

การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการตรึงโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์  
คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม

นางสาวปณิธิ เปรมสัจธรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF COMPRESSIVE STRENGTH AND FIXING OF HEAVY METALS FROM  
CONCRETE AND GEOPOLYMER CONCRETE CONTAINING BITUMINOUS OR LIGNITE FLY ASH

Miss Panitee Preamsattham



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการ ตรึงโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มี เถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม
โดย	นางสาวปณิธิ เปรมสัจธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.เอมมา อาสนจินดา)

ปณิธี เปรมสัต์ยัธรรม : การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการตรึงโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม (COMPARISON OF COMPRESSIVE STRENGTH AND FIXING OF HEAVY METALS FROM CONCRETE AND GEOPOLYMER CONCRETE CONTAINING BITUMINOUS OR LIGNITE FLY ASH) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ, 181 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้นในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย ตามมาตรฐาน USEPA method 3051 พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเท่ากับ 0.13 0.04 0.03 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เถ้าลอยบิทูมินัสมีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีเท่ากับ 0.01 0.01 0.01 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 method 1311 พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณโลหะหนักสูงกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส โดยพบโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วในเถ้าลอยลิกไนต์สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด (3.54 1.95 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ยกเว้นสังกะสีต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด (4.55 มิลลิกรัมต่อลิตร) และพบว่าพีเอชมีผลต่อการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอย กล่าวคืออาร์เซนิกและตะกั่วถูกชะละลายเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 10 ในขณะที่โครเมียมและสังกะสีถูกชะละลายต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 10 และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักหลังจากขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วพบว่าคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถตรึงโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีที่มีในเถ้าลอยได้ สำหรับการออกแบบส่วนผสม พบว่าสามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 60 โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 4.30 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด และสามารถใช้อเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานร่วมกับสารละลายต่างในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 13.67 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด สามารถรับแรงอัดได้ 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5770438821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: FLY ASH / HEAVY METALS / LEACHING / MIXTURE DESIGN / FORMING / GEOPOLYMER CONCRETE

This research investigated the leaching of heavy metals from concrete and geopolymer concrete containing bituminous or lignite fly ash. The studies comprised of heavy metals determination by acid digestion of US. EPA method 3051. The results revealed that lignite fly ash contains As, Cr, Pb and Zn were detected at concentration of 0.13, 0.04, 0.03 and 0.13 mg/kg respectively. Bituminous fly ash contains As, Cr, Pb and Zn were detected at concentration of 0.01, 0.01, 0.01 and 0.07 mg/kg respectively. And analyzed by TCLP of US. EPA SW-856 method 1311. Lignite fly ash had higher content of heavy metals than bituminous fly ash, which As, Cr and Pb in lignite fly ash leached higher than the standard (3.54, 1.95 and 0.40 mg/L respectively). Except for Zn was below standard (4.55 mg/L). Leaching of heavy metals was pH dependent. As and Pb were increased at pH 4 to 8 and lowered at pH 10 while Cr and Zn were lowered at pH 4 to 8 and increased at pH 10. Concrete and geopolymer concrete structure could fix heavy metals better than fly ash alone, which led to lower leaching of heavy metals. Mix design of fly ash in concrete could be used to replace ordinary portland cement from 15% to 60%. The suitable fly ash content was 4.30% of the total mixture. And fly ash could be used as pozzolanic material which was combined with alkaline liquid to make geopolymer concrete. The suitable fly ash content was 13.67% of the total mixture which gave compressive strength of 230 kg/cm<sup>2</sup>.

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากหน่วยงานหลายหน่วยงาน และบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานและบุคคลดังต่อไปนี้

ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท ทอรัส พอซโซลานซ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เก้าอี้ และบริษัท เคเวอร์ อินโนเวชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยาผสมคอนกรีตซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์

ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยปฏิบัติการวิจัยธรณีเทคนิค และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการทดลอง

อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง อีกทั้งช่วยแก้ไขสิ่งบกพร่องในการทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐิภาณ ปัญญาพลกุล และกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ดร.เอมมา อาสนจินดา ที่ให้เกียรติและสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งให้ความรู้ คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการอาคารสีภาค ที่ให้ความอนุเคราะห์สอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ และให้คำแนะนำในระหว่างการดำเนินการทดลอง

เพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และดูแลกันมาโดยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง และเฝ้าก้าลังใจที่ติดลอคมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเถ้าลอย.....	5
2.1.1 เถ้าลอย (fly ash).....	5
2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย.....	7
2.1.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....	8
2.1.2 สารปอซโซลาน (pozzolan).....	9
2.1.3 วัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material).....	13
2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement).....	14
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
2.2.2 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	15

2.2.3	ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	17
2.2.4	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration).....	18
2.2.4.1	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต.....	19
2.2.4.2	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต .....	19
2.2.4.3	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์.....	20
2.3	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต .....	20
2.3.1	ส่วนประกอบของคอนกรีต.....	21
2.3.1.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	21
2.3.1.2	มวลรวม (aggregate).....	21
2.3.1.3	น้ำ (water).....	21
2.3.1.4	สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) .....	22
2.3.2	การออกแบบคอนกรีตแบบทั่วไป .....	23
2.3.3	การออกแบบคอนกรีตแบบที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม .....	23
2.4	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	26
2.4.1	จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) .....	26
2.4.2	ส่วนประกอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	30
2.4.2.1	สารปอซโซลานตั้งต้น (pozzolan).....	30
2.4.2.2	อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) .....	30
2.4.2.3	อัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate) .....	30
2.4.2.4	น้ำ (water).....	31
2.4.2.5	มวลรวม (aggregates).....	31
2.4.3	การออกแบบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	31
2.5	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกำลังอัด .....	32



2.5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง.....	33
2.5.1.1	คุณสมบัติของวัสดุผสม.....	33
2.5.1.2	การทำคอนกรีต.....	33
2.5.1.3	การบ่มคอนกรีต .....	33
2.5.1.4	การทดสอบ .....	34
2.5.2	รูปทรงของก้อนตัวอย่าง.....	34
2.6	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนักและการชะละลาย.....	35
2.6.1	โลหะหนัก.....	35
2.6.2	การชะละลาย .....	37
2.7	ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	39
2.7.1	ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน .....	39
2.7.2	ข้อมูลการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ....	43
2.7.3	ข้อมูลการประยุกต์ใช้เถ้าลอยกับงานวิศวกรรม .....	46
2.7.3.1	การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต .....	47
2.7.3.2	การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต.....	49
2.8	เป้าหมายของงานวิจัย (Research Focus).....	50
บทที่ 3	แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.1	แผนการวิจัย .....	51
3.1.1	การวางแผนการทดลอง .....	51
3.1.2	ขั้นตอนการทดลอง .....	51
3.1.3	ตัวแปรในการทดลอง .....	53
3.2	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	57

3.2.2	วัตถุดิบและสารเคมี .....	58
3.2.3	เครื่องทดสอบและวิเคราะห์ผล .....	59
3.3	การเตรียมสารเคมีในการชะละลาย .....	59
3.3.1	การเตรียมสารละลายผงกรดสังเคราะห์ .....	59
3.3.2	การเตรียมสารละลายกรดอะซิติก .....	59
3.4	แผนการทดลอง .....	60
3.5	การดำเนินการทดลอง .....	61
3.5.1	การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแก้วลอย .....	61
3.5.1.1	คุณสมบัติทางเคมี .....	61
3.5.1.2	คุณสมบัติทางกายภาพ .....	62
3.5.2	การทดสอบหาความเป็นพิษของแก้วลอย .....	62
3.5.2.1	การชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธีย่อยสลาย .....	62
3.5.2.2	การชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure .....	63
3.5.3	การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ .....	64
3.5.3.1	กรณีศึกษาที่ 1: การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้แก้วลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน .....	64
3.5.3.2	กรณีศึกษาที่ 2: ปริมาณแก้วลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	69
3.5.4	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ .....	73
3.5.5	การทดสอบหาความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ .....	74
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	75
4.1	คุณสมบัติเบื้องต้นของแก้วลอย .....	75
4.1.1	คุณสมบัติทางเคมี .....	75

4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ .....	78
4.2 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอย.....	80
4.2.1 ผลการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย.....	80
4.2.2 ผลการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอยด้วยวิธี TCLP .....	82
4.3 การขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	88
4.3.1 กรณีศึกษาที่ 1: การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดย ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน.....	88
4.3.2 กรณีศึกษาที่ 2: ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	90
4.4 ปริมาณโลหะหนักในผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็น ส่วนผสม.....	92
4.4.1 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยกรดอะซิติก.....	94
4.4.2 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์ .....	97
4.4.3 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำกลั่น .....	100
4.4.4 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4.....	103
4.4.5 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6.....	106
4.4.6 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8.....	109
4.4.7 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10.....	112
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	117
5.1 สรุปผลวิจัย .....	117
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	119
5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	120
รายการอ้างอิง .....	121
ภาคผนวก.....	129

ภาคผนวก ก .....	130
ภาคผนวก ข .....	132
ภาคผนวก ค .....	138
ภาคผนวก ก .....	160
ภาคผนวก จ .....	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	181



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ปริมาณร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบทางเคมีและความชื้นของถ่านหิน.....	6
ตารางที่ 2-2 การแบ่งประเภทของถ่านล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	8
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติทางด้านเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	10
ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติทางด้านกายภาพของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	11
ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติทางด้านกายภาพเพิ่มเติมของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618..	12
ตารางที่ 2-6 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	15
ตารางที่ 2-7 ปริมาณสารประกอบอื่นๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	15
ตารางที่ 2-8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	16
ตารางที่ 2-9 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2-10 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบทั่วไป .....	23
ตารางที่ 2-11 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบที่มีถ่านล้อยเป็นส่วนผสม .....	25
ตารางที่ 2-12 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่แนะนำ .....	31
ตารางที่ 2-13 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต.....	32
ตารางที่ 2-14 อันตรายจากโลหะหนักที่พบในถ่านล้อย .....	36
ตารางที่ 2-15 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม .....	37
ตารางที่ 2-16 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย .....	38
ตารางที่ 3-1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1.....	53
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2.....	54
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3.....	55
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 4.....	57
ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีต.....	64
ตารางที่ 3-6 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 1.....	65

ตารางที่ 3-7 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 1.....	65
ตารางที่ 3-8 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 1.....	66
ตารางที่ 3-9 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1 .....	66
ตารางที่ 3-10 ตัวอย่างส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต .....	67
ตารางที่ 3-11 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 1 .....	67
ตารางที่ 3-12 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 1.....	68
ตารางที่ 3-13 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 1.....	68
ตารางที่ 3-14 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1.....	69
ตารางที่ 3-15 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 2.....	69
ตารางที่ 3-16 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 2.....	70
ตารางที่ 3-17 ส่วนผสมคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 2.....	70
ตารางที่ 3-18 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1 .....	71
ตารางที่ 3-19 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 2 .....	71
ตารางที่ 3-20 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 2.....	72
ตารางที่ 3-21 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 2.....	72
ตารางที่ 3-22 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 2.....	73
ตารางที่ 4-1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย .....	76
ตารางที่ 4-2 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618.....	77
ตารางที่ 4-3 ผลวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเถ้าลอย.....	78

ตารางที่ 4-4 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยด้วยวิธีย่อยสลาย .....	81
ตารางที่ 4-5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุอื่นๆ ในถ้ำลอยด้วยวิธีย่อยสลาย .....	81
ตารางที่ 4-6 ผลวิเคราะห์การชะละลายปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยด้วยวิธี TCLP .....	85
ตารางที่ 4-7 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1 .....	89
ตารางที่ 4-8 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 2 .....	91
ตารางที่ 4-9 สภาวะต่างๆ ในการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก .....	93
ตารางที่ 4-10 ผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตด้วยน้ำชะละลายต่างๆ .....	116



## สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 การนำถ่านหินไปใช้งานตามชนิดและคุณสมบัติของถ่านหิน .....	7
รูปที่ 2-2 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration) .	25
รูปที่ 2-3 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	27
รูปที่ 2-4 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	27
รูปที่ 2-5 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต .....	29
รูปที่ 2-6 แบบจำลองของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน .....	41
รูปที่ 2-7 เชื้อ Hungry Horse มลรัฐมอนทานา ประเทศสหรัฐอเมริกา .....	47
รูปที่ 2-8 เชื้อโคลงทำดำน จังหวัดนครนายก .....	48
รูปที่ 4-1 ภาพกำลังขยายของถ้ำลอยลิกไนต์ที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า .....	79
รูปที่ 4-2 ภาพกำลังขยายของถ้ำลอยบิทูมินัสที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า.....	79
รูปที่ 4-3 ภาพการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ้ำลอยลิกไนต์และบิทูมินัส.....	80
รูปที่ 4-4 ผลการชะละลายโลหะหนักในถ้ำลอยด้วยกรดอะซิติก ผงกรดสังเคราะห์ และน้ำกลั่น....	86
รูปที่ 4-5 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิดในถ้ำลอย ด้วยพีเอช 4 6 8 และ 10.....	87
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำลอยและกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ .....	92
รูปที่ 4-7 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยกรดอะซิติก.....	95
รูปที่ 4-8 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยน้ำฝนกรด สังเคราะห์ .....	98
รูปที่ 4-9 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยน้ำกลั่น .....	101
รูปที่ 4-10 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยพีเอช 4 .....	104
รูปที่ 4-11 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยพีเอช 6 .....	107
รูปที่ 4-12 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยพีเอช 8 .....	110
รูปที่ 4-13 ผลการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยพีเอช 10 .....	113



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในแต่ละปี มีปริมาณการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจำนวนหลายล้านตัน ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินก่อให้เกิดเถ้าถ่านหิน โดยประมาณร้อยละ 20 ของเถ้าถ่านหินจะเป็นเถ้าหนัก (bottom ash) และประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าถ่านหินจะเป็นเถ้าลอย (fly ash) สำหรับเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ไม่ให้ลอยออกมาจากปล่องควันไอร้อนของโรงงานสู่อากาศด้วยเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator; ESP) แล้วนำไปรวบรวมเก็บไว้ในไซโล (silo) เพื่อจำหน่ายหรือทิ้งลงสายพาน (ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย, 2544) ซึ่งเถ้าลอยอาจหลุดลอยออกมาได้ ก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันทางอากาศและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการทำหลุมฝังกลบ ผู้วิจัยจึงหาแนวทางที่จะลดปริมาณเถ้าลอยหรือของเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด (waste reduction) ประเด็นการรีไซเคิล (recycle) จึงได้รับความสนใจจากผู้วิจัย โดยการนำเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบในงานคอนกรีตเพื่อเตรียมการแก้ไขและลดปัญหาดังกล่าวลง

อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบในงานก่อสร้างนั้นอาจปนเปื้อนไปด้วยโลหะหนักและสารเคมีที่เป็นพิษ ซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลออกมาเมื่อสัมผัสกับน้ำฝนหรือมีน้ำไหลซึมผ่าน จึงมีงานวิจัยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี (Shi และ Kan, 2009) และค่าความเป็นพิษของเถ้าลอย เพื่อนำเถ้าลอยมาเป็นวัตถุดิบในงานก่อสร้างได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และศึกษาสมรรถนะด้านกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานก่อสร้าง (Aleem และ Arumairaj, 2012) ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วิธีทดสอบการชะละลายด้วยน้ำกลั่น (Xue และคณะ, 2009) โดยมุ่งเน้นทดลองการชะละลายของเถ้าลอยเชิงเดี่ยว แต่ในสภาวะจริง เถ้าลอยจะรวมตัวอยู่กับวัสดุอื่นๆ ซึ่งทำให้รูปแบบการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยผสมนั้นเปลี่ยนแปลงไป

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักของถ้ำลอยจาก ถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) และลิกไนต์ (lignite) ด้วยวิธีย่อยสลาย (Microwave Digestor) ตาม มาตรฐาน USEPA method 3051 และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 method 1311 โดยสารเคมีที่ใช้ในการชะละลายคือกรดอะซิติก (acetic acid) น้ำกลั่น (deionized water) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (synthetic acid rain extraction fluid) น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 เพื่อจำลองสภาวะการชะละลายในธรรมชาติ และนำถ้ำลอย ดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง 2 ประเภท ได้แก่ คอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดย แบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา ประกอบด้วย (1) กรณีศึกษาการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตโดยใช้ถ้ำลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน และ (2) กรณีศึกษาหาปริมาณถ้ำลอยที่ เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยกำหนดให้บ่มคอนกรีตในน้ำเป็น เวลา 28 วัน และบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อ เปรียบเทียบความสามารถในการตรึงความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทั้ง 2 ประเภทที่มีถ้ำลอย เป็นส่วนผสม ผ่านการทดสอบการชะละลายโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539) และเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดผ่านการทดสอบสมรรถนะตาม มาตรฐานงานก่อสร้าง (มอก. 57-2533, 2533) เป็นการลดต้นทุนวัสดุก่อสร้าง ลดปริมาณของเสีย (waste reduction) และเป็นการใช้ประโยชน์สูงสุดจากของเสีย ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการ ทดลองจากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ถ้ำลอยเป็นส่วนผสมสำหรับงาน คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเปรียบเทียบอัตราการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยวิธี Toxic Characteristic Leachability Procedure (TCLP)

1.2.2 เพื่อศึกษาประเภทและปริมาณของเถ้าลอยที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์สามารถนำไปใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากจากมีซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึกและกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีต และสามารถใช้เถ้าลอยจากถ่านหินปิทูมินัสเป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้ เนื่องจากมีซิลิกาและอลูมินาปริมาณสูง ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเมื่อผสมกับสารละลายต่างในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยปริมาณเถ้าลอยที่ใส่เพิ่มขึ้นในแต่ละส่วนผสมจะส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์สามารถดึงโลหะหนักของเถ้าลอยไว้ได้ กล่าวคือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม หรืออยู่ในช่วงที่ปลอดภัย (safety range)

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 แก๊สลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และถ่านหินบิทูมินัสจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง

1.4.2 ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแก๊สลอยด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size analyzer) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence; XRF) และเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma; ICP)

1.4.3 ทดสอบความเป็นพิษของแก๊สลอยและประเมินความเสี่ยงอันตรายของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยวิธี Toxic Characteristic Leachability Procedure (TCLP) โดยใช้กรดอะซิติก น้ำกลั่น น้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 เป็นสารเคมีในการชะละลาย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำแก๊สลอยซึ่งเป็นของเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้อย่างปลอดภัย

1.5.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำแก๊สลอยมาแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในงานคอนกรีต และเสนอทางเลือกซึ่งไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง เนื่องจากเป็นก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) อันเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน

1.5.3 สามารถลดปัญหาค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการทำหลุมฝังกลบแก๊สลอย ด้วยการลดปริมาณแก๊สลอยหรือของเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด (waste reduction) โดยใช้หลักการของ 3Rs (Reduce, Reuse & Recycle) ด้านรีไซเคิล

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเถ้าลอย

##### 2.1.1 เถ้าลอย (fly ash)

เถ้าลอยเป็นของเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยมีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียดสีเทา ดำ หรือน้ำตาล มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 150 ไมโครเมตร จะถูกดักจับไว้ไม่ให้ลอยออกมาจากปล่องควันไอร้อนของโรงงานปะปนไปสู่บรรยากาศด้วยเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator; ESP) แล้วนำไปรวบรวมเก็บไว้ในไซโล (silo) เพื่อจำหน่ายหรือทิ้งลงสายพาน ซึ่งอาจหลุดลอยออกมาได้ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการทำหลุมฝังกลบเถ้าลอย จึงจำเป็นต้องหาวิธีการกำจัด หรือนำเถ้าลอยไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อให้เหมาะสม (ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย, 2544)

โดยทั่วไปคุณสมบัติของเถ้าลอยจากแต่ละโรงงานจะมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้จากชนิดและคุณภาพของถ่านหินตามปริมาณคาร์บอน ปริมาณความชื้น ค่าความร้อนเมื่อเผา และลำดับการแปรสภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งทางธรณีวิทยาได้จัดแบ่งถ่านหินออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่

1) ถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เป็นถ่านหินที่มีซากพืชเหลือปรากฏให้มองเห็นอยู่เล็กน้อย ลักษณะเนื้อเหนียวและฉิวด้าน มีสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างต่ำ และมีปริมาณความชื้นสูง นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2) ถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) เป็นถ่านหินที่มีความอ่อนตัวคล้ายขี้ผึ้ง ลักษณะเนื้อไม่แข็งมาก มีสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูง มีปริมาณออกซิเจนและปริมาณซัลเฟอร์ค่อนข้างต่ำ นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในงานอุตสาหกรรม

3) ถ่านหินบิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น มีลักษณะแข็งเป็นมันวาว ส่วนใหญ่ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิท ถ่านหินชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการระเหย คือประเภทที่มีความสามารถในการระเหยสูง กลาง และต่ำ นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในการถลุงโลหะ หรือการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและความสามารถในการระเหย

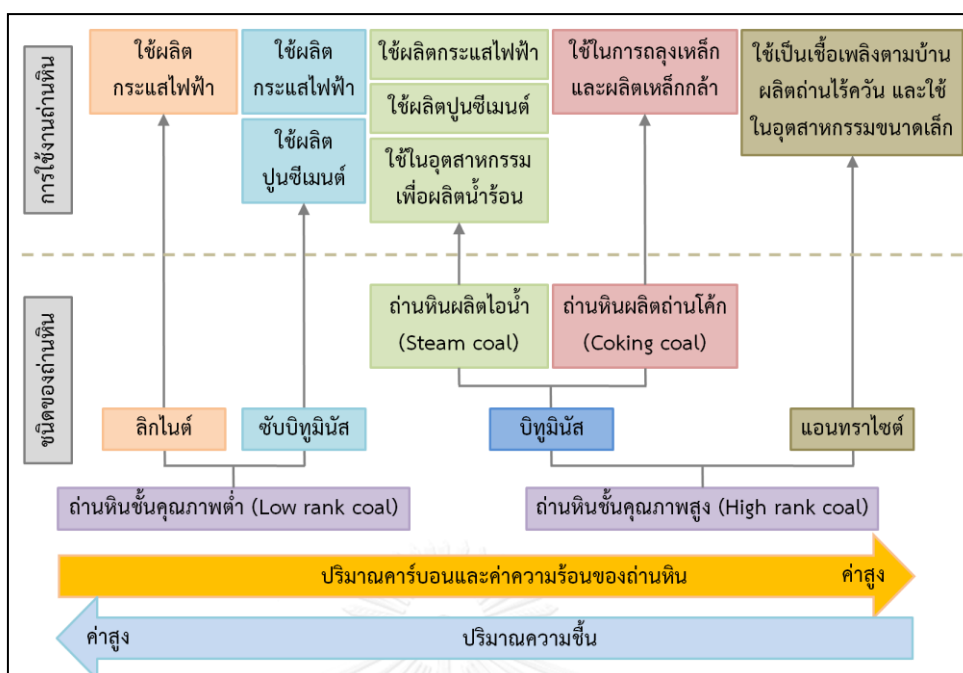
4) ถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุด มีลักษณะเป็นเงามันวาว มีสีดำ มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 90 ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำมาก และมีค่าความร้อนสูง มีควันน้อย แต่จุดไฟติดยาก นิยมใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนภายในบ้าน และใช้ในงานอุตสาหกรรมแก้ว หรืออุตสาหกรรมเคมี

ตารางที่ 2-1 ปริมาณร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบทางเคมีและความชื้นของถ่านหิน

ชนิดของถ่านหิน	ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยมวล)					ความชื้น
	C	H	O	N	S	
ลิกไนต์	60 – 75	5 – 6	20 – 30	1	1	50 – 70
ซับบิทูมินัส	75 – 80	5 – 6	15 – 20	1	1	25 – 30
บิทูมินัส	80 – 90	4 – 6	10 – 15	1	5	5 – 10
แอนทราไซต์	90 – 98	2 – 3	2 – 3	1	1	2 – 5

ที่มา: <http://fieldtrip.ipst.ac.th/content/2/detail/5>

จะเห็นว่าถ่านหินมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ 5 ธาตุ คือ คาร์บอน (Carbon; C) ไฮโดรเจน (Hydrogen; H) ออกซิเจน (Oxygen; O) ไนโตรเจน (Nitrogen; N) และซัลเฟอร์หรือกำมะถัน (Sulphur; S) โดยถ่านหินที่มีจำนวนธาตุคาร์บอนสูง และมีจำนวนธาตุอื่นๆ ต่ำ เมื่อนำไปเผาไหม้จะให้ความร้อนมาก จัดได้ว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพ ซึ่งถ่านหินทั้ง 4 ชนิดดังกล่าว ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553) แสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การนำถ่านหินไปใช้งานตามชนิดและคุณสมบัติของถ่านหิน

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

ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ทั่วทุกภาค ชนิดของถ่านหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่คือถ่านหินลิกไนต์ มีจำนวนมากที่บริเวณอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และอำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่ ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นคุณภาพต่ำ (Low rank coal) เนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำ และมีปริมาณความชื้นสูง ชนิดของถ่านหินที่พบรองลงมาคือถ่านหินซับบิทูมินัส และถ่านหินแอนทราไซต์ที่บริเวณอำเภอนาด่าง จังหวัดเลย และบริเวณอำเภอนากลาง จังหวัดอุดรธานี ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นคุณภาพสูง (High rank coal) เนื่องจากมีค่าความร้อนสูง และมีปริมาณความชื้นต่ำ (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

### 2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ้ำลอย

โดยทั่วไป ถ้ำลอยมีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียดสีเทาอ่อนถึงสีดำ ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินวิธีการเผา และอุณหภูมิในการเผา ถ้ำลอยมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่ และมีรูปร่างหลายเหลี่ยมเป็นส่วนน้อย มีความละเอียดตั้งแต่ 0.001 มิลลิเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร สำหรับถ้ำลอยที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดว่าต้องมีปริมาณร้อยละที่ค้างบนตะแกรงที่มีช่อง

เปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ความละเอียดของเถ้าลอยในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ วัดโดยชุดทดสอบความละเอียด (Air Blaine Permeability) อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม สำหรับความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าไม่ต่ำกว่า 2,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

### 2.1.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

โดยทั่วไป เถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก มีแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ออกไซด์ของอัลคาไลในรูปโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบรอง และมีความชื้นซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกประเภทของเถ้าลอยตามองค์ประกอบทางเคมีเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ C (Class C) และชั้นคุณภาพ F (Class F) โดยพิจารณาผลรวมขององค์ประกอบหลักในเถ้าลอย (Thomas, 2007) ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การแบ่งประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ชั้นคุณภาพ	คำอธิบาย	องค์ประกอบทางเคมี
F	โดยปกติ เกิดจากการเผาถ่านหินชนิดแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (pozzolan)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
C	โดยปกติ เกิดจากการเผาถ่านหินชนิดลิกไนต์และซับบิทูมินัส ซึ่งนอกจากมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious) โดยบางเถ้าลอยในชั้นคุณภาพ C อาจมีส่วนประกอบของปูนขาว (lime) ปริมาณสูงกว่า 10%	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$

ที่มา: ASTM C618-05, 2007 และ Thomas, 2007



### 2.1.2 สารปอซโซลาน (pozzolan)

เถ้าลอยสามารถเป็นสารผสมแบบแร่ธาตุของกลุ่มสารปอซโซลานชนิดหนึ่ง ซึ่งนอกจากเถ้าลอยแล้ว มีสารผสมแบบแร่ธาตุของกลุ่มสารปอซโซลานชนิดอื่นๆ ที่เป็นของเสีย (waste) จากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เถ้าแกลบ (rice husk ash) ตะกรันเตาถลุง (ground granular blast furnace slag) และผงฝุ่นซิลิกา (silica fume) เป็นต้น สำหรับคำจำกัดความของสารปอซโซลาน (pozzolan) ตามมาตรฐาน ASTM C618 คือวัสดุที่มีสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยวัสดุดังกล่าวไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่อุณหภูมิห้องแล้ว ผลของปฏิกิริยาที่ได้จะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (cementitious material) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยได้จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

- 1) ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติ หรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ
- 2) ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ ) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ต่ำและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 (1991) ดังแสดงในตารางที่ 2-3 ถึง 2-5 สำหรับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มีซิลิกา (silica;  $\text{SiO}_2$ ) สูง
- 3) ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินชนิดลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 50 ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50$ ) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2-3 ถึง 2-6 (Tikalsky และคณะ, 1996)

จะเห็นว่าถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานแล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง ยกตัวอย่างถ้าลอยชั้นคุณภาพ C จากบริษัท เฟิร์ส เอ็นเนอร์จี คอร์ปอเรชั่น (First Energy Corporation) ที่รัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 20 โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ประมาณร้อยละ 90 ซึ่งเป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Guo, Shi และ Dick, 2010) อย่างไรก็ตาม มีการประเมินถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ซึ่งพบว่ามีศักยภาพเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน (Lieberman และคณะ, 2015)

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ไม่น้อยกว่าร้อยละ)	70.0	70.0	50.0
SO <sub>3</sub> (ไม่เกินร้อยละ)	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น (ไม่เกินร้อยละ)	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (ไม่เกินร้อยละ)	10.0	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O (ไม่เกินร้อยละ)	1.5	1.5	1.5

ที่มา: ASTM C618-05, 2007

หมายเหตุ:

1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan)
2. สามารถใช้ถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการทำงานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้
3. ปริมาณนี้จะใช้ระบุสำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติทางกายภาพของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด			
- ปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) <sup>A</sup> ร่อนโดยใช้น้ำ (ไม่เกินร้อยละ)	34	34	34
ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
- ที่อายุ 7 วัน (อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม)	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
- ที่อายุ 28 วัน (อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม)	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
- ความต้องการน้ำ (สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม)	115	105	105
ความคงตัว (soundness) <sup>C</sup>			
- การขยายตัวหรือหดตัวออโตแคลฟ (ไม่เกินร้อยละ)	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ <sup>D</sup>			
- ความหนาแน่น (ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ)	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) (ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ)	5	5	5

ที่มา: ASTM C618-05, 2007

หมายเหตุ:

A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนตะแกรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชั้นส่วนทดสอบของการขยายตัว ออโตแคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างแต่ละอันต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของลิปตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมดถ้าทดสอบไม่ถึงลิปตัวอย่าง

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติมของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) กับปริมาณที่ค้างบนตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ (ไม่เกินร้อยละ)	-	255	-
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (ไม่เกินร้อยละ)	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟอง อากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง (ไม่เกินร้อยละ)	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม การขยายตัวของตัวอย่างที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ (ไม่เกินร้อยละ)	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต*			
วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ			
- สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ)	0.10	0.10	0.10
- สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ)	0.05	0.05	0.05
วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ			
- เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน (ไม่เกินร้อยละ)	100	100	100

หมายเหตุ:

\* ปริมาณปอซโซลานที่นับว่ามีประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานซัลเฟตจะต้องไม่เกินร้อยละ  $\pm$  2 ของการทดสอบหรือระหว่างสองค่าของการทดสอบที่อยู่ในเกณฑ์

จากตารางที่ 2-4 จะเห็นว่าความละเอียดของเถ้าลอยมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และกำลังอัดคอนกรีต ซึ่งความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ดังสมการที่ (2.1)

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์} = (A/B) \times 100 \quad (2.1)$$

โดย  $A =$  กำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

$B =$  กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้าลอยในส่วนผสม

สำหรับคำจำกัดความของมอร์ตาร์ (Mortar) คือส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยมาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหิน ชั้นคุณภาพ N F และ C ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

### 2.1.3 วัสดุเชื่อมประสาน (Cementitious Material)

เมื่อผสมเถ้าลอยกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) กับซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate;  $3\text{Ca} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate;  $3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ทำให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (cementitious) คล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ดังนั้นจึงสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ในการคอนกรีตได้ เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีความสามารถในการเชื่อมประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตอีกด้วย โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อ

มีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น (Prinya Chindaprasirt, Jaturapitakkul และ Sinsiri, 2007)

## 2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้จากการเผาส่วนผสมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ออกไซด์ของธาตุแคลเซียมจำพวกหินปูน (limestone) ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมจำพวก ดินเหนียว (Argillaceous materials) และออกไซด์ของธาตุเหล็กจำพวกลูกรัง (laterite) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,400 – 1,500 องศาเซลเซียส จนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปหมดได้เป็นเม็ด ปูนซีเมนต์ (clinker) แล้วนำเม็ดปูนซีเมนต์ไปบดเป็นผงละเอียด เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะได้เป็นวัสดุ เชื่อมประสานที่แข็งแรง

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์ รอง ดังแสดงในตารางที่ 2-6 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

1) สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxide) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยออกไซด์ กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2) สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxide) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>)

ตารางที่ 2-6 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กลุ่ม	สารประกอบประเภทออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide)	CaO	60.0 – 67.0
	ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide)	SiO <sub>2</sub>	17.0 – 25.0
	อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0 – 8.0
	เฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	MgO	1.0 – 4.0
	โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide)	Na <sub>2</sub> O	0.2 – 1.3
	โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide)	K <sub>2</sub> O	0.2 – 1.3
	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfur trioxide)	SO <sub>3</sub>	0.1 – 3.0

ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ ซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Odler, 1998) ดังแสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ปริมาณสารประกอบอื่นๆ โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบอื่นๆ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
สารประกอบอื่นๆ	0.5 – 3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition; LOI)	0.1 – 3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)	0.20 – 0.75

ที่มา: Odler, 1998

## 2.2.2 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตุถุติการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของ

ปูนซีเมนต์ (Bezerra และคณะ, 2011) ดังแสดงในตารางที่ 2-8 โดยสารประกอบที่สำคัญประกอบด้วย 4 ชนิด ดังนี้

ตารางที่ 2-8 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
Tricalcium silicate	$3\text{CaO SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Dicalcium silicate	$2\text{CaO SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Tetracalciumaluminoferrite	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

ที่มา: Bezerra และคณะ, 2011

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตคือเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัว ให้กำลังค่อนข้างดี โดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) เป็นสารประกอบที่มีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ ไดแคลเซียมซิลิเกตจะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดค่อนข้างช้า และช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดความรุนแรงมาก และทำให้ก่อตัวทันที (flash set) การพัฒนา กำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (solid solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า



ไตรแคลเซียมอลูมิเนต โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี ปริมาณร้อยละ 5 ถึง 10

### 2.2.3 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) จึงทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณที่แตกต่างกันของสารประกอบ สำหรับส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-9 โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่ผลิตขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C150 ของประเทศสหรัฐอเมริกา และ British Standard; B.S. ของประเทศอังกฤษ ซึ่งตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 ของประเทศไทยได้แบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) ดังนี้

ตารางที่ 2-9 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ

ประเภทของ ปูนซีเมนต์	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	$CaSO_4$	$CaO$	$MgO$
ประเภทที่ 1	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
ประเภทที่ 2	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
ประเภทที่ 3	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
ประเภทที่ 4	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
ประเภทที่ 5	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาดำเนินการเร็วมาก และให้ความร้อนปานกลาง เหมาะสำหรับงานทำผิวถนน สะพาน ท่อระบายน้ำ เป็นต้น

2) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง เหมาะสำหรับต่อม่อขนาดใหญ่ สะพาน เทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดินในบริเวณที่อุณหภูมิก่อนน้ำเค็มเป็นครั้งคราว เป็นต้น

3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานเร่งด่วนที่ต้องแข่งกับเวลา หรือในกรณีที่ต้องการถอดหรือรีแบบเร็วกว่าปกติ

4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำมากเพราะมีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ต่ำ แต่มีปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ที่ค่อนข้างสูง เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหนา เขื่อนกั้นน้ำ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3A$ ) ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในบริเวณที่ดินมีความเป็นด่างสูง บริเวณที่มีดินเค็ม หรือน้ำทะเล เนื่องจากระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะช้ากว่าประเภทอื่นๆ

#### 2.2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง และคณะ, 2545) ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก (Structure of Hydrate Cement Paste) หรือไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ (Hydrate Cement Paste;

HCP) หรือเพสต์ (Paste) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2-9 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

#### 2.2.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

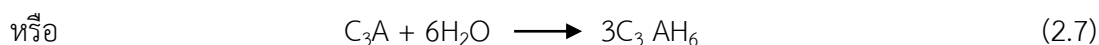
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้ผลผลิตคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate;  $3Ca \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ  $C_3S_2H_3$ ) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)



โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันดังกล่าว เมื่อผลผลิตแข็งตัวจะมีรูปร่างของผลึกที่ไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากมีรูปร่างไม่แน่นอน อีกทั้งความพรุนของ C-S-H จะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ที่ได้นั้นจะส่งผลดีให้ปูนซีเมนต์ผสมมีค่าพีเอชประมาณ 12.5 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

#### 2.2.4.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการก่อตัวทันที (flash set) ของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)



การเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วนี้ส่งผลให้เกิดอุปสรรคต่อการทำงาน จึงแก้ไขด้วยการใส่ยิบซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ในช่วงกระบวนการบดเม็ดซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดช้าลง โดยยิบซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) เกิดขึ้นของเอททริงไทต์ (Ettringite) หุ้มรอบอนุภาคของไตรแคลเซียมอลูมิเนตดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

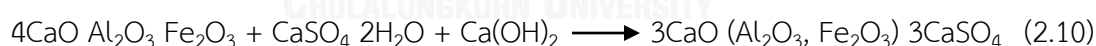




ซึ่งชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ดังนั้นการก่อตัวในช่วงแรกจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) เป็นส่วนใหญ่ โดยเอททริงไกต์ (Ettringite) นั้นไม่ได้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) เนื่องจากซีเมนเพสต์เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทำให้มีปริมาตรมากขึ้น จึงเกิดแรงดันภายใน ส่งผลให้ชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) แตกออก และขณะนั้นก็เกิดปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตขึ้น ต่อมาจะมีชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) ใหม่มาหุ้มอนุภาคของไตรแคลเซียมอลูมิเนตและเกิดชั้นตอนดังกล่าวสลับกันไปเรื่อยๆ จนซัลเฟตไอออน ( $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  และ  $OH^-$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite)

#### 2.2.4.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) จะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยที่เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) เกิดเป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเข็มของซัลโฟลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการที่ (2.10)



จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วที่สุด รองลงมาคือไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ตามลำดับ

### 2.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต

คอนกรีต (วิจิตต์ัจฉรา สรรพกิจจำนง และคณะ, 2545) ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม และน้ำ คุณภาพของมวลรวมและน้ำจึงมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ซึ่งทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น โดย

เฉพาะงานคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีกำลังสูง (high strength concrete) และคอนกรีตคุณภาพสูง (high performance concrete)

### 2.3.1 ส่วนประกอบของคอนกรีต

#### 2.3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุผสมละเอียด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับกำลังของคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 2.3.1.2 มวลรวม (aggregate)

มวลรวม หมายถึงวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) แล้วได้เป็นคอนกรีต สำหรับจำกัดความของซีเมนต์เพสต์ คือส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากที่สุด โดยทั่วไปมีประมาณร้อยละ 75 ของปริมาตรรวม มวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทราย กรวด และหินย่อย นอกจากนี้ยังมีมวลรวมจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเตาถลุง อีฐย่อย เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้มวลรวมที่เกิดตามธรรมชาติผสมทำคอนกรีต สำหรับคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงของมวลรวมคือความแข็งแรง ความสะอาด และขนาดคละ

#### 2.3.1.3 น้ำ (water)

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในงานคอนกรีต คุณภาพของน้ำที่ใช้โดยทั่วไปจึงควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด เช่น น้ำประปา เนื่องจากน้ำที่มีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มาก หากนำไปใช้ผสมคอนกรีตแล้ว อาจจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัว กำลังที่ต่ำลง ตลอดจนความคงทนของคอนกรีต

### 2.3.1.4 สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

สารลดน้ำพิเศษเป็นสารเคมีผสมเพิ่มที่สำคัญในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปนิยมใช้เพิ่มความสามารถในการเท การทำคอนกรีตไหล การทำคอนกรีตกำลังสูง และการทำคอนกรีตที่มีเนื้อละเอียดมากเป็นส่วนผสม สารลดน้ำพิเศษสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (ปริญญาจินดาประเสริฐ, 2553) ดังนี้

- 1) ซัลโฟเนตเตตเมลามีนเฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (sulfonated melamine formaldehyde condensates)
- 2) ซัลโฟเนตเตตแนฟธาไลน์เฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (sulfonated naphthalene formaldehyde condensates)
- 3) สารลดน้ำพิเศษอื่น เช่น กรดซัลโฟนิคเอสเทอร์ (sulfonic acid ester) โมดิฟายด์ ลิกโนซัลโฟเนต (modified lignosulfonates) คาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์ (carbohydrate esters) และโพลีคาร์บอกซิลิเออร์ (polycarboxyl ether)

หลักการทั่วไปของการออกแบบคอนกรีตที่มีกำลังสูง คือการลดปริมาณน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตให้มากที่สุด โดยไม่ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตด้านความสามารถในการเทเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการแยกตัว (พิชัย นิमितยงสกุล, กิตติพุมิ เปล่งขำ และ สุรัก พานิชนาวา, 2546) จึงจำเป็นต้องใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อลดปริมาณน้ำลง และผสมเนื้อละเอียดในงานคอนกรีต เพื่อให้เนื้อละเอียดกระจายและแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดีขึ้น ซึ่งการลดปริมาณน้ำลง และคุณสมบัติของเพสต์ที่สม่ำเสมอและความแน่นขึ้นนี้ ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้น

นอกจากนี้ยังนิยมใช้สารลดน้ำพิเศษในงานคอนกรีตที่ผสมเนื้อละเอียดปริมาณมาก (high volume fly ash) (McCarthy และ Dhir, 2005) เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง อีกทั้งเพิ่มปริมาณเนื้อละเอียดมากขึ้น โดยมีปริมาณเนื้อละเอียดมากกว่าร้อยละ 50 ของสารซีเมนต์ และใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากเพื่อให้ได้คอนกรีตกำลังรับแรงดี ซึ่งงานคอนกรีตที่มีเนื้อละเอียดปริมาณมากเป็นส่วนผสมนี้ จะมีความทนทานอย่างมาก

### 2.3.2 การออกแบบคอนกรีตแบบทั่วไป

การออกแบบคอนกรีตสำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะกำหนดส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตรในอัตราส่วน 1 : 2 : 4 คือปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2 ส่วน และหิน 4 ส่วน โดยประมาณ

ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบทั่วไป ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542) แสดงดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบทั่วไป

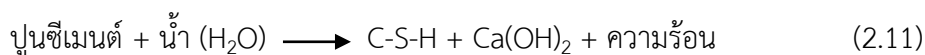
ลำดับที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	450
2	ทราย	675
3	หิน	1,150
4	น้ำ	125
	รวม	<u>2,400</u>

ที่มา: สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542

จะเห็นว่าตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตแบบทั่วไปดังตารางที่ 2-10 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เนื่องจากเหมาะสำหรับการก่อสร้างส่วนใหญ่ และโดยทั่วไปหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 2,400 กิโลกรัม

### 2.3.3 การออกแบบคอนกรีตแบบที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

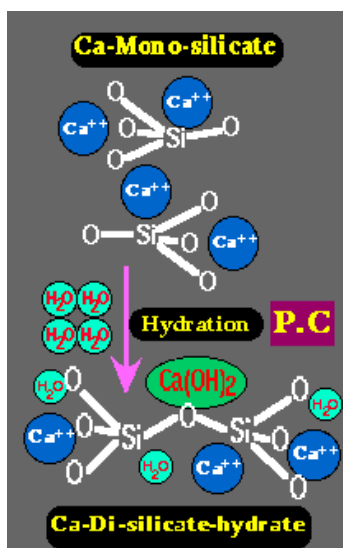
การนำเถ้าลอยมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต ทำให้เกิดปฏิกิริยาสองช่วง ช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (hydration reaction) และช่วงที่สองจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างเถ้าลอยกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ปฏิกิริยาทั้งสองช่วงเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) แสดงดังรูปที่ 2-2



ปฏิกิริยาช่วงที่สอง ระหว่างเถ้าลอยกับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลง เพราะถูกนำไปใช้เพื่อทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานหรือสารละลายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) เพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ปริมาณสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงนั้น ส่งผลให้คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมมีความทนทานต่อสารเคมีโดยเฉพาะซัลเฟตได้สูงขึ้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ และเกิดสารที่เป็นของแข็ง ซึ่งมีปริมาตรขยายตัวสูงขึ้น ดังนั้นถ้ามีสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมากไป คอนกรีตจะยังมีโอกาสเกิดการขยายตัวและเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ ส่วนใหญ่จะพบในงานก่อสร้างคอนกรีตที่อยู่ในน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล เนื่องจากคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำมีการสึกกร่อนมากกว่าคอนกรีตที่อยู่บนบก (Kroehong และคณะ, 2011)

การนำเถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม และน้ำในงานคอนกรีตสามารถช่วยให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มความสามารถในการทะลุเข้าแบบได้ง่าย เพิ่มความแข็งแรงช่วงปลาย และเพิ่มความทนทานต่อการกร่อนทำลายของสารเคมี (ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย, 2544) โดยส่วนผสมของคอนกรีตที่แนะนำควรมีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) ที่ต่ำมากๆ เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งวัสดุเชื่อมประสานหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยรวมกัน สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรืออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานที่แนะนำคือ 0.3 - 0.5 (Grosse, 2007)





รูปที่ 2-2 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Hydration)  
ที่มา: <http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry/>

สำหรับตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542) แสดงดังตารางที่ 2-11 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตแบบทั่วไป จะเห็นว่าปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 หรือมีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2-11 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแบบที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

ลำดับที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	360
2	เถ้าลอย	90
3	ทราย	675
4	หิน	1,152
5	น้ำ	127
	รวม	<u>2,404</u>

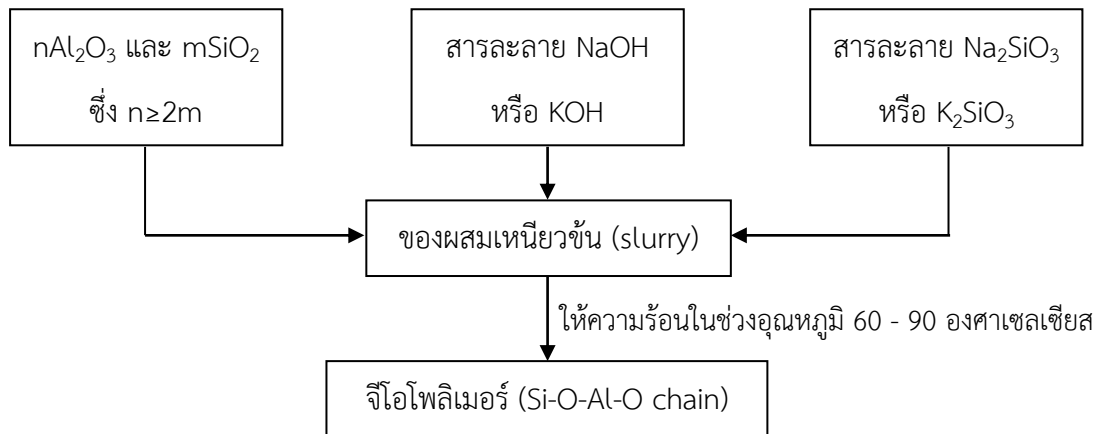
ที่มา: สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2542

## 2.4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นใช้พลังงานสูงมาก เริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด นอกจากนี้กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะเรือนกระจก (greenhouse gas) ถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณ 7% ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด (Malhotra, 2002) หน่วยงานและนักวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงมีความพยายามที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ด้วยการนำวัสดุที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นสารปอซโซลาน หรือเรียกว่าเป็นการพัฒนาคอนกรีตด้วยการใช้สารปอซโซลานในปริมาณสูง (high volume pozzolan concrete) (McCarthy และ Dhir, 2005) เนื่องจากสารปอซโซลานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทดแทนบางส่วน หรือใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น โดยสารปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือเถ้าลอย ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยอย่างกว้างขวางขึ้น เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2556)

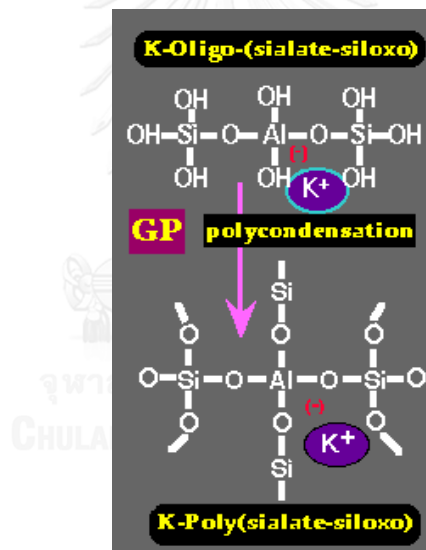
### 2.4.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์สารปอซโซลานซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นหลัก เมื่อนำเอาสารปอซโซลานนี้ผสมกับสารสารเร่งปฏิกิริยา (activator) ซึ่งเป็นสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง จำพวกอัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอร์ควบแน่น (polycondensation reaction) ด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60 – 90 องศาเซลเซียส ทำให้สารเหล่านั้นแตกตัวออกมาทำปฏิกิริยากลายเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (polymer chain) เรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ดังแสดงในรูปที่ 2-3 และ 2-4



รูปที่ 2-3 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

ที่มา: ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2556



รูปที่ 2-4 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization)

ที่มา: <http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry/>

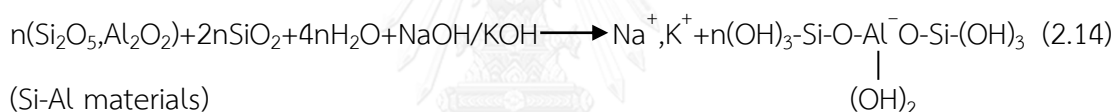
จะเห็นว่าสารจีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และ อลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (polymer chain) โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับ

อัตราส่วนระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ของสารตั้งต้น (Khale และ Chaudhary, 2007) ดังสมการที่ (2.13)

$$M_n [- (Si - O_2)_z - Al - O_2 -]_n \cdot wH_2O \quad (2.13)$$

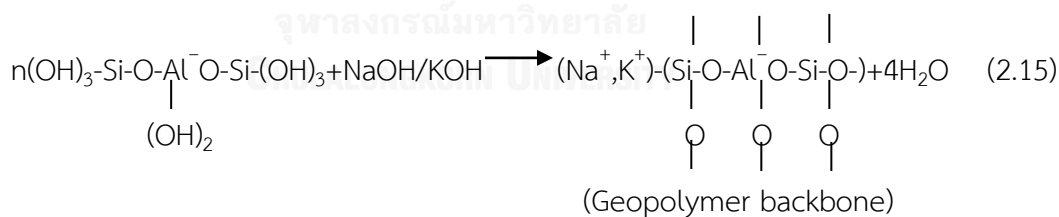
โดย M คือ ธาตุอัลคาไล  
 - คือ การยึดเกาะพันธะ (bond)  
 z คือ จำนวนโมเลกุลของ Si - O<sub>2</sub> เท่ากับ 1 2 หรือ 3  
 n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่ หรือบ่งบอกปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่  
 w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

โดยสามารถเขียนปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerization) ของจีโอโพลิเมอร์ได้ดังสมการที่ (2.14) และ (3.15) (Van Chanh, Trung และ Van Tuan, 2008)



(Si-Al materials)

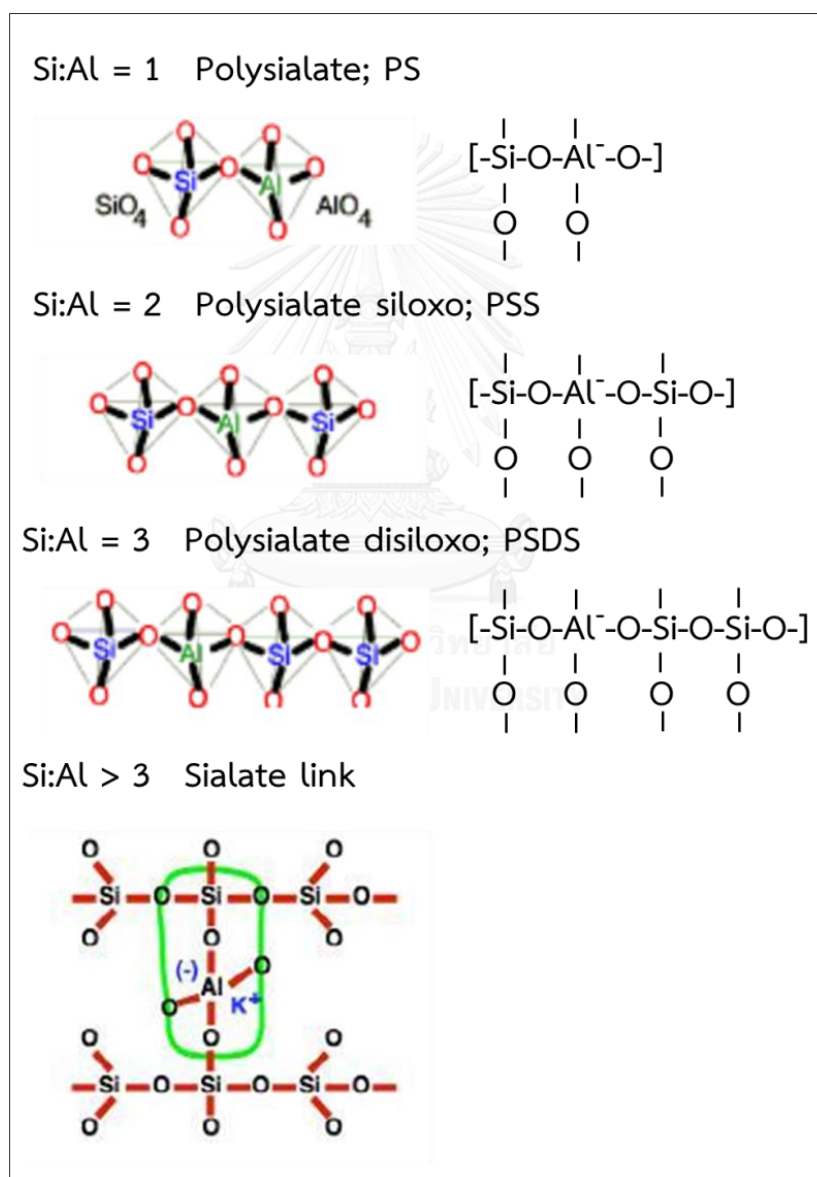
(Geopolymer precursor)



(Geopolymer backbone)

ในขั้นการทำปฏิกิริยากลายเป็นโมเลกุลลูกโซ่ หรือการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (polymerization) ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน (tetrahedral) ของซิลิกอน (Si<sup>4+</sup>) และอลูมิเนียม (Al<sup>3+</sup>) ที่เกิดโคออร์ดิเนต แบบ 4 แขน (IV-fold Coordinate) กับออกซิเจน (O) ตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอลูมิเนียม (Al) ได้ สารประกอบอลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากสมการที่ (2.13) ถ้า z มีค่าเท่ากับ 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (polysialate; PS) เป็นหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านสองหน่วย ถ้า z มีค่าเท่ากับ 2 จะเรียกว่าโพลีไซอะเลตซิลอกโซ (polysialate siloxo; PSS) เป็นหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยม

ด้านเท่าสี่ด้านสามหน่วย และถ้า  $z$  มีค่าเท่ากับ 3 จะเรียกว่าโพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo; PSDS) เป็นหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านสี่หน่วย โดยอัตราส่วนระหว่างอะตอมของซิลิกอน (Si) ต่ออลูมิเนียม (Al) จะบอกถึงคุณสมบัติและประเภทของการใช้งานของวัสดุนั้นๆ เช่น อัตราส่วนเท่ากับ 1 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หากอัตราส่วนมีค่ามากกว่า 3 จะเกิดการเชื่อมขวางกันขึ้น (Closslink) ทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้ เรียกว่าไซอะเลตลิง (sialate link) (Davidovits, 1994) แสดงดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต

ที่มา: Davidovits, 1994

ในการทำปฏิกิริยาหลอมของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ใช้สารละลายที่เป็นต่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอร์ควบแน่น (polycondensation reaction) พบว่าถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก ตรงตามคุณสมบัติของสารปอซโซลานที่ต้องการสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์ โดยสามารถรับแรงอัดได้ดีเช่นเดียวกันกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

## 2.4.2 ส่วนประกอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

### 2.4.2.1 สารปอซโซลานตั้งต้น (pozzolan)

ถ้าลอยสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานตั้งต้นที่ใช้ในการทำจีโอโพลิเมอร์คุณภาพดี เนื่องจากถ้าลอยผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง และองค์ประกอบอยู่ในสถานะแก้วค่อนข้างสูง นอกจากนี้ปริมาณของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ยังสูงอีกด้วย

### 2.4.2.2 อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide)

อัลคาไลไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) สารทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถให้ความเป็นต่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย และให้จีโอโพลิเมอร์คุณภาพดี สำหรับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กันมีค่าประมาณ 8 – 16 โมลาร์ (Nawy, 2008)

### 2.4.2.3 อัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate)

อัลคาไลซิลิเกตที่นิยมใช้กัน คือสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีหลายประเภท ถ้าอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ ) สูง จะให้กำลังรับแรงดี แต่ความสามารถในการทำงานได้จะต่ำ โดยจะใช้น้ำใส่เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ สำหรับตัวอย่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีอยู่ทั่วไปประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 15 ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 33 และน้ำ (water) ร้อยละ 52

#### 2.4.2.4 น้ำ (water)

สารจีโอโพลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง โดยทั่วไปจึงควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด เช่น น้ำประปา

#### 2.4.2.5 มวลรวม (aggregates)

มวลรวมที่ใช้เป็นหิน และทราย แบบเดียวกันกับการทำคอนกรีต ทั้งในด้านคุณภาพ และปริมาณที่ใช้ในส่วนผสม

### 2.4.3 การออกแบบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การผสมจีโอโพลิเมอร์กับมวลรวม ตลอดจนสารผสมเพิ่มอื่นๆ รวมกันเรียกว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (geopolymer mortar) ปริมาณของมวลรวมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถพิจารณาและใช้ได้เช่นเดียวกับมอร์ตาร์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยประมาณ จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นตัวกำหนดคุณภาพ โดยเฉพาะกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แนะนำประกอบด้วยอัตราส่วนของสารต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2-12 (Davidovits และ Orlinksi, 1999)

ตารางที่ 2-12 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แนะนำ

อัตราส่วน	สัดส่วนที่แนะนำ (โดยมวล)
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0.2 – 0.48
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3.3 – 4.5
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	10 – 25
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.8 – 1.2
w/b	0.3 – 0.4

ที่มา: Davidovits และ Orlinksi, 1999

โดยอัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) หมายถึง อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate solution;  $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{SiO}_2$ )

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide solution, NaOH) และน้ำ (water) ต่อวัสดุ เชื่อมประสาน ( $\text{Na}_2\text{O SiO}_2 + \text{NaOH} + \text{water} / \text{fly ash}$ )

สำหรับตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 400 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร (Aleem และ Arumairaj, 2012) แสดงดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-13 ตัวอย่างการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ลำดับที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	ถ้ำลอย	408
2	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	41 (10M)
3	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	103
4	น้ำ	10
5	หิน	1305
6	ทราย	571
รวม		<u>2,438</u>

ที่มา: Aleem และ Arumairaj, 2012

จะเห็นว่าส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตดังตารางที่ 2-13 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ควรมีค่า 8 – 16 โมลาร์ (Nawy, 2008)

## 2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกำลังอัด

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ คุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยการทดสอบกำลังอัดจะบ่งบอกได้ถึงคุณสมบัติด้านกำลัง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2539)



## 2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

### 2.5.1.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมาก เนื่องจากปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังอัดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และความละเอียดของปูนซีเมนต์ หากปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากจะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน สำหรับมวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันโดยทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ สำหรับน้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่

### 2.5.1.2 การทำคอนกรีต

การชั่งตวงส่วนผสมโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งตวงส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากผิดพลาดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้ โดยอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยตรง นอกจากนี้การผสมคอนกรีต การเทคอนกรีต เข้าแบบหล่อ และการอัดแน่นคอนกรีต ล้วนมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกัน จึงควรใช้วิธีทำให้เหมาะสม

### 2.5.1.3 การบ่มคอนกรีต

ความชื้นมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หากมีความชื้นตลอดเวลา ในทางปฏิบัติจึงมักบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที ซึ่งหากมีอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่ม จะยิ่งส่งผลให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเร่งเร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิสูงมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการบ่ม หากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้นาน จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

#### 2.5.1.4 การทดสอบ

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตจะทำในรูปของการชักตัวอย่างคอนกรีตสดมาก่อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่าง การใช้ก้อนทดสอบที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกัน
- 2) วิธีการทำก้อนตัวอย่าง การทำให้คอนกรีตแน่นด้วยการกระทุ้งเหล็ก จะให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า
- 3) ความชื้นในก้อนตัวอย่าง หากแห้งทดสอบมีความชื้นในขณะที่จะทำการทดสอบ จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแห้งทดสอบที่แห้งกว่า
- 4) อัตราการกด หากใช้อัตราการกดสูงในการทดสอบกำลังอัด จะทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้
- 5) เครื่องทดสอบ น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง

#### 2.5.2 รูปทรงของก้อนตัวอย่าง

ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัด โดยทั่วไปมี 2 รูปทรงคือ รูปทรงกระบอก และรูปทรงลูกบาศก์ สำหรับรูปทรงกระบอกเป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา สำหรับรูปทรงลูกบาศก์เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้มีความแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- 1) แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด ก่อให้เกิดแรงต้านต่อการแตกด้านข้าง (confining stress) ซึ่งมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง
- 2) องค์กรประกอบเรื่องความขรุขระ เนื่องจากก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าความกว้าง จึงมีผลทำให้แรงต้านต่อการแตกด้านข้าง (confining stress) ลดลงอย่างมาก

## 2.6 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนักและการชะละลาย

### 2.6.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) คือกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 ขึ้นไป เป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ โลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิด ได้แก่ ไททาเนียม (Titanium; Ti) โครเมียม (Chromium; Cr) แมงกานีส (Manganese; Mn) เหล็ก (Iron; Fe) โคบอลต์ (Cobalt; Co) นิกเกิล (Nickel; Ni) ทองแดง (Copper; Cu) อาร์เซนิก (Arsenic; As) สังกะสี (Zinc; Zn) โมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo) เงิน (Silver; Ag) แคดเมียม (Cadmium; Cd) ดีบุก (Tin; Sn) พลวง (Antimony; Sb) แทนทาลัม (Tantalum; Ta) ทังสเตน (Wolfram; W) ทองคำขาว (Platinum; Pt) ทองคำ (Gold; Au) ตะกั่ว (Lead; Pb)ปรอท (Mercury; Hg) บิสมัท (Bismuth; Bi) และยูเรเนียม (Uranium; U)

ถ้าลอยที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบด้วยออกไซด์ของโลหะหลายชนิด เมื่อทดสอบการชะละลายพบว่ามีโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี (Chai, Onitsuk และ Hayashi, 2009) ซึ่งการนำถ่านหินมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตและซีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นมีความเสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพอย่างมาก เพราะหากโลหะหนักเหล่านั้นถูกชะละลายออกมาแล้วสะสมอยู่ในร่างกายระดับหนึ่ง จะรบกวนการทำงานของเซลล์ โดยเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (enzymes) บางชนิด หรือเข้าไปแทนที่โลหะสำคัญของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์ทำงานได้ไม่ปกติ หรือเข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวโมเลกุล ซึ่งจะแสดงอาการออกมาให้เห็น

ตั้งแต่อาการเล็กน้อยจนถึงอาการรุนแรง (นางแสงโฉม เกิดคล้าย และ นางศรินุช ชื่นอินมณู, 2004)  
 ดังแสดงในตารางที่ 2-14

ตารางที่ 2-14 อันตรายจากโลหะหนักที่พบในถ้ำลอย

โลหะหนัก	พิษจากโลหะหนัก
อาร์เซนิก (Arsenic; As)	มีความเป็นพิษโดยตรงต่อเส้นผม ขน เล็บ และสมอง หากได้รับสารพิษนี้เข้าสู่ร่างกาย จะปรากฏรอยแถบสีขาวบนเล็บมือและเล็บเท้า แสดงถึงการหยุดชะงักของการเจริญเติบโตของเล็บ และยังเป็นสารก่อมะเร็งที่มีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และตับ
โครเมียม (Chromium; Cr)	หากมีการสัมผัสสารพิษนี้เป็นเวลานาน จะมีอาการระคายเคืองบริเวณผิวหนัง เกิดแผลเรื้อรัง เกิดการอักเสบที่ผนังกันจมูก แผลหายใจ ภาวะถุงพรุณ และเป็นสาเหตุของมะเร็งปอด
ตะกั่ว (Lead; Pb)	มีความเป็นพิษโดยตรงต่อผนังเซลล์ หากได้รับสารพิษนี้เข้าสู่ร่างกาย ผนังเซลล์จะสูญเสียความแข็งแรง ส่งผลให้เซลล์เม็ดเลือดแดงเปราะหรือแตกเสียหายง่าย ร่างกายเกิดปวดเมื่อยตัว เบื่ออาหาร ท้องผูก มีเลือดออกในปัสสาวะ และโลหิตจาง
สังกะสี (Zinc; Zn)	มีความเป็นพิษโดยตรงต่อหลอดเลือด และปอด หากได้รับสารพิษนี้เข้าสู่ร่างกาย เป็นเวลานานสามารถก่อให้เกิดความผิดปกติของเอนไซม์ในตับแบบชั่วคราว ท้องร่วง เกิดแผลในกระเพาะอาหาร และมีเลือดออกในทางเดินอาหาร

ที่มา: นางแสงโฉม เกิดคล้าย และ นางศรินุช ชื่นอินมณู, 2004

การทดลองการชะละลายโลหะหนักจากถ้ำลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีถ้ำลอยเป็นส่วนผสมในงานวิจัยนี้จึงใช้ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2-15 มาเป็นเกณฑ์ในการศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักจากถ้ำลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีถ้ำลอยเป็นส่วนผสมเพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัย

ตารางที่ 2-15 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
อาร์เซนิก (Arsenic; As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	วิธี Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma
โครเมียม (Chromium; Cr)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	วิธี Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration
ตะกั่ว (Lead; Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma
สังกะสี (Zinc; Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	

ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539

### 2.6.2 การชะละลาย

ในการชะละลาย สามารถแบ่งวัสดุที่เกิดการชะละลายได้ 2 ชนิด คือ (1) วัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (monolithic) เช่น ผลิตภัณฑ์คอนกรีต และ (2) วัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (granular) เช่น ถ้ำลอย สำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง จะมีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลาย ส่วนวัสดุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ จะมีกลไกการไหลผ่านของของเหลวเป็นตัวควบคุมการชะละลาย ซึ่งการชะละลายของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยหลักการพื้นฐานของการชะละลาย คือการชะละลายของสารประกอบในวัสดุลงไปสู่ น้ำชะละลาย ด้วยกลไกการควบคุมกระบวนการชะละลาย 2 กระบวนการ ดังนี้

- 1) กระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกตัวของธาตุ การดูดซับ การมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้

2) กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การพา (advection) การชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว การแพร่

โดยมีปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการชะละลายทั้งภายใต้สภาวะการทดลองและภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้น (Dijkstra, van der Sloot และ Comans, 2006) ดังแสดงในตารางที่ 2-16 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบการชะละลาย

ตารางที่ 2-16 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชะละลาย

ปัจจัยทางเคมี	ปัจจัยทางกายภาพ	ปัจจัยภายนอก
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ปริมาณสารประกอบ/การมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้</li> <li>▪ รูปแบบของสารประกอบ</li> <li>▪ ส่วนประกอบของสารสกัด/ความแรงของไอออน</li> <li>▪ การแตกตัว</li> <li>▪ คาร์บอนอินทรีย์ละลาย</li> <li>▪ บัฟเฟอร์ของกรดและด่าง</li> <li>▪ การให้และรับอิเล็กตรอน</li> <li>▪ พีเอช</li> <li>▪ เวลา</li> <li>▪ อุณหภูมิ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ลักษณะของวัสดุ</li> <li>▪ ขนาดของวัสดุ</li> <li>▪ ความพรุน</li> <li>▪ ความสามารถในการซึมผ่าน</li> <li>▪ ความคงเคี้ยว</li> <li>▪ การกักกรองการไหลผ่านวัสดุ</li> <li>▪ การแพร่</li> <li>▪ การชะล้างที่ผิวสัมผัส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ปริมาณของสารสกัด</li> <li>▪ คาร์บอนอินทรีย์ละลาย/การดูดซับ</li> <li>▪ การให้และรับอิเล็กตรอน</li> <li>▪ พีเอชของสิ่งแวดล้อม</li> <li>▪ เวลาในการสัมผัส</li> <li>▪ อุณหภูมิ</li> </ul>

ที่มา: Dijkstra, van der Sloot และ Comans, 2006

ในการทดสอบการชะละลาย โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) Static Extraction Tests เป็นการทดสอบที่กำหนดปริมาตรของสารชะละลายเดียวตลอดช่วงการทดสอบ และ (2) Dynamic Extraction Tests เป็นการทดสอบที่เปลี่ยนสารชะละลายใหม่ตลอดช่วงการทดสอบ

งานวิจัยนี้กำหนดใช้การทดสอบกลุ่ม Static Extraction Tests แบบเขย่า (agitated) ซึ่งการทดสอบแบบเขย่านี้ วัสดุหรือของเสียและสารชะละลายจะผสมเข้าด้วยกัน ทำให้การทดสอบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็ว โดยส่วนใหญ่จะมีขั้นตอนการลดขนาดของวัสดุหรือของเสียเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น และทำให้ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่สั้นลง การทดสอบแบบเขย่าจะวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของระบบของเสียและการชะละลายมากกว่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ผลการทดสอบมีค่าเกินความเป็นจริงในการประเมินการปลดปล่อยของสารองค์ประกอบต่างๆ สำหรับตัวอย่างของการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำชะละลายแบบเขย่านี้ได้แก่ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), Extraction Procedure Toxicity Test (EP Tox), California Environmental Protection Agency (California EPA), Waste Extraction Test (WET), Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) และ CEN 292

## 2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement; OPC) ได้โดยมีความคงทนสูง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมนั้นได้รับความสนใจและมีการศึกษาค้นคว้าอย่างกว้างขวางขึ้น เนื่องด้วยเหตุผลของโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอายุเพียง 10 - 20 ปี เริ่มเกิดความเสียหาย ปัญหาคือความคงทนของงานคอนกรีตที่เกิดจากการทรุด รวมถึงการบ่มคอนกรีตที่ไม่ดี และอีกหนึ่งสาเหตุสำคัญคือคุณสมบัติของตัววัสดุคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เองนั้นมีค่าการซึมผ่าน (permeability) ค่อนข้างสูง ทำให้น้ำและสารที่เป็นอันตรายซึมผ่านได้ง่าย ก่อให้เกิดปัญหาการสึกกร่อน และเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (carbonation reaction) ขึ้น ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิม และด้วยเหตุผลที่ต้องการลดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาจำนวน 1 ตัน ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ตัน อันเป็นสาเหตุหลักของภาวะเรือนกระจก (greenhouse gas) โดยหลักการพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ก็คือวัสดุตั้งต้นได้รับกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง เกิดเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Nida Chaimoon และ Krit Chaimoon, 2014)

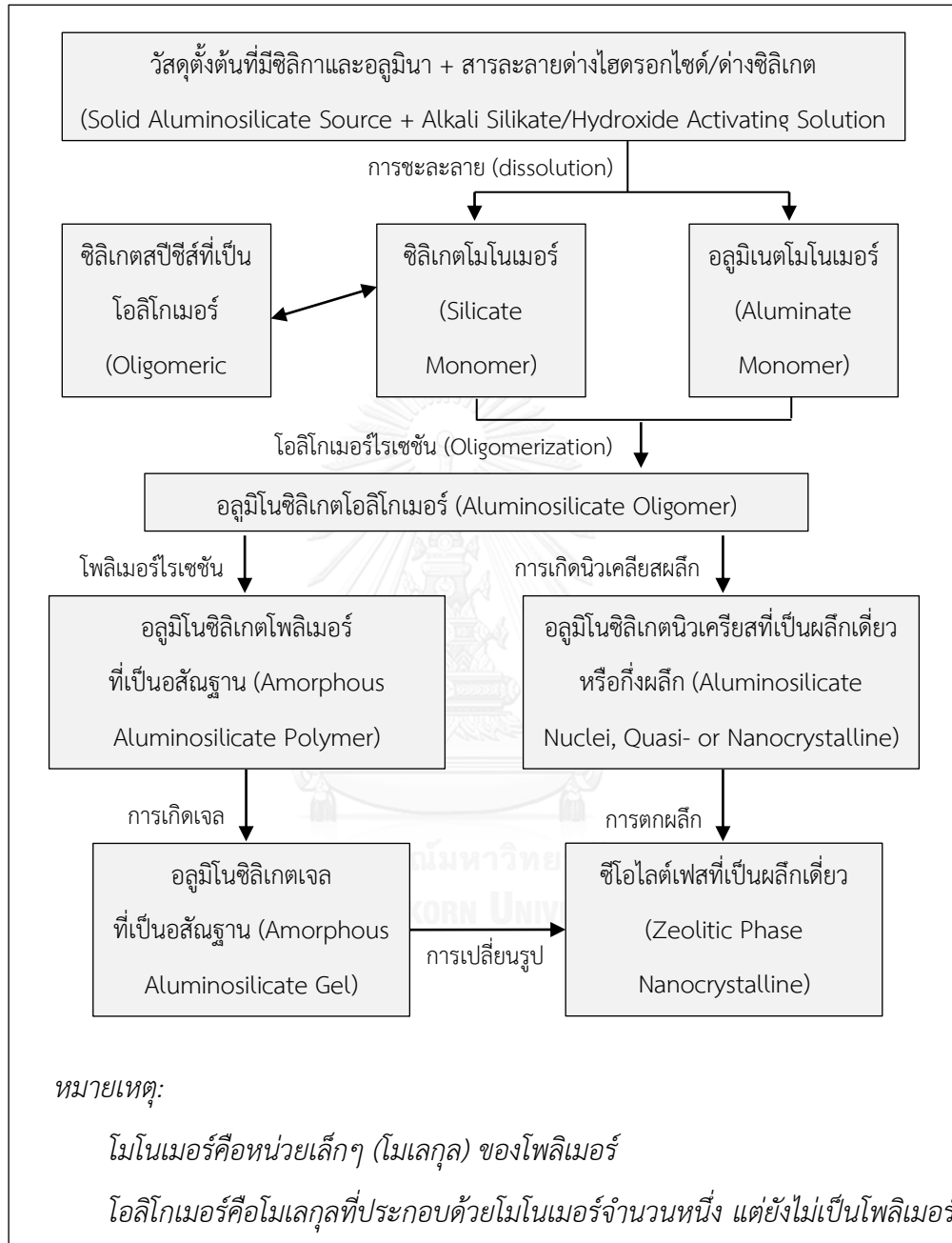
มีงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเชื่อมประสานจากการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง (alkali - activated binders) ในช่วงทศวรรษ 1940 โดย Purdon (Purdon, 1940) ใช้ตะกรันเตาถลุง (blast furnace slag) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเป็นวัสดุตั้งต้น กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดกระบวนการปลดปล่อย (liberation) ของซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) จากนั้นเกิดการก่อตัว (formation) ของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินาไฮเดรต (Al(OH)<sub>3</sub>) ขึ้นพร้อมกับเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารละลายต่าง (regeneration of alkali solution) ต่อมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเชื่อมประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง โดยใช้แร่ดินเหนียวเป็นวัสดุตั้งต้น กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดการก่อตัวเป็นอลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (Aluminosilicate Hydrate) ขึ้น (Glukhovskiy, Rostovskaja และ Rumyna, 1980)

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุเชื่อมประสานจากการกระตุ้นด้วยต่างได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากรายงานการวิจัยของ Davidovits (Davidovits, 1979) ผู้ซึ่งพัฒนาและจดลิขสิทธิ์วัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ดินขาวเผา (metakaolin) เป็นวัสดุตั้งต้น กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายต่าง โดยตั้งชื่อวัสดุเชื่อมประสานนี้ว่าจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) และมีชื่อทางเคมีว่าโพลีไซโอเลต (polysialate) Davidovits กล่าวว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นโพลิเมอร์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic) สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ และมีโครงสร้างเป็นสามมิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) สำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของดินขาวเผาสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง (Nida Chaimoon และ Krit Chaimoon, 2014) แสดงดังรูปที่ 2-6

การก่อตัวและการแข็งตัวของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันยังคงไม่แน่ชัด แต่สามารถอธิบายได้ว่า กลไกของการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างนี้เป็นปฏิกิริยาร่วมของการแยกตัวและการควบแน่น (destruction - condensation) ซึ่งประกอบด้วย การแยกตัวของวัสดุตั้งต้น เป็นหน่วยโครงสร้างที่มีเสถียรภาพต่ำในรูปของเฟสคอลลอยด์ (colloid phase) การปฏิสัมพันธ์กันกับโครงสร้างที่แข็งตัวแล้ว (coagulation structure) และการเกิดโครงสร้างที่ควบแน่น (Glukhovskiy, Rostovskaja และ Rumyna, 1980) ซึ่งกลไกดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงสถานะเริ่มต้นของการชะละลาย (dissolution) ของซิลิกา ตามด้วยสถานะของการเคลื่อนย้าย (transportation) และการควบแน่น



(polycondensation) (Van Jaarsveld, Van Deventer และ Lorenzen, 1998) อย่างไรก็ตาม สภาวะต่างๆ เกิดขึ้นในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถวิเคราะห์ในแต่ละสภาวะแยกออกจากกัน



รูปที่ 2-6 แบบจำลองของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาซีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

ที่มา: Nida Chaimoon และ Krit Chaimoon, 2014

ตามรายงานของ Jaarsveld (Van Jaarsveld, Van Deventer และ Lukey, 2002) กระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์มีความเหมือนกันกับกระบวนการเกิดซีโอไลต์ (zeolite) คือเกิดการชะละลายเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ions; OH<sup>-</sup>) เกิดการจัดเรียงตัว (orientation) ของสปีชีส์ที่ละลาย (dissolved species) เกิดการควบแน่น (condensation) และเกิดการแข็งตัว (hardening) ของโครงสร้างในระบบโพลิเมอร์อนินทรีย์ (inorganic polymeric system) ตามลำดับ

การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานจากการกระตุ้นด้วยต่าง อาจแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ (1) กรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอน (Si) และแคลเซียม (Ca) สูง เช่น ตะกรันเตาถลุง (blast furnace slag) ทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างปานกลาง จะได้สารละลายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) เป็นผลผลิตหลัก และ (2) กรณีที่ใช้วัสดุตั้งต้นที่มีซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) สูง เช่น ดินขาวเผา (metakaolin) ทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างปานกลางถึงสูง จะได้จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) ซึ่งมีกำลังสูงเป็นผลผลิต จากงานวิจัยของ Palomo (Palomo, Grutzeck และ Blanco, 1999) พบว่าความเข้มข้นของสปีชีส์ที่ละลายนั้นสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่มซิลิเกตที่ละลายน้ำ (soluble silicate) เข้าไปในส่วนผสม ซึ่งจะช่วยให้เร่งการชะละลายและทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ซึ่งนอกจากการใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์แล้ว มีงานวิจัยที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของ J.S.J. van Deventer (Van Deventer และคณะ, 2007) ได้ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างและระยะเชื่อมประสานระหว่างดินขาวเผาและเถ้าลอยในงานจีโอโพลิเมอร์ โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาคือเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ผลการทดลองพบว่าทั้งสองผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างระดับโมเลกุลและระดับจุลภาคที่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือจีโอโพลิเมอร์ที่มีเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบมีความทนทานและแข็งแรงมากกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีดินขาวเผาเป็นวัตถุดิบ

จากงานวิจัยที่กล่าวมา วัสดุตั้งต้นหรือวัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นส่วนผสมในจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีต ได้แก่ ตะกรันเตาถลุง (blast furnace slag) ดินขาวเผา (metakaolin) และเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งนอกจากนี้แล้ว ยังมีงานวิจัยที่ใช้เถ้าแกลบ (rice husk ash) และเถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ด้วยเช่นเดียวกัน (Van Jaarsveld, Van Deventer และ Lukey, 2002)

## 2.7.2 ข้อมูลการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม

การนำเถ้าลอยซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ จำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์เพื่อความปลอดภัย ในปี 2004 มีงานวิจัยของ Asavapisit (Asavapisit และ Chotklang, 2004) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง ปรับเสถียรภาพของเสียจากการชุบโลหะ (electroplating sludge) จากของเสียถูกทำให้แข็งด้วยการใช้ปูนขาว (lime) ร้อยละ 30 และเถ้าลอยร้อยละ 70 กระตุ้นด้วยสารละลายต่างสองชนิด คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน พบว่าความเป็นต่างสูงของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (พีเอช 13.5) เป็นผลให้เกิดการละลายใหม่ (resolubilization) ของไฮดรอกไซด์ของโลหะ (metal hydroxide) จากกากของเสีย เมื่อทดสอบความเป็นพิษด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) พบว่า ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) ไม่ถูกตรวจพบในน้ำชะละลาย ในขณะที่สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) และโครเมียม (Cr) ถูกตรวจพบในบางกรณี โดยโครเมียมมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; USEPA) กำหนด

ในปี 2007 มีงานวิจัยของ C. Fernández Pereira และคณะ (Pereira และคณะ, 2007) ศึกษาการชะละลายโลหะหนักในระยะสั้นและระยะยาวของผลิตภัณฑ์ก้อนหล่อแข็งจากเตาไฟฟ้า (stabilized/solidified electric arc furnace dust) ซึ่งมีเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นส่วนผสมในการทำเสถียร ร่วมกับปูนขาว (lime) หินปูน (Dolomitic limestone) ตะกรันเตาถลุง (blast furnace slag) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) ทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ที่อายุ 28 วัน และ 64 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เข้าไปทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่แข็งตัวเป็นก้อนแล้ว (carbonation) โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นหลัก เพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ส่งผลให้คอนกรีตเสียหาย หรือเกิดการแตกร้าว

และทำให้ความเป็นด่าง (alkalinity) ของผลิตภัณฑ์ลดลง จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด

ต่อมาในปี 2009 มีงานวิจัยของ Yongjie Xue และคณะ (Xue และคณะ, 2009) ศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายของผิวถนนชนิดสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่นำเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมาประยุกต์ใช้แทนที่บางส่วนของมวลละเอียด (fine aggregate) ในส่วนผสม ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารเคมีในการชะละลาย ทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) และปรอท (Mercury; Hg) ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์เชิงบวกที่ตีกับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในเถ้าลอย โดยเฉพาะตะกั่วมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายต่ำที่สุด ยกเว้นโลหะหนักชนิดนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ แต่ในน้ำชะละลายมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักสูงที่สุด ประหนึ่งว่าผิวถนนชนิดสโตนมาสติกแอสฟัลต์ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพและความคงตัวของโลหะหนักชนิดนิกเกิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดปรอทไม่ถูกตรวจพบ

และมีงานวิจัยของ Hui-Sheng Shi และคณะ (Shi และ Kan, 2009) ศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่นำเถ้าลอยจากเตาเผาขยะชุมชนมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย Chinese National Standard GB 5086.2-1997 ทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ที่อายุ 3 วัน 7 วัน 28 วัน และ 60 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด หรืออยู่ในช่วงที่ปลอดภัย (safety range) แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่จะใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้

ต่อมาในปี 2013 มีงานวิจัยของวรวรรณชัย สายวาริน (วรวรรณชัย สายวาริน, 2556) ศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพสต์หรือก้อนหล่อแข็งที่มีเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบชั้นคุณภาพ F เป็นส่วนผสม ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method

1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) ทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดนิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และโครเมียม (Cr) ที่อายุบ่ม 7 วัน 28 วัน และ 90 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดนิเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียมมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด หรือกล่าวได้ว่าความสามารถในการตรึงโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งมีสูง จึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตกตะกอนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ถูกชะละลายออกมาได้ต่ำ

ต่อมาในปี 2014 มีงานวิจัยของ Worawanchai Saiwarin (Worawanchai Saiwarin, Chuwit Napia และ Theerawat Sinsiri, 2014) ศึกษาเปรียบเทียบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักระหว่างผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุเชื่อมประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย USEPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP) โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารเคมีในการชะละลาย ทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดนิเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และโครเมียม (Cr) ที่อายุ 28 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดของผลิตภัณฑ์หล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุเชื่อมประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าการชะละลายลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว โดยโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดที่ตรวจพบนี้ถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด

ต่อมาในปี 2015 มีงานวิจัยของ ธนันพร ญาวิลาศ (ธนันพร ญาวิลาศ, สุวิมล อัครพิศิษฐ และรุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์, 2558) ศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายของผลิตภัณฑ์ไอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยประเภทบิทูมินัส ชั้นคุณภาพ F เป็นส่วนผสม ด้วยวิธีทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 (Waste Extraction Test; WET) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (sodium citrate) สารละลายโซเดียมอะซิเตรท (sodium acetate) และน้ำฝนกรดสังเคราะห์เป็นสารเคมีในการชะละลาย ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดสังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) และโครเมียม (Cr) ที่อายุบ่ม 28 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมซิเตรทเป็นสารเคมีในการชะละลาย พบโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดถูกชะละลายออกมามีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด โดยความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดสังกะสีในน้ำชะละลายมี

ค่ามากที่สุด แต่เมื่อใช้สารละลายโซเดียมอะซิเตรทและน้ำฝนกรดสังเคราะห์เป็นสารเคมีในการชะละลาย พบโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด

และมีงานวิจัยของ Roy Nir Lieberman (Lieberman และคณะ, 2015) ศึกษาศักยภาพการห่อหุ้มของเสียอันตรายในงานคอนกรีตที่มีเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นส่วนผสม ร่วมกับกากตะกอนละเอียดจากอุตสาหกรรมเหมืองหินปูน (quarry fine) โดยศึกษาเปรียบเทียบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักระหว่างงานคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยจากแอฟริกาใต้ (South African fly ash) เป็นส่วนผสม และงานคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยจากโคลัมเบีย (Colombian fly ash) เป็นส่วนผสม ด้วยวิธีมาตรฐานการชะละลาย European Directive (EN 12457-2) ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักและธาตุทั้งหมด 43 ชนิด เช่น ซัลเฟอร์ (S) โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) อาร์เซนิก (As) ซีลีเนียม (Se) ตะกั่ว (Pb) โมลิบดีนัม (Mo) แคดเมียม (Cd) พลวง (Sb) แบเรียม (Ba) และอื่นๆ พบว่าน้ำชะละลายของผลิตภัณฑ์จากทั้ง 2 แหล่งมีค่าความเป็นด่างอย่างชัดเจน (พีเอช 8.84 - 10.9) ความเข้มข้นของโลหะหนักและธาตุที่ตรวจพบทั้ง 43 ชนิดจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้เถ้าลอยจากแอฟริกาใต้ถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด (Council Decision 2003/33/EC) หมายความว่าไม่เป็นอันตราย (non hazardous) ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจพบจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้เถ้าลอยจากโคลัมเบียจำนวน 42 ชนิดถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด ยกเว้นซีลีเนียมมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดว่าไม่เป็นอันตราย

จากงานวิจัยที่กล่าวมา เมื่อทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม พบว่ามีโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก (As) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) โดยส่วนใหญ่ถูกชะละลายออกมามีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด

### 2.7.3 ข้อมูลการประยุกต์ใช้เถ้าลอยกับงานวิศวกรรม

มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 (Naik และ Ramme, 1989) และต่อมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยไปประยุกต์ใช้แทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด (fine aggregate) ในงานคอนกรีต (Xue และคณะ, 2009) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยไปประยุกต์ใช้เป็น

สารปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอย่างแพร่หลาย ทั้งในประเทศออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ สหรัฐอเมริกา เป็นต้น (Bakharev, 2005; Van Jaarsveld, Van Deventer และ Lukey, 2002) ซึ่งการนำเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตและงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นการลดใช้พลังงาน เนื่องจากต้องใช้พลังงานจำนวนมากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งยังลดการใช้วัสดุดิบ ลดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และลดต้นทุนการผลิต

### 2.7.3.1 การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

เถ้าลอยสามารถใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตได้ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงถึง 45% ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต อีกทั้งมีค่าพลังงานในการประสานตัวต่ำ (low energy clinker) (McCarthy และ Dhir, 2005)

การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างที่สำคัญชิ้นแรกของประเทศสหรัฐอเมริกา คือเขื่อน Hungry Horse มลรัฐมอนทานา สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1948 แสดงดังรูปที่ 2-7 โดยเขื่อน Hungry Horse มีความสูง 172 เมตร ความยาว 645 เมตร ใช้คอนกรีตในการก่อสร้าง 2.14 ล้านลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2-7 เขื่อน Hungry Horse มลรัฐมอนทานา ประเทศสหรัฐอเมริกา

ที่มา: <http://www.gopetition.com/petitions/build-bekhme-dam.html>

สำหรับประเทศไทย การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเถ้าลอยเริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2523 เป็นการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะในงานคอนกรีต (ประจิด จิรปภา, 2523) ต่อมาการศึกษาวิจัยด้านนี้ได้ขยายวงกว้างขึ้น และใน ปี พ.ศ. 2535 ได้มีการนำเถ้าลอยประมาณ 1 แสนตันมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแท่นฐานรากขนาด 30,000 ตารางเมตร เพื่อรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดในสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ แทนการใช้เสาเข็มเจาะรับน้ำหนัก ซึ่งไม่พบการทรุดตัวถึงปัจจุบัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร และ เฉลิมพล พิณรัตน์, 2527) ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างที่สำคัญของประเทศไทย คือเขื่อนคลองท่าด่าน จังหวัดนครนายก สร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2546 แสดงดังรูปที่ 2-8 เป็นเขื่อนคอนกรีตที่ยาวที่สุดในโลก ก่อสร้างด้วยการใช้คอนกรีตบดอัด (roller compacted concrete) โดยใช้คอนกรีตผสมประมาณ 5 ล้านลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยซีเมนต์ 90 กิโลกรัม และเถ้าลอย 100 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล, 2542)



รูปที่ 2-8 เขื่อนคลองท่าด่าน จังหวัดนครนายก

ที่มา: [http://www.tat8.com/thai/ny/p\\_thadandam.html](http://www.tat8.com/thai/ny/p_thadandam.html)

การนำเถ้าลอยไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตนั้นทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง เนื่องจากเถ้าลอยมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาควรใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ในปริมาณร้อยละ 15 – 25 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ



15 - 35 ได้เมื่อใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C โดยการใส่เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำ และอาจเป็นปัญหาในการใช้งาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553)

### 2.7.3.2 การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานตั้งต้น (pozzolan) ที่ชนิดหนึ่งสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น งานก่อสร้าง งานตกแต่ง ตลอดจนงานอุตสาหกรรมไฟฟ้า และเครื่องปั้น (Davidovits, 2002) นอกจากนี้ยังเป็นสารตั้งต้นในการปรับเสถียรของเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักที่เป็นพิษ (toxic heavy metal) ได้อีกด้วย หลักการพื้นฐานคือการทำให้เสถียรและการทำให้แข็ง (stabilization and solidification) โดยการผสมของเสียในส่วนผสมแล้วหล่อเป็นก้อน เพื่อให้เกิดการจับของเสียไว้ (encapsulation) ทำให้ของเสียถูกชะละลายออกมาได้น้อยลง ซึ่งการปรับเสถียรของเสียนี้เป็นการเตรียมของเสียก่อนนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย (secure landfill) ทั้งนี้สารละลายที่ออกมาจากการชะละลายของของเสียที่ปรับเสถียรแล้วนั้น จะต้องมีปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่างๆ ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ (Asavapisit และ Chotklang, 2004)

มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบผสมเถ้าลอย (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2552) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดที่สูง เนื่องจากเถ้าลอยมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อผสมเถ้าลอยกับเถ้าแกลบที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณเถ้าแกลบสูง จะมีค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ต่ำ อีกทั้งวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณเถ้าแกลบมากจะไม่เสถียรเมื่อแช่ในน้ำ เนื่องจากมีปริมาณซิลิกาในส่วนผสมมาก เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างจะได้ซิลิกาเจล ซึ่งซิลิกาเจลมีคุณสมบัติดูดความชื้น จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์พองตัวและเกิดรอยแตกร้าวขึ้นเมื่อบ่มเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงควรใช้เถ้าแกลบผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 40 ต่อ 60

เมื่อเหตุผลหลักของจีโอโพลิเมอร์คือทางเลือกใหม่ที่จะลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตคอนกรีตด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงมีงานวิจัยของ Hamid Akbari (Akbari, Mensah-Biney และ Simms, 2015) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อสนับสนุนทางเลือกใหม่ดังกล่าว โดยการประยุกต์ใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาของรัฐแคลิฟอร์เนีย

(Carolina) ประเทศสหรัฐอเมริกา มาเป็นวัสดุปอซโซลานของทั้งสองผลิตภัณฑ์ ผลลัพธ์พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้ 6,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มากกว่าคอนกรีตที่สามารถรับแรงอัดได้ 5,700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

สำหรับประเทศไทย การใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในงานก่อสร้างกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าใช้จ่ายในการผลิตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Hardjito และคณะ, 2004) ทั้งนี้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังต้องการงานวิจัยอีกมากเพื่อรองรับและยืนยันการนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลาย ปัจจุบันจึงเกิดงานวิจัยทางด้านนี้ขึ้นอย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับว่า การใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเกิดขึ้นในงานก่อสร้างของประเทศไทยได้เช่นกัน

## 2.8 เป้าหมายของงานวิจัย (Research Focus)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำเถ้าลอยมาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และนำเถ้าลอยมาเป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อีกทั้งศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นคอนกรีต ยังพบงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นส่วนน้อย และพบว่ายังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบค่าความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ระหว่างคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม เพื่อศึกษาประเภทและปริมาณของเถ้าลอยว่ามีผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะออกมาจากผลิตภัณฑ์และมีผลต่อกำลังอัดของผลิตภัณฑ์อย่างไร โดยเลือกใช้เถ้าลอยลิกไนต์เนื่องจากเป็นเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจำนวนมากที่สุดในประเทศไทย เปรียบเทียบกับเถ้าลอยบิทูมินัสเนื่องจากเป็นเถ้าลอยที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการทดลองจากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจเลือกใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของงานคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในอนาคตต่อไป

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการชั้น 1 อาคารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการชั้น 4 อาคารปฏิบัติการรวม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และหน่วยปฏิบัติการวิจัย ธรณีเทคนิค (GRU - Geotechnical Research Unit) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### 3.1 แผนการวิจัย

##### 3.1.1 การวางแผนการทดลอง

- 3.1.1.1 การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 3.1.1.2 การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย
- 3.1.1.3 การศึกษาค่าความเป็นพิษของเถ้าลอย
- 3.1.1.4 การดำเนินการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
- 3.1.1.5 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงโลหะหนักของผลิตภัณฑ์
- 3.1.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทดลองศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากการประยุกต์ใช้เถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และเป็นวัสดุพอลิเมอร์ในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แบ่งเป็น 2 ด้าน ดังนี้

- 1) การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี
  - ประเภทของเถ้าลอย
  - องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย
  - ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
  - ปริมาณความชื้นของเถ้าลอย
  - การสูญเสียน้ำหนักของเถ้าลอยเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI)
- 2) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ
  - ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวอนุภาคของเถ้าลอย
  - การกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอย

**ขั้นตอนที่ 2** การศึกษาค่าความเป็นพิษของเถ้าลอยเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้นโดยใช้กรดอะซิติก น้ำกลั่นน้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 เป็นสารเคมีในการชะละลาย

**ขั้นตอนที่ 3** การดำเนินการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

- 1) กรณีศึกษาการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน
- 2) กรณีศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

โดยมีการทดสอบสมรรถนะด้านกำลังรับแรงอัดหลังขึ้นรูปแล้วทั้ง 2 กรณี

**ขั้นตอนที่ 4** การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงโลหะหนักของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมทั้ง 2 กรณี เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก และประเมินความเป็นอันตรายในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### 3.1.3 ตัวแปรในการทดลอง

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ละการทดลองในขั้นตอนที่ 1: การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านลอยเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้ถ่านลอยในงานคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
-	-
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
ถ่านลอยที่ใช้ในการทดลอง <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ประเภทของถ่านหิน</li> </ul>	ลิกไนต์ (lignite) บิทูมินัส (bituminous)
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
ลักษณะของถ่านลอย <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ คุณสมบัติทางเคมี</li> <li>▪ คุณสมบัติทางกายภาพ</li> </ul>	ประเภทของถ่านลอย องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอย ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ ปริมาณความชื้นของถ่านลอย  ความหนาแน่นของถ่านลอย ความถ่วงจำเพาะของถ่านลอย รูปร่าง และพื้นผิวอนุภาคของถ่านลอย การกระจายตัวของอนุภาคถ่านลอย

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ละการทดลองในขั้นตอนที่ 2: การศึกษาหาความเป็นพิษของถ่านลอยเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
-	-
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อสารเคมีในการชะละลาย <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อกรดอะซิติก</li> <li>▪ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำกลั่น</li> <li>▪ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำฝนกรดสังเคราะห์</li> <li>▪ อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อน้ำที่มีค่าพีเอชต่างๆ</li> </ul>	1:20 1:20 1:20 1:20
การกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุน <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม</li> <li>▪ อุณหภูมิในการกวนผสม</li> <li>▪ เวลาในการกวนผสม</li> </ul>	30 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง 18 ชั่วโมง
การกรอง <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรองของแผ่นกรองใยแก้ว</li> </ul>	0.6 - 0.8 ไมครอน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำชะละลายหลังการทดลอง	ปริมาณโลหะหนัก พีเอช

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ละการทดลองในขั้นตอนที่ 3: การดำเนินการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
<p><u>กรณีศึกษาที่ 1:</u> การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน</p> <p><i>ผลิตภัณฑ์คอนกรีต</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 1</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 2</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 3</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 4</li> </ul> <p><i>ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 1</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 2</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 3</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 4</li> </ul>	<p>เถ้าลอย 15% ปูนซีเมนต์ 85% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 30% ปูนซีเมนต์ 70% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 45% ปูนซีเมนต์ 55% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 60% ปูนซีเมนต์ 40% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 12% สารละลายต่าง 88% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 24% สารละลายต่าง 76% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 37% สารละลายต่าง 63% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 49% สารละลายต่าง 51% (w/w)</p>
<p><u>กรณีศึกษาที่ 2:</u> ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</p> <p><i>ผลิตภัณฑ์คอนกรีต</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 1</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 2</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 3</li> <li>▪ แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในสูตรที่ 4</li> </ul> <p><i>ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 1</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 2</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 3</li> <li>▪ เป็นวัสดุปอซโซลานในสูตรที่ 4</li> </ul>	<p>เถ้าลอย 18% ปูนซีเมนต์ 82% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 20% ปูนซีเมนต์ 80% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 23% ปูนซีเมนต์ 77% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 25% ปูนซีเมนต์ 75% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 58% สารละลายต่าง 42% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 60% สารละลายต่าง 40% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 63% สารละลายต่าง 37% (w/w)</p> <p>เถ้าลอย 65% สารละลายต่าง 35% (w/w)</p>

ตารางที่ 3-3 (ต่อ) ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 3

ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
การบ่ม <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ผลิตภัณฑ์คอนกรีต</li> <li>▪ ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</li> </ul> การทดสอบดัชนีกำลัง <i>ผลิตภัณฑ์คอนกรีต</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ กำลังอัดที่อายุ 7 วัน</li> <li>▪ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน</li> </ul> <i>ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ กำลังอัดที่อายุ 48 ชั่วโมง</li> <li>▪ กำลังอัดที่อายุ 72 ชั่วโมง</li> </ul>	บ่มในน้ำเป็นเวลา 7 และ 28 วัน บ่มด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 และ 72 ชั่วโมง  $\leq 200$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร $\geq 200$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร  $\leq 200$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร $\geq 200$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
การทดสอบดัชนีกำลัง <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ความคงตัวของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต</li> </ul>	ความสามารถในการรับกำลังอัดของผลิตภัณฑ์

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ละการทดลองในขั้นตอนที่ 4: การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงโลหะหนักของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก และประเมินความเป็นอันตรายในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ต่อไป แสดงดังตารางที่ 3-4



ตารางที่ 3-4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 4

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
ผลิตภัณฑ์	คอนกรีต จีโอโพลีเมอร์คอนกรีต
ตัวแปรควบคุมคงที่	พารามิเตอร์
อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารเคมีในการชะละลาย <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อกรดอะซิติก 1:20</li> <li>▪ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อน้ำกลั่น 1:20</li> <li>▪ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อผงกรดสังเคราะห์ 1:20</li> <li>▪ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อน้ำที่มีค่าพีเอชต่างๆ 1:20</li> </ul> การกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม 30 รอบต่อนาที</li> <li>▪ อุณหภูมิในการกวนผสม อุณหภูมิห้อง</li> <li>▪ เวลาในการกวนผสม 18 ชั่วโมง</li> </ul> การกรอง <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรองของแผ่นกรองใยแก้ว 0.6 – 0.8 ไมครอน</li> </ul>	
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
ลักษณะของน้ำชะละลายหลังการทดลอง	ปริมาณโลหะหนัก พีเอช

### 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3) ขวดแก้วขนาด 50 มิลลิลิตร
- 4) หลอดเซนติฟิวแก้ว (Centrifuge Tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 5) ถังมือยาง
- 6) หน้ากากอนามัย

- 7) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask)
- 8) ปิเปตต์ (Pipette)
- 9) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 10) ลูกยาง
- 11) เครื่องดูดควัน
- 12) เครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (Rotator mixer)
- 13) ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
- 14) แผ่นกรองใยแก้วเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน
- 15) แบบหล่อคอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 16) ตู้อบความร้อน
- 17) ตู้เย็น
- 18) เต้าเผา
- 19) ตะแกรงร่อน (Seive)

### 3.2.2 วัตถุดิบและสารเคมี

- 1) ภัลลอลยลิกไนต์
- 2) ภัลลอลยบิทูมินัส
- 3) หินหยาบขนาด 20 มิลลิเมตร
- 4) ทรายนละเอียดขนาด 3 มิลลิเมตร
- 5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; NaOH)
- 6) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)
- 7) สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)
- 8) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 9) กรดอะซิติก (acetic acid)
- 10) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- 11) กรดไนตริก (nitric acid; HNO<sub>3</sub>)
- 12) น้ำกลั่น

### 3.2.3 เครื่องทดสอบและวิเคราะห์ผล

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM)
- 2) เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)
- 3) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF)
- 4) เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma; ICP)
- 5) เครื่องย่อยสลายสาร (Microwave Digestion)
- 6) เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (Compression Machine)

### 3.3 การเตรียมสารเคมีในการชะละลาย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายผงกรดสังเคราะห์

นำน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก จนพีเอชของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 4.2

#### 3.3.2 การเตรียมสารละลายกรดอะซิติก

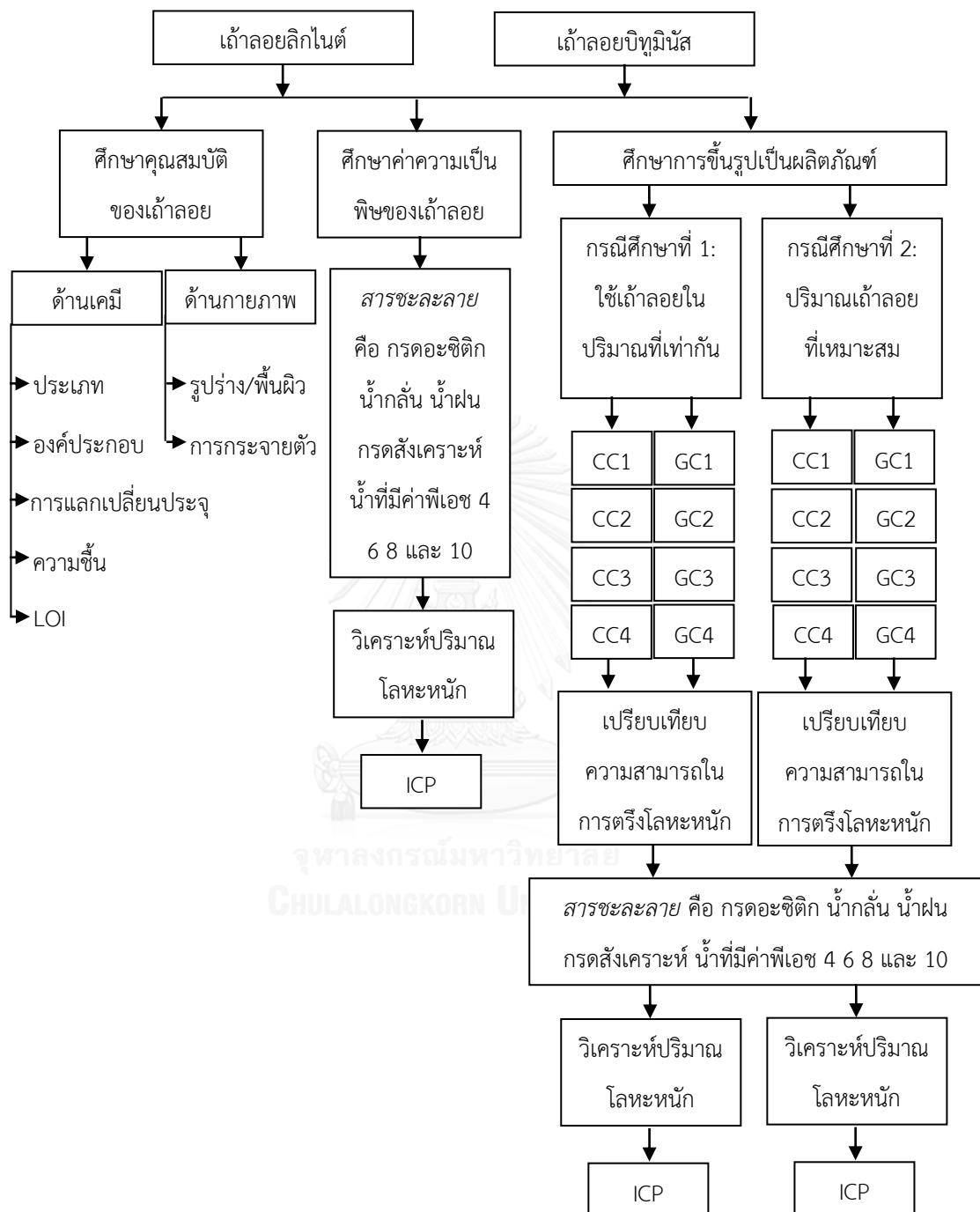
วัดพีเอชของกรดอะซิติก (acetic acid) ด้วยเครื่องวัดพีเอช และทำการปรับพีเอชด้วยน้ำกลั่น จนพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ  $2.88 \pm 0.05$  โดยเตรียมสารละลายกรดอะซิติกสำหรับแช่ตัวอย่าง ถ้าวางในเครื่องตุ๋น

#### 3.3.3 การเตรียมสารละลายที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10

นำน้ำกลั่นผสมกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) วัดพีเอช และทำการปรับพีเอชด้วยน้ำกลั่น จนพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ 4 และ 6

นำน้ำกลั่นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) วัดพีเอช และทำการปรับพีเอชด้วยน้ำกลั่น จนพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ 8 และ 10

## 3.4 แผนการทดลอง



หมายเหตุ:

CC1 หมายถึง ผลิตภัณฑ์คอนกรีต (Concrete) สูตรที่ 1

GC1 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซีโอโพลีเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) สูตรที่ 1

### 3.5 การดำเนินการทดลอง

#### 3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

##### 3.5.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

**3.5.1.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย:** ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF) และใช้วิธีย่อยสลาย (Digestion) เพื่อหาส่วนประกอบของโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก (As) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn)

**3.5.1.1.2 ประเภทของเถ้าลอย:** ทดสอบหาประเภทของเถ้าลอยด้วยวิธีวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF) โดยแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C618 ดังนี้

- 1) ชั้นคุณภาพ F;  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
- 2) ชั้นคุณภาพ C;  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$

**3.5.1.1.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC):** ทดสอบหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของเถ้าลอยด้วยการส่งวิเคราะห์ตัวอย่างเถ้าลอยกับโครงการพัฒนานาวิชากรดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ณ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**3.5.1.1.4 ปริมาณความชื้นของเถ้าลอย:** ทดสอบหาปริมาณความชื้นของเถ้าลอยด้วยการนำตัวอย่างเถ้าลอยมาอบที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเปรียบเทียบน้ำหนักเถ้าลอยก่อนและหลังการอบ ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักเถ้าลอยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักเถ้าลอยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเถ้าลอยก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.1)$$

**3.5.1.1.5 การสูญเสียน้ำหนักของเถ้าลอยเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI):** ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเถ้าลอยเนื่องจากการเผาด้วยการนำตัวอย่างเถ้าลอย

ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $750 \pm 50$  องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในบริเวณที่ปราศจากความชื้น ชั่งน้ำหนักหลังจากการเผา และคำนวณหาค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ดังสมการที่ (3.2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา} = \frac{\text{น้ำหนักแฉ่ำลอยก่อนเผา} - \text{น้ำหนักแฉ่ำลอยหลังเผา}}{\text{น้ำหนักแฉ่ำลอยก่อนเผา}} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.5.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

**3.5.1.2.1 ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวอนุภาคของแฉ่ำลอย:** ทดสอบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวอนุภาคของแฉ่ำลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า

**3.5.1.2.2 การกระจายตัวของอนุภาคแฉ่ำลอย:** ทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคแฉ่ำลอยด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) แสดงผลเป็นกราฟการกระจายตัวของแฉ่ำลอย และระบุขนาดของแฉ่ำลอยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ประกอบด้วย D10 D50 และ D90 โดย D50 หมายถึงขนาดของแฉ่ำลอยที่มีขนาดเล็กกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของแฉ่ำลอยทั้งหมด หรือขนาดเฉลี่ยของอนุภาคแฉ่ำลอย

## 3.5.2 การทดสอบหาความเป็นพิษของแฉ่ำลอย

### 3.5.2.1 การชะละลายโลหะหนักในแฉ่ำลอยด้วยวิธีย่อยสลาย

การย่อยสลายตัวอย่างแฉ่ำลอยด้วยเครื่องย่อยสลาย (Microwave Digestor) ตามวิธีมาตรฐาน USEPA Method 3051 มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่างแฉ่ำลอยปริมาณ 0.5 กรัม แล้วใส่ลงในหลอดทดลอง
2. เติมกรดไนตริก (nitric acid;  $\text{HNO}_3$ ) ปริมาตร  $9 \pm 0.1$  มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid;  $\text{HCl}$ ) ปริมาตร  $3 \pm 0.1$  มิลลิลิตร
3. ปิดฝาหลอดทดลอง แล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายสารด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟที่อุณหภูมิ  $175$  องศาเซลเซียส เป็นเวลาดำกว่า 5.5 นาที และที่อุณหภูมิ  $175 - 180$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4.5 นาที ที่ความดัน 6 บรรยากาศ

4. เมื่อครบกำหนด นำหลอดทดลองออกจากเครื่อง ที่ตั้งไว้ให้เย็น และนำไปกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร

5. นำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively Couple Plasma; ICP)

### 3.5.2.2 การชะละลายโลหะหนักในถ้ำลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic

#### Leaching Procedure

การชะละลายตัวอย่างถ้ำลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 มีขั้นตอนดังนี้

1. นำถ้ำลอยผสมกับสารเคมีในการชะละลายใส่ลงในขวดพลาสติกด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 20 หมายถึงถ้ำลอยปริมาณ 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยสารเคมีในการชะละลายคือ กรดอะซิติก น้ำกลั่น น้ำฝนกรดสังเคราะห์ และน้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10

2. นำขวดพลาสติกที่บรรจุถ้ำลอยผสมกับสารเคมีในการชะละลายกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (Rotator mixer) ความเร็ว 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3. นำของเหลวที่ได้จากการกวนผสมกรองของแข็งออกจากของเหลวด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน

4. นำของเหลวที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively Couple Plasma; ICP)

### 3.5.3 การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

3.5.3.1 กรณีศึกษาที่ 1: การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน

3.5.3.1.1 การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม และน้ำ สำหรับมวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) คือทราย และมวลละเอียด (Fine Aggregate) คือหิน โดยมีตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างส่วนผสมของคอนกรีตที่กำลังอัด 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ลำดับที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	450
2	ทราย	675
3	หิน	1,150
4	น้ำ	125
	รวม	<u>2,400</u>

หากต้องการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 15% จะได้ว่าต้องใช้เถ้าลอยในปริมาณ  $450 \times (15 \div 100) = 67.5$  กิโลกรัม และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ  $450 \times (85 \div 100) = 382.5$  กิโลกรัม หรือปริมาณ  $450 - 67.5 = 382.5$  กิโลกรัม

สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 มีอัตราส่วนในการเตรียมเถ้าลอย (Fly ash; FA) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement; OPC) จำนวน 4 สูตร แสดงดังตารางที่ 3-6



ตารางที่ 3-6 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
1	FA = 15% OPC = 85%	64	384	128	672	1152
2	FA = 30% OPC = 70%	136	312	128	672	1152
3	FA = 45% OPC = 55%	200	248	128	672	1152
4	FA = 60% OPC = 40%	272	184	128	672	1152

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละสูตรมีปริมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เนื่องจากปริมาณส่วนผสมของวัสดุคอนกรีตดังตารางที่ 3-6 เป็นปริมาณส่วนผสมที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร การเทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือปริมาตร  $1/8000$  ลูกบาศก์เมตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
1	FA = 15% OPC = 85%	0.008	0.048	0.016	0.084	0.144
2	FA = 30% OPC = 70%	0.017	0.039	0.016	0.084	0.144
3	FA = 45% OPC = 55%	0.025	0.031	0.016	0.084	0.144
4	FA = 60% OPC = 40%	0.034	0.023	0.016	0.084	0.144

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละสูตรมีปริมาณ 0.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเตรียมส่วนผสมในขั้นตอนนี้ ได้เทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นจำนวน 6 ลูกในแต่ละสูตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กรัมต่อ 5x5x5 เซนติเมตร) จำนวน 6 ลูก				
1	FA = 15% OPC = 85%	48	288	96	504	864
2	FA = 30% OPC = 70%	102	234	96	504	864
3	FA = 45% OPC = 55%	150	186	96	504	864
4	FA = 60% OPC = 40%	204	138	96	504	864

หากคำนวณส่วนผสมแต่ละชนิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมทั้งหมด และพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน	รวม	w/c	w/b
	(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	2.67	16.00	5.33	28.00	48.00	100	0.3	0.3
2	5.67	13.00	5.33	28.00	48.00	100	0.4	0.3
3	8.33	10.33	5.33	28.00	48.00	100	0.5	0.3
4	11.30	7.64	5.32	27.91	47.84	100	0.7	0.3

### 3.5.3.1.2 การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประกอบด้วยอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารประกอบซิลิเกต น้ำ มวลรวม และสารปอซโซลาน โดยอัลคาไลไฮดรอกไซด์ และสารประกอบซิลิเกตที่นิยมใช้กันคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ตามลำดับ สำหรับสารปอซโซลานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเถ้าลอย โดยมีตัวอย่างส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 72 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ตัวอย่างส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่กำลังอัด 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ลำดับที่	ส่วนผสม	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	เถ้าลอย	408
2	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	41
3	สารละลายโซเดียมซิลิเกต	103
		144
4	ทรายละเอียด	554
5	หินหยาบ	1,271
6	น้ำ (รวมสารลดน้ำพิเศษ)	23
	รวม	<u>2,400</u>

จะเห็นว่าอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อเถ้าลอยคือ  $144 \div 408 = 0.35$  หรือมีเถ้าลอย  $(408 \div 552) \times 100 = 74\%$  และมีสารละลายต่าง  $(144 \div 552) \times 100 = 26\%$  หรือ  $100 - 74 = 26\%$  โดยอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) คือ 2.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 2.0

สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 มีอัตราส่วนในการเตรียมเถ้าลอย (Fly ash; FA) และสารละลายต่าง (Alkaline Liquid; AL) จำนวน 4 สูตร แสดงดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL			หิน	ทราย
			NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	super P		
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	FA = 12% AL = 88%	64	160	320	24	1272	552
2	FA = 24% AL = 76%	136	138	278	24	1272	552
3	FA = 37% AL = 63%	200	118	234	24	1272	552
4	FA = 49% AL = 51%	272	96	192	24	1272	552

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เนื่องจากปริมาณส่วนผสมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตดังตารางที่ 3-10 เป็นปริมาณส่วนผสมที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร การเทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือปริมาตร 1/8000 ลูกบาศก์เมตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-12

ตารางที่ 3-12 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL		super P	หิน	ทราย
			NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	FA = 12% AL = 88%	0.008	0.020	0.040	0.003	0.159	0.069
2	FA = 24% AL = 76%	0.017	0.017	0.035	0.003	0.159	0.069
3	FA = 37% AL = 63%	0.025	0.015	0.029	0.003	0.159	0.069
4	FA = 49% AL = 51%	0.034	0.012	0.024	0.003	0.159	0.069

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 0.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเตรียมส่วนผสมในขั้นตอนนี้ได้เทลงในแบบหล่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นจำนวน 6 ลูกในแต่ละสูตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-13

ตารางที่ 3-13 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL		super P	หิน	ทราย
			NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
(กรัมต่อ 5x5x5 เซนติเมตร) จำนวน 6 ลูก							
1	FA = 12% AL = 88%	48	120	240	18	954	414
2	FA = 24% AL = 76%	102	104	208	18	954	414
3	FA = 37% AL = 63%	150	88	176	18	954	414
4	FA = 49% AL = 51%	204	72	144	18	954	414

หากคำนวณส่วนผสมแต่ละชนิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมทั้งหมด และพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	FA	AL		super P	หิน	ทราย	รวม	w/b
		NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>					
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)								
1	2.68	6.69	13.38	1.00	53.18	23.08	100	7.9
2	5.67	5.77	11.57	1.00	53.00	23.00	100	3.2
3	8.33	4.90	9.77	1.00	53.00	23.00	100	1.9
4	11.30	3.99	7.97	1.00	52.82	22.92	100	1.1

### 3.5.3.2 กรณีศึกษาที่ 2: ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 3.5.3.2.1 การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 มีอัตราส่วนการเตรียมเถ้าลอย (Fly ash; FA) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement; OPC) จำนวน 4 สูตร แสดงดังตารางที่ 3-15

ตารางที่ 3-15 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
1	FA = 18% OPC = 82%	81	369	128	672	1152
2	FA = 20% OPC = 80%	90	360	128	672	1152
3	FA = 23% OPC = 77%	103	346	128	672	1152
4	FA = 25% OPC = 75%	113	338	128	672	1152

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เนื่องจากปริมาณส่วนผสมของวัสดุคอนกรีตดังตารางที่ 3-13 เป็นปริมาณส่วนผสมที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร การเทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือปริมาตร  $1/8000$  ลูกบาศก์เมตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-16

ตารางที่ 3-16 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
1	FA = 18% OPC = 82%	0.010	0.046	0.016	0.084	0.144
2	FA = 20% OPC = 80%	0.011	0.045	0.016	0.084	0.144
3	FA = 23% OPC = 77%	0.013	0.043	0.016	0.084	0.144
4	FA = 25% OPC = 75%	0.014	0.042	0.016	0.084	0.144

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 0.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเตรียมส่วนผสมในขั้นตอนนี้ได้เทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นจำนวน 6 ลูกในแต่ละสูตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-17

ตารางที่ 3-17 ส่วนผสมของคอนกรีตขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ OPC	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน
		(กรัมต่อ $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร) จำนวน 6 ลูก				
1	FA = 18% OPC = 82%	61	277	96	504	864
2	FA = 20% OPC = 80%	68	270	96	504	864
3	FA = 23% OPC = 77%	77	260	96	504	864
4	FA = 25% OPC = 75%	85	253	96	504	864

หากคำนวณส่วนผสมแต่ละชนิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมทั้งหมด และพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (water to cement ratio; w/c) อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-18

ตารางที่ 3-18 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 1

สูตรที่	FA	OPC	น้ำ	ทราย	หิน	รวม	w/c	w/b
	(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	3.36	15.36	0.00	5.33	27.98	47.97	0.3	0.3
2	3.76	14.99	0.00	5.33	27.97	47.95	0.4	0.3
3	4.30	14.42	0.00	5.33	27.98	47.97	0.4	0.3
4	4.70	14.05	0.00	5.33	27.97	47.95	0.4	0.3

### 3.5.3.2.2 การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 มีอัตราส่วนในการเตรียมเถ้าลอย (Fly ash; FA) และสารละลายด่าง (Alkaline Liquid; AL) จำนวน 4 สูตร แสดงดังตารางที่ 3-19

ตารางที่ 3-19 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL		super P	หิน	ทราย
			NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	FA = 58% AL = 42%	320	78	95	24	1272	552
2	FA = 60% AL = 40%	331	74	147	24	1272	552
3	FA = 63% AL = 37%	348	68	137	24	1272	552
4	FA = 65% AL = 35%	359	65	129	24	1272	552

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เนื่องจากปริมาณส่วนผสมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตดังตารางที่ 3-16 เป็นปริมาณส่วนผสมที่ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร การเทลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด 5 × 5 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือปริมาตร 1/8000 ลูกบาศก์เมตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-20

ตารางที่ 3-20 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL		super P	หิน	ทราย
			NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							
1	FA = 58% AL = 42%	0.040	0.010	0.012	0.003	0.159	0.069
2	FA = 60% AL = 40%	0.041	0.009	0.018	0.003	0.159	0.069
3	FA = 63% AL = 37%	0.044	0.009	0.017	0.003	0.159	0.069
4	FA = 65% AL = 35%	0.045	0.008	0.016	0.003	0.159	0.069

รวมส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละแบบมีปริมาณ 0.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเตรียมส่วนผสมในขั้นตอนนี้ ได้เทลงในแบบหล่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นจำนวน 6 ลูกในแต่ละสูตร จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-21

ตารางที่ 3-21 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 6 ลูก ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	ปริมาณ FA และ AL	FA	AL		super P	หิน	ทราย
			NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
(กรัมต่อ 5x5x5 เซนติเมตร) จำนวน 6 ลูก							
1	FA = 58% AL = 42%	240	58	71	18	954	414
2	FA = 60% AL = 40%	248	55	110	18	954	414
3	FA = 63% AL = 37%	261	51	103	18	954	414
4	FA = 65% AL = 35%	269	49	97	18	954	414

หากคำนวณส่วนผสมแต่ละชนิดเป็นร้อยละโดยมวลของส่วนผสมทั้งหมด และพิจารณาอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (water to binder ratio; w/b) จึงมีปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3-22



ตารางที่ 3-22 ร้อยละโดยมวลของส่วนผสมซีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีศึกษาที่ 2

สูตรที่	FA	AL			super P	หิน	ทราย	รวม	w/b
		NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>						
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)									
1	13.67	3.32	4.07	1.03	54.34	23.58	100	0.6	
2	13.80	3.07	6.13	1.00	53.00	23.00	100	0.7	
3	14.50	2.83	5.70	1.00	52.98	22.99	100	0.7	
4	14.96	2.70	5.36	1.00	52.98	22.99	100	0.6	

### 3.5.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์

หลังจากขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว จะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน และทดสอบกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ซีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 48 และ 72 ชั่วโมง สำหรับมาตรฐานที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดตัวอย่างทรงลูกบาศก์คือ BS 1881: PART 4 Method of testing concrete for strength มีขั้นตอนดังนี้

- นำก้อนตัวอย่างวางลงกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด
- เปิดเครื่องทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ โดยอัตราที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ 1.4 – 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที
- กดก้อนตัวอย่างจนวิบัติหรือแตก และบันทึกค่ากำลังอัดสูงสุดที่ได้
- นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย หน่วยคือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

$$\text{กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดเฉลี่ย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}}$$

### 3.5.5 การทดสอบหาความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์

ทดสอบความสามารถในการตรึงโลหะหนักของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยการชะละลายตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 มีขั้นตอนดังนี้

1. แบ่งตัดตัวอย่างผลิตภัณฑ์ให้มีน้ำหนัก 1 กรัม
2. นำตัวอย่างใส่ลงในขวดพลาสติกผสมกับสารเคมีในการชะละลายด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 20 หมายถึงผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 1 กรัม ผสมกับสารเคมีในการชะละลายปริมาตร 20 เท่าของหน่วยน้ำหนักที่ซั่งได้ โดยสารเคมีในการชะละลายคือ กรดอะซิติก น้ำกลั่น น้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10
3. นำขวดพลาสติกที่บรรจุผลิตภัณฑ์ผสมกับสารเคมีในการชะละลายกวนผสมด้วยเครื่องเขย่าผสมสารชนิดหมุน (Rotator mixer) ความเร็ว 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. นำของเหลวที่ได้จากการกวนผสมกรองของแข็งออกจากของเหลวด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter) เส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้จากการกรองไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Inductively Couple Plasma; ICP)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทดลองศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากการประยุกต์ใช้เถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ (1) ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (2) ศึกษาหาค่าความเป็นพิษของเถ้าลอย เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้น 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี โดยใช้กรดอะซิติก น้ำกลั่น น้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 เป็นสารเคมีในการชะละลาย (3) ดำเนินการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด และ (4) ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงโลหะหนัก เพื่อวิเคราะห์และประเมินความเป็นอันตรายในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

#### 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเถ้าลอยบิทูมินัสจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี จังหวัดระยอง ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence; XRF) พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) โดยมวล เท่ากับ ร้อยละ 28.83 รองลงมาได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มีค่าร้อยละ 25.83 15.86 และ 15.60 โดยมวล ตามลำดับ สำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสมีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก เท่ากับ 66.53 โดยมวล ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มีค่าร้อยละ 23.01 และ 4.65 โดยมวล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทูมินัส
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide ; CaO)	25.83	1.09
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide; SiO <sub>2</sub> )	28.83	66.53
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15.86	23.01
เฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15.60	4.65
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide; MgO)	1.78	0.45
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide; Na <sub>2</sub> O)	1.57	0.48
โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide; K <sub>2</sub> O)	2.80	1.43
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfur trioxide; SO <sub>3</sub> )	6.40	0.28
ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO <sub>2</sub> )	0.51	1.29
ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorus pentoxide; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.27	0.36
สตรอนเทียมออกไซด์ (strontium oxide; SrO)	0.13	0.11
แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide; MnO)	0.15	0.05

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ปริมาณสูง ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Lamond และ Pielert, 2006; Nipatsat และ Tangtermsirikul, 2000; วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง และคณะ, 2545) ในขณะที่เถ้าลอยบิทูมินัสมีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ปริมาณสูง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ในการผลิตซีโพลิเมอร์คอนกรีต เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเมื่อผสมกับสารละลายต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดหากนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (Davidovits และ Orlinksi, 1999; Hardjito, 2005) และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีต่างๆ ของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด ประกอบด้วยภาวะความเป็นกรด-ต่าง (pH) ปริมาณซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) ปริมาณความชื้น ปริมาณการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition; LOI) ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่าโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) ตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์ มีองค์ประกอบทางเคมีตรงกับ

ข้อกำหนดของสารปอซโซลานชั้นคุณภาพ C ในขณะที่เถ้าลอยบิทูมินัส มีองค์ประกอบทางเคมีตรงกับข้อกำหนดของสารปอซโซลานชั้นคุณภาพ F ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		เถ้าลอย	
	C	F	ลิกไนต์	บิทูมินัส
ภาวะความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช (pH)	>10	<10	12.6	9.80
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ไม่น้อยกว่าร้อยละ)	50.0	70.0	60.1	94.2
SO <sub>3</sub> (ไม่เกินร้อยละ)	5.0	5.0	6.40	0.28
ปริมาณความชื้น (ไม่เกินร้อยละ)	3.0	3.0	0.24	0.29
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (ไม่เกินร้อยละ)	6.0	6.0	1.27	4.44
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O (ไม่เกินร้อยละ)	1.5	1.5	1.57	0.48

นอกจากนี้ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ยังมีผลต่อภาวะความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของเถ้าลอย (Gitari และคณะ, 2009; Komonweeraket, Cetin, Aydilek, และคณะ, 2015) เมื่อละลายเถ้าลอยในน้ำ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์จะเข้าไปควบคุมค่าพีเอชในน้ำชะ (Roy และ Berger, 2011) จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าเถ้าลอยบิทูมินัสมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ต่ำกว่าเถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ 1.09 และ 0.45 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) ส่งผลให้พีเอชของเถ้าลอยบิทูมินัสมีค่า 9.8 ซึ่งต่ำกว่าพีเอชของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีค่า 12.6

และจากการศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) ดังแสดงในตารางที่ 4-3 พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 3.67 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ในขณะที่เถ้าลอยบิทูมินัสมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 1.00 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณประจุบวกทั้งหมดที่เถ้าลอยลิกไนต์สามารถดูดซับไว้ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส ในด้านปฐพีวิทยาบ่งบอกได้ว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีความคงทนต่อการชะล้างน้อยกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส หรือบ่งบอกได้ว่าน้ำสามารถซึมผ่านเถ้าลอยลิกไนต์ได้ง่ายกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส (ศศิธร สิงห์เสริมวงษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์, 2560) ในด้าน

วิศวกรรมก่อสร้างบ่งบอกได้ว่าเส้นใยลิกไนต์มีการขยายตัวเมื่อเปียกและหดตัวเมื่อแห้งต่ำกว่าเส้นใยปิทิมินัส (พรชัย แสงอังศุมาลี, 2554) จึงมีแนวโน้มว่าค่าการชะละลายโลหะหนักของเส้นใยลิกไนต์สูงกว่าเส้นใยปิทิมินัส

ตารางที่ 4-3 ผลวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเส้นใย

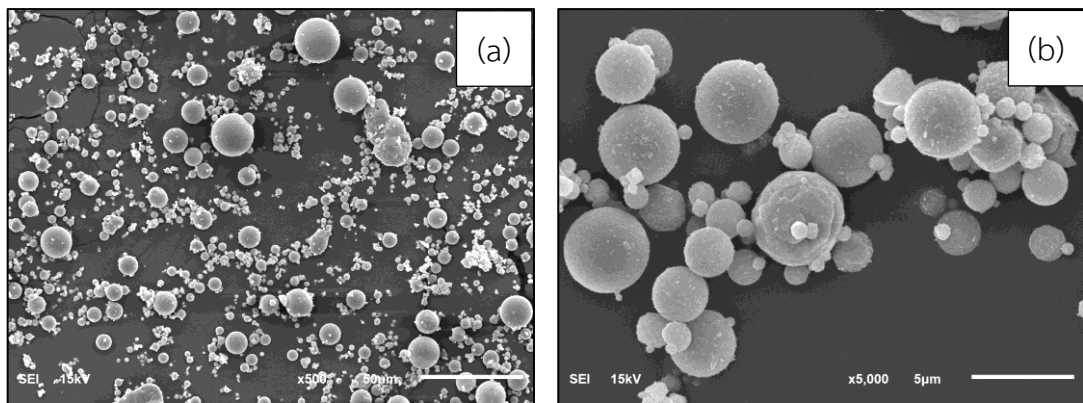
เส้นใย	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)
ลิกไนต์	3.67
ปิทิมินัส	1.00

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

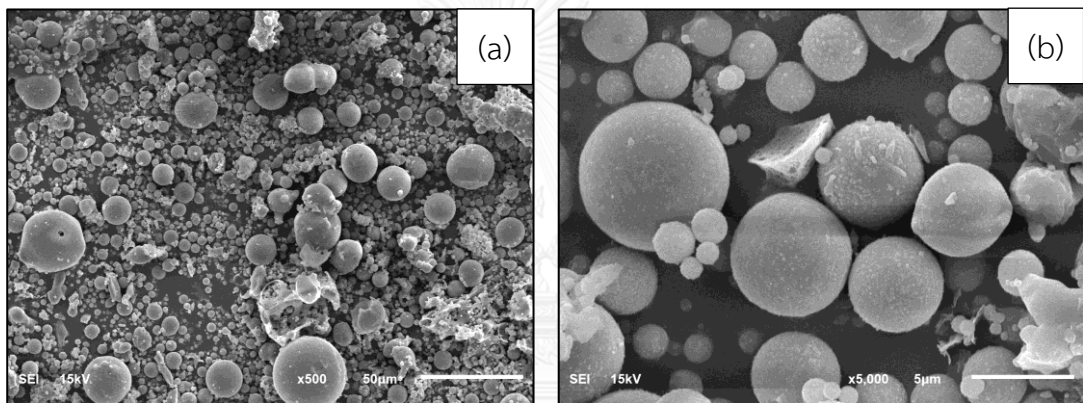
จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของเส้นใยลิกไนต์และปิทิมินัสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า พบว่าเส้นใยลิกไนต์มีลักษณะรูปทรงกลม มีขนาดคละกัน และมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ในขณะที่เส้นใยปิทิมินัสมีรูปร่างทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ และมีรูปร่างหลายเหลี่ยมเป็นส่วนน้อย แสดงดังรูปที่ 4-1 และ 4-2

จากการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเส้นใยด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size analyzer) โดยวัดค่าที่ D10, D50 และ D90 พบว่าเส้นใยลิกไนต์มีขนาดอนุภาค 2.51, 26.30 และ 121.23 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยปิทิมินัสมีขนาดอนุภาค 4.75, 23.39 และ 97.42 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเส้นใยลิกไนต์มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (D50) เล็กกว่าเส้นใยปิทิมินัส แสดงดังรูปที่ 4-3

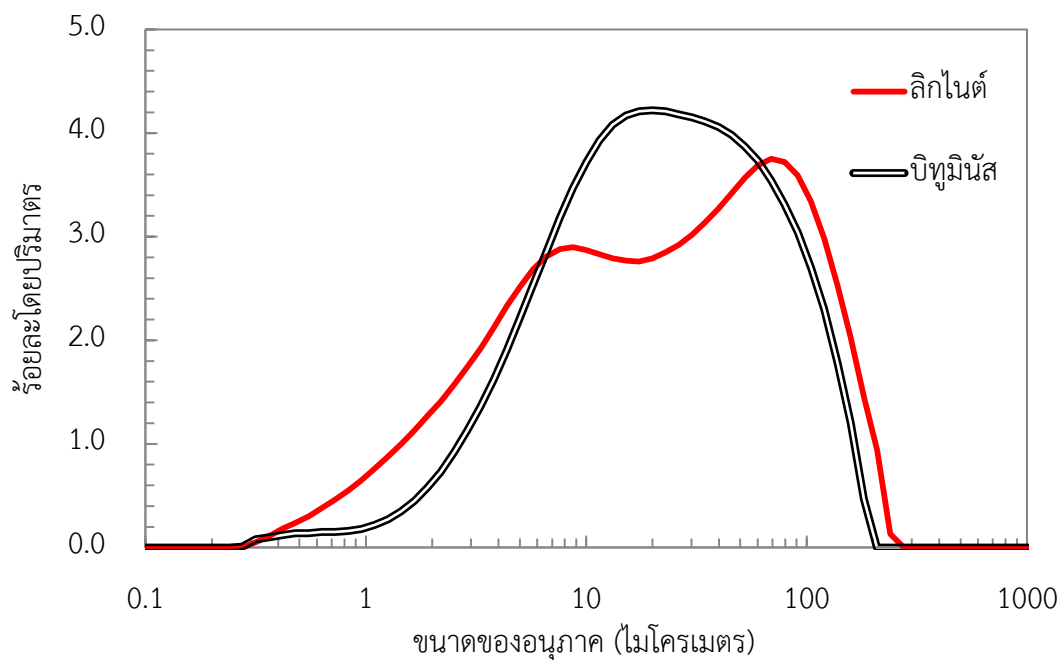
ด้วยลักษณะรูปทรงกลมและมีขนาดเล็กนี้ เส้นใยจึงช่วยอุดแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดหินทราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เป็นอย่างดี ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น ทึบน้ำ อีกทั้งลดการแทรกซึมของสารละลายต่างๆ ที่จะเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเทลงแบบหล่อได้ดี เนื่องจากรูปร่างที่เป็นทรงกลมนั้นสามารถลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และลดความต้องการน้ำเพื่อให้คอนกรีตสามารถไหลลื่นได้ (Dermatas และ Meng, 2003; Hoy และคณะ, 2016; S. Wang, Baxter และ Fonseca, 2008)



รูปที่ 4-1 ภาพกำลังขยายของเม็ดลอยลิกไนต์ (a) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ  
(b) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4-2 ภาพกำลังขยายของเม็ดลอยพียูมินีส (a) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ  
(b) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4-3 ภาพการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัส

## 4.2 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอย

### 4.2.1 ผลการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย

จากการศึกษาการย่อยสลายตัวอย่างเถ้าลอยด้วยเครื่องย่อยสลาย (Microwave Digestor) ตามวิธีมาตรฐาน USEPA Method 3051 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ผ่านเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma; ICP) พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณโลหะหนักทุกชนิดสูงกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส แต่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; USEPA) กำหนด ยกเว้นเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณอาร์เซนิกสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด แสดงดังตารางที่ 4-4 ซึ่งให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่จะใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตได้

นอกจากวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิดดังกล่าวมาแล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอื่นๆ อีก 3 ชนิด ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม และอลูมิเนียม ซึ่งพบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มี



ปริมาณแคลเซียมสูง (ร้อยละ 61.83 ของธาตุทั้ง 3 ชนิด) จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างยิ่งในการนำไปใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต (Brandt, 2009; Naik และ Ramme, 1989; Sata, Khammathit และ Chindaprasirt, 2011; Thomas, 2007) ในขณะที่เถ้าลอยบิทุมินส์มีปริมาณอลูมิเนียมสูง (ร้อยละ 68.03 ของธาตุทั้ง 3 ชนิด) จึงเหมาะอย่างยิ่งในการนำไปใช้เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (P Chindaprasirt และคณะ, 2010; Nazari และ Sanjayan, 2016; Palomo, Fernández-Jiménez และ Criado, 2004) สำหรับปริมาณแมกนีเซียมและอลูมิเนียมของเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดนั้นมีปริมาณต่ำ แสดงดังตารางที่ 4-5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-4 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย

ชนิด	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
		เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทุมินส์
อาร์เซนิก (Arsenic; As)	0.4	128.57	9.31
โครเมียม (Chromium; Cr)	230	42.81	13.36
ตะกั่ว (Lead; Pb)	400	34.35	11.15
สังกะสี (Zinc; Zn)	23,000	127.58	66.10

ตารางที่ 4-5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุอื่นๆ ในเถ้าลอยด้วยวิธีย่อยสลาย

ชนิด	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	เถ้าลอยลิกไนต์	เถ้าลอยบิทุมินส์
แคลเซียม (Calcium; Ca)	154,719.57	2,450.94
แมกนีเซียม (Magnesium; Mg)	13,838.79	2,976.99
อลูมิเนียม (Aluminium; Al)	81,661.04	11,549.28

#### 4.2.2 ผลการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอยด้วยวิธี TCLP

จากการศึกษาการชะละลายตัวอย่างเถ้าลอยด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ผ่านเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively coupled plasma; ICP) โดยใช้กรดอะซิติก น้ำกลั่น น้ำฝนกรดสังเคราะห์ และน้ำที่มีค่าพีเอชต่างๆ เป็นสารเคมีในการชะละลาย แสดงดังตารางที่ 4-6 พบว่าพีเอชมีผลต่อการชะละลายโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์ (LCFA) และบิทูมินัส (BCFA) กล่าวคือ อาร์เซนิกและตะกั่วถูกชะละลายเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 10 หรือกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกและตะกั่วในน้ำชะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากภาวะความเป็นกรดสู่ภาวะความเป็นกลาง และลดต่ำลงที่ภาวะความเป็นด่าง ในขณะที่โครเมียมและสังกะสีถูกชะละลายต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 4 ถึง 8 และเพิ่มขึ้นที่พีเอชเท่ากับ 10 หรือกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีในน้ำชะมีค่าลดต่ำลงจากภาวะความเป็นกรดสู่ภาวะความเป็นกลาง และเพิ่มสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นด่าง

การชะละลายของอาร์เซนิกแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการชะละลายแบบออกซีแอนไอออนิก (oxyanionic) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการป้องกันการดูดซับประจุลบ (anion) บนผิวเถ้าลอย ที่ระดับน้ำชะละลายมีภาวะความเป็นด่าง เป็นการยับยั้งการเกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นระหว่างเถ้าลอยและออกซีแอนไอออน (oxyanion) ทำให้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำชะมีค่าลดลงที่ภาวะความเป็นด่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-5 (a) สำหรับตัวอย่างรูปของสารประกอบที่ช่วยป้องกันการดูดซับประจุลบบนผิวเถ้าลอยคือ อาร์เซนเนท ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) (Komonweeraket, Cetin, Benson, และคณะ, 2015) นอกจากนี้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำชะมีค่าลดลงที่ภาวะความเป็นด่าง เนื่องจากเถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสานของเถ้าลอย จากตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสโดยมวลร้อยละ 25.83 และ 1.09 ตามลำดับ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) เพราะทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานหรือสารละลายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) เกิดชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งสามารถยับยั้งการชะละลายและลดความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำชะได้ (T. Wang, 2007) โดยมีสารประกอบประจุลบของอาร์เซนิก เช่น

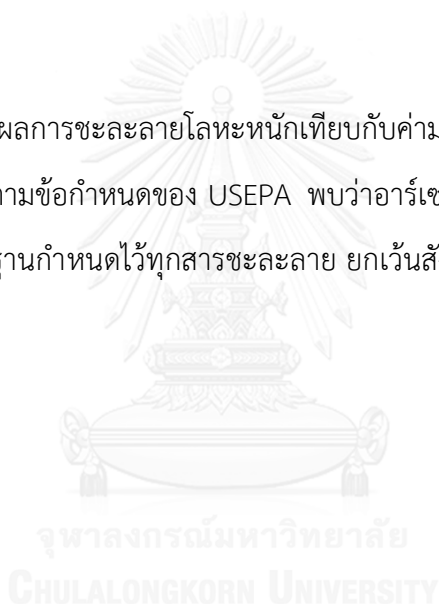
อาร์เซเนท ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) ร่วมกับชั้นของเอททริงไคต์มาตริงไว้ (Hassett, Pflughoeft-Hassett และ McCarthy, 1991; Komonweeraket, Cetin, Aydilek, และคณะ, 2015)

การชะละลายของโครเมียมและสังกะสีเพิ่มสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นกรดและด่าง และลดต่ำลงที่ภาวะความเป็นกลางหรือที่พีเอชเท่ากับ 8 ดังแสดงในรูปที่ 4-5 (b) และ (d) เป็นพฤติกรรมการชะละลายแบบแอมโฟเทอริก (amphoteric) สำหรับแอมโฟเทอริกหมายถึงสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักที่ละลายได้ดีในกรดแก่และเบสแก่ ทำให้การชะละลายของโครเมียมและสังกะสีขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ซึ่งโครเมียมและสังกะสีที่อยู่ในรูปของออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ควบคุมการละลายและหรือการตกตะกอน (Gitari และคณะ, 2009) กล่าวคือโครเมียมและสังกะสีที่อยู่ในรูปของออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ เช่น โครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_{3(s)}$ ) โครเมียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cr}(\text{OH})_{3(s)}$ ) และสังกะสีไฮดรอกไซด์ ( $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ) (Mulugeta และคณะ, 2011) เป็นตัวควบคุมความสามารถในการชะละลายโครเมียมและสังกะสีจากเถ้าลอย ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีในน้ำจะมีค่าสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นกรดและด่าง เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนในรูปออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ อีกทั้งซัลเฟตมีความเข้มข้นสูงในภาวะความเป็นด่าง ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมบนผิวของเถ้าลอยลดลง (Fruchter, Rai และ Zachara, 1990) จึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีในน้ำชะของเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสถูกควบคุมด้วยระดับความสามารถในการละลาย (solubility limit) จากการสลายตัวของโครเมียมและสังกะสีที่อยู่ในรูปของออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ในภาวะความเป็นกรดและด่าง (Komonweeraket, Cetin, Benson, และคณะ, 2015)

การชะละลายของตะกั่วลดต่ำลงที่พีเอชเท่ากับ 10 เนื่องจากภายใต้ภาวะความเป็นด่างประจุลบบนผิวของเถ้าลอยจะช่วยดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก เช่น ตะกั่ว นิเกิล และทองแดงไว้ (Lee และ Saunders, 2003) นอกจากนี้การมีแคลเซียมยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของเถ้าลอยในภาวะความเป็นด่าง (Gitari และคณะ, 2009; Varma, Singh และ Sahu, 2013) จากรูปที่ 4-5 (c) ที่พีเอชเท่ากับ 10 จะเห็นว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะลดต่ำลง ขณะที่เถ้าลอยบิทูมินัสมีความเข้มข้นของน้ำชะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณแคลเซียมสูงกว่าเถ้าลอยบิทูมินัส ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของเถ้าลอยลิกไนต์จึงสูงกว่าเถ้าลอยบิทูมินัสในภาวะความเป็นด่าง

โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และสังกะสีในน้ำชะที่พีเอชต่างๆ มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนด ยกเว้นตะกั่วในถ้ำลอยลิกไนต์ถูกชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดทุกพีเอช (0.20, 0.81, 0.80 และ 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) สำหรับการใช้อิทธิพลของความเป็นสารเคมีในการชะละลายนั้น อาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วในถ้ำลอยลิกไนต์ถูกชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนด (3.54, 1.95 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ยกเว้นสังกะสีที่ถูกชะละลายต่ำกว่า (4.55 มิลลิกรัมต่อลิตร) สำหรับน้ำชะละลายที่เป็นน้ำกลั่นและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ โลหะหนักถูกชะละลายในปริมาณต่ำมาก

แต่หากวิเคราะห์ผลการชะละลายโลหะหนักเทียบกับค่ามาตรฐาน Toxicity characteristic leaching procedure ตามข้อกำหนดของ USEPA พบว่าอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่ว มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ทุกสารชะละลาย ยกเว้นสังกะสี เนื่องจากไม่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน

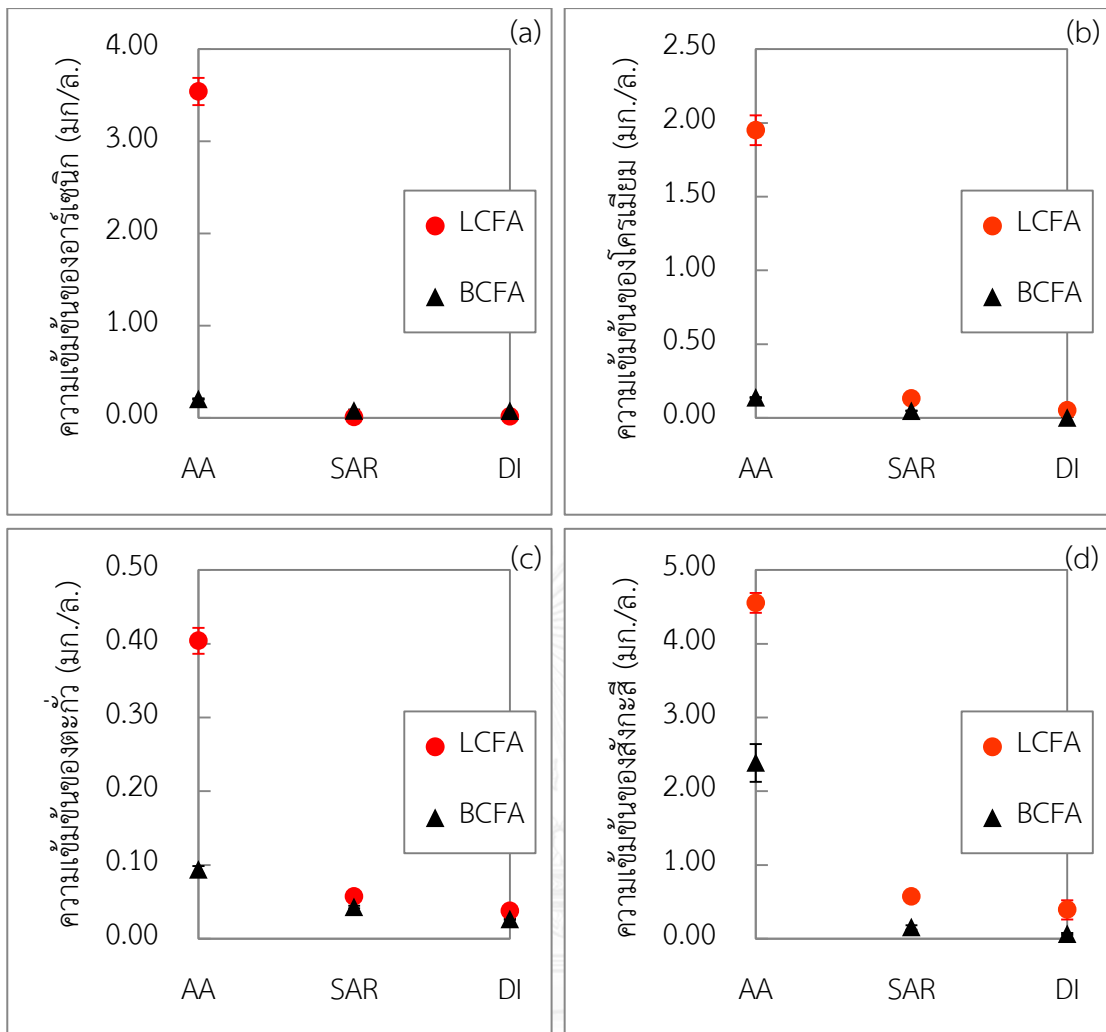


ตารางที่ 4-6 ผลวิเคราะห์การชะละลายปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยด้วยวิธี TCLP

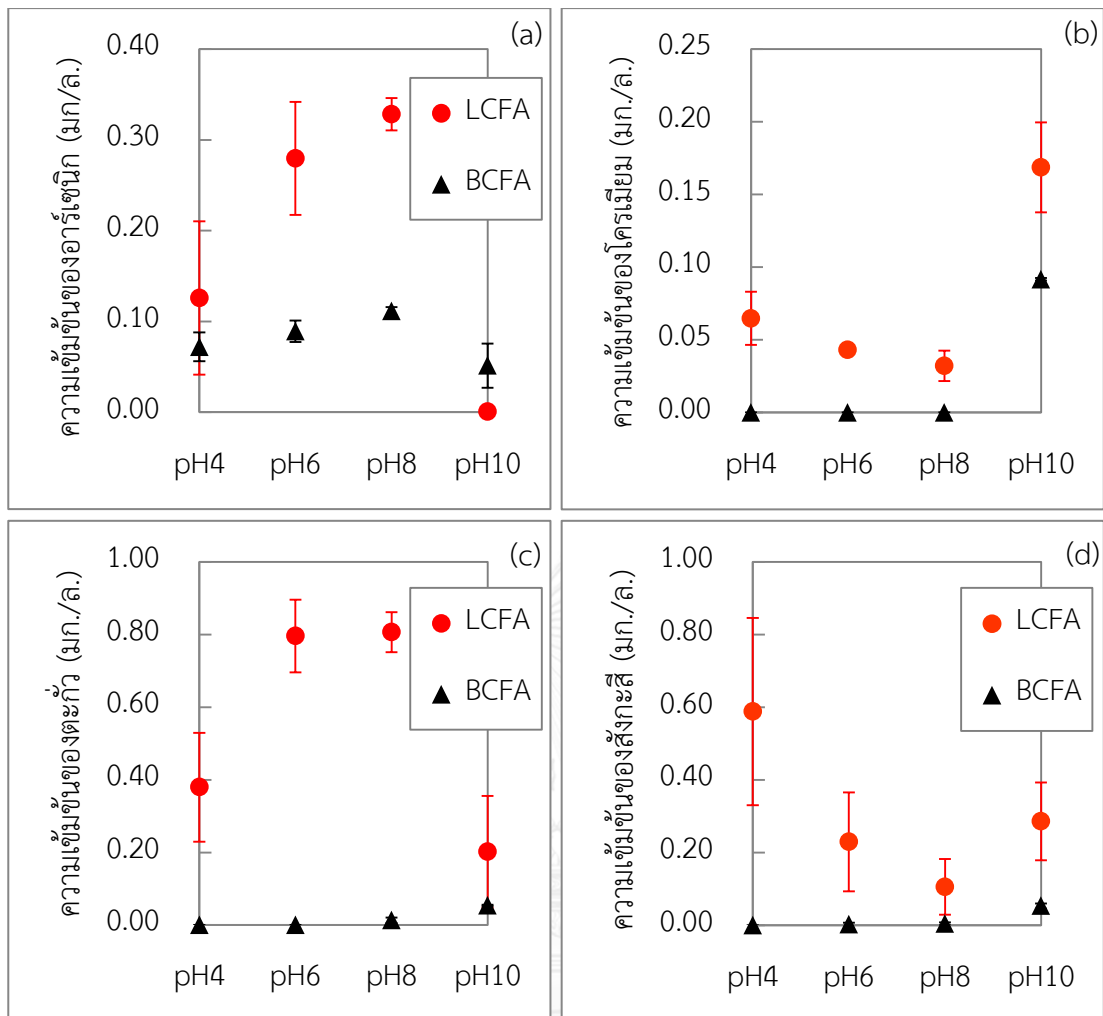
ถ้ำลอย	สารเคมีในการชะละลาย	ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
		อาร์เซนิก	โครเมียม	ตะกั่ว	สังกะสี
ถ้ำลอย	สารเคมีในการชะละลาย	<0.25 <sup>a</sup>	<0.25 <sup>a</sup>	<0.20 <sup>a</sup>	<5.00 <sup>a</sup>
		<5.00 <sup>b</sup>	<5.00 <sup>b</sup>	<5.00 <sup>b</sup>	-
กรดอะซีติก	กรดอะซีติก	3.54	1.95	0.40	4.55
	น้ำกลั่น	0.01	0.13	0.06	0.57
	น้ำฝนกรดสังเคราะห์	0.02	0.05	0.04	0.39
ลิกไนต์	พีเอช 4	0.00	0.17	0.20	0.29
	พีเอช 6	0.33	0.03	0.81	0.11
	พีเอช 8	0.28	0.04	0.80	0.23
	พีเอช 10	0.13	0.06	0.38	0.59
กรดอะซีติก	กรดอะซีติก	0.20	0.14	0.09	2.38
	น้ำกลั่น	0.08	0.05	0.04	0.15
	น้ำฝนกรดสังเคราะห์	0.07	0.00	0.03	0.06
บิทูมินัส	พีเอช 4	0.05	0.09	0.05	0.05
	พีเอช 6	0.11	0.00	0.01	0.00
	พีเอช 8	0.09	0.00	0.00	0.00
	พีเอช 10	0.07	0.00	0.00	0.00

<sup>a</sup> ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

<sup>b</sup> ค่ามาตรฐาน Toxicity characteristic leaching procedure ตามข้อกำหนดของ USEPA



รูปที่ 4-4 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี  
 ในถ้ำลอยลิกันต์ (LCFA) และถ้ำลอยบิทุมินัส (BCFA) ด้วยกรดอะซิติก (AA)  
 น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (SAR) และน้ำกลั่น (DI)



รูปที่ 4-5 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี

ในถ้ำลอยลิกไนต์ (LCFA) และถ้ำลอยบิทูมินัส (BCFA) ด้วยพีเอช 4 6 8 และ 10

### 4.3 การขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีต (CC) ประกอบด้วยเถ้าลอย (CFA) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) น้ำ หิน และทราย สำหรับส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (GC) ประกอบด้วยเถ้าลอย (CFA) สารละลายต่าง (AL) น้ำ สารเคมีผสมเพิ่ม (superplasticizer; super P) หิน และทราย ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา คือ (1) กรณีศึกษาการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน และ (2) กรณีศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 4.3.1 กรณีศึกษาที่ 1: การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน

การขึ้นรูปในกรณีที่ศึกษาที่ 1 นี้มีปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4-7 ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในสูตรที่ 1 และ 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (N/A) เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยน้อยเกินไป (ต่ำกว่าร้อยละ 6 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด) ในขณะที่คอนกรีตสามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากสามารถใส่เถ้าลอยในคอนกรีตได้มากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด (Huang และคณะ, 2013; Thomas, 2007) หากพิจารณาในสูตรที่ 3 ซึ่งกำหนดใส่เถ้าลอยในปริมาณ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือร้อยละ 8.33 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด พบว่าคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิคนิตเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 220 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 189 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิคนิตเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 38 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 68 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ 4-7 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและซีเมนต์โพซิเมนต์คอนกรีต กรณีศึกษาที่ 1: การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้เถาวัลย์ในปริมาณที่เท่ากัน

สูตรที่ ผลิตภัณฑ์	ปริมาณส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)							กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)			
	เปอร์เซ็นต์การแทนที่ โดยน้ำหนัก (w/w)	CFA	OPC	AL NaOH	น้ำ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	super P	หิน	ทราย	ลิกไนต์	บิวทิลีน	
1	CC	FA = 15% OPC = 85%	64	384	-	128	-	1,152	672	137	108
	GC	FA = 12% AL = 88%	64	-	160	320	24	1,272	552	N/A	N/A
2	CC	FA = 30% OPC = 70%	136	312	-	128	-	1,152	672	214	147
	GC	FA = 24% AL = 76%	136	-	138	278	24	1,272	552	N/A	N/A
3	CC	FA = 45% OPC = 55%	200	248	-	128	-	1,152	672	220	189
	GC	FA = 37% AL = 63%	200	-	118	234	24	1,272	552	38	68
4	CC	FA = 60% OPC = 40%	272	184	-	128	-	1,152	672	154	170
	GC	FA = 49% AL = 51%	272	-	96	192	24	1,272	552	41	83

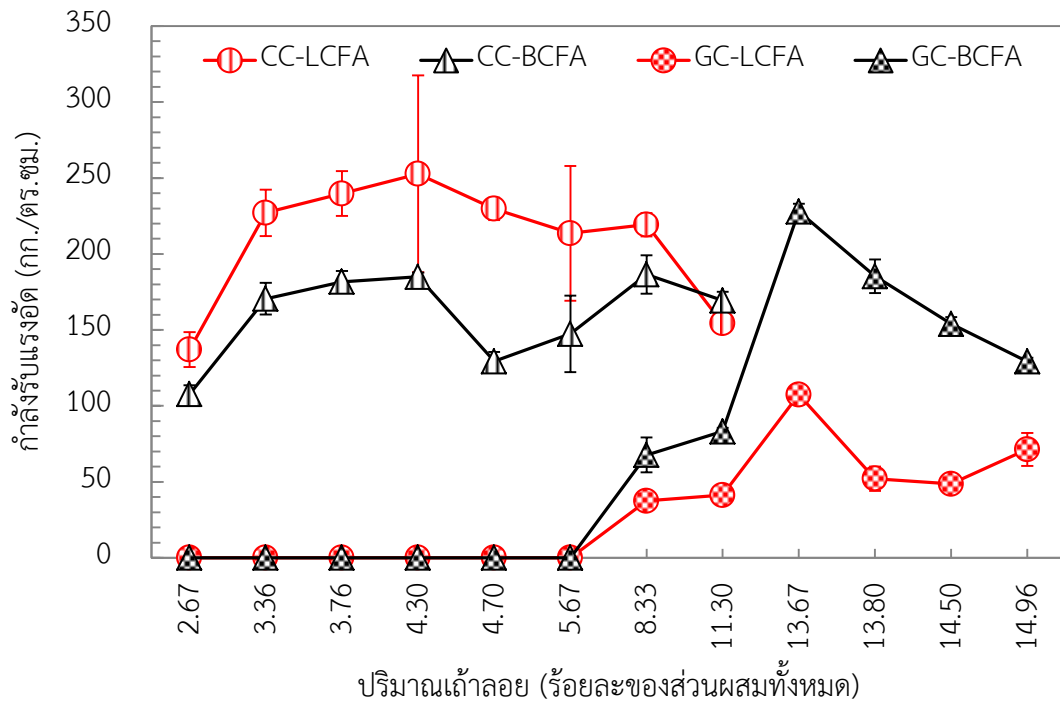
#### 4.3.2 กรณีศึกษาที่ 2: ปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การขึ้นรูปในกรณีที่ศึกษาที่ 2 นี้มีปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4-8 ซึ่งปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตคือ 103 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในสูตรที่ 3 หรือร้อยละ 4.30 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด โดยคอนกรีตที่มีเถ้าลอย ลิกไนต์เป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 253 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตที่มี เถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 185 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และปริมาณ เถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคือ 320 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในสูตร ที่ 1 หรือร้อยละ 13.67 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 107 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มี เถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ 228 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเถ้าลอยและกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ พบว่าค่ากำลังรับ แรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่การผสมเถ้าลอยร้อยละ 4.30 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่การผสมเถ้าลอยร้อยละ 13.67 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ เถ้าลอย โดยคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสม (CC-LCFA) สามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่า คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสม (CC-BCFA) ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอย บิทูมินัสเป็นส่วนผสม (GC-BCFA) สามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอย ลิกไนต์เป็นส่วนผสม (GC-LCFA) แสดงดังรูปที่ 4-6 ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าลอย ในตารางที่ 4-1 เถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูง จึงมีผลต่อโครงสร้างผลึกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในขณะที่เถ้าลอยบิทูมินัสมีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) สูง จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ใน การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ตารางที่ 4-8 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตและซีโพลีเมอร์คอนกรีต กรณีศึกษาที่ 2 : ทหาปริมาณแฉ่ำถ้อยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

สูตรที่ ผลิตภัณฑ์	ปริมาณส่วนผสม (กก./ลบ.ม.)										กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)		
	เปอร์เซ็นต์การแทนที่ โดยน้ำหนัก (w/w)			CFA	OPC	AL	น้ำ	super P	หิน	ทราย	ลิกไนต์	ขุยมะพร้าว	
1	CC	FA = 18%	OPC = 82%	81	369	-	-	128	-	1,152	672	227	171
	GC	FA = 58%	AL = 42%	320	-	78	95	-	24	1,272	552	107	228
2	CC	FA = 20%	OPC = 80%	90	360	-	-	128	-	1,152	672	240	182
	GC	FA = 60%	AL = 40%	331	-	74	147	-	24	1,272	552	52	185
3	CC	FA = 23%	OPC = 77%	103	346	-	-	128	-	1,152	672	253	185
	GC	FA = 63%	AL = 37%	348	-	68	137	-	24	1,272	552	49	154
4	CC	FA = 25%	OPC = 75%	113	338	-	-	128	-	1,152	672	230	129
	GC	FA = 65%	AL = 35%	359	-	65	129	-	24	1,272	552	71	129



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำชะละลายและกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์

#### 4.4 ปริมาณโลหะหนักในผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีน้ำชะละลายเป็นส่วนผสม

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีน้ำชะละลายเป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 ในสถานะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-9 แบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา คือ (1) กรณีศึกษาการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยใช้น้ำชะละลายเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน และ (2) กรณีศึกษาการหาปริมาณน้ำชะละลายที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งจะเห็นว่าไม่ได้ทำการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในกรณีที่ศึกษาที่ 1 เนื่องจากสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (N/A) อีกทั้งสูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 มีกำลังรับแรงอัดต่ำ

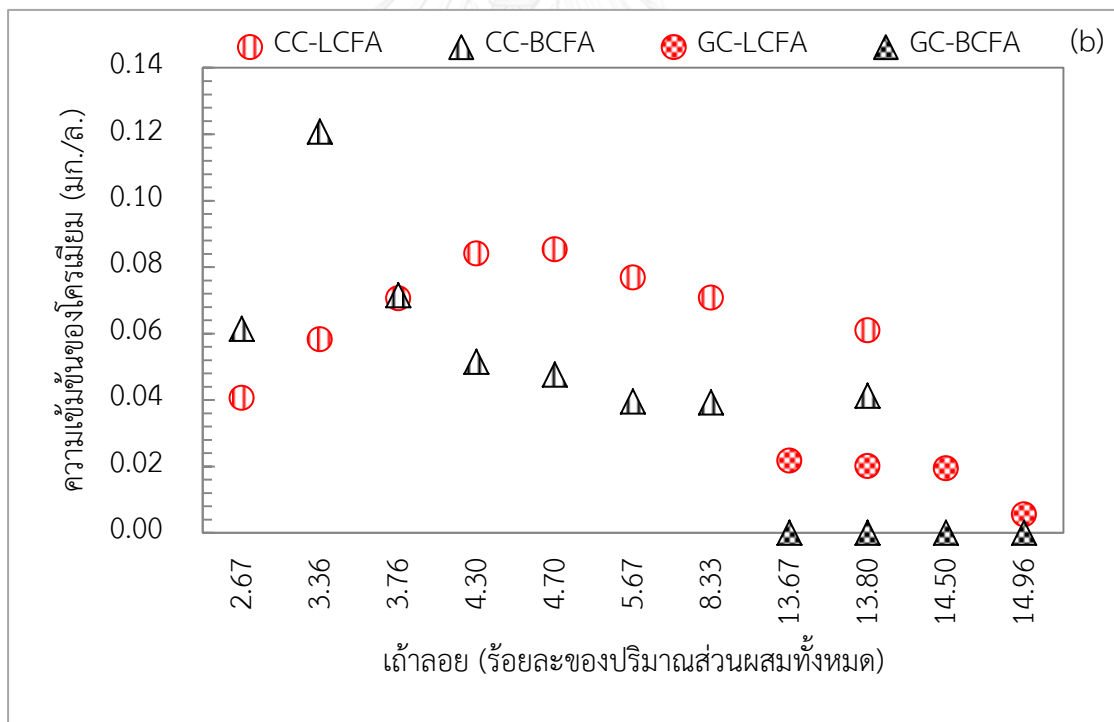
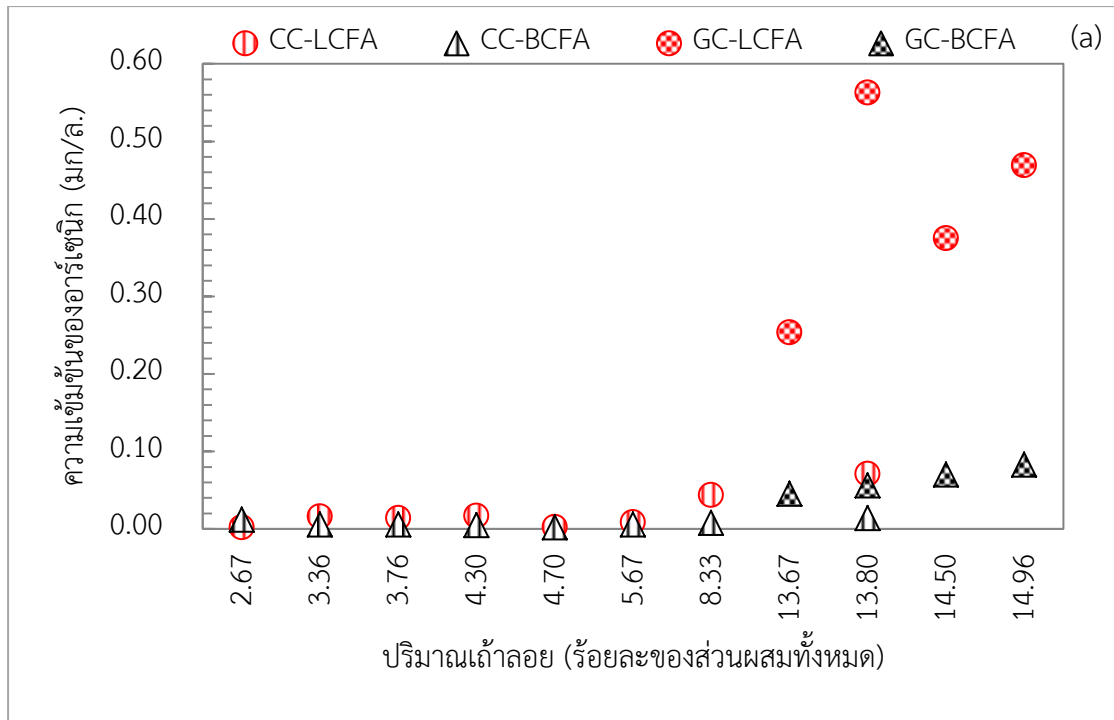
ตารางที่ 4-9 สภาวะต่างๆ ในการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก

ผลิตภัณฑ์	คอนกรีต								ซีโอไฟเบอร์คอนกรีต							
	กรณี 1				กรณี 2				กรณี 1				กรณี 2			
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4
สารชะละลาย	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
กรดอะซิติก	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
น้ำกลั่น	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ฝนกรดสังเคราะห์	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
พีเอช 4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
พีเอช 6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
พีเอช 8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
พีเอช 10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

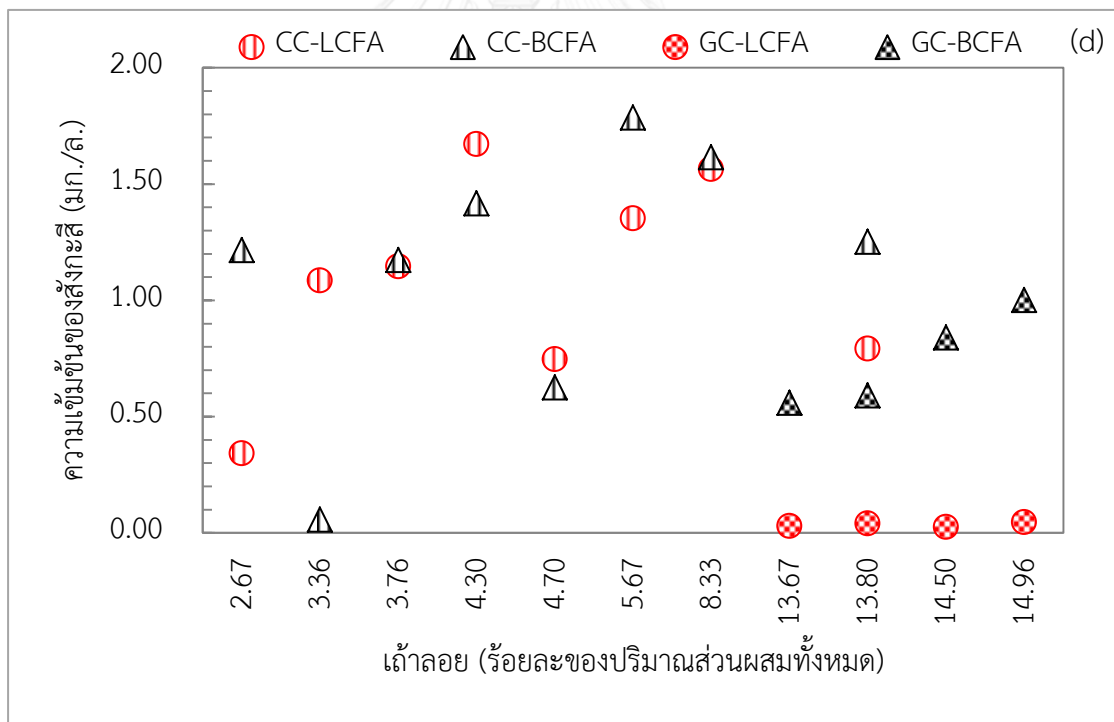
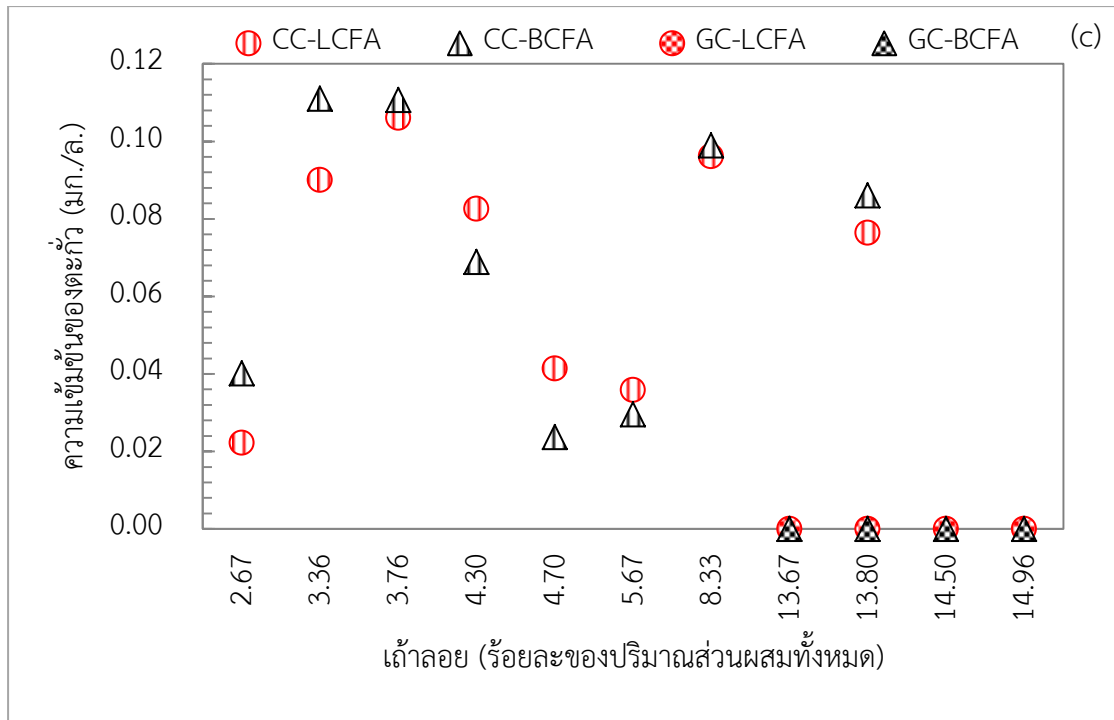
#### 4.4.1 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยกรดอะซิติก

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-7 พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกโครเมียม และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกันต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ตะกั่วในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกันต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกันต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่สังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-7 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีแก้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยกรดอะซิติก



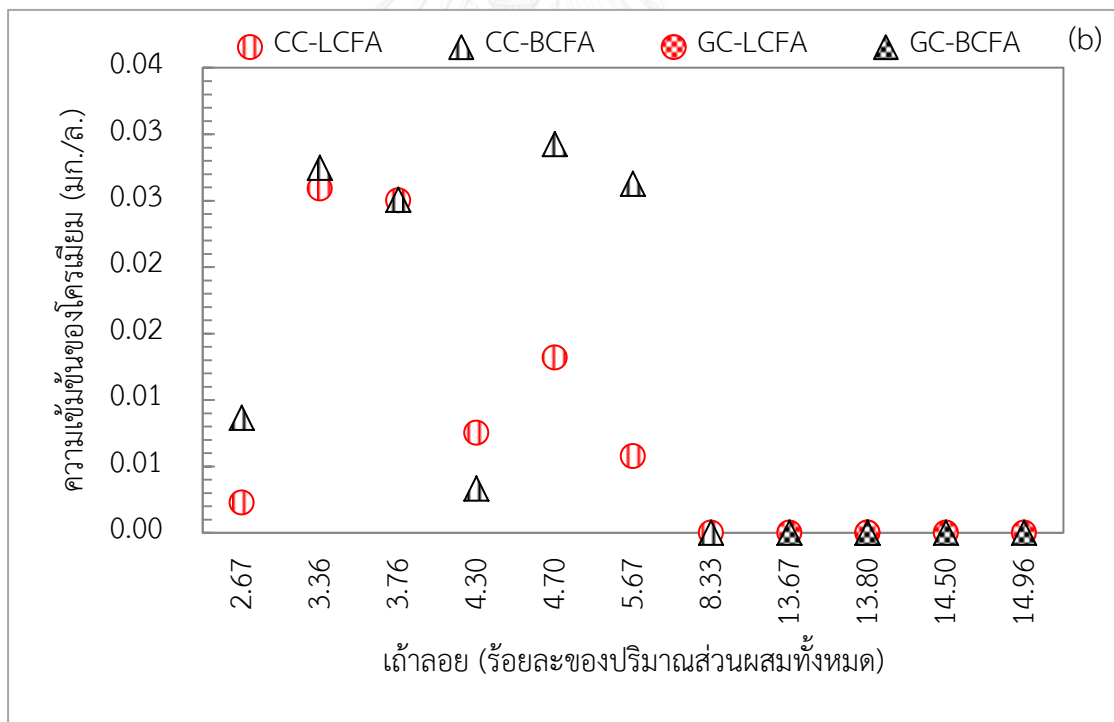
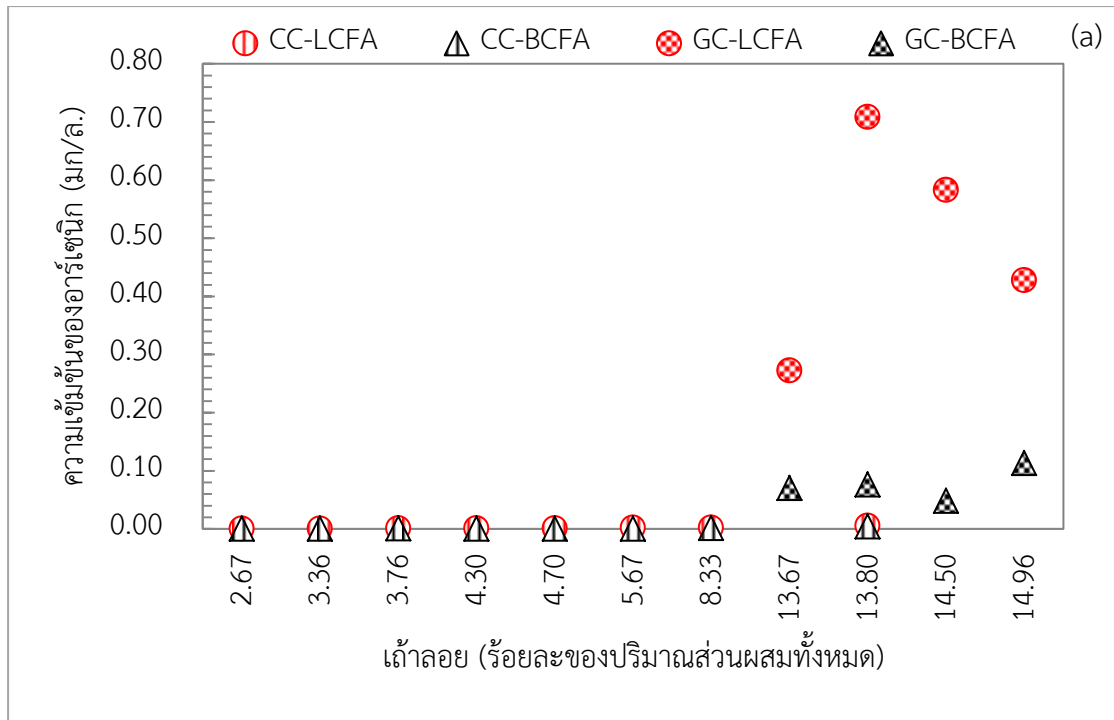
รูปที่ 4-7 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยกรดอะซิติก



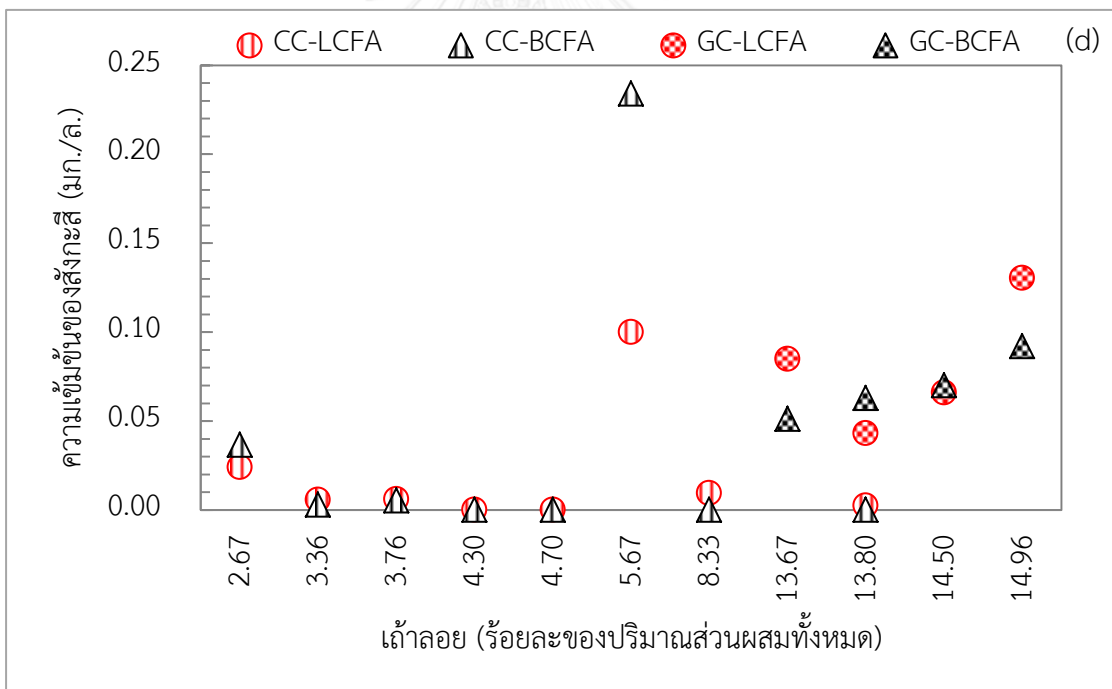
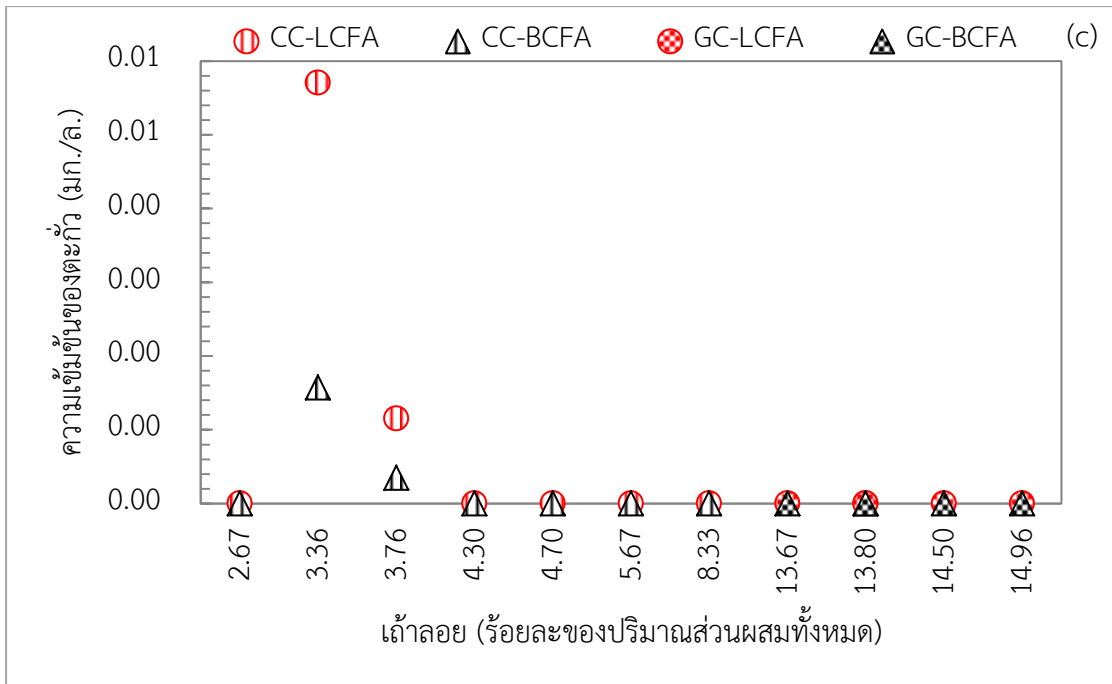
#### 4.4.2 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้ น้ำฝนกรดสังเคราะห์เป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-8 พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคือโครเมียมและตะกั่วในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น และสังกะสีในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่อาร์เซนิกถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น และสังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมและตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-8 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์



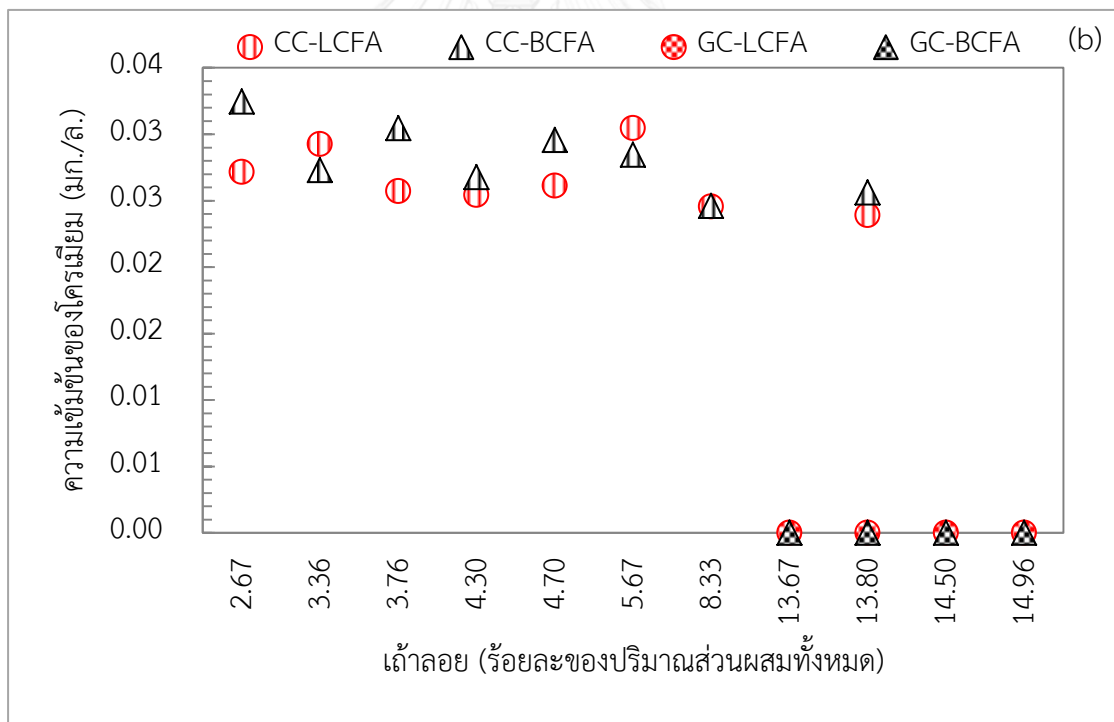
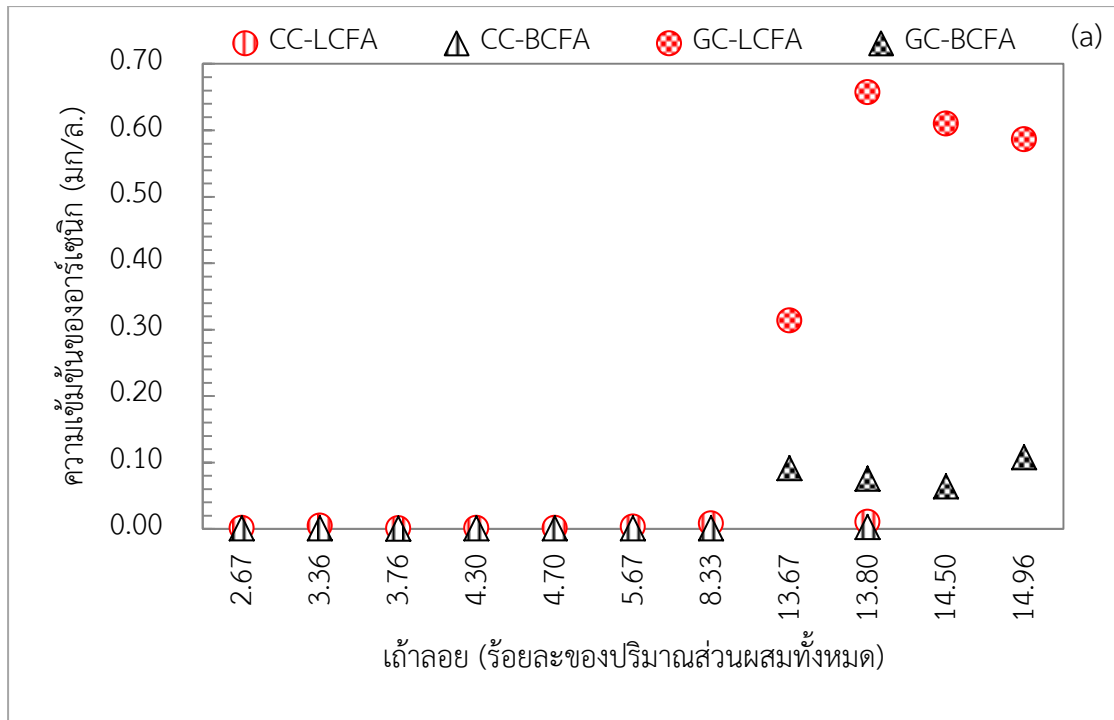
รูปที่ 4-8 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำฝนกรด

สังเคราะห์

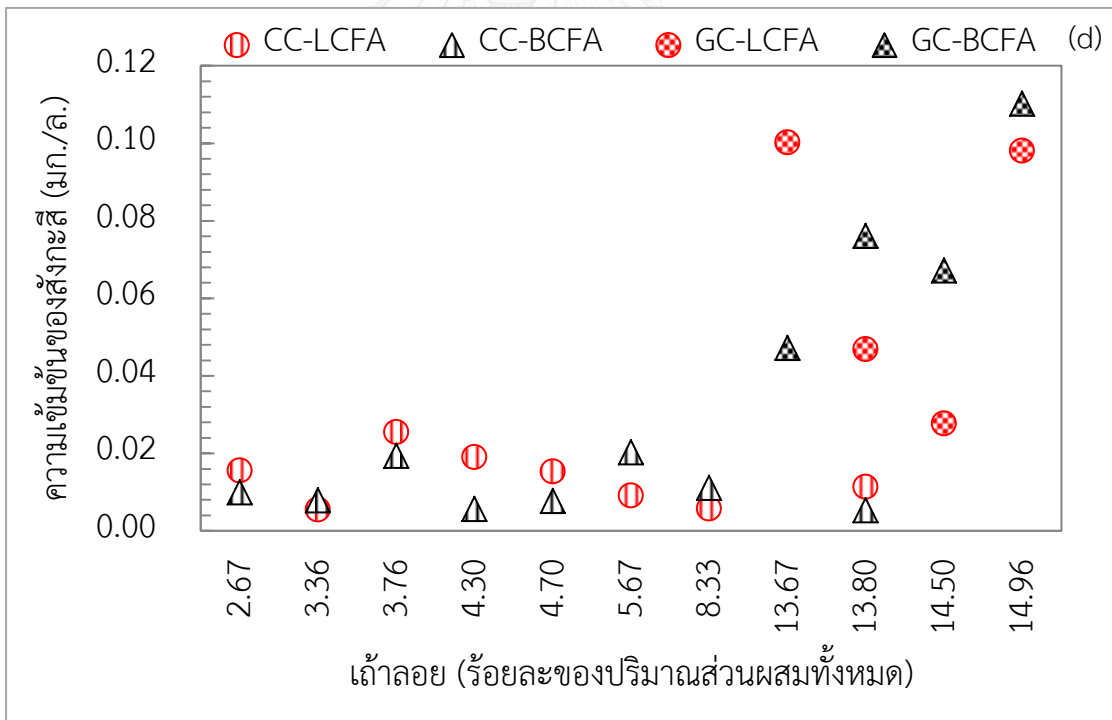
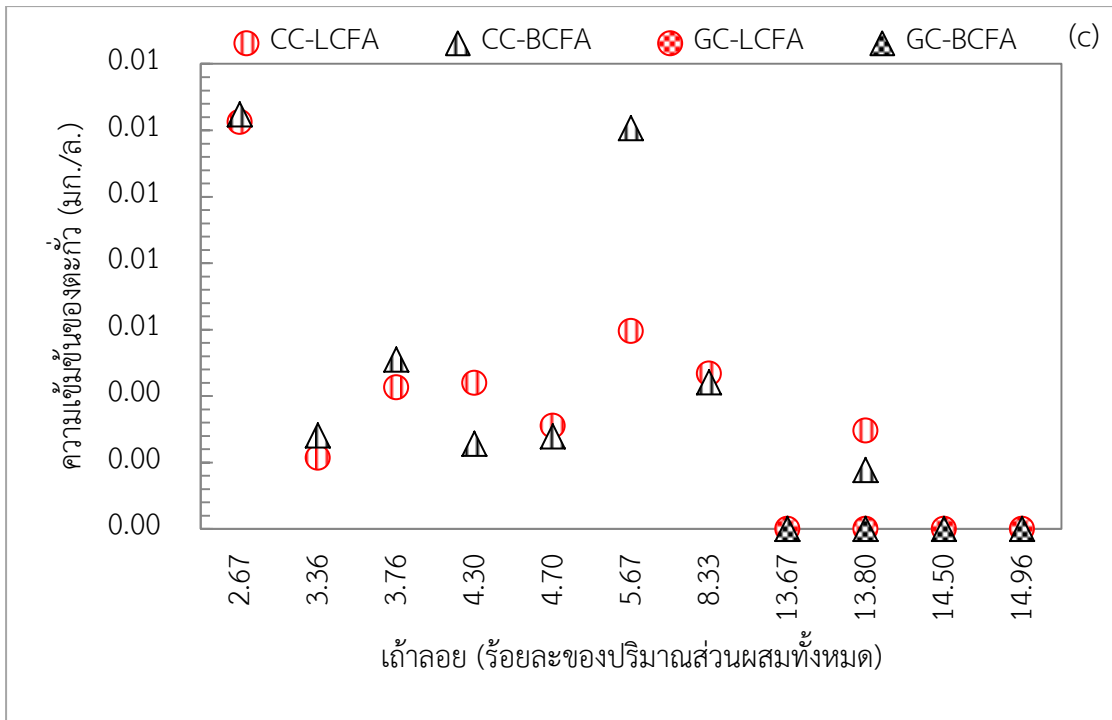
#### 4.4.3 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำกลั่น

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-9 พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคือตะกั่วและสังกะสีในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิแกนด์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่อาร์เซนิกถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิแกนด์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกและสังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิแกนด์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมและตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิแกนด์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-9 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำกลั่น

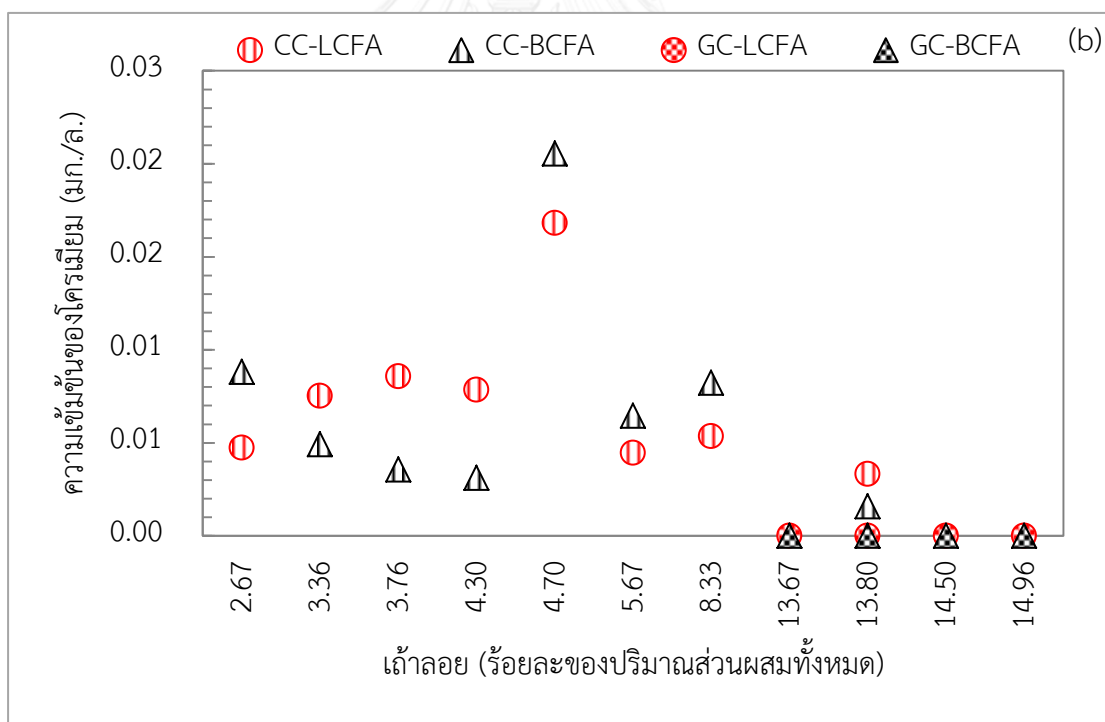
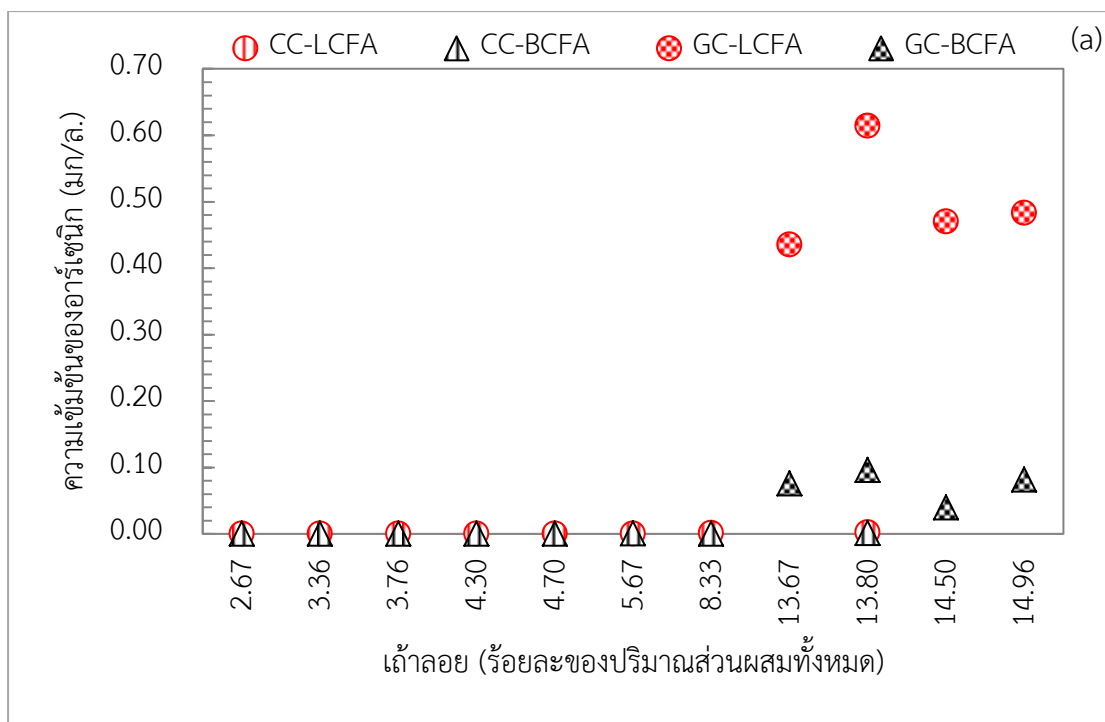


รูปที่ 4-9 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำกลั่น

#### 4.4.4 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

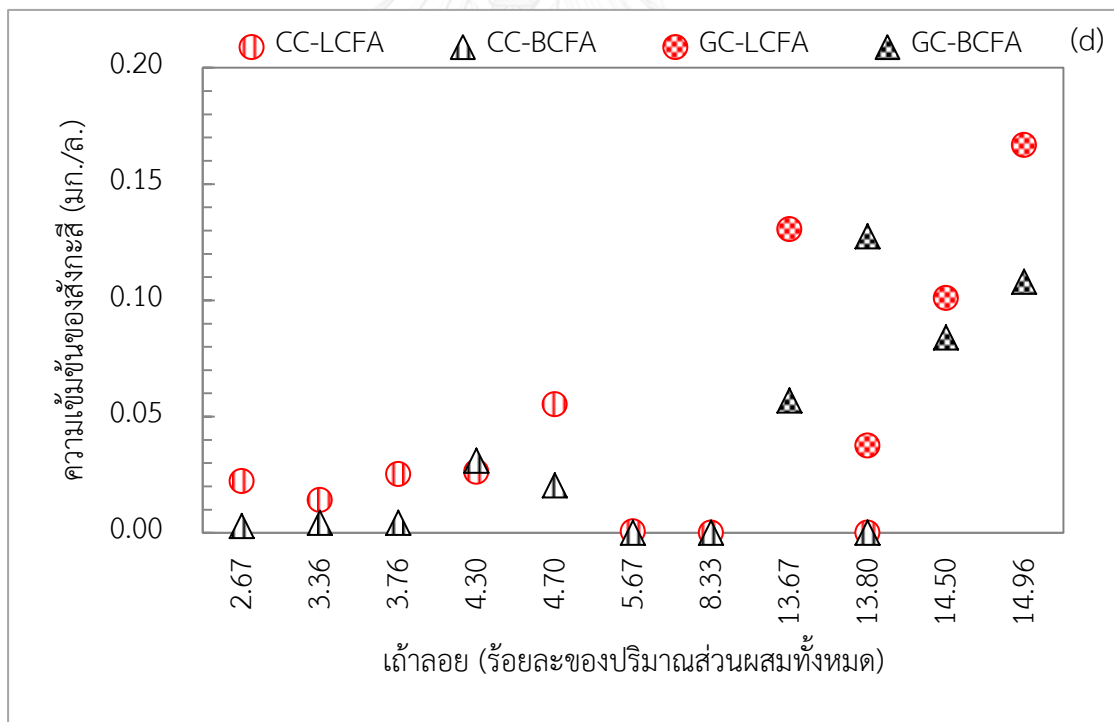
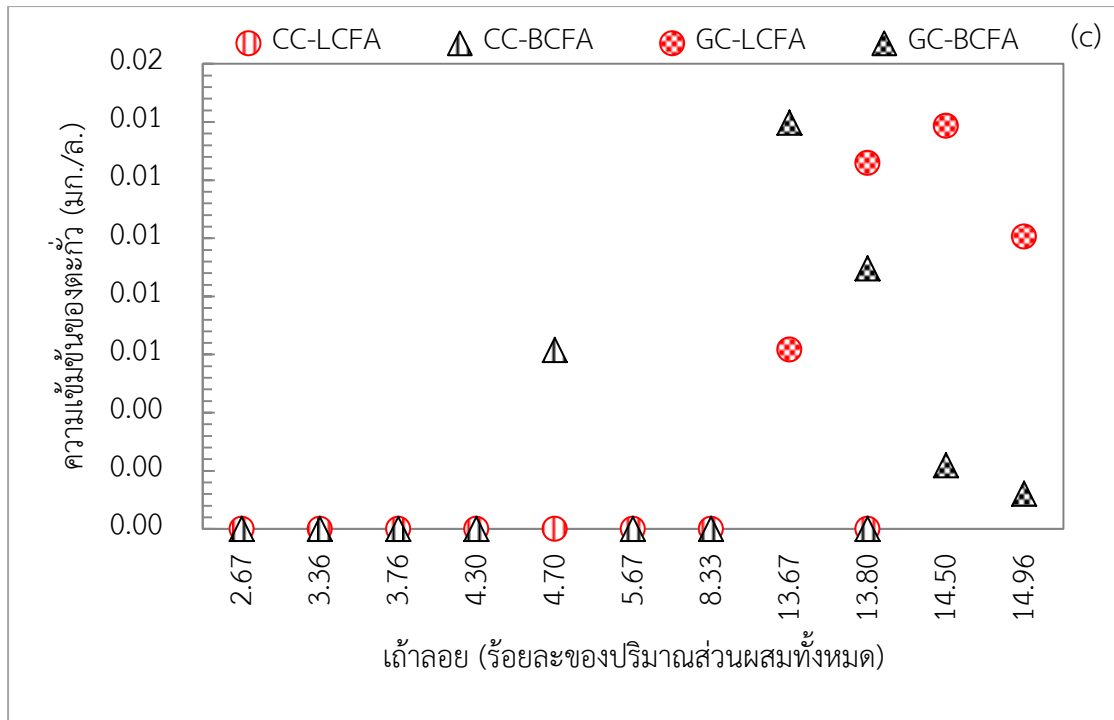
จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีแฉะลอย ปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 เป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-10 พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นใน คอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณ แฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียม และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อ ความเข้มข้นของอาร์เซนิกและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคือตะกั่วในคอนกรีตถูก ชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น และสังกะสีในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อ ใส่แฉะลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์หรือ บิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้น ของโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความ เข้มข้นของอาร์เซนิก ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอย บิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกและตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอย บิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอย ลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-10 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4



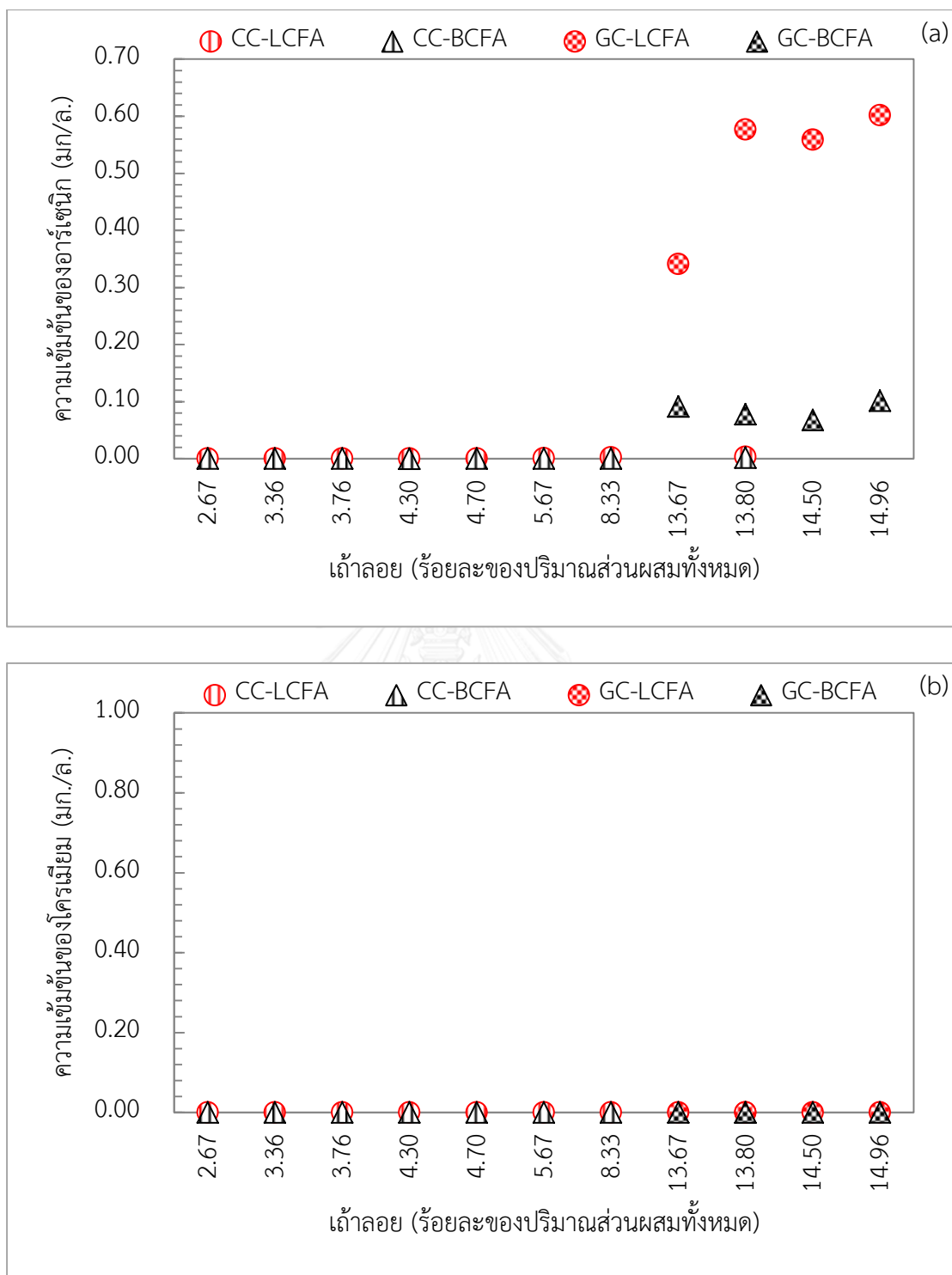


รูปที่ 4-10 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

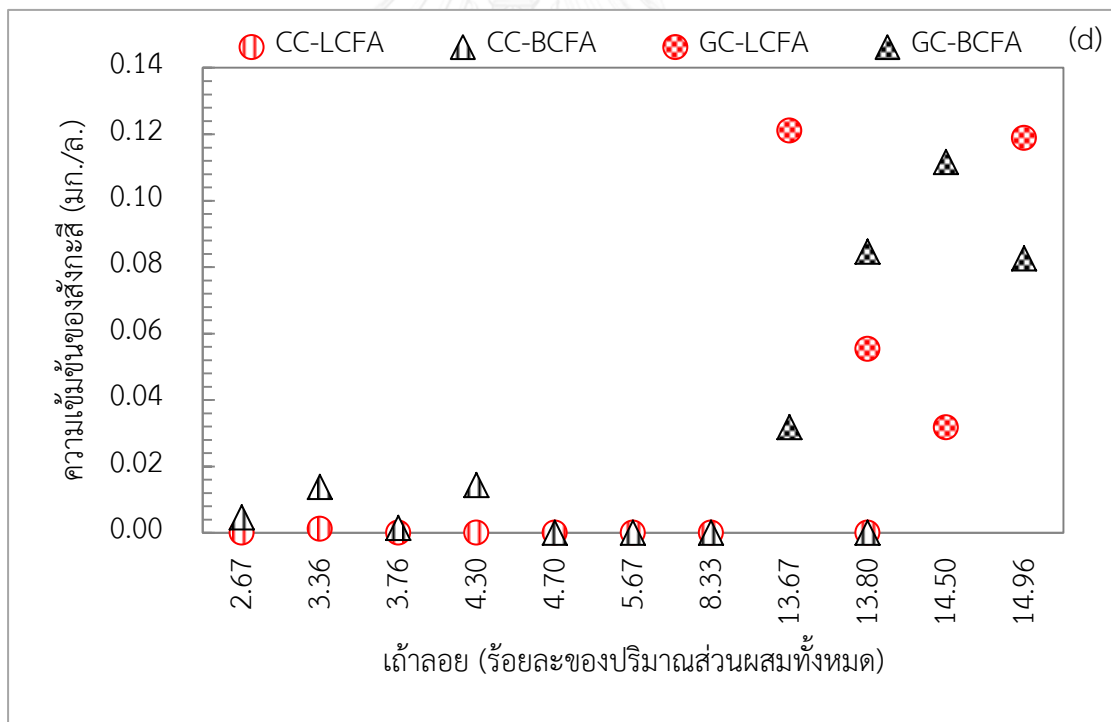
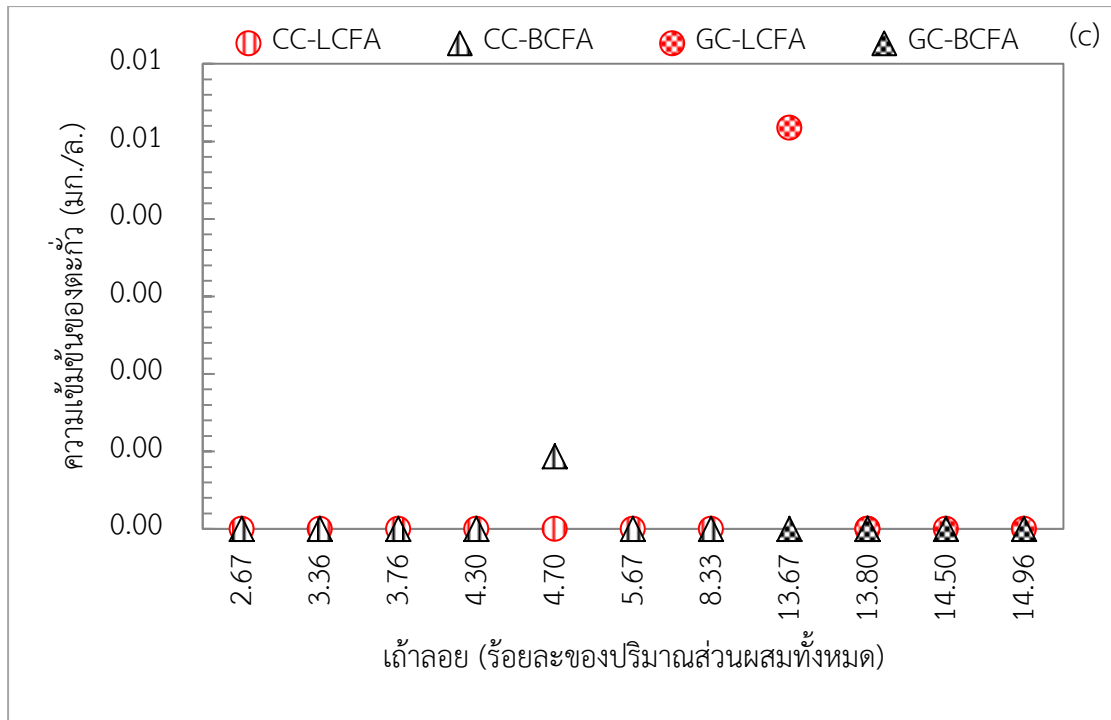
#### 4.4.5 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้ น้ำที่มีค่าพีเอช 6 เป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-11 พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคือตะกั่วในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น และโครเมียมในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่อาร์เซนิกถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณเถ้าลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกและสังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมและตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-11 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

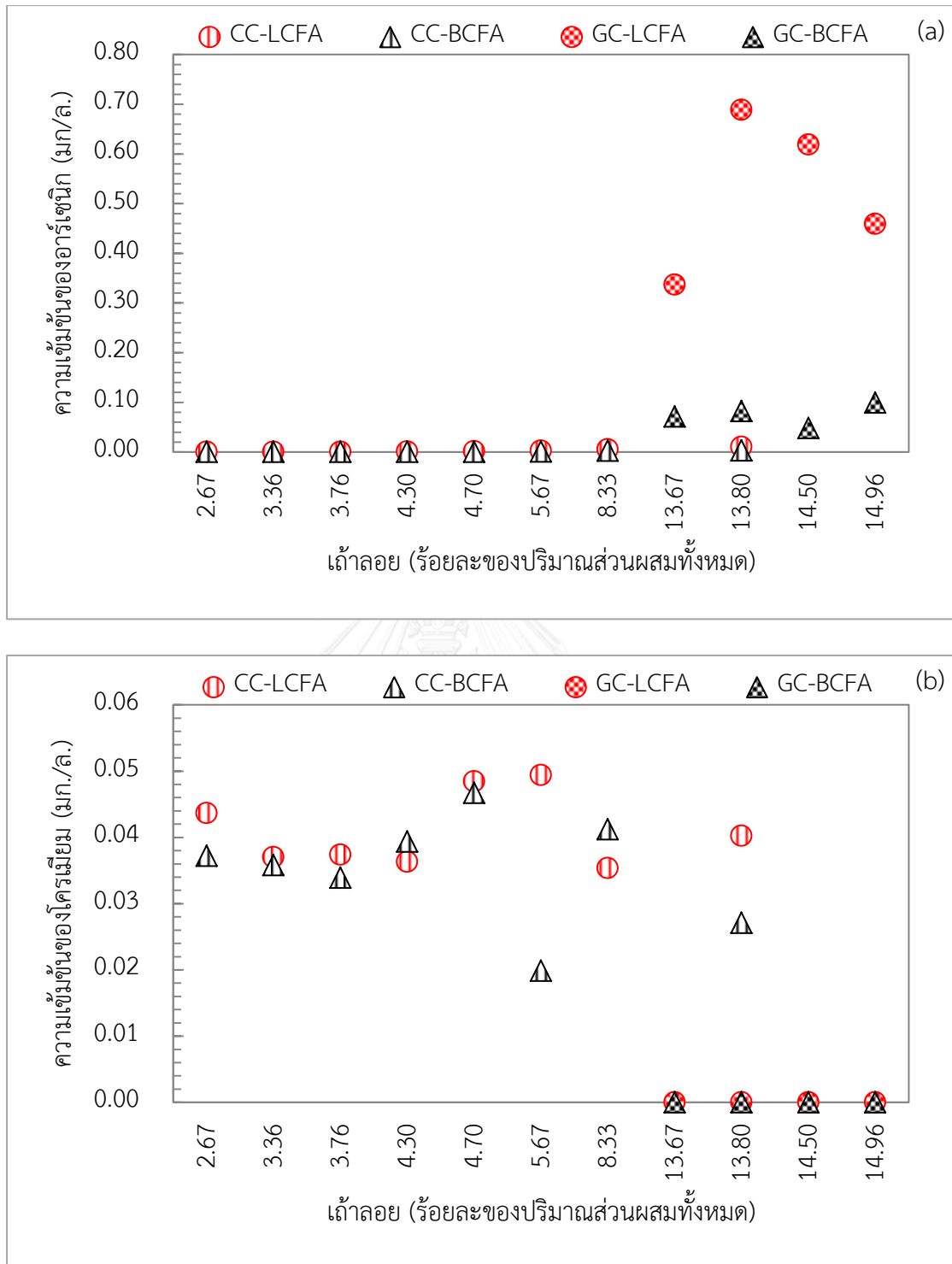


รูปที่ 4-11 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

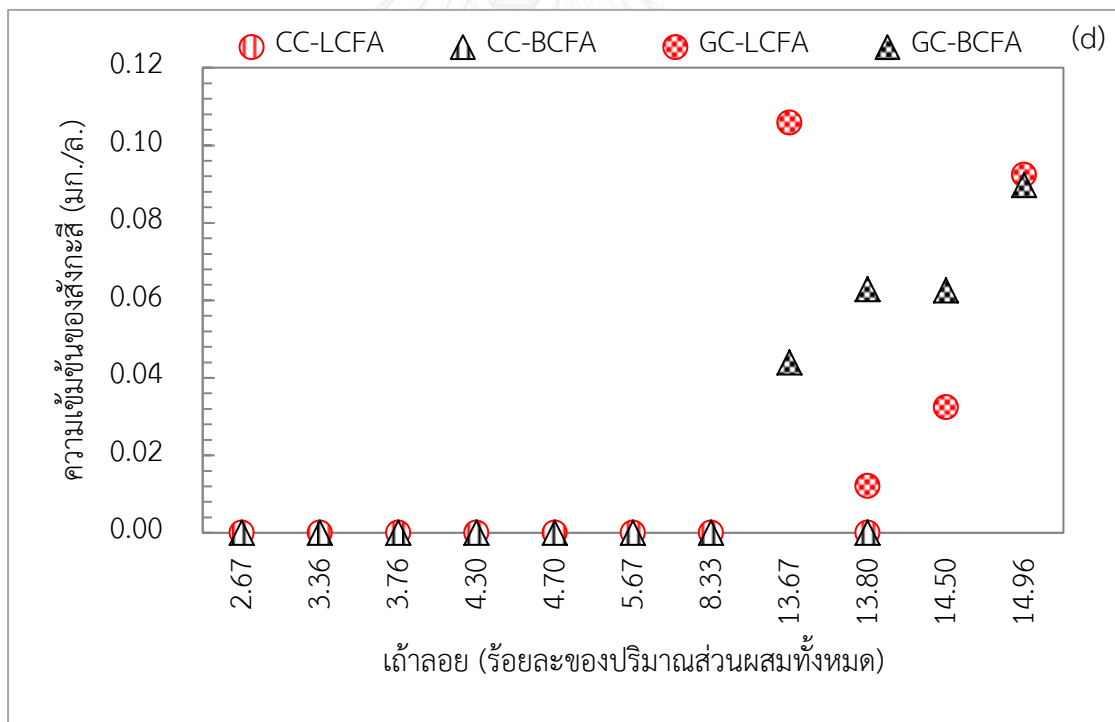
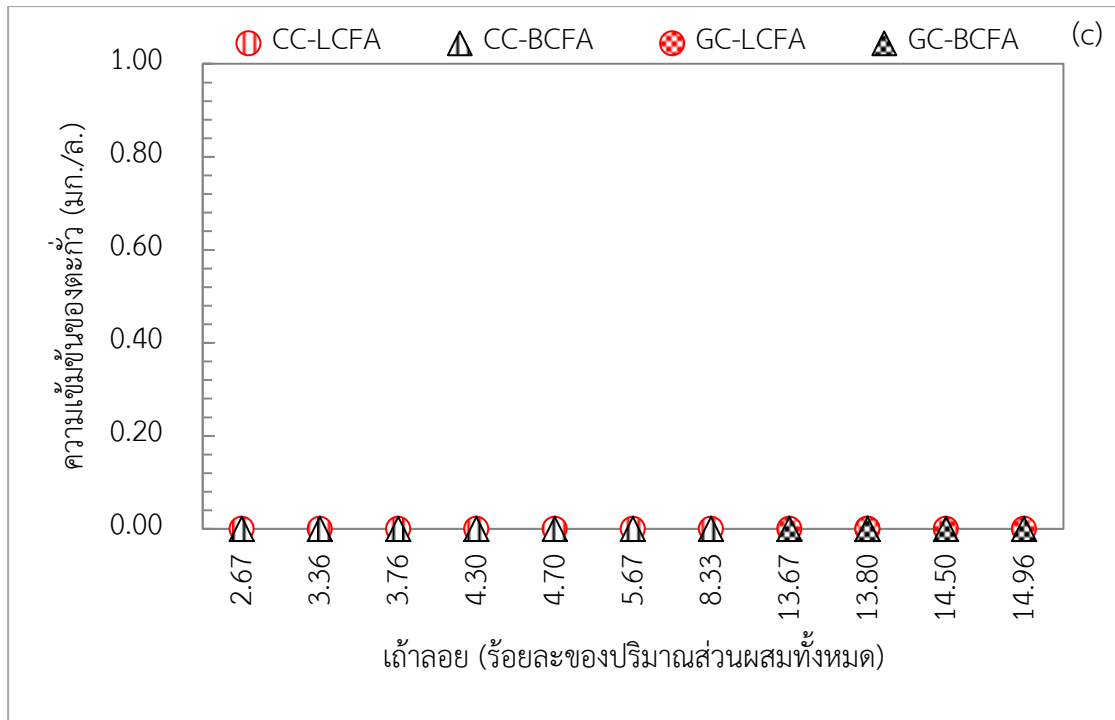
#### 4.4.6 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีแฉะลอย ปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้ น้ำที่มีค่าพีเอช 8 เป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-12 พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นใน คอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และ ปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ ส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิก ตะกั่ว และสังกะสี ในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้น ของอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอย บิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคือสังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์ใน ปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่อาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อ ใส่แฉะลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-12 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8



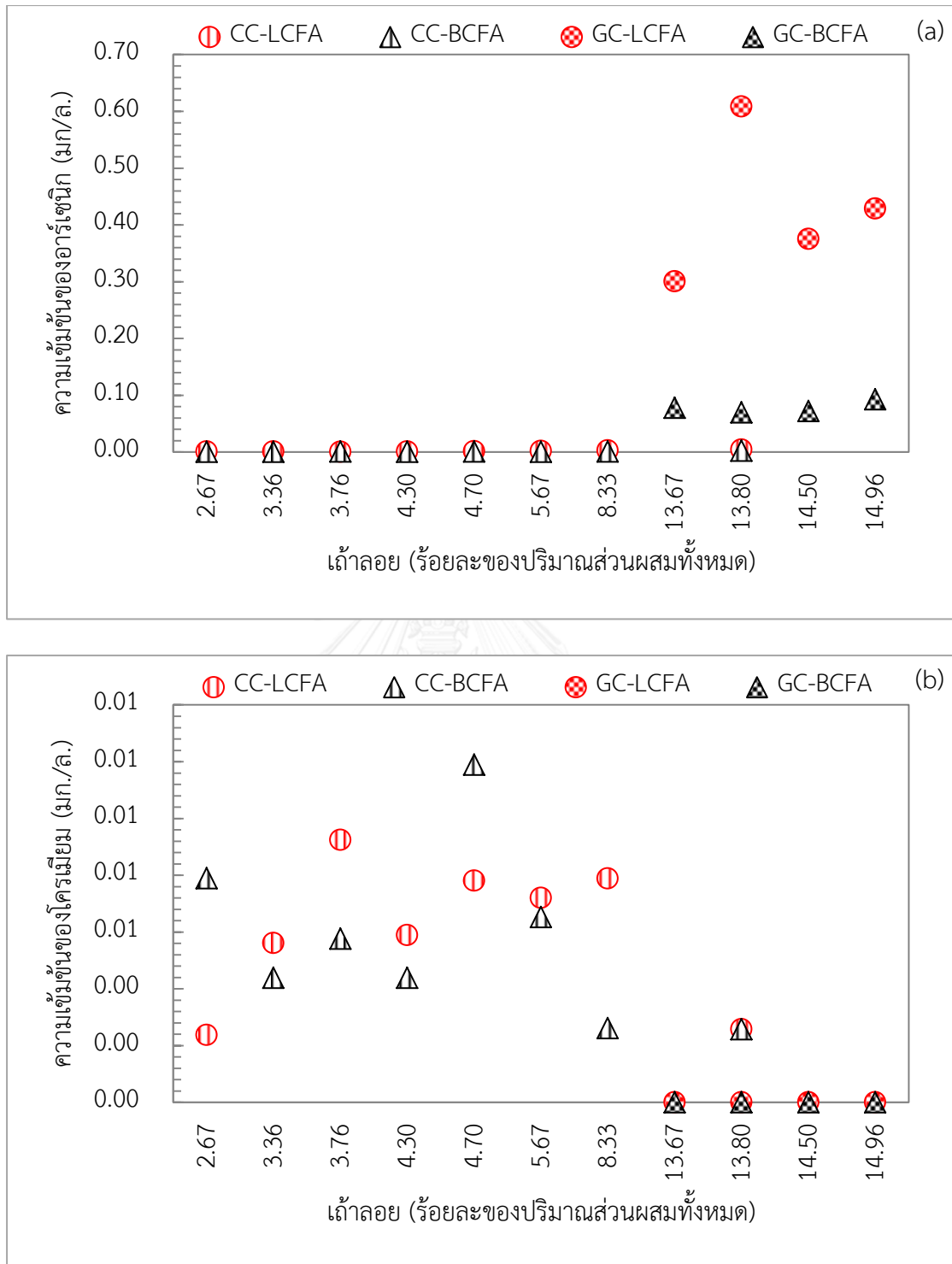
รูปที่ 4-12 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สตีโรล จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

#### 4.4.7 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

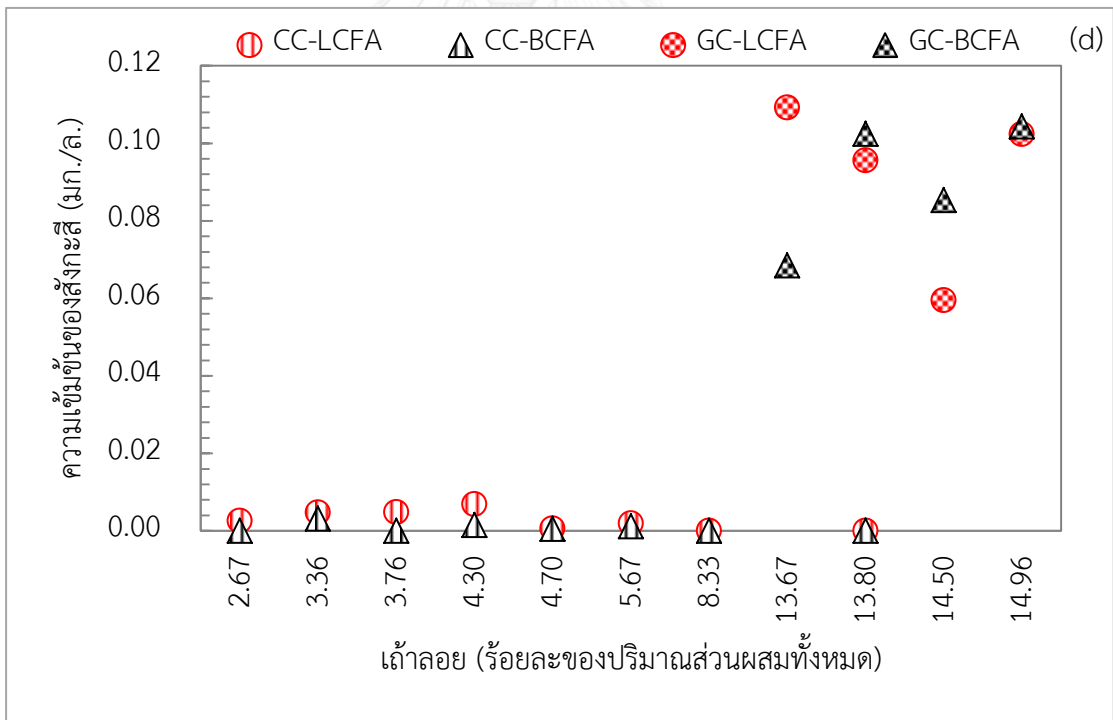
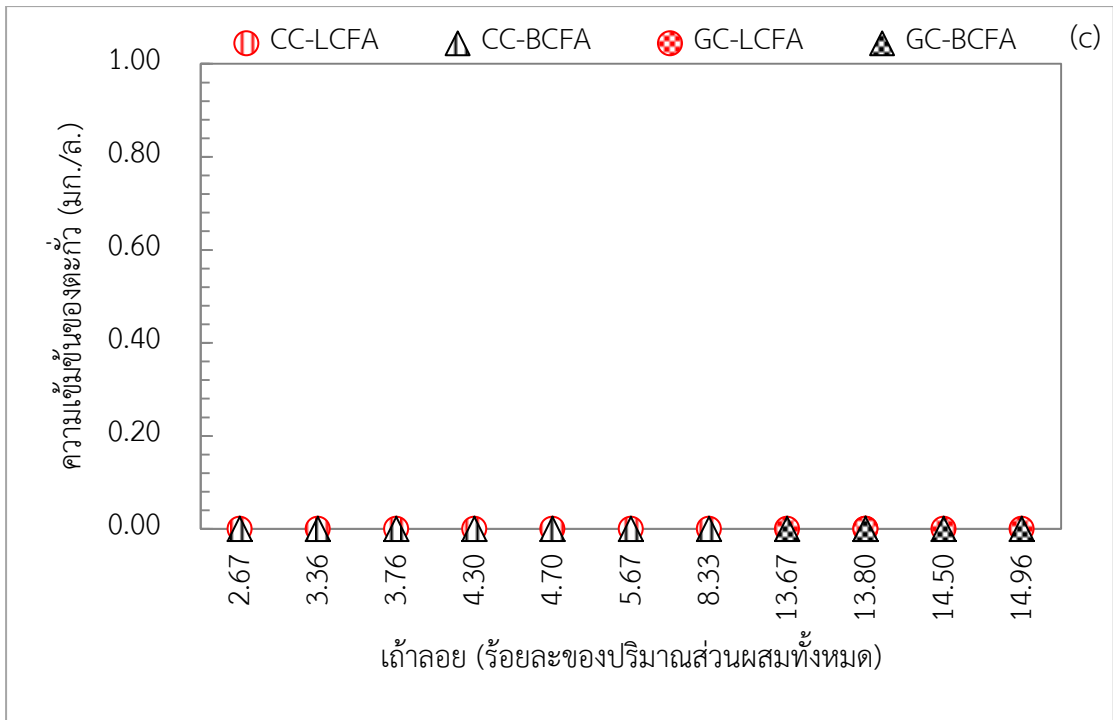
จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีแฉะลอย ปริมาณต่างๆ เป็นส่วนผสมด้วยวิธี TCLP ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 Method 1311 โดยใช้น้ำ ที่มีค่าพีเอช 10 เป็นสารชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4-13 พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นใน คอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่ เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิก และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อ ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกในคอนกรีตถูก ชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมในคอนกรีตถูกชะละลาย สูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้น ของอาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแฉะลอยบิทูมินัสที่ เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และปริมาณแฉะลอย บิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) กล่าวคืออาร์เซนิกในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอยลิกไนต์ใน ปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่โครเมียมและตะกั่วในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่แฉะลอย ลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น





รูปที่ 4-13 ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10



รูปที่ 4-13 (ต่อ) ผลการชะละลายโลหะหนักชนิด (a) อาร์เซนิก (b) โครเมียม (c) ตะกั่ว และ (d) สังกะสี จากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

จากผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยกรดอะซิติก น้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำกลั่น น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 จากผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสม (CC-LCFA) ผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสม (CC-BCFA) ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสม (GC-LCFA) และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสม (GC-BCFA) ในรูปที่ 4-7 ถึง 4-13 พบว่าผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสเป็นส่วนผสม และผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิทูมินัสเป็นส่วนผสม มีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดทุกน้ำชะละลาย หรืออยู่ในช่วงที่ปลอดภัย แต่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมมีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิกถูกชะออกมาสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดไว้ทุกน้ำชะละลาย (มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิกน้อยกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร) หรืออยู่ในช่วงที่ไม่ปลอดภัย และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-10

ยกตัวอย่างผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตด้วยกรดอะซิติก ในตารางที่ 4-10 หมายถึงอาร์เซนิกในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ตะกั่วในคอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น และอาร์เซนิกในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่สังกะสีในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกชะละลายสูงขึ้นเมื่อใส่เถ้าลอยบิทูมินัสในปริมาณเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-10 ผลกระทบของการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยน้ำชะละลายต่างๆ ต่อความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

น้ำชะละลาย	ผลิตภัณฑ์	โลหะหนัก			
		อาร์เซนิก	โครเมียม	ตะกั่ว	สังกะสี
กรดอะซิติก	CC-LCFA	✓		✓	
	CC-BCFA			✓	
	GC-LCFA	✓			
	GC-BCFA	✓			✓
น้ำฝนกรดสังเคราะห์	CC-LCFA	✓	✓	✓	
	CC-BCFA	✓			✓
	GC-LCFA		✓	✓	✓
	GC-BCFA	✓	✓	✓	
น้ำกลั่น	CC-LCFA	✓		✓	✓
	CC-BCFA	✓			
	GC-LCFA	✓	✓	✓	✓
	GC-BCFA		✓	✓	
พีเอช 4	CC-LCFA		✓	✓	
	CC-BCFA		✓		✓
	GC-LCFA		✓		
	GC-BCFA	✓	✓	✓	
พีเอช 6	CC-LCFA	✓		✓	
	CC-BCFA	✓	✓		
	GC-LCFA	✓	✓	✓	✓
	GC-BCFA		✓	✓	
พีเอช 8	CC-LCFA	✓		✓	✓
	CC-BCFA	✓		✓	✓
	GC-LCFA	✓	✓	✓	✓
	GC-BCFA	✓	✓	✓	
พีเอช 10	CC-LCFA		✓		
	CC-BCFA	✓	✓		
	GC-LCFA	✓	✓	✓	
	GC-BCFA		✓	✓	

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัย ข้อเสนอแนะ และความสัมพันธ์กับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักของเถ้าลอยจากถ่านหินประเภทลิกไนต์และบิทูมินัสด้วยวิธีย่อยสลาย (Microwave Digestor) ตามมาตรฐาน USEPA method 3051 และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน USEPA SW-856 method 1311 สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการชะละลายคือ กรดอะซิติก น้ำฝนกรดสังเคราะห์ น้ำกลั่น น้ำที่มีค่าพีเอช 4 6 8 และ 10 เพื่อจำลองสภาวะของการชะละลายในธรรมชาติ และนำเถ้าลอยดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ 2 ประเภท ได้แก่ คอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีต โดยแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา คือ (1) กรณีศึกษาการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เท่ากัน และ (2) กรณีศึกษาหาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทั้ง 2 ประเภทผ่านการทดสอบการชะละลายโลหะหนักตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดผ่านการทดสอบสมรรถนะตามมาตรฐานงานก่อสร้าง จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีผลต่อภาวะความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของเถ้าลอย

2) รูปแบบการชะละลายอาร์เซนิกของเถ้าลอยเชิงเดี่ยวคือออกซีแอนไอออนิก (oxyanionic) เป็นพฤติกรรมการป้องกันการดูดซับประจุลบ (anion) บนผิวของเถ้าลอยที่ภาวะความเป็นด่าง ส่งผลให้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำชะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นกรดและกลาง และมีค่าลดต่ำลงที่ภาวะความเป็นด่าง

3) รูปแบบการชะละลายโครเมียมและสังกะสีของเถ้าลอยเชิงเดี่ยวคือแอมโฟเทอริก (amphoteric) เป็นพฤติกรรมการชะละลายที่ถูกควบคุมด้วยโครเมียมและสังกะสีที่อยู่

ในรูปของออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ หรือกล่าวได้ว่าถูกควบคุมด้วยระดับความสามารถในการละลาย (solubility limit) จากการสลายตัวของโครเมียมและสังกะสีที่อยู่ในรูปของออกไซด์และหรือไฮดรอกไซด์ในภาวะความเป็นกรดและต่าง ส่งผลให้ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นกรดและต่าง และมีค่าลดต่ำลงที่ภาวะความเป็นกลาง

4) การชะละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมบนผิวของแก้วลอย กล่าวคือ แคลเซียมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของแก้วลอยในภาวะความเป็นต่าง ส่งผลให้ความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ภาวะความเป็นกรดและกลาง และมีค่าลดต่ำลงที่ภาวะความเป็นต่าง

5) น้ำชะละลายแต่ละประเภทส่งผลให้ความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิก โครเมียม และสังกะสีในน้ำชะที่พีเอชต่างๆ มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนด ยกเว้นตะกั่วในแก้วลอยลิกไนต์ถูกชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดทุกพีเอช (0.20, 0.81, 0.80 และ 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) สำหรับการใช้อกรตะขิดิกเป็นสารเคมีในการชะละลาย อาร์เซนิก โครเมียม และตะกั่วในแก้วลอยลิกไนต์ถูกชะละลายสูงกว่าที่มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนด (3.54, 1.95 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ยกเว้นสังกะสีที่ถูกชะละลายต่ำกว่า (4.55 มิลลิกรัมต่อลิตร) สำหรับการใช้น้ำกลั่นและน้ำฝนกรดสังเคราะห์เป็นสารเคมีในการชะละลาย โลหะหนักถูกชะละลายในปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดไว้ทุกชนิดโลหะหนัก

6) แก้วลอยลิกไนต์มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ปริมาณสูง จึงมีผลต่อโครงสร้างผลึกและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ขณะที่แก้วลอยบิโทมินส์มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณสูง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเมื่อผสมกับสารละลายต่าง ส่งผลให้คอนกรีตที่มีแก้วลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าคอนกรีตที่มี

เถ้าลอยบิพูนินัสเป็นส่วนผสม ขณะที่จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยบิพูนินัสเป็นส่วนผสมสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสม

7) สามารถนำเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 60 โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 4.30 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด และสามารถใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปูซโกลานร่วมกับสารละลายต่างในงานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตได้ โดยปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมคือร้อยละ 13.67 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ผลผลิตทั้งหมด 2 ประเภทมีกำลังรับแรงอัด 230 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

8) ปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิก โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสีถูกชะออกมาจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตต่ำกว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากเถ้าลอยเชิงเดี่ยว และต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดหรืออยู่ในช่วงที่ปลอดภัย ยกเว้นผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมมีปริมาณโลหะหนักชนิดอาร์เซนิกถูกชะออกมาสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดไว้ทุกน้ำชะละลาย หรืออยู่ในช่วงที่ไม่ปลอดภัย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ประเมินราคาผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพื่อเปรียบเทียบกับราคาตลาด

5.2.2 ทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมโดยใช้แบบหล่ออิฐบล็อกรูปตัวหนอน เพื่อจำลองสภาวะจริงในการศึกษา

5.2.3 ทดลองนำเถ้าลอยจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงประเภทอื่น เช่น ขยะมูลฝอย มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต

5.2.4 วัดพีเอชของน้ำชะผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตระหว่างบ่มแห้งและหลังบ่มแห้งในขั้นตอนการทดสอบหาความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ เพื่อรายงานผลเป็นพีเอชของน้ำชะเริ่มต้นและพีเอชของน้ำชะสุดท้ายในผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์ด้วยพีเอชต่างๆ

### 5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

5.3.1 สามารถนำเถ้าลอยซึ่งเป็นของเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย

5.3.2 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นคอนกรีตที่ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม จึงเป็นอีกหนี่งทางที่ช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจก อันเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน

5.3.3 สามารถลดปัญหาค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการทำหลุมฝังกลบเถ้าลอยด้วยการลดปริมาณเถ้าลอยหรือของเสียที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด โดยใช้หลักการของ 3Rs ด้านรีไซเคิล





## รายการอ้างอิง

### อ้างอิงภาษาอังกฤษ

- Akbari, H., Mensah-Biney, R., & Simms, J. (2015). Production of Geopolymer Binder from Coal Fly Ash to Make Cement-less Concrete.
- Aleem, M. A., & Arumairaj, P. (2012). Optimum mix for the geopolymer concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(3), 2299-2301.
- Asavapisit, S., & Chotklang, D. (2004). Solidification of electroplating sludge using alkali-activated pulverized fuel ash as cementitious binder. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 349-353.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246.
- Bezerra, U., Martinelli, A., Melo, D., Melo, M., & Oliveira, V. (2011). The strength retrogression of special class Portland oilwell cement. *Ceramica*, 57(342), 150-154.
- Brandt, A. M. (2009). *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance, Second Edition*: Taylor & Francis.
- Chai, J.-C., Onitsuk, K., & Hayashi, S. (2009). Cr(VI) concentration from batch contact/tank leaching and column percolation test using fly ash with additives. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 67-73.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., & Cao, T. (2010). High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), 264-270.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1534-1541.
- Davidovits, J. (1979). Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. *SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center*, 151-154.

- Davidovits, J. (1994). Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. *World Resource Review*, 6 No.2, 263-298.
- Davidovits, J. (2002). *30 years of successes and failures in geopolymers applications. Market trends and potential breakthroughs*. Paper presented at the Keynote Conference on Geopolymer Conference.
- Davidovits, J., & Orlinski, J. (1999). *Geopolymer: Second International Conference*: Geopolymer Institute.
- Dermatas, D., & Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology*, 70(3-4), 377-394.
- Dijkstra, J. J., van der Sloot, H. A., & Comans, R. N. (2006). The leaching of major and trace elements from MSWI bottom ash as a function of pH and time. *Applied Geochemistry*, 21(2), 335-351.
- Fruchter, J. S., Rai, D., & Zachara, J. M. (1990). Identification of solubility-controlling solid phases in a large fly ash field lysimeter. *Environmental Science & Technology*, 24(8), 1173-1179.
- Gitari, M., Fatoba, O., Nyamihingura, A., Petrik, L., Vadapalli, V., Nel, J., Mahlaba, J. (2009). *Chemical weathering in a dry ash dump: an insight from physicochemical and mineralogical analysis of drilled cores*. Paper presented at the World of Coal Ash (WOCA) Conference in Lexington, KY, USA.
- Glukhovskiy, V., Rostovskaja, G., & Rumyna, G. (1980). High strength slag alkaline cements. *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement*, 164-168.
- Grosse, C. U. (2007). *Advances in Construction Materials 2007*: Springer Berlin Heidelberg.
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.
- Hardjito, D. (2005). *Studies of fly ash-based geopolymer concrete*.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 101(6), 467-472.

- Hassett, D. J., Pflughoeft-Hassett, D., & McCarthy, G. (1991). *Ettringite formation in coal ash as a mechanism for stabilization of hazardous trace elements*. Paper presented at the ANNUAL INTERNATIONAL PITTSBURGH COAL CONFERENCE.
- Hoy, M., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2016). Recycled asphalt pavement – fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations. *Science of The Total Environment*, 573, 19-26.
- Huang, C.-H., Lin, S.-K., Chang, C.-S., & Chen, H.-J. (2013). Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, 46, 71-78.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729-746.
- Komonweeraket, K., Cetin, B., Aydilek, A. H., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2015). Effects of pH on the leaching mechanisms of elements from fly ash mixed soils. *Fuel*, 140, 788-802.
- Komonweeraket, K., Cetin, B., Benson, C. H., Aydilek, A. H., & Edil, T. B. (2015). Leaching characteristics of toxic constituents from coal fly ash mixed soils under the influence of pH. *Waste Management*, 38, 174-184.
- Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4095-4104.
- Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*: ASTM.
- Lee, M.-K., & Saunders, J. A. (2003). Effects of pH on metals precipitation and sorption. *Vadose Zone Journal*, 2(2), 177-185.
- Lieberman, R. N., Anker, Y., Font, O., Querol, X., Mastai, Y., Knop, Y., & Cohen, H. (2015). Potential of Hazardous Waste Encapsulation in Concrete Compound

Combination with Coal Ash and Quarry Fine Additives. *Environmental science & technology*.

- Malhotra, V. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. *Concrete International*, 24(7), 30-34.
- McCarthy, M., & Dhir, R. (2005). Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel*, 84(11), 1423-1432.
- Mulugeta, M., Engelsen, C. J., Wibetoe, G., & Lund, W. (2011). Charge-based fractionation of oxyanion-forming metals and metalloids leached from recycled concrete aggregates of different degrees of carbonation: a comparison of laboratory and field leaching tests. *Waste Management*, 31(2), 253-258.
- Naik, T. R., & Ramme, B. W. (1989). High early strength concrete containing large quantities of fly ash. *ACI Mater. J*, 86(2), 111-116.
- Nawy, E. G. (2008). *Concrete Construction Engineering Handbook*: CRC Press.
- Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2016). *Handbook of Low Carbon Concrete*: Elsevier Science.
- Nida Chaimoon, & Krit Chaimoon. (2014). ALKALI-ACTIVATED BINDERS/GEOPOLYMER AND AN APPLICATION TO ENVIRONMENTAL ENGINEERING. *Public Knowledge Project*, 41, 263-270.
- Nipatsat, N., & Tangtermsirikul, S. (2000). Compressive strength prediction model for fly ash concrete. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 5(1), 1-7.
- Odler, I. (1998). Hydration, setting and hardening of Portland cement. *LEA's Chemistry of Cement and Concrete*, 4, 241-297.
- Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Criado, M. (2004). "Geopolymers": same basic chemistry, different microstructures. *Materiales de Construcción*, 54(275), 77-91.
- Palomo, A., Grutzeck, M., & Blanco, M. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329.



- Wang, S., Baxter, L., & Fonseca, F. (2008). Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis. *Fuel*, 87(3), 372-379.
- Wang, T. (2007). The leaching behavior of arsenic, selenium and other trace elements in coal fly ash.
- Worawanchai Saiwarin, Chuwit Napia, & Theerawat Sinsiri. (2014). The study of leaching of heavy metals contaminant in cement pastes containing bagasse ashes *KKU ENGINEERING JOURNAL*, 41, 181.
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., & Zha, J. (2009). Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989-996.



## อ้างอิงภาษาไทย

- กรมทรัพยากรธรณี. (2544). ธรณีวิทยาประเทศไทย เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว  
เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 6 รอบ 5 ธันวาคม 2542.  
กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง  
จำกัด.
- ทิพย์รัตน์ หาญสืบสาย. (2544). แก๊วลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและ  
สิ่งแวดล้อม. นนทบุรี: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- ชนันพร ญาวิลาศ สุวิมล อัครพิศิษฐ์ และรุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์. (2558). สมบัติของก้อนของเสียหล่อ  
แข็งจากจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากแก๊วลอยปิทมินัส. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา  
แห่งชาติ “วิศวกรรมโยธากับการก้าวเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน” (NCCE) ครั้งที่ 20.
- นางแสงโฉม เกิดคล้าย และ นางศิรินุช ชื่นอินมณู. (2004). สรุปรายงานการเฝ้าระวังโรค ๒๕๔๗  
(*Annual Epidemiological Surveillance Report 2004*).
- ประจित จีร์ปภา. (2523). การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ของซีเมนต์จากการเผาถ่านหินแม่เมาะใน  
โรงไฟฟ้า: การประชุมวิชาการเทคโนโลยีเหมาะสม เพื่อการพัฒนาชนบท  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552). การพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากถ่านกลบ. กรุงเทพฯ: สำนักงาน  
พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). แก๊วลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). ขอนแก่น: ศูนย์วิจัยและ  
พัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ อินทรชัย หอวิจิตร และเฉลิมพล พิณรัตน์. (2527). การศึกษาปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แก๊วลอย, การประชุมวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย  
ไทยครั้งที่ 10, 25 – 27 ตุลาคม 2527. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, บทความที่ F17.
- พรชัย แสงอังศุมาลี. (2554). ดินกระจายตัว (*Dispersive Soil*).
- พิชัย นิमितยงสกุล กิตติพุดิ เปล่งขำ และสุรศักดิ์ พานิชานาวา. (2546). เทคนิคและวิธีการผลิตคอนกรีต  
กำลังสูงในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

- วรวรรณชัย สายวาริน. (2556). การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสม  
เถ้าซีวมวล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรม  
โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิจิตต์อัจฉรา สรรพกิจจำนง ณรงค์ชัย จันทาวงษ์ เลิศ พัดฉวี และสมหวัง โสมนินทร์. (2545). การ  
ก่อสร้างและประเมินความแข็งแรงของผิวถนนคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยวิธีบดอัด.  
กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.
- ศศิธร สิงห์เสริมวงษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. (2560). การใช้ประโยชน์ของเสียจากอุตสาหกรรม  
และเกษตรกรรมในการลดการชะละลายโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่เหมือง.  
*Thai Journal of Science and Technology*, 6(1), 60-71.
- ศักรินทร์ เหลืองกำจร. (2556). วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Material). สมาคมคอนกรีตแห่ง  
ประเทศไทย, 3-6.
- สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล. (2542). การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย. กรุงเทพฯ: วิศวกรรม  
สถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.).
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2532). มอก. 80 เล่ม 1 - 2532 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ.







## ก-1 ปริมาณความชื้น

ประเภท ถ้ำลอย	น้ำหนักถ้ำและ ถ้ำลอยหลังอบ	น้ำหนัก ถ้ำเปล่า	น้ำหนักถ้ำลอย หลังอบ	น้ำหนักถ้ำลอย ก่อนอบ	ปริมาณ ความชื้น	เฉลี่ยปริมาณ ความชื้น
BCFA 1	71.8364	70.8318	1.0046	1.0083	0.37	
BCFA 2	78.4983	77.4955	1.0028	1.0048	0.20	0.29
BCFA 3	77.8633	76.8635	0.9998	1.0029	0.31	
LCFA 1	76.9412	75.9344	1.0068	1.0093	0.25	
LCFA 2	75.6915	74.6905	1.0010	1.0032	0.22	0.24
LCFA 3	76.8907	75.8926	0.9981	1.0006	0.25	

## ก-2 การสูญเสียน้ำหนักของถ้ำลอยเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI)

ประเภท ถ้ำลอย	น้ำหนักถ้ำและ ถ้ำลอยหลังเผา	น้ำหนัก ถ้ำเปล่า	น้ำหนักถ้ำลอย หลังเผา	น้ำหนักถ้ำลอย ก่อนเผา	ค่า LOI	เฉลี่ยค่า LOI
BCFA 1	81.3104	80.3457	0.9647	1.0106	4.54	
BCFA 2	83.0757	82.1215	0.9542	1.0000	4.58	0.29
BCFA 3	80.1880	79.2115	0.9765	1.0194	4.21	
LCFA 1	51.6180	50.6333	0.9847	1.0002	1.55	
LCFA 2	52.6655	51.6703	0.9952	1.0075	1.22	0.24
LCFA 3	51.1164	50.1266	0.9898	1.0003	1.05	

## ก-3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชของถ้ำลอย

ประเภทถ้ำลอย	พีเอช
BCFA	9.8
LCFA	12.63



ข-1 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0008	3.4091	2.0400	0.3850	4.6900		68.127	40.767	7.694	93.725
	1.0052	3.7004	1.9700	0.4200	4.4200	0.02	73.949	39.369	8.393	88.329
	1.0031	3.5116	1.8400	0.4070	4.5500		70.176	36.771	8.133	90.927
	MEAN	3.5404	1.9500	0.4040	4.5533	MEAN	70.751	38.969	8.074	90.994
	SD	0.1478	0.1015	0.0177	0.1350	SD	2.953	2.028	0.354	2.698
	RSD	4.1737	5.2046	4.3792	2.9655	RSD	4.174	5.205	4.379	2.966
BCFA	1.0001	0.1967	0.1340	0.0879	2.2300		3.934	2.680	1.758	44.596
	1.0040	0.2035	0.1420	0.0983	2.6800	0.02	4.070	2.840	1.966	53.595
	1.0021	0.2106	0.1360	0.0940	2.2400		4.212	2.720	1.880	44.796
	MEAN	0.2036	0.1373	0.0934	2.3833	MEAN	4.072	2.746	1.868	47.662
	SD	0.0070	0.0042	0.0052	0.2570	SD	0.139	0.083	0.105	5.139
	RSD	3.4138	3.0316	5.5952	10.782	RSD	3.414	3.032	5.595	10.782

ข-2 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้ฝนกรดสังเคราะห์เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0046	0.0094	0.0946	0.0503	0.5500		0.187	1.883	1.001	10.950
	1.0013	0.0092	0.1438	0.0594	0.5925	0.02	0.183	2.863	1.183	11.796
	1.0018	0.0088	0.1563	0.0610	0.5738		0.175	3.112	1.214	11.423
	MEAN	0.0091	0.1316	0.0569	0.5721	MEAN	0.182	2.619	1.133	11.390
	SD	0.0003	0.0326	0.0058	0.0213	SD	0.006	0.649	0.115	0.424
	RSD	3.3449	24.792	10.143	3.7233	RSD	3.345	24.792	10.143	3.723
BCFA	1.0026	0.0672	0.0448	0.0446	0.1600		1.341	0.894	0.890	3.192
	1.0035	0.0832	0.0483	0.0424	0.1188	0.02	1.660	0.963	0.846	2.370
	1.0036	0.0874	0.0485	0.0413	0.1763		1.743	0.967	0.824	3.517
	MEAN	0.0793	0.0472	0.0428	0.1517	MEAN	1.581	0.942	0.853	3.026
	SD	0.0107	0.0021	0.0017	0.0296	SD	0.213	0.042	0.034	0.591
	RSD	13.447	4.4086	3.9289	19.535	RSD	13.447	4.409	3.929	19.535

ข-3 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0031	0.0093	0.0443	0.0329	0.3213		0.185	0.883	0.656	6.406
	1.0039	0.0297	0.0465	0.0409	0.3113	0.02	0.592	0.927	0.815	6.207
	1.0012	0.0088	0.0640	0.0384	0.5413		0.175	1.276	0.766	10.793
	MEAN	0.0159	0.0516	0.0374	0.3913	MEAN	0.318	1.029	0.746	7.802
	SD	0.0119	0.0108	0.0041	0.1300	SD	0.238	0.215	0.082	2.592
	RSD	74.842	20.920	10.943	33.222	RSD	74.842	20.920	10.943	33.223
BCFA	1.0049	0.0728	0.0035	0.0261	0.0553		1.449	0.070	0.519	1.101
	1.0011	0.0766	0.0004	0.0273	0.0589	0.02	1.525	0.008	0.543	1.172
	1.0028	0.0754	0.0003	0.0258	0.0781		1.501	0.006	0.513	1.554
	MEAN	0.0749	0.0014	0.0264	0.0641	MEAN	1.491	0.028	0.525	1.276
	SD	0.0019	0.0018	0.0008	0.0123	SD	0.039	0.036	0.016	0.244
	RSD	2.5923	129.95	3.0065	19.122	RSD	2.592	129.95	3.007	19.122

ข-4 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้ น้ำที่มีค่าพีเอช 4 เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0048	0.0498	0.0499	0.0697	0.1850		0.991	0.993	1.387	3.682
	1.0063	0.1110	0.0852	0.3340	0.8660	0.02	2.209	1.696	6.648	17.237
	1.0125	0.2170	0.0591	0.7350	0.7140		4.319	1.176	14.630	14.212
	MEAN	0.1259	0.0647	0.3796	0.5883	MEAN	2.507	1.288	7.555	11.710
	SD	0.0846	0.0183	0.3350	0.3575	SD	1.684	0.364	6.668	7.115
	RSD	67.174	28.288	88.253	60.759	RSD	67.174	28.288	88.254	60.760
BCFA	1.0067	0.0630	0.0000	0.0000	0.0000		1.252	0.000	0.000	0.000
	1.0562	0.0627	0.0000	0.0000	0.0000	0.02	1.246	0.000	0.000	0.000
	1.0167	0.0903	0.0000	0.0000	0.0000		1.794	0.000	0.000	0.000
	MEAN	0.0720	0.0000	0.0000	0.0000	MEAN	1.430	0.000	0.000	0.000
	SD	0.0158	0.0000	0.0000	0.0000	SD	0.315	0.000	0.000	0.000
	RSD	22.012	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	RSD	22.012	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

ข-5 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้น้ำที่มีค่าพีเอช 6 เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0032	0.2080	0.0467	0.6880	0.2000		4.147	0.931	13.716	3.987
	1.0017	0.3100	0.0430	0.8860	0.3780	0.02	6.180	0.857	17.663	7.536
	1.0107	0.3210	0.0394	0.8150	0.1110		6.400	0.785	16.248	2.213
	MEAN	0.2797	0.0430	0.7963	0.2297	MEAN	5.575	0.858	15.876	4.579
	SD	0.0623	0.0037	0.1003	0.1359	SD	1.242	0.073	2.000	2.710
	RSD	22.279	8.4821	12.596	59.194	RSD	22.280	8.482	12.597	59.194
BCFA	1.0341	0.0758	0.0000	0.0000	0.0001		1.466	0.000	0.000	0.003
	1.0024	0.0984	0.0000	0.0000	0.0088	0.02	1.903	0.000	0.000	0.169
	1.0087	0.0931	0.0000	0.0000	0.0000		1.801	0.000	0.000	0.000
	MEAN	0.0891	0.0000	0.0000	0.0030	MEAN	1.723	0.000	0.000	0.057
	SD	0.0118	0.0000	0.0000	0.0050	SD	0.229	0.000	0.000	0.097
	RSD	13.264	#DIV/0!	#DIV/0!	169.42	RSD	13.265	#DIV/0!	#DIV/0!	169.42

ข-6 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้น้ำที่มีค่าพีเอช 8 เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0051	0.3240	0.0407	0.7920	0.0431		6.447	0.810	15.760	0.858
	1.0000	0.3480	0.0353	0.8680	0.0836	0.02	6.925	0.702	17.272	1.664
	1.0600	0.3130	0.0204	0.7610	0.1910		6.228	0.406	15.143	3.801
	MEAN	0.3283	0.0321	0.8070	0.1059	MEAN	6.533	0.639	16.058	2.107
	SD	0.0179	0.0105	0.0551	0.0764	SD	0.356	0.209	1.096	1.521
	RSD	5.4511	32.719	6.8221	72.172	RSD	5.451	32.720	6.822	72.172
BCFA	1.0139	0.1060	0.0000	0.0060	0.0000		2.091	0.000	0.119	0.000
	1.0049	0.1140	0.0000	0.0123	0.0057	0.02	2.249	0.000	0.243	0.113
	1.0072	0.1140	0.0000	0.0205	0.0076		2.249	0.000	0.404	0.150
	MEAN	0.1113	0.0000	0.0129	0.0044	MEAN	2.196	0.000	0.255	0.087
	SD	0.0046	0.0000	0.0073	0.0039	SD	0.091	0.000	0.143	0.078
	RSD	4.1486	#DIV/0!	56.114	89.137	RSD	4.149	#DIV/0!	56.114	89.137

ข-7 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธี TCLP โดยใช้ น้ำที่มีค่าพีเอช 10 เป็นสารชะละลาย

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1.0098	0.0013	0.1370	0.0896	0.2020		0.026	2.713	1.775	4.001
	1.0005	0.0004	0.1700	0.1390	0.2490	0.02	0.008	3.367	2.753	4.932
	1.0032	0.0001	0.1990	0.3770	0.4070		0.002	3.941	7.467	8.061
	MEAN	0.0006	0.1687	0.2019	0.2860	MEAN	0.012	3.341	3.998	5.664
	SD	0.0006	0.0310	0.1537	0.1074	SD	0.012	0.614	3.044	2.127
	RSD	102.37	18.392	76.123	37.549	RSD	102.38	18.392	76.124	37.550
BCFA	1.0057	0.0621	0.0922	0.0540	0.0497		1.236	1.834	1.074	0.988
	1.0099	0.0235	0.0906	0.0516	0.0616	0.02	0.467	1.802	1.026	1.225
	1.0020	0.0685	0.0922	0.0561	0.0478		1.361	1.834	1.116	0.951
	MEAN	0.0514	0.0917	0.0539	0.0530	MEAN	1.021	1.823	1.072	1.055
	SD	0.0244	0.0009	0.0023	0.0075	SD	0.484	0.018	0.045	0.149
	RSD	47.426	1.0077	4.1775	14.103	RSD	47.426	1.008	4.177	14.103

ข-8 ผลการชะละลายโลหะหนักในแก้วลอยด้วยวิธีย่อยสลาย (Microwave Digestor)

ประเภท แก้วลอย	น้ำหนัก แก้วลอย (g)	โลหะหนัก (mg/L)				ปริมาณสาร ชะละลาย (L)	โลหะหนัก (mg/kg)			
		As	Cr	Pb	Zn		As	Cr	Pb	Zn
LCFA	0.5059	2.6678	0.78	0.654	2.89		131.83	38.55	32.32	142.81
	0.5021	2.5839	0.915	0.72	2.56	0.025	128.65	45.56	35.85	127.46
	0.5069	2.5389	0.899	0.707	2.28		125.22	44.34	34.87	112.45
	MEAN	2.5969	0.8647	0.6937	2.5767	MEAN	128.57	42.81	34.35	127.58
	SD	0.0654	0.0738	0.0350	0.3053	SD	3.31	3.75	1.82	15.18
	RSD	2.5192	8.5303	5.0402	11.850	RSD	0.03	0.09	0.05	0.12
BCFA	0.5006	0.1936	0.258	0.232	1.81		9.67	12.88	11.59	90.39
	0.5013	0.1831	0.255	0.213	1.3	0.025	9.13	12.72	10.62	64.83
	0.5004	0.1827	0.29	0.225	0.862		9.13	14.49	11.24	43.07
	MEAN	0.1865	0.2677	0.2233	1.3240	MEAN	9.31	13.36	11.15	66.10
	SD	0.0062	0.0194	0.0096	0.4745	SD	0.31	0.98	0.49	23.69
	RSD	3.3147	7.2476	4.3025	35.835	RSD	0.03	0.07	0.04	0.36



ข-9 ผลการชะละลายธาตุอื่นๆ ในแก๊ลลอยด้วยวิธีย่อยสลาย (Microwave Digestor)

ประเภท แก๊ลลอย	น้ำหนัก แก๊ลลอย (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			ปริมาณสารชะ ละลาย (L)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/kg)		
		Ca	Mg	Al		Ca	Mg	Al
LCFA	0.5089	2760.0	254.00	1454.00	0.025	135,586.56	12,477.89	71,428.57
	0.5033	3500.0	306.00	1850.00		173,852.57	15,199.68	91,893.50
	MEAN	3130.0	280.00	1652.00		MEAN	154,719.57	13,838.79
BCFA	0.5036	73.800	61.400	240.00	0.025	3,663.62	3,048.05	11,914.22
	0.5007	24.800	58.200	224.00		1,238.27	2,905.93	11,184.34
	MEAN	0.1865	0.2677	0.2233		MEAN	2,450.94	2,976.99



ภาคผนวก ค

ผลการชะละลายโละหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค-1 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยกรดอะซิติก

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.05	0.002160	0.025900	0.006720	0.041800
		1.07	0.001940	0.055200	0.037600	0.640000
		MEAN	0.002050	0.040550	0.022160	0.340900
	2	1.01	0.004980	0.077500	0.029900	1.860000
		1.06	0.012170	0.076100	0.041800	0.842000
		MEAN	0.008575	0.076800	0.035850	1.351000
	3	1.06	0.040640	0.065100	0.089300	2.180000
		1.02	0.046490	0.076300	0.103000	0.948000
		MEAN	0.043565	0.070700	0.096150	1.564000
	4	1.04	0.073540	0.063200	0.070300	1.090000
		1.13	0.068530	0.058500	0.082500	0.493000
		MEAN	0.071035	0.060850	0.076400	0.791500
BCFA	1	1.03	0.019720	0.048900	0.041700	1.020000
		1.09	0.003780	0.073800	0.038500	1.410000
		MEAN	0.011750	0.061350	0.040100	1.215000
	2	1.10	0.008290	0.031800	0.023200	1.680000
		0.98	0.003020	0.047200	0.035900	1.890000
		MEAN	0.005655	0.039500	0.029550	1.785000
	3	1.07	0.007810	0.066100	0.098000	2.150000
		1.04	0.007850	0.012200	0.099900	1.080000
		MEAN	0.007830	0.039150	0.098950	1.615000
	4	1.07	0.012200	0.053800	0.107000	0.812000
		1.11	0.015720	0.028600	0.065100	1.690000
		MEAN	0.013960	0.041200	0.086050	1.251000

ค-2 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.03	0.000540	0.000000	0.000000	0.000000
		1.07	0.000200	0.004530	0.000000	0.048200
		MEAN	0.000370	0.002265	0.000000	0.024100
	2	1.07	0.001150	0.004600	0.000000	0.024800
		1.04	0.003360	0.006910	0.000000	0.175000
		MEAN	0.002255	0.005755	0.000000	0.099900
	3	1.06	0.001900	0.000000	0.000000	0.016900
		1.09	0.002610	0.000000	0.000000	0.001830
		MEAN	0.002255	0.000000	0.000000	0.009365
	4	1.07	0.003840	0.000000	0.000000	0.000000
		1.03	0.006860	0.000000	0.000000	0.005000
		MEAN	0.005350	0.000000	0.000000	0.002500
BCFA	1	1.02	0.000450	0.004800	0.000000	0.036300
		1.09	0.000310	0.012500	0.000000	0.036800
		MEAN	0.000380	0.008650	0.000000	0.036550
	2	1.05	0.000140	0.002600	0.000000	0.239000
		1.07	0.000220	0.049900	0.000000	0.229000
		MEAN	0.000180	0.026250	0.000000	0.234000
	3	1.10	0.001340	0.000000	0.000000	0.000000
		1.08	0.001640	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001490	0.000000	0.000000	0.000000
	4	1.06	0.003190	0.000000	0.000000	0.000000
		1.06	0.005050	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.004120	0.000000	0.000000	0.000000

ค-3 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำกลั่น

ประเภทเถ้าลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.10	0.001000	0.027300	0.010100	0.012000
		1.00	0.001313	0.027000	0.014400	0.019000
		MEAN	0.001156	0.027150	0.012250	0.015500
	2	1.08	0.001938	0.026700	0.006730	0.009020
		1.05	0.004163	0.034200	0.005180	0.009120
		MEAN	0.003050	0.030450	0.005955	0.009070
	3	1.07	0.006425	0.024800	0.005780	0.007310
		1.09	0.009700	0.024300	0.003560	0.004020
		MEAN	0.008063	0.024550	0.004670	0.005665
	4	1.01	0.008338	0.022800	0.004270	0.015400
		1.10	0.012275	0.025000	0.001640	0.007200
		MEAN	0.010306	0.023900	0.002955	0.011300
BCFA	1	1.09	0.000663	0.029300	0.016400	0.011900
		1.00	0.000638	0.035600	0.008550	0.007850
		MEAN	0.000650	0.032450	0.012475	0.009875
	2	1.03	0.000963	0.030500	0.019800	0.035900
		1.00	0.001150	0.026400	0.004330	0.004470
		MEAN	0.001056	0.028450	0.012065	0.020185
	3	1.03	0.001138	0.024600	0.003170	0.008950
		1.05	0.000900	0.024600	0.005660	0.013100
		MEAN	0.001019	0.024600	0.004415	0.011025
	4	1.09	0.002388	0.024700	0.002200	0.007040
		1.08	0.002963	0.026500	0.001340	0.003500
		MEAN	0.002675	0.025600	0.001770	0.005270

ค-4 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.07	0.000260	0.006860	0.000000	0.041700
		1.05	0.000100	0.002580	0.000000	0.002630
		MEAN	0.000180	0.004720	0.000000	0.022165
	2	1.07	0.000220	0.004320	0.000000	0.000000
		1.04	0.000340	0.004570	0.000000	0.000946
		MEAN	0.000280	0.004445	0.000000	0.000473
	3	1.02	0.001060	0.008800	0.000000	0.000000
		1.06	0.001140	0.001890	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001100	0.005345	0.000000	0.000000
	4	1.02	0.003380	0.004880	0.000000	0.000000
		1.05	0.001180	0.001760	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002280	0.003320	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.08	0.000370	0.009020	0.000000	0.003550
		1.05	0.000190	0.008610	0.000000	0.002110
		MEAN	0.000280	0.008815	0.000000	0.002830
	2	1.07	0.001140	0.002960	0.000000	0.000000
		1.06	0.000300	0.009930	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000720	0.006445	0.000000	0.000000
	3	1.02	0.000220	0.005240	0.000000	0.000000
		1.06	0.000490	0.011200	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000355	0.008220	0.000000	0.000000
	4	1.01	0.001860	0.002010	0.000000	0.000000
		1.03	0.000520	0.001150	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001190	0.001580	0.000000	0.000000

ค-5 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.04	0.000140	0.000000	0.000000	0.005520
		1.07	0.000530	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000335	0.000000	0.000000	0.002760
	2	1.08	0.000420	0.000000	0.000000	0.001090
		1.01	0.001230	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000825	0.000000	0.000000	0.000545
	3	1.05	0.001400	0.000000	0.000000	0.000000
		1.06	0.002980	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002190	0.000000	0.000000	0.000000
	4	1.00	0.004610	0.000000	0.000000	0.000000
		1.04	0.002060	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.003335	0.000000	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.05	0.000380	0.000000	0.000000	0.001790
		1.10	0.000240	0.000000	0.000612	0.007380
		MEAN	0.000310	0.000000	0.000306	0.004585
	2	1.00	0.000760	0.000000	0.000000	0.000000
		1.00	0.000220	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000490	0.000000	0.000000	0.000000
	3	1.04	0.000290	0.000000	0.005000	0.000000
		1.00	0.000600	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000445	0.000000	0.002500	0.000000
	4	1.05	0.002710	0.000000	0.000000	0.000000
		1.01	0.001120	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001915	0.000000	0.000000	0.000000

ค-6 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.08	0.000460	0.046400	0.000000	0.000000
		1.05	0.000440	0.040900	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000450	0.043650	0.000000	0.000000
	2	1.01	0.004240	0.053400	0.000000	0.000000
		1.07	0.001320	0.045400	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002780	0.049400	0.000000	0.000000
	3	1.07	0.005400	0.035300	0.000000	0.000000
		1.08	0.005280	0.035400	0.000000	0.000000
		MEAN	0.005340	0.035350	0.000000	0.000000
	4	1.03	0.007740	0.042800	0.000000	0.000000
		1.00	0.013010	0.037600	0.000000	0.000000
		MEAN	0.010375	0.040200	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.03	0.000270	0.053600	0.000000	0.000000
		1.00	0.000560	0.020800	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000415	0.037200	0.000000	0.000000
	2	1.01	0.001250	0.020500	0.000000	0.000000
		1.05	0.000960	0.019200	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001105	0.019850	0.000000	0.000000
	3	1.01	0.002850	0.043600	0.000000	0.000000
		1.07	0.002100	0.038800	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002475	0.041200	0.000000	0.000000
	4	1.09	0.002680	0.038900	0.000000	0.000000
		1.11	0.003190	0.015300	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002935	0.027100	0.000000	0.000000



ค-7 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.000570	0.002440	0.000000	0.000624
		1.07	0.001010	0.002290	0.000000	0.004450
		MEAN	0.000790	0.002365	0.000000	0.002537
	2	1.04	0.001140	0.007740	0.000000	0.000000
		1.10	0.002270	0.006660	0.000000	0.003730
		MEAN	0.001705	0.007200	0.000000	0.001865
	3	1.06	0.000830	0.010100	0.000000	0.000000
		1.02	0.004240	0.005670	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002535	0.007885	0.000000	0.000000
	4	1.11	0.000840	0.000488	0.000000	0.000000
		1.03	0.007430	0.004650	0.000000	0.000000
		MEAN	0.004135	0.002569	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.03	0.000290	0.007890	0.000000	0.000000
		1.08	0.000380	0.007890	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000335	0.007890	0.000000	0.000000
	2	1.10	0.000120	0.006590	0.000000	0.002320
		1.10	0.000410	0.006460	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000265	0.006525	0.000000	0.001160
	3	1.09	0.000630	0.002510	0.000000	0.000000
		1.01	0.000940	0.002710	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000785	0.002610	0.000000	0.000000
	4	1.04	0.002220	0.000488	0.000000	0.000000
		1.02	0.002420	0.004650	0.000000	0.000000
		MEAN	0.002320	0.002569	0.000000	0.000000

ค-8 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยกรดอะซิติก

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.019210	0.037600	0.071100	1.110000
		1.15	0.012980	0.078700	0.109000	1.060000
		MEAN	0.016095	0.058150	0.090050	1.085000
	2	1.11	0.015170	0.081200	0.102000	1.560000
		1.07	0.012720	0.059900	0.110000	0.729000
		MEAN	0.013945	0.070550	0.106000	1.144500
	3	1.10	0.019130	0.084900	0.089600	2.350000
		1.04	0.014940	0.083100	0.075600	0.991000
		MEAN	0.017035	0.084000	0.082600	1.670500
	4	1.03	0.002760	0.088500	0.040100	0.947000
		1.00	0.001770	0.082000	0.042700	0.546000
		MEAN	0.002265	0.085250	0.041400	0.746500
BCFA	1	1.05	0.005030	0.161000	0.110000	0.062900
		1.06	0.005920	0.080400	0.112000	0.049100
		MEAN	0.005475	0.120700	0.111000	0.056000
	2	1.07	0.005660	0.072600	0.097400	1.420000
		1.15	0.005840	0.070300	0.124000	0.926000
		MEAN	0.005750	0.071450	0.110700	1.173000
	3	1.08	0.004650	0.064600	0.069200	2.060000
		1.10	0.005190	0.038300	0.068500	0.773000
		MEAN	0.004920	0.051450	0.068850	1.416500
	4	1.08	0.002470	0.056300	0.029700	1.010000
		1.09	0.001130	0.038900	0.017600	0.239000
		MEAN	0.001800	0.047600	0.023650	0.624500

ค-9 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.10	0.000100	0.028600	0.002960	0.004550
		1.11	0.000250	0.023200	0.008450	0.006720
		MEAN	0.000175	0.025900	0.005705	0.005635
	2	1.03	0.000400	0.023900	0.000010	0.005480
		1.09	0.001600	0.026100	0.002290	0.006510
		MEAN	0.001000	0.025000	0.001150	0.005995
	3	1.07	0.000660	0.009780	0.000000	0.000000
		1.11	0.001260	0.005250	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000960	0.007515	0.000000	0.000000
	4	1.10	0.000610	0.009750	0.000000	0.000348
		1.09	0.001710	0.016600	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001160	0.013175	0.000000	0.000174
BCFA	1	1.10	0.000100	0.028400	0.002400	0.003520
		1.05	0.000520	0.026500	0.000749	0.002470
		MEAN	0.000310	0.027450	0.001575	0.002995
	2	1.11	0.001410	0.025000	0.000000	0.004640
		1.07	0.000380	0.025100	0.000696	0.005860
		MEAN	0.000895	0.025050	0.000348	0.005250
	3	1.02	0.000260	0.002440	0.000000	0.000000
		1.09	0.000190	0.004190	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000225	0.003315	0.000000	0.000000
	4	1.04	0.000710	0.036500	0.000000	0.000000
		1.11	0.000460	0.022000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000585	0.029250	0.000000	0.000000

ค-10 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำกลั่น

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.002613	0.032300	0.002290	0.008400
		1.11	0.007138	0.026200	0.001990	0.002510
		MEAN	0.004875	0.029250	0.002140	0.005455
	2	1.11	0.001338	0.026100	0.003270	0.022200
		1.09	0.000775	0.025300	0.005250	0.028700
		MEAN	0.001056	0.025700	0.004260	0.025450
	3	1.11	0.002163	0.024600	0.005940	0.014800
		1.06	0.000963	0.026200	0.002850	0.023200
		MEAN	0.001563	0.025400	0.004395	0.019000
	4	1.11	0.000863	0.025400	0.004110	0.012800
		1.00	0.001700	0.026800	0.002100	0.017700
		MEAN	0.001281	0.026100	0.003105	0.015250
BCFA	1	1.10	0.000675	0.026800	0.003380	0.009050
		1.11	0.000975	0.027800	0.002240	0.006550
		MEAN	0.000825	0.027300	0.002810	0.007800
	2	1.10	0.000272	0.032000	0.005250	0.028700
		1.11	0.000500	0.028900	0.004950	0.009930
		MEAN	0.000386	0.030450	0.005100	0.019315
	3	1.11	0.001013	0.027700	0.002510	0.007650
		1.00	0.000913	0.025800	0.002620	0.003550
		MEAN	0.000963	0.026750	0.002565	0.005600
	4	1.11	0.000488	0.027700	0.003000	0.009620
		1.09	0.000838	0.031400	0.002570	0.005650
		MEAN	0.000663	0.029550	0.002785	0.007635

ค-11 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.08	0.000230	0.007370	0.000000	0.025600
		1.05	0.000440	0.007650	0.000000	0.002450
		MEAN	0.000335	0.007510	0.000000	0.014025
	2	1.01	0.000180	0.007690	0.000000	0.043300
		1.07	0.000170	0.009430	0.000000	0.007090
		MEAN	0.000175	0.008560	0.000000	0.025195
	3	1.07	0.000700	0.011500	0.000000	0.052200
		1.08	0.000100	0.004180	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000400	0.007840	0.000000	0.026100
	4	1.03	0.000210	0.016800	0.000000	0.096400
		1.00	0.000970	0.016800	0.000000	0.013900
		MEAN	0.000590	0.016800	0.000000	0.055150
BCFA	1	1.03	0.000150	0.004090	0.000000	0.008560
		1.00	0.000190	0.005730	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000170	0.004910	0.000000	0.004280
	2	1.01	0.000560	0.004960	0.000000	0.003820
		1.05	0.000360	0.002140	0.000000	0.004640
		MEAN	0.000460	0.003550	0.000000	0.004230
	3	1.01	0.000600	0.001390	0.000000	0.036800
		1.07	0.000150	0.004840	0.000000	0.025100
		MEAN	0.000375	0.003115	0.000000	0.030950
	4	1.09	0.000690	0.023300	0.000000	0.022600
		1.11	0.000260	0.017800	0.012300	0.018100
		MEAN	0.000475	0.020550	0.006150	0.020350

ค-12 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.000460	0.000000	0.000000	0.003460
		1.01	0.000520	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000490	0.000000	0.000000	0.001730
	2	1.05	0.000650	0.000000	0.000000	0.000000
		1.11	0.000540	0.000000	0.000000	0.003600
		MEAN	0.000595	0.000000	0.000000	0.001800
	3	1.07	0.000360	0.000000	0.000000	0.000134
		1.07	0.000300	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000330	0.000000	0.000000	0.000067
	4	1.10	0.000900	0.000350	0.000000	0.000000
		1.11	0.000220	0.000000	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000560	0.000175	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.06	0.000120	0.000000	0.000000	0.026800
		1.05	0.000160	0.000000	0.000000	0.000662
		MEAN	0.000140	0.000000	0.000000	0.013731
	2	1.11	0.000340	0.000000	0.000000	0.002070
		1.03	0.000190	0.000000	0.000000	0.000692
		MEAN	0.000265	0.000000	0.000000	0.001381
	3	1.09	0.000100	0.000000	0.000000	0.016000
		1.08	0.000100	0.000000	0.000000	0.012700
		MEAN	0.000100	0.000000	0.000000	0.014350
	4	1.09	0.000520	0.011100	0.000000	0.000000
		1.06	0.000350	0.019000	0.006490	0.000000
		MEAN	0.000435	0.015050	0.003245	0.000000

ค-13 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.04	0.000460	0.038700	0.000000	0.000000
		1.07	0.000690	0.035300	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000575	0.037000	0.000000	0.000000
	2	1.08	0.000620	0.037900	0.000000	0.000000
		1.01	0.000660	0.036800	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000640	0.037350	0.000000	0.000000
	3	1.05	0.000360	0.037900	0.000000	0.000000
		1.06	0.001180	0.034700	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000770	0.036300	0.000000	0.000000
	4	1.00	0.000910	0.040800	0.000000	0.000000
		1.04	0.001760	0.056100	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001335	0.048450	0.000000	0.000000
BCFA	1	1.05	0.000160	0.036400	0.000000	0.000000
		1.10	0.000170	0.035200	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000165	0.035800	0.000000	0.000000
	2	1.00	0.000140	0.033600	0.000000	0.000000
		1.00	0.000160	0.034200	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000150	0.033900	0.000000	0.000000
	3	1.04	0.000460	0.040000	0.000000	0.000000
		1.00	0.000570	0.038700	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000515	0.039350	0.000000	0.000000
	4	1.05	0.000560	0.041700	0.000000	0.000000
		1.01	0.000810	0.051700	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000685	0.046700	0.000000	0.000000

ค-14 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.10	0.000940	0.002880	0.000000	0.002540
		1.07	0.000390	0.008340	0.000000	0.006820
		MEAN	0.000665	0.005610	0.000000	0.004680
	2	1.03	0.000320	0.011800	0.000000	0.006260
		1.09	0.000740	0.006670	0.000000	0.003270
		MEAN	0.000530	0.009235	0.000000	0.004765
	3	1.10	0.000390	0.007130	0.000000	0.007820
		1.08	0.000840	0.004650	0.000000	0.005810
		MEAN	0.000615	0.005890	0.000000	0.006815
	4	1.04	0.001180	0.009370	0.000000	0.001060
		1.03	0.001540	0.006230	0.000000	0.000000
		MEAN	0.001360	0.007800	0.000000	0.000530
BCFA	1	1.06	0.000410	0.004400	0.000000	0.003260
		1.07	0.000440	0.004360	0.000000	0.002980
		MEAN	0.000425	0.004380	0.000000	0.003120
	2	1.04	0.000380	0.002040	0.000000	0.000000
		1.08	0.001390	0.009480	0.000000	0.000000
		MEAN	0.000885	0.005760	0.000000	0.000000
	3	1.10	0.000350	0.000005	0.000000	0.000000
		1.00	0.000500	0.008750	0.000000	0.002870
		MEAN	0.000425	0.004378	0.000000	0.001435
	4	1.04	0.000490	0.009770	0.000000	0.000000
		1.07	0.000830	0.014000	0.000000	0.001010
		MEAN	0.000660	0.011885	0.000000	0.000505



ค-15 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์อีโพลีเมอร์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยกรดอะซิติก

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.309000	0.018000	0.000000	0.034600
		1.01	0.198100	0.025300	0.000000	0.023700
		MEAN	0.253550	0.021650	0.000000	0.029150
	2	1.05	0.560300	0.022700	0.000000	0.023700
		1.11	0.565600	0.017400	0.000000	0.054700
		MEAN	0.562950	0.020050	0.000000	0.039200
	3	1.07	0.350200	0.023900	0.000000	0.027300
		1.07	0.399800	0.014700	0.000000	0.020200
		MEAN	0.375000	0.019300	0.000000	0.023750
	4	1.10	0.335700	0.001530	0.000000	0.046300
		1.11	0.602400	0.009370	0.000000	0.043300
		MEAN	0.469050	0.005450	0.000000	0.044800
BCFA	1	1.06	0.044070	0.000000	0.000000	0.585000
		1.05	0.046340	0.000000	0.000000	0.531000
		MEAN	0.045205	0.000000	0.000000	0.558000
	2	1.11	0.056790	0.000000	0.000000	0.843000
		1.03	0.055480	0.000000	0.000000	0.337000
		MEAN	0.056135	0.000000	0.000000	0.590000
	3	1.09	0.086880	0.000000	0.000000	1.200000
		1.08	0.053080	0.000000	0.000000	0.479000
		MEAN	0.069980	0.000000	0.000000	0.839500
	4	1.09	0.082090	0.000000	0.000000	1.270000
		1.06	0.083390	0.000000	0.000000	0.730000
		MEAN	0.082740	0.000000	0.000000	1.000000

ค-16 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในกรณีที่ 2 ด้วยฝนกรดสังเคราะห์

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.04	0.291400	0.000000	0.000000	0.103620
		1.07	0.253200	0.000000	0.000000	0.066220
		MEAN	0.272300	0.000000	0.000000	0.084920
	2	1.08	0.673700	0.000000	0.000000	0.039820
		1.01	0.744000	0.000000	0.000000	0.046310
		MEAN	0.708850	0.000000	0.000000	0.043065
	3	1.05	0.473500	0.000000	0.000000	0.083710
		1.06	0.693100	0.000000	0.000000	0.048290
		MEAN	0.583300	0.000000	0.000000	0.066000
	4	1.00	0.521800	0.000000	0.000000	0.133100
		1.04	0.333600	0.000000	0.000000	0.127600
		MEAN	0.427700	0.000000	0.000000	0.130350
BCFA	1	1.05	0.063300	0.000000	0.000000	0.058190
		1.10	0.076940	0.000000	0.000000	0.044330
		MEAN	0.070120	0.000000	0.000000	0.051260
	2	1.00	0.066480	0.000000	0.000000	0.067870
		1.00	0.086330	0.000000	0.000000	0.057970
		MEAN	0.076405	0.000000	0.000000	0.062920
	3	1.04	0.055710	0.000000	0.000000	0.102960
		1.00	0.040560	0.000000	0.000000	0.037290
		MEAN	0.048135	0.000000	0.000000	0.070125
	4	1.05	0.105700	0.000000	0.000000	0.121000
		1.01	0.121000	0.000000	0.000000	0.063140
		MEAN	0.113350	0.000000	0.000000	0.092070

ค-17 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์อีโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำกลั่น

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.04	0.335000	0.000000	0.000000	0.122100
		1.07	0.291700	0.000000	0.000000	0.078210
		MEAN	0.313350	0.000000	0.000000	0.100155
	2	1.08	0.609000	0.000000	0.000000	0.051810
		1.01	0.705700	0.000000	0.000000	0.041800
		MEAN	0.657350	0.000000	0.000000	0.046805
	3	1.05	0.591800	0.000000	0.000000	0.043120
		1.06	0.627900	0.000000	0.000000	0.012100
		MEAN	0.609850	0.000000	0.000000	0.027610
	4	1.00	0.570900	0.000000	0.000000	0.104830
		1.04	0.601200	0.000000	0.000000	0.091300
		MEAN	0.586050	0.000000	0.000000	0.098065
BCFA	1	1.05	0.089140	0.000000	0.000000	0.067430
		1.10	0.093710	0.000000	0.000000	0.026840
		MEAN	0.091425	0.000000	0.000000	0.047135
	2	1.00	0.074690	0.000000	0.000000	0.125400
		1.00	0.076430	0.000000	0.000000	0.026730
		MEAN	0.075560	0.000000	0.000000	0.076065
	3	1.04	0.059870	0.000000	0.000000	0.070510
		1.00	0.067590	0.000000	0.000000	0.063690
		MEAN	0.063730	0.000000	0.000000	0.067100
	4	1.05	0.092540	0.000000	0.000000	0.157300
		1.01	0.122700	0.000000	0.000000	0.063030
		MEAN	0.107620	0.000000	0.000000	0.110165

ค-18 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.03	0.365700	0.000000	0.012320	0.176000
		1.08	0.505200	0.000000	0.000000	0.085030
		MEAN	0.435450	0.000000	0.006160	0.130515
	2	1.10	0.564800	0.000000	0.016390	0.047740
		1.10	0.663200	0.000000	0.008778	0.027060
		MEAN	0.614000	0.000000	0.012584	0.037400
	3	1.09	0.437400	0.000000	0.011440	0.099110
		1.01	0.503300	0.000000	0.016280	0.102630
		MEAN	0.470350	0.000000	0.013860	0.100870
	4	1.04	0.587600	0.000000	0.009592	0.221100
		1.02	0.378500	0.000000	0.010505	0.112200
		MEAN	0.483050	0.000000	0.010049	0.166650
BCFA	1	1.08	0.074310	0.000000	0.015070	0.073920
		1.05	0.077850	0.000000	0.012870	0.039600
		MEAN	0.076080	0.000000	0.013970	0.056760
	2	1.01	0.091330	0.000000	0.011440	0.159500
		1.07	0.101270	0.000000	0.006479	0.095480
		MEAN	0.096300	0.000000	0.008960	0.127490
	3	1.07	0.041520	0.000000	0.004081	0.105930
		1.08	0.038360	0.000000	0.000297	0.061820
		MEAN	0.039940	0.000000	0.002189	0.083875
	4	1.03	0.087760	0.000000	0.000012	0.170500
		1.00	0.076100	0.000000	0.002398	0.045430
		MEAN	0.081930	0.000000	0.001205	0.107965

ค-19 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.10	0.261900	0.000000	0.006809	0.122100
		1.07	0.420000	0.000000	0.003542	0.119900
		MEAN	0.340950	0.000000	0.005176	0.121000
	2	1.03	0.551800	0.000000	0.000000	0.070290
		1.09	0.601200	0.000000	0.000000	0.040370
		MEAN	0.576500	0.000000	0.000000	0.055330
	3	1.10	0.586200	0.000000	0.000000	0.017160
		1.08	0.531700	0.000000	0.000000	0.046200
		MEAN	0.558950	0.000000	0.000000	0.031680
	4	1.04	0.607000	0.000000	0.000000	0.136400
		1.03	0.596600	0.000000	0.000000	0.101200
		MEAN	0.601800	0.000000	0.000000	0.118800
BCFA	1	1.06	0.126300	0.000000	0.000000	0.021340
		1.07	0.056300	0.000000	0.000000	0.042130
		MEAN	0.091300	0.000000	0.000000	0.031735
	2	1.04	0.083510	0.000000	0.000000	0.107910
		1.08	0.072790	0.000000	0.000000	0.061270
		MEAN	0.078150	0.000000	0.000000	0.084590
	3	1.10	0.074920	0.000000	0.000000	0.166100
		1.00	0.060660	0.000000	0.000000	0.057090
		MEAN	0.067790	0.000000	0.000000	0.111595
	4	1.04	0.096680	0.000000	0.000000	0.108240
		1.07	0.106800	0.000000	0.000000	0.056980
		MEAN	0.101740	0.000000	0.000000	0.082610

ค-20 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.10	0.338500	0.000000	0.000000	0.116600
		1.00	0.335000	0.000000	0.000000	0.095040
		MEAN	0.336750	0.000000	0.000000	0.105820
	2	1.08	0.750200	0.000000	0.000000	0.018590
		1.05	0.627600	0.000000	0.000000	0.005544
		MEAN	0.688900	0.000000	0.000000	0.012067
	3	1.07	0.641300	0.000000	0.000000	0.045980
		1.09	0.596100	0.000000	0.000000	0.018810
		MEAN	0.618700	0.000000	0.000000	0.032395
	4	1.01	0.491700	0.000000	0.000000	0.092510
		1.10	0.426800	0.000000	0.000000	0.092180
		MEAN	0.459250	0.000000	0.000000	0.092345
BCFA	1	1.09	0.069820	0.000000	0.000000	0.053130
		1.00	0.073320	0.000000	0.000000	0.034760
		MEAN	0.071570	0.000000	0.000000	0.043945
	2	1.03	0.076860	0.000000	0.000000	0.090530
		1.00	0.088260	0.000000	0.000000	0.035200
		MEAN	0.082560	0.000000	0.000000	0.062865
	3	1.03	0.045760	0.000000	0.000000	0.071500
		1.05	0.050390	0.000000	0.000000	0.053460
		MEAN	0.048075	0.000000	0.000000	0.062480
	4	1.09	0.113100	0.000000	0.000000	0.144100
		1.08	0.085880	0.000000	0.000000	0.035310
		MEAN	0.099490	0.000000	0.000000	0.089705

ค-21 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีที่ 2 ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

ประเภทแก้้ลอย	สูตร	น้ำหนักตัวอย่าง (g)	ปริมาณโลหะหนัก (mg/L)			
			As	Cr	Pb	Zn
LCFA	1	1.11	0.245100	0.000000	0.000000	0.095150
		1.01	0.355800	0.000000	0.000000	0.123200
		MEAN	0.300450	0.000000	0.000000	0.109175
	2	1.05	0.635300	0.000000	0.000000	0.122100
		1.11	0.581400	0.000000	0.000000	0.069080
		MEAN	0.608350	0.000000	0.000000	0.095590
	3	1.07	0.425500	0.000000	0.000000	0.022770
		1.07	0.325000	0.000000	0.000000	0.096140
		MEAN	0.375250	0.000000	0.000000	0.059455
	4	1.10	0.414200	0.000000	0.000000	0.097350
		1.11	0.443200	0.000000	0.000000	0.107360
		MEAN	0.428700	0.000000	0.000000	0.102355
BCFA	1	1.06	0.059400	0.000000	0.000000	0.071500
		1.05	0.096520	0.000000	0.000000	0.065450
		MEAN	0.077960	0.000000	0.000000	0.068475
	2	1.11	0.076980	0.000000	0.000000	0.150700
		1.03	0.062380	0.000000	0.000000	0.054120
		MEAN	0.069680	0.000000	0.000000	0.102410
	3	1.09	0.070890	0.000000	0.000000	0.129800
		1.08	0.073180	0.000000	0.000000	0.040810
		MEAN	0.072035	0.000000	0.000000	0.085305
	4	1.09	0.085740	0.000000	0.000000	0.075570
		1.06	0.100400	0.000000	0.000000	0.133100
		MEAN	0.093070	0.000000	0.000000	0.104335

ภาคผนวก ก

ความสามารถในการรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ง-1 ความสามารถในการรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 1

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 1

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	3210	25	128.40	
	2	3750	25	150.00	137.07
	3	3320	25	132.80	
BCFA	1	2800	25	112.00	
	2	2530	25	101.20	107.73
	3	2750	25	110.00	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 2

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	4900	25	196.00	
	2	4520	25	180.80	213.60
	3	6600	25	264.00	
BCFA	1	4400	25	176.00	
	2	3450	25	138.00	147.47
	3	3210	25	128.40	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 3

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	5690	25	227.60	
	2	5310	25	212.40	219.33
	3	5450	25	218.00	
BCFA	1	4300	25	172.00	
	2	4830	25	193.20	186.53
	3	4860	25	194.40	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 4

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	3860	25	154.40	
	2	3830	25	153.20	154.27
	3	3880	25	155.20	
BCFA	1	4400	25	176.00	
	2	4130	25	165.20	169.33
	3	4170	25	166.80	

## ง-2 ความสามารถในการรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์คอนกรีต ในกรณีที่ 2

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 1

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	5300	25	212.00	227.07
	2	5670	25	226.80	
	3	6060	25	242.40	
BCFA	1	4200	25	168.00	170.53
	2	4550	25	182.00	
	3	4040	25	161.60	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 2

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	6250	25	250.00	239.73
	2	6160	25	246.40	
	3	5570	25	222.80	
BCFA	1	4390	25	175.60	181.73
	2	4740	25	189.60	
	3	4500	25	180.00	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 3

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	5720	25	228.80	252.67
	2	8150	25	326.00	
	3	5080	25	203.20	
BCFA	1	4550	25	182.00	184.93
	2	4690	25	187.60	
	3	4630	25	185.20	

## ผลิตภัณฑ์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 4

ประเภทเสา	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	5760	25	230.40	229.73
	2	5550	25	222.00	
	3	5920	25	236.80	
BCFA	1	3200	25	128.00	129.33
	2	3100	25	124.00	
	3	3400	25	136.00	

ง-3 ความสามารถในการรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีที่ 1

ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 3

ประเภทเสาลอย	ลูกที่	น้ำหนักกด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	790	25	31.60	37.47
	2	840	25	41.60	
	3	700	25	39.20	
BCFA	1	1975	25	79.00	67.67
	2	1700	25	68.00	
	3	1400	25	56.00	

ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 1 สูตร 4

ประเภทเสาลอย	ลูกที่	น้ำหนักกด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	1070	25	42.80	41.20
	2	1040	25	41.60	
	3	980	25	39.20	
BCFA	1	2020	25	80.80	83.20
	2	2140	25	85.60	
	3	2080	25	83.20	

## ง-4 ความสามารถในการรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ในกรณีที่ 2

## ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 1

ประเภทเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนักก่ด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	2700	25	108.00	
	2	2790	25	111.60	107.47
	3	2570	25	102.80	
BCFA	1	5670	25	226.80	
	2	5590	25	223.60	228.00
	3	5840	25	233.60	

## ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 2

ประเภทเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนักก่ด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	1510	25	60.40	
	2	1290	25	51.60	52.13
	3	1110	25	44.40	
BCFA	1	4950	25	198.00	
	2	4430	25	177.20	185.33
	3	4520	25	180.80	

## ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 3

ประเภทเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนักก่ด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	1210	25	48.40	
	2	1190	25	47.60	48.67
	3	1250	25	50.00	
BCFA	1	3960	25	158.40	
	2	3850	25	154.00	154.00
	3	3740	25	149.60	

## ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต กรณี 2 สูตร 4

ประเภทเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนักก่ด (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm <sup>2</sup> )	กำลัง (ksc)	เฉลี่ยกำลัง (ksc)
LCFA	1	1910	25	76.40	
	2	1470	25	58.80	71.33
	3	1970	25	78.80	
BCFA	1	3190	25	127.60	
	2	3200	25	128.00	129.20
	3	3300	25	132.00	

ภาคผนวก จ

การคำนวณผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทางสถิติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

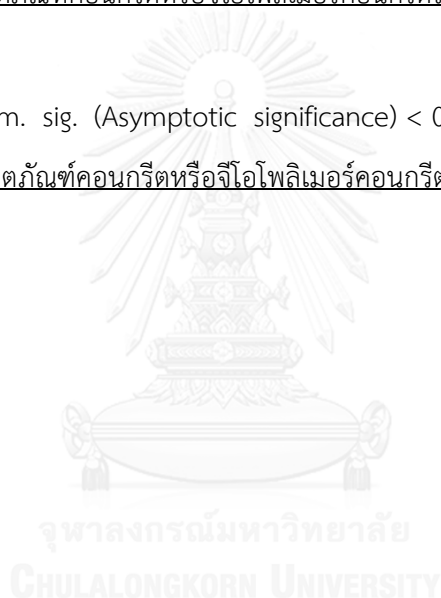
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Science for Windows) วิเคราะห์ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทางสถิติทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA Analysis) และแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปของตาราง ซึ่งตารางที่ได้จะมีค่า sig. ของ equation of variances (ความแปรปรวนของกลุ่ม)

กำหนด H0: ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ ทุกกลุ่มเท่ากัน

H1: ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ อย่างน้อย 1 กลุ่มไม่เท่ากับกลุ่มอื่น

ถ้าผลที่ได้ใน Asym. sig. (Asymptotic significance)  $\geq 0.05$  แสดงว่า ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์คอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ ยอมรับ H0

ถ้าผลที่ได้ใน Asym. sig. (Asymptotic significance)  $< 0.05$  แสดงว่า ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์หรือบิทูมินัสที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์คอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ ยอมรับ H1



จ-1 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยกรดอะซิติก

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0.008	7	0.001	103.825	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.008	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	1.671	0.244
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0.003	7	0	2.21	0.144
		Within Groups	0.002	8	0		
		Total	0.005	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0.01	7	0.001	2.016	0.173
		Within Groups	0.006	8	0.001		
		Total	0.016	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0.014	7	0.002	9.979	0.002
		Within Groups	0.002	8	0		
		Total	0.015	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0.018	7	0.003	14.92	0.001
		Within Groups	0.001	8	0		
		Total	0.02	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	2.802	7	0.4	1.073	0.456
		Within Groups	2.985	8	0.373		
		Total	5.786	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	4.356	7	0.622	2.161	0.151
		Within Groups	2.304	8	0.288		
		Total	6.659	15			

จ-2 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยกรดอะซิติก

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.105	3	0.035	3.258	0.142
		Within Groups	0.043	4	0.011		
		Total	0.148	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.002	3	0.001	3.712	0.119
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.002	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	3.963	0.108
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.001	3	0	1.274	0.397
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.001	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.266	3	0.089	0.662	0.617
		Within Groups	0.535	4	0.134		
		Total	0.801	7			



จ-3 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	5.013	0.019
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	11.509	0.001
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0.002	7	0	27.719	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.002	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0.002	7	0	2.205	0.145
		Within Groups	0.001	8	0		
		Total	0.004	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	3.621	0.046
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	3.045	0.071
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	0.016	7	0.002	1.454	0.304
		Within Groups	0.013	8	0.002		
		Total	0.029	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	0.093	7	0.013	2063	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.093	15			

จ-4 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำฝนกรดสังเคราะห์

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.215	3	0.072	6.374	0.053
		Within Groups	0.045	4	0.011		
		Total	0.26	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.004	3	0.001	11.253	0.02
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.005	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.008	3	0.003	8.051	0.036
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.01	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.002	3	0.001	0.594	0.651
		Within Groups	0.004	4	0.001		
		Total	0.006	7			

จ-5 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำกลั่น

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	7.418	0.006
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	22.602	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	1.591	0.264
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	2.483	0.113
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	6.397	0.009
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	1.924	0.189
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	0.001	7	0	5.06	0.018
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.001	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	0.764	0.632
		Within Groups	0.001	8	0		
		Total	0.001	15			

จ-6 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำกลั่น

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.144	3	0.048	28.608	0.004
		Within Groups	0.007	4	0.002		
		Total	0.151	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.002	3	0.001	5.874	0.06
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0.003	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.008	3	0.003	6.757	0.048
		Within Groups	0.002	4	0		
		Total	0.01	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.004	3	0.001	0.545	0.677
		Within Groups	0.01	4	0.003		
		Total	0.014	7			

จ-7 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	2.809	0.086
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	1.085	0.45
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	4.368	0.028
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	8.269	0.004
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.001	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	1	0.493
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	0.005	7	0.001	0.881	0.56
		Within Groups	0.006	8	0.001		
		Total	0.011	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	0.002	7	0	18.151	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.002	15			

จ-8 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 4

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.037	3	0.01	1.266	0.399
		Within Groups	0.039	4	0.01		
		Total	0.075	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.003	3	0	35.735	0.002
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0.004	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0.788	0.56
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	11.693	0.019
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.018	3	0.01	2.328	0.216
		Within Groups	0.01	4	0		
		Total	0.028	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.006	3	0	0.655	0.621
		Within Groups	0.011	4	0		
		Total	0.017	7			

จ-9 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
As	CC-LCFA Between Groups	0	7	0	3.711	0.043
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
As	CC-BCFA Between Groups	0	7	0	3.655	0.045
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Cr	CC-LCFA Between Groups	0	7	0	1	0.493
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Cr	CC-BCFA Between Groups	0	7	0	14.517	0.001
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Pb	CC-LCFA Between Groups	0	7	0	0	0
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Pb	CC-BCFA Between Groups	0	7	0	0.833	0.589
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Zn	CC-LCFA Between Groups	0	7	0	0.662	0.7
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0	15			
Zn	CC-BCFA Between Groups	0.001	7	0	1.713	0.233
	Within Groups	0	8	0		
	Total	0.001	15			

จ-10 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 6

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.087	3	0.029	7.596	0.04
		Within Groups	0.015	4	0.004		
		Total	0.102	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.001	3	0	0.664	0.616
		Within Groups	0.003	4	0.001		
		Total	0.004	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	10.038	0.025
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.012	3	0.004	10.941	0.021
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.014	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.007	3	0.002	1.038	0.466
		Within Groups	0.009	4	0.002		
		Total	0.015	7			



จ-11 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	10.318	0.002
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	34.321	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	2.622	0.1
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0.001	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0.001	7	0	1.279	0.366
		Within Groups	0.001	8	0		
		Total	0.002	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			

จ-12 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 8

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.151	3	0.05	18.881	0.008
		Within Groups	0.011	4	0.003		
		Total	0.161	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.003	3	0.001	8.213	0.035
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0.003	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.012	3	0.004	24.091	0.005
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.013	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.002	3	0.001	0.365	0.783
		Within Groups	0.008	4	0.002		
		Total	0.01	7			

จ-13 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	0.876	0.563
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
As	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	10.247	0.002
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	1.816	0.211
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Cr	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	1.821	0.21
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Pb	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	0	0
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-LCFA	Between Groups	0	7	0	3.382	0.055
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			
Zn	CC-BCFA	Between Groups	0	7	0	2.658	0.097
		Within Groups	0	8	0		
		Total	0	15			

จ-14 ผลการชะละลายโลหะหนักจากผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ด้วยน้ำที่มีค่าพีเอช 10

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
As	GC-LCFA	Between Groups	0.103	3	0.034	10.539	0.023
		Within Groups	0.013	4	0.003		
		Total	0.116	7			
As	GC-BCFA	Between Groups	0.001	3	0	0.977	0.487
		Within Groups	0.001	4	0		
		Total	0.002	7			
Cr	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Cr	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-LCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Pb	GC-BCFA	Between Groups	0	3	0	0	0
		Within Groups	0	4	0		
		Total	0	7			
Zn	GC-LCFA	Between Groups	0.003	3	0.001	0.866	0.528
		Within Groups	0.005	4	0.001		
		Total	0.007	7			
Zn	GC-BCFA	Between Groups	0.002	3	0.001	0.219	0.879
		Within Groups	0.01	4	0.003		
		Total	0.012	7			

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปณิธิ เปรมสัจย์ธรรม เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 มีภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา-ทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 (16th National Environmental Conference และ 16th International Conference on Environmental Engineering, Science, and Management) ในหัวข้อ "การเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดและการตรึงโลหะหนักจากคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์และบิทูมินัสเป็นส่วนผสม" ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 17 - 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2560