพื่อใช้เป็นกำแพงกันเสียง (noise barrier)..	40
2.11 เป้าหมายของงานวิจัย.....	42
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 แผนการวิจัย.....	43
3.1.1 การวางแผนการทดลอง.....	43
3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	43
3.1.3 ตัวแปรในการทดลอง.....	45
3.2 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการทดลอง .....	50
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	50
3.2.2 วัสดุดิบและสารเคมี .....	50
3.2.3 เครื่องมือทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	51
3.3 การเตรียมสารเคมีในการชะละลาย .....	52
3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดอะซิติก .....	52
3.3.2 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์ .....	52
3.3.3 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก.....	52
3.4 แผนการทดลอง.....	53
3.5 การดำเนินการทดลอง.....	54
3.5.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของเก้าอี้และกากคอนกรีต .....	54
3.5.1.1 สมบัติทางด้านเคมี.....	54
3.5.1.2 สมบัติทางด้านกายภาพ .....	54
3.5.2 การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักของเก้าอี้.....	55
3.5.2.1 การย่อยสลายเก้าอี้ด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ.....	55

3.5.2.2 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure และ Synthetic Precipitation Leaching Procedure.....	56
3.5.2.3 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) .....	57
3.5.3 การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์.....	58
3.5.3.1 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินปิ ทูนินัส และเถ้าลอยจาเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใน อัตราส่วนที่แตกต่างกัน .....	58
3.5.3.2 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้กากคอนกรีต แทนที่มวลรวมละเอียดใน อัตราส่วนที่แตกต่างกัน .....	59
3.5.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์.....	60
3.5.5 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์.....	60
3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์.....	61
3.5.7 การทดสอบปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์.....	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	65
4.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและกากคอนกรีต.....	65
4.1.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย .....	65
4.1.1.1 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....	65
4.1.1.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย .....	69
4.1.2 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกากคอนกรีต.....	76
4.1.2.1 สมบัติทางเคมีของกากคอนกรีต.....	76
4.1.2.2 สมบัติทางกายภาพของกากคอนกรีต.....	77
4.2 ผลการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักของเถ้าลอย.....	82
4.2.1 การย่อยสลายเถ้าลอยด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ.....	82
4.2.2 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure.....	83
4.2.3 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure .....	85

4.2.4 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	86
4.2.5 การชะละลายเถ้าลอยด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) .....	87
4.3 ผลการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอย และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	91
4.3.1 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	91
4.3.2 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้กากคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	95
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์.....	96
4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ .....	96
4.4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	101
4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์.....	104
4.5.1 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ .....	104
4.5.2 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	107
4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์.....	110
4.6.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ.....	110
4.6.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ.....	110
4.6.1.2 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ .....	118
4.6.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	127
4.6.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	127
4.6.2.2 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	130

4.7 ผลการทดสอบปริมาณโลหะหนักของผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ.....	138
4.7.1 การย่อยสลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ.	138
4.7.2 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure .....	139
4.7.3 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure .....	145
4.7.4 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) .....	151
4.7.5 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water).....	156
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	164
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	164
5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	168
5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม .....	168
บรรณานุกรม .....	170
ภาคผนวก .....	180
ภาคผนวก ก. รูปภาพตัวอย่างและอุปกรณ์.....	181
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองโดยละเอียดและใบรายงานผลการทดลอง.....	187
ประวัติผู้เขียน .....	212

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างองค์ประกอบของมูลฝอยที่นำเข้าสู่โครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้า ของเทศบาลนครภูเก็ต.....	4
ตารางที่ 2-2 ประเภทของเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	8
ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหิน.....	8
ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ .....	11
ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต .....	14
ตารางที่ 2-6 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต .....	15
ตารางที่ 2-7 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 : 2 : 4 ตามมาตรฐานคอนกรีตของกรมโยธาธิการและ ผังเมือง กระทรวงมหาดไทย .....	18
ตารางที่ 2-8 ปริมาณขององค์ประกอบสำหรับการขึ้นรูปมอร์ตาร์จำนวน 6 ก้อน และ 9 ก้อน .....	19
ตารางที่ 2-9 ชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 .....	20
ตารางที่ 2-10 ค่าวัสดุของอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 : 2 : 4 ตามมาตรฐานคอนกรีตของ กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย.....	21
ตารางที่ 2-11 ได้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	21
ตารางที่ 2-12 ตัวอย่างค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ .....	24
ตารางที่ 2-13 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ .....	30
ตารางที่ 2-14 ตัวอย่างค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	33
ตารางที่ 2-15 ค่ามาตรฐานของสารชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอย .....	35
ตารางที่ 2-16 ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของคอนกรีตที่มีองค์ประกอบ แตกต่างกัน .....	40
ตารางที่ 3-1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 .....	45

ตารางที่ 3-2	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 .....	46
ตารางที่ 3-3	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 .....	47
ตารางที่ 3-4	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 6 .....	48
ตารางที่ 3-5	ปฏิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่มีเถ้า ลอยเป็นองค์ประกอบ .....	58
ตารางที่ 3-6	ปฏิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่มีกาก คอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	59
ตารางที่ 4-1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย .....	66
ตารางที่ 4-2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ใช้ในงานวิจัย นี้เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่น .....	68
ตารางที่ 4-3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต .....	77
ตารางที่ 4-4	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อ คอนกรีตด้วยตะแกรงร่อน .....	81
ตารางที่ 4-5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลาย ไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน EPA 3051A .....	83
ตารางที่ 4-6	ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน EPA 1311 .....	84
ตารางที่ 4-7	ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี SPLP ตามมาตรฐาน EPA 1312 .....	85
ตารางที่ 4-8	ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม .....	87
ตารางที่ 4-9	ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) .....	88
ตารางที่ 4-10	ผลการชะละลายของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับ เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่นในประเทศไทย ด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน EPA 1311 .....	91
ตารางที่ 4-11	ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็น องค์ประกอบ .....	93

ตารางที่ 4-12 ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	96
ตารางที่ 4-13 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ .....	111
ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ.....	114
ตารางที่ 4-15 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ .....	116
ตารางที่ 4-16 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	119
ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ.....	123
ตารางที่ 4-18 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ .....	126
ตารางที่ 4-19 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	129
ตารางที่ 4-20 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	132
ตารางที่ 4-21 สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น.....	135
ตารางที่ 4-22 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น.....	136
ตารางที่ 4-23 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน EPA 3051A.....	139
ตารางที่ 4-24 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP .....	140

ตารางที่ 4-25 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP .....	142
ตารางที่ 4-26 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP .....	144
ตารางที่ 4-27 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP .....	146
ตารางที่ 4-28 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP .....	148
ตารางที่ 4-29 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP .....	150
ตารางที่ 4-30 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET152	
ตารางที่ 4-31 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET .....	153
ตารางที่ 4-32 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET .....	155
ตารางที่ 4-33 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน .....	157
ตารางที่ 4-34 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน.....	159
ตารางที่ 4-35 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน.....	161
ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	190
ตารางที่ ข-2 คำอธิบายชื่อตัวอย่างในใบรายงานผลการทดสอบการย่อยสลายเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	196



ตารางที่ ข-3 คำอธิบายชื่อตัวอย่างในใบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ชะละลายได้จากถ้ำ  
ลอยและมอร์ตาร์ที่มีถ้ำลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ..... 198



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 แผนผังการทำงานของเตาเผาขยะชุมชน .....	5
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างการนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์ตามสมบัติของถ่านหิน .....	6
รูปที่ 2-3 กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ .....	13
รูปที่ 2-4 กระบวนการผลิตของโรงงานประเภท 58(1).....	14
รูปที่ 2-5 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต.....	16
รูปที่ 2-6 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (heat flow meter).....	24
รูปที่ 2-7 เส้นทางเดินของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้รับเสียงเมื่อมีกำแพงกั้น .....	25
รูปที่ 2-8 หลักเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดวัสดุสำหรับกำแพงกั้นเสียงในประเทศไทย.....	27
รูปที่ 2-9 แผนภาพการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงด้วยท่อนำคลื่นเสียง .....	29
รูปที่ 2-10 การทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุ .....	31
รูปที่ 2-11 แผนภาพการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงด้วยท่อนำคลื่นเสียง.....	32
รูปที่ 4-1 ภาพถ่ายถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และกำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา).....	69
รูปที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ โดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	69
รูปที่ 4-3 ภาพถ่ายถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัสที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา).....	70
รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส โดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	70
รูปที่ 4-5 ภาพถ่ายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา) .....	71
รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	71

รูปที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	72
รูปที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	73
รูปที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) .....	74
รูปที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer).....	76
รูปที่ 4-11 ภาพถ่ายกากคอนกรีตที่กำลังขยาย 30 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 500 เท่า (ขวา).....	78
รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากคอนกรีตโดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) .....	78
รูปที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากคอนกรีต ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	79
รูปที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของกากคอนกรีตด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer) .....	80
รูปที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยตะแกรงร่อน (sieve analysis) เปรียบเทียบกับมวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 และมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน มอก. 566.....	82
รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	97
รูปที่ 4-17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ.....	99
รูปที่ 4-18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ.....	100
รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	102
รูปที่ 4-20 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	105

รูปที่ 4-21 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ.....	106
รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ.....	107
รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ	108
รูปที่ 4-24 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ .....	112
รูปที่ 4-25 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ .....	115
รูปที่ 4-26 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ .....	118
รูปที่ 4-27 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ.....	121
รูปที่ 4-28 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ.....	124
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ .....	127
รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	130
รูปที่ 4-31 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ .....	133
รูปที่ 4-32 ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ.....	134
รูปที่ ก-1 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ (lignite) .....	182
รูปที่ ก-2 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินบิทูมินัส (bituminous).....	182
รูปที่ ก-3 เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน .....	182

รูปที่ ก-4	กากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีต.....	183
รูปที่ ก-5	ขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน ASTM C188....	183
รูปที่ ก-6	เครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ของบริษัท Biosan รุ่น Multi RS-60..	184
รูปที่ ก-7	แบบหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	184
รูปที่ ก-8	เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (compression machine) Amsler 30 ton .....	184
รูปที่ ก-9	ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 10 x 10 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับทดสอบ.....	185
รูปที่ ก-10	ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติเชิงเสียง .....	185
รูปที่ ก-11	ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติเชิงเสียง .....	185
รูปที่ ก-12	ท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube) และชุดทดสอบสมบัติเชิงเสียงของบริษัท Geonise .....	186

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการกำจัดขยะชุมชนโดยใช้เตาเผา (municipal solid waste incineration) ในระบบปิดเป็นกระบวนการกำจัดขยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะระบบการกำจัดขยะชุมชนโดยใช้เตาเผาที่สามารถเดินระบบได้อย่างสมบูรณ์จะมีการปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ หรืออาจไม่มีการปลดปล่อยมลพิษเลยตลอดกระบวนการ อีกทั้งยังสามารถนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย (Dabbaransi, 2007) อย่างไรก็ตามกระบวนการใด ๆ ที่มีการเผาเชื้อเพลิง เช่น การเผาขยะชุมชน และการเผาถ่านหินเพื่อผลิตไฟฟ้า ย่อมก่อให้เกิดของเสียกลุ่มหนึ่งขึ้นเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังอาจจะกลายเป็นขยะอันตรายได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผา ของเสียที่เกิดขึ้นนั้นก็คือ เถ้าลอย (fly ash) โดยปกติเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจะถูกนำไปทดสอบความเป็นพิษและถูกนำไปกำจัดอย่างเหมาะสมด้วยวิธีฝังกลบ

อีกหนึ่งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่มีวิธีกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ คือ กากคอนกรีตจากโรงงานที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์คอนกรีต (โรงงานลำดับที่ 58(1)) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) โดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ได้รายงานปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นของเสียอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2554 ว่ามีปริมาณมากถึง 320,201 ตัน (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555) อย่างไรก็ตามหลุมฝังกลบของเสียไม่ว่าจะประเภทใด ก็ตามนับวันล้วนแต่จะมีจำนวนพื้นที่รับของเสียน้อยลงเรื่อย ๆ เพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (sustainable development goals) ที่ประกาศโดยองค์การสหประชาชาติ (United Nations: UN) เมื่อปี พ.ศ. 2558 ดังนั้นการพยายามลดปริมาณของเสียต่าง ๆ ที่จะถูกทิ้งลงในหลุมฝังกลบอันมีอยู่จำกัดให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้นั้น จึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญยิ่ง

แนวทางการนำมาใช้ประโยชน์ที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันของทั้งเถ้าลอย และกากคอนกรีต คือ การนำมาใช้ทดแทนส่วนผสมของวัสดุคอนกรีต และด้วยสมบัติปอซโซลาน (pozzolan) ของเถ้าลอย จึงได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (portland cement) (Hemalatha และ Ramaswamy, 2017) ในขณะที่กากคอนกรีตจะนำมาใช้ทดแทนมวลรวม (aggregate) ในงานวัสดุคอนกรีต (Salesa และคณะ, 2017) การนำของเสียอุตสาหกรรมอย่างเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตมาเป็นส่วนผสมของวัสดุคอนกรีตนั้น ไม่เพียงแต่มีข้อดีในการประหยัดวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต

วัสดุคอนกรีต แต่พบว่าคอนกรีตที่มีองค์ประกอบของเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตยังมีสมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียงที่ดีอีกด้วย โดยพบว่าการเพิ่มส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินหรือกากคอนกรีตส่งผลช่วยให้ค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ของวัสดุมีค่าลดลง (Fenollera และคณะ, 2015) กล่าวคือ มีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีขึ้น ในขณะที่การใช้เถ้าลอยถ่านหินหรือกากคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ ทำให้วัสดุที่ได้นั้นมีสมบัติการดูดกลืนเสียงที่ดี (Sun และ Guo, 2015) เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นกำแพงกันเสียง (noise barrier)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash) เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) และเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ (lignite) ในการใช้แทนที่องค์ประกอบในมอร์ตาร์ โดยมีศึกษาการชะละลายโลหะหนักทั้งในเถ้าลอยที่นำมาใช้และมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในการนำวัสดุคอนกรีตไปใช้ประโยชน์ และนอกจากนี้มีการศึกษาสมบัติของกากคอนกรีตในการแทนที่องค์ประกอบของมอร์ตาร์เป็นกรณีต่างหาก จากนั้นมีการศึกษากำลังรับแรงอัด (compressive strength) สมบัติเชิงความร้อน (thermal properties) และสมบัติเชิงเสียง (acoustical properties) ของมอร์ตาร์ เพื่อนำไปสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิดและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในการเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ (lignite fly ash) เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส (bituminous fly ash) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash) และการใช้กากคอนกรีต (concrete waste) เป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียงของวัสดุคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอย และกากคอนกรีตแตกต่างกัน เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์เป็นฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียง

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอย และวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ปริมาณเถ้าลอยและกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบในมอร์ตาร์ มีผลต่อกำลังรับแรงอัด สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงเสียง และปริมาณโลหะหนักของผลิตภัณฑ์

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration)

1.4.2 กากคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยคือกากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีต

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำเถ้าลอย และกากคอนกรีต นำกลับมาใช้ใหม่ในรูปขององค์ประกอบสำหรับวัสดุคอนกรีต

1.5.2 สามารถผลิตคอนกรีตที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนและกักเก็บเสียงจากเถ้าลอยและกากคอนกรีต

1.5.3 สามารถเป็นแนวทางในการลดปริมาณของเถ้าลอยและกากคอนกรีตที่จะถูกทิ้งในหลุมฝังกลบ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เตาเผาขยะชุมชน

ในแต่ละปีมีปริมาณขยะชุมชนเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในแต่ละวันของพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร มีปริมาณขยะเกิดขึ้นสูงกว่า 10,453 ตันต่อวัน (สำนักงานสำนักสิ่งแวดล้อม, 2560) ซึ่งโดยปกติแล้วขยะชุมชนเหล่านี้จะถูกจัดการโดยวิธีฝังกลบในหลุมฝังกลบขยะชุมชน แต่เนื่องจากแนวโน้มการขยายตัวของเมืองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อปริมาณขยะชุมชนที่จะเกิดมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการแสวงหาทางเลือกใหม่ในการจัดการขยะชุมชน หนึ่งในทางเลือกนั้นคือการกำจัดขยะชุมชนแบบเตาเผา (municipal solid waste incineration) ซึ่งมีจุดเด่นที่มีความเหมาะสมกับสภาพเมืองที่มีพื้นที่น้อยแต่จำเป็นต้องกำจัดขยะจำนวนมาก นอกจากนี้พลังงานที่ได้จากการเผาขยะชุมชนยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าหากการกำจัดขยะชุมชนแบบเตาเผามีการควบคุมผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมที่ดีแล้ว การกำจัดขยะชุมชนแบบเตาเผานี้ก็ถือเป็นหนึ่งในวิธีการกำจัดขยะชุมชนที่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบันที่สุด ตัวอย่างองค์ประกอบของมูลฝอยที่นำเข้าสู่โครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ต (บริษัท พีเจที เทคโนโลยี จำกัด, 2561) แสดงดังตารางที่ 2-1

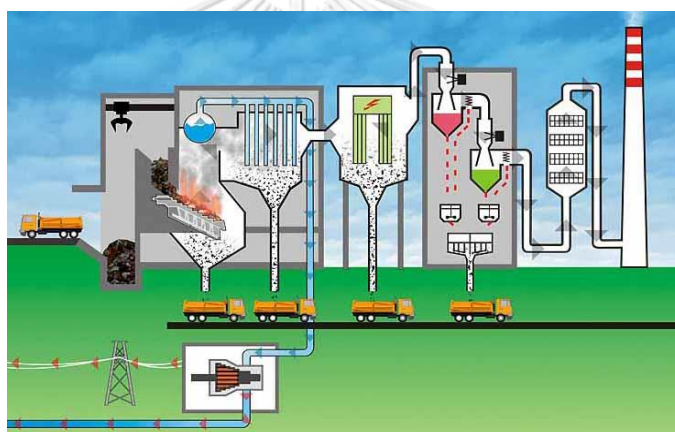
ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างองค์ประกอบของมูลฝอยที่นำเข้าสู่โครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ต

องค์ประกอบมูลฝอย	ร้อยละที่พบ	องค์ประกอบมูลฝอย	ร้อยละที่พบ
พลาสติก	33.68	ยาง/หนัง	4.42
กระดาษ	14.74	โฟม	2.11
เศษอาหาร	11.58	สารที่ไม่ติดไฟ	9.47
เศษไม้/ใบไม้	7.79	องค์ประกอบที่ติดไฟ	10.32
เศษผ้า	5.89	รวม	100

หลักการดำเนินงานโดยทั่วไปของเตาเผาขยะชุมชนคือการกำจัดขยะด้วยความร้อนสูงเมื่อป้อนขยะมูลฝอยเข้าสู่เตาเผาขยะ ขยะมูลฝอยเหล่านั้นจะถูกเผาไหม้ โดยที่อุณหภูมิที่ทำให้ขยะเกิดการถูกเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์คืออุณหภูมิระหว่าง 850 - 1100 องศาเซลเซียส ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ ได้แก่ เถ้าหนัก (bottom ash) ซึ่งจะถูกนำออกโดยตรงจากระบบเตาเผา และ

เถ้าลอย (fly ash) ซึ่งจะถูก นำออกจากระบบจากกระบวนการดักจับฝุ่น ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ จากข้อมูลโครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ตระบุว่าในการเผามูลฝอย 1 ตัน จะเกิดเถ้าหนักและเถ้าเบาในประมาณร้อยละ 25 และร้อยละ 2.5 ตามลำดับ (บริษัท พีเจที เทคโนโลยี จำกัด, 2561)

การผลิตไฟฟ้าจากเตาเผาขยะชุมชนเกิดจากเมื่อทำการเผาขยะจะเกิดก๊าซอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเหล่านี้จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง (waste heat boiler) เกิดเป็นไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam) ขับเคลื่อนกังหันไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าจ่ายสู่ชุมชนหรือจ่ายเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าท้องถิ่น การทำงานของเตาเผาขยะชุมชนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แผนผังการทำงานของเตาเผาขยะชุมชน

ที่มา: <https://nenxyas.wordpress.com/2013/01/05/inilah-5-energi-alternatif-yang-cocok-untuk-indonesia>

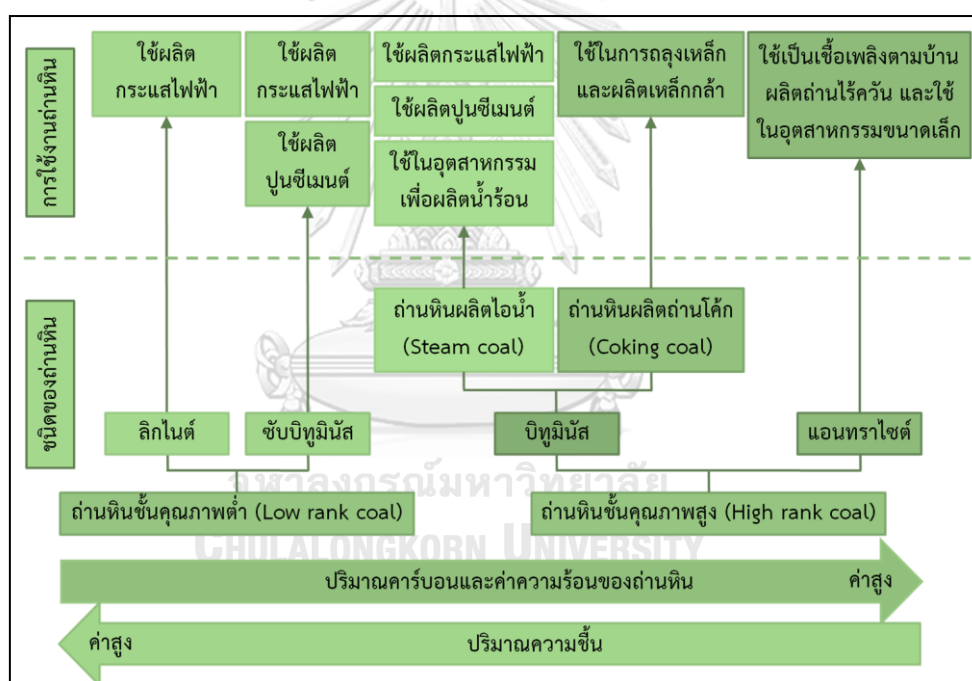
## 2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเถ้าลอย

### 2.2.1 เถ้าลอย (fly ash)

เถ้าลอย คือ ของเสี้ยวอุตสาหกรรมที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น การเผาขยะชุมชนในเตาเผาขยะชุมชน และการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ลักษณะภายนอกโดยทั่วไปของเถ้าลอยจะเป็นฝุ่นละเอียดสีเทาปนน้ำตาล โดยจะถูกดักจับไว้ด้วยเครื่องจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เพื่อไม่ให้เถ้าลอยสามารถออกมาจากปล่องควันไอร้อนของโรงงานและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ หลังจากนั้นเถ้าลอยจะถูกนำไปเก็บรวบรวมไว้ในไซโล (silo) เพื่อนำออกจากระบบ และกำจัดด้วยวิธีฝังกลบต่อไป แต่เนื่องด้วยใน

กระบวนการขนย้ายถ่านล้อยสามารถเป็นเหตุให้ถ่านล้อยหลุดล่อยออกมาได้ อีกทั้งการกำจัดด้วยวิธีหลุมฝังกลบยังเป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองทั้งพื้นที่และค่าใช้จ่าย จึงจำเป็นต้องหาวิธีการกำจัด หรือนำถ่านล้อยไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมต่อไป (ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย, 2544)

สมบัติของถ่านล้อยโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในกระบวนการเผา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ถ่านล้อยที่มีแหล่งที่มาแตกต่างกันมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน สำหรับการใช้อ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผา เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน ชนิดของถ่านหินที่นำมาใช้ก็ส่งผลต่อถ่านล้อยที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน ถ่านหินสามารถจำแนกชนิดและคุณภาพได้จากปริมาณคาร์บอน ปริมาณความชื้น ค่าความร้อนเมื่อเผา และลำดับการแปรสภาพ ตัวอย่างการนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์ตามสมบัติแสดงดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างการนำถ่านหินไปใช้ประโยชน์ตามสมบัติของถ่านหิน

ที่มา: <http://fieldtrip.ipst.ac.th/content/2/detail/11>

ดัดแปลงโดย: ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2560

สำหรับในประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินกระจายอยู่หลายภูมิภาค โดยชนิดของถ่านหินที่พบมากที่สุดในประเทศไทยคือถ่านหินลิกไนต์ โดยเฉพาะที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และอำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่ ในขณะที่ชนิดของถ่านหินที่พบในปริมาณรองลงมาคือถ่านหินซับบิทูมินัส

และถ่านหินแอนทราไซต์ พบที่อำเภอนาด่าง จังหวัดเลย และอำเภอนากลาง จังหวัดอุดรธานี (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

### 2.2.1.1 สมบัติทางด้านกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินมีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียด มีสีเทาอ่อนถึงดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินที่นำมาเผา วิธีการเผา และอุณหภูมิในการเผา โดยทั่วไปเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินมีลักษณะกลม แต่มีส่วนน้อยที่มีลักษณะรูปร่างเหลี่ยม สำหรับการนำเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินไปใช้ประโยชน์เป็นสารปอซโซลาน เถ้าลอยจะต้องมีสมบัติตาม ASTM C618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-05, 2005) ซึ่งระบุขนาดเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินไว้ว่า ต้องมีปริมาณร้อยละของเถ้าลอยที่ติดค้างอยู่บนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร หรือตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ระบุความละเอียดของเถ้าลอยในลักษณะของพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยกำหนดให้มีค่าระหว่าง 2,500 ถึง 5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ทดสอบโดยชุดทดสอบความละเอียด (air blaine permeability) ในขณะที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความละเอียดไม่ต่ำกว่า 2,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

### 2.2.1.2 สมบัติทางด้านเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินโดยทั่วไปประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะหลายชนิด โดยมีองค์ประกอบหลักได้แก่ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) โดยที่องค์ประกอบหลักของเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินจะถูกใช้ในการพิจารณาแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งได้จำแนกออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ ชั้นคุณภาพ C (Class C) และชั้นคุณภาพ F (Class F) (ASTM C618-05, 2005) ดังที่แสดงในตารางที่ 2-2 นอกจากนี้ในตารางที่ 2-3 ได้แสดงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหิน

ตารางที่ 2-2 ประเภทของเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618

ชั้นคุณภาพ	สมบัติทางเคมี	คำอธิบาย
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70.0 \%$ $\text{SO}_3 \leq 5.0 \%$ ความชื้น $\leq 3.0 \%$ $\text{LOI} \leq 6.0 \%$	ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินชนิดแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (pozzolan)
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ $\text{SO}_3 \leq 5.0 \%$ ความชื้น $\leq 3.0 \%$ $\text{LOI} \leq 6.0 \%$	ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินชนิดลิกไนต์และซับบิทูมินัส มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานแล้วเป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious)

ที่มา: (ASTM C618-05, 2005) (Hemalatha และ Ramaswamy, 2017)

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหิน

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	ชั้นคุณภาพ C	ชั้นคุณภาพ F
CaO	15.1 – 54.8	0.50 – 14.0
SiO <sub>2</sub>	11.8 – 46.4	37.0 – 62.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.6 – 20.5	16.6 – 35.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4 – 15.6	2.6 – 21.2
MgO	0.1 – 6.7	0.3 – 5.2
K <sub>2</sub> O	0.3 – 9.3	0.1 – 4.1
Na <sub>2</sub> O	0.2 – 2.8	0.1 – 3.6
SO <sub>3</sub>	1.4 – 12.9	0.02 – 4.7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2 – 0.4	0.1 – 1.7

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบอื่น ๆ ที่พบในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหิน (ต่อ)

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	ชั้นคุณภาพ C	ชั้นคุณภาพ F
TiO <sub>2</sub>	0.6 – 1.0	0.5 – 2.6
MnO	0.003 – 0.2	0.3 – 32.8
Loss on ignition (LOI)	0.3 – 11.7	0.3 – 32.8

ที่มา: (Hemalatha และ Ramaswamy, 2017)

### 2.2.2 สารปอซโซลาน (pozzolan)

ตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-05, 2005) ได้ระบุสมบัติของสารปอซโซลานว่าเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยปกติสารปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่อุณหภูมิห้องแล้วจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสารปอซโซลานจัดเป็นสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (mineral admixture) ชนิดหนึ่ง โดยชนิดที่สามารถหาได้มาจากธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) หรือชนิดที่ได้จากวัสดุที่ทำขึ้นหรือได้จากของเสีย เช่น ดินเหนียวหรือดินดานเผา (burnt clay or shale) ผงถ่านหิน (pulverized fuel ash; PFA) หรือเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า

การใช้สารปอซโซลานเป็นสารผสมเพิ่มทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ช่วยให้เกิดความร้อนต่ำในการทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และเนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ จึงทำให้มีอัตราการพัฒนาแรงอัดช้า แต่ให้แรงอัดในระยะหลังเท่ากันหรือมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบในกลุ่มซัลเฟตด้วยเช่นกัน (วินิต ช่อวิเชียร, 2557) ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังนี้

- 1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) คือ วัสดุปอซโซลานดิบที่ได้มาจากธรรมชาติหรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านการเผาเพื่อให้ได้สมบัติตามชั้นคุณภาพนี้
- 2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินชนิดแอนทราไซต์หรือถ่านหินบิทูมินัสที่มีสมบัติเป็นไปตามชั้นคุณภาพนี้ กล่าวคือมีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยถ้ำล่อยชั้นคุณภาพนี้มีสมบัติพอซโซลาน

3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) คือ ถ้ำล่อยที่ได้จากการเผาถ้ำนหินชนิดลิกไนต์หรือถ้ำนหินซ้บพิทุมินัสที่สมบัติเป็นไปต้ำตามชั้นคุณภาพนี้ ถ้ำล่อยคือมีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ไม่ต่ำก้ำร้อยละ 50 โดยถ้ำล่อยชั้นคุณภาพนี้มีทั้งสมบัติพอซโซลานและสมบัติในการเชื่อมประส้าน

### 2.2.3 วัสดุเชื่อมประส้าน (cementitious material)

เมื่อนำถ้ำล่อยซึ่งเป็นส้ารผสมเพิ่มแบบร้รฐฐฐในคอนกรีตประเภทส้ารพอซโซลานผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นส้ารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาพอซโซลาน (pozzolanic reaction) กับซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate; 3Ca 2SiO<sub>2</sub> 3H<sub>2</sub>O) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate; 3CaO 2Al<sub>2</sub>O 3H<sub>2</sub>O) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ซึ่งจะท้ำให้เกิดสมบัติเชื่อมประส้าน (cementitious) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



โดยปกติแล้วปฏิกิริยาพอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างซ้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลำนาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และเกิดปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาพอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อถ้ำล่อยมีความละเอียดมากขึ้น (Chindaprasirt, Jaturapitakkul และ Sinsiri, 2007)

### 2.3 ถ้ำล่อยจากเต้าเผาซ้บซ้บ (municipal solid waste incineration fly ash)

หนึ่งในของเสี้ยจากกระบวนการเต้าเผาซ้บซ้บ (municipal solid waste incineration; MSWI) คือ ถ้ำล่อยจากตัวอย่างโครงการโรงเผามูลฝอยซ้บซ้บและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ตพบว่าในแต่ละปีมีปริมาณถ้ำล่อยเกิดขึ้นในปริมาณมากถึง 3,960 ตันต่อปี (บริษัท เข้าเทิร์นไทยคอนซัลต้ง จำกัด, 2555) โดยปกติถ้ำล่อยจากโรงเผามูลฝอยซ้บซ้บและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ตจะถูกจัดเก็บไว้ภายในไซโลเก็บถ้ำล่อย จากนั้นจึงขนส่งด้วยรถบรรทุกไปยังบ่อเก็บถ้ำล่อยของเทศบาลภูเก็ต ก่อนที่จะนำไปกำจัดยังหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย

### 2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจะขึ้นอยู่กับชนิดของมูลฝอยที่นำเข้าสู่กระบวนการเผา ตารางที่ 2-4 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่พบจากเตาเผาแหล่งต่าง ๆ

ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	(Sancharoen, 2003) <sup>1</sup>	(Shi และ Kan, 2009) <sup>2</sup>	(Leelarungroj, 2015) <sup>3</sup>	(Wei, 2015) <sup>4</sup>	(Clavier และคณะ, 2020) <sup>5</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.08	7.42	16.73	25.8	0.92 – 12.7
CaO	34.36	23.37	32.27	18.9	16.6 – 54.9
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	NR	NR	NR	0.03 – 0.14
CuO	0.05	NR	NR	NR	NR
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68	4.01	10.16	14.4	0.12 – 5.04
K <sub>2</sub> O	5.27	4.60	1.441	1.2	2.03 – 8.1
MgO	1.30	2.72	2.644	1.3	1.30 – 5.81
MnO	0.03	NR	0.0658	0.06	NR
Na <sub>2</sub> O	3.70	4.00	1.49	0.4	2.93 – 8.9
PbO	0.15	NR	NR	NR	NR
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.95	NR	0.365	0.01	0.49 – 2.7
SiO <sub>2</sub>	5.88	24.50	26.6	49.5	3.93 – 27.52
SnO <sub>2</sub>	0.13	NR	NR	NR	NR
SO <sub>3</sub>	4.15	12.03	7.091	1.3	4.64 – 14.4
SrO	0.04	NR	NR	NR	0.02 – 0.03
TiO <sub>2</sub>	0.39	NR	NR	NR	0.41 – 3.12
ZnO	0.58	NR	NR	NR	1.63 – 3.08

1. โรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ต

NR = ไม่ได้รายงาน

2. Shanghai Yuqiao Wastes Incineration Plant สาธารณรัฐประชาชนจีน

3. เตาเผาขยะชุมชนของ SCG industry

4. Suzhou Wastes Incineration Plant สาธารณรัฐประชาชนจีน

5. ขยะชุมชนโดยทั่วไป



### 2.3.2 ลักษณะวิทยาของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวอนุภาคของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนโดยส่วนใหญ่มีรูปร่างที่หลากหลาย พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีช่องว่างในเนื้อวัสดุมาก โดยพบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตร ถึง 200 ไมโครเมตร (Sancharoen, 2003) ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะที่สามารถควบคุมชนิดของมูลฝอยที่จะนำเข้าสู่ระบบได้ พบว่ามีขนาดอนุภาคของเถ้าลอยอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตร ถึง 40 ไมโครเมตร (Leelarungroj, 2015)

### 2.4 โรงงานผลิตคอนกรีต

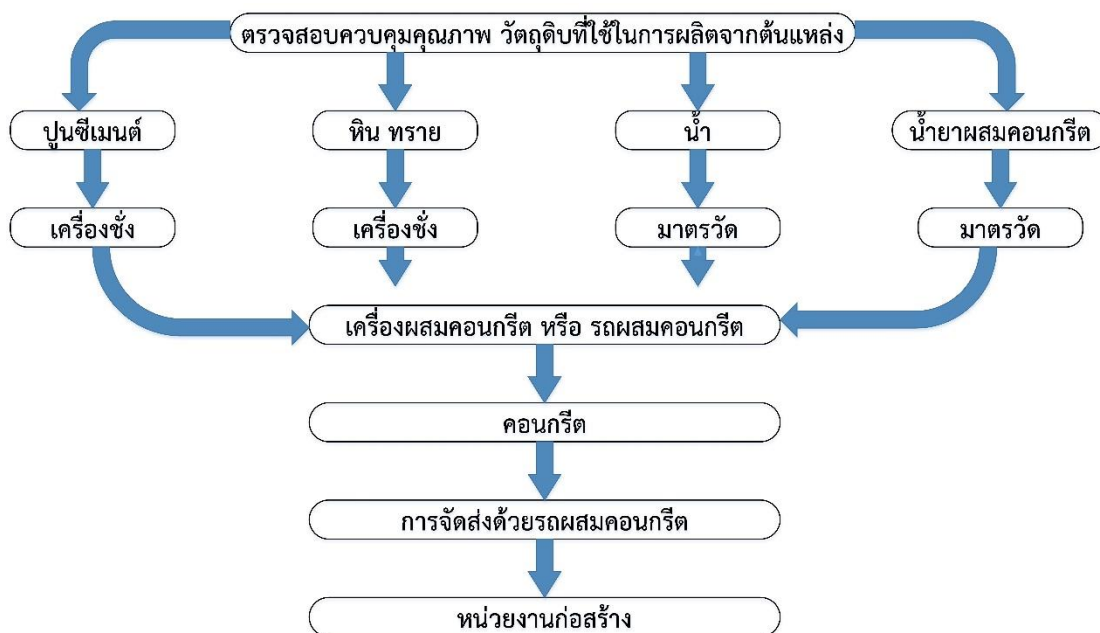
ในงานก่อสร้าง คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลายาวนาน ด้วยจุดเด่นที่สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้ อีกทั้งมีความทนทานสูงและสามารถทนไฟได้ดี การใช้คอนกรีตโดยทั่วไปผู้รับเหมาก่อสร้างจะต้องสั่งซื้อส่วนผสมของคอนกรีตมาผสมเองในสถานที่ก่อสร้างตามอัตราส่วนที่สอดคล้องกับการใช้ประโยชน์ หรือสั่งซื้อคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ขึ้นรูปตามลักษณะการใช้ประโยชน์แล้วจากโรงงานผลิตคอนกรีต (โรงงานลำดับที่ 58(1)) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) แต่ในปัจจุบันมีความนิยมใช้คอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยจากโรงงาน เรียกว่า คอนกรีตผสมเสร็จ (ready-mixed concrete) โดยเมื่อทำการผสมคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะลำเลียงคอนกรีตใส่รถผสมคอนกรีตเพื่อจัดส่งไปยังสถานที่ก่อสร้างต่อไป การที่คอนกรีตผสมเสร็จได้รับความนิยมแทนที่การใช้คอนกรีตผสมไม่เหล็กประกอบด้วยเหตุผล 3 ประการ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2548) ดังนี้

1. เวลาและสถานที่ในการก่อสร้างจำกัด
2. แรงงานหายาก
3. วงการก่อสร้างต้องการคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงขึ้น

คอนกรีตผสมเสร็จ มีองค์ประกอบที่สำคัญเช่นเดียวกับคอนกรีตโดยทั่วไป ได้แก่ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต หากแตกต่างกันเพียงแต่คอนกรีตผสมเสร็จจะผสมองค์ประกอบดังกล่าวสำเร็จจากโรงงาน ซึ่งตั้งอยู่นอกหรือในหน่วยงานก่อสร้าง แล้วจึงบริการส่งไปยังหน่วยงานก่อสร้าง

กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จจะเริ่มต้นจากการตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมต่าง ๆ ให้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน โดยที่ หิน และทราย จะนำมาจัดกองเก็บแยกกัน ในขณะที่ปูนซีเมนต์ จะถูกบรรจุไว้ในไซโลอย่างมิดชิด รวมถึงน้ำยาผสมคอนกรีตก็จะถูกบรรจุไว้ในภาชนะเฉพาะปิดมิดชิดต่างหากเช่นเดียวกัน เมื่อเริ่มกระบวนการผลิตจะลำเลียงหิน ทราย ปูนซีเมนต์ ไปยังเครื่องชั่งน้ำหนัก

ในขณะที่น้ำและน้ำยาผสมคอนกรีตจะถูกลำเลียงไปยังเครื่องวัดปริมาตร เพื่อชั่งตวงส่วนผสมให้เป็นไปตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ จากนั้นจะนำส่วนผสมทั้งหมดผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตระบบอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนด แล้วจึงลำเลียงลงสู่รถผสมคอนกรีตเพื่อนำไปส่งยังสถานที่ก่อสร้าง ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 กระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

ดัดแปลงจาก: (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2548)

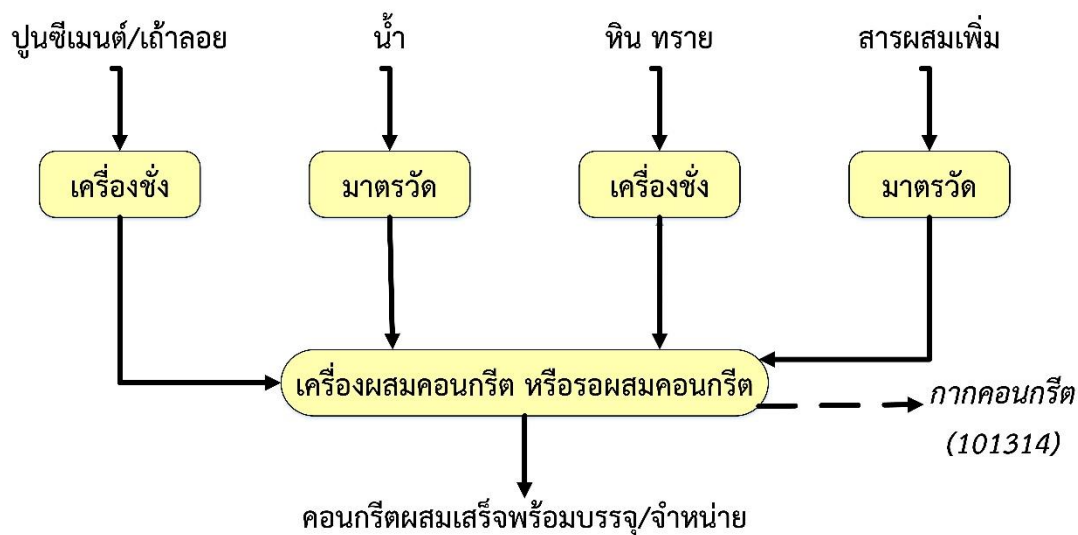
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.5 กากคอนกรีต

หนึ่งในของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคอนกรีตของโรงผลิตคอนกรีต และโรงผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (โรงงานลำดับที่ 58(1)) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) คือ กากคอนกรีต โดยมีรหัสสิ่งปฏิกูลหรือของเสียที่ไม่ใช่แล้ว (waste code) เป็น 101314 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) โดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม ได้รายงานปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นของเสียอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2554 ว่ามีปริมาณมากถึง 320,201 ตัน (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555) กากคอนกรีตโดยส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผสมคอนกรีต หรือรถผสมคอนกรีต และกระบวนการคัดคุณภาพวัสดุคอนกรีต วิธีจัดการเศษและกากคอนกรีตโดยทั่วไปจะใช้วิธีตามรหัส 082 (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2559) ของรหัสดำเนินการสำหรับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (treatment and disposal codes) ซึ่งได้ระบุว่าเป็นการถมทะเลหรือที่ลุ่ม (land reclamation) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือ

วัสดุที่ไม่ใช่แก้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) กระบวนการผลิตของโรงผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 กระบวนการผลิตของโรงงานประเภท 58(1)

ดัดแปลงจาก: (ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2559)

### 2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต

เนื่องจากโดยทั่วไปกากคอนกรีตที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงผลิตคอนกรีตผสมเสร็จเกิดจากคอนกรีตที่ถูกผลิตขึ้นและเหลือใช้ในแต่ละวัน ดังนั้นองค์ประกอบของกากคอนกรีตจึงมีลักษณะใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ขึ้นรูปแล้ว ตารางที่ 2-5 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต

องค์ประกอบทางเคมี (%)	กากคอนกรีต
SiO <sub>2</sub>	40.1
CaO	20.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.5
K <sub>2</sub> O	2.3
H <sub>2</sub> O	2.2
MgO	2.1
Na <sub>2</sub> O	1.7

ดัดแปลงจาก (Ahmari และคณะ, 2012)

## 2.6 คอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุเปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเป็นโครงสร้าง (วินิต ช่อวิเชียร, 2557) โดยเป็นการผสมกันระหว่างซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน กับทราย หินหรือกรวดที่ทำหน้าที่เป็นมวลรวม และน้ำซึ่งจะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ เมื่อผสมรวมกันแล้วจะเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) มีสมบัติเป็นตัวประสานแทรกตามเม็ดทรายและก้อนหิน เมื่อเกิดการรวมตัวเป็นก้อนในแบบหล่อ จะสามารถแข็งตัวได้เมื่อมีอายุประมาณ 24 ชั่วโมง และมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุ

สาเหตุที่คอนกรีตสามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น อิฐ ไม้ หรือเหล็ก เพราะคอนกรีตสามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะรูปร่างและขนาดเป็นไปตามที่ต้องการได้ ตารางที่ 2-6 ได้แสดงตัวอย่างข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของวัสดุคอนกรีต

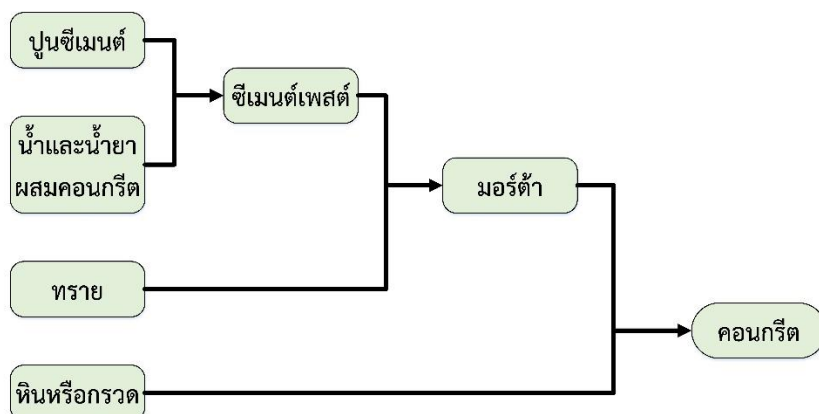
ตารางที่ 2-6 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามที่ต้องการได้	ความสามารถรับแรงดึงต่ำ
ราคาถูก	มีความยึดตัวต่ำ
มีความทนทานสูง	มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
ทนไฟได้ดี ไม่ไหม้ไฟ	อัตราต่อน้ำหนักต่ำ
สามารถเทหล่อได้ในสถานที่ก่อสร้าง	
สามารถทำให้ผิวสวยงามได้	

ที่มา: (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2548)

คอนกรีตโดยทั่วไปประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต เมื่อนำองค์ประกอบต่าง ๆ มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังต่อไปนี้

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (cement paste)
- ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย เรียกว่า มอร์ตาร์ (mortar)
- มอร์ตาร์ ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่าคอนกรีต (concrete) ดังแผนภูมิในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต  
ดัดแปลงจาก: (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2548)

ในแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตในข้างต้น มีหน้าที่และสมบัติที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

1) ซีเมนต์เพสต์ มีหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม ช่วยหล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ โดยสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และการเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2) มวลรวม มีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน มีปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก โดยสมบัติที่สำคัญของมวลรวม ได้แก่ ความแข็งแรง มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ต่ำ คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี รวมถึงต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสี นอกจากนี้การคละขนาดที่เหมาะสมของมวลรวมในสัดส่วนการผสมคอนกรีต จะช่วยให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น สม่่าเสมอ คุณภาพดี ทำงานง่าย ไม่เกิดการแยกตัวของคอนกรีต ใช้ปริมาณน้ำน้อยลง มีความสามารถเทได้ดี และตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตได้ง่าย โดยวิธีที่ใช้ในการควบคุมขนาดคละของมวลรวมคือวิธีตะแกรงร่อน (sieve analysis)

3) น้ำ มีทั้งที่หน้าที่ในการเป็นส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ การเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีลักษณะเหลวพอที่จะเทได้ รวมถึงช่วยเคลือบหินและทรายให้เปียกเพื่อซีเมนต์เพสต์จะสามารถเกาะโดยรอบได้ และหน้าที่สำหรับกระบวนการผลิตคอนกรีต ได้แก่ การใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่าง ๆ และการใช้บ่มคอนกรีต สำหรับน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตต้องเป็นน้ำสะอาด (สำเร็จ รักซ้อน และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2557) ไม่ควรมีสิ่งเจือปนที่จะทำปฏิกิริยากับคอนกรีต เช่น สารพวกซัลเฟต หรือสารที่จะทำให้เกิดความสกปรกและทำให้สีจับ

กับผิวคอนกรีตได้ไม่ดี (ซัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2540) สำหรับน้ำที่มีสารเจือปน เช่น ฟลูน น้ำมัน และเกลือ เล็กน้อยยังสามารถใช้บ่มคอนกรีตได้ แต่สำหรับน้ำที่มีกรดหรือสารอินทรีย์เจือปน เช่น กรดแทนนิก (tannic acid) ไม่สามารถใช้ได้ เพราะอาจทำให้เกิดรอยเปื้อนบนผิวคอนกรีต (วินิต ช่อวิเชียร, 2557) แต่ตามมาตรฐาน ASTM C31 (ASTM C31 / C31M-19a, 2019) ได้แนะนำให้บ่มคอนกรีตในน้ำปูนขาวอิ่มตัว (saturated lime water, calcium hydroxide;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งแตกต่างจากการบ่มในน้ำบริสุทธิ์ที่สามารถทำให้เกิดการแพร่ออกมาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากวัสดุคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ (Backus, 2015)

4) น้ำยาบ่มคอนกรีต มีหน้าที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของทั้งคอนกรีตเหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่าง ๆ เช่น เวลาการก่อตัว ความสามารถเทได้ กำลังอัด และความทนทาน เป็นต้น

### 2.6.1 การออกแบบคอนกรีตแบบทั่วไป

การออกแบบคอนกรีต หรือ การหาปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต (mix design) เป็นการหาอัตราส่วนปริมาณที่เหมาะสมของส่วนประกอบแต่ละชนิดในวัสดุคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่ความชื้นเหลวพอเหมาะและสะดวกในการทำงาน (workability)
- 2) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทานตามต้องการ (strength)
- 3) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมประหยัด (economy)

ในงานก่อสร้างขนาดเล็กการคำนวณหาอัตราส่วนขององค์ประกอบในวัสดุคอนกรีตถือว่าไม่มีความสำคัญมากนัก โดยสามารถกำหนดอัตราส่วนผสมได้ทันทีจากข้อมูลที่มีอยู่แล้ว เช่น ใช้คอนกรีตในอัตราส่วน 1 : 2 : 4 โดยปริมาตร ซึ่งหมายความว่า ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน และหิน 4 ส่วน สำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป และใช้น้ำประมาณ 25 – 30 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 1 ถุง (วินิต ช่อวิเชียร, 2557) โดยที่ปูนซีเมนต์ 1 ถุง มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม

ตามมาตรฐานคอนกรีตของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ได้ระบุปริมาณส่วนผสมแต่ละชนิดสำหรับวัสดุคอนกรีตอัตราส่วน 1 : 2 : 4 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556) โดยได้กำหนดปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ผสมสำหรับคอนกรีต 1 คิว ไว้ดังนี้ตารางที่ 2-7

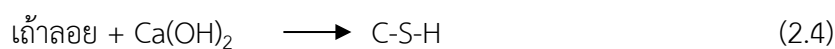
ตารางที่ 2-7 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 : 2 : 4 ตามมาตรฐานคอนกรีตของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

ลำดับที่	ส่วนผสม	จำนวน
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เช่น ตราช้าง, พญานาค, เพชร ฯ)	342 กิโลกรัม
2	ทรายหยาบ	0.57 ลูกบาศก์เมตร
3	หินเบอร์ 1-2	1.09 ลูกบาศก์เมตร
4	น้ำผสมคอนกรีต	180 ลิตร

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556)

### 2.6.2 การออกแบบคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

การใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มในการขึ้นรูปคอนกรีตร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ซึ่งก็คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยปฏิกิริยานี้คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในการขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงหลังคือ ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเถ้าลอยกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) โดยปฏิกิริยาทั้งสองช่วงจะทำให้เกิดเป็นสารละลายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมประสาน ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4



สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) โดยทั่วไปที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.5 (Grosse, 2007) เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูง โดยที่วัสดุเชื่อมประสานหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยรวมกัน เนื่องจากการใช้เถ้าลอยเป็นองค์ประกอบมีผลทำให้วัสดุคอนกรีตมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัด ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากความสามารถที่ได้ (workability) ผ่านทางการทดสอบค่าความยุบตัวของคอนกรีต (slump test) (Sancharoen, 2003) สำหรับการใส่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในวัสดุคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำหรือค่า w/c สูงขึ้น โดยการ

ใช้เถ้าลอยขยะชุมชนประมาณร้อยละ 40 แทนที่ปูนซีเมนต์ต้องใช้ค่า w/c ประมาณ 0.50 – 0.60 (Li, Dong และ Yang, 2017) แต่ในหลายงานวิจัยพบว่าสามารถใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานแบบคงที่ในการทดลองได้เช่นกัน เช่นการใช้ค่า w/b เท่ากับ 0.485 ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 ประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ (Inthasaro, 2002) หรือการทดลองใช้ค่า w/b ระหว่าง 0.40 – 0.70 (ปราโมทย์ พรหมทอง, 2546) หรือการใช้ค่า w/b ประมาณ 0.27 สำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ (ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2560) และการใช้ค่า w/b เท่ากับ 0.5 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าลอยบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ (Dontriros, Likitlersuang และ Janjaroen, 2020)

### 2.6.3 มอร์ตาร์

ในการศึกษาวิจัยการนำวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในบางกรณีอาจไม่สะดวกเมื่อทำการทดลองด้วยตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้การทดสอบด้วยมอร์ตาร์เพื่อเป็นผลสะท้อนต่อการผลิตคอนกรีต (สำเร็จ รักษ์อ่อน และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2557) มอร์ตาร์ คือ วัสดุที่นำปูนซีเมนต์ น้ำ และทราย หล่อในแบบหล่อจนกลายเป็นก้อนแข็ง ซึ่งในปูนซีเมนต์สามารถที่จะเติมส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานเข้าไปด้วยได้ ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์เพื่อทดสอบสมบัติ เช่น กำลังรับแรงอัด เป็นต้น สามารถขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens) ซึ่งได้ระบุให้ขึ้นรูปมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) เท่ากับ 0.485 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) และนอกจากนี้ยังได้ระบุปริมาณขององค์ประกอบที่ใช้ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 ปริมาณขององค์ประกอบสำหรับการขึ้นรูปมอร์ตาร์จำนวน 6 ก้อน และ 9 ก้อน

องค์ประกอบมอร์ตาร์	จำนวนตัวอย่าง	
	6 ก้อน	9 ก้อน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (กรัม)	500	740
ทราย (กรัม)	1,375	2,035
น้ำ (มิลลิลิตร) (w/c = 0.485)	242	340

ดัดแปลงจาก: (ASTM C109 / C109M-02, 2002)



#### 2.6.4 มาตรฐานกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ตามประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) ได้ระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของอิฐคอนกรีตไว้ 17.2 เมกะปาสกาล นอกจากนี้ตามประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 1505 - 2541 เรื่อง ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ ได้ระบุถึงการแบ่งชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาซึ่งจำแนกตามกำลังรับแรงอัดของวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยถ่านหิน และวัสดุอื่น ๆ เป็นมวลผสม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541) ดังตารางที่ 2-9 นอกจากนี้

ตารางที่ 2-9 ชั้นคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541

ชั้นคุณภาพ	กำลังรับแรงอัด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด
2	2.5	2.0
4	5.0	4.0
6	7.5	6.0
8	10.0	8.0

ดัดแปลงจาก: (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541)

#### 2.6.4 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตวัสดุคอนกรีตและวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

ตามมาตรฐานคอนกรีตของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ได้แนะนำค่าวัสดุสำหรับคอนกรีตอัตราส่วน 1 : 2 : 4 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556) ไว้ดังตารางที่ 2-10

**ตารางที่ 2-10** ค่าวัสดุของอัตราส่วนผสมของคอนกรีต 1 : 2 : 4 ตามมาตรฐานคอนกรีตของ  
กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

ลำดับที่	ส่วนผสม	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เช่น ตราช้าง, พญานาค, เพชร ฯ)	342 กิโลกรัม	2.87	981.54
2	ทรายหยาบ	0.57 ลูกบาศก์เมตร	373.83	213.08
3	หินเบอร์ 1-2	1.09 ลูกบาศก์เมตร	607.48	662.15
4	น้ำผสมคอนกรีต	180 ลิตร	0.0150	2.70
	รวมคอนกรีต 1 : 2 : 4	1 ลูกบาศก์เมตร	=	1,859

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556)

ในปี พ.ศ. 2544 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้รายงานราคาจำหน่ายของถั่วลอยจากกระบวนการเผ่าถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแหล่งแม่เมาะ โดยถั่วลอยลิกไนต์มีราคาจำหน่าย 70 บาทต่อตัน แต่ถ้าหากรวมค่าขนส่งและการจัดการจะมีราคารวมประมาณ 1,000 บาทต่อตัน (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) เมื่อนำมูลค่าของปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามคำแนะนำของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ดังตารางที่ 2-9 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยถั่วลอยถ่านหินลิกไนต์ในสัดส่วนร้อยละ 50 จะได้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของมอร์ตาร์ที่มีถั่วลอยลิกไนต์เป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 2-11

**ตารางที่ 2-11** ได้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของมอร์ตาร์ที่มีถั่วลอยลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ

ลำดับที่	ส่วนผสม	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	ราคารวม (บาท)
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เช่น ตราช้าง, พญานาค, เพชร ฯ)	171 กิโลกรัม	2.87	490.77
2	ถั่วลอยถ่านหินลิกไนต์	171 กิโลกรัม	0.07	11.97
3	ทรายหยาบ	0.57 ลูกบาศก์เมตร	373.83	213.08
4	หินเบอร์ 1-2	1.09 ลูกบาศก์เมตร	607.48	662.15
5	น้ำผสมคอนกรีต	180 ลิตร	0.0150	2.70
	รวมคอนกรีต 1 : 2 : 4	1 ลูกบาศก์เมตร	=	1,380.67

ที่มา: (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560)

## 2.7 วัสดุฉนวนกันความร้อน

วัสดุฉนวนกันความร้อน คือ วัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุได้โดยง่าย (กษิตา ชำนาญดี, 2554) โดยอาศัยลักษณะของวัสดุที่ประกอบไปด้วยช่องอากาศเล็ก ๆ จำนวนมาก ทำหน้าที่ต้านทานการไหลของอากาศหรือก๊าซ ทำให้ให้ความร้อนโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถผ่านวัสดุชนิดนี้เข้าไปได้

สำหรับสมบัติความเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน หรือการจะอธิบายว่าวัสดุชนิดใดมีความเป็นฉนวนที่ดี จะต้องพิจารณาจากสมบัติด้านความร้อนในทางทฤษฎี 3 ข้อหลัก (นพดล สหชัยเสรี และคณะ, 2556) ต่อไปนี้

1) การนำความร้อน (conduction) คือ การที่พลังงานความร้อนเกิดการถ่ายเทอยู่ภายในวัตถุ หรืออาจเกิดการถ่ายเทระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความร้อนมากกว่ามาสู่บริเวณที่เย็นกว่า

2) การพาความร้อน (convection) คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โดยเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อน จะทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคน้อยลง อนุภาคเกิดการขยายตัวลอยสูงขึ้น และในขณะเดียวกันก็ได้พาความร้อนไปด้วย สำหรับวัสดุส่วนอื่น ๆ ที่ยังไม่ได้รับความร้อนและยังไม่เกิดการสูญเสียความหนาแน่นของอนุภาค จะเกิดการเคลื่อนมาแทนที่อนุภาคที่ขยายตัว เมื่อเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ วัสดุนั้นจะได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง

3) การแผ่รังสี (radiation) คือ การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากแหล่งความร้อนหนึ่งไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

ในปัจจุบันฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารที่นิยมใช้มีอยู่ 4 ประเภท (วีทิต วรรณเลิศลักษณ์, 2560) ได้แก่

1) แผ่นเงาสะท้อนความร้อน เช่น อลูมิเนียมฟอยล์ ทำหน้าที่ในการสะท้อนรังสีความร้อนไม่ให้เข้ามาภายในอาคาร โดยไม่ได้ทำหน้าที่ในการป้องกันการความร้อน ส่วนใหญ่นิยมติดตั้งไว้ที่หลังคา

2) แผ่นยิปซัมบอร์ด มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ใช้กันผนังหรือทำฝ้าเพดาน โดยแผ่นยิปซัมบอร์ดนี้สามารถช่วยลดการนำความร้อนลงได้

3) โยแก้ว เป็นฉนวนกันความร้อนที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟู ประกอบด้วยเส้นใย โดยจะมีแผ่นเงาสะท้อนรังสีความร้อนหุ้มอยู่ด้วย มีน้ำหนักเบา และป้องกันความร้อนได้ดีมาก นิยมติดตั้งที่ ฝ้าเพดาน และผนัง

4) การพ่นโฟมใต้หลังคา เป็นการฉีดโฟมในบริเวณที่ต้องการป้องกันความร้อน แต่วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่นิยม เพราะโฟมสามารถติดไฟได้ง่าย อีกทั้งยังมีราคาแพงอีกด้วย

5) อิฐกันความร้อน เช่น คอนกรีตมวลเบา ซึ่งมีรูพรุนเป็นจำนวนมากอยู่ภายใน โดยรูพรุนทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน สามารถใช้ก่อเป็นผนังเหมือนอิฐมวลเบา หรือคอนกรีตบล็อก โดยทั่วไป

### 2.7.1 สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุฉนวนกันความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปของวัสดุมี 3 ลักษณะ ดังที่แสดงในข้างต้น สำหรับปริมาณที่ใช้ระบุสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่เป็นนิยมใช้คือ ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity,  $k$ ) โดยเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ โดยจะเป็นการวัดอัตราการไหลของความร้อนที่จุดใด ๆ ผ่านมวลวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างพื้นผิววัสดุ (สมจิต พุฒติ, 2560) วัสดุที่มีความสามารถนำความร้อนที่ดีจะมีค่าสภาพนำความร้อนสูง เรียกว่า ตัวนำความร้อน ในขณะที่วัสดุที่มีความสามารถนำความร้อนที่ไม่ดีจะมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ เรียกว่า ฉนวนความร้อน โดยหนึ่งในวิธีการวัดค่าสภาพนำความร้อนเป็นที่นิยมในปัจจุบัน คือ การวัดแบบสภาวะคงที่ (steady-state method) ด้วยวิธีเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (heat flow meter)

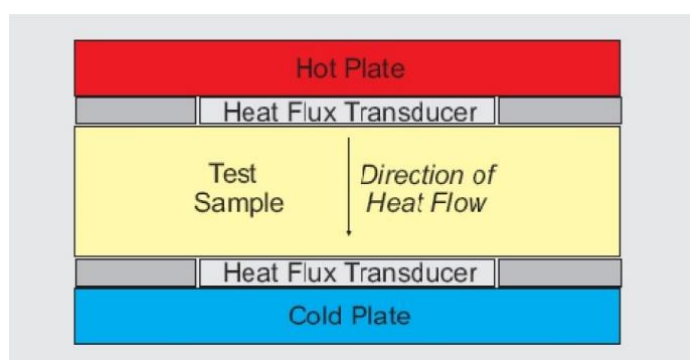
เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (heat flow meter) เป็นวิธีวัดสภาพนำความร้อนที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้วัสดุตัวอย่างเพียงหนึ่งชิ้น โดยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนประกอบไปด้วยแผ่นร้อน (hot plate) และแผ่นเย็น (cold plate) ดังรูปที่ 2-6 เมื่อติดตั้งตัวอย่างระหว่างแผ่นทั้ง 2 ชนิด เครื่องทดสอบจะถ่ายเทความร้อนจากแผ่นร้อน (hot plate) ผ่านวัสดุตัวอย่าง และไปยังแผ่นเย็น (cold plate) ของเครื่องมือทดสอบ เมื่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) กล่าวคือ ในระบบมีเกรเดียนต์อุณหภูมิ (temperature gradient) เป็นศูนย์ เครื่องทดสอบจะคำนวณสภาพนำความร้อนของวัสดุตัวอย่าง โดยการคำนวณสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ ของฟูเรียร์ (Fourier's law) ดังสมการที่ 2.5 สำหรับตัวอย่างค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2-12

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

โดยที่  $q$  คือ ฟลักซ์ความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)

$k$  คือ ค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)

$\frac{dT}{dx}$  คือ เกรเดียนต์อุณหภูมิ (เคลวินต่อเมตร)



รูปที่ 2-6 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (heat flow meter)  
ที่มา: (สมจิต พุฒดี, 2560)

ตารางที่ 2-12 ตัวอย่างค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	สภาพการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
อิฐฉนวน	0.15
อิฐแดง	0.6
คอนกรีต	0.8
คอร์ก	0.04
สีกหลาด	0.04
ใยแก้ว	0.04
แก้ว	0.8
น้ำแข็ง	1.6
ใยหิน	0.04
สไตรโฟม	0.01
ไม้	0.12 – 0.04

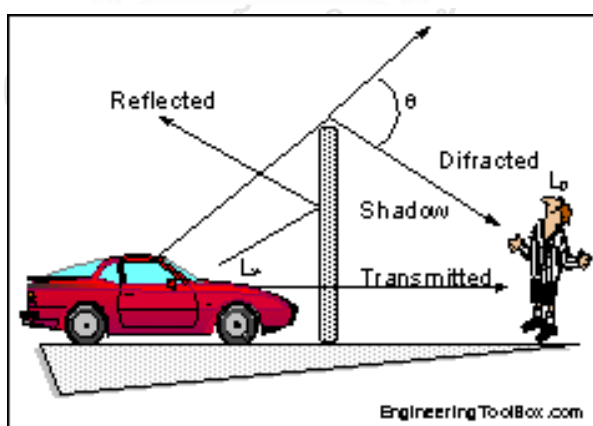
ดัดแปลงจาก: (Young และคณษะ, 2009)

## 2.8 กำแพงกั้นเสียง (noise barrier)

ปัญหามลพิษทางเสียงที่เกิดขึ้นจากสถานประกอบการหรือสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป เช่น มลพิษทางเสียงจากการจราจร ส่งผลเสียโดยตรงต่อสุขภาพในด้านต่าง ๆ และอาจส่งผลกระทบต่อการสูญเสียการได้ยินของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแสวงหาแนวทางเพื่อจัดการลดปัญหามลพิษทางเสียงนี้ หนึ่งในวิธีการควบคุมมลพิษทางเสียงคือการอาศัยหลักการทางวิศวกรรมในการจัดการ โดยทั่วไปการเกิดมลพิษทางเสียงประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ แหล่งกำเนิด ทางผ่านหรือตัวกลาง และผู้รับผลกระทบ (Harris, 1991)

การควบคุมปัญหามลพิษทางเสียงจากการจราจรที่นิยมใช้สำหรับการแก้ปัญหาที่ทางผ่านหรือตัวกลางคือการใช้ “กำแพงกั้นเสียง (noise barrier)” ติดตั้งที่ริมถนนหรือทางด่วน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดระดับเสียงระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงและผู้รับเสียงให้ลดน้อยลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2556)

กำแพงกั้นเสียง คือ โครงสร้างภายนอกอาคารสำหรับบริเวณที่มีเสียงรบกวนเพื่อลดเสียงรบกวน มีสมบัติหลักคือ การสะท้อน การหักเห และการดูดกลืนเสียง การติดตั้งกำแพงกั้นเสียงจะทำให้เกิดบริเวณเงาเสียง (shadow zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่เสียงถูกกำแพงบังไม่ให้ไปถึงผู้รับโดยตรง จึงมีเสียงแค่บางส่วนที่เลี้ยวเบน และลอดผ่านกำแพงกั้นเสียงมายังผู้รับเสียงได้ (วิสิทธิ์ สีลาศิริวงศ์ และคณะ, 2560) ดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 เส้นทางเดินของเสียงจากแหล่งกำเนิดไปยังผู้รับเสียงเมื่อมีกำแพงกั้น

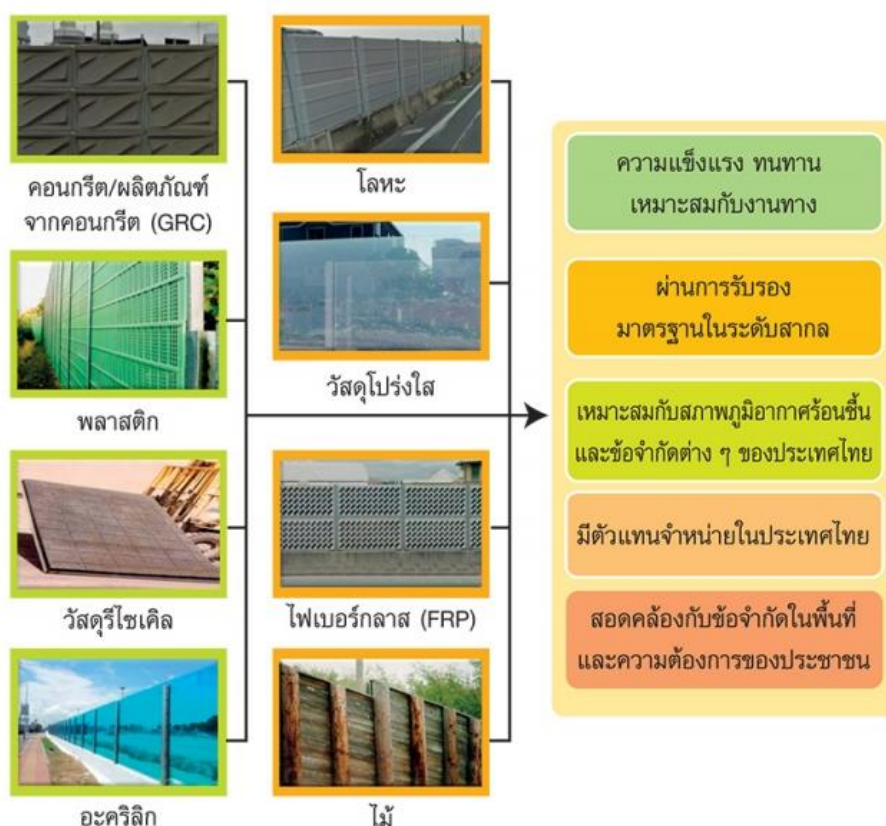
ที่มา: [https://www.engineeringtoolbox.com/outdoor-sound-partial-barriers-d\\_65.html](https://www.engineeringtoolbox.com/outdoor-sound-partial-barriers-d_65.html)

กำแพงกันเสียงที่มีการใช้อยู่โดยทั่วไปในประเทศไทย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (พิพัฒน์ ละอองศรี, 2556) ดังนี้

1) กำแพงกันเสียงแบบกระจายเสียง (dispersive panel) เป็นกำแพงกันเสียงที่มีผิวเรียบมันจึงมีสมบัติในการสะท้อนเสียงที่ดี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกันไม่ให้เสียงเดินทางผ่านวัสดุไปยังผู้รับเสียงที่อยู่อีกฝั่งหนึ่งของกำแพงได้ โดยอาศัยหลักการที่เสียงเดินทางตกกระทบพื้นผิวของกำแพงกันเสียงแล้วเกิดการสะท้อนกลับออกไปในทิศทางอื่น นอกจากนี้ยังนิยมมีการออกแบบพื้นผิวของกำแพงกันเสียงให้มีเหลี่ยมมุม เพื่อให้เสียงที่สะท้อนกลับมาไม่เกิดการรวมกันอีก

2) กำแพงกันเสียงแบบดูดกลืนเสียง (absorption panel) เป็นกำแพงกันเสียงที่มีวัสดุดูดกลืนเสียงติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างของกำแพงกันเสียง มีจุดเด่นที่สามารถกันเสียงไม่ให้ผ่านไปอยู่อีกฝั่งหนึ่งของกำแพงกันเสียงได้ และนอกจากนี้ยังสามารถดูดกลืนเสียงไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับที่มากเกินไปได้อีกด้วย

ชนิดของวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นกำแพงกันเสียงมีอยู่หลากหลายชนิด เช่น คอนกรีต และผลิตภัณฑ์จากคอนกรีต โลหะ พลาสติก วัสดุโปร่งใส วัสดุรีไซเคิล ไฟเบอร์กลาส อะคริลิก และไม้ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติด้านต่าง ๆ รวมถึงสมบัติเชิงเสียงที่แตกต่างกัน หลักเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดวัสดุสำหรับกำแพงกันเสียงในประเทศไทยแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 หลักเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาในการเลือกชนิดวัสดุสำหรับกำแพงกันเสียงในประเทศไทย  
ที่มา: [https://www.prachachat.net/news\\_detail.php?newsid=1416562165](https://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1416562165)

### 2.8.1 สมบัติเชิงเสียงของกำแพงกันเสียง (noise barrier)

สมบัติที่สำคัญของกำแพงกันเสียง ได้แก่ ความสามารถในการกันเสียงไม่ให้เดินทางผ่านไปยังผู้รับเสียงได้ และความสามารถในการดูดกลืนเสียงของวัสดุที่นำมาใช้เป็นกำแพงกันเสียง โดยสมบัติในการดูดกลืนเสียงของวัสดุจะถูกระบุด้วย สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ในขณะที่สมบัติการกันเสียงของกำแพงกันเสียงจะถูกระบุด้วย ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss)

#### 2.8.1.1 การดูดกลืนเสียง (sound absorption)

การดูดกลืนเสียง คือ กระบวนการที่พลังงานเสียงถูกดูดกลืนเอาไว้ภายในวัสดุหรือสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้เสียงส่วนที่แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดถูกลดทอนลง ในขณะที่ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) เป็นการอธิบายถึง พลังงานเสียงที่ถูกดูดกลืนในการสะท้อนของเสียงแต่ละครั้งในแต่ละความถี่ (คิวพันธุ์ ซูอินทร์, 2556) โดยทั่วไปความสามารถในการดูดกลืนเสียงของวัสดุจะมีสูงขึ้นเมื่อวัสดุมีรูพรุน โดยประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงจะมีค่าสูงในความถี่ต่ำ



ประมาณ 500 – 5,000 เฮิรตซ์ หลังจากนั้นเมื่อถึงช่วงความถี่หนึ่งประสิทธิภาพในการดูดกลืนเสียงจะมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและค่าการดูดกลืนเสียงเป็นตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ต่อไปนี้

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n \quad (2.6)$$

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (2.7)$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนเสียง (ซาบิน, sabine)

$\alpha_i$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของพื้นผิวในพื้นที่ i

$S_i$  คือ พื้นที่ผิวของพื้นผิว i (ตารางเมตร)

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุในแต่ละความถี่สำหรับบางกรณีอาจไม่สะดวกในการใช้งาน จึงมีการนำค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) ใช้เป็นตัวแทนในการอธิบายสมบัติการดูดกลืนเสียงของวัสดุ สัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ 250 500 1,000 และ 2,000 เฮิรตซ์ (ASTM C423-99a, 2001) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8 (บุรฉัตร วิริยะ, 2551)

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.8)$$

โดยที่ NRC คือ สัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง

$\alpha_{250}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์

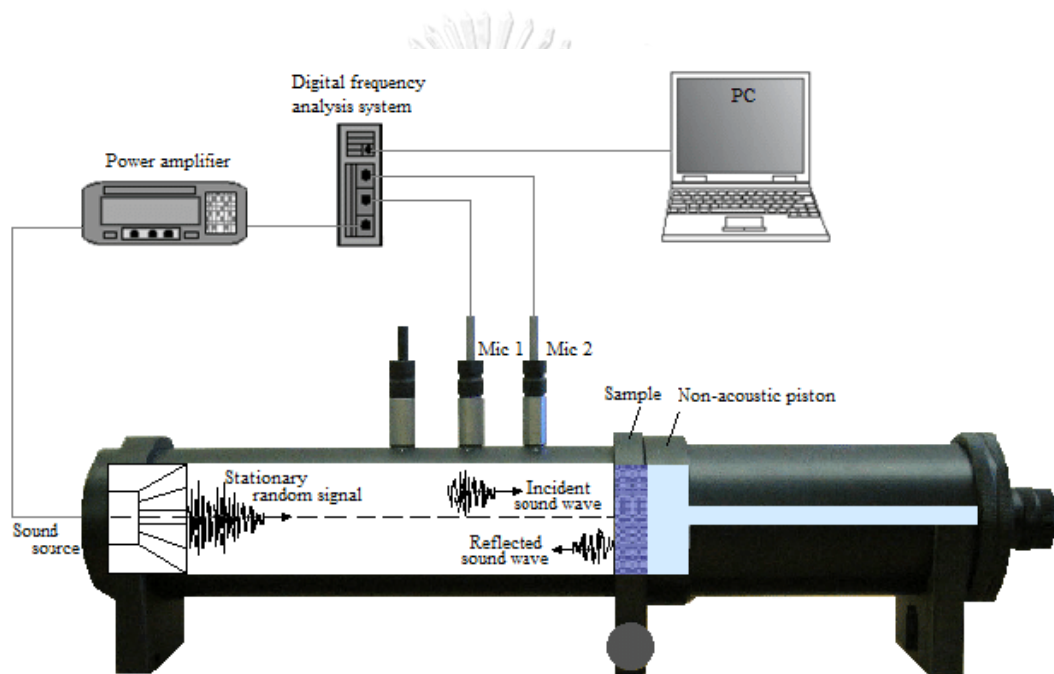
$\alpha_{500}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์

$\alpha_{1000}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ 1,000 เฮิรตซ์

$\alpha_{2000}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ความถี่ 2,000 เฮิรตซ์

ปกติการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุในเชิงพาณิชย์จะทดสอบในห้องเสียงสะท้อน (reverberation room) ด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM C423 standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method แต่สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุที่เป็นตัวอย่างขนาดเล็กเพื่อการวิจัยจะนิยมทดสอบโดยใช้ท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube method) ด้วยวิธีตามมาตรฐาน

ASTM E1050 standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system โดยวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM E1050 เป็นการทดสอบโดยติดตั้งตัวอย่างไว้ที่ฝั่งหนึ่งของท่อนำคลื่นเสียง ส่วนอีกฝั่งหนึ่งติดตั้งแหล่งกำเนิดเสียง จากนั้นวัดความดันเสียงที่สองตำแหน่งบนท่อนำคลื่นเสียง แล้วคำนวณเป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในแต่ละความถี่ของวัสดุ (ASTM E1050-98, 1998) แผนภาพการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงด้วยท่อนำคลื่นเสียงแสดงในรูปที่ 2-9 และตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2-13



รูปที่ 2-9 แผนภาพการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงด้วยท่อนำคลื่นเสียง

ที่มา: (Çelikel และ Babaarstan, 2017)

ตารางที่ 2-13 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง		
	ความถี่ (เฮิรตซ์)		
	125	500	2,000
แผ่นไม้อัด	0.16	0.50	0.80
ปูนปลาสเตอร์หรือยิปซัม	0.30	0.50	0.55
ผนังอิฐที่ไม่ทาสี	0.02	0.03	0.05
ผ้า (เบา)	0.04	0.11	0.30
ผ้า (หนัก)	0.10	0.50	0.82
ผ้าสักหลาด	0.13	0.56	0.65
พรมคอนกรีต	0.01	0.02	0.02
พรมไม้	0.06	0.06	0.06
พรมปูพรม	0.11	0.37	0.27
แก้ว	0.04	0.05	0.05
หินอ่อน	0.01	0.01	0.02
ผนังหิน	0.35	0.63	0.83
ไม้อัด (จากไม้สน)	0.10	0.10	0.08

ดัดแปลงจาก: (คิวพินธุ์ ชูอินทร์, 2556)

### 2.8.1.2 การสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss)

คลื่นเสียงมีความสามารถในการทะลุผ่านเนื้อวัสดุใด ๆ ก็ตามที่มีรูได้ โดยในการเคลื่อนที่ของเสียงผ่านวัสดุนั้น จะมีการสูญเสียพลังงานเสียงส่วนหนึ่งในเนื้อวัสดุในรูปของความร้อนไหลเข้าไปหรือถูกดูดกลืนผ่านภายในเนื้อวัสดุ โดยการที่พลังงานเสียงจะสามารถเดินทางผ่านวัสดุได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมบัติการสะท้อนและการดูดกลืนเสียงของวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นกำแพง ส่วนพลังงานเสียงที่เหลือจะสามารถเดินทางต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าพลังงานเสียงจะถูกกลทอนจนสลายไปเอง รูปที่ 2-10 แสดงการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุ

ความเข้มเสียงที่สูญเสียการส่งผ่านทะลุวัสดุ (sound transmission loss) ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของระดับเสียงระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงและผู้รับเสียง โดยผิวที่ส่งผ่านและพื้นที่ที่มีการ

ดูดกลืนเสียงมีผลต่อการสะท้อนของเสียง (คิวพันธ์ุ ชูอินทร์, 2556) โดยการสูญเสียการส่งผ่านเสียงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (2.9)$$

โดยที่ TL คือ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล)

$L_1$  คือ ระดับความดันเสียงที่ส่งผ่านเข้าสู่ผิวของวัสดุ (เดซิเบล)

$L_2$  คือ ระดับความดันเสียงที่ผ่านออกจากผิวของวัสดุ (เดซิเบล)

S คือ พื้นที่ของวัสดุที่รับเสียงส่งผ่าน (ตารางเมตร)

A คือ ค่าการดูดกลืนเสียง (ซาบิน, sabine)

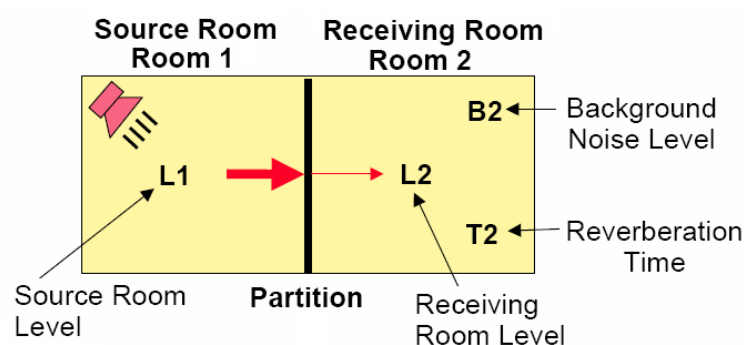
ค่าการดูดกลืนเสียง (A) นอกจากจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 แล้ว ยังสามารถคำนวณได้จากเวลาที่เสียงเดินทางและสะท้อนกลับหรือเวลากังวาน (reverberation time; RT) ดังสมการที่ 2.10

$$RT = 0.161 \frac{V}{A} \quad (2.10)$$

โดยที่ RT คือ เวลากังวาน (วินาที)

V คือ ปริมาตรของห้องทดสอบ (ลูกบาศก์เมตร)

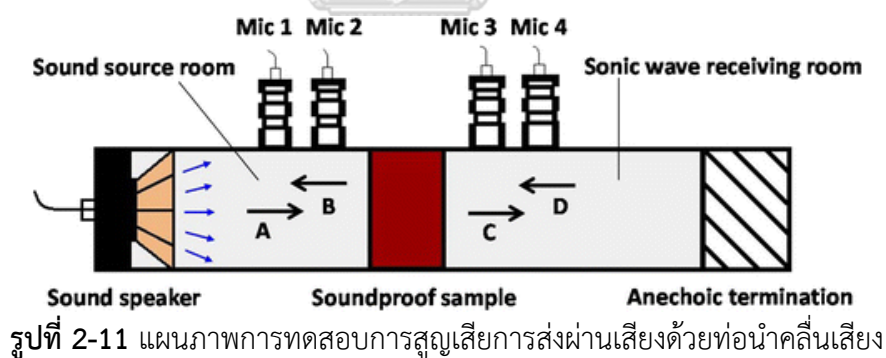
A คือ ค่าการดูดกลืนเสียง (ซาบิน, sabine)



รูปที่ 2-10 การทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุ

ที่มา: (วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์ และคณะ, 2560)

ปกติการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุในเชิงพาณิชย์จะทดสอบในห้องเสียงสะท้อน (reverberation room) เช่นเดียวกับกรณีของการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง แต่สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงจะทดสอบด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM E90 standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements ดังรูปที่ 2-10 แต่สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุที่เป็นตัวอย่างขนาดเล็กเพื่อการวิจัยสามารถทดสอบได้โดยใช้ท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube method) ตามมาตรฐาน ASTM E2611 standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method เช่นเดียวกับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง วิธีการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงด้วยวิธีตามมาตรฐาน ASTM E2611 เป็นการทดสอบโดยติดตั้งตัวอย่างระหว่างกลางท่อนำคลื่นเสียง ฝั่งหนึ่งของท่อนำคลื่นเสียงติดตั้งลำโพง ส่วนอีกฝั่งปิดด้วยวัสดุที่ไม่สะท้อนเสียง จากนั้นวัดความดันเสียงที่สี่ตำแหน่งบนท่อนำคลื่นเสียง แล้วคำนวณเป็นค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในแต่ละความถี่ของวัสดุ (ASTM E2611-09, 2009) แผนภาพการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงด้วยท่อนำคลื่นเสียงแสดงในรูปที่ 2-11 และตัวอย่างค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2-14



ที่มา: (Yang และ Tasi, 2016)

ตารางที่ 2-14 ตัวอย่างค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	ความหนา มิลลิเมตร	พื้นที่ผิว (กก./ตรม.)	การสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล)
คอนกรีตบล็อก	142.2	175.8	32
คอนกรีตมวลเบา	101.6	195.3	36
	152.4	293.0	39
คอนกรีตทรายกรวด	101.6	234.4	40
งานก่อคอนกรีตบล็อก	91.4	107.4	32
	142.2	161.1	36
งานก่ออิฐดินเหนียว	91.4	175.8	40
	142.2	273.4	47
ไม้สน	12.7	7.3	16
	50.8	30.3	23
ไม้สนเรดวูด	12.7	5.4	16
	50.8	21.0	23
ไม้ซีดาร์	12.7	5.4	15
	50.8	21.0	22
อลูมิเนียม	1.5	4.4	23
	6.4	17.6	27
เหล็กกล้า	0.8	6.4	15
	1.5	12.7	22

ดัดแปลงจาก: <http://www.allanblock.com/>

## 2.9 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนักและการชะละลาย

### 2.9.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) คือกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำตั้งแต่ 5 ขึ้นไป หรือคือธาตุที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำ 5 เท่า เป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ สำหรับเฝ้าระวังจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบด้วย ออกไซด์ของโลหะหลายชนิด เมื่อทดสอบการชะละลายพบว่าโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี (ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2560) ดังนั้นเพื่อให้การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นองค์ประกอบของวัสดุคอนกรีตเป็นไปด้วยความปลอดภัย จึงต้องให้ความสำคัญกับปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอยเป็นพิเศษ

ตามมาตรฐาน USEPA (USEPA, 2009) ได้กำหนดค่ามาตรฐานปริมาณความเป็นพิษของสารชนิดต่าง ๆ ที่ชะละลายด้วยวิธี USEPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่จำลองการชะละลายสารชนิดต่าง ๆ จากหลุมฝังกลบขยะ แต่สำหรับในประเทศไทยได้ใช้มาตรฐานการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และเปรียบเทียบค่ามาตรฐานน้ำสกัด (Soluble Threshold Limit Concentration; STLC) เพื่อประเมินความเป็นของเสียอันตราย แต่ในทางปฏิบัติทั้งสองมาตรฐานนี้ได้กำหนดค่ามาตรฐานปริมาณสารชนิดต่าง ๆ ที่พบในน้ำชะละลายมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยได้ นอกจากนี้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) ยังได้ระบุค่ามาตรฐานสำหรับความเข้มข้นทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ (Total Threshold Limit Concentration; TTLC) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการสกัดเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (USEPA, 2007) ได้ ค่ามาตรฐานของสารชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเถ้าลอยตามมาตรฐาน USEPA และกระทรวงอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 2-15

ตารางที่ 2-15 ค่ามาตรฐานของสารชนิดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำ

ธาตุ	มาตรฐานน้ำชะละลาย	มาตรฐานน้ำชะละลาย	มาตรฐานความเข้มข้นทั้งหมด
	(TCLP)	(STLC)	(TTLC)
	(มิลลิกรัม/ลิตร)	(มิลลิกรัม/ลิตร)	(มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
	(USEPA, 2009)	(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)	(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)
Zn	-	200.0	5,000
Ba	100.0	100.0	10,000
Ag	5.0	5.0	500
As	5.0	5.0	500
Hg	0.2	0.2	20
Se	1.0	1.0	100
Cr	5.0	5.0	2,500
Cd	1.0	1.0	100
Pb	5.0	5.0	1,000

### 2.9.2 การชะละลาย

การทดสอบการชะละลาย ประกอบด้วยวัสดุที่ถูกการชะละลายได้ 2 ชนิด ดังนี้

- 1) วัสดุที่เป็นก้อนแข็ง (monolithic) ใช้กลไกการแพร่ของสารชะละลายเป็นตัวควบคุมการชะละลาย เช่น ผลิตภัณฑ์คอนกรีต
- 2) วัสดุที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ (granular) ใช้กลไกการไหลผ่านของสารชะละลายเป็นตัวควบคุมการชะละลาย เช่น ฝ้ายลอย

กลไกควบคุมการชะละลายของสารประกอบจากวัสดุลงสู่น้ำชะละลาย มี 2 กระบวนการ ดังนี้

- 1) กระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกตัวของธาตุ การดูดซับ และการมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้
- 2) กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การพา (advection) การชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว และการแพร่



ในการทดสอบการชะละลาย โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

- 1) static extraction tests คือ การทดสอบที่กำหนดปริมาตรของสารชะละลาย เดียวตลอดช่วงการทดสอบ
- 2) dynamic extraction tests คือ การทดสอบที่เปลี่ยนสารชะละลายใหม่ตลอดช่วงการทดสอบ

สำหรับการทดสอบการชะละลายในกลุ่ม static extraction tests แบบเขย่า (agitated) จะเป็นการที่ผสมวัสดุและสารชะละลายเข้าด้วยกัน มีผลทำให้การชะละลายเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น ในบางกรณีจะต้องมีการลดขนาดของวัสดุเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้เข้าสู่สภาวะคงที่สั้นลง ในการทดสอบแบบเขย่าอาจจะทำให้ผลการทดสอบมีค่ามากเกินไปจนความเป็นจริงได้ในการประเมินการถูกชะละลายของสารองค์ประกอบต่าง ๆ เนื่องจากการทดสอบนี้จะวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและการชะละลายมากกว่าสมบัติทางกายภาพและกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย ตัวอย่างของการทดสอบสมบัติทางเคมีของน้ำชะละลายแบบเขย่านี้ เช่น Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Waste Extraction Test (WET) เป็นต้น

## 2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 ข้อมูลการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอย

เถ้าลอยทั้งจากกระบวนการเผาขยะชุมชนและจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อนำพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นมาผลิตกระแสไฟฟ้า ต่างก็มีโลหะหนักในแต่ละชนิดเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจากการนำวัสดุที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยไปใช้งาน จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักทั้งตั้งแต่เป็นวัตถุดิบจนกระทั่งการนำไปสู่การกลายเป็นผลิตภัณฑ์

มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเกี่ยวกับโลหะหนักในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2007 มีการศึกษาการเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักในระยะสั้นและระยะยาวของผลิตภัณฑ์ก่อนหล่อแข็งจากเตาไฟฟ้า (Pereira และคณะ, 2007) โดยมีเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นส่วนผสมในการทำเสถียร ร่วมกับปูนขาว (lime) หินปูน (dolomitic limestone) ตะกรันเตาถลุง (blast furnace slag) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) พบว่ามีโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr)

มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด และในปี 2017 ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยจากถ่านหินประเภทบิทูมินัส (bituminous) และลิกไนต์ (lignite) ด้วยวิธี Toxic Characteristic Leachability Procedure (TCLP) รวมถึงศึกษาสมบัติการชะละลายของทั้งการชะละลายของทั้งคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินเป็นองค์ประกอบ (ปณิธิ เปรมสัจธรรม, 2560) พบว่าการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอยมีโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก (Arsenic; As) โครเมียม (Chromium; Cr) ตะกั่ว (Lead; Pb) และสังกะสี (Zinc; Zn) นอกจากนี้โดยส่วนใหญ่ถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด

ในขณะที่ยังงานวิจัยเกี่ยวกับโลหะหนักในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาขยะชุมชนก็มีการศึกษาไว้มากเช่นเดียวกัน ที่สำคัญคือการศึกษาในปี 2009 โดยศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักจากคอนกรีตที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ (Shi และ Kan, 2009) โดยพบว่ามีโลหะหนักในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ 5 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zinc; Zn) ตะกั่ว (Lead; Pb) ทองแดง (Copper; Cu) แคดเมียม (Cadmium; Cd) และโครเมียม (Chromium; Cr) แต่โลหะหนักที่พบดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดตามมาตรฐานระดับชาติของประเทศจีน (National Standard of China)

ในช่วงปี 2017 ยังคงมีการศึกษาเกี่ยวกับโลหะหนักในเถ้าลอยจากกระบวนการเผาขยะชุมชนที่น่าสนใจ โดยมีการศึกษาในเชิงเคมีและเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (Weibel และคณะ, 2017) โดยโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ยังคงพบอยู่คือ สังกะสี (Zinc; Zn) ตะกั่ว (Lead; Pb) ทองแดง (Copper; Cu) และแคดเมียม (Cadmium; Cd) นอกจากนี้ยังนำไปสู่การประเมินการกำจัดโลหะหนักโดยใช้การชะละลายด้วยกรดร่วมกับสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide;  $H_2O_2$ ) พบว่ามีความเหมาะสมทั้งในด้านการลดปริมาณโลหะหนักที่สิ่งแวดล้อมจะต้องรองรับและในด้านความคุ้มค่าในการลดต้นทุนของการกำจัดโลหะหนัก และในช่วงเวลาเดียวกัน มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (Lederer, Trinkel และ Fellner, 2017) ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลและกรณีศึกษาในสาธารณรัฐออสเตรีย ร่วมกับการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (material flow analysis) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มการใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะขึ้นอีกร้อยละ 0.9 จะทำให้ปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นดังนี้ แคดเมียม เพิ่มขึ้นร้อยละ 310 ในขณะที่ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี

เพิ่มขึ้นร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 170 อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นนี้ก็ยังคงไม่เกินมาตรฐานกำหนดของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ของสาธารณรัฐออสเตรเลีย

### 2.10.2 ข้อมูลปริมาณกัมมันตภาพรังสีของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากเถ้าลอย

มีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในเถ้าลอยและเถ้าหนักจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Ningnoi, 1992) พบว่าในถ่านหินลิกไนต์มี ยูเรเนียม-238 ทอเรียม-232 และโปแตสเซียม-40 อยู่ระหว่าง 5.0 – 36.5 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม 7.6 – 61.2 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม และ 24 – 687 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยพบปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์นี้ ในปี 2005 มีการศึกษาปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ (Golewski, 2015) โดยได้ทำการศึกษา โปแตสเซียม-40 ยูเรเนียม-238 เรเดียม-226 เรดอน-222 และ ทอเรียม-232 พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตแล้ว ไม่พบปริมาณกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบโปแตสเซียม-40 471.12 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม เรเดียม-226 16.90 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม และทอเรียม-232 13.35 เบเคอเรลต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณกัมมันตรังสีในระดับที่ไม่ถือว่าเป็นอันตราย

### 2.10.3 ข้อมูลการประยุกต์ใช้เถ้าลอยกับงานวิศวกรรม

#### 2.10.3.1 ข้อมูลการประยุกต์ใช้คอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน

นอกจากสมบัติในเชิงเคมี และเชิงกายภาพแล้ว หนึ่งในสมบัติด้านการใช้งานเชิงวิศวกรรมที่น่าสนใจของวัสดุคอนกรีตคือสมบัติด้านการนำความร้อน ซึ่งจะมีผลต่อการเลือกประยุกต์ใช้วัสดุคอนกรีตเพื่อเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน โดยทั่วไปสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุจะพิจารณาจากค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) โดยวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงจะหมายความว่าวัสดุชนิดนั้นยอมให้ความร้อนผ่านชั้นวัสดุได้ง่าย ซึ่งถือว่าเป็นสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน ในขณะที่วัสดุซึ่งมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำจะหมายความว่าวัสดุชนิดนั้นยอมให้ความร้อนผ่านชั้นวัสดุได้ยาก ถือเป็นสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน

สมบัติด้านการนำความร้อนเป็นสมบัติที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของคอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตที่ผลิตจากวัสดุที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปในงานคอนกรีต หรือคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่หรือมีส่วนประกอบจากของเสียอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (fly ash) และกากคอนกรีต (concrete waste) เป็นต้น

ในปี 2015 ได้มีการศึกษาสมบัติของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (self-compacting concrete) ที่ใช้เศษคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป (precast) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตคอนกรีตเป็นมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycled aggregates) (Fenollera และคณะ, 2015) พบว่าการเพิ่มองค์ประกอบของมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 50 ทำให้ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ลดลง 15% และในช่วงเวลาเดียวกันนี้ได้มีการศึกษาฉนวนกันความร้อนนาโนคอนกรีตที่มีการอัตราส่วนของมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่แตกต่างกันในเชิงจุลสัณฐานวิทยา (micro morphology) (Zhao และคณะ, 2015) พบว่าการใช้มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ทำให้เกิดการแทนที่ช่องอากาศ (air pores) ในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้สภาพนำความร้อนมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการศึกษาขนาดแฟร็กทัลในระดับจุลภาค (macro fractal dimension) ของช่องว่างจะช่วยให้การอธิบายความแปรผันของสภาพนำความร้อนที่มีต่อคอนกรีตอีกด้วย นอกจากนี้ในปีเดียวกันได้มีการศึกษาแผ่นกระดานซึ่งมีองค์ประกอบของยิปซัมและเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหิน (Leiva และคณะ, 2015) โดยมีองค์ประกอบของเถ้าลอยร้อยละ 60 โดยมวล ยิปซัมร้อยละ 30 โดยมวล และอื่น ๆ โดยพบว่านอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำแล้ว ยังได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีสมบัติความต้านทานอัคคีภัย (fire resistance) อีกด้วย

ในปี 2017 ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอย (fly ash) จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หินพัมมิช (pumice) หินเพอร์ไลต์ (perlite) แบไรต์ (barite) คอนกรีต และยิปซัม (gypsum) ร่วมกับเส้นใยพิวหัวหอม และเปลือกถั่วลิสง เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุฉนวน (Binici และ Aksogan, 2017) ผลการวิจัยในด้านสมบัติเชิงความร้อนพบว่า วัสดุฉนวนคอนกรีตที่มีแบไรต์ (barite) หินพัมมิช (pumice) หินเพอร์ไลต์ (perlite) พิวหัวหอม และเปลือกถั่วลิสง เป็นส่วนผสมมีผลในการปรับปรุงค่าสภาพนำความร้อนให้ดีขึ้นจนมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวในสำนักงาน ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของคอนกรีตที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2-

ตารางที่ 2-16 ค่าสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) ของคอนกรีตที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน

องค์ประกอบ		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)	อ้างอิง	
ร้อยละ RA	ร้อยละเถ้าลอย				
100	0	30	0.616	(Fenollera และ คณะ, 2015)	
50	0		0.610		
20	0		0.728		
0	0		0.692		
100	0	25	0.639		
50	0		0.623		
20	0		0.730		
0	0		0.707		
100	0	20	0.655		
50	0		0.659		
20	0		0.751		
0	0		0.736		
0	60	700	0.25		(Leiva และคณะ, 2015)
		500	0.23		
		200	0.23		
		40	0.33		
		30	0.32		
0	50	22	0.081	(Binici และ Aksogan, 2017)	
	25		0.09		
	15		0.13		

### 2.10.3.2 ข้อมูลการประยุกต์ใช้คอนกรีตเพื่อใช้เป็นกำแพงกันเสียง (noise barrier)

การปรับปรุงสมบัติเชิงเสียงของคอนกรีตเป็นหนึ่งในงานเชิงวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจ เพราะคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย เช่น การใช้คอนกรีตที่ปรับปรุงสมบัติเชิงเสียงแล้วสำหรับการก่อสร้างอาคารที่ต้องการความเงียบสงบหรือต้องการระดับความกังวาน

ภายในห้องที่สอดคล้องกับประโยชน์การใช้งานของห้อง และนอกจากนี้มีการใช้คอนกรีตเป็นกำแพงกั้นเสียง (noise barriers) สำหรับทางด่วน โดยคอนกรีตที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันย่อมมีสมบัติเชิงเสียงที่แตกต่างกัน สำหรับสมบัติเชิงเสียงที่นิยมใช้ทดสอบ โดยเฉพาะสำหรับกำแพงกั้นเสียงคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) และค่าการสูญเสียพลังงานเสียงเมื่อส่งผ่านวัสดุ (transmission loss)

การศึกษาสมบัติเชิงเสียงของคอนกรีตในรูปแบบต่าง ๆ ยังคงมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ได้มีการศึกษาคอนกรีตพูนจีโอพอลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นองค์ประกอบหลัก ผสมกับของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน (construction and demolition waste) ซึ่งใช้เป็นมวลรวม (aggregate) ในกระบวนการคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ เพื่อทำเป็นกำแพงกั้นเสียง (noise barriers) สำหรับติดตั้งบนถนน (C. Arenas และคณะ, 2017) จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficients) โดยใช้วิธีหอนำคลื่นเสียง (impedance tube method) พบว่าคอนกรีตที่ใช้ของเสียจากการก่อสร้างเป็นมวลรวมมีสมบัติที่ดีกว่าการใช้หินแกรนิตบด (crushed-granite) ทั่วไป แต่พบว่าปริมาณของเถ้าลอยในวัสดุคอนกรีตจีโอพอลิเมอร์ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงเสียง โดยคาดว่าการศึกษาที่วัสดุมีสมบัติเชิงเสียงที่ดีเป็นผลมาจากความซับซ้อนของโครงสร้างภายใน และปริมาณช่องว่างภายในเนื้อวัสดุที่เพิ่มขึ้น ในเวลาเดียวกันนี้ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอย (fly ash) จากการเผ่าถ่านหินลิกไนต์ หินพัมมิช (pumice) หินเพอร์ไลต์ (perlite) แบไรต์ (barite) คอนกรีต และยิปซัม (gypsum) ร่วมกับเส้นใยพิวหัวหอม และเปลือกถั่วลิสง เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุฉนวน (Binici และ Aksogan, 2017) ในด้านสมบัติเชิงเสียง ได้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic sound penetration coefficient) พบว่าวัสดุที่ผสมเถ้าลอยกับซีเมนต์ และแบไรต์ ไม่สามารถดูดกลืนเสียงในขณะที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวอย่างได้ คาดว่าเป็นเพราะการผสมด้วยวัสดุดังกล่าวส่งผลให้มีอัตราส่วนของช่องว่างในเนื้อวัสดุ (void ratios) ที่ต่ำ ในขณะที่วัสดุที่ผสมหินพัมมิช และหินเพอร์ไลต์ สามารถดูดกลืนเสียงในขณะที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวอย่างได้ดี กล่าวคือมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของคลื่นเสียงความถี่สูงที่ต่ำ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ร่วมกับเถ้าลอย เพื่อทดสอบสมบัติเชิงเสียง โดยมีการศึกษาวัสดุดูดกลืนเสียงแบบรูพรุนโดยใช้ตะกรันเหล็ก (steel slag) และเถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 เป็นวัตถุดิบหลัก (Sun และ Guo, 2015) ในด้านสมบัติเชิงเสียงพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุดูดกลืนเสียงคือร้อยละ 50 โดยมวล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient) เท่ากับ 0.50 แต่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของเถ้าลอย และการลดตัวสร้างรูพรุน (pore former) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงลดลง นอกจากนี้ได้ระบุว่าการเพิ่ม

ความเป็นรูปพรุนให้กับเนื้อวัสดุจะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านเสียง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันได้มีการศึกษา แผ่นกระดานที่มีองค์ประกอบของยิปซัมและเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F จากกระบวนการเผาถ่านหิน (Leiva และคณะ, 2015) จากการทดสอบสมบัติเชิงเสียงโดยใช้วิธีท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube method) ตาม ISO 10534-2 พบว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 โดยมวล จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficients) เท่ากับ 0.3 และ 0.8 สำหรับตัวอย่างที่มีความหนา 2 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ระบุว่าวัสดุที่มีสมบัติเชิงเสียงที่ดีจะต้องยอมให้คลื่นเสียงผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุโดยง่าย และเกิดการแพร่อยู่ภายในช่องว่างของเนื้อวัสดุ โดยขนาดของรูปพรุนในเนื้อวัสดุที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นเสียงจะทำให้สามารถดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่นั้นได้มาก

## 2.11 เป้าหมายของงานวิจัย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษามากมายที่นำเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และกากคอนกรีตที่เป็นของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง (construction and demolition waste) นำมาทดสอบสมบัติในด้านต่าง ๆ รวมถึงการนำไปใช้เพื่อประโยชน์ต่าง ๆ ในเชิงวิศวกรรม และถึงแม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash) เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินทั้งในด้านสมบัติเชิงกายภาพ เชิงเคมี รวมถึงในแง่การใช้ประโยชน์เชิงวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ชนิดและแหล่งที่มาของเถ้าลอยมีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งเถ้าลอยที่มีที่มาแตกต่างกันย่อมมีสมบัติในด้านต่าง ๆ แตกต่างกัน โดยเฉพาะเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน อีกทั้งการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการใช้ประโยชน์ของกากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตยังมีอยู่น้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash) เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินซึ่งได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์ (lignite) และถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) ในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในมอร์ตาร์ โดยมีศึกษาการชะละลายโลหะหนักทั้งในเถ้าลอยที่นำมาใช้และมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในการนำวัสดุไปใช้ประโยชน์ และนอกจากนี้มีการศึกษาสมบัติของกากคอนกรีตในการแทนที่มวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์เป็นกรณีต่างหาก จากนั้นมีการศึกษาสมบัติที่มีผลต่อการใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรม ได้แก่ กำลังรับแรงอัด (compressive strength) สมบัติเชิงความร้อน (thermal properties) และสมบัติเชิงเสียง (acoustical properties) ของมอร์ตาร์ เพื่อนำไปสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิดและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เพื่อผลิตเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียงต่อไป

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อาคารปฏิบัติการรวม และห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นสถานที่หลัก โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัยดังนี้

#### 3.1 แผนการวิจัย

##### 3.1.1 การวางแผนการทดลอง

- 3.1.1.1 เตรียมอุปกรณ์ สารเคมี รวมถึงเก้าอี้และกากคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง
- 3.1.1.2 ศึกษาสมบัติทางด้านเคมี และทางด้านกายภาพของเก้าอี้และกากคอนกรีต
- 3.1.1.3 ศึกษาปริมาณโลหะหนักของเก้าอี้แต่ละชนิด
- 3.1.1.4 ดำเนินการขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ โดยมีเก้าอี้และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ
- 3.1.1.5 ศึกษากำลังรับแรงอัด (compressive strength) ของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบ และมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ
- 3.1.1.6 ศึกษาค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบ และมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ
- 3.1.1.7 ศึกษาสมบัติเชิงเสียง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบ และมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ
- 3.1.1.8 ศึกษาปริมาณโลหะหนักของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบ
- 3.1.1.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้เก้าอี้ และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์เพื่อใช้ศึกษาสมบัติในการใช้ประโยชน์เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนและกำแพงกันเสียง สำหรับกรณีของมอร์ตาร์ที่มีองค์ประกอบของเก้าอี้จะมีการศึกษาการชะละลายโลหะหนักของเก้าอี้และมอร์ตาร์ด้วย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้



**ขั้นตอนที่ 1** ศึกษาสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพของถ้ำลอยจากถ่านหินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ และ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส เปรียบเทียบกับถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในมอร์ตาร์ สำหรับกากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตได้ดำเนินการทดสอบสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากคอนกรีตเพื่อแทนที่มวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ สมบัติทางด้านเคมี และสมบัติทางด้านกายภาพที่ดำเนินการทดสอบ มีดังต่อไปนี้

1) การศึกษาสมบัติทางด้านเคมี

- ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี
- ทดสอบหาปริมาณความชื้น

2) การศึกษาสมบัติทางด้านกายภาพ

- ศึกษาความถ่วงจำเพาะ
- ศึกษาลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวอนุภาค
- ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

**ขั้นตอนที่ 2** ศึกษาการชะละลายโลหะหนักของถ้ำลอยจากถ่านหินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ และ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส เปรียบเทียบกับถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเบื้องต้น โดยใช้กรดอะซิติก ด้วยวิธีตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 1311: TCLP (USEPA, 1992) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ด้วยวิธีตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 1312: SPLP (USEPA, 1994) กรดซिटริกด้วยวิธีตามมาตรฐาน Waste Extraction Test (WET) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และน้ำปราศจากไอออน (deionized water) เป็นสารเคมีในการชะละลาย

**ขั้นตอนที่ 3** ดำเนินการขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยมีถ้ำลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

- 1) กรณีการขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้ถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน
- 2) กรณีการขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้กากคอนกรีต แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

**ขั้นตอนที่ 4** ศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทั้งกรณีที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ และกรณีที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

**ขั้นตอนที่ 5** ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมของมอร์ตาร์ ทั้ง 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียง เพื่อศึกษาความสามารถในการนำวัสดุนี้ไปใช้ประโยชน์เป็นฉนวนกันความร้อน และกำแพงกันเสียงตามลำดับ

**ขั้นตอนที่ 6** ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักของมอร์ตาร์ สำหรับกรณีที่ขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามวิธีวิธีการทดสอบกำหนด

### 3.1.3 ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาในแต่ละขั้นตอนการทดลอง สำหรับขั้นตอนที่ 1: ศึกษาความแตกต่างระหว่างเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และเถ้าลอยจากถ่านหินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ รวมถึงศึกษาสมบัติของกากคอนกรีตด้วย แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง เถ้าลอย กากคอนกรีต	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยเตาเผาขยะชุมชน กากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีต
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
-	-
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
สมบัติของเถ้าลอยและกากคอนกรีต สมบัติทางด้านเคมี สมบัติทางด้านกายภาพ	องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ รูปร่าง และพื้นผิวอนุภาค การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาในแต่ละขั้นตอนการทดลอง สำหรับขั้นตอนที่ 2: การศึกษาการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยจากถ่านหินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
เถ้าลอยที่ใช้ในการทดลอง แหล่งที่มาของเถ้าลอย	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยเตาเผาขยะชุมชน
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อของเหลวที่ใช้ชะละลาย อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อกรดอะซิติก อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำฝนกรดสังเคราะห์ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อกรดซัลฟูริก อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำปราศจากไอออน การหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุน (rotary agitation apparatus) ความเร็วที่ใช้ในการหมุน อุณหภูมิในการการหมุน เวลาในการการหมุน การกรอง ขนาดของรูกรองของแผ่นกรอง	1:20 (TCLP <sup>1</sup> ) 1:20 (SPLP <sup>2</sup> ) 1:10 (WET <sup>3</sup> ) 1:20 30 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง 18 ชั่วโมง (TCLP, SPLP), 48 ชั่วโมง (WET) 0.6 - 0.8 ไมครอน (TCLP, SPLP), 0.45 ไมครอน (WET)
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำชะละลายหลังการทดลอง	ปริมาณโลหะหนัก

1. มาตรฐาน USEPA SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992)

2. มาตรฐาน USEPA SW-846 Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994)

3. มาตรฐาน Waste Extraction Test (WET) ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาในแต่ละขั้นตอนการทดลอง สำหรับขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยมีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัด สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียง ของมอร์ตาร์ทั้ง 2 กรณี แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
<p><u>กรณี 1:</u> การขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน</p> <p>แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในตัวอย่างที่ 1            แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในตัวอย่างที่ 2            แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในตัวอย่างที่ 3            แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในตัวอย่างที่ 4            แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในตัวอย่างที่ 5</p>	<p>เถ้าลอย 0% ปูนซีเมนต์ 100%            เถ้าลอย 25% ปูนซีเมนต์ 75%            เถ้าลอย 50% ปูนซีเมนต์ 50%            เถ้าลอย 75% ปูนซีเมนต์ 25%            เถ้าลอย 100% ปูนซีเมนต์ 0%            (อัตราส่วนโดยมวลของน้ำหนักแห้ง)</p>
<p><u>กรณี 2:</u> การขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้กากคอนกรีตเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน</p> <p>แทนที่ด้วยกากคอนกรีตในตัวอย่างที่ 1            แทนที่ด้วยกากคอนกรีตในตัวอย่างที่ 2            แทนที่ด้วยกากคอนกรีตในตัวอย่างที่ 3            แทนที่ด้วยกากคอนกรีตในตัวอย่างที่ 4            แทนที่ด้วยกากคอนกรีตในตัวอย่างที่ 5</p>	<p>กากคอนกรีต 0% มวลรวมละเอียด 100%            กากคอนกรีต 25% มวลรวมละเอียด 75%            กากคอนกรีต 50% มวลรวมละเอียด 50%            กากคอนกรีต 75% มวลรวมละเอียด 25%            กากคอนกรีต 100% มวลรวมละเอียด 0%            (อัตราส่วนโดยมวลของน้ำหนักแห้ง)</p>
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
<p>การบ่มผลิตภัณฑ์คอนกรีต            สมบัติเชิงความร้อน</p>	<p>บ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน            อุณหภูมิห้อง</p>

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 (ต่อ)

ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
สมบัติด้านการรับแรง	กำลังรับแรงอัด
สมบัติเชิงความร้อน	ค่าสภาพนำความร้อน
สมบัติเชิงเสียง	ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง

ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาในแต่ละขั้นตอนการทดลอง สำหรับขั้นตอนที่ 6 การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักของมอร์ตาร์ สำหรับกรณีที่ใช้รูปมอร์ตาร์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 6

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
ผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์ ชนิดของเถ้าลอยที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุ คอนกรีต	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยเตาเผาขยะชุมชน
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อของเหลวที่ใช้ชะละลาย อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อกรดอะซิติก อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำฝนกรดสังเคราะห์ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อกรดซัลฟิวริก อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำปราศจากไอออน	1:20 (TCLP <sup>1</sup> ) 1:20 (SPLP <sup>2</sup> ) 1:10 (WET <sup>3</sup> ) 1:20

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 6 (ต่อ)

ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
การหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุน (rotary agitation apparatus) ความเร็วที่ใช้ในการหมุน อุณหภูมิในการการหมุน เวลาในการการหมุน การกรอง เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรองของแผ่นกรองใยแก้ว	30 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง 18 ชั่วโมง (TCLP, SPLP), 48 ชั่วโมง (WET) 0.6 - 0.8 ไมครอน (TCLP, SPLP), 0.45 ไมครอน (WET)
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำชะละลายหลังการทดลอง	ปริมาณโลหะหนัก

1. มาตรฐาน EPA SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992)
2. มาตรฐาน EPA SW-846 Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994)
3. มาตรฐาน Waste Extraction Test (WET) ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

### 3.2 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง ของบริษัท Ohaus รุ่น Adventurer ARC120
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น Dragon 204
- ขวดแก้วใสหาคความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน ASTM C188 (ASTM C188-95(2003), 2003)
- เครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ของบริษัท Biosan รุ่น Multi RS-60
- แผ่นกรองใยแก้วขนาดรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน ของบริษัท Whatman ชนิด GF/F
- ไนลอนไซริงค์ฟิวเตอร์ (nylon syringe filter) ขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน ของบริษัท Filtrex
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของบริษัท Ohaus รุ่น Starter 300
- ตะแกรงร่อน (seive) เบอร์ 1½ เบอร์ 3/4 เบอร์ 3/8 เบอร์ 3/8 เบอร์ 4 เบอร์ 8 เบอร์ 35 เบอร์ 50 และเบอร์ 80 ของบริษัท Advantech
- แบบหลอมออร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาด 10 x 10 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- แบบหลอมออร์ตาร์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร

#### 3.2.2 วัสดุดิบและสารเคมี

- ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ (lignite) ที่ได้รับจากบริษัทแห่งหนึ่งในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ 2561
- ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) ที่ได้รับจากบริษัทแห่งหนึ่งในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ 2561
- ถ้ำล่อยจากเตาเผาขยะชุมชน (municipal solid waste incineration fly ash) ที่ได้รับจากโรงเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทย ในช่วงเดือน พฤษภาคม 2561
- กากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตแห่งหนึ่ง ที่ได้รับในช่วงเดือน มกราคม 2561
- ทรายละเอียดซีแพค สำหรับงานฉาบ ตกแต่ง

- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- กรดอะซิติก (acetic acid glacial;  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ของบริษัท QRèC CAS: 64-19-7
- กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 98 % ของบริษัท QRèC CAS: 7664-93-9
- กรดไนตริก (nitric acid;  $\text{HNO}_3$ ) 65 % ของบริษัท Carlo Erba Reagents CAS: 7697-37-2
- กรดซิตริก (citric acid;  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) เตรียมจาก กรดซิตริกโมโนไฮเดรต (citric acid monohydrate;  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 99.5 – 102 % ของบริษัท Loba Chemie CAS: 5949-29-1
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของบริษัท Ajax Finechem CAS: 1310-73-2
- น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- น้ำมันก๊าด (kerosene)

### 3.2.3 เครื่องมือทดสอบและวิเคราะห์ผล

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-IT300
- เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence spectrometry; XRF) ของบริษัท Bruker รุ่น S8 Tiger
- เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ของบริษัท Bruker รุ่น D8-Discover
- เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size analyzer) ของบริษัท MALVERN รุ่น Mastersizer 3000
- เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP)
- เครื่องย่อยสลายสาร (microwave digestion)
- เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (compression machine) Amsler 30 ton
- เครื่องมือทดสอบสภาพนำความร้อน (thermal conductivity tester) ของบริษัท EKO Instruments รุ่น C074-200
- ท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube) และชุดทดสอบสมบัติเชิงเสียงของบริษัท Geonoise



### 3.3 การเตรียมสารเคมีในการชะละลาย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดอะซิติก

กรดอะซิติกสำหรับใช้เป็นสารชะละลายตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) สามารถเตรียมได้โดยเริ่มจากการวัดค่าพีเอชของสารละลายกรดอะซิติก (acetic acid) ด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH meter) จากนั้นทำการปรับค่าพีเอชด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำชะละลายมีค่าเท่ากับ  $2.88 \pm 0.05$

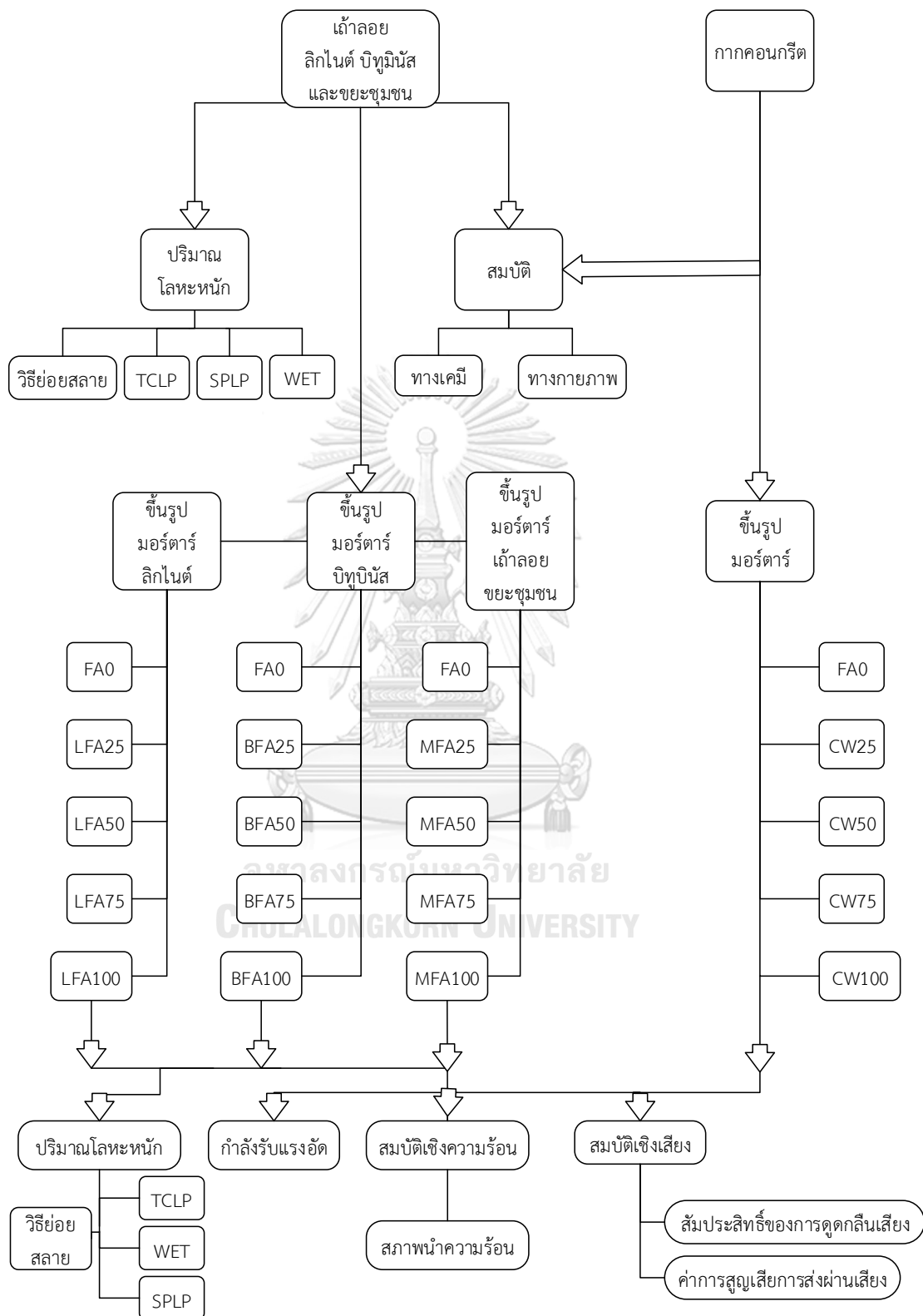
#### 3.3.2 การเตรียมสารละลายฝนกรดสังเคราะห์

สารละลายฝนกรดสังเคราะห์สำหรับใช้เป็นสารชะละลายตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) สามารถเตรียมได้โดยการนำน้ำปราศจากไอออนผสมสารละลายกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid;  $H_2SO_4$ ) และกรดไนตริก (nitric acid;  $HNO_3$ ) ในสัดส่วน 60 ต่อ 40 โดยน้ำหนัก จนกระทั่งค่าพีเอชของสารละลายผสมมีเท่ากับ  $4.20 \pm 0.05$

#### 3.3.3 การเตรียมสารละลายกรดซิตริก

กรดซิตริกสำหรับใช้เป็นสารชะละลายตามมาตรฐาน Waste Extraction Test (WET) ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) สามารถเตรียมได้โดยเริ่มจากการวัดค่าพีเอชของกรดซิตริก (citric acid) ด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH meter) จากนั้นทำการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จนกระทั่งค่าพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ 5.0

3.4 แผนการทดลอง



คำอธิบายอักษรย่อ

LFA = lignite fly ash

BFA = bituminous fly ash

MFA = municipal solid waste incineration fly ash

CW = concrete waste

### 3.5 การดำเนินการทดลอง

#### 3.5.1 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของแก๊สลอยและกากคอนกรีต

##### 3.5.1.1 สมบัติทางด้านเคมี

**3.5.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมี:** การหาองค์ประกอบทางเคมีสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence spectrometry; XRF) ซึ่งเป็นการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบยังตัวอย่าง เมื่อธาตุในตัวอย่างดูดกลืนรังสีเอ็กซ์จะเกิดการคายพลังงานเฉพาะ ที่แสดงถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง โดยทำการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.1.1.2 ปริมาณความชื้น:** สามารถทดสอบได้โดยการนำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเปรียบเทียบน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการอบ

##### 3.5.1.2 สมบัติทางด้านกายภาพ

**3.5.1.2.1 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ:** สามารถทดสอบได้โดยการนำตัวอย่างปริมาณ 45 - 50 กรัม บรรจุลงในขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำมันก๊าด (kerosene) ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เติมน้ำมันก๊าดลงในขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier Flask) จนระดับน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างตำแหน่ง 0 และ 1 มิลลิลิตร บนขีดบอกปริมาตร
2. นำขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะที่บรรจุน้ำมันก๊าดใส่ไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิมียุ่ค่าคงที่ จากนั้นบันทึกปริมาตรของน้ำมันก๊าดบนขีดบอกปริมาตร ( $V_1$ ) และน้ำหนักของน้ำมันก๊าดในขวด ( $W_1$ )
3. เติมนูนซีเมนต์หรือแก๊สลอยตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงในขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะที่บรรจุน้ำมันก๊าดอยู่ โดยเติมตัวอย่างให้ระดับน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่างตำแหน่ง 18 และ 24 มิลลิลิตร บนขีดบอกปริมาตร
4. ปรับอุณหภูมิของขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะที่บรรจุน้ำมันก๊าดและตัวอย่างจนมีอุณหภูมิเท่ากับที่วัดได้ในขั้นตอนที่ 2 จากนั้นบันทึกปริมาตรของน้ำมันก๊าดบนขีดบอกปริมาตร ( $V_2$ ) และน้ำหนักของน้ำมันก๊าดผสมตัวอย่างในขวด ( $W_2$ )
5. คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดังสมการที่ 3.1

$$SG = \frac{W_2 - W_1}{(V_2 - V_1) \times \rho_{w(at4^\circ C)}} \quad (3.1)$$

โดยที่ SG คือ ความถ่วงจำเพาะ

$W_1$   $W_2$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

$V_1$   $V_2$  คือ ปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่ถูกแทนที่ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\rho_{w(at4^\circ C)}$  คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

(1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

**3.5.1.2.2 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวอนุภาค:** สามารถทดสอบได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) โดยทำการทดลองที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.1.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค:** สามารถทดสอบได้ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size analyzer) โดยใช้น้ำ (water) เป็นตัวกลางในการทดสอบ การทดสอบดำเนินการที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.2 การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักของเถ้าลอย

การทดสอบหาโลหะหนักของเถ้าลอยในที่นี้จะทดสอบความสามารถในการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

#### 3.5.2.1 การย่อยสลายเถ้าลอยด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ

การย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (USEPA, 2007) นี้ใช้กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกในการสกัด เพื่อหาปริมาณโลหะหนักเสมือนทั้งหมดในเถ้าลอย (pseudo-total concentration) กล่าวคือ วิธีการนี้จะไม่สามารถย่อยสลายประกอบบางชนิดเช่น ซิลิกา ( $SiO_2$ ) ได้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้กรดไฮโดรฟลูออริกหรือกรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid; HF) ที่มีความอันตรายสูงต่อผู้ใช้งานและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่ใช้ในการ

สก็ต (Leelarungroj, 2015) การย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 3051A ได้ดำเนินการทดลองที่สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างแฉ่ำลอยปริมาณ 0.5 กรัม บรรจุลงในกระบอกทดลอง
2. เติมกรดไนตริก (nitric acid;  $\text{HNO}_3$ ) ปริมาณ  $9 \pm 0.1$  มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid;  $\text{HCl}$ ) ปริมาณ  $3 \pm 0.1$  มิลลิลิตร ลงในกระบอกทดลอง แล้วปิดฝาในแน่นหนา
3. นำกระบอกทดลองติดตั้งในเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟอย่างแน่นหนา ตั้งอุณหภูมิ  $175 \pm 5$  องศาเซลเซียส โดยต้องใช้เวลาประมาณ  $5.5 \pm 0.25$  นาที ในการเพิ่มจากอุณหภูมิปกติไปยังอุณหภูมิ  $175$  องศาเซลเซียส จากนั้นคงไว้ที่อุณหภูมิ  $175 \pm 5$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4.5 นาที
4. เมื่อเสร็จสิ้นตามขั้นตอนอัตโนมัติของเครื่องไมโครเวฟ ให้นำกระบอกทดลองออกจากเครื่อง ทิ้งไว้ให้เย็น และนำไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน แล้วทำการปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร
5. นำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (inductively couple plasma ICP)

### 3.5.2.2 การชะละลายแฉ่ำลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure และ Synthetic Precipitation Leaching Procedure

การชะละลายด้วยวิธี USEPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) และวิธี USEPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแฉ่ำลอยผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการชะละลายใส่ลงในหลอดเซนต์ปีทิวาสติกด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 20 กล่าวคือ ปริมาณแฉ่ำลอย 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยใช้ กรดอะซิติก สำหรับวิธี TCLP น้ำฝนกรดสังเคราะห์สำหรับวิธี SPLP และน้ำปราศจากไอออนเป็นสารเคมีในการชะละลาย
2. นำหลอดเซนต์ปีทิวาสติกที่บรรจุแฉ่ำลอยผสมกับสารเคมีในการชะละลายกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ความเร็ว  $30 \pm 2$  รอบต่อนาทีเป็นเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมง

3. นำของเหลวที่ได้จากการหมนผสมกรองของแข็งออกจากของเหลวด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน
4. ทำการตรึงโลหะหนักในของเหลวที่ชะละลายได้ด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริกจนกระทั่งมีค่าพีเอชน้อยกว่า 2
5. นำของเหลวใสที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (inductively couple plasma ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.2.3 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

การสกัดสารด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ในการทดลองนี้ได้ดัดแปลงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัด สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) โดยรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

1. นำเถ้าลอยผสมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นสารชะละลายใส่ลงในหลอดเซนต์ปีแยร์พลาสติกด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10 กล่าวคือ ปริมาณเถ้าลอย 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร หรือเถ้าลอย 2 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 มิลลิลิตร
2. นำหลอดเซนต์ปีแยร์พลาสติกที่บรรจุเถ้าลอยผสมกับสารเคมีในการชะละลายกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ความเร็ว  $30 \pm 2$  รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
3. นำของเหลวที่ได้จากการหมนผสมกรองของแข็งออกจากของเหลวด้วยไนลอนไซริงค์ฟิวเตอร์ (nylon syringe filter) ขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน
4. ทำการตรึงโลหะหนักในของเหลวที่ชะละลายได้ด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริกในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตรของสารละลายที่ชะละลายได้
5. นำของเหลวใสที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (inductively couple plasma ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.3 การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

#### 3.5.3.1 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจาเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

มอร์ตาร์โดยทั่วไปประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลละเอียด และน้ำ โดยจะใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจาเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ที่สัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens) (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ซึ่งได้กำหนดองค์ประกอบของมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ว่าจะต้องประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ทราย และน้ำ และในกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water-cement ratio; w/c) เท่ากับ 0.485 ปฏิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ปฏิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

ชื่อสูตร	ชนิดเถ้าลอย	FA (กรัม)	OPC (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (กรัม)	w/c
FA0	ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ	0.0	82.2	226.1	39.9	0.485
LFA25	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ (LFA)	20.6	61.7	226.1	39.9	
LFA50		41.1	41.1	226.1	39.9	
LFA75		61.7	20.6	226.1	39.9	
LFA100		82.2	0.0	226.1	39.9	
BFA25	เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส (BFA)	20.6	61.7	226.1	39.9	
BFA50		41.1	41.1	226.1	39.9	
BFA75		61.7	20.6	226.1	39.9	
BFA100		82.2	0.0	226.1	39.9	

ตารางที่ 3-5 ภูมิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ (ต่อ)

ชื่อสูตร	ชนิดเถ้าลอย	FA (กรัม)	OPC (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (กรัม)	w/c
MFA25	เถ้าลอยจากเตาเผาขยะ ชุมชน (MFA)	20.6	61.7	226.1	39.9	0.485
MFA50		41.1	41.1	226.1	39.9	
MFA75		61.7	20.6	226.1	39.9	
MFA100		82.2	0.0	226.1	39.9	

### 3.5.3.2 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้กากคอนกรีต แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่ต่างกัน

ในกรณีนี้จะขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด (ทรายละเอียด) ที่สัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงภูมิภาคส่วนผสมจาก ASTM C109 standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens) (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ซึ่งได้กำหนดองค์ประกอบของมอร์ตาร์สำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ว่าจะต้องประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ และในกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water-cement ratio; w/c) เท่ากับ 0.485 ภูมิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ภูมิภาคส่วนผสมสำหรับมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ก้อน ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ชื่อสูตร	ชนิดกากคอนกรีต	OPC (กรัม)	ทราย (กรัม)	กากคอนกรีต (กรัม)	น้ำ (กรัม)	w/c
FA0	ไม่มี กากคอนกรีตเป็น องค์ประกอบ	82.2	226.1	0.0	39.9	0.485
CW25	กากคอนกรีตจาก โรงผลิตคอนกรีต (CW)	82.2	169.6	56.5	39.9	
CW50		82.2	113.1	113.1	39.9	
CW75		82.2	56.5	169.6	39.9	
CW100		82.2	0.0	226.1	39.9	



### 3.5.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens) (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นวัสดุตัวอย่างทรงลูกบาศก์วางลงที่กึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด
2. เปิดเครื่องทดสอบ โดยที่ขณะทำการทดสอบจะต้องควบคุมน้ำหนักที่ตกลงบนวัสดุตัวอย่างให้มีอัตราสม่ำเสมอ โดยอัตราที่ใช้โดยทั่วไปคือ 1.4 – 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที
3. กดก่อนตัวอย่างจนวิบัติหรือแตก และบันทึกค่ากำลังอัดสูงสุดที่ได้
4. คำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ย จากน้ำหนักกดเฉลี่ยและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวอย่าง ดังสมการที่ 3.2 หน่วยคือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

$$F = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

โดยที่ F คือ ค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ยหรือค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

P คือ แรงอัดเฉลี่ย (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

### 3.5.5 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์

การทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ตามมาตรฐาน ASTM C518: standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus (ASTM C518-98, 1998) ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยใช้มอร์ตาร์ขนาด 10 x 10 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งวัสดุตัวอย่างระหว่างแผ่นร้อน (hot plate) และแผ่นเย็น (cold plate) ของเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (heat flow meter)
2. เลือกช่วงอุณหภูมิที่จะทำการทดสอบ ในที่นี้จะทดสอบในช่วงระหว่าง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส
3. เริ่มทำการทดสอบ โดยเครื่องทดสอบจะถ่ายเทความร้อนจากแผ่นร้อน (hot plate) ผ่านวัสดุตัวอย่าง และไปยังแผ่นเย็น (cold plate) ของเครื่องมือทดสอบ
4. เมื่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) เครื่องทดสอบจะคำนวณสภาพนำความร้อนของวัสดุตัวอย่าง โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตรเคลวิน

### 3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์

การทดสอบสมบัติเชิงเสียง ได้แก่ การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ตามมาตรฐาน ASTM E1050 standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system (ASTM E1050-98, 1998) และการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ตามมาตรฐาน ASTM E2611 standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method (ASTM E2611-09, 2009) โดยใช้มอร์ตาร์ที่ดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ที่เป็นทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ โดยดำเนินการทดลองที่ บริษัท จีไอโนยส์ (ไทยแลนด์) ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

#### การเตรียมอุปกรณ์

1. ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดเสียงเข้ากับท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube) ดังนี้
  - 1.1 เชื่อมต่อตัวกำเนิดเสียง (noise generator) กับเครื่องขยายเสียง (amplifier)
  - 1.2 เชื่อมต่อเครื่องขยายเสียงเข้ากับส่วนลำโพงของท่อนำคลื่นเสียง
  - 1.3 ติดตั้งไมโครโฟนบนท่อนำคลื่นเสียงตามช่องที่เตรียมไว้เฉพาะ
  - 1.4 เชื่อมต่อไมโครโฟนเข้ากับชุดประมวลผลข้อมูล (acquisition box)
  - 1.5 เชื่อมต่อชุดประมวลผลข้อมูลเข้ากับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ติดตั้งชุดโปรแกรมเฉพาะ สำหรับบันทึกเสียงและประมวลผลข้อมูลเสียงที่บันทึก

### การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง

1. ติดตั้งตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สำหรับการทดสอบในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบในช่วงความถี่ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ในท่อตันสำหรับรองรับตัวอย่าง
2. ประกอบท่อตันที่ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับท่อนำคลื่นเสียงที่ปลายอีกฝั่งหนึ่งมีลำโพงติดตั้งไว้
3. สอบเทียบ (calibrate) ไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว ที่ใช้ในการทดลองด้วยตัวสอบเทียบเสียงตามมาตรฐาน IEC 60942 Class 1 ที่ระดับความดันเสียง (sound pressure level) 94 เดซิเบล ความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ โดยปรับค่าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นติดตั้งไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว ลงบนช่องของท่อนำคลื่นเสียง
4. บันทึกตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบลงในโปรแกรมสำหรับทดสอบ เช่น ความหนาของวัสดุ และอุณหภูมิ เป็นต้น
5. เริ่มการทดสอบโดยเปิดแหล่งกำเนิดเสียง โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะวัดระดับความดันเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่เดินทางไปที่กระทบวัสดุตัวอย่างแล้วเกิดเป็นคลื่นนิ่งในท่อนำเสียง
6. เมื่อโปรแกรมสามารถวัดค่าได้แล้ว ให้ทำการสลับตำแหน่งไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว แล้วทดสอบตามขั้นตอนที่ 5 ซ้ำอีกครั้งเพื่อตรวจสอบแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นที่วัดได้
7. เมื่อการวัดครั้งที่ 2 เสร็จสิ้น โปรแกรมจะคำนวณสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในแต่ละความถี่และรายงานผลโดยอัตโนมัติ

### การทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียง

1. ติดตั้งตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 สำหรับการทดสอบในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบในช่วงความถี่ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ในท่อนำคลื่นเสียงที่ปลายอีกฝั่งหนึ่งเป็นวัสดุไม่สะท้อนเสียงที่สามารถเปิดปิดได้
2. ประกอบท่อนำคลื่นเสียงที่ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับท่อนำคลื่นเสียงอีกท่อหนึ่งที่ปลายอีกฝั่งมีลำโพงติดตั้งไว้
3. สอบเทียบ (calibrate) ไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว ที่ใช้ในการทดลองด้วยตัวสอบเทียบเสียงตามมาตรฐาน IEC 60942 Class 1 ที่ระดับความดันเสียง (sound pressure level) 94 เดซิเบล ความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ โดยปรับค่าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นติดตั้งไมโครโฟนทั้ง 4 ตัว ลงบนช่องของท่อนำคลื่นเสียง

4. บันทึกตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบลงในโปรแกรมสำหรับทดสอบ เช่น ความหนาของวัสดุ และอุณหภูมิ เป็นต้น
5. เริ่มการทดสอบโดยเปิดแหล่งกำเนิดเสียงในขณะที่ปลายของท่อนำคลื่นเสียงฝั่งที่มีตัวอย่างติดตั้งอยู่กำลังปิดอยู่ด้วยวัสดุไม่สะท้อนเสียง โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะวัดระดับความดันเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงที่เดินทางไปกระทบวัสดุตัวอย่างแล้วมีคลื่นเสียงบางส่วนเดินทางผ่านวัสดุไปยังท่อนำคลื่นเสียงอีกฝั่งหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งสะท้อนผิววัสดุกลับมายังทิศทางเดิม
6. เมื่อโปรแกรมสามารถวัดค่าได้แล้ว ให้ทำการเปิดวัสดุไม่สะท้อนเสียงที่ปลายของท่อนำเสียงที่มีตัวอย่างติดตั้งอยู่ออก แล้วทดสอบตามขั้นตอนที่ 5 ซ้ำอีกครั้งเพื่อตรวจสอบแอมพลิจูดและเฟสของคลื่นที่วัดได้
7. เมื่อการวัดครั้งที่ 2 เสร็จสิ้น โปรแกรมจะคำนวณการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในแต่ละความถี่และรายงานผลโดยอัตโนมัติ

### 3.5.7 การทดสอบปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์

การทดสอบปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์โดยการสกัดสารด้วยวิธี TCLP (USEPA, 1992) SPLP (USEPA, 1994) WET (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และชะละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำเศษมอร์ตาร์ที่มีเกล็ดล่อยเป็นองค์ประกอบที่เป็นเศษเหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดผสมกับสารเคมีที่ใช้ในการชะละลายใส่ลงในหลอดเซนต์ปีฟัวพลาสติกด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 20 กล่าวคือ ปริมาณเกล็ดล่อย 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยใช้ กรดอะซิติก สำหรับวิธี TCLP น้ำฝนกรดสังเคราะห์สำหรับวิธี SPLP และน้ำปราศจากไอออนเป็นสารเคมีในการชะละลาย และในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 กล่าวคือ ปริมาณเกล็ดล่อย 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร หรือเกล็ดล่อย 2 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 มิลลิลิตร สำหรับวิธี WET
2. นำหลอดเซนต์ปีฟัวพลาสติกที่บรรจุเกล็ดล่อยผสมกับสารเคมีในการชะละลายกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ความเร็ว  $30 \pm 2$  รอบต่อนาทีเป็นเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมง สำหรับวิธี TCLP และ SPLP และ 48 ชั่วโมง สำหรับวิธี WET
3. นำของเหลวที่ได้จากการหมุนผสมกรองของแข็งออกจากของเหลวด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน สำหรับวิธี TCLP

และ SPLP และกรองด้วยไนลอนไซริงค์ฟิวเตอร์ (nylon syringe filter) ขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน สำหรับวิธี WET

4. ทำการตรึงโลหะหนักในของเหลวที่ชะละลายได้ด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริกจนกระทั่งมีค่าพีเอชน้อยกว่า 2 สำหรับวิธี TCLP และ SPLP และเติมกรดไนตริกในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตรของสารละลายที่ชะละลายได้สำหรับวิธี WET
5. นำของเหลวใสที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (inductively couple plasma ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและกากคอนกรีต

##### 4.1.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย

##### 4.1.1.1 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence: XRF) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณโดยมวลของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากที่สุด คือ ร้อยละ 33.2 ในลำดับถัดมาพบ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และเฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณโดยมวลร้อยละ 18.6 16.4 และ 12.4 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสพบว่ามีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณโดยมวลมากถึงร้อยละ 69.1 นอกจากนี้พบ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณโดยมวลร้อยละ 23.0 และ 3.36 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน พบสารประกอบที่มีความหลากหลายกว่าที่พบในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และบิทูมินัส โดยพบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) มากที่สุด ซึ่งมีปริมาณโดยมวลร้อยละ 26.0 และพบคลอรีน (Cl) มากเป็นอันดับสอง โดยมีปริมาณโดยมวลร้อยละ 24.0 ดังตารางที่ 4-1

ในด้านความชื้น (moisture content) ของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน พบว่า เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส มีค่าความชื้นที่ต่ำมาก ซึ่งสามารถสังเกตได้อีกทางหนึ่งจากลักษณะภายนอกของเถ้าลอยที่มีความละเอียด และสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เก็บจากระบบกำจัดฝุ่นของเตาเผา มีค่าความชื้นมากกว่าเถ้าลอยจากการเผาถ่านหิน โดยมีลักษณะที่ชื้น และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ได้อย่างชัดเจน ผลการทดสอบหาความชื้นในเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4-1 เช่นกัน

เมื่อพิจารณาชั้นคุณภาพของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนตามมาตรฐานการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานคอนกรีต ASTM C618 (ASTM C618-05, 2005) พบว่าผลรวมของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่พบในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็น 64.2 95.5 และ 3.5 ตามลำดับ ปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็น 4.66 0.261 และ 3.26

ตามลำดับ และความชื้นในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นร้อยละ 0.04 0.08 และ 0.57 ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนไม่สามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-05, 2005) ได้

**ตารางที่ 4-1** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ชนิดของเถ้าลอย (ร้อยละโดยมวล)		
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส	เถ้าลอยขยะชุมชน
SiO <sub>2</sub>	33.2	69.1	2.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.6	23.0	0.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.4	3.36	0.42
CaO	16.4	0.76	26.0
SO <sub>3</sub>	4.66	0.26	3.26
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	262 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM
BaO	0.13	565 PPM	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	109 PPM	87.7 PPM	90.7 PPM
CuO	112 PPM	104 PPM	527 PPM
K <sub>2</sub> O	2.36	0.89	4.52
MgO	2.09	0.50	1.20
MnO	909 PPM	308 PPM	198 PPM
Na <sub>2</sub> O	1.81	0.49	10.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.23	0.66
PbO	-	52.6 PPM	0.10
TiO <sub>2</sub>	0.38	1.04	0.28
ZnO	247 PPM	150 PPM	0.47
Br	-	-	0.12
Cl	363 PPM	-	24.0
ความชื้น (%)	0.04	0.08	0.57
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซม.)	2.4	2.3	2.3

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ได้รับจากโรงเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทยในช่วงเดือนพฤษภาคม 2561 ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence: XRF) ดังตารางที่ 4-1 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่น ๆ ดังตารางที่ 4-2 พบว่าแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่น ๆ มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยพบว่าผลรวมของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ของแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนทั้งจากแหล่งที่ศึกษาและจากแหล่งอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 50 และร้อยละ 70 ตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-05, 2005) กล่าวคือแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเหล่านี้ไม่สามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดได้ตามมาตรฐาน ASTM C618

หนึ่งในองค์ประกอบทางเคมีที่พบมากที่สุดทั้งในแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้และแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบคือ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) โดยพบว่ามีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 26.0 – 37.4 โดยมวล การที่พบแคลเซียมออกไซด์ปริมาณมากในแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นเพราะในกระบวนการบำบัดมลพิษทางอากาศของเตาเผาขยะชุมชนโดยส่วนใหญ่จะมีการผสมสารจำพวกปูนขาวเพื่อปรับเสถียรก๊าซที่เป็นกรดในแก้วลอย (Sancharoen, 2003) สำหรับองค์ประกอบทางเคมีที่พบมากในอันดับสองคือ คลอรีน (Cl) หรือคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) โดยพบว่ามีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 17.3 - 29.3 โดยมวล สาเหตุที่พบสารในกลุ่มคลอรีนในแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ศึกษาเป็นผลจากกระบวนการเผาขยะจำพวกพลาสติก (Dontriros, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานชนิดของมูลฝอยที่เข้าสู่เตาเผาขยะชุมชนในตารางที่ 2-1 ที่พบว่าขยะจำพวกพลาสติกมีร้อยละที่พบมากที่สุดที่เข้าสู่เตาเผาขยะชุมชน เมื่อใช้ข้อมูลของโครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ตเป็นตัวอย่าง (บริษัท พีเจที เทคโนโลยี จำกัด, 2561) นอกจากนี้แหล่งของคลอรีนที่พบในแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนอาจจะมาจากการเผากระดาษหนังสือพิมพ์ สารกลุ่มตัวทำละลาย (Sancharoen, 2003) ขยะจากห้องครัว และเครื่องหนัง (Wu และคณะ, 2016) นอกจากนี้ในแก้วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ศึกษาพบสารในกลุ่มโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ในปริมาณที่รองลงมา ซึ่งพบว่าอาจมีแหล่งที่มาจากขยะจำพวกเศษอาหาร (Dontriros, 2019) พลาสติก เซรามิก และแก้ว (Clavier และคณะ, 2020)



**ตารางที่ 4-2** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่น

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (ร้อยละโดยมวล)				
	MFA	แหล่งที่ 1	แหล่งที่ 2	แหล่งที่ 3	แหล่งที่ 4
SiO <sub>2</sub>	2.21	4.07	5.88	2.70	7.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.83	2.32	2.08	0.850	2.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.82	0.68	0.578	2.23
CaO	26.0	34.83	34.36	32.1	37.4
SO <sub>3</sub>	3.26	6.23	4.15	4.03	8.56
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.7 PPM	-	0.00	91.9 PPM	0.04
CuO	527 PPM	0.05	0.05	687 PPM	-
K <sub>2</sub> O	4.52	6.90	5.27	6.52	2.40
MgO	1.20	1.77	1.30	1.41	2.18
MnO	198 PPM	0.05	0.03	-	-
Na <sub>2</sub> O	10.4	6.59	3.70	13.9	3.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.66	1.63	0.95	0.724	0.54
PbO	0.10	0.12	0.15	0.130	-
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.59	0.39	0.369	0.55
ZnO	0.47	0.18	0.58	0.600	3.08
Br	0.12	0.03	0.00	-	-
Cl	24.0	23.94	27.80	29.3	17.3

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

MFA = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทย เก็บในช่วงเดือน พฤษภาคม 2561 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

แหล่งที่ 1 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Inthasaro, 2002)

แหล่งที่ 2 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Sancharoen, 2003)

แหล่งที่ 3 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Dontriros, 2019)

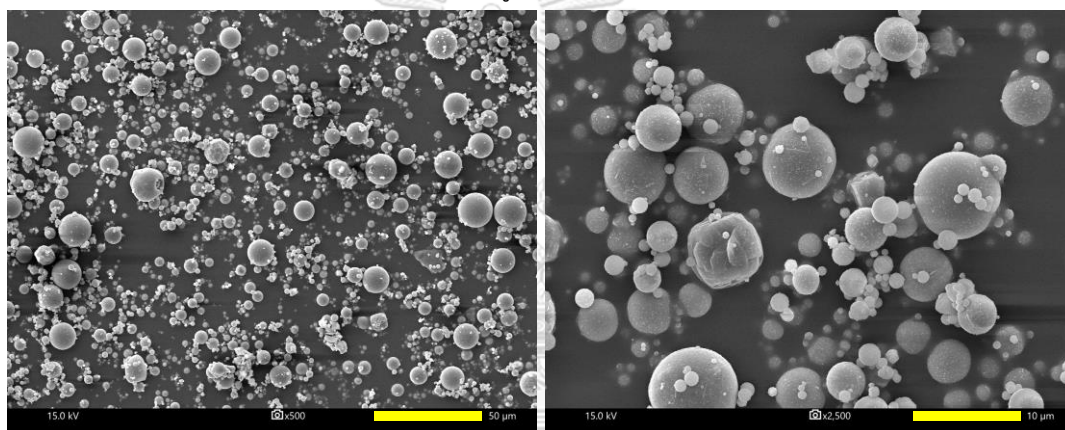
แหล่งที่ 4 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Sarmiento และคณะ, 2019)

#### 4.1.1.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

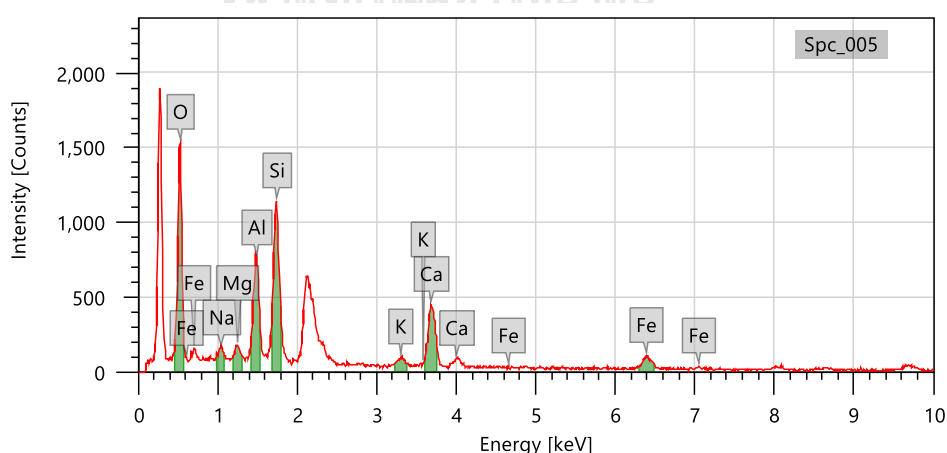
##### 4.1.1.2.1 สัณฐานวิทยา (morphology)

###### 1) เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่กำลังขยาย 500 เท่า และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์มีลักษณะกลม ผิวเรียบ มีหลากหลายขนาดปะปนอยู่ด้วยกัน ดังรูปที่ 4-1 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุในเถ้าลอยด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) พบปริมาณซิลิคอน (Si) มากที่สุด นอกจากนี้พบ แคลเซียม (Ca) และ เหล็ก (Fe) ในปริมาณที่รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 ภาพถ่ายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และกำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา)

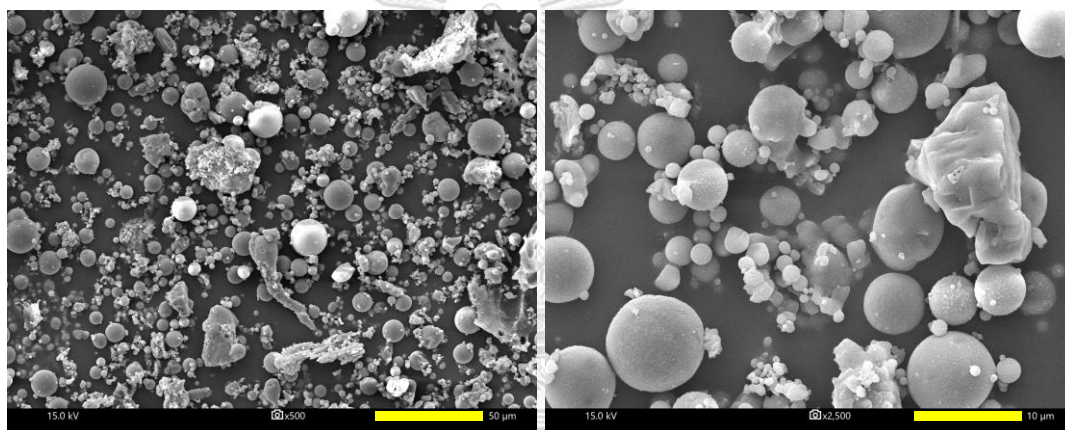


รูปที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ โดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

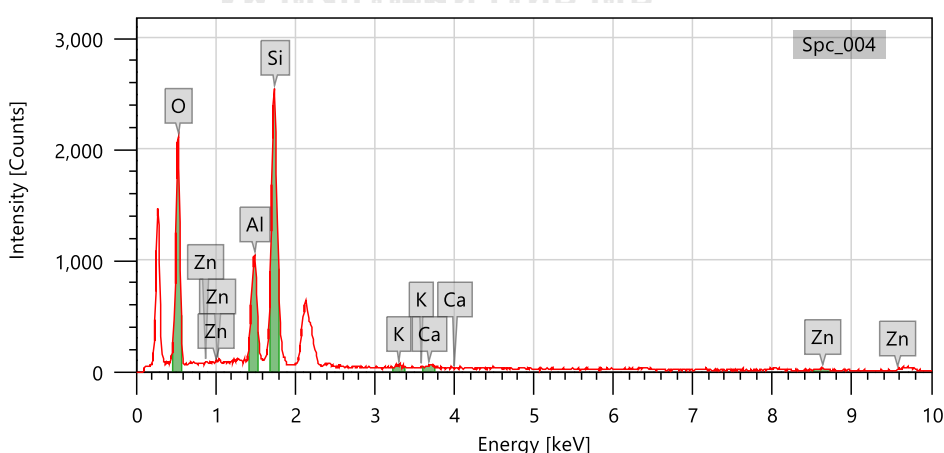
หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

## 2) แก้วลอยถ่านหินปิทูมินัส

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของแก้วลอยถ่านหินปิทูมินัส ที่กำลังขยาย 500 เท่า และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าอนุภาคของแก้วลอยถ่านหินปิทูมินัสบางส่วนมีลักษณะกลม ผิวเรียบ ในขณะที่บางส่วนมีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม ขรุขระ มีหลากหลายขนาดปะปนอยู่ด้วยกัน ดังรูปที่ 4-3 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุในแก้วลอยด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) พบปริมาณซิลิคอน (Si) มากที่สุด นอกจากนี้พบ อลูมิเนียม (Al) และ สังกะสี (Zn) ในปริมาณที่รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-3 ภาพถ่ายแก้วลอยถ่านหินปิทูมินัสที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา)

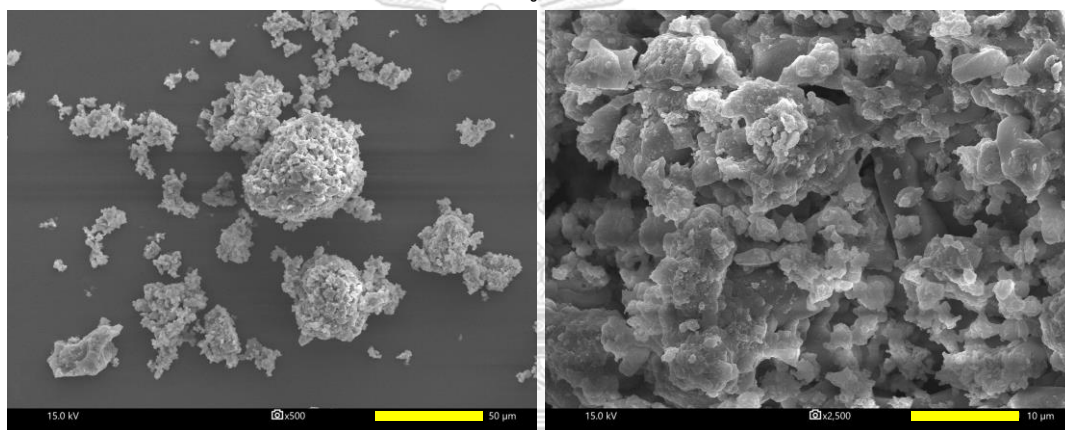


รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้วลอยถ่านหินปิทูมินัส โดยเทคนิคเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

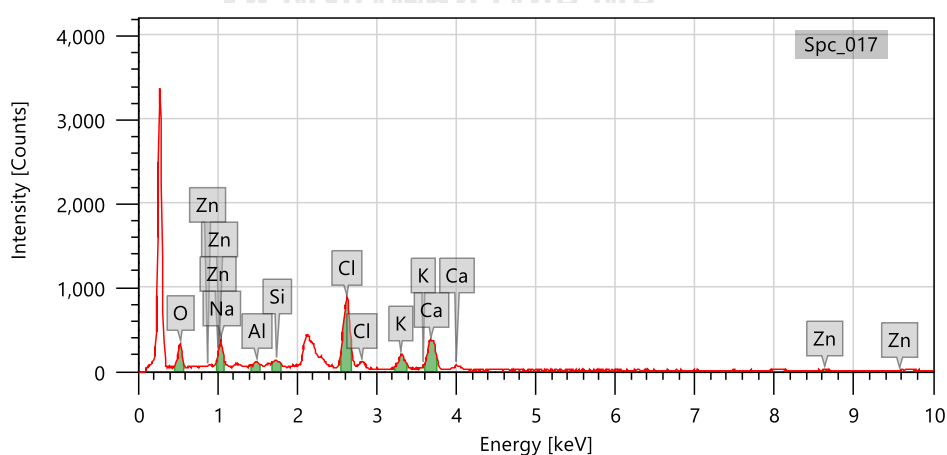
หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

### 3) ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ที่กำลังขยาย 500 เท่า และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าอนุภาคของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน มีทั้งส่วนที่จับตัวเป็นก้อนใหญ่ และส่วนที่ยังเป็นอิสระไม่จับตัวเป็นก้อน แต่ละอนุภาคมีรูปร่างกลมมน รูปร่างเหลี่ยม และมีผิวขรุขระ ดังรูปที่ 4-5 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุในถ้ำลอยด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) พบธาตุที่มีความหลากหลายกว่าในกลุ่มถ้ำลอยจากถ่านหินค่อนข้างมาก โดยพบปริมาณคลอรีน (Cl) มากที่สุด นอกจากนี้พบ แคลเซียม (Ca) และ โซเดียม (Na) ในปริมาณที่รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-5 ภาพถ่ายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (ขวา)



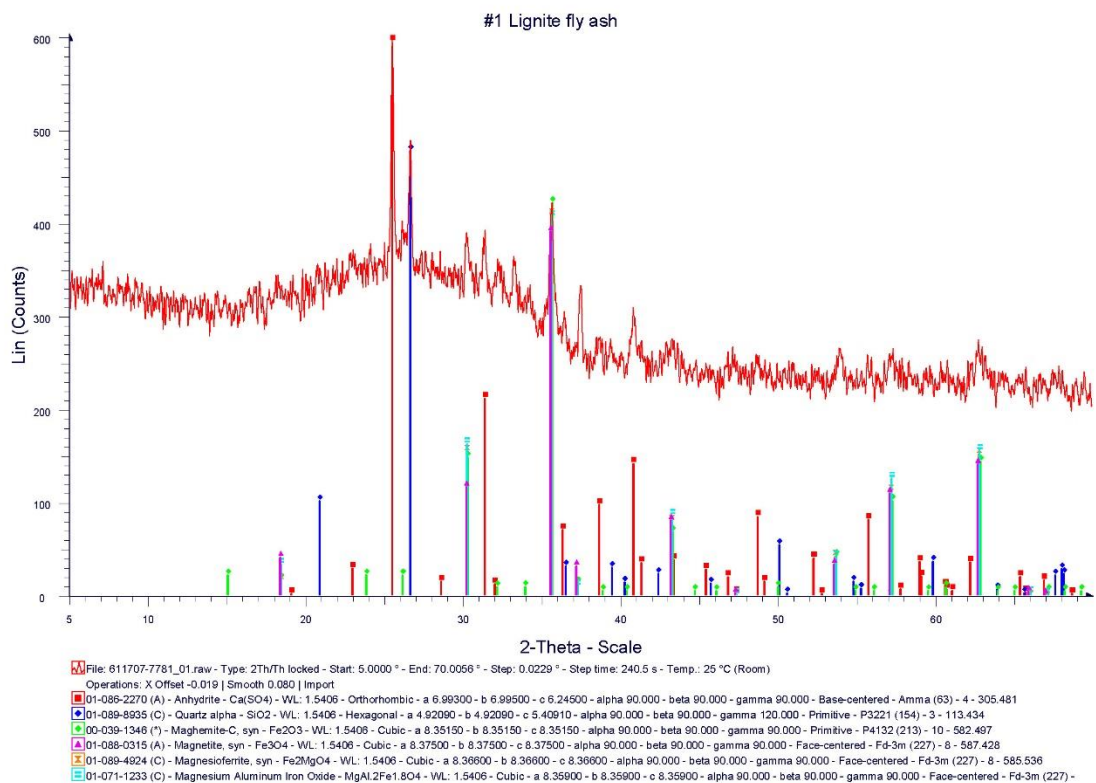
รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยเทคนิคเอกซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.1.1.2.2 โครงสร้างผลึก (mineralogical composition)

##### 1) เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer: XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเกิดโครงสร้างเป็น anhydrite –  $\text{Ca}(\text{SO}_4)$  มากที่สุด นอกจากนั้นพบ quartz alpha –  $\text{SiO}_2$  และ Maghemite-C  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  รองลงมา ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-7

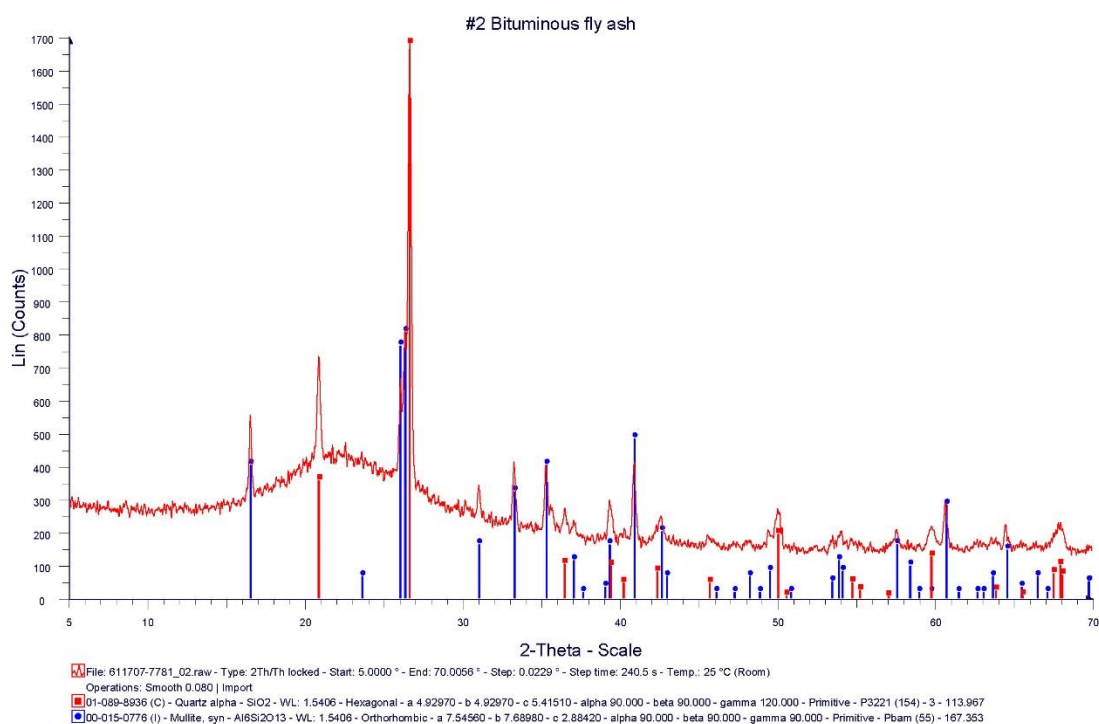


รูปที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

## 2) เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer: XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเกิดโครงสร้างเป็น quartz alpha – SiO<sub>2</sub> มากที่สุด นอกจากนั้นพบ mullite – Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub> รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-8

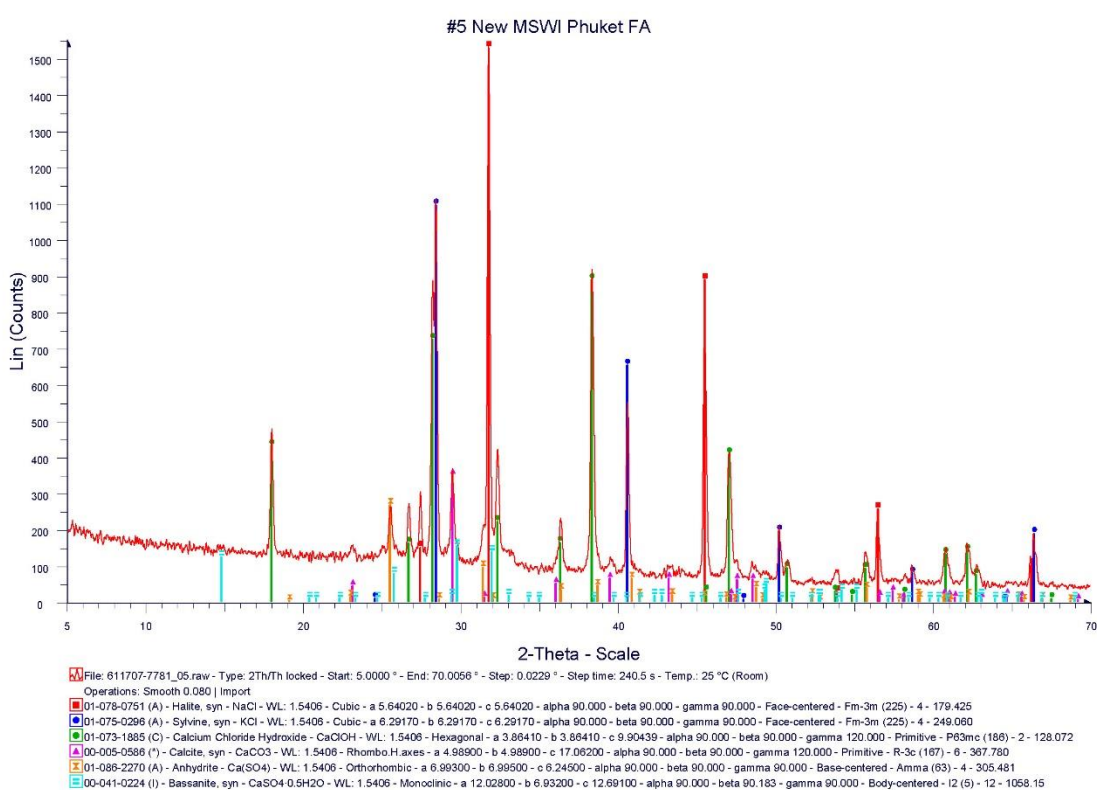


รูปที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

### 3) แก๊วลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแก๊วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer: XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเกิดโครงสร้างเป็น halite – NaCl มากที่สุด นอกจากนั้นพบ sylvine – KCl และ calcium chloride hydroxide - CaClOH รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-9



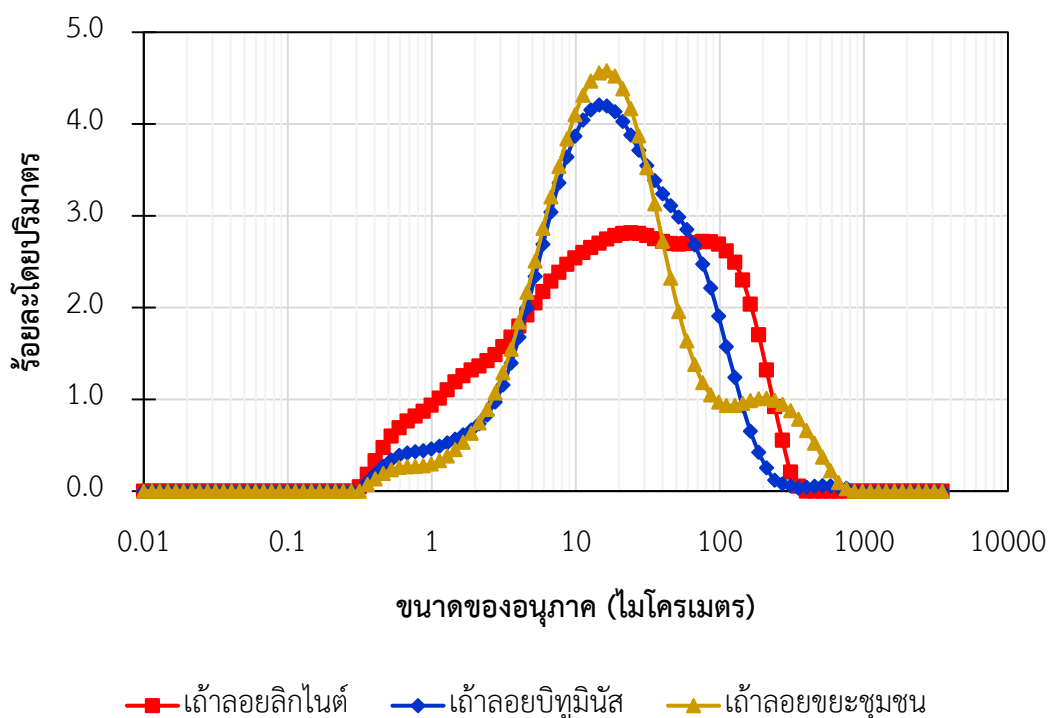
รูปที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแก๊วลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.1.1.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size distribution)

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่การกระจายของขนาดเถ้าลอยร้อยละ 10 (D10) การกระจายของขนาดเถ้าลอยร้อยละ 50 (D50) และการกระจายของขนาดเถ้าลอยร้อยละ 90 (D90) มีขนาดอนุภาค 1.83 21.03 และ 137.00 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการกระจายตัวหนาแน่นในช่วงขนาดอนุภาค 21.2 ไมโครเมตร ถึง 24.1 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาค 76 ไมโครเมตร ในขณะที่เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส พบว่าที่ D10 D50 และ D90 มีขนาดอนุภาค 3.69 18.53 และ 85.47 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่ามีขนาดของอนุภาคที่เล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอมากกว่าในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ โดยพบปริมาณมากที่สุดที่ขนาด 14.5 ไมโครเมตร สำหรับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนซึ่งเก็บจากระบบกำจัดฝุ่นของเตาเผาพบว่าที่ D10 D50 และ D90 มีขนาดอนุภาค 4.07 17.77 และ 134.33 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยมีการกระจายตัวหนาแน่นในช่วงของขนาดอนุภาค 8.68 ไมโครเมตร และที่ขนาดอนุภาค 666 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนและเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินทั้ง 2 ชนิด พบว่าเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอ โดยมีทั้งส่วนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเถ้าลอยในกลุ่มเถ้าลอยถ่านหิน และส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยในกลุ่มเถ้าลอยถ่านหิน ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer) แสดงดังรูปที่ 4-10





รูปที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.1.2 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของกากคอนกรีต

##### 4.1.2.1 สมบัติทางเคมีของกากคอนกรีต

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence: XRF) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าในกากคอนกรีตมีปริมาณโดยมวลของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากที่สุด คือ ร้อยละ 53.1 ในลำดับถัดมาพบแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณโดยมวลร้อยละ 18.2 และ 5.71 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากคอนกรีต

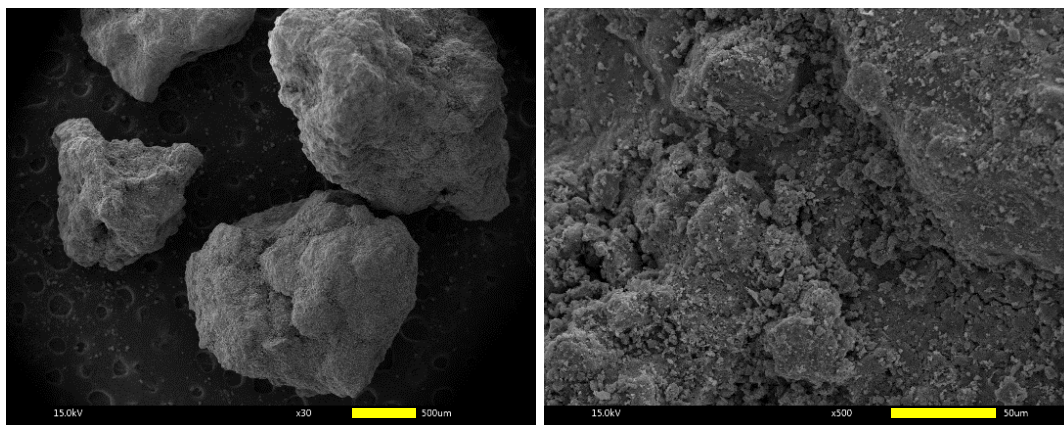
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล	องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยมวล
SiO <sub>2</sub>	53.1	MnO	234 PPM
CaO	18.2	SrO	186 PPM
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.71	Cl	156 PPM
K <sub>2</sub> O	1.98	Rb <sub>2</sub> O	132 PPM
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.30	ZrO <sub>2</sub>	78.9 PPM
MgO	1.00	ZnO	61.3 PPM
SO <sub>3</sub>	0.994	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57.6 PPM
Na <sub>2</sub> O	0.345	CuO	38.3 PPM
TiO <sub>2</sub>	0.162	NiO	32.7 PPM
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	680 PPM	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.6 PPM
BaO	310 PPM	CoO	0.0 PPM

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

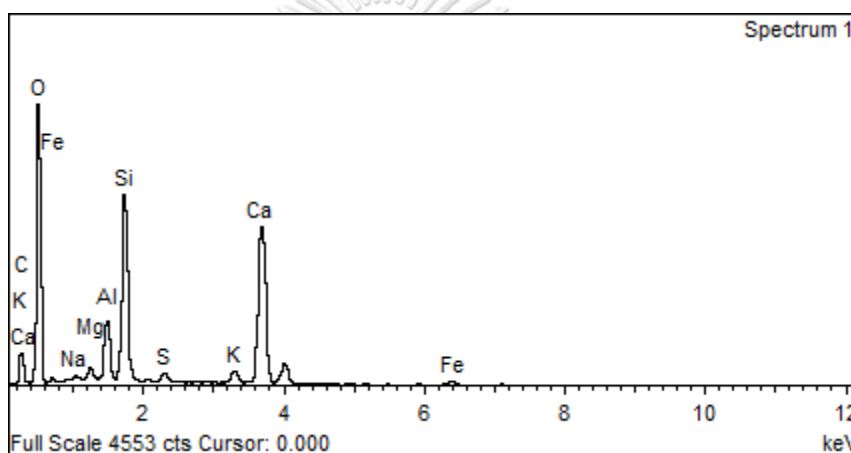
#### 4.1.2.2 สมบัติทางกายภาพของกากคอนกรีต

##### 4.1.2.2.1 สัณฐานวิทยา (morphology)

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีต ที่กำลังขยาย 30 เท่า และ 500 เท่า ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าอนุภาคของกากคอนกรีตมีการจับตัวเป็นก้อนใหญ่ รูปทรงอสมมาตร และขรุขระ ดังรูปที่ 4-11 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุในกากคอนกรีตด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) พบธาตุที่ไม่ได้แตกต่างจากองค์ประกอบของคอนกรีตโดยทั่วไป โดยพบปริมาณคาร์บอน (C) มากที่สุด นอกจากนี้พบ แคลเซียม (Ca) และ ซิลิกอน (Si) ในปริมาณที่รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-11 ภาพถ่ายจากคอนกรีตที่กำลังขยาย 30 เท่า (ซ้าย) และที่กำลังขยาย 500 เท่า (ขวา)

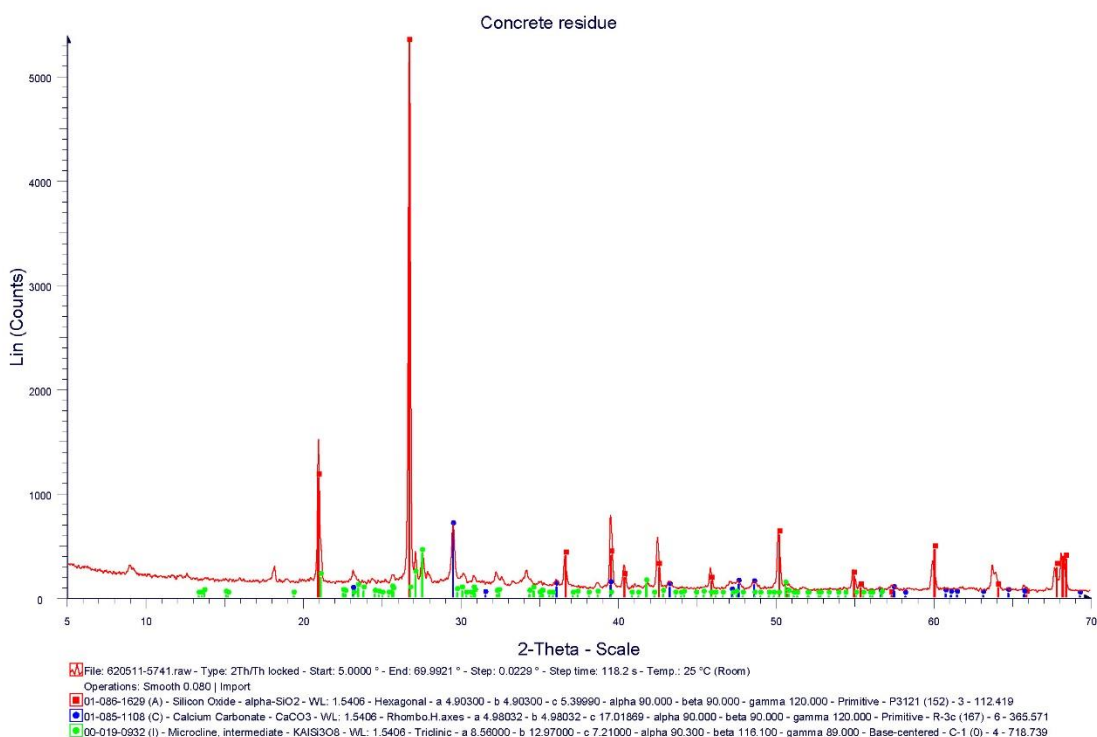


รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากคอนกรีตโดยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.1.2.2.2 โครงสร้างผลึก (mineralogical composition)

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer: XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเกิดโครงสร้างเป็น silicon oxide – alpha  $\text{SiO}_2$  มากที่สุด นอกจากนั้นพบ calcium carbonate –  $\text{CaCO}_3$  และ microcline, intermediate -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  รองลงมาตามลำดับ ดังรูปที่ 4-13

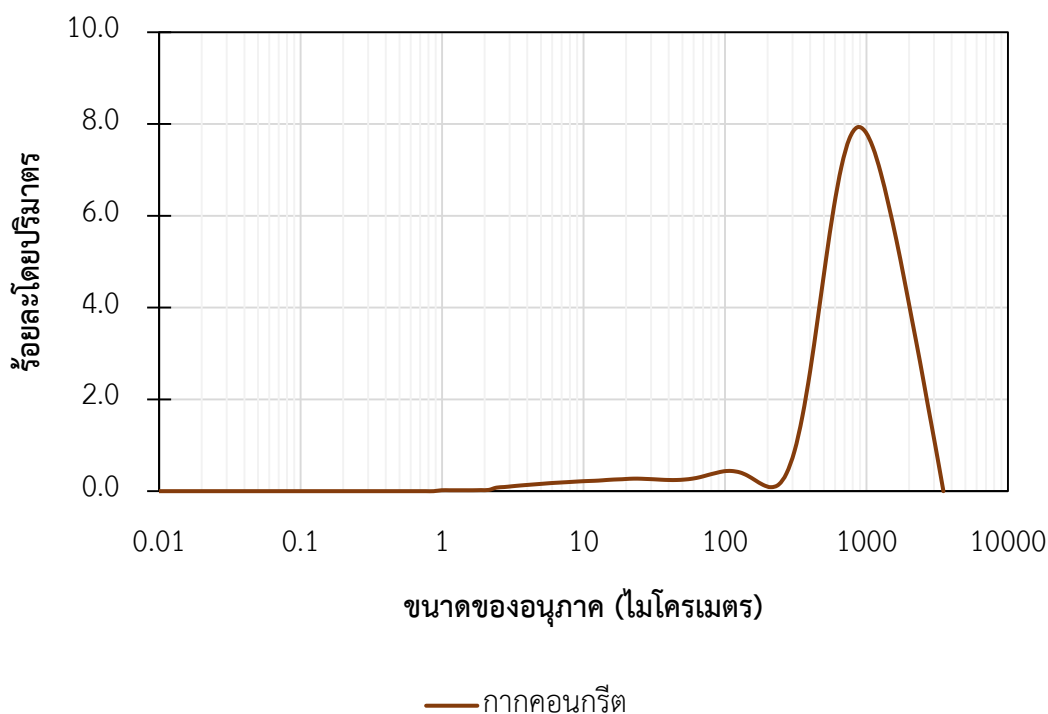


รูปที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากคอนกรีต ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.1.2.2.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size distribution analyzer)

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่ากากคอนกรีตที่การกระจายของขนาดอนุภาคร้อยละ 10 (D10) การกระจายของขนาดอนุภาคร้อยละ 50 (D50) และการกระจายของขนาดอนุภาคร้อยละ 90 (D90) มีขนาดอนุภาค 336 952 และ 2,053 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีต ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer) แสดงดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของกากคอนกรีตด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (laser particle size distribution analyzer)

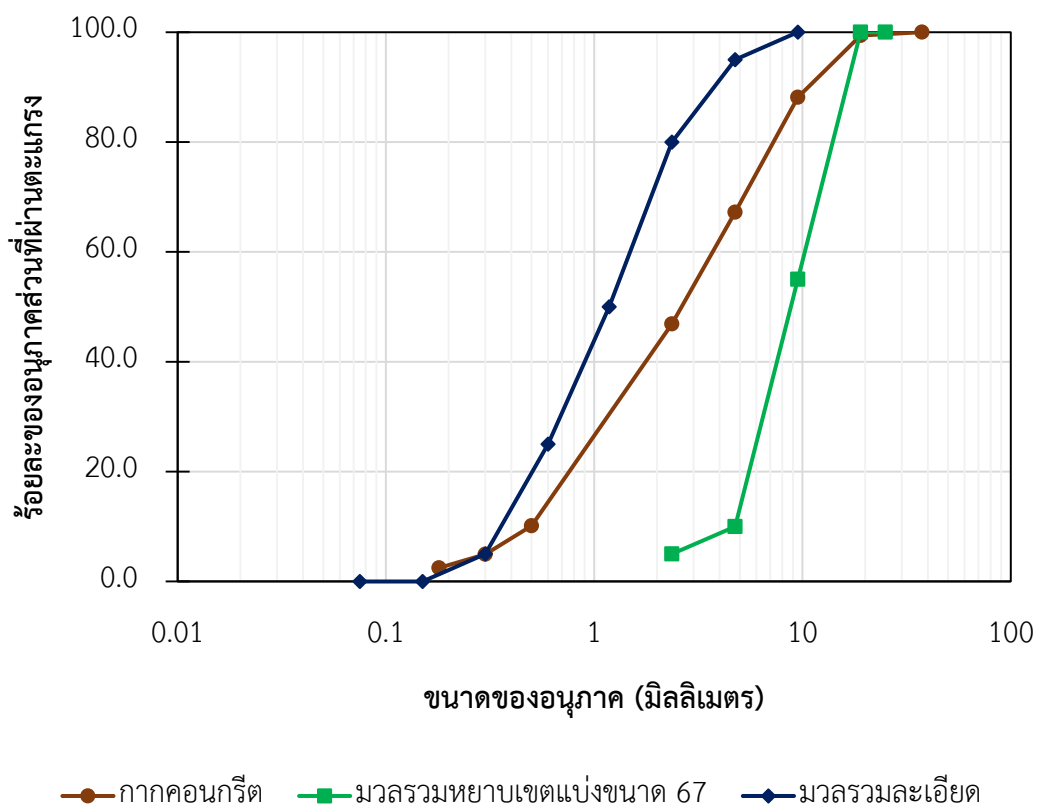
หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยตะแกรงร่อน (sieve analysis) พบว่ากากคอนกรีตมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างกว้าง โดยมีทั้งส่วนที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 3/4 จนถึงส่วนที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 80 ได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตกับมวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 และมวลรวมละเอียดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 566 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่างขอบบนของมวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 และขอบล่างของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน มอก. 566 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากคอนกรีตนี้มีทั้งส่วนที่สามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบ และสามารถใช้เป็นมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน มอก. 566 ได้ ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตกับมวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 และมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน มอก. 566 แสดงดังตารางที่ 4-4 และรูปที่ 4-15

**ตารางที่ 4-4** ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วยตะแกรงร่อน

ขนาดของตะแกรง ร่อน (มิลลิเมตร)	ร้อยละของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงร่อน		
	กากคอนกรีต	มวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 (มอก. 566)	มวลรวมละเอียด (มอก. 566)
No.1½ (37.5)	100.0	-	-
No.1 (25)	-	100	-
No.3/4 (19)	99.4	90 - 100	-
No.3/8 (9.5)	88.2	20 - 55	100
No.4 (4.75)	67.2	0 - 10	95 - 100
No.8 (2.36)	46.9	0 - 5	80 - 100
No.16 (1.18)	-	-	50 - 85
No.30 (0.6)	-	-	25 - 60
No.35 (0.5)	10.1	-	-
No.50 (0.3)	5.0	-	5 - 30
No.80 (0.18)	2.5	-	-
No.100 (0.15)	-	-	0 - 10
No.200 (0.075)	-	-	0 - 3

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น



รูปที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตด้วย ตะแกรงร่อน (sieve analysis) เปรียบเทียบกับมวลรวมหยาบเขตแบ่งขนาด 67 และมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน มอก. 566

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 ผลการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักของเถ้าลอย

### 4.2.1 การย่อยสลายเถ้าลอยด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (USEPA, 2007) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดจากการสกัดจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์คือ แคลเซียม (Ca) และ อลูมิเนียม (Al) โดยพบปริมาณ 56,643 และ 27,552 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสพบ เหล็ก (Fe) และ อลูมิเนียม (Al) มากที่สุด โดยมีปริมาณ 9,817 และ 8,389 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนในเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนพบ แคลเซียม (Ca) และ โซเดียม (Na) มากที่สุด โดยมีปริมาณ 188,649 และ 60,312 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อ

เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสำหรับความเข้มข้นทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ (Total Threshold Limit Concentration; TTLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) พบว่ามีเพียงปริมาณตะกั่วจากการสกัดเถ้าลอยจากเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่มีค่าเกินมาตรฐานเล็กน้อยจากที่ระบุไว้ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 1,069 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 4-5

**ตารางที่ 4-5** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน EPA 3051A

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอย (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			มาตรฐาน TTLC (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส	เถ้าลอยขยะชุมชน	
Fe	13,147	9,817	3,151	-
Ca	56,643	114	188,649	-
Na	3,126	240	60,312	-
Al	27,552	8,389	6,090	-
As	73.40	7.65	9.21	500
Pb	3.76	8.45	<b>1,069</b>	1,000

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.2.2 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure

จากผลการศึกษาการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA 1311 (USEPA, 1992) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินมาตรฐาน EPA (USEPA, 2009) เว้นแต่ปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี TCLP ที่มีค่าเกินมาตรฐานจาก 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6.46 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้จากผลการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่าน



หินบิทูมินัส และถ้ำล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี TCLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากถ้ำล่อยได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากถ้ำล่อยและวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้แก่ เงิน (Ag) ในถ้ำล่อยถ่านหินลิกไนต์และถ้ำล่อยถ่านหินบิทูมินัส และแคดเมียม (Cd) ในถ้ำล่อยถ่านหินบิทูมินัสและถ้ำล่อยจากเตาเผาขยะชุมชน ผลการวิเคราะห์การชะละลายถ้ำล่อยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำล่อยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี TCLP แสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ผลการชะละลายถ้ำล่อยด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน EPA 1311

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์ถ้ำล่อย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน TCLP (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	ถ้ำล่อยลิกไนต์	ถ้ำล่อยบิทูมินัส	ถ้ำล่อยขยะชุมชน	
Fe	0.85	0.18	0.05	-
Zn	5.02	3.16	3.50	-
Mn	5.45	0.32	0.03	-
K	101	2,524	2,407	-
Ca	2,137	8,936	9,846	-
Mg	160	2.97	41.4	-
Na	41.9	2,786	3,209	-
Al	7.17	11.4	0.36	-
Ba	0.21	4.06	2.30	100.0
Ag	<0.005	<0.005	0.01	5.0
As	0.06	0.12	0.01	5.0
Hg	0.01	0.01	0.02	0.2
Se	0.03	0.04	0.01	1.0
Cr	0.13	0.05	0.1	5.0
Cd	0.01	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.31	0.03	<b>6.46</b>	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.2.3 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure

จากผลการศึกษาการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) ตามมาตรฐาน USEPA 1312 (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) แต่สำหรับปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี SPLP พบว่าถึงแม้จะมีค่าไม่เกินมาตรฐาน TCLP แต่ก็ถือว่าพบตะกั่ว (Pb) ในปริมาณมาก โดยพบปริมาณตะกั่ว (Pb) มากถึง 4.93 มิลลิกรัมต่อลิตร จากมาตรฐานที่ระบุไว้ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้จากผลการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี SPLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากเถ้าลอยได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากเถ้าลอยและวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้แก่ เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เงิน (Ag) ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ในเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ในเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ผลการวิเคราะห์การชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี SPLP แสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี SPLP ตามมาตรฐาน EPA 1312

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน TCLP (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส	เถ้าลอยขยะชุมชน	
Fe	0.06	0.53	<0.005	-
Zn	7.96	5.06	0.48	-
Mn	0.056	0.035	<0.005	-
K	6.55	1.47	2,333	-
Ca	559	55.2	7,731	-
Mg	2.52	3.35	0.19	-
Na	41.2	5.99	3,312	-
Al	1.77	5.18	0.28	-

ตารางที่ 4-7 ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี SPLP ตามมาตรฐาน EPA 1312 (ต่อ)

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน TCLP (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส	เถ้าลอยขยะชุมชน	
Ba	0.12	0.67	0.41	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	0.07	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	0.07	0.01	1.0
Cr	0.06	0.02	0.09	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.02	0.01	4.93	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.2.4 การชะละลายเถ้าลอยด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

จากผลการศึกษาการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน โดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน (Soluble Threshold Limit Concentration; STLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) เว้นแต่ปริมาณสารหนู (As) ที่ชะละลายจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธี WET ที่มีค่าเกินมาตรฐานจาก 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 11.62 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้จากผลการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี WET พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากเถ้าลอยได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากเถ้าลอยและวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้แก่ พรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เงิน (Ag) พรอท (Hg) และแคดเมียม

(Cd) ในถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และ แมกนีเซียม (Mg) สารหนู (As) และปรอท (Hg) ในถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ผลการวิเคราะห์การชะละลายถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี WET แสดงในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลการชะละลายถ้ำลอยด้วยวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์ถ้ำลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน STLC (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) (มิลลิกรัม/ลิตร)
	ถ้ำลอยลิกไนต์	ถ้ำลอยบิทูมินัส	ถ้ำลอยขยะชุมชน	
Fe	10.12	32.57	0.11	-
Zn	0.37	0.18	2.92	250.0
Mn	6.75	0.68	0.016	-
K	26.09	3.21	4,438	-
Ca	471	39.06	3,223	-
Mg	46.74	161	<0.005	-
Na	7,006	6,775	13,040	-
Al	4.75	52.03	0.88	-
Ba	1.06	2.47	2.85	100.0
Ag	0.01	<0.005	0.03	5.0
As	<b>11.62</b>	0.64	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.20	0.01	0.005	1.0
Cr	0.62	0.20	0.16	5.0
Cd	<0.005	<0.005	0.01	1.0
Pb	<0.005	0.01	0.81	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.2.5 การชะละลายถ้ำลอยด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)

จากผลการศึกษาการชะละลายถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) โดยอาศัยวิธีการชะละลายตามวิธีของ USEPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) และวิธี USEPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation

Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมในการศึกษาปริมาณโลหะหนักของถ้ำลอย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) แต่สำหรับปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ถูกชะละลายจากถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่าถึงแม้จะมีค่าไม่เกินมาตรฐาน TCLP แต่ก็ถือว่าพบตะกั่ว (Pb) ในปริมาณมาก โดยพบปริมาณตะกั่ว (Pb) มากถึง 3.50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากมาตรฐานที่ระบุไว้ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้จากผลการชะละลายถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากถ้ำลอยได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากถ้ำลอยและวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ในถ้ำลอยถ่านหินแมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ในถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และ เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ในถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ผลการวิเคราะห์การชะละลายถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ้ำลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยน้ำปราศจากไอออน แสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ผลการชะละลายถ้ำลอยด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์ถ้ำลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน TCLP (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	ถ้ำลอยลิกไนต์	ถ้ำลอยบิทูมินัส	ถ้ำลอยขยะชุมชน	
Fe	0.01	0.01	0.02	-
Zn	0.05	0.05	1.81	-
Mn	<0.005	<0.005	0.02	-
K	4.13	0.72	2,330	-
Ca	576	38.0	6,224	-
Mg	0.63	2.55	2.58	-
Na	40.25	6.81	3,192	-
Al	0.25	3.75	0.65	-
Ba	0.16	0.45	0.66	100.0

ตารางที่ 4-9 ผลการชะละลายเถ้าลอยด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) (ต่อ)

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)			มาตรฐาน EPA (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส	เถ้าลอยขยะชุมชน	
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	0.04	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.02	0.07	0.01	1.0
Cr	0.05	0.02	0.10	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	<0.005	<0.005	3.50	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

จากผลการการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยการสกัดและชะละลายเถ้าลอยด้วยกรดในหัวข้อ 4.2.1 4.2.2 4.2.3 และ 4.2.4 พบว่าปริมาณธาตุที่ชะละลายจากเถ้าลอยโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินมาตรฐาน TCLP (USEPA, 2009) และ STLC (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) เว้นแต่ปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน EPA 1311 (USEPA, 1992) และปริมาณสารหนู (As) ที่ชะละลายจากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) ที่มีค่าเกินค่ามาตรฐานจาก 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6.46 และ 11.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการชะละลายเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี TCLP พบว่าปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายได้จากเถ้าลอยมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณแคลเซียม (Ca) ในเถ้าลอย แคลเซียมที่มีปริมาณมากในเถ้าลอยจะเป็นการเพิ่มสภาพด่าง (alkalinity) ให้กับระบบ (Alinnor, 2007) ทำให้ผิวเถ้าลอยเกิดประจุลบและสามารถดูดซับ (adsorption) โลหะหนักที่มีประจุบวกอย่างตะกั่วได้มาก (Leelarungroj และคณะ, 2018) จึงอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อใช้กรดอะซิติกที่มีค่าพีเอชประมาณ 2.88 ตามมาตรฐาน TCLP ชะละลายเถ้าลอยจึงทำให้พบแคลเซียมและตะกั่วถูกชะละลายออกมาด้วยกันได้มาก จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ตารางที่ 4-5 พบว่าผลการย่อยสลายเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน EPA SW-846 test method 3051A:

microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (USEPA, 2007) แสดงให้เห็นว่าในถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีปริมาณแคลเซียมมากถึง 188,649 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อชะละลายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธี TCLP ดังหัวข้อ 4.2.2 ตารางที่ 4-6 พบปริมาณแคลเซียม 9,846 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ ที่ชะละลายได้

สำหรับปริมาณสารหนู (As) เป็นที่ทราบกันดีว่าสามารถสะสมและถูกชะละลายได้เป็นจำนวนมากในถ้ำลอยประเภทถ่านหิน (Guangliang Liu และคณะ, 2016) จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.4 ตารางที่ 4-7 ที่พบว่าปริมาณสารหนูจากการชะละลายถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดด้วยวิธี WET มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการการย่อยถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน EPA 3051A (USEPA, 2007) ในหัวข้อ 4.4.1 ตารางที่ 4-4 พบว่ามีปริมาณสารหนูที่สกัดได้จากถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดสอดคล้องกับที่ชะละลายจากถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดได้ด้วยวิธี WET โดยพบสารหนูปริมาณ 73.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่ามีปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ที่ทดสอบ นอกจากนี้สำหรับถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดจากโรงไฟฟ้ามีรายงานว่าพบสารหนูเป็นปริมาณมาก ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณเหล็ก (Fe) ที่สะสมในอนุภาคขนาดเล็ก (Baba และคณะ, 2008) จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence: XRF) ในหัวข้อ 4.1.1.1 ตารางที่ 4-1 พบว่าในถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดมีปริมาณ  $Fe_2O_3$  ร้อยละ 12.4 โดยมวล ซึ่งถือว่ามีปริมาณมากเมื่อเทียบกับถ้ำลอยชนิดอื่น ๆ ที่ทดสอบ จึงมีผลทำให้พบสารหนูในถ้ำลอยถ่านหินลิคนัดในปริมาณที่มากกว่าในถ้ำลอยชนิดอื่น ๆ เมื่อชะละลายด้วยวิธี WET ซึ่งสอดคล้องกับหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณสารหนูที่สามารถชะละลายจากถ้ำลอยคือปริมาณของเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ในถ้ำลอย เป็นที่พบว่า  $Fe_2O_3$  มีความสัมพันธ์กับการทำให้ไม่เคลื่อนที่ (immobilization) ของสารหนูในน้ำ (Leelarungroj และคณะ, 2018)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการชะละลายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ได้รับจากโรงเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทยในช่วงเดือน พฤษภาคม 2561 ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ กับผลการชะละลายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแหล่งอื่น ๆ ในประเทศไทยด้วยวิธี TCLP ดังตารางที่ 4-10 พบว่าโดยส่วนใหญ่ชนิดของสารที่ถูกชะละลายออกมามีปริมาณที่สอดคล้องกัน โดยเฉพาะปริมาณตะกั่วที่พบมากในถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีปริมาณสอดคล้องกับผลการชะละลายถ้ำลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแหล่งที่ 3 (Dontriros, 2019)

ตารางที่ 4-10 ผลการชะละลายของเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากแหล่งอื่นในประเทศไทย ด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน EPA 1311

ธาตุ	เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน (มิลลิกรัม/ลิตร)				มาตรฐาน TCLP (มิลลิกรัม/ลิตร) (USEPA, 2009)
	MFA	แหล่งที่ 1	แหล่งที่ 2	แหล่งที่ 3	
Ba	2.30	1.273	0.322	-	100.0
Ag	0.01	<0.007	<0.007	-	5.0
As	0.01	<0.007	<0.10	<0.005	5.0
Hg	0.02	<0.005	<0.005	-	0.2
Se	0.01	<0.080	<0.10	-	1.0
Cr	0.10	0.062	0.043	0.095	5.0
Cd	<0.005	<0.004	<0.005	<0.005	1.0
Pb	<b>6.46</b>	1.369	2.033	<b>6.820</b>	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

MFA = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทย เก็บในช่วงเดือน พฤษภาคม 2561 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

แหล่งที่ 1 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Inthasaro, 2002)

แหล่งที่ 2 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Sancharoen, 2003)

แหล่งที่ 3 = เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนจากงานวิจัยของ (Dontriros, 2019)

#### 4.3 ผลการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอย และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

##### 4.3.1 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน






จากผลการศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากถึงร้อยละ 100 กล่าวคือสามารถใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมด ในขณะที่การใช้เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 โดยเมื่อใช้เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใน



สัดส่วนร้อยละ 100 พบว่าถึงแม้จะสามารถขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ แต่หลังจากนำมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ดังกล่าวเกิดการสลายตัว ไม่สามารถคงรูปเป็นชิ้นมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ได้

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักและวัดมิติของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบโดยตรง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อาคารปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าแนวโน้มในภาพรวมเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลง สำหรับความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทดสอบโดยดัดแปลงจากวิธีตาม ASTM C373-88 (ASTM C373-88, 2006) ณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ (ศนว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในมอร์ตาร์ ส่งผลทำให้ความพรุนตัวของมอร์ตาร์นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างชัดเจน ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์แสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

ลำดับ	ชื่อสูตร	ชนิดของเถ้าลอย	ปริมาณเถ้าลอย (%)	ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความพรุนตัว (%)	รูปภาพมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.
1.	FA0	ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ	0	1,920	12.35	
2.	LFA25	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์	25	1,936	21.62	
3.	LFA50		50	1,857	20.17	
4.	LFA75		75	1,934	21.10	
5.	LFA100		100	1,809	24.11	
6.	BFA25		เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส	25	1,775	19.37

ลำดับ	ชื่อสูตร	ชนิดของ เถ้าลอย	ปริมาณ เถ้าลอย (%)	ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความพรุนตัว (%)	รูปภาพมอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.
7.	BFA50		50	1,820	19.40	
8.	BFA75		75	1,748	24.34	
9.	BFA100		100	หมายเหตุ มอร์ตาร์สูญเสียการคงรูป หลังจากการบ่มน้ำ 28 วัน		
10.	MFA25	เถ้าลอย จาก เตาเผา ขยะชุมชน	25	1,836	17.38	
11.	MFA50		50	1,735	20.09	
12.	MFA75		75	1,742	19.88	
13.	MFA100		100	หมายเหตุ มอร์ตาร์สูญเสียการคงรูป หลังจากการบ่มน้ำ 28 วัน		





หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

#### 4.3.2 กรณีศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์โดยใช้กากคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากผลการศึกษาการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) พบว่าสามารถใช้กากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่ทรายละเอียดซึ่งทำหน้าที่เป็นมวลรวมละเอียดในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้มากถึงร้อยละ 100 กล่าวคือสามารถใช้กากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียดได้ทั้งหมด

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักและวัดมิติของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบโดยตรง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อาคารปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตแทนที่ทรายละเอียดซึ่งทำหน้าที่เป็นมวลรวมละเอียดในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ในสัดส่วนร้อยละ 50 – 75 จะมีผลทำให้มอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีความหนาแน่นมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบในมอร์ตาร์จนถึงร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มความหนาแน่นลดลง สำหรับความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ทดสอบโดยดัดแปลงจากวิธีตาม ASTM C373-88 (ASTM C373-88, 2006) ณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ (ศนว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตแทนที่ทรายละเอียดซึ่งทำหน้าที่เป็นมวลรวมละเอียดในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ในสัดส่วนร้อยละ 50 – 75 จะมีผลทำให้มอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีความพรุนตัวลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบในมอร์ตาร์จนถึงร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มความพรุนตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะผกผันกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากคอนกรีตที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดกับความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ทดสอบ ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียดแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ ความหนาแน่น และความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ลำดับ	ชื่อสูตร	ชนิดของกากคอนกรีต	ปริมาณกากคอนกรีต (%)	ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	ความพรุนตัว (%)	รูปภาพมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.
14.	CW25	กากคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	25	1,957	17.48	
15.	CW50		50	2,033	10.77	
16.	CW75		75	2,034	10.25	
17.	CW100		100	1,981	13.91	

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

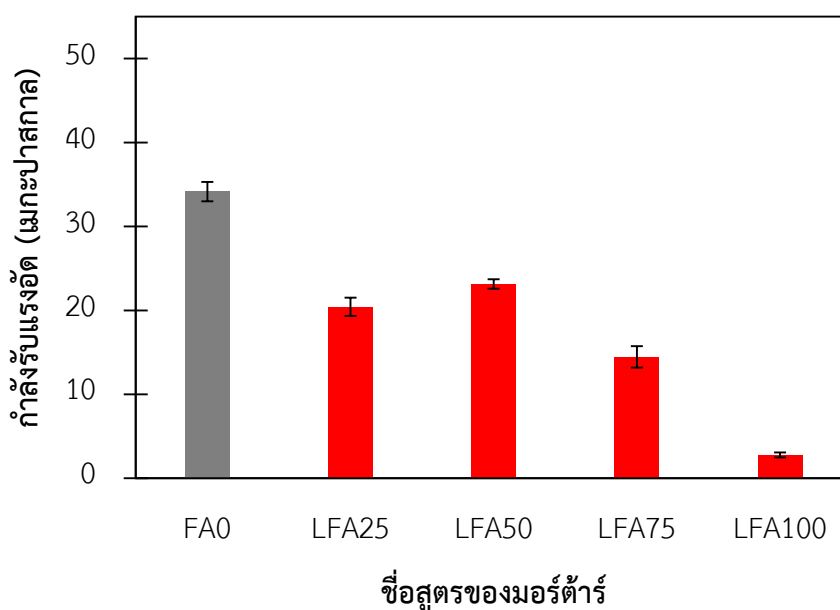
#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์

##### 4.4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

###### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75

และ 100 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเป็น  $34.2 \pm 1.2$   $20.4 \pm 1.1$   $23.1 \pm 0.6$   $14.5 \pm 1.3$  และ  $2.8 \pm 0.3$  เมกะปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพรวมว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 และ 50 ที่ยังมีความสัมพันธ์ไม่สอดคล้องกับตัวอย่างอื่น ในเบื้องต้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 เรื่องชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพ 8 ไว้ 10.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 10.0 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 และ 75 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของอิฐคอนกรีตไว้ 17.2 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-16



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%

LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

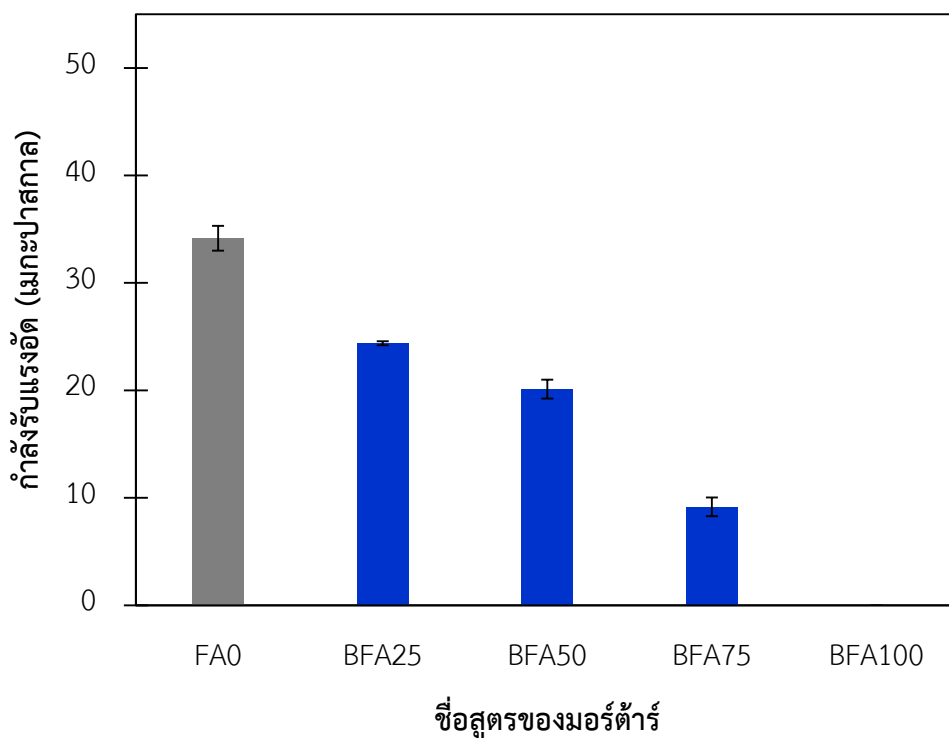
LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

**รูปที่ 4-16** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ

## 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วน ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยมอร์ตาร์ ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเป็น  $34.2 \pm 1.2$   $24.4 \pm 0.2$   $20.1 \pm 0.9$  และ  $9.2 \pm 0.9$  เมกะ ปาสกาล ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์เกิดการสลายตัวหลังจากผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของ มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ในเบื้องต้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 เรื่องชิ้นส่วน คอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับ แรงอัดมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพ 8 ไว้ 10.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 10.0 เม กะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐาน ของอิฐคอนกรีตไว้ 17.2 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบใน สัดส่วนร้อยละ 25 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 ผลการทดสอบกำลัง รับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-17



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

BFA100 = เถ้าลอยบิทูมินัส 100%

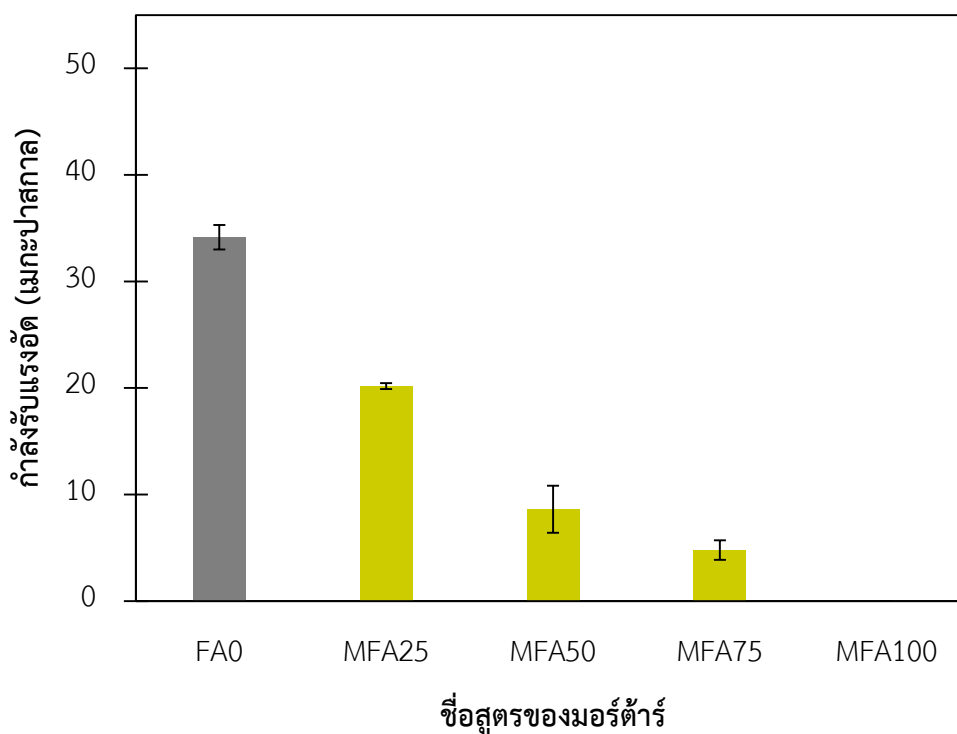
**รูปที่ 4-17** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ

### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเป็น  $34.2 \pm 1.2$   $20.2 \pm 0.3$   $8.6 \pm 2.2$  และ  $4.8 \pm 0.9$  เมกะปาสกาล ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์เกิดการสลายตัวหลังจากผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็น



เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ในเบื้องต้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 เรื่องชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพ 8 ไว้ 10.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 10.0 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.1505 - 2541 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของอิฐคอนกรีตไว้ 17.2 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-18



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

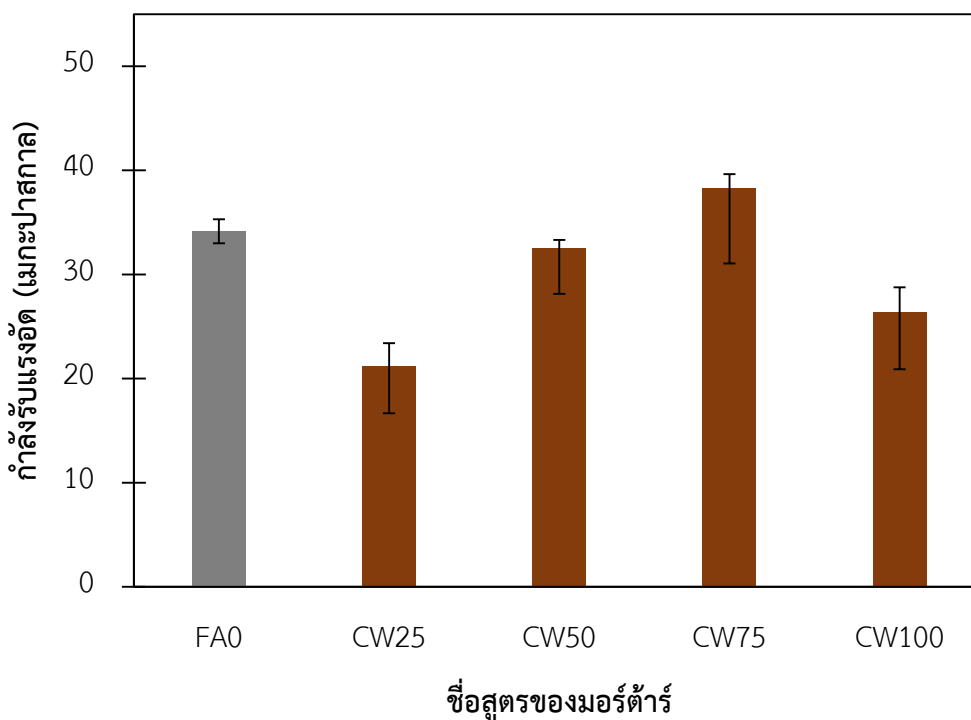
MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

MFA100 = เถ้าลอยขยะชุมชน 100%

**รูปที่ 4-18** ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

#### 4.4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดเป็น  $34.2 \pm 1.2$   $21.2 \pm 2.2$   $32.5 \pm 0.8$   $38.3 \pm 1.4$  และ  $26.4 \pm 2.4$  เมกะปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบ ซึ่งในที่นี้คือทรายละเอียดในสัดส่วนร้อยละ 50 – 75 จะทำให้แนวโน้มของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบของมอร์ตาร์จนถึงร้อยละ 100 พบว่าแนวโน้มของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีกำลังรับแรงอัดลดลง ในเบื้องต้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505 - 2541 เรื่องชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของคอนกรีตมวลเบาชั้นคุณภาพ 8 ไว้ 10.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 10.0 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.1505 – 2541 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) ซึ่งระบุค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดมาตรฐานของอิฐคอนกรีตไว้ 17.2 เมกะปาสกาล พบว่ามอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 มีค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59 – 2561 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-19



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ      CW25 = กากคอนกรีต 25%      CW50 = กากคอนกรีต 50%

CW75 = กากคอนกรีต 75%      CW100 = กากคอนกรีต 100%

#### รูปที่ 4-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2 พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในสัดส่วนร้อยละ 50 ร้อยละ 50 และร้อยละ 25 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีต (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561) สำหรับการใส่กากคอนกรีตแทนที่ทรายละเอียดซึ่งทำหน้าที่เป็นมวลรวมละเอียดในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ พบว่าสามารถใช้กากคอนกรีตแทนที่ทรายละเอียดได้ในสัดส่วนถึงร้อยละ 100 เพื่อให้มอร์ตาร์ที่ขึ้นรูปเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 59 - 2561 เรื่องอิฐคอนกรีตเช่นเดียวกัน

ภาพรวมแนวโน้มของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง สำหรับมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในภาพรวม

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเช่นกัน แต่ก็พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 50 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 25 เล็กน้อย ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอื่น ๆ โดยมีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์วิจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ สำหรับแนวโน้มเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง พบว่าสอดคล้องกับลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบที่พบว่าเมื่อมีการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากกว่าร้อยละ 35 จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Sahmaran และคณะ, 2008) นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ แทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น จะทำให้ปริมาณแคลเซียมในระบบลดลง ทำให้วัสดุคอนกรีตที่ได้มีความหนาแน่นลดลง และมีรูพรุนมากขึ้นซึ่งทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Lim และคณะ, 2013) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบพบว่าเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีแนวโน้มของกำลังอัดที่ต่ำกว่าในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส โดยเกิดจากการที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมีองค์ประกอบทางเคมี เช่น ซิลิกอน (Si) และ อลูมิเนียม (Al) ที่น้อยกว่าที่พบในเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส (Dontriros, 2019) สำหรับระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์ โดยเฉพาะในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบยังมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยในปริมาณมากจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดในช่วงแรกเกิดได้น้อย จึงต้องใช้ระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์นานมากขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอซโซลาน (pozzolanic reaction) ซึ่งต้องใช้เวลานานมากกว่าในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (Adesina และ Awoyera, 2019)

## CHULALONGKORN UNIVERSITY

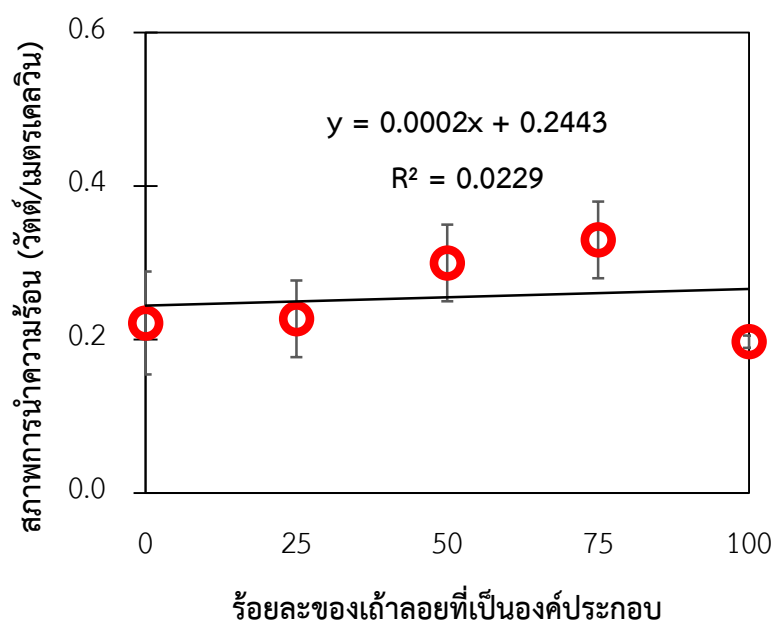
สำหรับมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบพบว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตในสัดส่วนที่มากกว่าร้อยละ 75 จะทำให้แนวโน้มกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง สาเหตุหลักที่ทำให้การใช้วัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยหรือมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิลเป็นองค์ประกอบมีผลต่อกำลังรับแรงอัดคือการที่เถ้าลอยหรือมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิลมีผลทำให้ความพรุนตัวของวัสดุคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Singh, Kumar และ Goyal, 2019) จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 4-9 และตารางที่ 4-10 กับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2 พบว่าเมื่อมอร์ตาร์มีร้อยละความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง

#### 4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์

##### 4.5.1 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

###### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด  $10 \times 10 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM C518 (ASTM C518-98, 1998) ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ทำให้มอร์ตาร์มีสภาพการนำความร้อนเป็น  $0.22 \pm 0.07$   $0.23 \pm 0.05$   $0.30 \pm 0.05$   $0.33 \pm 0.05$  และ  $0.20 \pm 0.01$  วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) ของข้อมูลพบว่ามีค่าใกล้เคียงไปทางค่าน้อย ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์กับสภาพการนำความร้อนในมอร์ตาร์ยังไม่ชัดเจน โดยคาดว่าเป็นผลมาจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ที่ช่วยในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งควรได้รับการปรับปรุงในโอกาสต่อไป ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแสดงในรูปแบบที่ 4-20

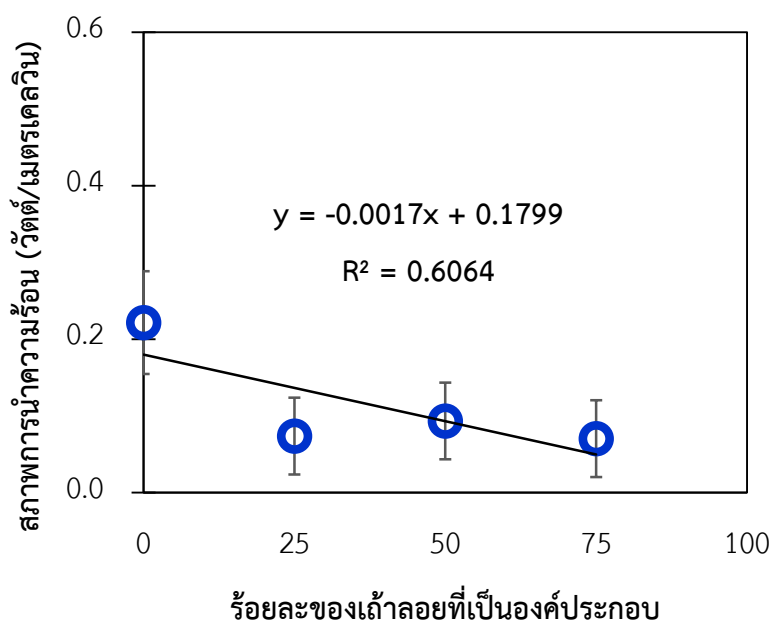


หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

## รูปที่ 4-20 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ

### 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด  $10 \times 10 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM C518 (ASTM C518-98, 1998) ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ทำให้มอร์ตาร์มีสภาพการนำความร้อนเป็น  $0.22 \pm 0.07$   $0.07 \pm 0.05$   $0.09 \pm 0.05$  และ  $0.07 \pm 0.05$  วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์เกิดการสลายตัวหลังจากผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในภาพรวมเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง กล่าวคือมอร์ตาร์นั้นมีแนวโน้มเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) ของข้อมูลพบว่ามีค่าใกล้เคียงค่ามาก ซึ่งในเบื้องต้นถือว่าปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่แทนที่ปูนซีเมนต์กับสภาพการนำความร้อนในมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กัน แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะระหว่างมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยกันพบว่ามีความสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ไม่แตกต่างกันมาก ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-21



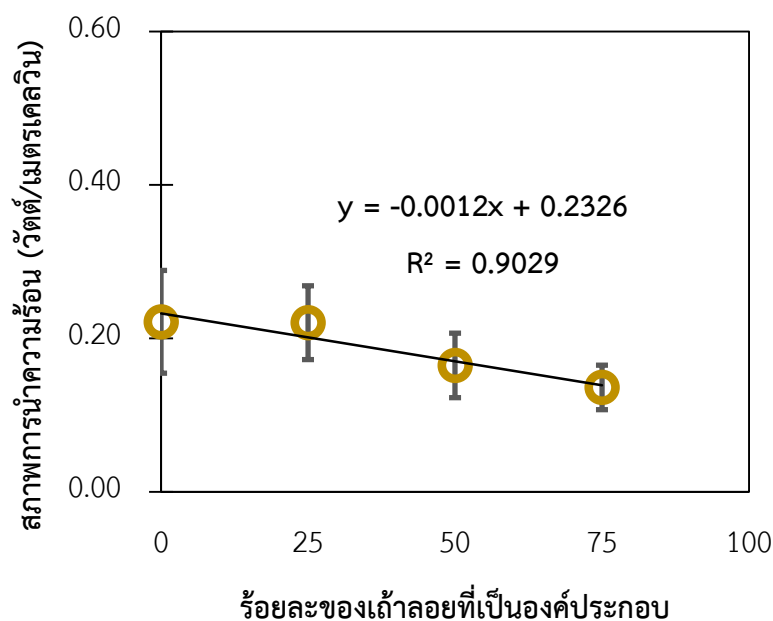
หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

**รูปที่ 4-21** ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทุมินัสเป็นองค์ประกอบ

3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด 10 × 10 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM C518 (ASTM C518-98, 1998) ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ทำให้มอร์ตาร์มีสภาพการนำความร้อนเป็น 0.22 ± 0.07 0.22 ± 0.05 0.16 ± 0.04 และ 0.14 ± 0.03 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 100 พบว่ามอร์ตาร์เกิดการสลายตัวหลังจากผ่านการบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในภาพรวมเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง กล่าวคือมอร์ตาร์นั้นมีแนวโน้มเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination; R<sup>2</sup>)

ของข้อมูลพบว่ามีความใกล้เคียงค่ามาก ซึ่งในเบื้องต้นถือว่าปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่แทนที่ปูนซีเมนต์กับสภาพการนำความร้อนในมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กัน ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-22



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

รูปที่ 4-22 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

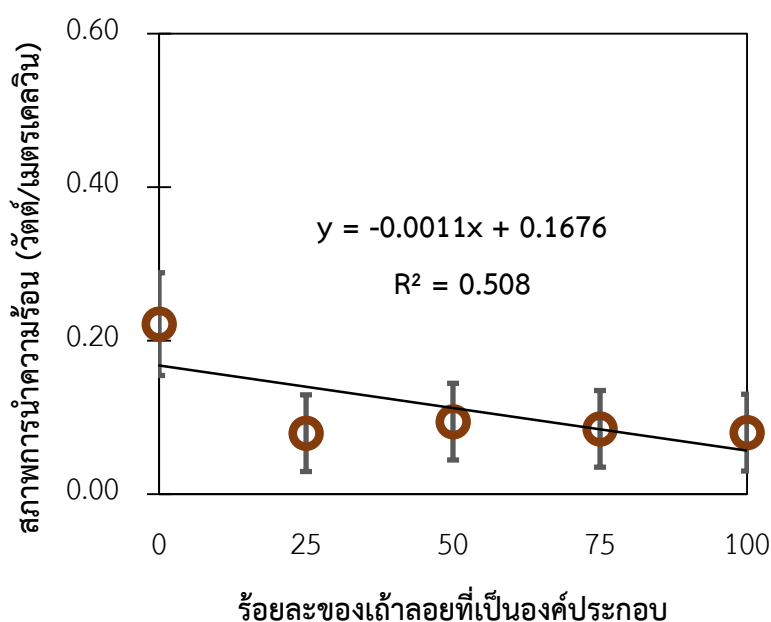
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5.2 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ด้วยมอร์ตาร์ขนาด 10 x 10 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM C518 (ASTM C518-98, 1998) ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน พบว่าเมื่อใช้กากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ทำให้มอร์ตาร์มีสภาพการนำความร้อนเป็น  $0.22 \pm 0.07$   $0.08 \pm 0.05$   $0.09 \pm 0.05$   $0.09 \pm 0.05$  และ  $0.08 \pm 0.05$  วัตต์ต่อเมตรเคลวิน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในภาพรวมเมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์มี



แนวโน้มลดลง กล่าวคือมอร์ตาร์นั้นมีแนวโน้มเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination;  $R^2$ ) ของข้อมูลพบว่ามีค่าใกล้เคียงไปทางค่ามาก ซึ่งในเบื้องต้นถือว่าปริมาณกากคอนกรีตที่แทนที่ทรายละเอียดซึ่งเป็นมวลรวมละเอียดกับสภาพการนำความร้อนในมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กัน แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะระหว่างมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบด้วยกันพบว่ามีค่าสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ไม่แตกต่างกันมาก ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแสดงในรูปที่ 4-23



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

รูปที่ 4-23 ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.5.1 และ 4.5.2 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มของสภาพการนำความร้อนต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบเล็กน้อย กล่าวคือมีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ในขณะที่สภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบพบว่าแนวโน้มของสภาพการนำความร้อนยังไม่ชัดเจน ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์วิจัยที่ยังไม่เหมาะสมกับการทดลอง สำหรับภาพรวมของค่าสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะพบว่าไม่ได้มีค่า

แตกต่างกันมากนัก โดยมอร์ตาร์ที่มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำที่สุดคือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหิน บิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 และ 75 ที่มีค่าสภาพการนำความร้อน  $0.07 \pm 0.05$  วัตต์ต่อเมตรเคลวิน เมื่อเปรียบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุคอนกรีตที่มีเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.15 – 0.31 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Demirboğa, Ramazan, 2003; Duran-Herrera และคณะ, 2016) ส่วนกรณีค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุคอนกรีตที่มีมวลรวมชนิดต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.067 – 0.36 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Tasdemir, Sengul และ Tasdemir, 2017) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในงานวิจัยนี้

ในการใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นองค์ประกอบสำหรับขึ้นรูปวัสดุคอนกรีตจะส่งผลให้วัสดุคอนกรีตที่ได้มีลักษณะเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำเช่นเดียวกัน (Adesina และ Awoyera, 2019) หนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุคอนกรีตคือความหนาแน่นของวัสดุ โดยพบว่าวัสดุคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำจะทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุคอนกรีตต่ำด้วย (R. Demirboğa, 2007) และสำหรับการใช้เถ้าลอยเป็นองค์ประกอบในลักษณะของสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (mineral admixture) พบว่ามีผลในการลดค่าสภาพการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (Demirboğa, Ramazan, 2003) จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบความหนาแน่นและความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบดังตารางที่ 4-11 และตารางที่ 4-12 กับสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.5.1 และ 4.5.2 พบว่าเมื่อมอร์ตาร์มีความหนาแน่นลดลงและมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้สภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง

#### 4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์

##### 4.6.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

##### 4.6.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E1050 (ASTM E1050-98, 1998) ณ บริษัท จีไอเอเอส (ไทยแลนด์) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 ถึง 200 เฮิรตซ์ ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในภาพรวม มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ แต่ที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ภาพรวมในช่วงความถี่ 315 ถึง 6,300 เฮิรตซ์ พบว่าช่วงแรกมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 มีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจนถึง 1,250 เฮิรตซ์ พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบมีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกั้นเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ก็พบว่ามีค่า 0.15 0.19 0.13 0.12 และ 0.12 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเสียงที่ต่ำกว่าค่าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ที่ 0.60 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-13 และรูปที่ 4-24

ตารางที่ 4-13 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยถ่านหินลิกไนต์  
เป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (ความหนา 5 ซม.)					
	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	กทพ.
63	0.06	0.02	0.11	0.07	0.04	-
80	0.06	0.01	0.08	0.06	0.03	-
100	0.08	0.04	0.07	0.06	0.02	-
125	0.11	0.05	0.08	0.07	0.04	1.05
160	0.08	0.07	0.09	0.08	0.05	-
200	0.07	0.09	0.06	0.06	0.06	-
250	0.18	0.19	0.22	0.27	0.29	1.07
315	0.07	0.15	0.06	0.05	0.05	-
400	0.05	0.17	0.05	0.04	0.04	-
500	0.05	0.26	0.05	0.04	0.04	1.08
630	0.04	0.18	0.05	0.05	0.04	-
800	0.03	0.10	0.04	0.06	0.03	-
1000	0.10	0.13	0.07	0.08	0.06	0.93
1250	0.15	0.15	0.11	0.10	0.09	-
1600	0.19	0.15	0.13	0.13	0.11	-
2000	0.26	0.19	0.17	0.09	0.11	0.75
2500	0.27	0.24	0.18	0.09	0.11	-
3150	0.26	0.24	0.17	0.13	0.19	-
4000	0.27	0.22	0.18	0.11	0.19	0.63
5000	0.28	0.23	0.17	0.10	0.23	-
6300	0.28	0.24	0.20	0.08	0.32	-
NRC	0.15	0.19	0.13	0.12	0.12	0.60

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีแก้วลอยเป็นองค์ประกอบ

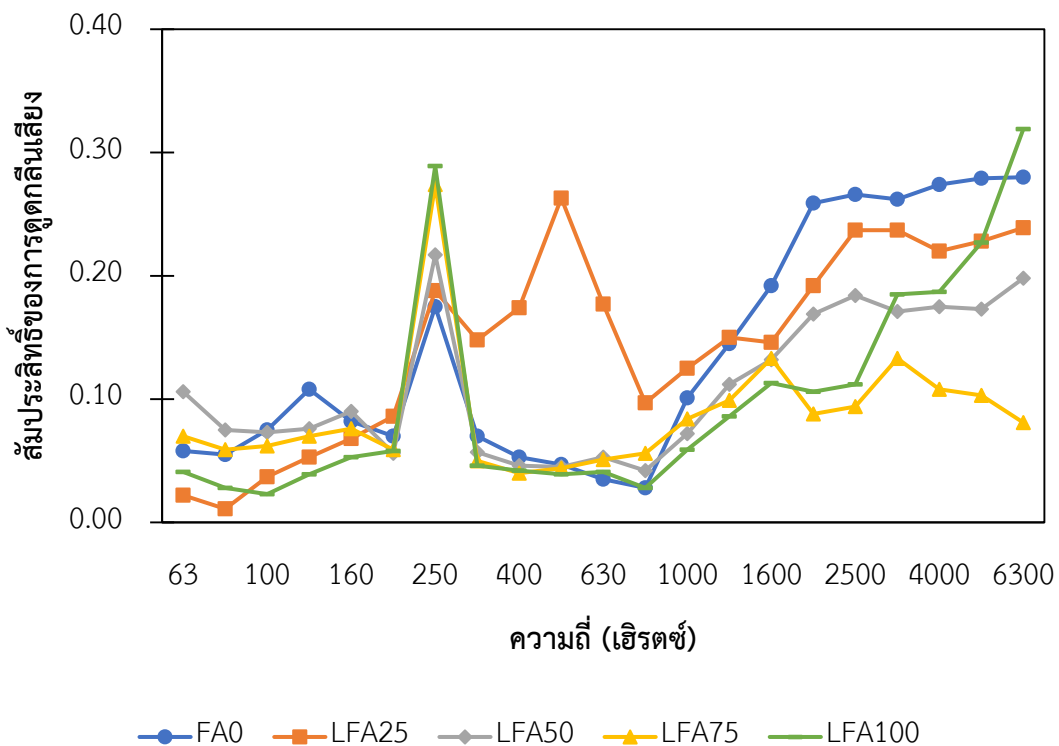
LFA25 = แก้วลอยลิกไนต์ 25%

LFA50 = แก้วลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = แก้วลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = แก้วลอยลิกไนต์ 100%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น  
 คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอเตอร์ที่ไม่มีไส้ลวดเป็นองค์ประกอบ      LFA25 = ไส้ลวดลิกไนต์ 25%      LFA50 = ไส้ลวดลิกไนต์ 50%  
 LFA75 = ไส้ลวดลิกไนต์ 75%      LFA100 = ไส้ลวดลิกไนต์ 100%

**รูปที่ 4-24** ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่มีไส้ลวดถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ

## 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E1050 (ASTM E1050-98, 1998) ณ บริษัท จีไอออนอยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 ถึง 200 เฮิรตซ์ ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ และที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับภาพรวมในช่วงความถี่ 315 ถึง 6,300 เฮิรตซ์ พบว่าช่วงแรกมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 มีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจนถึง 1,250 เฮิรตซ์ พบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบมีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ก็พบว่ามีค่า 0.15 0.17 0.14 และ 0.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเสียงที่ต่ำกว่าค่าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ที่ 0.60 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-14 และรูปที่ 4-25

ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทุมินัสเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (ความหนา 5 ซม.)				
	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	กทพ.
63	0.06	0.08	0.07	0.09	-
80	0.06	0.07	0.09	0.10	-
100	0.08	0.07	0.08	0.09	-
125	0.11	0.09	0.10	0.11	1.05
160	0.08	0.12	0.12	0.11	-
200	0.07	0.11	0.11	0.12	-
250	0.18	0.25	0.23	0.27	1.07
315	0.07	0.09	0.11	0.08	-
400	0.05	0.10	0.11	0.09	-
500	0.05	0.11	0.11	0.09	1.08
630	0.04	0.11	0.11	0.08	-
800	0.03	0.11	0.09	0.08	-
1000	0.10	0.13	0.09	0.12	0.93
1250	0.15	0.15	0.13	0.14	-
1600	0.19	0.17	0.14	0.17	-
2000	0.26	0.21	0.13	0.19	0.75
2500	0.27	0.23	0.14	0.21	-
3150	0.26	0.24	0.18	0.20	-
4000	0.27	0.23	0.14	0.20	0.63
5000	0.28	0.21	0.15	0.19	-
6300	0.28	0.19	0.13	0.18	-
NRC	0.15	0.17	0.14	0.17	0.60

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

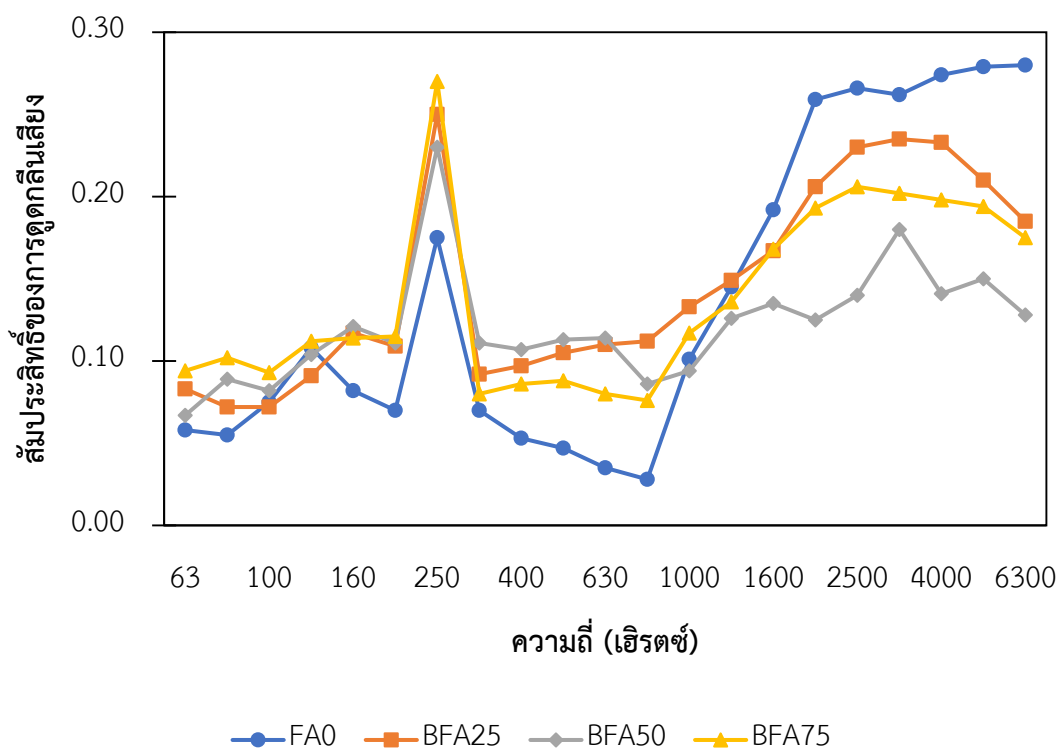
คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทุมินัส 25% BFA50 = เถ้าลอยบิทุมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทุมินัส 75%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

#### รูปที่ 4-25 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ

##### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E1050 (ASTM E1050-98, 1998) ณ บริษัท จี โอนอยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 ถึง 200 เฮิรตซ์ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มี



เก้าอี้เป็นองค์ประกอบ เว้นแต่มอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ที่มีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงต่ำกว่ามอเตอร์ที่ไม่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบ สำหรับที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ พบว่ามอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงกว่ามอเตอร์ที่ไม่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบเช่นกัน ส่วนภาพรวมในช่วงความถี่ 315 ถึง 6,300 เฮิรตซ์ พบว่าช่วงแรกมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 มีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจนถึง 1,250 เฮิรตซ์ พบว่ามอเตอร์ที่ไม่มีเก้าอี้เป็นองค์ประกอบมีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) ของมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ก็พบว่ามีค่า 0.15 0.14 0.13 และ 0.09 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงที่ต่ำกว่าค่าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ที่ 0.60 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-15 และรูปที่ 4-26

**ตารางที่ 4-15** ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่มีเก้าอี้จากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (ความหนา 5 ซม.)				
	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	กทพ.
63	0.06	0.13	0.13	0.04	-
80	0.06	0.11	0.12	0.05	-
100	0.08	0.11	0.12	0.04	-
125	0.11	0.12	0.13	0.05	1.05
160	0.08	0.14	0.11	0.04	-
200	0.07	0.12	0.10	0.03	-
250	0.18	0.24	0.21	0.20	1.07
315	0.07	0.12	0.09	0.03	-

ตารางที่ 4-15 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ (ต่อ)

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (ความหนา 5 ซม.)				
	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	กทพ.
400	0.05	0.11	0.08	0.01	-
500	0.05	0.10	0.06	0.02	1.08
630	0.04	0.09	0.05	0.04	-
800	0.03	0.06	0.05	0.02	-
1000	0.10	0.09	0.08	0.05	0.93
1250	0.15	0.09	0.12	0.07	-
1600	0.19	0.09	0.14	0.07	-
2000	0.26	0.12	0.17	0.09	0.75
2500	0.27	0.13	0.18	0.11	-
3150	0.26	0.15	0.17	0.12	-
4000	0.27	0.14	0.16	0.11	0.63
5000	0.28	0.14	0.16	0.10	-
6300	0.28	0.15	0.15	0.09	-
NRC	0.15	0.14	0.13	0.09	0.60

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

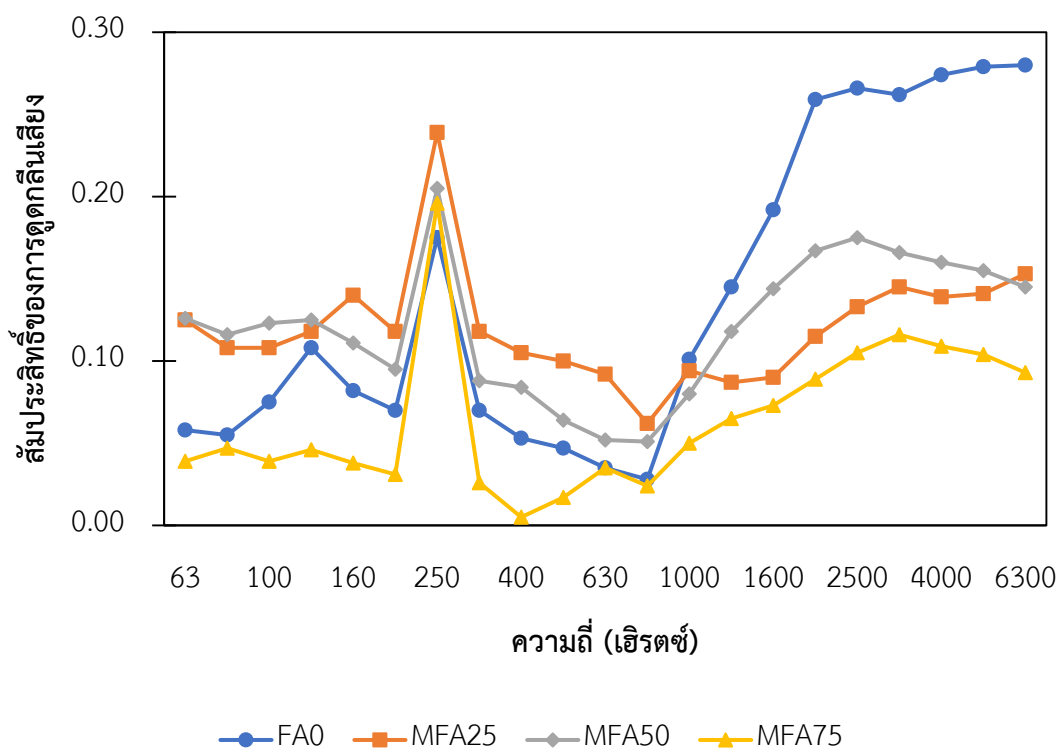
FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

รูปที่ 4-26 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

#### 4.6.1.2 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E2611 (ASTM E2611-09,

2009) ณ บริษัท จีไอโนอยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอย ถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ โดย ช่วงความถี่ 63 ถึง 1,250 เฮิรตซ์ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบมีค่าการ สูญเสียการส่งผ่านเสียงใกล้เคียงกัน แต่หลังจากความถี่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไปพบว่าค่าการสูญเสีย การส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในแต่ละสัดส่วนของเถ้าลอย เริ่มมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการ สูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบกับค่าการสูญเสียการ ส่งผ่านเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มี เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่การทาง พิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่าน หินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-16 และรูปที่ 4-27

**ตารางที่ 4-16** ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็น องค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล) (ความหนา 5 ซม.)					
	FAO	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	กทพ.
63	10	2	2	0	0	-
80	11	4	4	2	2	-
100	13	7	7	4	5	-
125	15	9	10	7	8	21
160	17	11	11	9	9	26
200	19	13	13	10	11	27
250	21	14	15	12	13	29
315	22	15	16	14	14	30
400	22	16	17	15	16	32
500	23	17	18	16	17	33
630	24	19	20	18	18	33
800	24	19	21	19	19	33

**ตารางที่ 4-16** ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ (ต่อ)

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล) (ความหนา 5 ซม.)					
	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	กทพ.
1000	24	19	21	19	21	33
1250	25	20	21	19	16	35
1600	28	23	22	17	28	34
2000	33	26	24	16	20	35
2500	34	29	26	18	5	35
3150	36	28	24	21	12	34
4000	34	30	28	21	-5	35
5000	37	41	29	25	14	-
6300	40	25	30	37	5	-

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีแก้วลอยเป็นองค์ประกอบ

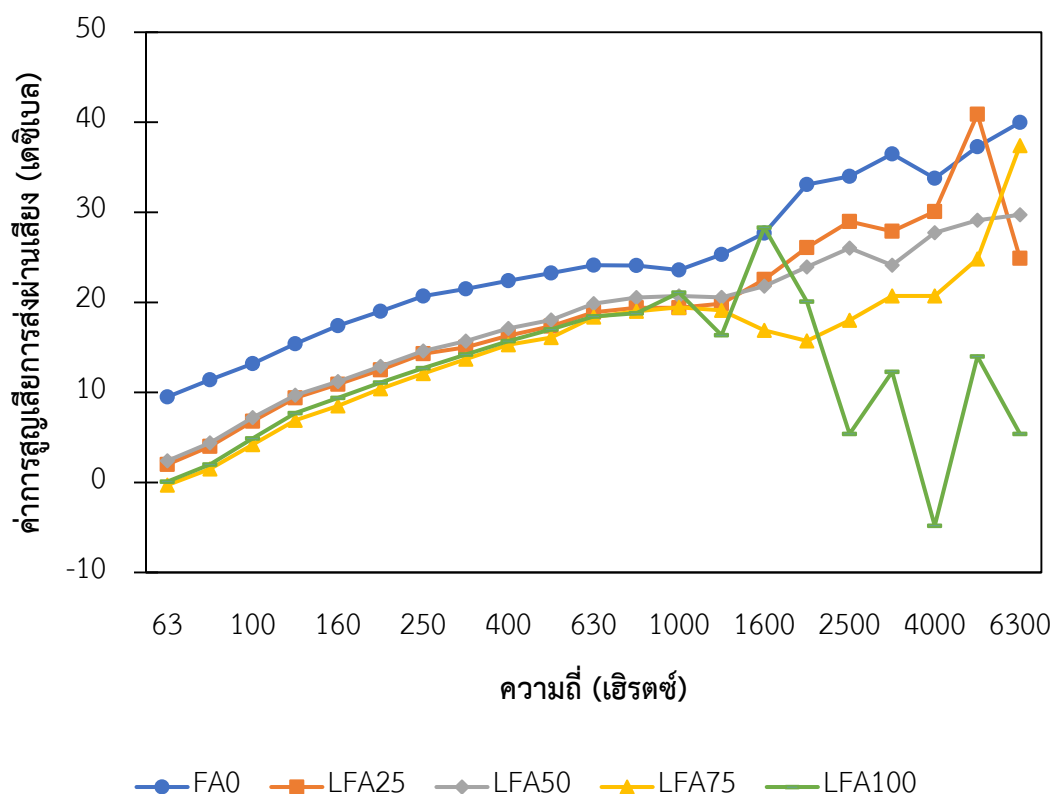
LFA25 = แก้วลอยลิกไนต์ 25%

LFA50 = แก้วลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = แก้วลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = แก้วลอยลิกไนต์ 100%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%

LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

**รูปที่ 4-27** ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็น

องค์ประกอบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินปิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินปิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E2611 (ASTM E2611-09, 2009) ณ บริษัท จีไอโนยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าในช่วงความถี่ 63 ถึง 1,250 เฮิรตซ์ ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงสูงกว่า ได้แก่

มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ และ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 50 และกลุ่มที่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงต่ำกว่า ได้แก่ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 และ 75 แต่หลังจากความถี่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไปพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในแต่ละสัดส่วนของเถ้าลอยเริ่มมีความแตกต่างกัน โดยมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 และ 75 มีแนวโน้มค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบกับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในแต่ละความถี่โดยส่วนใหญ่ต่ำกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ เว้นแต่มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ที่ความถี่ 2,000 2,500 และ 3,150 เฮิรตซ์ และ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ที่ความถี่ 3,150 และ 4,000 เฮิรตซ์ ที่มีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงเป็นไปตามที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-17 และรูปที่ 4-28

ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล) (ความหนา 5 ซม.)				
	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	กทพ.
63	10	2	8	3	-
80	11	4	10	5	-
100	13	7	14	9	-
125	15	10	16	11	21
160	17	12	18	13	26
200	19	13	20	15	27
250	21	15	22	17	29
315	22	16	22	18	30
400	22	17	23	20	32
500	23	18	24	20	33
630	24	20	24	21	33
800	24	20	24	22	33
1000	24	20	24	22	33
1250	25	24	26	24	35
1600	28	23	31	28	34
2000	33	25	36	31	35
2500	34	25	44	33	35
3150	36	25	34	41	34
4000	34	34	34	36	35
5000	37	32	42	49	-
6300	40	35	33	40	-

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

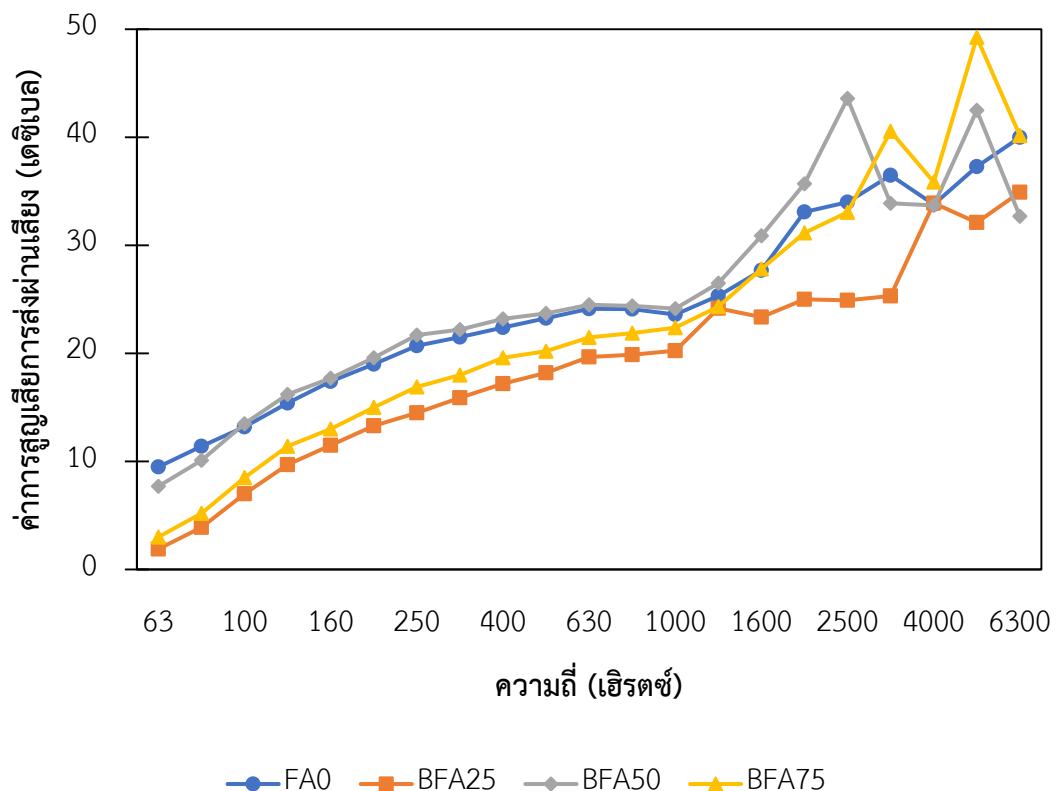
BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย





หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอเตอร์ที่ไม่มีถั่วลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = ถั่วลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = ถั่วลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = ถั่วลอยบิทูมินัส 75%

รูปที่ 4-28 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอเตอร์ที่มีถั่วลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็น

### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E2611 (ASTM E2611-09, 2009) ณ บริษัท จีไอโนออยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำลง ส่วนตั้งแต่ความถี่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไปพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในแต่ละสัดส่วนของเถ้าลอยเริ่มมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อความถี่สูงขึ้นพบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 มีแนวโน้มของค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบกับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกั้นเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-18 และรูปที่ 4-29

ตารางที่ 4-18 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล) (ความหนา 5 ซม.)				
	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	กทพ.
63	10	4	-2	1	-
80	11	6	0	3	-
100	13	9	2	5	-
125	15	12	4	8	21
160	17	14	6	10	26
200	19	15	8	11	27
250	21	17	9	13	29
315	22	18	11	14	30
400	22	20	12	15	32
500	23	20	14	16	33
630	24	22	15	18	33
800	24	22	16	17	33
1000	24	21	17	17	33
1250	25	22	18	21	35
1600	28	27	19	18	34
2000	33	26	22	19	35
2500	34	25	27	7	35
3150	36	22	20	5	34
4000	34	21	22	5	35
5000	37	27	28	21	-
6300	40	16	28	10	-

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

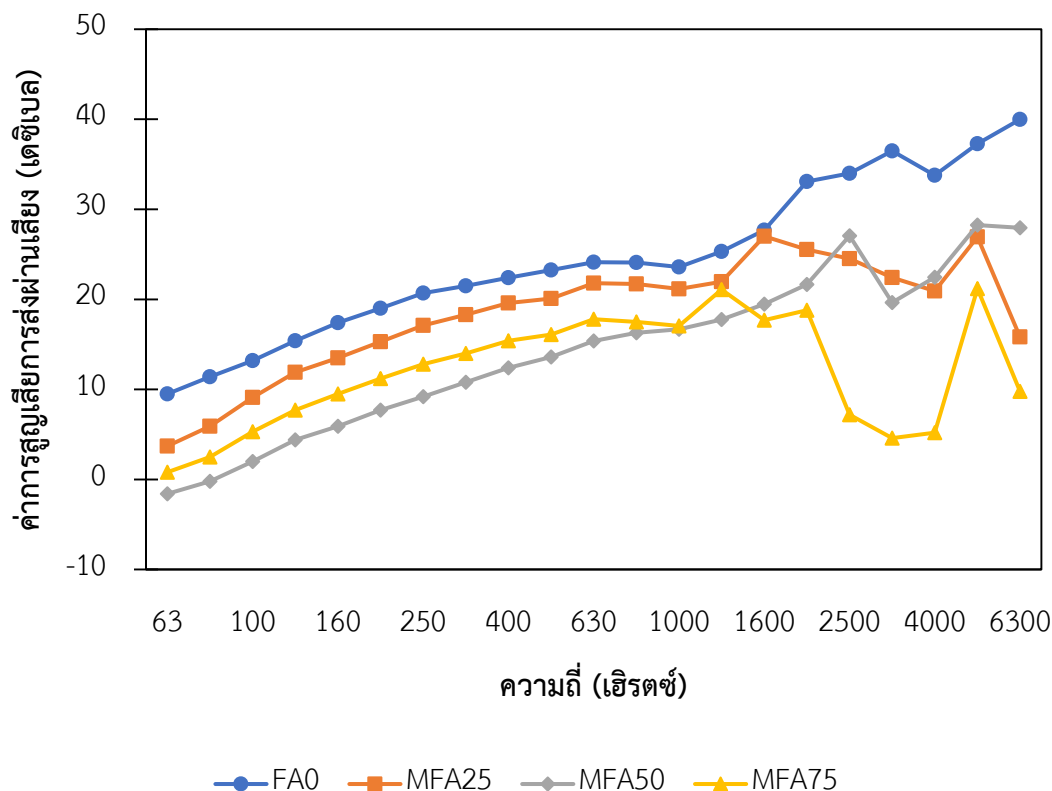
FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอเตอร์ที่ไม่มีเฝ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เฝ้าลอยขณะชุมชน 25%

MFA50 = เฝ้าลอยขณะชุมชน 50%

MFA75 = เฝ้าลอยขณะชุมชน 75%

**รูปที่ 4-29** ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอเตอร์ที่มีเฝ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ

#### 4.6.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียงของมอเตอร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

##### 4.6.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient)

##### ของมอเตอร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการขึ้นรูปมอเตอร์ที่มีกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) ด้วยมอเตอร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E1050 (ASTM E1050-98, 1998) ณ บริษัท จีไอโนยส์

(ไทยแลนด์) พบว่าในช่วงความถี่ 63 ถึง 200 เฮิรตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่มีค่ามากที่สุด คือ มอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ร้อยละ 50 มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ มอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบร้อยละ 100 และร้อยละ 75 ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่ 250 เฮิรตซ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่มีค่ามากที่สุด คือ มอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ร้อยละ 50 ร้อยละ 75 มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ และมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบร้อยละ 100 ตามลำดับ แต่ที่ความถี่ 630 เฮิรตซ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่มีค่ามากที่สุดมีแนวโน้มตรงข้ามกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ 250 เฮิรตซ์ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบที่ความถี่ 630 เฮิรตซ์ มีแนวโน้มเมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับความถี่ตั้งแต่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป พบว่าในภาพรวมมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบใน มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) ของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 ก็พบว่ามีค่า 0.15 0.16 0.15 0.13 และ 0.16 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงที่ต่ำกว่าค่าที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ที่ 0.60 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-19 และรูปที่ 4-30

ตารางที่ 4-19 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (ความหนา 5 ซม.)					
	FA0	CW25	CW50	CW75	CW100	กทพ.
63	0.06	0.18	0.14	0.01	0.03	-
80	0.06	0.22	0.16	0.05	0.05	-
100	0.08	0.24	0.17	0.05	0.08	-
125	0.11	0.22	0.13	0.04	0.05	1.05
160	0.08	0.21	0.12	0.03	0.05	-
200	0.07	0.20	0.12	0.03	0.07	-
250	0.18	0.27	0.23	0.21	0.14	1.07
315	0.07	0.21	0.11	0.07	0.12	-
400	0.05	0.17	0.13	0.07	0.16	-
500	0.05	0.13	0.17	0.12	0.19	1.08
630	0.04	0.13	0.21	0.24	0.29	-
800	0.03	0.10	0.14	0.14	0.17	-
1000	0.10	0.12	0.11	0.09	0.16	0.93
1250	0.15	0.11	0.11	0.09	0.14	-
1600	0.19	0.11	0.09	0.06	0.13	-
2000	0.26	0.13	0.10	0.08	0.16	0.75
2500	0.27	0.15	0.14	0.11	0.20	-
3150	0.26	0.14	0.14	0.10	0.17	-
4000	0.27	0.15	0.11	0.06	0.15	0.63
5000	0.28	0.18	0.13	0.07	0.16	-
6300	0.28	0.18	0.12	0.07	0.10	-
NRC	0.15	0.16	0.15	0.13	0.16	0.60

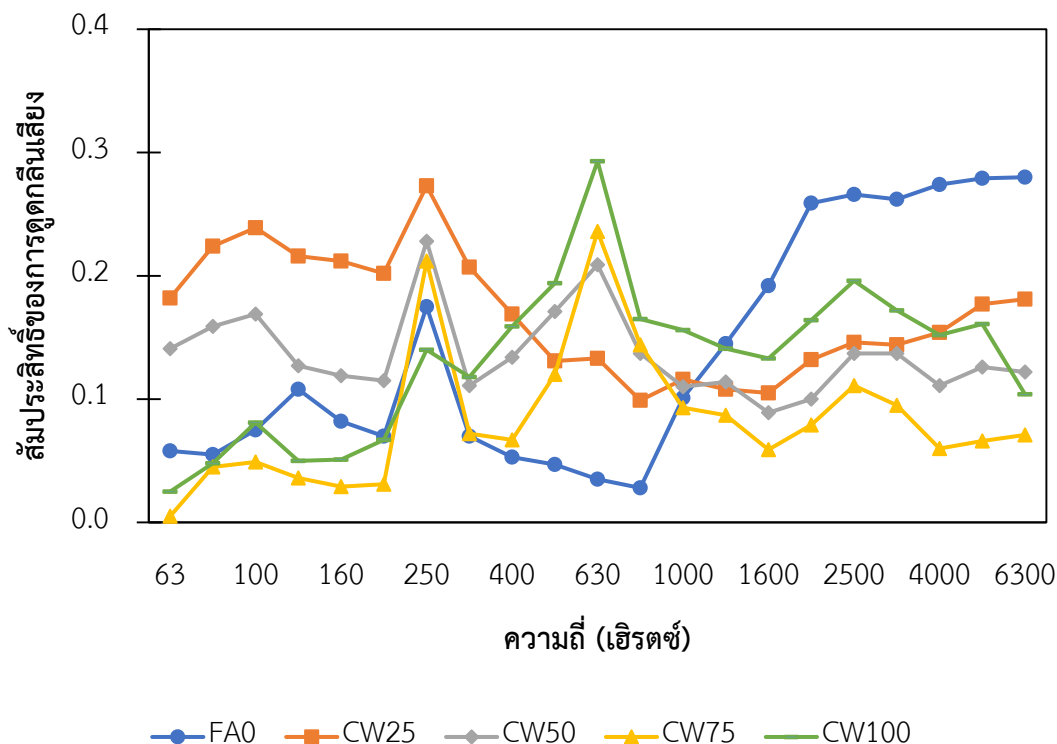
หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ      CW25 = กากคอนกรีต 25%      CW50 = กากคอนกรีต 50%

CW75 = กากคอนกรีต 75%      CW100 = กากคอนกรีต 100%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกันเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ      CW25 = กากคอนกรีต 25%      CW50 = กากคอนกรีต 50%

CW75 = กากคอนกรีต 75%      CW100 = กากคอนกรีต 100%

รูปที่ 4-30 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

#### 4.6.2.2 ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแทนที่มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายละเอียด ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ด้วยมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 และ 3 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในช่วงความถี่ 63 – 1,600 เฮิรตซ์ และ 800 – 6,300 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E2611 (ASTM E2611-09, 2009) ณ บริษัท จีโคโนยส์ (ไทยแลนด์) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์

ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ โดยช่วงความถี่ 63 ถึง 800 เฮิรตซ์ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงใกล้เคียงกัน สำหรับที่ความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำลง แต่หลังจากความถี่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไปพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในแต่ละสัดส่วนของแกลลวยเริ่มมีความแตกต่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตพบว่าตั้งแต่ความถี่ 1,250 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบกับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่ระบุในเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบทุกความถี่มีค่าต่ำกว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่การทางพิเศษแห่งประเทศไทยระบุไว้ ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบแสดงในตารางที่ 4-18 และรูปที่ 4-27



ตารางที่ 4-20 ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล) (ความหนา 5 ซม.)					กทพ.
	FA0	CW25	CW50	CW75	CW100	
63	10	3	3	2	5	-
80	11	5	5	4	7	-
100	13	8	8	7	9	-
125	15	10	11	10	12	21
160	17	12	12	11	13	26
200	19	13	14	13	15	27
250	21	15	15	15	16	29
315	22	16	16	16	17	30
400	22	17	18	17	18	32
500	23	18	19	19	20	33
630	24	20	20	21	21	33
800	24	20	21	23	21	33
1000	24	29	27	26	21	33
1250	25	12	13	13	21	35
1600	28	18	16	18	22	34
2000	33	18	7	26	24	35
2500	34	8	4	13	27	35
3150	36	-9	10	11	30	34
4000	34	-5	9	3	30	35
5000	37	15	23	13	34	-
6300	40	8	16	1	30	-

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

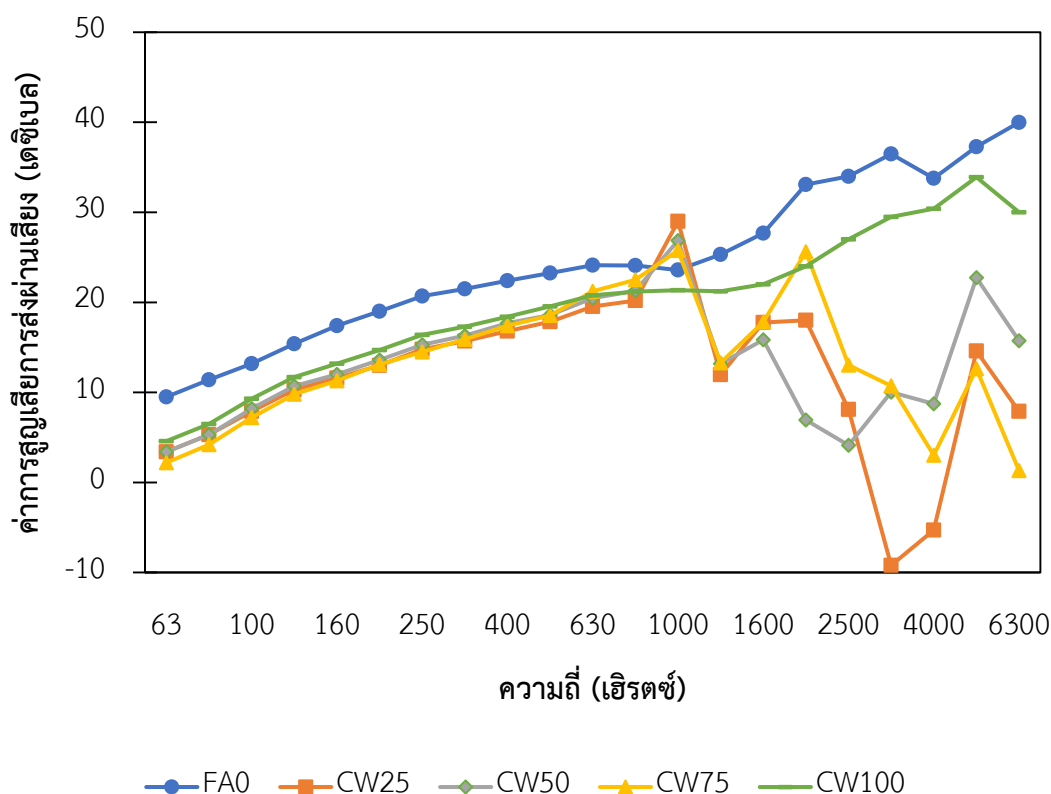
CW25 = กากคอนกรีต 25%

CW50 = กากคอนกรีต 50%

CW75 = กากคอนกรีต 75%

CW100 = กากคอนกรีต 100%

กทพ. = สมบัติของกำแพงกั้นเสียงตามประกาศของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอเตอร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

CW25 = กากคอนกรีต 25%

CW50 = กากคอนกรีต 50%

CW75 = กากคอนกรีต 75%

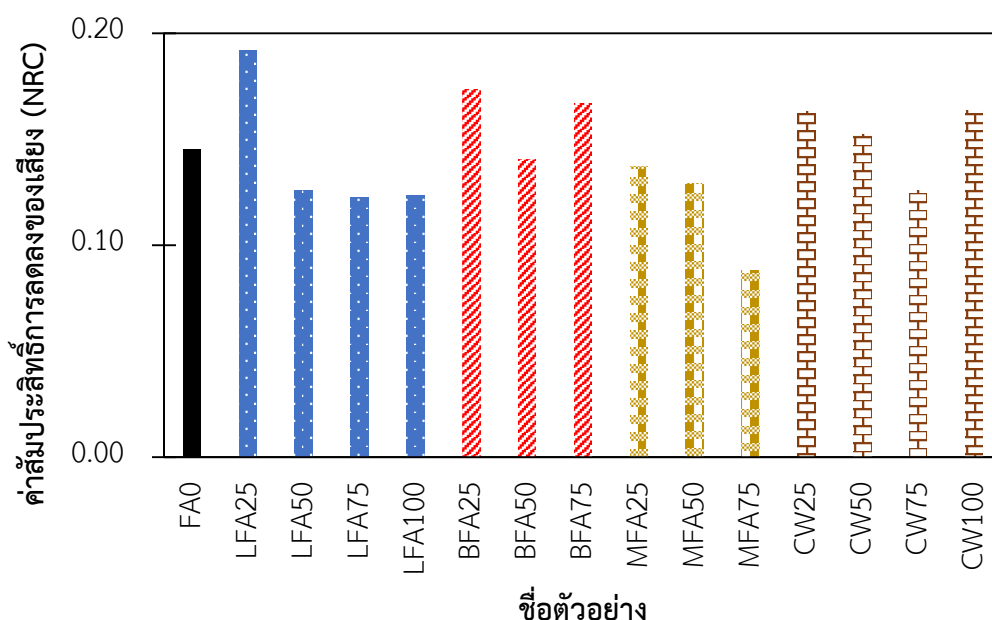
CW100 = กากคอนกรีต 100%

**รูปที่ 4-31** ผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอเตอร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงเสียง ได้แก่ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) และการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอเตอร์ที่ไม่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.6.1 และ 4.6.2 พบว่าในภาพรวมค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงระหว่างมอเตอร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ และมอเตอร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1,000 เฮิรตซ์ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงโดยส่วนใหญ่ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 1,000 เฮิรตซ์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอเตอร์ที่ไม่มีเถ้าลอยมีค่ามากกว่ามอเตอร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient; NRC) พบว่ามอเตอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 โดยส่วนใหญ่มีค่า NRC มากกว่ามอเตอร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ ส่วนมอเตอร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบพบว่ามีค่า NRC มากกว่ามอเตอร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบในตัวอย่างโดยส่วน

ใหญ่ ดังรูปที่ 4-32 ถึงแม้ว่าผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) ดังที่บรรยายในหัวข้อ 4.6.1.1 และ 4.6.2.1 แต่เนื่องจากเสียงจากการจราจรโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ไม่เกิน 1,000 เฮิรตซ์ (ประธาน อารีพล, 2541 อ้างถึงใน บุรฉัตร วิริยะ, 2551) จึงพอสรุปได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบอาจพอใช้งานเป็นกำแพงกันเสียงได้บ้าง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงของวัสดุชนิดอื่น พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มสมบัติใกล้เคียงพื้นที่ปูพรม และมีสมบัติต่ำกว่า โฟมยาง EDPM เล็กน้อย ดังตารางที่ 4-21



หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

LFA = เถ้าลอยลิกไนต์

BFA = เถ้าลอยบิทูมินัส

MFA = เถ้าลอยขยะชุมชน

CW = กากคอนกรีต

รูปที่ 4-32 ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ 4-21 สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

ความถี่ (เฮิรตซ์)	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง					
	LFA25* <sup>1</sup>	BFA25* <sup>1</sup>	MFA25* <sup>1</sup>	CW25* <sup>1</sup>	พื้นปูพรม* <sup>2</sup>	โฟมยาง EPDM* <sup>3</sup>
125	0.05	0.25	0.24	0.22	0.01	-
160	0.07	0.09	0.12	0.21	-	-
200	0.09	0.10	0.11	0.20	-	-
250	0.19	0.11	0.10	0.27	0.02	-
315	0.15	0.11	0.09	0.21	-	-
400	0.17	0.11	0.06	0.17	-	0.07
500	0.26	0.13	0.09	0.13	0.06	0.06
630	0.18	0.15	0.09	0.13	-	0.08
800	0.10	0.17	0.09	0.10	-	0.12
1000	0.13	0.21	0.12	0.12	0.15	0.21
1250	0.15	0.23	0.13	0.11	-	0.28
1600	0.15	0.24	0.15	0.11	-	0.51
2000	0.19	0.23	0.14	0.13	0.25	0.72
2500	0.24	0.25	0.24	0.15	-	0.77
3150	0.24	0.09	0.12	0.14	-	0.60
4000	0.22	0.10	0.11	0.15	0.45	0.48
NRC	0.19	0.17	0.14	0.16	0.12	0.25

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

LFA25 = แก้วลอยลิกไนต์ 25%

BFA25 = แก้วลอยบิซูมินัส 25%

MFA25 = แก้วลอยขยชะมูน 25%

CW25 = กากคอนกรีต 25%

\*1 มอร์ตาร์ทรงกระบอกที่มีแก้วลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ ความหนา 5 เซนติเมตร

\*2 พรมสำหรับปูพื้น (JCW acoustic supplies, 2020)

\*3 แผ่นโฟมยาง EPDM (EPTSEALER) ความหนา 5 มิลลิเมตร (วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์ และคณะ, 2560)

สำหรับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในหัวข้อ 4.6.1.2 และ 4.6.2.2 พบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในภาพรวมมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มี

เก้าอี้หรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ โดยในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1,000 เฮิรตซ์ พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงใกล้เคียงกัน แต่หลังจากความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ เป็นต้นไปพบว่าค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในแต่ละสัดส่วนของเก้าอี้และกากคอนกรีตเริ่มมีความแตกต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเก้าอี้หรือกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มต่ำลง ยกเว้นมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบพบว่ามีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงในบางช่วงความถี่สูงกว่าที่ทดสอบได้ในมอร์ตาร์ที่ไม่มีเก้าอี้หรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ ถึงแม้ว่าผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงจะไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการว่าจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) (การทางพิเศษแห่งประเทศไทย, 2563) ดังที่บรรยายในหัวข้อ 4.6.1.2 และ 4.6.2.2 แต่เนื่องจากเสียงจากการจราจรโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความถี่ไม่เกิน 1,000 เฮิรตซ์ (ประธาน อารีพล, 2541 อ้างถึงใน บุรฉัตร วิริยะ, 2551) จึงพอสรุปได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบอาจพอใช้งานเป็นกำแพงกันเสียงได้บ้าง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุชนิดอื่น พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มสมบัติใกล้เคียงแผ่นไม้อัดและมีสมบัติต่ำกว่าแผ่นพลาสติกใสเล็กน้อย ดังตารางที่ 4-22

**ตารางที่ 4-22** ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเก้าอี้กากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล)					
	LFA25* <sup>1</sup>	BFA25* <sup>1</sup>	MFA25* <sup>1</sup>	CW25* <sup>1</sup>	ไม้อัด* <sup>2</sup>	แผ่นพลาสติก* <sup>3</sup>
125	9	10	12	10	17	15
160	11	12	14	12	18	16
200	13	13	15	13	15	17
250	14	15	17	15	19	18
315	15	16	18	16	16	18
400	16	17	20	17	18	20
500	17	18	20	18	19	19
630	19	20	22	20	20	20
800	19	20	22	20	20	21
1000	19	20	21	29	20	23

**ตารางที่ 4-22** ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น (ต่อ)

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (เดซิเบล)					
	LFA25 <sup>*1</sup>	BFA25 <sup>*1</sup>	MFA25 <sup>*1</sup>	CW25 <sup>*1</sup>	ไม้อัด <sup>*2</sup>	แผ่นพลาสติก <sup>*3</sup>
1250	20	24	22	12	21	25
1600	23	23	27	18	20	27
2000	26	25	26	18	19	28
2500	29	25	25	8	19	31
3150	28	25	22	-9	19	33
4000	30	34	21	-5	18	35

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

LFA25 = แก้วลอยลิกไนต์ 25%

BFA25 = แก้วลอยบิซูมินัส 25%

MFA25 = แก้วลอยขยะชุมชน 25%

CW25 = กากคอนกรีต 25%

\*1 มอร์ตาร์ทรงกระบอกที่มีแก้วลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ ความหนา 5 เซนติเมตร

\*2 ไม้อัดชั้นเดียว ความหนา 10 มิลลิเมตร (วิธีทรี สี่ลาศิริวงค์ และคณะ, 2560)

\*3 แผ่นพลาสติกใส ชั้นเดียว ความหนา 3 มิลลิเมตร (วิธีทรี สี่ลาศิริวงค์ และคณะ, 2560)

โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างภายในวัสดุคอนกรีตนั้น วัสดุคอนกรีตที่มีขนาดของรูพรุนและรูปร่างของมวลรวมแตกต่างกันส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (Ngohpok และคณะ, 2018) และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุ สำหรับวัสดุคอนกรีตที่มีมวลรวมที่แตกต่างกันเป็นองค์ประกอบพบว่า นอกจากรูพรุนของวัสดุคอนกรีตที่มีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเสียงของคลื่นเสียงแล้ว รูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของมวลรวมที่ใช้เป็นองค์ประกอบก็มีผลต่อสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุเช่นเดียวกัน โดยอนุภาคที่เป็นทรงกลมแข็งจะมีผลทำให้เกิดการสะท้อนออกของเสียง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของวัสดุมีค่าต่ำลง (บุรฉัตร วิริยะ, 2551) จากผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงและค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีแก้วลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ พบว่ามีบางส่วนที่มีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบความพรุนตัวดังตารางที่ 4-11 และตารางที่ 4-12

#### 4.7 ผลการทดสอบปริมาณโลหะหนักของผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

##### 4.7.1 การย่อยสลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 50 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟตามมาตรฐาน USEPA SW-846 test method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils (USEPA, 2007) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดจากการสกัดจากมอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบคือ แคลเซียม (Ca) และ เหล็ก (Fe) โดยพบปริมาณ 71,209 และ 7,347 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 50 พบแคลเซียม (Ca) และ เหล็ก (Fe) มากที่สุด โดยมีปริมาณ 68,566 และ 15,307 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 50 พบแคลเซียม (Ca) และ อลูมิเนียม (Al) มากที่สุด โดยมีปริมาณ 39,294 และ 7,209 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 50 พบแคลเซียม (Ca) และ อลูมิเนียม (Al) มากที่สุด โดยมีปริมาณ 65,954 และ 4,745 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสำหรับความเข้มข้นทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ (Total Threshold Limit Concentration; TTLC) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) พบว่าไม่มีปริมาณของธาตุใดเกินค่ามาตรฐาน ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 50 ด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟแสดงในตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน EPA 3051A

ธาตุ	ผลการวิเคราะห์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)				มาตรฐาน TTLC (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
	FA0	LFA50	BFA50	MFA50	
Fe	7,347	15,307	5,777	3,736	-
Ca	71,209	68,566	39,294	65,954	-
Na	655	717	354	3,145	-
Al	6,744	12,747	7,209	4,745	-
As	5.63	20.26	4.33	5.32	500
Pb	11.31	6.08	6.42	105	1,000

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

#### 4.7.2 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Toxicity

##### Characteristic Leaching Procedure

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน EPA 1311 (USEPA, 1992) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน EPA (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามอร์ตาร์มีทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณี



ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) และอลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น โซเดียม (Na) และโครเมียม (Cr) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) พรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 75 และ 100 ได้แก่ เงิน (Ag) พรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP แสดงในตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP

ชนิดของธาตุ	เถ้าลอย ลิกไนต์	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน TCLP (มก./ล.)
		FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	
Fe	0.85	<0.005	<0.005	0.02	0.11	2.35	-
Zn	5.02	0.45	<0.005	0.09	1.97	0.18	-
Mn	5.45	<0.005	0.01	0.64	0.80	2.35	-
K	101	33.72	21.14	21.54	15.90	12.69	-
Ca	2,137	1,871	1,765	1,836	884	1,033	-
Mg	160	38.70	21.17	41.73	47.26	48.19	-
Na	41.9	40.98	16.06	18.17	12.39	9.63	-
Al	7.17	0.17	0.05	0.09	1.40	19.06	-
Ba	0.21	0.12	0.29	0.59	0.65	0.218	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.06	0.01	0.03	0.01	0.01	0.06	5.0
Hg	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2

**ตารางที่ 4-24** ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ (มิลลิกรัม/ลิตร)						มาตรฐาน EPA (มก./ล.)
	เถ้าลอย ลิกไนต์	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	
Se	0.03	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.13	0.19	0.16	0.14	0.13	0.07	5.0
Cd	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.31	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%

LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

## 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงภูมิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน EPA 1311 (USEPA, 1992) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน EPA (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้บางธาตุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น แมงกานีส (Mn) และแบเรียม (Ba) เป็นต้น จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์

ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) เงิน (Ag) พรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ได้แก่ เงิน (Ag) พรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ เหล็ก (Fe) เงิน (Ag) พรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP แสดงในตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP

ชนิดของธาตุ	เถ้าลอย บิทูมินัส	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส (มิลลิกรัม/ลิตร)				มาตรฐาน TCLP (มก./ล.)
		FA0	BFA25	BFA50	BFA75	
Fe	0.18	<0.005	<0.005	0.06	<0.005	-
Zn	3.16	0.45	0.09	0.24	0.26	-
Mn	0.32	<0.005	0.35	0.42	0.73	-
K	2,524	33.72	12.48	11.74	27.75	-
Ca	8,936	1,871	1,756	1,758	1,635	-
Mg	2.97	38.70	42.26	42.27	39.83	-
Na	2,786	40.98	12.79	9.360	26.92	-
Al	11.4	0.17	0.04	0.15	0.07	-
Ba	4.06	0.12	0.31	0.40	0.58	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01	5.0
Hg	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.04	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	1.0
Cr	0.05	0.19	0.18	0.20	0.15	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.03	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

### 3) แก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน EPA 1311 (USEPA, 1992) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน EPA (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากแก๊สลอยที่เป็นผง โดยเฉพาะในกรณีของตะกั่ว (Pb) ที่พบมีปริมาณเกินมาตรฐาน EPA เมื่ออยู่ในลักษณะของแก๊สลอย แต่เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์มีค่าไม่เกินมาตรฐาน เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่าทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่มีปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น โครเมียม (Cr) เป็นต้น จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 และ 50 ได้แก่ เงิน (Ag) พรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ เหล็ก (Fe) เงิน (Ag) และพรอท (Hg) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี TCLP แสดงในตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4-26 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี

TCLP

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยขยะชุมชน (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน TCLP (มก./ล.)
	เถ้าลอย ขยะชุมชน	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	
Fe	0.05	<0.005	0.01	0.02	<0.005	-
Zn	3.50	0.45	1.40	1.57	7.00	-
Mn	0.03	<0.005	0.09	0.26	0.83	-
K	2,407	33.72	28.85	63.55	60.54	-
Ca	9,846	1,871	2,003	2,103	2,178	-
Mg	41.4	38.70	44.65	43.74	53.11	-
Na	3,209	40.98	41.20	93.90	92.59	-
Al	0.36	0.17	0.12	0.08	0.08	-
Ba	2.30	0.12	0.21	0.38	0.33	100.0
Ag	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	5.0
Hg	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	0.008	1.0
Cr	0.10	0.19	0.16	0.10	0.05	5.0
Cd	<0.005	<0.005	0.11	0.15	0.50	1.0
Pb	<b>6.46</b>	<0.005	<0.005	<0.005	0.02	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

#### 4.7.3 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงภูมิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) ตามมาตรฐาน EPA 1312 (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามีทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น สังกะสี (Zn) อลูมิเนียม (Al) และสารหนู (As) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 และ 50 ได้แก่ สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 และ 100 ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP แสดงในตารางที่ 4-27

ตารางที่ 4-27 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ (มิลลิกรัม/ลิตร)						มาตรฐาน
	เถ้าลอย ลิกไนต์	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	TCLP (มก./ล.)
Fe	0.06	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	-
Zn	7.96	0.13	<0.005	<0.005	0.64	0.88	-
Mn	0.056	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	6.55	34.84	29.63	21.81	11.78	7.05	-
Ca	559	532	242	147	103	107	-
Mg	2.52	<0.005	<0.005	<0.005	1.62	0.77	-
Na	41.2	32.85	20.38	17.32	10.38	4.914	-
Al	1.77	1.05	2.95	4.76	7.39	8.29	-
Ba	0.12	0.10	0.14	0.042	0.02	0.09	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	0.04	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.06	0.07	0.03	0.04	0.04	0.01	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%    LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

## 2) แก๊สลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วน ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็น องค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบ กำลังรับ แรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) ตามมาตรฐาน EPA 1312 (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็น องค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากแก๊สลอย ที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่า มีทั้งกรณีที่ส่งผลให้ ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดย ธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณ ธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) อลูมิเนียม (Al) และโครเมียม (Cr) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็น องค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น แคลเซียม (Ca) และ แบเรียม (Ba) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็น องค์ประกอบด้วยวิธี SPLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ใน ปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊ส ลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ธาตุที่ถูกชะละลาย ได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP แสดงในตารางที่ 4-28



ตารางที่ 4-28 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน TCLP (มก./ล.)
	เถ้าลอย บิทูมินัส	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	
Fe	0.53	0.01	<0.005	<0.005	0.08	-
Zn	5.06	0.13	<0.005	0.21	0.83	-
Mn	0.035	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	1.47	34.84	13.73	12.06	13.05	-
Ca	55.2	532	193	159	109	-
Mg	3.35	<0.005	<0.005	<0.005	0.80	-
Na	5.99	32.85	13.44	10.170	11.21	-
Al	5.18	1.05	3.88	4.21	5.13	-
Ba	0.67	0.10	0.04	0.03	0.02	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.07	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.07	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.02	0.07	0.05	0.05	0.06	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับ แรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) ตามมาตรฐาน EPA 1312 (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง โดยเฉพาะในกรณีของตะกั่ว (Pb) ที่พบมีปริมาณใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน EPA เมื่ออยู่ในลักษณะของเถ้าลอย แต่เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานมาก นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้บางธาตุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น นอกจากนี้จากการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 และ 75 ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และแคดเมียม (Cd) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี SPLP แสดงในตารางที่ 4-29

ตารางที่ 4-29 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี

SPLP

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยขยะชุมชน (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน
	เถ้าลอย ขยะชุมชน	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	TCLP (มก./ล.)
Fe	<0.005	0.01	<0.005	0.01	0.02	-
Zn	0.48	0.13	<0.005	0.28	0.17	-
Mn	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	2,333	34.84	25.90	51.09	54.45	-
Ca	7,731	532	553	535	559	-
Mg	0.19	<0.005	<0.005	0.26	0.39	-
Na	3,312	32.85	31.47	73.28	80.67	-
Al	0.28	1.05	0.92	2.86	1.26	-
Ba	0.41	0.10	0.16	0.43	0.38	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.09	0.07	0.04	0.01	0.03	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	4.93	<0.005	<0.005	0.02	0.02	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

#### 4.7.4 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบ กำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน (Soluble Threshold Limit Concentration; STLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง โดยเฉพาะในกรณีของสารหนู (As) ที่พบมีปริมาณเกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เมื่ออยู่ในลักษณะของเถ้าลอย แต่เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณสารหนู (As) ที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์มีค่าไม่เกินมาตรฐาน เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่าทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น อลูมิเนียม (Al) แบเรียม (Ba) สารหนู (As) ซีลีเนียม (Se) และแคดเมียม (Cd) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น เงิน (Ag) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ได้แก่ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์

ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ พรอท (Hg) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 100 ได้แก่ เงิน (Ag) และพรอท (Hg) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET แสดงในตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ (มิลลิกรัม/ลิตร)						มาตรฐาน STLC (มก./ล.)
	เถ้าลอย ลิกไนต์	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	
Zn	0.37	9.02	1.40	0.32	0.20	0.59	250.0
Ca	471	1,250	1,312	1,335	1,367	1,161	-
Al	4.75	26.51	25.54	82.32	130	332	-
Ba	1.07	0.12	0.30	0.94	1.74	6.55	100.0
Ag	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	<0.005	5.0
As	<b>11.62</b>	0.10	0.38	1.23	2.25	4.48	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.20	<0.005	0.01	0.02	0.04	0.05	1.0
Cr	0.62	0.65	0.54	0.48	0.52	0.40	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	0.01	1.0
Pb	<0.005	0.01	0.01	<0.005	<0.005	0.05	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%    LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

## 2) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงภูมิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบ

กำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน (Soluble Threshold Limit Concentration; STLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามอร์ตาร์ที่มีทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่มีปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น แคลเซียม (Ca) อลูมิเนียม (Al) แบเรียม (Ba) สารหนู (As) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น โครเมียม (Cr) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 และ 50 ได้แก่ เงิน (Ag)ปรอท (Hg) และแคดเมียม (Cd) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ เงิน (Ag) และปรอท (Hg) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET แสดงในตารางที่ 4-31

**ตารางที่ 4-31** ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน STLC (มก./ล.)
	เถ้าลอย บิทูมินัส	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	
Zn	0.18	9.02	0.44	4.41	3.10	250.0
Ca	39.06	1,250	374	899	2,815	-
Al	52.03	26.51	1.95	13.9	199	-
Ba	2.47	0.12	0.20	0.49	2.34	100.0

ตารางที่ 4-31 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET (ต่อ)

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน WET (มก./ล.)
	เถ้าลอยบิทูมินัส	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	
Ag	<0.005	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.64	0.10	0.14	0.24	0.29	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.10	<0.005	0.01	0.02	0.04	1.0
Cr	0.20	0.65	0.53	0.51	0.42	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	1.0
Pb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.18	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน (Soluble Threshold Limit Concentration; STLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง นอกจากนี้

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้บางธาตุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น สังกะสี (Zn) แบเรียม (Ba) ซีลีเนียม (Se) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 50 และ 75 ได้แก่ เงิน (Ag) และปรอท (Hg) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET แสดงในตารางที่ 4-32

**ตารางที่ 4-32** ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยวิธี WET

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยขยะชุมชน (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน STLC (มก./ล.)
	เถ้าลอย ขยะชุมชน	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	
Zn	2.91	9.02	0.22	0.37	7.89	250.0
Ca	3,223	1,250	532	1,046	777	-
Al	0.88	26.51	226	19.42	24.32	-
Ba	2.85	0.12	0.12	0.20	0.21	100.0
Ag	0.03	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	0.10	0.08	0.06	0.15	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	<0.005	0.01	0.02	0.04	1.0
Cr	0.16	0.65	0.62	0.66	0.82	5.0
Cd	0.02	<0.005	0.01	0.03	0.33	1.0
Pb	0.81	0.01	0.08	0.15	0.87	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%



#### 4.7.5 การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water)

##### 1) เถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิภาคส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) โดยอาศัยวิธีการชะละลายตามวิธีของ EPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) และวิธี EPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเถ้าลอยที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามีทั้งกรณีที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น อลูมิเนียม (Al) และสารหนู (As) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) ซีลีเนียม (Se)

แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 100 ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยตัวนำปราศจากไอออนแสดงในตารางที่ 4-33

**ตารางที่ 4-33** ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์เป็นองค์ประกอบด้วยตัวนำปราศจากไอออน

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์ (มิลลิกรัม/ลิตร)						มาตรฐาน
	เถ้าลอยลิกไนต์	FA0	LFA25	LFA50	LFA75	LFA100	TCLP (มก./ล.)
Fe	0.01	0.01	0.02	<0.005	<0.005	0.01	-
Zn	0.05	<0.005	0.47	<0.005	<0.005	0.11	-
Mn	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	4.13	32.30	20.46	19.21	11.99	7.74	-
Ca	576	507	197	134	79.06	89.22	-
Mg	0.63	<0.005	0.43	<0.005	<0.005	0.17	-
Na	40.25	34.14	14.61	16.05	10.50	6.06	-
Al	0.25	0.97	3.16	5.17	6.66	9.05	-
Ba	0.16	0.08	0.09	0.03	0.01	0.09	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	0.04	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01	<0.005	0.2
Se	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.05	0.06	0.02	0.04	0.03	0.01	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

LFA25 = เถ้าลอยลิกไนต์ 25%    LFA50 = เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

LFA75 = เถ้าลอยลิกไนต์ 75%

LFA100 = เถ้าลอยลิกไนต์ 100%

## 2) แก๊สลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัส

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วน ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็น องค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบ กำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) โดยอาศัย วิธีการชะละลายตามวิธีของ EPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) และวิธี EPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง วิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัส เป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจาก แก๊สลอยที่เป็นผง เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามีทั้งกรณี ที่ส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้ม ลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น โพแทสเซียม (K) และอลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วน ธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณ ธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น สังกะสี (Zn) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และแบเรียม (Ba) เป็นต้น นอกจากนี้จากผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบ ด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ใน ปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีแก๊ส ลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากใน มอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 และ 75 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีแก๊สลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำ ปราศจากไอออนแสดงในตารางที่ 4-34

ตารางที่ 4-34 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยบิทูมินัส (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน
	เถ้าลอยบิทูมินัส	FA0	BFA25	BFA50	BFA75	TCLP (มก./ล.)
Fe	0.01	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	-
Zn	0.05	<0.005	0.07	<0.005	<0.005	-
Mn	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	0.72	32.30	7.83	8.83	13.50	-
Ca	38.0	507	185	118	90.00	-
Mg	2.55	<0.005	0.17	<0.005	<0.005	-
Na	6.81	34.14	6.69	5.95	12.70	-
Al	3.75	0.97	3.17	3.28	4.90	-
Ba	0.45	0.08	0.04	0.02	0.01	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	0.04	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.07	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.02	0.06	0.04	0.03	0.04	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

BFA25 = เถ้าลอยบิทูมินัส 25%

BFA50 = เถ้าลอยบิทูมินัส 50%

BFA75 = เถ้าลอยบิทูมินัส 75%

### 3) เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ordinary portland cement type 1; OPC) ในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยดัดแปลงปฏิกิริยาส่วนผสมจากมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-02, 2002) แล้วทดสอบการชะละลายของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็น

องค์ประกอบในสัดส่วนร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยใช้เศษมอร์ตาร์ที่เหลือจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) โดยอาศัยวิธีการชะละลายตามวิธีของ EPA SW-846 test method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (USEPA, 1992) และวิธี EPA SW-846 test method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) (USEPA, 1994) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ TCLP (USEPA, 2009) และปริมาณธาตุที่ถูกชะละลายจากมอร์ตาร์โดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อชะละลายจากเกลือที่เป็นผง โดยเฉพาะในกรณีของตะกั่ว (Pb) ที่พบมีปริมาณใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน EPA เมื่ออยู่ในลักษณะของเกลือลอย แต่เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ พบว่าปริมาณตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานมาก เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นพบว่ามอร์ตาร์มีทั้งกรณีที่สูงผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและกรณีที่ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง โดยธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น อลูมิเนียม (Al) และแบเรียม (Ba) เป็นต้น ส่วนธาตุที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นแล้วส่งผลให้ปริมาณธาตุที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เช่น สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) และโครเมียม (Cr) นอกจากนี้จากการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่ามีปริมาณของบางธาตุที่สามารถชะละลายออกมาจากมอร์ตาร์ได้ในปริมาณที่น้อยมาก กล่าวคือสามารถชะละลายจากมอร์ตาร์และวัดปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง ICP ได้ปริมาณน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As)ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และแคดเมียม (Cd) ธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 ได้แก่ เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) แมกนีเซียม (Mg) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และแคดเมียม (Cd) และธาตุที่ถูกชะละลายได้ปริมาณน้อยมากในมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยเป็นองค์ประกอบร้อยละ 100 ได้แก่ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) เงิน (Ag) สารหนู (As) ปรอท (Hg) ซีลีเนียม (Se) และแคดเมียม (Cd) ผลการวิเคราะห์การชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเกลือลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออนแสดงในตารางที่ 4-35

ตารางที่ 4-35 ผลการชะละลายมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยน้ำปราศจากไอออน

ชนิดของธาตุ	ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยขยะชุมชน (มิลลิกรัม/ลิตร)					มาตรฐาน
	เถ้าลอย ขยะชุมชน	FA0	MFA25	MFA50	MFA75	TCLP (มก./ล.)
Fe	0.02	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	-
Zn	1.81	<0.005	0.17	<0.005	<0.005	-
Mn	0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	-
K	2,330	32.30	26.64	68.98	59.29	-
Ca	6,224	507	536	649	388	-
Mg	2.58	<0.005	0.24	0.01	<0.005	-
Na	3,192	34.14	30.78	99.48	78.44	-
Al	0.65	0.97	0.97	1.03	2.51	-
Ba	0.66	0.08	0.16	0.40	0.50	100.0
Ag	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Hg	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.2
Se	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Cr	0.10	0.06	0.04	0.03	0.01	5.0
Cd	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	1.0
Pb	3.50	<0.005	0.01	0.03	0.02	5.0

หมายเหตุ ผลการทดลองเฉพาะตัวอย่างที่นำมาศึกษาเท่านั้น

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ

MFA25 = เถ้าลอยขยะชุมชน 25%

MFA50 = เถ้าลอยขยะชุมชน 50%

MFA75 = เถ้าลอยขยะชุมชน 75%

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบด้วยการสกัดและชะละลายมอร์ตาร์ด้วยกรดในหัวข้อ 4.7.1 4.7.2 4.7.3 และ 4.7.4 พบว่าปริมาณธาตุที่ชะละลายจากมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินมาตรฐาน TCLP (USEPA, 2009) และ STLC (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548) รวมถึงปริมาณสารหนู (As) และตะกั่ว (Pb) ที่พบเกินค่ามาตรฐานในเถ้าลอย

ถ่านหินลิกไนต์ และถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชน เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์พบว่าปริมาณสารหนู (As) และตะกั่ว (Pb) ที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจนไม่เกินค่ามาตรฐาน การทำถ่านลอยให้กลายเป็นของแข็ง (solidification) และปรับเสถียรภาพ (stabilization) โดยใช้ปูนซีเมนต์จะช่วยตรึงโลหะหนักในถ่านลอยถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ซึ่งมีผลต่อการลดปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากถ่านลอยได้อย่างมีนัยสำคัญ (Bie และคณะ, 2016) โดยเฉพาะปริมาณตะกั่วในถ่านลอย (Su และคณะ, 2016) ด้วยความสามารถในการตรึงโลหะหนักของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์จะทำให้ตะกั่วมีค่าไม่เกินค่าตามมาตรฐาน (Dontriros, Likitlersuang และ Janjaroen, 2020) ส่วนในกรณีที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลอยที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณธาตุบางชนิดที่ชะละลายได้มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาผลการชะละลายปูนซีเมนต์ดังที่แสดงในภาคผนวก ข.5 หัวข้อใบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ชะละลายได้จากถ่านลอยและมอร์ตาร์ที่มีถ่านลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP) ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าในปูนซีเมนต์มีบางธาตุ เช่น โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) และโครเมียม (Cr) ในปริมาณมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลอยที่เป็นองค์ประกอบจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ธาตุบางกลุ่มที่พบมากในปูนซีเมนต์ถูกชะละลายออกมาได้น้อยลงด้วย

ในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน ปริมาณปรอท (Hg) ในถ่านลอยถ่านหินลิกไนต์ ถ่านลอยถ่านหินบิทูมินัส และถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชน รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่มีถ่านลอยเป็นองค์ประกอบพบว่าสามารถถูกชะละลายออกมาจากถ่านลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีถ่านลอยเป็นองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ได้ในปริมาณที่น้อยมาก โดยมีค่าประมาณ <0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ในบางงานวิจัยพบเช่นเดียวกันว่าพบปริมาณปรอทที่ถูกชะละลายจากถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชนในปริมาณ <0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร (Inthasaro, 2002) ซึ่งถือว่าปริมาณน้อย แต่ในบางงานวิจัยพบว่าปริมาณปรอทในถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในประเทศออสเตรเลียมีค่าเกินมาตรฐานในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเตาเผาปูนซีเมนต์ (Lederer, Trinkel และ Fellner, 2017) ดังนั้นถึงแม้ในงานวิจัยนี้จะพบปรอทในปริมาณที่ต่ำมากแต่ปริมาณปรอทยังคงเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการศึกษาถ่านลอยชนิดต่าง ๆ ต่อไป สำหรับสารกลุ่มไดออกซิน (Dioxins) พบว่าเกิดในกระบวนการเผาของขยะชุมชน และสามารถตกค้างในถ่านลอยได้ (Konduri และ Altwicker, 1994) มีงานวิจัยพบว่าสารในกลุ่ม PCDDs กว่า 94% สามารถถูกกำจัดได้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ (Guorui Liu และคณะ, 2015) โดยถ่านลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในประเทศจีนมีการพบว่าค่าสมมูลความเป็นพิษ (toxic equivalency; TEQ) ของสารกลุ่มไดออกซินมีค่าประมาณ 0.629 นาโนกรัมต่อกรัม ดังนั้นปริมาณสารไดออกซินก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อความปลอดภัยในการใช้ประโยชน์จากถ่านลอย ส่วนด้าน

การใช้งานในระยะยาวมีรายงานพบว่าปริมาณธาตุ เช่น แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ในวัสดุคอนกรีตสามารถถูกชะละลายออกมาได้จากการสูญเสียสภาพความเป็นด่างที่ทำหน้าที่ตรึงโลหะในวัสดุเมื่อถูกชะละลายต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน (Webster และ Loehr, 1996) (Sancharoen, 2003)





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยและกากคอนกรีตกลับมาใช้งานใหม่เป็นองค์ประกอบของวัสดุคอนกรีตโดยศึกษาสมบัติต่าง ๆ ผ่านทางการศึกษามอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนแห่งหนึ่งในภาคใต้ของประเทศไทยที่เก็บในช่วงเดือนพฤษภาคม 2561 ส่วนกากคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยคือ เศษคอนกรีตที่เหลือจากกระบวนการผลิตคอนกรีต ในขั้นต้นได้ศึกษาทั้งสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากคอนกรีต สำหรับเถ้าลอยได้ศึกษาปริมาณโลหะหนักของเถ้าลอยเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเป็นกรณีต่างหาก ในขั้นต่อไปได้ทดลองนำเถ้าลอยและกากคอนกรีตใช้เป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปวัสดุอมอร์ตาร์ โดยกรณีของเถ้าลอยได้ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนกากคอนกรีตใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดในการขึ้นรูปวัสดุอมอร์ตาร์ จากนั้นได้ศึกษาสมบัติเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์เชิงวิศวกรรม ได้แก่ กำลังรับแรงอัด สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้สำหรับผลิตภัณฑ์อมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบได้มีการทดสอบปริมาณโลหะหนักอีกครั้งเพื่อศึกษาปริมาณโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากขึ้นรูปเป็นอมอร์ตาร์ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 1) สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากคอนกรีต

จากผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยพบว่าเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณที่สอดคล้องกับการจัดชั้นคุณภาพเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนพบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่สอดคล้องในการจัดเป็นชั้นคุณภาพใด ในด้านสมบัติทางกายภาพพบว่าอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์โดยส่วนใหญ่มีลักษณะกลม การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีขนาดประมาณ 20 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสจะมีทั้งอนุภาคที่มีลักษณะกลมและอนุภาคที่มีลักษณะเหลี่ยมปะปนอยู่ด้วยกัน มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคประมาณ 19 ไมโครเมตร ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนพบว่าเริ่มมีอนุภาคบางส่วนจับตัวเป็นก้อน โดยส่วนใหญ่มีพื้นผิวขรุขระ มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคประมาณ 18 ไมโครเมตร สำหรับสมบัติทางเคมีของกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตพบว่ากากคอนกรีตมีปริมาณของซิลิกามากที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างจากองค์ประกอบของ

คอนกรีตโดยทั่วไป ในด้านสมบัติทางกายภาพพบว่าอนุภาคของกากคอนกรีตมีรูปร่างเป็นก้อนขรุขระ อสมมาตร โดยมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.20 ถึง 20 มิลลิเมตร

จากผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากคอนกรีตแสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส มีสมบัติที่จะสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ในขณะที่เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนถึงแม้จะไม่สามารถจัดชั้นคุณภาพได้ แต่ด้วยปริมาณขององค์ประกอบอื่น ๆ เช่น แคลเซียม (Ca) ก็แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนและสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนได้ ซึ่งต้องอาศัยการศึกษากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มน้ำที่แตกต่างกันเพิ่มเติมสำหรับกากคอนกรีตที่ตกค้างในแบบหล่อคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีตพบว่าขนาดของอนุภาคที่ครอบคลุมในการใช้งานเป็นได้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวัสดุคอนกรีตโดยศึกษาผ่านทางมอร์ตาร์ ดังนั้นจึงได้เลือกกากคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียด

## 2) การศึกษาการนำเถ้าลอยและกากคอนกรีตขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์ และการใช้ประโยชน์เชิงวิศวกรรม

จากผลการขึ้นรูปมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้กากคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ถึงร้อยละ 100 ในขณะที่เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ส่วนกรณีของการใช้กากคอนกรีตแทนที่มวลรวมละเอียดซึ่งในงานวิจัยนี้คือทรายละเอียดพบว่า สามารถใช้กากคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 100 ในการแทนที่ทรายละเอียดในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ เมื่อนำมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่า มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 2.8 – 23.1 9.2 – 24.4 4.8 – 20.2 และ 21.2 – 38.3 เมกะปาสกาล ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่เป็นองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ส่วนกรณีของกากคอนกรีตพบว่าการใช้กากคอนกรีตเป็นมวลรวมละเอียดในสัดส่วนประมาณร้อยละ 50 – 75 จะทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด

ในด้านการศึกษาสภาพการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ พบว่าในภาพรวมมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็น

องค์ประกอบมีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ กล่าวคือมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบด้วยกันเอง พบว่าปริมาณเถ้าลอยและกากคอนกรีตที่เป็นองค์ประกอบไม่ได้มีผลทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงไปมากนัก โดยพบว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.22 0.20 – 0.33 0.07 – 0.09 0.14 – 0.22 และ 0.08 – 0.09 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ

ในด้านการศึกษาสมบัติเชิงเสียง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ พบว่าภาพรวมของค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1,000 เฮิรตซ์ ของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง (noise reduction coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียงของวัสดุ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียงของมอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.15 0.12 – 0.19 0.14 – 0.17 0.09 – 0.14 และ 0.13 – 0.16 ตามลำดับ สำหรับค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ พบว่าภาพรวมในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1,000 เฮิรตซ์ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่ไม่แตกต่างจากมอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมากนัก โดยมีค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงที่ความถี่ระหว่าง 125 – 4,000 เฮิรตซ์ของมอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยหรือกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงระหว่าง 10 – 36 7 – 30 10 – 44 5 – 27 และ 3 – 30 เดซิเบล ตามลำดับ

ดังนั้นในการนำมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบไปใช้ประโยชน์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับมาตรฐาน มอก. 59-2561 เรื่องอิฐคอนกรีตแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์และเถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัสแทนที่

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในขณะที่ถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 25 ส่วนกากคอนกรีตสามารถใช้แทนที่มวลรวมละเอียดได้ถึงร้อยละ 100 เพื่อให้ได้มอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. 59 ในด้านการนำมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบไปใช้ประโยชน์เป็นฉนวนกันความร้อน พบว่าผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์ที่ได้มีสภาพการนำความร้อนที่ต่ำกว่าคอนกรีตโดยทั่วไปมาก และยังมีสภาพการนำความร้อนอยู่ในช่วงเดียวกับอิฐที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ประโยชน์เป็นฉนวนกันความร้อนได้ สำหรับด้านการนำมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบไปใช้ประโยชน์เป็นกำแพงกันเสียง พบว่าผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์ที่ได้ยังมีสมบัติเชิงเสียงต่ำกว่าข้อกำหนดของการทางพิเศษแห่งประเทศไทย ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของเสียง และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียงไว้ 0.60 และค่าระหว่าง 21 - 35 เดซิเบล ตามลำดับ ดังนั้นในการนำมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยและมอร์ตาร์ที่มีกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบไปใช้ประโยชน์เป็นกำแพงกันเสียงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวหน้าให้มีลวดลายหรือความขรุขระมากขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงเสียง (Celia Arenas และคณะ, 2015) หรือสามารถใช้ผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์ที่ได้เป็นคอนกรีตปูพื้นหรือก่อเป็นกำแพงที่สามารถเป็นฉนวนกันเสียงได้บ้าง

### 3) การศึกษาปริมาณโลหะหนักในถ้าล่อย และมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยเป็นองค์ประกอบ

จากผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในถ้าล่อยถ่านหินลิกไนต์ ถ้าล่อยถ่านหินบิทูมินัส และถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชน ด้วยการชะละลายตามวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) วิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) และวิธี Waste Extraction Test (WET) พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายจากถ้าล่อยโดยส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินมาตรฐานยกเว้นปริมาณตะกั่ว (Pb) และสารหนู (As) ในถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP และถ้าล่อยถ่านหินลิกไนต์ชะละลายด้วยวิธี WET ตามลำดับ แต่เมื่อนำถ้าล่อยถ่านหินลิกไนต์ ถ้าล่อยถ่านหินบิทูมินัส และถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุมอร์ตาร์ พบว่าผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์มีปริมาณโลหะหนักโดยส่วนใหญ่ลดลงและมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน รวมถึงปริมาณตะกั่วและสารหนูที่เคยพบในถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนและถ้าล่อยถ่านหินลิกไนต์ ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำถ้าล่อยขึ้นรูปเป็นมอร์ตาร์แล้วทำให้มีปริมาณตะกั่วและสารหนูมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานเช่นกัน

ดังนั้นมอร์ตาร์ที่มีถ้าล่อยถ่านหินลิกไนต์ ถ้าล่อยถ่านหินบิทูมินัส และถ้าล่อยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบ มีความสามารถในการตรึงโลหะหนักไว้ภายในวัสดุเมื่อถูกชะละลายใน

หลุมฝังกลบขยะตามมาตรฐาน TCLP ถูกชะละลายด้วยฝนกรดตามมาตรฐาน SPLP และไม่ถือว่าเป็นของเสียอันตรายตามมาตรฐาน WET ซึ่งพอจะสามารถเทียบเคียงได้ว่าเมื่อนำผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์นี้ไปใช้งานจะไม่พบการถูกชะละลายโลหะหนักในปริมาณมากในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

## 5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

5.2.1 สามารถนำเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส เถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน และกากคอนกรีต มาประยุกต์ใช้ในรูปของวัสดุคอนกรีตได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์และมวลรวมแล้ว ยังช่วยลดปริมาณของเสียอุตสาหกรรมอย่างเถ้าลอยและกากคอนกรีตที่จะถูกทิ้งในหลุมฝังกลบอีกด้วย

5.2.2 สามารถนำวัสดุที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบกลับมาใช้งานใหม่เป็นฉนวนกันความร้อนได้ และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้เถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบในการผลิตกำแพงกันเสียง ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำขยะอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่แล้ว ยังเป็นการลดปัญหามลพิษทางเสียงอีกด้วย

5.2.3 เกิดองค์ความรู้ในด้านองค์ประกอบและปริมาณโลหะหนักของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชน ซึ่งนำไปสู่แนวทางในการลดความเป็นพิษของของเสียอุตสาหกรรม เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ใหม่หรือกำจัดทิ้งด้วยวิธีการที่เหมาะสม

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

5.3.1 ศึกษาเถ้าลอยรูปแบบอื่น ๆ เช่น เถ้าลอยขยะอุตสาหกรรม เถ้าลอยจากกระบวนการเผาวัสดุ RDF และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนที่ขุดจากหลุมฝังกลบเถ้าลอย เป็นต้น เพื่อเพิ่มองค์ความรู้ในด้านองค์ประกอบและการนำไปใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยที่มีความหลากหลายมากขึ้น

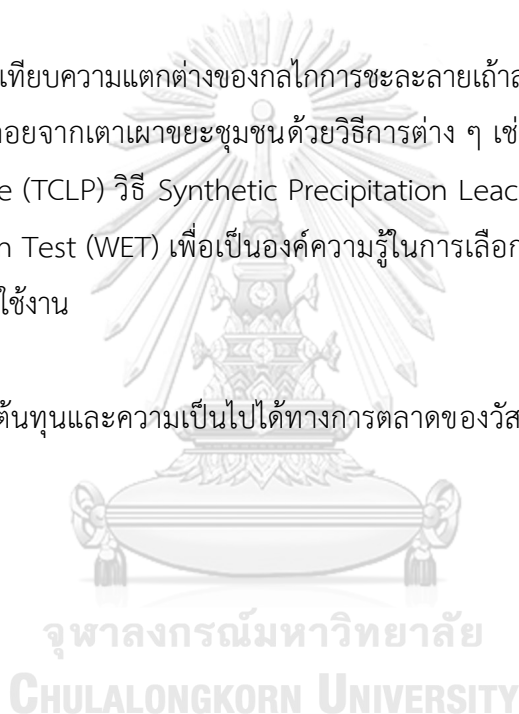
5.3.2 ศึกษาการใช้เถ้าลอยและกากคอนกรีต ในการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตโดยตรง โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ และกากคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบ รวมถึงทดสอบและใช้เครื่องมือที่ใช้จริงในทางวิศวกรรมโยธา เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นในทางวิศวกรรมโยธา

5.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่มีขนาด  $20 \times 20 \times 4$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่แนะนำในการทดสอบสภาพการนำความร้อนด้วยเครื่องทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity tester)

5.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงเสียงของผลิตภัณฑ์โดยทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเสียง (sound absorption coefficient) และค่าการสูญเสียการส่งผ่านเสียง (sound transmission loss) ของตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในห้องเสียงสะท้อน (reverberation room) ตามมาตรฐาน ASTM C423 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method และ ASTM E90 Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements ตามลำดับ รวมถึงมีการปรับปรุงผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ให้มีความขรุขระ มีลักษณะเป็นช่อง หรือมีรูพรุนมากขึ้น เพื่อให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริง

5.3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างของกลไกการชะละลายเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส และเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) วิธี Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) และวิธี Waste Extraction Test (WET) เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการเลือกใช้วิธีชะละลายที่เหมาะสมกับตัวอย่างและการนำไปใช้งาน

5.3.6 ศึกษาต้นทุนและความเป็นไปได้ทางการตลาดของวัสดุที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ



## บรรณานุกรม

### รายการอ้างอิงภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). การใช้แก๊สลอยในงานคอนกรีต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/pol\\_suc\\_ash.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html) [16 ตุลาคม 2560]
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2560). การใช้แก๊สลอยในงานคอนกรีต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/pol\\_suc\\_ash.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html) [1 มิถุนายน 2563]
- กรมทรัพยากรธรณี. 2544. ธรณีวิทยาประเทศไทย เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542. กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2556). ตารางคำนวณหาค่าวัสดุรวมต่อหน่วยของงานก่อสร้าง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.dpt.go.th/phangnga/main/images/stories/pdf/Provisionordinance/Phangnga1.pdf> [16 ตุลาคม 2560]
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2555. โครงการจัดทำบัญชีของเสียที่เป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน.
- กฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. 2535. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 109 ตอน 108. หน้า 50.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2541). มอก.1505-2541 ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กฎกระทรวง (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535. 2548. ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 123 ตอนพิเศษ 11 ง. หน้า 14.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2560). มอก. 566-25XX มวลรวมผสมคอนกรีต. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2561). มอก. 59-2561 อิฐคอนกรีต. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กษิดา ชำนาญดี. 2554. การเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งฉนวนกันความร้อนภายในและภายนอกของผนังต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานปรับอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- การทางพิเศษแห่งประเทศไทย. (2563). การจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงทางพิเศษคลองรัช. [ออนไลน์].  
แหล่งที่มา <http://www.exat.co.th/index.php/th/จัดซื้อจัดจ้าง//tor-e-bidding/item/การจ้างติดตั้งกำแพงกันเสียงทางพิเศษคลองรัช-รายคอนโดมิเนียม-เดอะเบส-พาร์คเวส-และพาร์คอีสต์-สุขุมวิท-77.html> [1 มิถุนายน 2563]
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology. กรุงเทพฯ: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.
- ทิพย์รัตน์ หาญสีบสาย. 2544. แก้ลรอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. นนทบุรี: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- นพดล สหชัยเสรี, วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์, อนุรักษ์ กุศลชู, กัลยกร แก่นวิจิตร และ จิรวิฑูร รณเรืองฤทธิ์. 2556. คุณสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมจากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมรองเท้า. ใน การจัดประชุมทางวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ครั้งที่ 9 : การวิจัยสู่ประชาคมอาเซียน, 2: 133-143.
- บริษัท เข้าเทิร์นไทยคอนซัลติ้ง จำกัด. (2555). รายงานการปฏิบัติตามมาตรการลดผลกระทบ และติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม (ระยะก่อสร้างและทดสอบเครื่องจักร) โครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้า เทศบาลนครภูเก็ต ในนามบริษัท พีเจที เทคโนโลยี จำกัด ประจำปีเดือน มกราคม - มิถุนายน 2555. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://eiadoc.onep.go.th/eia2/3-2-72.pdf> [16 ตุลาคม 2560]
- บริษัท พีเจที เทคโนโลยี จำกัด. (2561). การจัดแสดงตัวอย่างมูลฝอย เถ้าเา และเถ้าหนัก ของโครงการโรงเผามูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าของเทศบาลนครภูเก็ต.
- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2548. Cement and Applications ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. กรุงเทพฯ: บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.
- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2548. คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology. กรุงเทพฯ: บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.
- บุรฉัตร วิริยะ. 2551. การศึกษาและพัฒนาวัสดุป้องกันเสียงที่ผลิตจากของเสียอุตสาหกรรม ที่มีสารบิทูเมนเป็นองค์ประกอบเพื่อลดระดับเสียงรบกวนจากการจราจร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรี, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปณิธิ เปรมสัจธรรม. 2560. การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการตั้งโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีแก้ลรอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรี, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประธาน อารีพล. 2541. การจัดการมลพิษทางเสียงและความสั่นสะเทือน. นนทบุรี: บริษัท เอ็นไวร์



คอนเซ็ปต์ จำกัด, อ้างถึงใน บุรฉัตร วิริยะ. 2551. การศึกษาและพัฒนาวัสดุป้องกันเสียงที่ผลิตจากของเสียอุตสาหกรรม ที่มีสารพิษเป็นองค์ประกอบเพื่อลดระดับเสียงรบกวนจากการจราจร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทศึกษบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ปราโมทย์ พรหมทอง. 2546. ผลของการคัดแยกมูลฝอยของเตาเผามูลฝอยชุมชนจังหวัดภูเก็ตที่มีต่อการทำแก๊สลอยให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทศึกษบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิพัฒน์ ละอองศรี. 2556. การประเมินประสิทธิภาพของกาแพงกันเสียงตามแนวทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตามสภาพปัจจุบัน. โครงการปริญญาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วินิต ช่อวิเชียร. 2557. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: นิวไทยมิตรการพิมพ์ (1996).

วิสิทธิ์ ธีลาศิริวงศ์, ชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์, นภัส เกียรติวิศาลกิจ และ วิชเวชศรี ก่อธรรมนิเวศน์. 2560. คู่มือการเก็บตัวอย่างคุณภาพเสียงจากต้นกำเนิดเสียง การประเมินผลกระทบและมาตรการป้องกันแก้ไขผลกระทบด้านเสียงจากโครงการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติไปยังลูกค้ำอุตสาหกรรมและสถานีบริการก๊าซธรรมชาติ (NGV). กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีทิต วรรณเลิศลักษณ์. (2560). ฟิสิกส์รอบตัว ตอน ฉนวนกันความร้อน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7308-2017-06-14-15-23-36> [16 ตุลาคม 2560]

ศิวพันธ์์ ชูอินทร์. 2556. ความรู้เบื้องต้นด้านมลพิษทางเสียง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. (2559). ลักษณะกากอุตสาหกรรมและวิธีกำจัดสำหรับโรงงานลำดับที่ 58. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.facwaste.com/upload/content/doc1495631655.pdf> [16 ตุลาคม 2560]

สมจิต พุฒดี. (2560). การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.eic.co.th/Portals/4/download/Thermal%20conductivity%20measurement.pdf> [16 ตุลาคม 2560]

สำนักงานสำนักสิ่งแวดล้อม. 2560. สถิติปริมาณมูลฝอย เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2560.

สำเร็จ รักซ้อน และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2557. ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. นนทบุรี: แองเกิ้ลออฟไซ.

### รายการอ้างอิงภาษาอังกฤษ

- Adesina, A. and Awoyera, P. 2019. Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production. *Sn Applied Sciences*, 1: 18.
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V. and Zhang, L. 2012. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35: 718-729.
- Alinnor, I.J. 2007. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel*, 86: 853-857.
- Arenas, C., Leiva, C., Vilches, L.F., Cifuentes, H. and Rodríguez-Galán, M. 2015. Technical specifications for highway noise barriers made of coal bottom ash-based sound absorbing concrete. *Construction and Building Materials*, 95: 585-591.
- Arenas, C. and others. 2017. Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. *Construction and Building Materials*, 134: 433-442.
- ASTM C31 / C31M-19a. (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C109 / C109M-02. (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C188-95(2003). (2003). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C373-88. (2006). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C423-99a. (2001). Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C518-98. (1998). Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM C618-05. (2005). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In. West Conshohocken, PA,: ASTM International.
- ASTM E1050-98. (1998). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System,. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM E2611-09. (2009). Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Baba, A., Gurdal, G., Sengunalp, F. and Ozay, O. 2008. Effects of leachant temperature and pH on leachability of metals from fly ash. A case study: Can thermal power plant, province of Canakkale, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 139: 287-298.
- Backus, B.E. (2015). Concrete Curing: What Equipment is Right For You? [Online]. Available from: <https://www.globalgilson.com/blog/concrete-curing-what-equipment-is-right-for-you> [2020, July 19]
- Bie, R., Chen, P., Song, X. and Ji, X. 2016. Characteristics of municipal solid waste incineration fly ash with cement solidification treatment. Journal of the Energy Institute, 89: 704-712.
- Binici, H. and Aksogan, O. 2017. Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum. Materials Today Communications, 10: 14-24.
- Çelikel, D. and Babaarslan, O. 2017. Effect of Bicomponent Fibers on Sound Absorption Properties of Multilayer Nonwovens. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 12: 15-25.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. 2007. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. Construction and Building Materials, 21: 1534-1541.
- Clavier, K.A., Paris, J.M., Ferraro, C.C. and Townsend, T.G. 2020. Opportunities and challenges associated with using municipal waste incineration ash as a raw ingredient in cement production – a review. Resources, Conservation and

Recycling, 160: 104888.

Dabbaransi, N. 2007. The optimum solution for clean development mechanism (CDM) of municipal solid waste incineration power plant at Nontaburi Province.

Master's Thesis, Regional Centre for Manufacturing Systems Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Demirboğa, Ramazan. 2003. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. Energy and Buildings, 35: 189-192.

Demirboğa, R. 2007. Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. Building and Environment, 42: 2467-2471.

Dontriros, S. 2019. Municipal solid waste fly ash washing for cement application.

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Dontriros, S., Likitlersuang, S. and Janjaroen, D. 2020. Mechanisms of chloride and sulfate removal from municipal-solid-waste-incineration fly ash (MSWI FA): Effect of acid-base solutions. Waste Management, 101: 44-53.

Duran-Herrera, A., Campos-Dimas, J.K., Valdez-Tamez, P. and Bentz, D.P. 2016. Effect of a micro-copolymer addition on the thermal conductivity of fly ash mortars. Journal of building physics, 40: 3-16.

Fenollera, M., Míguez, J., Goicoechea, I. and Lorenzo, J. 2015. Experimental Study on Thermal Conductivity of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate. Materials, 8: 4457.

Golewski, G.L. 2015. Studies of natural radioactivity of concrete with siliceous fly ash addition. Cement Wapno Beton, 20: 106-+.

Grosse, C.U. 2007. Advances in Construction Materials 2007: Springer Berlin Heidelberg.

Harris, D.A. 1991. Noise Control Manual: Guidelines for Problem-solving in the Industrial/commercial Acoustical Environment: Van Nostrand Reinhold.

Hemalatha, T. and Ramaswamy, A. 2017. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. Journal of Cleaner Production, 147: 546-559.

Inthasaro, P. 2002. Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial

- cement replacement. Master's Thesis, Environmental Management (Inter-Department), Graduate School, Chulalongkorn University.
- JCW acoustic supplies. (2020). Sound Absorption Coefficient Chart. [Online]. Available from: <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/> [2020, June 15]
- Konduri, R. and Altwicker, E. 1994. Analysis of time scales pertinent to dioxin/furan formation on fly ash surfaces in municipal solid waste incinerators. Chemosphere, 28: 23-45.
- Lederer, J., Trinkel, V. and Fellner, J. 2017. Wide-scale utilization of MSWI fly ashes in cement production and its impact on average heavy metal contents in cements: The case of Austria. Waste Management, 60: 247-258.
- Leelarungroj, K. 2015. Heavy Metal Leaching From Different Fly Ashes Uses Different Leaching Methods. Master's Thesis, Hazardous Substance and Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Leelarungroj, K., Likitlersuang, S., Chompoorat, T. and Janjaroen, D. 2018. Leaching mechanisms of heavy metals from fly ash stabilised soils. Waste Management & Research, 36: 616-623.
- Leiva, C., Arenas, C., Vilches, L.F., Alonso-Fariñas, B. and Rodriguez-Galán, M. 2015. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties. Waste Management, 46: 298-303.
- Li, J., Dong, Z. and Yang, E.-H. 2017. Strain hardening cementitious composites incorporating high volumes of municipal solid waste incineration fly ash. Construction and Building Materials, 146: 183-191.
- Lim, S.K., Tan, C.S., Lim, O.Y. and Lee, Y.L. 2013. Fresh and hardened properties of lightweight foamed concrete with palm oil fuel ash as filler. Construction and Building Materials, 46: 39-47.
- Liu, G., Cai, Y., Hernandez, D., Schrlau, J. and Allen, M. 2016. Mobility and speciation of arsenic in the coal fly ashes collected from the Savannah River Site (SRS). Chemosphere, 151: 138-144.
- Liu, G. and others. 2015. Field pilot study on emissions, formations and distributions of PCDD/Fs from cement kiln co-processing fly ash from municipal solid waste

- incinerations. Journal of Hazardous Materials, 299: 471-478.
- Ngohpok, C., Sata, V., Satiennam, T., Klungboonkrong, P. and Chindaprasirt, P. 2018. Mechanical Properties, Thermal Conductivity, and Sound Absorption of Pervious Concrete Containing Recycled Concrete and Bottom Ash Aggregates. Ksce Journal of Civil Engineering, 22: 1369-1376.
- Ningnoi, T. 1992. Determination of some natural radionuclides in lignite and lignite ash. Master's Thesis, Department of Nuclear Technology, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Pereira, C.F., Galiano, Y.L., Rodríguez-Piñero, M.A. and Parapar, J.V. 2007. Long and short-term performance of a stabilized/solidified electric arc furnace dust. Journal of Hazardous Materials, 148: 701-707.
- Şahmaran, M., Keskin, S.B., Ozerkan, G. and Yaman, I.O. 2008. Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. Cement and Concrete Composites, 30: 872-879.
- Salesa, Á. and others. 2017. Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry. Journal of Cleaner Production, 141: 248-255.
- Sancharoen, P. 2003. Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial cement replacement on concrete. Master's Thesis, Environmental Management (Inter-Department), Graduate School, Chulalongkorn University.
- Sarmiento, L.M., Clavier, K.A., Paris, J.M., Ferraro, C.C. and Townsend, T.G. 2019. Critical examination of recycled municipal solid waste incineration ash as a mineral source for portland cement manufacture – A case study. Resources, Conservation and Recycling, 148: 1-10.
- Shi, H.S. and Kan, L.-L. 2009. Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete. Journal of Hazardous Materials, 164: 750-754.
- Singh, N., Kumar, P. and Goyal, P. 2019. Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self compacting concrete. Journal of Building Engineering, 26: 100882.
- Su, Y. and others. 2016. Effects of municipal solid waste incineration fly ash on solidification/stabilization of Cd and Pb by magnesium potassium phosphate

- cement. Journal of Environmental Chemical Engineering, 4: 259-265.
- Sun, P. and Guo, Z. 2015. Preparation of steel slag porous sound-absorbing material using coal powder as pore former. Journal of Environmental Sciences, 36: 67-75.
- Tasdemir, C., Sengul, O. and Tasdemir, M.A. 2017. A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. Energy and Buildings, 151: 469-475.
- USEPA. (1992). SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure. In: United States Environmental Protection Agency.
- USEPA. (1994). SW-846 Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure. In: United States Environmental Protection Agency.
- USEPA. (2007). SW-846 Test Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. In: United States Environmental Protection Agency.
- USEPA. (2009). Hazardous Waste Characteristics A User-Friendly Reference Document. In.
- Webster, M.T. and Loehr, R.C. 1996. Long-term leaching of metals from concrete products. Journal of Environmental Engineering, 122: 714-721.
- Wei, N. 2015. Leachability of Heavy Metals from Lightweight Aggregates Made with Sewage Sludge and Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. International Journal of Environmental Research and Public Health, 12: 4992.
- Weibel, G., Eggenberger, U., Schlumberger, S. and Mäder, U.K. 2017. Chemical associations and mobilization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration. Waste Management, 62: 147-159.
- Wu, B., Wang, D., Chai, X., Takahashi, F. and Shimaoka, T. 2016. Characterization of chlorine and heavy metals for the potential recycling of bottom ash from municipal solid waste incinerators as cement additives. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 10: 8.
- Yang, H.-C. and Tasi, T.-P. 2016. Enhanced Soundproof Performance of Construction Coatings Using Polyvinyl Acetate Resin and Calcium Sulfate Whiskers. Journal of Materials in Civil Engineering, 28: 04016168.
- Young, H.D., Freedman, R.A., Ford, A.L., Zemansky, M.W. and Sears, F.W. 2009. Sears and

Zemansky's University Physics, 12th Edition: Pearson Education, Limited.

Zhao, L., Wang, W.J., Li, Z. and Chen, Y.F. 2015. Microstructure and pore fractal dimensions of recycled thermal insulation concrete. *Materials Testing*, 57: 349-359.











รูปที่ ก-1 ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ (lignite)



รูปที่ ก-2 ถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินบิทูมินัส (bituminous)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-3 ถ้ำล่อยจากเตาเผาขยะชุมชน



รูปที่ ก-4 กากคอนกรีตจากโรงผลิตคอนกรีต



รูปที่ ก-5 ขวดแก้วใสหาความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน ASTM C188



รูปที่ ก-6 เครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (rotator mixer) ของบริษัท Biosan รุ่น Multi RS-60



รูปที่ ก-7 แบบหลอมออร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ ก-8 เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (compression machine) Amsler 30 ton



รูปที่ ก-9 ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 10 x 10 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)



รูปที่ ก-10 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติเชิงเสียง



รูปที่ ก-11 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกความหนา 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สำหรับทดสอบสมบัติเชิงเสียง



รูปที่ ก-12 ท่อนำคลื่นเสียง (impedance tube) และชุดทดสอบสมบัติเชิงเสียงของบริษัท

Geonoise

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY









## ภาคผนวก ข.1

ใบรายงานผลการทดสอบความพรุนตัวของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ  
ณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



คำขอบริการที่ สนว. 159/63	ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ	ที่ ทป. 145/63
วันที่ 22 เมษายน 2563	(สนว.)	หน้า 1 ของ 2
รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ ให้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330		
ชื่อ/รหัสตัวอย่าง	:- FAO, LFA25, LFA50, LFA75, LFA100, BFA25, BFA50, BFA75, MFA25, MFA50, MFA75, RFA25, RFA50, RFA75, RFA100, IFA25, IFA50, IFA75, CW25, CW50, CW75 และ CW100	
ลักษณะตัวอย่าง	:- ก้อนสี่เหลี่ยม	
วิธีทดสอบ/วิเคราะห์	:- ความพรุนตัวโดยวิธีการแทนที่น้ำ	
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์	:-	
ผลวิเคราะห์ค่าความพรุนตัวของตัวอย่าง แสดงรายละเอียดในตารางหน้า 2		
ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์	ผู้รับรอง	
		
(นางสาวนิภาพร ชะวงษา)	(นางสาวศรัทธา ลาภเกียรติถาวร)	
ผู้ตรวจสอบ	ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ	
		
(นางสาววาสนา ช้องวงศ์)		
FM-EIM 02-01 แก้ไขครั้งที่ 3		
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ/วิเคราะห์เท่านั้น ห้ามนำผลการทดสอบ/วิเคราะห์ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.		

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

๓๕ หมู่ ๓ เทคโนโลยี ๓ คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐  
โทร.(๐๖) ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐๕  
E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

วิสัยทัศน์ : วว. เป็นองค์กรชั้นนำในการบูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมเพื่อสร้างสังคมนวัตกรรมอย่างยั่งยืน



ทว. TISTR

คำขอบริการที่ ศนว.159/63  
วันที่ 22 เมษายน 2563

ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ  
(ศนว.)

ที่ หป. 145/63  
หน้า 2 ของ 2

ผลวิเคราะห์ค่าความพรุนตัวของตัวอย่าง แสดงรายละเอียดในตารางดังนี้

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	ความพรุนตัว (เปอร์เซ็นต์)
1.	FAO	12.35
2.	LFA25	21.62
3.	LFA50	20.17
4.	LFA75	21.10
5.	LFA100	24.11
6.	BFA25	19.37
7.	BFA50	19.40
8.	BFA75	24.34
9.	MFA25	17.38
10.	MFA50	20.09
11.	MFA75	19.88
12.	RFA25	22.59
13.	RFA50	24.08
14.	RFA75	26.12
15.	RFA100	32.11
16.	IFA25	25.13
17.	IFA50	29.54
18.	IFA75	39.98
19.	CWA25	17.48
20.	CWA50	10.77
21.	CWA75	10.25
22.	CWA100	13.91

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (ทว.)

๓๕ หมู่ ๓ เทศบาลเมือง ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐  
โทร.(๒๖) ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๖๗ ๕๐๐๔  
E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

วิสัยทัศน์ : ทว. เป็นองค์กรชั้นนำในการบูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมเพื่อสร้างสังคมนวัตกรรมอย่างยั่งยืน

### คำอธิบายอักษรย่อ

FAO = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ      LFA = เส้นใยลิกไนต์

BFA = เส้นใยปิทมินัส      MFA = เส้นใยขยะชุมชน      CW = กากคอนกรีต

RFA = เส้นใยเชื้อเพลิง RDF (ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้)

IFA = เส้นใยขยะอุตสาหกรรม (ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้)

## ภาคผนวก ข.2

## ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ

ชื่อตัวอย่าง	แรงอัด ประลัย (กิโลกรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย กำลังรับ แรงอัด	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
FA0 #1	8,900	25.0	356.0	34.91	34.15	1.15
FA0 #2	8,850	25.0	354.0	34.72		
FA0 #3	8,200	24.5	334.7	32.82		
LFA25 #1	5,100	25.0	204.0	20.01	20.43	1.08
LFA25 #2	5,000	25.0	200.0	19.61		
LFA25 #3	5,300	24.0	220.8	21.66		
LFA50 #1	5,800	25.0	232.0	22.75	24.50	2.39
LFA50 #2	6,000	25.0	240.0	23.54		
LFA75 #1	3,400	25.0	136.0	13.34	14.46	1.28
LFA75 #2	3,800	23.5	161.7	15.86		
LFA75 #3	3,400	23.5	144.7	14.19		
LFA100 #1	700	24.0	29.2	2.86	2.78	0.29
LFA100 #2	800	26.0	30.8	3.02		
LFA100 #3	600	24.0	25.0	2.45		
BFA25 #1	5,700	22.8	250.3	24.54	24.38	0.19
BFA25 #2	6,400	25.7	249.0	24.42		
BFA25 #3	6,000	24.3	246.5	24.18		
BFA50 #1	5,200	24.6	211.5	20.74	20.12	0.88
BFA50 #2	4,700	23.6	198.9	19.50		

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	แรงอัด ประลัย (กิโลกรัม)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย กำลังรับ แรงอัด	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
BFA75 #1	2,300	25.2	91.3	8.95	9.16	0.87
BFA75 #2	2,200	25.6	85.9	8.43		
BFA75 #3	2,600	25.2	103.2	10.12		
MFA25 #1	5,300	25.5	207.8	20.38	20.19	0.28
MFA25 #2	5,300	26.0	203.8	19.99		
MFA50 #1	1,800	25.0	72.0	7.06	8.62	2.21
MFA50 #2	2,700	26.0	103.8	10.18		
MFA75 #1	1,500	25.6	58.6	5.75	4.79	0.91
MFA75 #2	1,200	25.0	48.0	4.71		
MFA75 #3	1,000	25.0	40.0	3.92		
CW25 #1	5,800	25.0	232.0	22.75	21.18	2.22
CW25 #2	5,000	25.0	200.0	19.61		
CW50 #1	8,300	25.5	325.5	31.92	32.5	0.81
CW50 #2	8,600	25.5	337.3	33.07		
CW75 #1	9,700	25.5	380.4	37.30	38.27	1.36
CW75 #2	10,200	25.5	400.0	39.23		
CW100 #1	6,300	25.0	252.1	24.72	26.40	2.37
CW100 #2	7,300	25.5	286.3	28.07		

คำอธิบายอักษรย่อ

FA0 = มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ      LFA = เถ้าลอยลิกไนต์

BFA = เถ้าลอยบิทูมินัส      MFA = เถ้าลอยขยะชุมชน      CW = กากคอนกรีต

## ภาคผนวก ข.3

ใบรายงานผลการทดสอบสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ของมอร์ตาร์ที่มี  
 ใ้ล้อยและกากคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ ณ ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร  
 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน



ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร  
 Center of Building Innovation and Technology  
 ที่อยู่ : ชั้น 6 ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว  
 เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
 Address: 6 th Floor Faculty of Architecture Kasetsart University 50 Ngamwongwan, Latyao,  
 Jatujak, Bangkok 10900 Tel: (662) 942 8960-3 #202 Fax: (662) 940 5413  
 Website: www.cbit.arch.ku.ac.th/home

## TEST REPORT FOR THERMAL CONDUCTIVITY (K) (ASTM C518)

PROJECT: SAMPLE OWNER : คุณชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 TESTED BY: THANAPHAT DATED: 20/02/2020 CERT NO.: 2002002 PAGE: 1/1

NO. OF SAMPLE / TOTAL NO. OF TEST SPECIMEN: 3/3  
 Operating Temperature  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , Relative Humidity  $50 \pm 5\% \text{RH}$   
 UNCERTAINTY OF TEST :  $\pm 0.005 \text{ W/m.K}$

Sample Type	Thermal Conductivity (W/m.K)				
	Thickness (m)	Test Temp (°C)	Test Temp (°C)	K-Value (W/m.K)	STANDARD
LFA2 25	$0.0482 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.2271 \pm 0.05$	C518
LFA2 50	$0.0466 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.2998 \pm 0.05$	C518
LFA2 75	$0.0479 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.3299 \pm 0.05$	C518

Remark : 1). K-Value is the thermal conductivity of sample @ thickness.  
 2). Certification applies to the test sample only.  
 3). This certificate is invalid without appropriate signature and seal.



Checked by

(Ms. Kanokon Hancharoen)

Metrologist

20 FEB 2020

Checked by

(Dr. Parames Kamhangrittirong)

Director of CBIT

20 FEB 2020

Center of Building Innovation &amp; Technology

คำอธิบายอักษรย่อ

LFA = ใ้ล้อยลิกไนต์



ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร  
Center of Building Innovation and Technology  
ที่อยู่ : ชั้น 6 ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว  
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
Address: 6 th Floor Faculty of Architecture Kasetsart University 50 Ngamwongwan, Latyao,  
Jatujak, Bangkok 10900 Tel: (662) 942 8960-3 #202 Fax: (662) 940 5413  
Website: www.cbit.arch.ku.ac.th/home

### TEST REPORT FOR THERMAL CONDUCTIVITY (K) (ASTM C518)

PROJECT: SAMPLE OWNER : คุณชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TESTED BY: THANAPHAT DATED: 07/05/2020 CERT NO.: 2005008 PAGE: 1/1

NO. OF SAMPLE / TOTAL NO. OF TEST SPECIMEN: 3/3

Operating Temperature  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , Relative Humidity  $50 \pm 5\% \text{RH}$

UNCERTAINTY OF TEST :  $\pm 0.005 \text{ W/m.K}$

Sample Type	Thermal Conductivity (W/m.K)				STANDARD
	Thickness (m)	Test Temp ( $^\circ\text{C}$ )	Test Temp ( $^\circ\text{C}$ )	K-Value (W/m.K)	
BFA 25	$0.0520 \pm 0.005$	20 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$	$0.0737 \pm 0.005$	C518
BFA 50	$0.0516 \pm 0.005$	20 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$	$0.0934 \pm 0.005$	C518
BFA 75	$0.0486 \pm 0.005$	20 $^\circ\text{C}$	50 $^\circ\text{C}$	$0.0704 \pm 0.005$	C518

- Remark : 1). K-Value is the thermal conductivity of sample @ thickness.  
2). Certification applies to the test sample only.  
3). This certificate is invalid without appropriate signature and seal.



Checked by

*Kanokon Hancharoen*

(Ms. Kanokon Hancharoen)

Metrologist

07 MAY 2020

Approved by

*Dr. Parames Kamhangritirong*

(Dr. Parames Kamhangritirong)

Director of CBIT

07 MAY 2020

Center of Building Innovation & Technology

คำอธิบายอักษรย่อ

BFA = ฝ้าลอยบิพูนินัส



ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร  
Center of Building Innovation and Technology  
ที่อยู่ : ชั้น 6 ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว  
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
Address: 6 th Floor Faculty of Architecture Kasetsart University 50 Ngamwongwan, Latyao,  
Jatujak, Bangkok 10900 Tel: (662) 942 8960-3 #202 Fax: (662) 940 5413  
Website: www.cbit.arch.ku.ac.th/home

TEST REPORT FOR THERMAL CONDUCTIVITY (K) (ASTM C518)

PROJECT: SAMPLE OWNER : คุณซึ้งพงศ์ ณ ป้อมเพชร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
TESTED BY: THANAPHAT DATED: 23/05/2019 CERT NO.: 1905012 PAGE: 2/2

NO. OF SAMPLE / TOTAL NO. OF TEST SPECIMEN: 12/12  
Operating Temperature 23 + 2°C, Relative Humidity 50 + 5 %RH  
UNCERTAINTY OF TEST : + 0.005 W/m.K

Sample Type	Thermal Conductivity (W/m.K)				STANDARD
	Thickness (m)	Test Temp (°C)	Test Temp (°C)	K-Value (W/m.K)	
Sample 7	0.0587 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.1964 ± 0.048	C518
Sample 8	0.0572 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.2494 ± 0.070	C518
Sample 9	0.0560 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.2205 ± 0.048	C518
Sample 10	0.0543 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.1648 ± 0.042	C518
Sample 11	0.0556 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.1362 ± 0.029	C518
Sample 12	0.0512 ± 0.005	20 °C	50 °C	0.2216 ± 0.067	C518

- Remark : 1). K-Value is the thermal conductivity of sample @ thickness.  
2). Certification applies to the test sample only.  
3). This certificate is invalid without appropriate signature and seal.



Checked by

*Kanokon Hancharoen*

(Ms. Kanokon Hancharoen)  
Metrologist

25 MAY 2019

APPROVED by

*Dr. Parames Kamhangrittirong*  
(Dr. Parames Kamhangrittirong)  
Director of CBIT

25 MAY 2019

Center of Building Innovation & Technology

คำอธิบายชื่อตัวอย่าง

Sample 9 คือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25

Sample 10 คือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50

Sample 11 คือ มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 75

Sample 12 คือ มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ



ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร  
Center of Building Innovation and Technology  
ที่อยู่: ชั้น 6 ตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว  
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
Address: 6 th Floor Faculty of Architecture Kasetsart University 50 Ngamwongwan, Latyao,  
Jatujak, Bangkok 10900 Tel: (662) 942 8960-3 #202 Fax: (662) 940 5413  
Website: www.cbit.arch.ku.ac.th/home

### TEST REPORT FOR THERMAL CONDUCTIVITY (K) (ASTM C518)

PROJECT: SAMPLE OWNER: คุณชีพพงศ์ ณ ป้อมเพชร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
TESTED BY: THANAPHAT DATED: 18/11/2019 CERT NO.: 1911003 PAGE: 1/1

NO. OF SAMPLE / TOTAL NO. OF TEST SPECIMEN: 4/4

Operating Temperature  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , Relative Humidity  $50 \pm 5\% \text{RH}$

UNCERTAINTY OF TEST :  $\pm 0.005 \text{ W/m.K}$

Sample Type	Thermal Conductivity (W/m.K)				
	Thickness (m)	Test Temp (°C)	Test Temp (°C)	K-Value (W/m.K)	STANDARD
CW25	$0.0505 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.0794 \pm 0.05$	C518
CW50	$0.0507 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.0945 \pm 0.05$	C518
CW75	$0.0528 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.0851 \pm 0.05$	C518
CW100	$0.0523 \pm 0.005$	20 °C	50 °C	$0.0802 \pm 0.05$	C518

- Remark : 1). K-Value is the thermal conductivity of sample @ thickness.  
2). Certification applies to the test sample only.  
3). This certificate is invalid without appropriate signature and seal.



Checked by

*Kanokon Hancharoen*

(Ms. Kanokon Hancharoen)

Metrologist

18 NOV 2019

Approved by

*Dr. Parames Karnhangrittrong*

(Dr. Parames Karnhangrittrong)

Director of CBIT

18 NOV 2019

Center of Building Innovation & Technology

คำอธิบายอักษรย่อ

CW = กากคอนกรีต



## ภาคผนวก ข.4

ใบรายงานผลการทดสอบการย่อยสลายเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วย  
เครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 คำอธิบายชื่อตัวอย่างในใบรายงานผลการทดสอบการย่อยสลายเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อตัวอย่างในใบ รายงานผล	คำอธิบาย	หมายเหตุ
Lignite	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์	-
Bituminous	เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส	-
NMSWI	เถ้าลอยขยะชุมชนที่เก็บจากระบบกำจัด ฝุ่นของเตาเผา	-
OMSWI	เถ้าลอยขยะชุมชนที่เก็บจากหลุมฝังกลบ เถ้าลอย	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ วิทยานิพนธ์นี้
TPI	เถ้าลอยเชื้อเพลิง RDF	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ วิทยานิพนธ์นี้
BPEC	เถ้าลอยขยะอุตสาหกรรม	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ วิทยานิพนธ์นี้
OPC ปูนซีเมนต์	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	-
Sand ทราย	ทรายละเอียด	-
FA0 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ	-
LFA50 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยลิกไนต์ 50%	-
BFA50 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยบิทูมินัส 50%	-
MFA50 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยขยะชุมชน 50%	-
RFA50 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเชื้อเพลิง RDF 50%	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ วิทยานิพนธ์นี้
IFA50 เศษคอนกรีต	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยขยะอุตสาหกรรม 50%	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของ วิทยานิพนธ์นี้

ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211 โทรสาร. 02-2188210

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายซังพงศ์ ณ ป้อมเพชร์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : ของแข็ง

รหัสงานวิเคราะห์ : B 328

วันที่ส่งตัวอย่าง : 4 กุมภาพันธ์ 2563

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 18 กุมภาพันธ์ 2563

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์ (แก้alogy)					
		Lignite	Bituminous	NMSWI	OMSWI	TPI	BPEC
Iron (Fe)	mg/kg	13,147	9,817	3,151	4,280	18,598	7,428
Calcium (Ca)	mg/kg	56,643	114	188,649	162,490	172,078	102,912
Sodium (Na)	mg/kg	3,126	240	60,312	13,865	12,355	52,852
Aluminium (Al)	mg/kg	27,552	8,389	6,090	11,458	36,887	13,253
Arsenic (As)	mg/kg	73.40	7.652	9.210	10.06	8.532	4.872
Lead (Pb)	mg/kg	3.756	8.450	1,069	475	400	396

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์ (แก้alogy)							
		OPC ปูนซีเมนต์	Sand ทราย	FAO เศษคอนกรีต	LFA50 เศษคอนกรีต	BFA50 เศษคอนกรีต	MFA50 เศษคอนกรีต	RFA50 เศษคอนกรีต	IFA50 เศษคอนกรีต
Iron (Fe)	mg/kg	6,129	4,381	7,347	15,307	5,777	3,736	8,530	16,672
Calcium (Ca)	mg/kg	197,708	1,564	71,209	68,566	39,294	65,954	71,200	55,888
Sodium (Na)	mg/kg	1,337	30.22	655	717	354	3,145	2,214	1,201
Aluminium (Al)	mg/kg	15,388	2,588	6,744	12,747	7,209	4,745	9,975	14,237
Arsenic (As)	mg/kg	6.594	2.992	5.613	20.26	4.333	5.319	4.766	4.309
Lead (Pb)	mg/kg	6.946	4.756	11.31	6.079	6.416	105	53.20	64.38

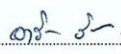
หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรงเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ



(ดร.ซิลาส ดำรงศิริ)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการ

18 / 02 / 63



(นางอารียา รัตนวรรณชัย)

ผู้วิเคราะห์

18 / 02 / 63



(รองศาสตราจารย์ ดร. พันรวิศ สัมพันธ์พงษ์)

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

18 / 02 / 63

## ภาคผนวก ข.5

ใบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ชะละลายได้จากเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (inductively coupled plasma; ICP)

ณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 คำอธิบายชื่อตัวอย่างในใบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ชะละลายได้จากเถ้าลอยและมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ชื่อตัวอย่างในใบรายงานผล	คำอธิบาย	หมายเหตุ
Lignite FA	เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์	-
Bituminous FA	เถ้าลอยถ่านหินบิทูมินัส	-
New MSWI FA	เถ้าลอยขยะชุมชนที่เก็บจากระบบกำจัด ฝุ่นของเตาเผา	-
Old MSWI FA	เถ้าลอยขยะชุมชนที่เก็บจากหลุมฝัง กลบเถ้าลอย	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้
TPI FA	เถ้าลอยเชื้อเพลิง RDF	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้
BPEC FA	เถ้าลอยขยะอุตสาหกรรม	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้
FA0 Mortar	มอร์ตาร์ที่ไม่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบ	-
LFAXX Mortar	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยลิกไนต์ XX%	-
BFAXX Mortar	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยบิทูมินัส XX%	-
New MSWIXX	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยขยะชุมชน XX%	-
TPIXX Mortar	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเชื้อเพลิง RDF XX%	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้
BPECXX Mortar	มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเถ้าลอย ขยะอุตสาหกรรม XX%	ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้
Sand	ทรายละเอียด	-
TCLP	ตัวอย่างที่ชะละลายด้วยวิธี TCLP	-
SPLP	ตัวอย่างที่ชะละลายด้วยวิธี SPLP	-
DI Water	ตัวอย่างที่ชะละลายด้วย น้ำปราศจากไอออน	-
WET	ตัวอย่างที่ชะละลายด้วยวิธี WET	-

ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : น้ำชะละลายน้ำกลั่นด้วยวิธี TCLP

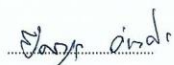
รหัสงานวิเคราะห์ : B 184

วันที่ส่งตัวอย่าง : 3 ตุลาคม 2561

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 8 ตุลาคม 2561

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์				วิธีวิเคราะห์
		Lignite FA	Bituminous FA	New MSWI FA	Old MSWI FA	
Iron (Fe)	mg/L	0.85	0.18	0.05	0.03	Inductively Coupled Plasma
Manganese (Mn)	mg/L	5.45	0.32	0.03	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Potassium (K)	mg/L	101	2,524	2,407	449	Atomic Absorption Spectrometric Method
Calcium (Ca)	mg/L	2,137	8,936	9,846	3,447	Atomic Absorption Spectrometric Method
Magnesium (Mg)	mg/L	160	2.97	41.4	0.37	Atomic Absorption Spectrometric Method
Sodium (Na)	mg/L	41.9	2,786	3,209	775	Atomic Absorption Spectrometric Method
Aluminium (Al)	mg/L	7.17	11.4	0.36	0.11	Inductively Coupled Plasma
Barium (Ba)	mg/L	0.21	4.06	2.30	2.56	Inductively Coupled Plasma
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	0.01	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Arsenic (As)	mg/L	0.06	0.12	0.005	0.006	Inductively Coupled Plasma
Mercury (Hg)	mg/L	0.006	0.007	0.02	0.02	Inductively Coupled Plasma
Selenium (Se)	mg/L	0.03	0.04	0.007	0.005	Inductively Coupled Plasma
Chromium (Cr)	mg/L	0.13	0.05	0.10	0.06	Inductively Coupled Plasma
Cadmium (Cd)	mg/L	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Lead (Pb)	mg/L	0.31	0.03	6.46	0.14	Inductively Coupled Plasma


หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ



(ดร.สีลาวัณย์ ดำรงศิริ)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการ

๙ / ๓.๑.๖1



(นางอารียา รัตนวรรณชัย)

ผู้วิเคราะห์

๙ / ๙.๑๐.๖1





สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : น้ำชะละลายแล้วด้วยวิธี TCLP

รหัสงานวิเคราะห์ : B 197

วันที่ส่งตัวอย่าง : 30 พฤศจิกายน 2561

วันที่ออกรวิเคราะห์ : 21 ธันวาคม 2561

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์				วิธีวิเคราะห์
		Lignite FA	Bituminous FA	New MSWI FA	Old MSWI FA	
Zinc (Zn)	mg/L	5.02	3.16	3.50	5.60	Inductively Coupled Plasma

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรงเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

.....  
.....

(ดร.ศิลาวุธ ดำรงศิริ)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการ

.....  
.....

.....  
.....

(นางอารียา รัตนวรรณชัย)

ผู้วิเคราะห์

.....  
.....

.....  
.....  
.....

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

.....  
.....



ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายซัพพงค์ ณ ป้อมเพชร

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : น้ำชะละลายแล้วลอยด้วยวิธี SPLP

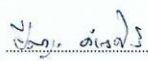
รหัสงานวิเคราะห์ : B 198


วันที่ส่งตัวอย่าง : 30 พฤศจิกายน 2561

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 21 ธันวาคม 2561

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์				วิธีวิเคราะห์
		Lignite FA	Bituminous FA	New MSWI FA	Old MSWI FA	
Iron (Fe)	mg/L	0.059	0.538	<0.005	0.008	Inductively Coupled Plasma
Zinc (Zn)	mg/L	7.96	5.06	0.48	0.29	Inductively Coupled Plasma
Manganese (Mn)	mg/L	0.056	0.035	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Potassium (K)	mg/L	6.55	1.47	2,333	452	Atomic Absorption Spectrometric Method
Calcium (Ca)	mg/L	559	55.2	7,731	1,848	Atomic Absorption Spectrometric Method
Magnesium (Mg)	mg/L	2.52	3.35	0.19	0.15	Atomic Absorption Spectrometric Method
Sodium (Na)	mg/L	41.2	5.99	3,312	821	Atomic Absorption Spectrometric Method
Aluminium (Al)	mg/L	1.77	5.18	0.28	0.42	Inductively Coupled Plasma
Barium (Ba)	mg/L	0.123	0.677	0.406	4.884	Inductively Coupled Plasma
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	0.067	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Selenium (Se)	mg/L	0.014	0.068	0.006	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Chromium (Cr)	mg/L	0.064	0.018	0.088	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	Inductively Coupled Plasma
Lead (Pb)	mg/L	0.020	0.013	4.929	0.573	Inductively Coupled Plasma

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

  
(ดร.ศิลาวัณ ดำรงศิริ)  
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ  
24/12/61

  
(นางอารียา รัตนารมชัย)  
ผู้วิเคราะห์  
24/12/61

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์รัฐ สิ้นพันธุ์คุณ)  
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม  
24/12/61  


ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายซังพงศ์ ณ ป้อมเพชร

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : แก๊สลอยเซด้วย DI Water

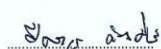
รหัสงานวิเคราะห์ : B 230

วันที่ส่งตัวอย่าง : 26 มีนาคม 2562

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 29 มีนาคม 2562

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		Lignite FA	Bituminous FA	New MSWI FA	Old MSWI FA	TPI FA	BPEC FA
Iron (Fe)	mg/L	0.014	0.009	0.019	0.011	0.017	0.021
Zinc (Zn)	mg/L	0.049	0.045	1.805	0.219	0.051	0.861
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	<0.005	0.024	<0.005	<0.005	0.013
Potassium (K)	mg/L	4.131	0.717	2,330	627	323	403
Calcium (Ca)	mg/L	576	38.01	6,224	1,636	587	730
Magnesium (Mg)	mg/L	0.631	2.522	2.575	0.455	0.832	0.559
Sodium (Na)	mg/L	40.25	6.810	3192	927	280	2552
Aluminium (Al)	mg/L	0.249	3.752	0.646	0.099	6.957	0.673
Barium (Ba)	mg/L	0.158	0.454	0.657	3.794	0.813	0.373
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	0.046	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	0.016	0.066	0.007	<0.005	0.009	0.010
Chromium (Cr)	mg/L	0.053	0.019	0.096	0.007	0.066	0.096
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	<0.005	3.496	0.311	<0.005	<0.005

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรงเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ



(ดร.ศิวาส ตังศิริ)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการ

1 / 156 / 62



(นางอารียา จิตนวรรณชัย)

ผู้วิเคราะห์

1 / 156 / 62



(รองศาสตราจารย์ ดร.พันวิทย์ สมพิศบุญ)

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

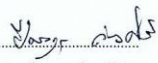
1 / 156 / 62





รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์				
		BFA50 Mortar TCLP	BFA75 Mortar TCLP	New MSWI25 TCLP	New MSWI50 TCLP	New MSWI75 TCLP
Iron (Fe)	mg/L	0.055	<0.005	0.009	0.020	<0.005
Zinc (Zn)	mg/L	0.238	0.257	1.395	1.568	7.001
Manganese (Mn)	mg/L	0.417	0.734	0.088	0.256	0.825
Potassium (K)	mg/L	11.74	27.75	28.85	63.55	60.54
Calcium (Ca)	mg/L	1,758	1,635	2,003	2,103	2,178
Magnesium (Mg)	mg/L	42.27	39.83	44.65	43.74	53.11
Sodium (Na)	mg/L	9.360	26.92	41.20	93.90	92.59
Aluminium (Al)	mg/L	0.154	0.066	0.117	0.079	0.080
Barium (Ba)	mg/L	0.397	0.575	0.205	0.376	0.325
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	0.009	0.011	0.008	0.007	0.007
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	0.007	<0.005	<0.005	0.008
Chromium (Cr)	mg/L	0.204	0.145	0.162	0.098	0.054
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	0.011	0.147	0.502
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.015

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

  
(ดร.ศิลาอุท ตังกรศิริ)  
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ  
13 / มิ.ย. / 62

  
(นางอารียา รัตนวรรณชัย)  
ผู้วิเคราะห์  
13 / มิ.ย. / 62

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทันจัต สัมพันธ์สงเปื้อน)  
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม  
13 / มิ.ย. / 62



ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

#### รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายซังพงศ์ ณ ป้อมเพ็ชร

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : ฝ้าลอยชนิดด้วย TCLP

รหัสงานวิเคราะห์ : B 279

วันที่ส่งตัวอย่าง : 9 กันยายน 2562

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 20 กันยายน 2562

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		TPI Fly ash TCLP	BPEC Fly ash TCLP	TPI Fly ash SPLP	BPEC Fly ash SPLP	FAO Mortar SPLP	LFA25 Mortar SPLP
Iron (Fe)	mg/L	0.008	0.006	0.008	0.016	0.009	0.006
Zinc (Zn)	mg/L	0.016	0.270	<0.005	0.833	0.134	<0.005
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	0.214	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Potassium (K)	mg/L	311	439	321	507	34.84	29.63
✓ Calcium (Ca)	mg/L	2,074	3,792	819	659	532	242
Magnesium (Mg)	mg/L	27.51	38.33	0.019	0.921	<0.005	<0.005
Sodium (Na)	mg/L	300	2,724	298	3,083	32.85	20.38
✓ Aluminium (Al)	mg/L	1.266	0.153	98.64	1.169	1.052	2.949
Barium (Ba)	mg/L	0.391	0.128	0.361	0.085	0.096	0.140
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	0.008	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	0.015	0.016	0.006	0.009	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.542	0.106	0.015	0.150	0.068	0.028
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	0.045	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	0.006	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		LFA50 Mortar SPLP	LFA75 Mortar SPLP	LFA100 Mortar SPLP	BFA25 Mortar SPLP	BFA50 Mortar SPLP	BFA75 Mortar SPLP
Iron (Fe)	mg/L	0.009	0.037	0.023	<0.005	<0.005	0.079
Zinc (Zn)	mg/L	<0.005	0.642	0.881	<0.005	0.211	0.825
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Potassium (K)	mg/L	21.81	11.78	7.050	13.73	12.06	13.05
Calcium (Ca)	mg/L	147	103	107	193	159	109
Magnesium (Mg)	mg/L	<0.005	1.622	0.770	<0.005	<0.005	0.795
Sodium (Na)	mg/L	17.32	10.38	4.914	13.44	10.17	11.21
Aluminium (Al)	mg/L	4.759	7.389	8.288	3.876	4.214	5.131
Barium (Ba)	mg/L	0.042	0.022	0.089	0.035	0.032	0.018
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	0.013	0.042	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.036	0.035	0.013	0.046	0.046	0.057
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		New MSWI25 SPLP	New MSWI50 SPLP	New MSWI75 SPLP	FAO Mortar DI Water	LFA25 Mortar DI Water	LFA50 Mortar DI Water
Iron (Fe)	mg/L	<0.005	0.011	0.017	0.011	0.022	<0.005
Zinc (Zn)	mg/L	<0.005	0.282	0.172	<0.005	0.427	<0.005
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Potassium (K)	mg/L	25.90	51.09	54.45	32.30	20.46	19.21
Calcium (Ca)	mg/L	553	535	559	507	197	134
Magnesium (Mg)	mg/L	<0.005	0.264	0.388	<0.005	0.427	<0.005
Sodium (Na)	mg/L	31.47	73.28	80.67	34.14	14.61	16.05
Aluminium (Al)	mg/L	0.923	2.861	1.259	0.965	3.159	5.172
Barium (Ba)	mg/L	0.163	0.430	0.379	0.077	0.081	0.031
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.044	0.011	0.026	0.062	0.020	0.036
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	0.019	0.018	<0.005	<0.005	<0.005

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		LFA75 Mortar DI Water	LFA100Mortar DI Water	BFA25 Mortar DI Water	BFA50 Mortar DI Water	BFA75 Mortar DI Water	New MSWI25 DI Water
Iron (Fe)	mg/L	<0.005	0.013	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Zinc (Zn)	mg/L	<0.005	0.106	0.071	<0.005	<0.005	0.174
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Potassium (K)	mg/L	11.99	7.378	7.832	8.827	13.50	26.64
Calcium (Ca)	mg/L	79.06	89.22	185	118	90.07	536
Magnesium (Mg)	mg/L	<0.005	0.166	0.167	<0.005	<0.005	0.237
Sodium (Na)	mg/L	10.50	6.060	6.389	5.950	12.70	30.78
Aluminium (Al)	mg/L	6.664	9.046	3.171	3.283	4.904	0.967
Barium (Ba)	mg/L	0.010	0.089	0.035	0.022	0.007	0.163
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	0.013	0.036	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	0.011	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.032	0.010	0.037	0.030	0.038	0.043
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.005

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		New MSWI50 DI Water	New MSWI75 DI Water	TPI25 Mortar TCLP	TPI50 Mortar TCLP	TPI75 Mortar TCLP	TPI100Mortar TCLP
Iron (Fe)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	0.008	<0.005	<0.005
Zinc (Zn)	mg/L	<0.005	<0.005	0.039	2.287	0.108	1.047
Manganese (Mn)	mg/L	<0.005	<0.005	0.093	0.286	0.305	0.882
Potassium (K)	mg/L	68.98	59.29	40.05	43.97	53.66	55.78
Calcium (Ca)	mg/L	649	388	1,425	1,833	1,663	1,496
Magnesium (Mg)	mg/L	0.009	<0.005	44.00	103	107	117
Sodium (Na)	mg/L	99.48	78.44	55.00	58.38	72.75	73.76
Aluminium (Al)	mg/L	1.029	2.507	0.019	0.754	0.084	0.201
Barium (Ba)	mg/L	0.398	0.499	0.240	0.234	0.207	0.129
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	<0.005	0.006	0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.029	0.009	0.133	0.191	0.158	0.145
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	0.006	0.012	0.058
Lead (Pb)	mg/L	0.026	0.022	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

ERIC-S-L...002



สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายชัยพงศ์ ณ ป้อมเพชร

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : WET

รหัสงานวิเคราะห์ : B 294

วันที่ส่งตัวอย่าง : 17 ตุลาคม 2562

วันที่ออกรายวิเคราะห์ : 1 พฤศจิกายน 2562

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์						
		Lignite Fly Ash WET	Bituminous Fly ash WET	New MSWI Fly ash WET	Old MSWI Fly ash WET	TPI Fly ash WET	BPEC Fly ash WET	Sand WET
Iron (Fe)	mg/L	10.12	32.57	0.113	2.043	162	6.361	42.61
Zinc (Zn)	mg/L	0.367	0.175	2.914	13.07	3.760	0.496	0.070
Manganese (Mn)	mg/L	6.752	0.683	0.016	0.093	5.44	0.697	4.77
Potassium (K)	mg/L	26.09	3.211	4,438	1,096	531	715	3.728
Calcium (Ca)	mg/L	471	39.06	3,223	1,940	5,191	249	426
Magnesium (Mg)	mg/L	46.74	161	<0.005	6.731	34.23	15.46	20.33
Sodium (Na)	mg/L	7,006	6,775	13,040	8,380	6,987	12,320	6,811
Aluminium (Al)	mg/L	4.746	52.03	0.882	8.380	897	3.002	7.67
Barium (Ba)	mg/L	1.061	2.47	2.851	0.277	1.39	0.247	0.763
Silver (Ag)	mg/L	0.013	<0.005	0.028	0.009	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	11.62	0.640	<0.005	0.018	0.079	0.026	0.064
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	0.202	0.097	0.005	0.013	0.067	0.059	0.006
Chromium (Cr)	mg/L	0.624	0.202	0.155	0.076	1.80	1.835	0.025
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	0.015	0.015	0.073	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	<0.005	0.013	0.809	1.619	0.337	0.063	0.118

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		BFA25 Mortar WET	BFA50 Mortar WET	BFA75 Mortar WET	New MSWI25 WET	New MSWI50 WET	New MSWI75 WET
Zinc (Zn)	mg/L	0.439	4.408	3.10	0.217	0.368	7.888
Calcium (Ca)	mg/L	374	899	2,815	532	1,046	777
Aluminium (Al)	mg/L	1.954	13.86	199	226	19.42	24.32
Barium (Ba)	mg/L	0.204	0.488	2.34	0.122	0.204	0.209
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	0.141	0.244	0.294	0.077	0.064	0.151
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	0.013	0.021	0.039	0.011	0.019	0.036
Chromium (Cr)	mg/L	0.528	0.505	0.421	0.623	0.663	0.823
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	0.008	0.012	0.030	0.327
Lead (Pb)	mg/L	0.006	0.006	0.176	0.075	0.152	0.870

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า  
การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

*ศาสตราจารย์ ดร. พันธ์วิทย์ สัมพันธ์พานิช*  
 (ดร. ศีลาวัจร ดำรงศิริ)  
 หัวหน้าห้องปฏิบัติการ  
 1 / 14.2. / 62

*นางอารียา รัตนวรรณชัย*  
 (นางอารียา รัตนวรรณชัย)  
 ผู้วิเคราะห์  
 1 / พ.ย. / 62

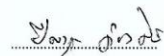
*ศาสตราจารย์ ดร. พันธ์วิทย์ สัมพันธ์พานิช*  
 (รองศาสตราจารย์ ดร. พันธ์วิทย์ สัมพันธ์พานิช)  
 รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม  
 1 / พ.ย. / 62



รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		LFO Mortar WET	LFA25 Mortar WET#1	LFA25 Mortar WET#2	LFA50 Mortar WET	LFA75 Mortar WET	LFA100 Mortar WET
Zinc (Zn)	mg/L	9.018	1.404	0.407	0.315	0.195	0.586
Calcium (Ca)	mg/L	1,250	1,312	1,266	1,335	1,367	1,161
Aluminium (Al)	mg/L	26.51	25.54	17.23	82.32	130	332
Barium (Ba)	mg/L	0.118	0.299	0.400	0.936	1.744	6.55
Silver (Ag)	mg/L	0.018	0.008	0.006	0.005	0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	0.0981	0.378	0.456	1.230	2.247	4.480
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	0.013	0.012	0.022	0.037	0.052
Chromium (Cr)	mg/L	0.646	0.536	0.462	0.482	0.516	0.396
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.005	0.010
Lead (Pb)	mg/L	0.010	0.006	<0.005	<0.005	<0.005	0.047

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์						
		TPI25 Mortar WET	TPI50 Mortar WET	TPI75 Mortar WET	TPI100 Mortar WET	BPEC 25 Mortar WET	BPEC 50 Mortar WET	BPEC 75 Mortar WET
Zinc (Zn)	mg/L	0.129	0.118	0.319	2.332	0.362	1.809	34.19
Calcium (Ca)	mg/L	1,245	1,371	1,453	427	485	485	550
Aluminium (Al)	mg/L	40.33	112	252	400	8.24	44.11	135
Barium (Ba)	mg/L	0.254	0.292	0.432	0.613	1.018	0.665	0.981
Silver (Ag)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	0.088	0.105	0.139	0.198	0.083	0.145	0.157
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	0.010	0.017	0.025	0.035	0.012	0.025	0.035
Chromium (Cr)	mg/L	0.498	0.962	0.882	0.894	0.510	0.786	0.880
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	0.014	0.041	0.147	<0.005	0.009	0.071
Lead (Pb)	mg/L	0.057	0.118	0.156	0.179	0.028	0.102	0.313

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้รับรองผลให้เฉพาะตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้อ้างอิงเพื่อการค้าหรือโฆษณาสินค้า การคัดลอกหรือสำเนารายงานผลวิเคราะห์ไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการสถาบันฯ



(ดร.ศิริราช ต่ารังศิริ)  
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ  
๒๗/๖๖/๖๒



(นางอารียา รัตนวรรณชัย)  
ผู้วิเคราะห์  
๒๗/๖๖/๖๒

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ สมานอ่วม)  
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม  
๒๗/๖๖/๖๒





สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถาบัน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร. 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร. 02-2188210

รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายชัชพงศ์ ณ ป้อมเพชร์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประเภทตัวอย่าง : WET

รหัสงานวิเคราะห์ : B\_298

วันที่ส่งตัวอย่าง : 5 พฤศจิกายน 2562

วันที่ออกรายงาน : 26 พฤศจิกายน 2562

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์					
		Sand TCLP	OPC TCLP	Sand SPLP	OPC SPLP	Sand DI Water	OPC DI Water
Iron (Fe)	mg/L	1.110	0.016	<0.005	0.013	0.013	0.012
Zinc (Zn)	mg/L	0.022	<0.005	<0.005	<0.005	0.443	<0.005
Manganese (Mn)	mg/L	1.532	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Potassium (K)	mg/L	0.529	123	0.055	130	<0.005	124
Calcium (Ca)	mg/L	190	2,829	10.22	1,001	18.35	991
Magnesium (Mg)	mg/L	8.850	<0.005	0.307	<0.005	0.826	<0.005
Sodium (Na)	mg/L	0.583	79.02	0.634	84.31	0.541	78.90
Aluminium (Al)	mg/L	0.747	0.061	0.374	0.033	0.408	0.069
Barium (Ba)	mg/L	0.230	0.468	<0.005	0.351	<0.005	0.342
Silver (Ag)	mg/L	0.011	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Arsenic (As)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mercury (Hg)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Selenium (Se)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Chromium (Cr)	mg/L	<0.005	0.499	<0.005	0.406	<0.005	0.404
Cadmium (Cd)	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Lead (Pb)	mg/L	0.016	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชัชพงศ์ ณ บ่อมเพชร
วัน เดือน ปี เกิด	6 กันยายน พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษา ต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	16/6 หมู่ 17 ต.คูคต อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12130
ผลงานตีพิมพ์	ชัชพงศ์ ณ บ่อมเพชร และ ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ. 2562. ลักษณะทาง เคมีและกายภาพของวัสดุออร์ตาที่มีเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนเป็น องค์ประกอบ. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 18, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 23-24 พฤษภาคม 2562, หน้า 97-98.