

การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Utilization of sludge from plastic eyeglasses lens industry



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา พลาสติก
โดย	นายศรัณย์พร อุ้นเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งามเสริฐ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชดชนก อัทธมพงศ์)	

ศรัณย์พร อุ่นเพชร : การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา
พลาสติก. (Utilization of sludge from plastic eyeglasses lens industry) อ.ที่
ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุธา ขาวเอียร

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก ใช้การวิเคราะห์ผังการไหลของวัสดุ คัดเลือกของเสียจากการศึกษาผังการไหลของวัสดุที่ส่งไปหลุมฝังกลบ และยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกได้แก่ ตะกอนเจียแม่พิมพ์ ตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอน พบว่าตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์มีซีเรียมอยู่ และตะกอนทั้งสามชนิดยังพบว่ามีซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบ จึงศึกษาแนวทางการนำกลับซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และนำตะกอนทั้ง 3 ชนิดมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนทราย ในการผลิตมอร์ตาร์ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 และ 0.50 ศึกษาอัตราส่วนแทนที่ของเสียลงในทราย ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน การศึกษาการนำกลับซีเรียม ความบริสุทธิ์สูงสุดของซีเรียมร้อยละ 38.28 ชนิดของกรดและอุณหภูมิมีผลต่อความบริสุทธิ์ของซีเรียม ผลการศึกษาการผลิตมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายมากขึ้นด้วยตะกอนบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ พบว่าความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยตะกอนเจียแม่พิมพ์ เมื่อแทนที่มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วต่ำลง ส่วนการดูดซึมน้ำพบว่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (มอก. 15-2547) พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยตะกอนบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ไม่ผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยตะกอนเจียแม่พิมพ์พบว่าผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ตะกอนเจียแม่พิมพ์คือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเวลาบ่ม 28 วัน การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากมอร์ตาร์ พบว่าค่าการชะละลายของโลหะหนักไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070477921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Waste management, Material Flow Analysis, Cerium, Mortar

Sarunporn Ounpetch : Utilization of sludge from plastic eyeglasses lens industry.

Advisor: Assoc. Prof. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D.

These research studies waste management from the plastic eyeglasses industry. Use analysis of material flow chart and selection waste from the study of the flow chart of materials sent to landfills and can also be utilized, such as glass powder sludge (GS), mold factory wastewater treatment sludge (MS), And biological wastewater treatment sludge (BS). Study the chemical composition of sludge, found that the MS contains cerium and all three sludges were found to contain silica and alumina. Therefore studied the method of recovery cerium from MS. And all 3 types of sludge are used as sand substitutes in the production of mortars. Using the ratio of cement to sand equal to 1: 2 and water to cement ratio of 0.55 and 0.50. Study the ratio of replacing waste into the sand at 10, 20, 30, 40 and 50 percent by weight, curing time 7, 14 and 28 days. The Cerium recovery has maximum purity of cerium is 38.28 percent. The type of acid and temperature affects the purity of the cerium. The results of the production of mortar that replaced more sand with BS and MS found that the density and the compressive strength is reduced The water absorption increased The mortar that replaced the sand with the GS When replacing more resulting in density And the compressive strength increased to one point and then lower, water absorption showed no change. When compared with the standard of Portland Cement (TIS. 15-2547), it is found that mortar that replaces sand with BS and MS did not meet all standards of the study. The mortar that replaced the sand with the GS found that all standards were studied. The optimum ratio for replacing GS was 30% by weight and 28 days of curing time. Leach testing of heavy metals from mortars Found that the leaching value of heavy metals does not exceed the standards set.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2019 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเชียร ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งประเสริฐ และคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชตชนก อัทธพงศ์ ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ และได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมถึงคุณอดิสร-ชวนปี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต และทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความเอื้อเฟื้ออุปการะ สถานที่ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณโปรแกรมวิจัย (Research Program) นโยบาย และแนวทางการปฏิบัติด้านการจัดการของเสียอุตสาหกรรม (Industrial Waste Management – Policies and Practices) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสาร และของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนวิจัย คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยออปติคอล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ อีกทั้งยังให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตแว่นตา และกระบวนการในการจัดการของเสียภายในโรงงาน

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนส่งเสริมทางการศึกษา ให้การสนับสนุนทางด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่อื่นๆ ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก.....	6
2.2 ของเสียจากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	9
2.2.1 ปริมาณของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก.....	9
2.2.2 การจัดการของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	10
2.2.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	12
2.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis).....	13
2.4 หลัก 3Rs	17

2.4.1	แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการของเสียภายในโรงงานตามหลัก 3Rs.....	18
2.5	ซีเรียมออกไซด์ (CeO ₂).....	19
2.5.1	ลักษณะสมบัติซีเรียมออกไซด์ (CeO ₂).....	20
2.5.2	การใช้ประโยชน์ซีเรียมออกไซด์ในอุตสาหกรรม.....	21
2.5.3	กระบวนการขจัดกระจกด้วยซีเรียม.....	22
2.5.4	การได้รับซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกาย.....	23
2.5.5	ของเสียจากการใช้ซีเรียมในการขจัด.....	24
2.6	คอนกรีต.....	25
2.6.1	คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	25
2.6.1.1	องค์ประกอบทางเคมี.....	25
2.6.1.2	คุณสมบัติของสารประกอบหลัก.....	26
2.6.2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	28
2.6.2	ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวกับคอนกรีต.....	30
2.7	มอร์ตาร์.....	31
2.8	มวลรวม.....	31
2.9	ส่วนผสมของคอนกรีต.....	32
2.10	การบ่มคอนกรีต (Curing).....	35
2.11	การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	37
2.11.1	งานวิจัยเกี่ยวกับ Material Flow Analysis: MFA.....	37
2.11.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับซีเรียม.....	40
2.11.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุมวลรวม.....	42
บทที่ 3	แผนการดำเนินการวิจัย.....	49
3.1	แผนการทดลอง.....	49
3.2	การศึกษาการไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis).....	49

3.2.1	ขอบเขตพื้นที่การศึกษา.....	51
3.2.2	ขอบเขตช่วงเวลาที่ทำการศึกษา.....	51
3.2.3	การเก็บข้อมูลการไหลของวัสดุ.....	51
3.2.4	การทำสมมูลมวล.....	51
3.2.5	วิเคราะห์สถานการณ์เกี่ยวกับการจัดการของเสียภายในโรงงาน.....	53
3.3	การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....	54
3.3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	54
3.3.2	สารเคมี.....	54
3.3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	55
3.4	การดำเนินการวิจัย.....	57
3.4.1	การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	57
3.4.1.1	การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย.....	57
3.4.1.2	การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ของตะกอนทั้ง 3 ชนิด.....	57
3.4.2	การทดลองที่ 2 ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์.....	57
3.4.3	การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียจากตะกอน.....	59
3.4.3.1	ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียจากตะกอน.....	59
3.4.3.2	การทดสอบสมบัติของวัสดุก่อสร้าง.....	60
3.4.4	การทดลองที่ 4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์ที่การแทนที่ด้วยตะกอน.....	62
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	63
4.1	การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก.....	63

4.1.1 การศึกษาผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	63
4.1.2 การศึกษาผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม... 65	
4.2 การศึกษาองค์ประกอบกายภาพ และเคมีพื้นฐานของของเสีย	70
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสีย	70
4.2.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค	72
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม	74
4.3 การศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์	76
4.4 การศึกษาหาอัตราส่วนพื้นฐานที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนทั้ง 3 ชนิด	78
4.4.1 การศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์	78
4.4.2 การศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์	79
4.4.3 การศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับตะกอนแต่ละชนิดในการผลิตมอร์ตาร์	80
4.5 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนทั้ง 3 ชนิด	82
4.5.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)	82
4.5.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ	85
4.5.3 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)	88
4.5.4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์	92
4.5.5 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์	93
4.5.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	99
5.1 การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก	99

5.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้ง 3 ชนิด.....	100
5.3 การศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์.....	100
5.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกาก ตะกอนจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก	101
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	102
6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	102
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก. วิธีการทดลองโดยละเอียด	104
ภาคผนวก ข. ภาพการทดลอง.....	108
ภาคผนวก ค. ผลการทดลอง	112
ภาคผนวก ง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	119
บรรณานุกรม.....	131
ประวัติผู้เขียน.....	135

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2- 1	ประเภทของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	10
ตารางที่ 2- 2	ตัวอย่างการนำตะกอนของเสียมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ	11
ตารางที่ 2- 3	องค์ประกอบทางเคมีจากการวิเคราะห์เบื้องต้นของตะกอนทั้ง 3 ชนิด	13
ตารางที่ 2- 4	ลักษณะสมบัติของซีเรียมออกไซด์ (CeO ₂).....	21
ตารางที่ 2- 5	เส้นทางการได้รับ อากาศ และการป้องกันเมื่อซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกาย.....	24
ตารางที่ 2- 6	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	26
ตารางที่ 2- 7	คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	27
ตารางที่ 2- 8	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1-5.....	29
ตารางที่ 2- 9	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้สำหรับงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ	33
ตารางที่ 2- 10	ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเมื่อมีอายุครบ 28 วัน สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่าง ๆ	33
ตารางที่ 2- 11	อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ	34
ตารางที่ 2- 12	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานประเภทต่าง ๆ.....	34
ตารางที่ 2- 13	เวลาในการบ่มคอนกรีต.....	36
ตารางที่ 2- 14	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ.....	45
ตารางที่ 2- 15	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม	46
ตารางที่ 2- 16	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุก่อสร้าง... ..	47
ตารางที่ 3- 1	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการจัดการของเสีย ณ ปัจจุบัน	51
ตารางที่ 3- 2	วิธีการจัดการของเสียแต่ละชนิดของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก.....	53
ตารางที่ 3- 3	จำนวนตัวอย่างที่ทำการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียจากตะกอน.....	59
ตารางที่ 4- 1	ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก	70

ตารางที่ 4- 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โรงแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ปูซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทราย	72
ตารางที่ 4- 3 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการศึกษาการนำกลับซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรง แม่พิมพ์ด้วยวิธีฟลักซ์	77
ตารางที่ 4- 4 ค่าโลหะหนักจากการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักจากก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอน	92
ตารางที่ ค- 1 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจีย แม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	113
ตารางที่ ค- 2 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบ บำบัดน้ำเสียรวม ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	113
ตารางที่ ค- 3 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบ บำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	114
ตารางที่ ค- 4 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจีย แม่พิมพ์ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	115
ตารางที่ ค- 5 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัด น้ำเสียรวม ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	115
ตารางที่ ค- 6 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจาก ระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	116
ตารางที่ ค- 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจีย แม่พิมพ์ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	117
ตารางที่ ค- 8 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัด น้ำเสียรวม ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	117
ตารางที่ ค- 9 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัด น้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	118
ตารางที่ ง- 1 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	122
ตารางที่ ง- 2 สมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์	123
ตารางที่ ง- 3 สมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ที่อาจเพิ่มเติมได้	124

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 2- 1	กระบวนการขึ้นรูปเลนส์โดยวิธีฉีดแบบ.....	7
ภาพที่ 2- 2	กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก.....	8
ภาพที่ 2- 3	ผังอย่างง่ายแสดงการไหลของสารอันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์	16
ภาพที่ 2- 4	แนวทางการจัดการของเสียแบบผสมผสานตามหลัก 3Rs.....	19
ภาพที่ 2- 5	กระบวนการขัดแก้วโดยใช้ซีเรียมเป็นตัวขัด.....	23
ภาพที่ 2- 6	กลไกการขัดแก้วโดยใช้ผงขัดซีเรียม.....	23
ภาพที่ 3- 1	แผนภาพแสดงการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ.....	50
ภาพที่ 3- 2	ตัวอย่างการทำสมดุลมวลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAN เวอร์ชัน 2.6.801	52
ภาพที่ 3- 3	ขั้นตอนในการวิจัย.....	56
ภาพที่ 3- 4	ขั้นตอนการนำกลับซีเรียม	58
ภาพที่ 4- 1	ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน ข้อมูลจาก บริษัท ไทยออปติคอล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ปี 2560.....	64
ภาพที่ 4- 2	ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2558.....	66
ภาพที่ 4- 3	ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2559.....	67
ภาพที่ 4- 4	ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2560.....	69
ภาพที่ 4- 5	เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยน้ำหนักของของเสียทั้ง 3 ชนิด	74
ภาพที่ 4- 6	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนทั้ง 3 ชนิด	75
ภาพที่ 4- 7	ร้อยละการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมโดยใช้กรดทั้ง 3 ชนิด.....	76
ภาพที่ 4- 8	ผังแสดงการไหลของแร่ธาตุซีเรียมในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	78

ภาพที่ 4- 9	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50)	79
ภาพที่ 4- 10	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	80
ภาพที่ 4- 11	กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับแต่ละตะกอน ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน	81
ภาพที่ 4- 12	ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	84
ภาพที่ 4- 13	ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	84
ภาพที่ 4- 14	ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	85
ภาพที่ 4- 15	ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	87
ภาพที่ 4- 16	ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ	87
ภาพที่ 4- 17	ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	88
ภาพที่ 4- 18	ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ	90
ภาพที่ 4- 19	ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมในอัตราส่วนต่าง ๆ	91
ภาพที่ 4- 20	ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ	91
ภาพที่ 4- 21	โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย	94
ภาพที่ 4- 22	โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์.....	95

ภาพที่ 4- 23 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัด
น้ำเสียรวม..... 95

ภาพที่ 4- 24 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัด
น้ำเสียโรงแม่พิมพ์ 96

ภาพที่ 4- 25 โครงสร้างผลึกในมอร์ตาร์ ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ด้วยวิธี XRD 97

ภาพที่ ข- 1 ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์กระจก..... 109

ภาพที่ ข- 2 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ 109

ภาพที่ ข- 3 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ 109

ภาพที่ ข- 4 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร 110

ภาพที่ ข- 5 ชุดการทดลองแนวทางการนำกลับซีเรียม..... 110

ภาพที่ ข- 6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Amsler 30 ton)..... 111

ภาพที่ ข- 7 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร 111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีปริมาณของเสียอุตสาหกรรมที่ถูกนำไปกำจัดมากถึง 77 ล้านตันต่อปี และมีปริมาณของเสียเพิ่มมากขึ้นทุกปี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) การแก้ไขปัญหาของเสียอุตสาหกรรมต้องได้รับการร่วมมือจากทุกฝ่าย ด้วยการสนับสนุนการใช้หลัก 3Rs คือ Reduce Reuse และ Recycle รวมถึงสนับสนุนให้ทำตามหลักในการจัดการของเสียด้วยการลดการฝังกลบของเสียเป็นศูนย์ (Zero Waste to Landfill) ซึ่งจากการที่ประเทศไทยเกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการของเสีย ทำให้ส่งผลกระทบต่อทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านสุขภาพ ด้านเศรษฐกิจ และด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการรณรงค์ให้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อเป็นการลดของเสีย และลดภาระหลุมฝังกลบ

งานวิจัยนี้สนใจของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกที่เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศไทย โดยประเทศไทยเป็นอันดับสองของโลกในการส่งออกผลิตภัณฑ์แว่นตา (สถาบันพลาสติก, 2559) โดยโรงงานที่ผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกในประเทศไทยมีจำนวนทั้งสิ้น 28 โรงงาน เกิดของเสียประมาณ 52,000 ตันต่อปี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) โดยเฉพาะเลนส์แว่นตาที่ทำมาจากโมโนเมอร์ซึ่งเป็นส่วนผสมในการผลิตเลนส์แว่นตาชนิด Trivex และเลนส์แว่นตาชนิด CR-39 โดยโมโนเมอร์จะถูกหลอมเหลว แล้วจึงนำมาฉีดใส่แม่พิมพ์ที่ทำจากกระจก ผ่านการอบขึ้นรูปด้วยความร้อน นำไปเจียขอบเลนส์เพื่อส่งไปใช้งานต่อไป โดยเศษวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้น คือ เลนส์ที่ผ่านคัดออกเนื่องจากไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ เศษเลนส์ขนาดเล็กจากการเจีย และโมโนเมอร์จากขั้นตอนฉีดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งปริมาณเศษพลาสติกจากการผลิตเลนส์ในปีหนึ่ง ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมีปริมาณถึง 2,214 ตัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) โรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกได้มีการนำของเสียไปรีไซเคิล โดยการนำเข้าไปในกระบวนการผลิตอีกครั้งหนึ่ง ส่วนที่เหลือที่ใช้งานไม่ได้แล้วถูกกำจัดด้วยการฝังกลบ ส่วนของเสียอีกประเภทหนึ่งนอกจากเศษพลาสติก คือ ของเสียกากตะกอน ประกอบด้วยกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม และกากตะกอนการเจียแม่พิมพ์ โดยมีปริมาณถึง 3,235 ตัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) ซึ่งของเสียกากตะกอนทั้งหมดถูกกำจัดด้วย

การฝังกลบ หากสามารถนำเศษวัสดุเหล่านี้ มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ จะเป็นการช่วยลดภาระของหลุมฝังกลบ และได้ประโยชน์เพิ่มขึ้นจากการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

จากการเกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดการของเสียในอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก ส่งผลให้มีปริมาณของเสียไปสู่หลุมฝังกลบปริมาณมากดังกล่าวข้างต้น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis : MFA) โดยศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกในเขตโรงงานที่เป็นพื้นที่ในการศึกษา โดยพิจารณาการไหลของวัสดุที่เข้ามาในกระบวนการผลิต จนถึงเส้นทางในการจัดการของเสียประเภทต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์สภาพปัญหา และเสนอแนวทางในการจัดการของเสียที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจ และพัฒนาการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก

จากการวิเคราะห์การไหลของวัสดุดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถจำแนกของเสียออกเป็นประเภทต่าง ๆ และทราบวิธีในการกำจัดของเสียแต่ละประเภท ซึ่งวิธีการจัดการของเสียที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้ คือ ของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ เนื่องจากของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบยังสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้อีก และยังสามารถคล้องกับหลักในการจัดการของเสียด้วยการลดการฝังกลบของเสียเป็นศูนย์ (Zero Waste to Landfill)

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการศึกษาการรีไซเคิลกากตะกอน ซึ่งกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม และกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ หลังจากตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นด้วยวิธี XRF พบว่ากากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวมมีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ของเสียกากตะกอนดังกล่าวจึงมีศักยภาพในการประยุกต์เป็นวัสดุในการผสมปูนซีเมนต์ ส่วนตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ นอกจากจะพบซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังพบแร่ธาตุที่สำคัญ คือ ซีเรียมออกไซด์ เนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกใช้ซีเรียมออกไซด์ในการขัดกระจกแม่พิมพ์เพื่อเตรียมพื้นผิวของกระจกแม่พิมพ์ (Kazuhiro Kato et al., 2000) ซีเรียมหากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ร่างกายสามารถได้รับผ่านทางหายใจ ทำให้เกิดอาการระคายเคือง จาม ไอ และยังสามารถทำให้เกิดอาการปอดอักเสบ (pneumonitis) เนื่องจากปอดเต็มไปด้วยฝุ่นผง ดังนั้นในการนำกาก

ตะกอนเหล่านี้มีรีไซเคิล นอกจากจะเป็นการลดของเสียสู่หลุมฝังกลบ และยังลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับสุขภาพมนุษย์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ เพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการขุดพื้นผิวแม่พิมพ์ และศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่ใช้กากตะกอน 2 ชนิด คือกากตะกอนบำบัดน้ำเสียรวม และกากตะกอนจากการขัดเจียแม่พิมพ์ เป็นวัสดุผสมทดแทนในการผลิตมอร์ตาร์ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตะกอนสามชนิดที่นำมาทำทดแทนทรายในการผลิตมอร์ตาร์ ที่ส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุก่อสร้าง เช่น ความหนาแน่น (Density) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินปริมาณของเสีย และวิธีการกำจัดของเสียของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis)

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนผสม และระยะเวลาที่เหมาะสมในการบ่มมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสีย ได้แก่ ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์ ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ที่ใช้เป็นส่วนผสมทดแทนทรายในการผลิตมอร์ตาร์

1.2.4 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์ ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ที่นำมาแทนที่ทรายในการผลิตมอร์ตาร์ ส่งผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ในด้านกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) เป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก เพื่อทำให้ทราบถึงปริมาณองค์ประกอบของของเสียที่เกิดขึ้น

1.3.2 ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกมีซีเรียม อยู่ในรูปซีเรียมออกไซด์ร้อยละ 13 สามารถใช้วิธีการทางเคมี และฟิสิกส์ เพื่อนำซีเรียมกลับมาใช้ ประโยชน์ภายในโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกได้

1.3.3 ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ของโรงงานผลิต เลนส์แว่นตามือองค์ประกอบหลักคือซิลิกา และอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในการทำมอร์ตาร์เพื่อใช้ในการก่อสร้างได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ใช้ฐานข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2558

1.4.2 สํารวจเก็บข้อมูลปริมาณ และองค์ประกอบของของเสีย จากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตา พลาสติก

1.4.3 ใช้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis :MFA) เพื่อศึกษาเส้นทาง ของของเสียไปสู่แหล่งกำจัด

1.4.4 ทำการทดลอง (Lab scale) การรีไซเคิลตะกอนอย่างน้อย 3 ชนิด

1.4.5 ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์ เก็บจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยเก็บ ตัวอย่าง 1 ครั้ง เก็บตะกอนส่วนที่แยกน้ำออกแล้ว

1.4.6 ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ เก็บจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง เก็บตะกอนส่วนที่รีดน้ำออกแล้ว

1.4.7 ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม นำมาจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก เป็น ตะกอนที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงานโดยใช้วิธีทางชีวภาพ

1.4.8 ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ โดยใช้วิธีการชะ ด้วยกรดซัลฟูริก กรดออกซาลิก และกรดไนตริก ทำการทดลองด้วยชุดรีฟลักซ์

1.4.9 ศึกษาการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ เลนส์ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยแทนที่ใน อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 และใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน และทำ การทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ เทียบกับมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 15-2547 (มอก. 15-2547)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสถานการณ์การจัดการของเสีย รวมถึงปริมาณและองค์ประกอบของของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกในปัจจุบัน

1.5.2 ได้แนวทางในการกลับนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงทำแม่พิมพ์

1.5.3 ทราบถึงอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมของของเสีย ได้แก่ ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์ และตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม ที่ใช้เป็นส่วนผสมทดแทนในการผลิตมอร์ตาร์ และยังช่วยประหยัดต้นทุนในการซื้อทรายมาใช้ในการทำมอร์ตาร์ หรือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ

1.5.4 ได้แนวทางในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

1.5.5 ได้แนวทางในการจัดการของเสียตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก ได้แก่ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียรวม ตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก (ดังภาพที่ 3-2 ฝั่งแสดงกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก) ส่วนแรก คือ โรงงานเตรียมแม่พิมพ์ โดยกระบวนการจะเริ่มจากกระจกแม่พิมพ์ถูกส่งไปยังกระบวนการเจียขอบแม่พิมพ์ โดยในส่วนนี้จะเกิดของเสีย คือ กากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ (W1) และน้ำเสียจากการล้างแม่พิมพ์ หลังจากแม่พิมพ์ผ่านการเจียขอบแล้วจะถูกส่งไปยังกระบวนการขัดผิวหน้าแม่พิมพ์โดยใช้แร่ธาตุซีเรียมเพื่อเตรียมพื้นผิวให้มีความเรียบ หลังจากนั้นตะกอนของแร่ธาตุซีเรียมและน้ำที่ใช้ล้างแม่พิมพ์จากการเจียและการขัดผิวแม่พิมพ์จะถูกส่งไปยังโรงบำบัดน้ำเสียโรงทำแม่พิมพ์เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอน หลังจากบำบัดน้ำเสียแล้วพบว่าน้ำเสียยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำในส่วนนี้จึงต้องส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงานต่อไป ส่วนกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ (W2) จะผ่านการรีดน้ำ และถูกส่งกำจัดโดยหลุมฝังกลบ

กระบวนการผลิตเลนส์ส่วนที่สอง คือ กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก หลังจากที่ได้แม่พิมพ์ที่พร้อมใช้งานจากกระบวนการเตรียมแม่พิมพ์แม่พิมพ์จะถูกส่งมายังโรงงานผลิตเลนส์ โดยจะผ่านกระบวนการเติมโมโนเมอร์ และกระบวนการอื่น ๆ จนได้เลนส์แว่นตาพลาสติกออกมา ในส่วนนี้น้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นน้ำเสียที่ใช้ในกระบวนการผลิตเลนส์ จะถูกส่งไปกำจัดที่ระบบบำบัดน้ำเสียรวม

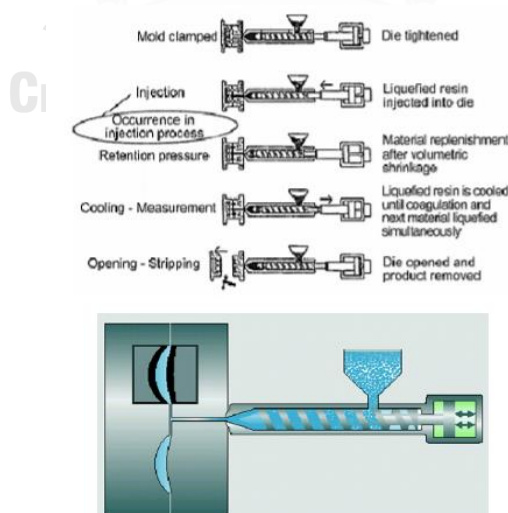
น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงาน นอกจากจะมีน้ำเสียที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงทำแม่พิมพ์ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเลนส์ และยังมีน้ำที่ผ่านการ อูบโภาค บริโภาค ภายในโรงงานถูกรวบรวมส่งที่โรงบำบัดน้ำเสียรวมนี้ โดยระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบชีวภาพแบบฟิล์มตรึง (Biofilm System) ซึ่งน้ำถูกรวบรวมมาบำบัดที่โรงบำบัดน้ำเสียรวมเป็นจุดสุดท้ายก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก โดยในกระบวนการบำบัดน้ำเสียรวมจะทำให้เกิดตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม (W3) กากตะกอนที่เกิดขึ้นถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ

กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยวิธีการฉีดแบบ

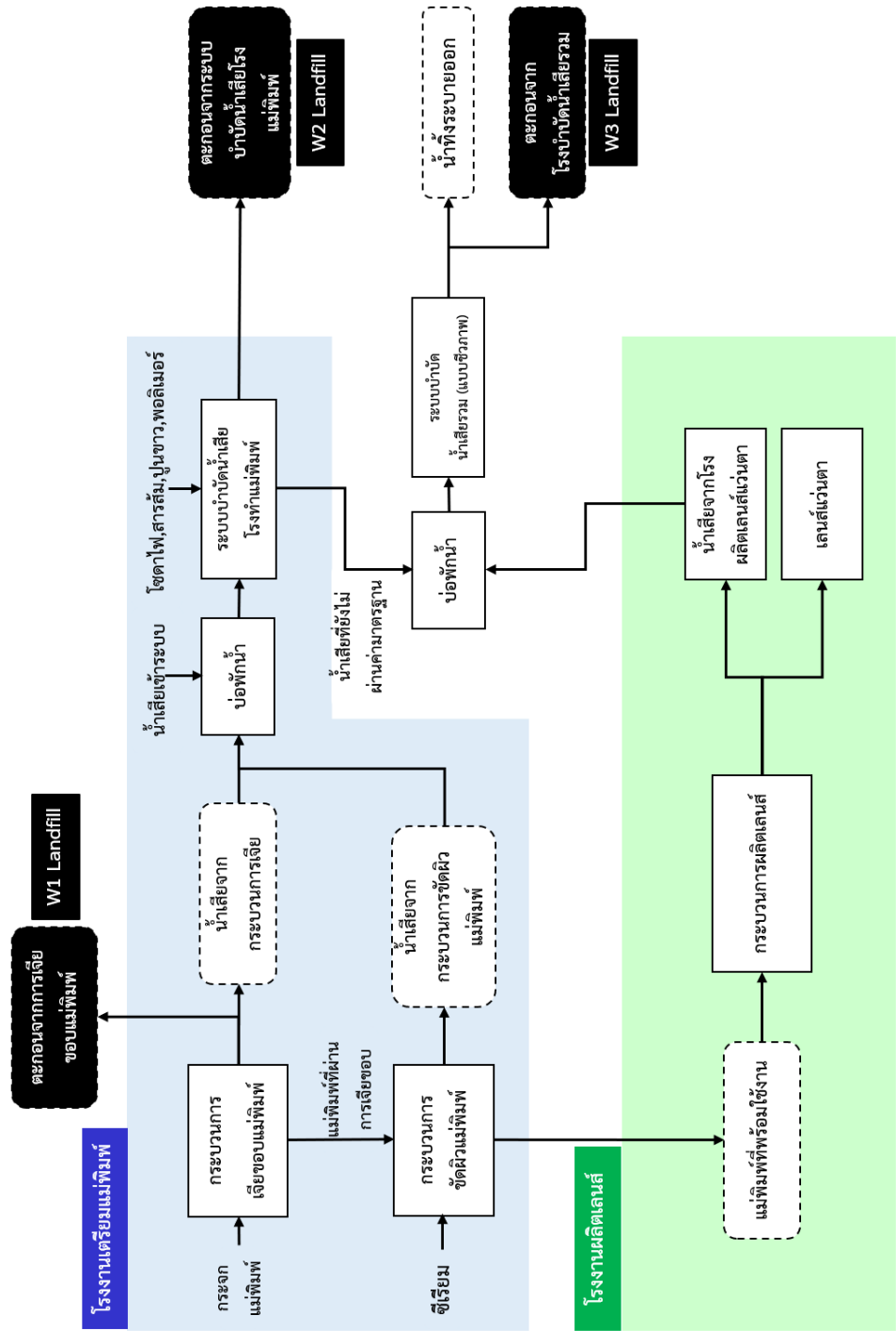
การขึ้นรูปเลนส์สายตาโดยวิธีการฉีดแบบ (Injecting Molding) หลักการของกระบวนการฉีดแบบ คือ การใช้แรงดัน (จากสกรู) เป็นตัวผลักของไหล (กรณีนี้คือโพลีเมอร์เหลว) เข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Mold) จากนั้นทำให้เกิดการแข็งตัวก่อนที่จะทำการถอดแบบ ดังภาพที่ 2-1 ดังนั้นส่วนประกอบที่เป็นหัวใจสำคัญก็คือ ส่วนการฉีด (Injection Unit) และส่วนการยึดแม่แบบ (Clamping Unit)

โดยส่วนการฉีดจะทำหน้าที่อัดโพลีเมอร์เหลวเข้าไปในแม่แบบด้วยแรงดันสูงเนื่องจากความหนืดของโพลีเมอร์เหลวมีค่าสูง ดังนั้นส่วนที่เป็นการยึดแม่แบบจะต้องทำการยึดแม่แบบที่ประกบกันอยู่ด้วยแรงที่มากพอที่จะไม่ทำให้พลาสติกหลอมดันแม่แบบเปิดหรือเกิดครีบ (Flashing) ขึ้นที่ผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนโดยทั่วไปของกระบวนการนั้นสามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนการป้อนวัสดุเข้าสู่กระบวนการและการหลอมเหลวรวมถึงการผสมให้วัตถุดิบเข้ากันเป็นเนื้อเดียวเพื่อพร้อมสำหรับการฉีด
- ขั้นตอนการฉีดโพลีเมอร์เหลวเข้าสู่แม่แบบ ในขั้นนี้หน้าที่ของสกรูคือการผลักหรือฉีดโพลีเมอร์เหลวเข้าสู่แม่แบบ
- ขั้นตอนการทำให้โพลีเมอร์เหลวเกิดการแข็งตัว และขั้นการถอดแบบ



ภาพที่ 2- 1 กระบวนการขึ้นรูปเลนส์โดยวิธีฉีดแบบ



ภาพที่ 2- 2 กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

2.2 ของเสียจากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

ในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก ดังภาพที่ 2-2 ประกอบด้วย 2 หน่วยหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดกากตะกอน คือ โรงทำแม่พิมพ์ และระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงาน โดยของเสียประเภทกากตะกอนจากโรงขัดเจียแม่พิมพ์ประกอบด้วยกากตะกอนจากการขัดเจียแม่พิมพ์ และกากตะกอนจากการใช้แร่ซีเรียมในการขัดเจียแม่พิมพ์โดยกากตะกอนในส่วนนี้เกิดจากระบบบำบัดเสียของโรงงานขัดเจียแม่พิมพ์ ใช้ระบบบำบัดเสียแบบเคมี ซึ่งมีการเติมสารเคมีในการช่วยตกตะกอนเพื่อบำบัดน้ำเสีย และตะกอนส่วนสุดท้ายคือกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี จากกระบวนการเติมสารช่วยในการตกตะกอนส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะใช้สารส้ม เนื่องจากสารส้มมีประจุบวกที่มากจะเข้าจับสารแขวนลอยต่าง ๆ ในน้ำเสียซึ่งเป็นประจุลบ หลังจากการกำจัดสารแขวนลอย จะเกิดตะกอนของสารแขวนลอย ซึ่งมีส่วนประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) และมีแร่ธาตุหลักที่สำคัญคือ ซีเรียมปะปนอยู่ในตะกอนด้วย ซึ่งกากตะกอนนี้ควรได้รับการกำจัด หรือนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม

2.2.1 ปริมาณของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

ประเภทของเสียจากตะกอนที่ได้จากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 ได้จัดของเสียตามรหัสของเสียดังตารางที่ 2-1 ซึ่งแสดงประเภทของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกปริมาณของเสียทั้งหมดจำนวน 3,235 ตัน โดยกากตะกอนที่นำมาศึกษานี้เป็นกากตะกอนจาก บริษัท ไทยออปติคอลลูบ จำกัด (มหาชน) ซึ่งเกิดเศษกากตะกอนประมาณ โดยของเสียจากบริษัทดังกล่าวจัดอยู่ในรหัสของเสีย 12 01 14 HM คือ ตะกอนที่เกิดจากงานกลึง ตะไบ เจีย ที่มีสารอันตราย จำนวน 10 ตัน และ 19 08 14 คือ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีอื่น ๆ ที่ไม่ใช่รหัส 19 08 13 จำนวน 3,225 ตัน

ตารางที่ 2- 1 ประเภทของเสียกากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

รหัสของเสีย	ของเสียกากตะกอน	รหัส กำจัด	วิธีการกำจัด
10 11 13 HM	ตะกอนจากการบดขีดแก้วที่มีสาร อันตราย	044	เป็นวัตถุติดทนแทนใน เตาเผาปูนซีเมนต์
10 11 14	กากตะกอนจากการบดขีดแก้ว ที่ไม่ใช่ 10 11 13	071	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล
10 11 19 HM	ของเสียที่เป็นของแข็งจากการบำบัด น้ำเสียที่มีสารอันตราย	044	เป็นวัตถุติดทนแทนใน เตาเผาปูน
12 01 14 HM	ตะกอนที่เกิดจากงานกลึง ตะไบ เจีย ที่มีสารอันตราย	075	เผาในเตาเผาเฉพาะสำหรับ ของเสียอันตราย
12 01 15	ตะกอนที่เกิดจากงานกลึง ตะไบ เจีย ที่ไม่ใช่ 12 01 14	071	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล
19 08 12	กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมโดยวิธีชีวภาพที่ไม่ใช่ 19 08 11	071	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล
19 08 13 HM	กากตะกอนที่มีสารอันตรายจากการ บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีอื่นๆ	073 075	ฝังกลบอย่างปลอดภัย เมื่อทำการ ปรับเสถียรหรือรับก้อนแข็งแล้ว เผาในเตาเผาเฉพาะสำหรับ ของเสียอันตราย
19 08 14	กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมโดยวิธีอื่นๆ ที่ไม่ใช่ 19 08 13	071	ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล

(ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558)

2.2.2 การจัดการของเสียกากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

กากตะกอนที่ไม่เป็นอันตรายส่วนใหญ่นิยมกำจัดตะกอนโดยการนำไปถมที่ ซึ่งยังมีปริมาณ
เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดปัญหาด้านที่ดินในการถมที่มีปริมาณจำกัด หรือถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ
ปริมาณมากในทุก ๆ ปี ซึ่งทำให้พื้นที่หลุมฝังกลบลดน้อยลงไปทุกทีทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดอีก
ด้วย ดังนั้นจึงควรที่จะนำกากตะกอนจากมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของ
เสียที่เกิดขึ้น เช่น การนำตะกอนมาทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง การนำตะกอนมาใช้ในอุตสาหกรรม

เครื่องปั้นดินเผา การนำกลับแร่ธาตุที่มีมูลค่าจากตะกอน และการนำตะกอนมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งได้มีการศึกษาการนำตะกอนของเสียมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2- 2 ตัวอย่างการนำตะกอนของเสียมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ

การรีไซเคิล		อ้างอิง
ตะกอน		
ทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง	การใช้ตะกอนบำบัดน้ำเสีย ผสมกับเศษไม้จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันนำไปอัดแท่ง และเผาจนเป็นแท่งเชื้อเพลิง	(สุรียา ชัยเดชทยากุล, 2544)
ทำวัสดุดูดซับ	การใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพ นำมาทำเป็นเม็ด และแบบอิสระ นำมาทำเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก พบว่า Cu, Ni ดูดซับได้ดีที่ pH 5 และ Pb ที่ pH 4 การเข้าสู่สมดุลตะกอนแบบอิสระใช้เวลา 30 นาที ตะกอนอัดเม็ดใช้เวลานาน 5 ชั่วโมง และตะกอนทั้งสองชนิดดูดซับ Pb > Cu > Ni	(อุบลทิศ จังதியานนท์, 2546)
ทำถ่านกัมมันต์	การนำกากตะกอนมาทำถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ โดยใช้สารกระตุ้นทั้งกรดและด่าง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH เวลาในการกระตุ้น 25 ชม. เเผาที่ 800 องศา นาน 30 นาที ใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที พบว่าปรับสภาพกลีเซอรอลดิบได้ร้อยละ 93	(เชาวน์วัศ อรรถานิทธิ์, 2555)
ผลิตเป็นอิฐตัวหนอน	การนำกากตะกอนน้ำเสียของบริษัทที่รับฝังกลบกากตะกอน พบว่าในตะกอนมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม เหล็ก ซิลิคอน และแคลเซียม ซึ่งเหมาะในการทำอิฐ โดยทดสอบอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น และกากตะกอน พบว่าหลังจากทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดพบว่ายิ่งเพิ่มกากตะกอนแรงต้านทานแรงอัดยิ่งลดลง แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ มอก. และสามารถช่วยประหยัดต้นทุนในการทำอิฐตัวหนอนได้ 0.08 บาท/ก้อน	(เอกชัย ลิ้มพัฒนสกุล, 2553)

2.2.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

ของเสียจากตะกอนจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก ประกอบด้วยกากตะกอน 3 ชนิด ประกอบด้วย 1) กากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ 2) กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงเจียแม่พิมพ์ 3) กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียรวม จากการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกในขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นคือการนำกระจกที่เป็นตัวแม่พิมพ์นำมาเตรียมพื้นผิว และเจียขนาดให้ได้ตามที่ต้องการ โดยกากตะกอนตัวแรกที่เกิดขึ้นเกิดจากเจียขอบแม่พิมพ์ซึ่งเป็นกระจกทำให้เกิดตะกอนซิลิกา (SiO₂) ในตะกอนจำนวนมากซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกระจก หลังจากนั้นแม่พิมพ์เลนส์ที่ได้ขนาดแล้วถูกส่งไปเตรียมพื้นผิวเพื่อให้ความใส เรียบ โดยใช้ผงขัดซีเรียม และมีการใช้น้ำล้างซีเรียมออกจากกระจกแม่พิมพ์ หลังจากนั้นน้ำที่ผ่านการล้างซีเรียมถูกส่งเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี มีการเติมสารรวบรวมตะกอน และทำการตกตะกอนเพื่อแยกของแข็งออกจากน้ำ จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงทำแม่พิมพ์นี้ทำให้เกิดตะกอนอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีสีน้ำตาลอ่อน องค์ประกอบหลักๆ ของตะกอนนี้พบว่ามีปริมาณของ ซิลิกา (SiO₂) และ อะลูมินา (Al₂O₃) ในปริมาณที่สูงเช่นกัน และยังพบแร่ซีเรียมที่มาจากกระบวนการขัดผิวแม่พิมพ์ปนอยู่ในตะกอนด้วย หลังจากนั้นน้ำที่ได้จากการแยกตะกอนออกของระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์พบว่ามีค่าที่ไม่ผ่านมาตรฐาน จึงต้องส่งน้ำส่วนนี้เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงงานโดยใช้ระบบแบบชีวภาพ หลังจากผ่านกระบวนการบำบัดน้ำแล้วทำให้เกิดตะกอนชนิดที่ 3 ซึ่งเป็นตะกอนสีดำเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม องค์ประกอบในตะกอน พบว่ามีปริมาณของ ซิลิกา (SiO₂) และ อะลูมินา (Al₂O₃) ในปริมาณที่สูงเช่นกัน

กากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีซิลิกาสูงที่สุด เนื่องจากเศษแม่พิมพ์นั้นเป็นเศษกระจกชิ้นเล็ก ๆ ซิลิกาเป็นส่วนประกอบในกระจกอยู่แล้วจึงพบปริมาณซิลิกาสูงในตะกอนชนิดนี้ โดยลักษณะของตะกอนมีสีขาวเนื้อละเอียด น้ำหนักเบา จากองค์ประกอบทางเคมีที่พบซิลิกาปริมาณสูงนี้ จากองค์ประกอบทางเคมีที่พบซิลิกา และอะลูมินา ปริมาณสูงนี้ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบเป็นอะลูมินา และซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเช่นกัน ดังนั้นตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์จึงน่าจะมีศักยภาพในการนำเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างได้

ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโรงเจียแม่พิมพ์นอกจากจะพบว่ามีปริมาณซิลิกา (SiO₂) และ อะลูมินา (Al₂O₃) ในปริมาณที่สูงแล้วนั้น องค์ประกอบทางเคมีที่พบรองจากสองตัวข้างต้นคือ ซีเรียมออกไซด์ (CeO₂) ซึ่งพบว่าเป็นสารเคมีที่ใช้ในการขัดเจียกระจกแม่พิมพ์ที่ใช้ในโรงงาน คือ ซีเรียม

ออกไซด์ (CeO_2) ดังนั้นตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงเจียมแม่พิมพ์สามารถนำมานำกลับแร่ธาตุ ซิเรียมเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการขัดกระจกของโรงงานได้

ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสยรวมพบว่ามีปริมาณของ ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูง ดังตารางที่ 2-3 เหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนในการก่อสร้าง เนื่องจากสารประกอบในตะกอนที่พบนั้นมีองค์ประกอบคล้ายกับวัสดุพอลิซิลาน ซึ่งเมื่อโดนน้ำแล้วจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน

ตารางที่ 2- 3 องค์ประกอบทางเคมีจากการวิเคราะห์เบื้องต้นของตะกอนทั้ง 3 ชนิด

ตะกอนจากการเจียมแม่พิมพ์		ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์		ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม	
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)	องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)	องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
Al_2O_3	22.1	Al_2O_3	35.9	SiO_2	59.4
SiO_2	21	SiO_2	26.8	ZnO	13.3
P_2O_5	20.9	CeO_2	13.8	K_2O	11
SO_3	8.76	La_2O_3	6.95	Na_2O	7.8
CaO	6.99	ZnO	4.22	MgO	3.29
CeO_2	4.53	K_2O	3.24	Al_2O_3	3.09
Fe_2O_3	4.14	Na_2O	2.7	SB_2O_3	0.0993
La_2O_3	2.3	CaO	1.95	TiO_2	0.094
MgO	2.29	MgO	1.58	CaO	0.0923
ZnO	2.08	Pr_6O_{11}	0.546	SO_3	0.0575

2.3 การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis)

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กล่าวว่า Material Flow analysis (MFA) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่ออธิบายการไหลของวัสดุและพลังงาน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ระบบ ปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่แพร่หลายไม่ว่าจะเป็นเพื่อการควบคุมกระบวนการ (Process Control) การบำบัดน้ำเสียและของเสีย (Waste and Wastewater Treatment) การจัดการสารอาหารในภาคเกษตรกรรม (Agricultural Nutrient Management) การจัดการคุณภาพของน้ำ (Water Quality Management) การฟื้นฟูและอนุรักษ์ทรัพยากร (Resource Conservation and Recovery) การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design) การประเมินวัฏจักรของ

ชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) และอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่การไหลของวัสดุได้ถูก นำมาใช้งาน ทางด้านการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทาง ด้านนิเวศวิทยา อุตสาหกรรม (Industrial Ecology) เป้าหมายหลักของการวิเคราะห์ การไหลของวัสดุ คือ เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และกำหนดยุทธศาสตร์ที่เหมาะสมในการต่อสู้กับปัญหา สิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ของโลก เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การสูญเสียความหลากหลายทาง ชีวภาพ และการเปลี่ยนแปลงเป็นทะเลทราย เป็นต้น

หลักพื้นฐานของการไหลของวัสดุเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม เป็นหลักการที่อาศัยการใช้ สมดุลมวลสาร (Material Balance) กล่าวคือ ปริมาณวัสดุหรือวัตถุดิบที่เข้าระบบ (Input) จะเท่ากับ ปริมาณสุทธิของวัสดุที่สะสมในระบบ (Stock) รวมกับปริมาณวัสดุที่ออกจากระบบ (Output) การ ไหลของวัสดุสำหรับการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม นั้นเป็นวิธีการประเมินอย่างเป็นระบบของ การไหลและสะสมของวัสดุ โดยกำหนดระบบด้วยหลักสำคัญ 2 ประการ คือ พื้นที่และเวลา ในส่วน พื้นที่ของการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม สามารถที่จะควบคุมตั้งแต่พื้นที่ที่มีขนาดเล็กจนไปถึง พื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ขอบเขตบริษัท หรืออาคารสถานที่หนึ่งๆ พื้นที่เขต นิคมอุตสาหกรรม พื้นที่ลุ่มแม่น้ำ พื้นที่ชุมชน พื้นที่จังหวัด จนไปถึงพื้นที่ประเทศ เป็นต้น (IGEs 2008)

ในการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้น MFA สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1) การใช้ MFA ในรูปแบบของ Material Flow Accounting เป็น MFA ที่ ใช้ใน ระดับประเทศหรือภูมิภาค ในการศึกษาวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนวัสดุระหว่าง ด้านเศรษฐกิจ และ สิ่งแวดล้อมตามตัวชี้วัดจะถูกคำนวณเพื่อประเมินระดับของความ หนาแน่นของทรัพยากรของระบบ (Resource Intensity)

2) การใช้ MFA ในห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) ในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ บริษัทหรือผู้ประกอบการจำนวนมาก เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตที่เหมาะสมทั้งทางด้านวัตถุดิบ และพลังงานที่ใช้ ตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้น สามารถนำไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อ หลีกเลี่ยงความเสียหาย และลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยผลจากการใช้ MFA จะ ได้ข้อมูลที่น่าไปสู่การจัดการ การดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายร่วมกับการดำเนินการทางด้าน สิ่งแวดล้อม

3) การใช้ MFA สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ในการใช้เทคนิค MFA ใน การประเมินสิ่งแวดล้อม ระดับยุทธศาสตร์นั้น Material Flow Accounting เป็นวิธีที่สำคัญวิธีหนึ่ง

และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ในการเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินผลกระทบอย่างบูรณาการในการวางแผนการจัดการ นโยบาย มาตรการ ตลอดจนการติดตาม ตรวจสอบ และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย และกำหนดมาตรการที่เหมาะสมทั้งในเชิงพื้นที่ และรายสาขา ตลอดจนใช้ในการประเมินความสามารถในการรองรับของทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมต่อการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ ตลอดจนการผลิตสินค้าและบริการ เช่น ใช้ในการวิเคราะห์รอยเท้าทางนิเวศวิทยา (Ecological Footprint Analysis) ในระดับเทศบาลเมืองยอร์ก ประเทศอังกฤษ ใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำชุมชน และควบคุมการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งด้าน พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติ เป็นต้น

ข้อดี: เป็นการวิเคราะห์เชื่อมโยงในเชิงปริมาณของปัญหาสิ่งแวดล้อม และ กิจกรรมของมนุษย์ เพื่อใช้ในการวางแผนการจัดการ นโยบาย มาตรการ ตลอดจน การติดตามตรวจสอบ การเตือนภัยหรือการออกมาตรการการป้องกันล่วงหน้า อีกทั้ง ยังชี้ให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างภูมิภาคหรือสาขาได้อย่างครอบคลุม ตลอดจน รวบรวมข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกระบบของ กิจกรรมทางเศรษฐกิจ

ข้อเสีย: ต้องการข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้มากเพียงพอ และมีมาตรฐานในการนำวิธีการไปปรับใช้มากขึ้น

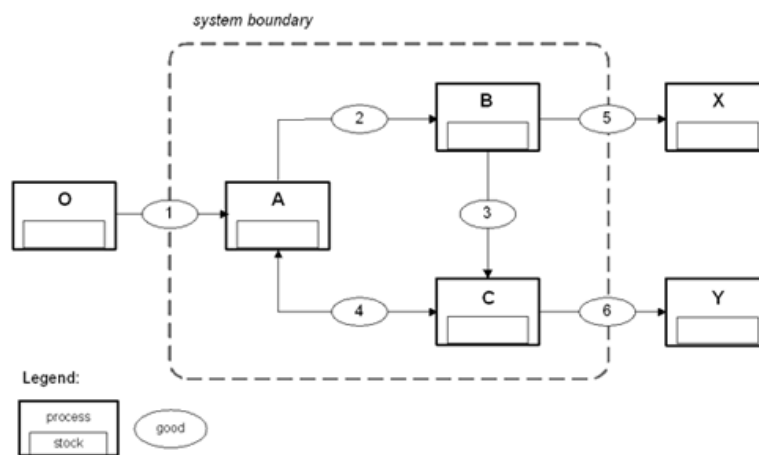
สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของสาร คือ

- ปริมาณสารขาเข้าของแต่ละกระบวนการ (หน่วย) ย่อย และระบบรวมทั้งหมด
- ปริมาณสารขาออกของแต่ละกระบวนการย่อย (หน่วย) และระบบรวมทั้งหมด
- ปริมาณสารสะสม (สต็อก) ในแต่ละกระบวนการ (หน่วย) ย่อย และระบบรวมทั้งหมด

หลักในการวิเคราะห์ จะใช้หลักการทำ สมดุลมวลสาร (Mass Balance) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐาน ของกฎการอนุรักษ์มวล ว่า มวลสารไม่สูญหาย หรือถูกทำลายไป ถ้าพิจารณาระบบ (ดังแสดงในภาพที่ 2-3) ที่มีมวลสารไหลผ่านเข้าออก สมการทั่วไป ของสมดุลมวลสาร ในแต่ละกระบวนการ (หน่วย) ย่อย และระบบคือ

$$\text{สารที่สะสมในระบบ} = \text{สารที่เข้าสู่ระบบ} - \text{สารที่ออกจากระบบ}$$

ในการศึกษาวิเคราะห์เบื้องต้นเราจะสมมติว่า ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) หมายถึง สารที่เข้าและออกคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา



ภาพที่ 2- 3 ผังอย่างง่ายแสดงการไหลของสาร (หรือวัสดุ ผลิตภัณฑ์) อันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์ (ที่มา : Baccini และคณะ (1991) ; Baccini และคณะ (1996) ; Moore (1997) ; Brunner และคณะ (2004))

ขั้นตอนเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์การไหลของสาร อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การวิเคราะห์ระบบ และการเก็บข้อมูล ซึ่งสามารถแยกเป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ ดังนี้ (Baccini และคณะ (1996) Brunner และคณะ (2004) ; Kwonpongsagoon และคณะ, 2007)

1. เลือกขอบเขตของระบบ (System boundary) สารหรือวัสดุ (Substance, Material) และระยะเวลาที่สนใจจะศึกษาเก็บข้อมูล
2. ระบุผลิตภัณฑ์สินค้า กระบวนการผลิต ขนส่ง แปรรูป ที่เกี่ยวข้องกับสารที่สนใจ
3. เขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการย่อย และการไหลของสาร
4. เก็บข้อมูล เช่น ปริมาณผลิตภัณฑ์สินค้า (การผลิต ขนส่ง อุปโภคบริโภค) ปริมาณสินค้าที่หมดสภาพกลายเป็นขยะเพื่อทิ้ง กำจัดหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ปริมาณสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์นั้น ๆ รวมถึงปริมาณมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม
5. คำนวณปริมาณการไหลของสาร ใช้หลักสมดุลมวลสารที่กล่าวแล้วข้างต้น
6. เขียนแผนภูมิเชิงปริมาณสรุปผลการวิเคราะห์ แสดงการไหลของสารทั้งระบบ

ด้วยหลักการและวิธีวิเคราะห์การไหลของวัสดุเบื้องต้น จะทำให้ได้ข้อมูลสนับสนุน นโยบาย การบริหารจัดการวัสดุ ทำให้เข้าใจถึงสาเหตุ ของปัญหาในภาพรวม ทั้งระบบก่อนการตัดสินใจ ดำเนินการใด ๆ

เครื่องมือนี้ได้รับการคิดค้นพัฒนาเพื่อใช้สนับสนุนนโยบาย การจัดการสิ่งแวดล้อมในประเด็น ต่าง ๆ ในประเทศแถบยุโรปมานาน โดยเฉพาะ สวิตเซอร์แลนด์ ออสเตรีย เนเธอร์แลนด์ เดนมาร์ค และสวีเดน สำหรับประเทศไทย เครื่องมือชนิดนี้ ยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก งานวิจัยมีน้อย เมื่อเทียบกับ เครื่องมือชนิดอื่น ๆ หรือมีอยู่บ้าง ก็เป็นเพียงขั้นพื้นฐาน และยังไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้สนับสนุน เชิงนโยบายอย่างจริงจัง

2.4 หลัก 3Rs

3Rs คือ การจัดการของเสียโดยให้ความสำคัญในการลดการเกิดของเสียให้เหลือน้อยที่สุดเป็น ลำดับแรก โดยมุ่งเน้น การใช้วัตถุดิบหรือทรัพยากรการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมาเมื่อเกิด ของเสียแล้วต้องพยายามหาแนวทางการนำกลับไปใช้ซ้ำหรือใช้ใหม่ให้ได้มากที่สุด โดยพิจารณาถึง ศักยภาพการใช้ประโยชน์ของของเสียแต่ละประเภทและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เหลือของเสียที่ จะต้องบำบัด/กำจัด ในปริมาณน้อยที่สุด โดยเลือกใช้วิธีการกำจัดของเสียเป็นวิธีสุดท้าย ซึ่ง 3Rs คือ

- Reduce (ลดการใช้หรือใช้น้อยเท่าที่จำเป็น)
- Reuse (การใช้ซ้ำ)
- Recycle (แปรรูปมาใช้ใหม่)

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการจัดการของเสียที่ดีตามหลัก 3Rs จะต้องมีการดำเนินการ ดังนี้

- มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการดำเนินงานทั้งในส่วนของการผลิตและกิจกรรม สนับสนุนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดการเกิดของเสียให้เหลือน้อยที่สุด
- ใช้วิธีจัดการกับของเสียแต่ละประเภทตามศักยภาพการใช้ประโยชน์ เพื่อให้มีของเสียที่ ต้องถูกส่งไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบในปริมาณน้อยที่สุด
- มีการจัดการของเสียเป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด ตั้งแต่การจัดเก็บของเสีย การนำไปใช้ ประโยชน์ภายในโรงงาน และการนำออกไปบำบัด/กำจัดภายนอกโรงงาน

ปัจจุบันมีการนำแนวคิด 3Rs ไปประยุกต์ใช้ ร่วมกับการทำเทคโนโลยีสะอาด (CT) หรือ ระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม (EMS) ในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ในเบื้องต้น เมื่อได้

ดำเนินการอย่างจริงจัง ผู้ประกอบการหลายรายพบว่าการใช้หลัก 3Rs ทำให้การปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถลดต้นทุนการผลิตได้อีกทั้งยังเป็นการสร้าง ภาพลักษณ์และความรู้สึกที่ดีให้แก่ลูกค้า รวมถึงสร้างทัศนคติที่ดี และการยอมรับของชุมชน โดยรอบ

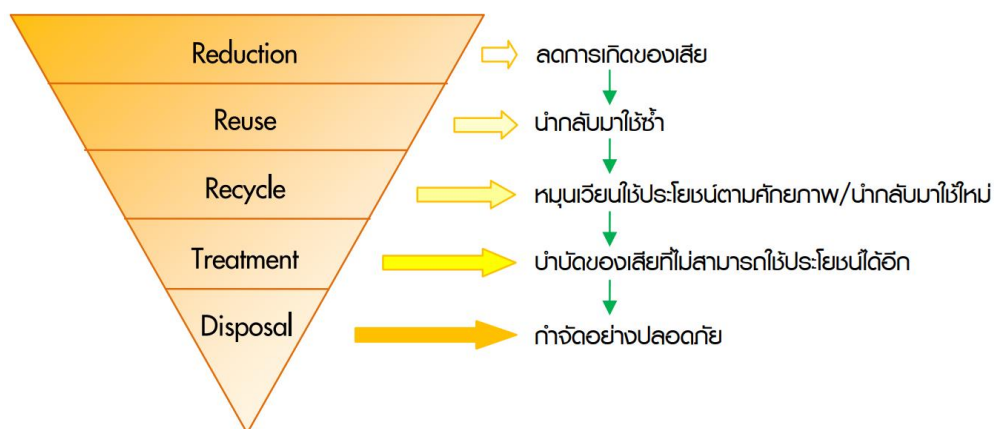
ประกอบกิจการโรงงานส่วนใหญ่ที่มีการจัดการของเสียที่ระบุว่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การจัดการของเสียตามหลัก 3Rs ดำเนินการอย่างได้ผลและมีประสิทธิภาพ คือ ความตระหนัก ความมุ่งมั่น และการสนับสนุนของผู้บริหาร เนื่องจากเป็นแรงผลักดันที่สำคัญที่สุด ที่ทำให้พนักงานปฏิบัติตามและร่วมกันพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถหาแนวทางจัดการ ของเสียที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับรูปแบบของโรงงานมากที่สุด

2.4.1 แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการของเสียภายในโรงงานตามหลัก 3Rs

แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการของเสียภายในโรงงานตามหลัก 3Rs ที่พัฒนาขึ้น มีวัตถุประสงค์ เพื่อผู้ประกอบการโรงงานได้ใช้เป็นแนวทางในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น โดยมีจุดมุ่งหมายสำคัญ คือ ลดปริมาณของเสียที่โรงงานจะต้องส่งไปกำจัดให้เหลือน้อยที่สุด โดยลดของเสียที่แหล่งกำเนิด และ การนำกลับไปใช้ซ้ำหรือใช้ใหม่ตามศักยภาพการใช้ประโยชน์ของเสียแต่ละชนิด ขณะเดียวกัน การจัดการของเสียในแต่ละขั้นตอนเป็นการดำเนินการที่สอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมายทั้งหมด การจัดการของเสียให้ได้ผลต้องใช้อย่างหลายวิธีการในการดำเนินการร่วมกัน ตั้งแต่ต้นทางจนถึง ปลายทาง รวมทั้งคำนึงถึงเหตุปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือเป็น “การจัดการของเสียแบบผสมผสาน”

การจัดการของเสียแบบผสมผสาน (Integrated Waste Management) หมายถึง การดำเนินการจัดการของเสียที่เหมาะสมกับลักษณะสมบัติ ของของเสีย ด้วยการคำนึงถึงการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและ พลังงาน รวมทั้งการป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อมให้มีคุณภาพที่ดีอย่างยั่งยืน

การจัดการของเสียแบบผสมผสานนี้จะต้องประกอบด้วยแนวคิดการจัดการที่เริ่มตั้งแต่การลด การเกิดของเสียที่แหล่งหรือกระบวนการที่ก่อให้เกิดของเสีย (Source Reduction) การใช้ซ้ำของเสีย/ วัสดุที่ยังใช้งานได้ (Reuse) การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ในรูปแบบต่างๆ ก่อนที่จะนำส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ อีกไปบำบัด (Treatment) และการกำจัดของเสีย (Disposal) อย่างปลอดภัย ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2- 4 แนวทางการจัดการของเสียแบบผสมผสานตามหลัก 3Rs

การที่จะจัดการของเสียอย่างไรและด้วยวิธีการใดนั้น ต้องทราบข้อมูลของเสียก่อนเป็นลำดับแรกได้แก่ ชนิดและปริมาณของของเสีย เพื่อพิจารณาการจัดลำดับความสำคัญที่จะต้องดำเนินการ, ลักษณะสมบัติของของเสีย เพื่อศึกษาและวางแผนการใช้ประโยชน์ของเสียได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ในระยะเริ่มแรกการเก็บข้อมูลดังกล่าวอาจดำเนินการแบบค่อยเป็นค่อยไป เมื่อมีข้อมูลที่ถูกต้องและชัดเจนแล้วจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการวางแผนการจัดการของเสีย การทำโครงการ การนำของเสียมาใช้ประโยชน์ตลอดจนการตัดสินใจในการดำเนินการหรือลงทุนเพิ่มเติม แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการของเสียภายในโรงงานตามหลัก 3Rs จึงเป็นวิธีปฏิบัติสำหรับ การจัดการกับของเสียในแต่ละขั้นตอนการจัดการของเสียแบบผสมผสาน โดยประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

1. แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการลดของเสียที่แหล่งกำเนิด
2. แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการคัดแยกและจัดเก็บของเสียที่เกิดขึ้น
3. แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการนำของเสียกลับไปใช้ซ้ำหรือใช้ใหม่
4. แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการบำบัด/กำจัดของเสีย

2.5 ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)

ซีเรียมเป็นธาตุแรกของหมู่ธาตุแลนทานอยด์ (lanthanoids) หรือแลนทาไลต์ (lanthanides) หรือแลนทานอน (lanthanon) ชื่อ lanthanoids เป็นชื่อที่รับรองของ IUPAC อาจเรียกธาตุในหมู่นี้

ว่าธาตุ rare earths ได้เช่นเดียวกัน หมู่ธาตุแลนทานอยด์มีทั้งหมด 14 ธาตุ (Ce, เลขอะตอม 58 ถึง Lu, เลขอะตอม 71) เป็นหมู่ย่อย (subgroup) ของหมู่ III B ในตารางธาตุ

ซีเรียมเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในธาตุกลุ่มแรเอิร์ธ โดยแร่ธาตุหลักของซีเรียมเป็นแร่ธาตุกลุ่ม bastnaesite, monazite, loparite และ Lateritic เป็นดินเหนียวที่สามารถดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออน ปัจจุบันพบว่าซีเรียมทั่วโลกมีปริมาณสำรองอยู่ 30 ล้านตัน โดยถูกนำขึ้นมาผลิตเป็นซีเรียมออกไซด์ประมาณ 54,400 ตัน (คิดเป็น 32% ของธาตุกลุ่มแรเอิร์ธทั้งหมด) โดยราคาปัจจุบันของซีเรียมออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 3 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ กิโลกรัม การใช้งานซีเรียมในปัจจุบัน ได้แก่ สารเติมแต่ง, ตัวเร่งปฏิกิริยา, ชัด, สารเรืองแสง, โดยพบว่ามีการใช้แรเอิร์ธออกไซด์ทั้งหมดประมาณ 40,000 ตัน ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วประมาณ 16,000 ตันสำหรับงานขัด

ซีเรียมมีสมบัติพิเศษประการหนึ่งคือในสถานะของเหลวมีความหนาแน่นมากกว่าในสถานะของแข็ง ณ จุดหลอมเหลวของมัน (ความดัน 1 บรรยากาศ) ในเชิงการค้า ซีเรียมในรูปซีริกออกไซด์ (CeO₂) มีความสำคัญที่สุดใช้ในการขัดกระจกโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระจกจำพวก precision optical glasses นอกจากนี้ยังใช้ในการเคลือบผิว เป็น refractory ออกไซด์ (ออกไซด์ที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง) ทำคาโทด, capacitors, กิ่งตัวนำ และเป็นตัวเร่งของบางปฏิกิริยา

2.5.1 ลักษณะสมบัติซีเรียมออกไซด์ (CeO₂)

ลักษณะสมบัติเฉพาะที่สำคัญของซีเรียมออกไซด์ (ดังตารางที่ 2-4) คือ สารที่ทนความร้อนได้สูง และมีออกซิเจนในโครงสร้างผลึกและสามารถถ่ายเทออกซิเจนออกไปสู่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย (high oxygen ion conductivity) ที่อุณหภูมิประมาณ 500-800 องศาเซลเซียส ซีเรียมออกไซด์จึงเป็นที่รู้จักในฐานะเป็นสารเชื้อเพลิงในรูปของแข็ง (solid oxide fuel cell, SOFC) ซีเรียมออกไซด์จึงสามารถให้ออกซิเจนกับปฏิกิริยาเผาไหม้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Deshpande และคณะ, 2005)

จากการที่ผลึกโครงสร้างของซีเรียมออกไซด์เป็นโครงสร้างในรูปแบบของ fluorite ทำให้อะตอมของออกซิเจนอยู่ในทุกระนาบของโครงสร้างผลึก จึงทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้เกิดช่องว่างของอะตอมออกซิเจนเกิดขึ้นในโครงสร้างที่จะสามารถหมุนเวียน ออกซิเจนไปตามช่องว่างต่าง ๆ และนำไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยซีเรียมออกไซด์สามารถถูกรีดิวซ์

กลายเป็นซีเรียมออกไซด์ที่มี เลขออกซิเดชันเป็น 3+ ได้ ซึ่งทำให้ขนาดของซีเรียมออกไซด์มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนได้จากลักษณะสมบัติ เฉพาะดังกล่าวของซีเรียมออกไซด์ จึงได้มีการนำซีเรียมออกไซด์นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เซลล์เชื้อเพลิง และสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ในการใช้งานอุตสาหกรรม (Deshpande และคณะ, 2005)

ตารางที่ 2- 4 ลักษณะสมบัติของซีเรียมออกไซด์ (CeO₂)

ชื่อ	Cerium oxide, Cerium (VI) dioxide, Ceric oxide, Ceria
CAS number	1306-38-3
สูตรโมเลกุล	CeO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	172.11 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	7.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	2,400
จุดเดือด	3,500
ลักษณะทั่วไป	ผงสีเหลืองซีด ซีเรียมออกไซด์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นสีน้ำตาล สารไม่ละลายน้ำ (water insoluble) สารไม่ติดไฟ (Non-flammable)

(ที่มา: พวงรัตน์ ขจิตรวิชยานกุล และคณะ, 2555)

2.5.2 การใช้ประโยชน์ซีเรียมออกไซด์ในอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมกระจกและเลนส์ ซีเรียมออกไซด์นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของแก้วโดยซีเรียมออกไซด์จะช่วยให้การป้องกันการได้รับแสงมากเกินไปเข้าสู่แก้ว (solarization) รวมทั้งป้องกันไม่ให้เกิดการขีดของสีบนเลนส์หรือกระจกอีกด้วย นอกจากนี้ซีเรียมออกไซด์นิยมใช้ในการเป็นสารขัดเงา (Polishing agent) สำหรับกระจก แก้ว และเลนส์อีกด้วย (Kilbourn, 2003, Limbach และคณะ, 2008)

อุตสาหกรรมน้ำมัน ซีเรียมออกไซด์นิยมใช้ในการลดการปลดปล่อยอากาศเสียของเครื่องยนต์สำหรับ ยานพาหนะ โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันดีเซล ในปัจจุบันน้ำมันรถที่ใช้กันมากมาจาก ถ่านหิน การเผาไหม้สารไฮโดรคาร์บอนเพื่อให้ได้พลังงานจากน้ำมันจะทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำด้วย แต่หากเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดอากาศเสียทั้งจากสารไฮโดร คาร์บอน

และเขม่าทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ (Wakefield และคณะ, 2008, Ertl และคณะ, 1990, Stern และคณะ, 1984)

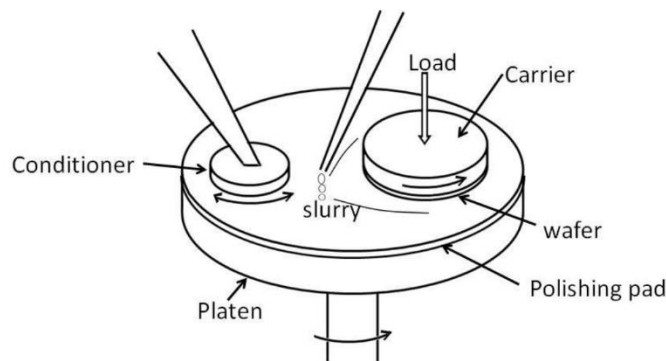
ซีเรียมออกไซด์ เป็นสารที่สามารถเก็บและให้ออกซิเจนจากโครงสร้างผลึกให้กับปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยซีเรียมออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ สารไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงช่วยลดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้และทำให้ลดมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ได้ (HEI, 2001) โดยได้มีงานวิจัยที่แสดงว่าการใช้ซีเรียมออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 ถึง 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในน้ำมัน จะทำให้ลดปริมาณฝุ่นเขม่าที่ออกมามากกว่าร้อยละ 90 โดยใช้ร่วมกับเครื่องกรองฝุ่น (Limbach และคณะ, 2008) และ ได้มีงานวิจัยยืนยันผลว่าการใช้นาโนซีเรียมออกไซด์ในน้ำมันจะทำให้ลด ความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ และลดการปลดปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) และทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ยาวนาน ทำให้ลดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนถึงร้อยละ 15 และทำให้ประหยัดน้ำมันไปร้อยละ 5-9 (Logothetidis, 2003) จากลักษณะที่สำคัญนี้ได้ทำให้มีการใช้นาโนซีเรียมในน้ำมัน โดยในประเทศอังกฤษได้ใช้ซีเรียมออกไซด์เป็นสารเติมแต่งน้ำมันภายใต้ชื่อ EnviroxTM ซึ่งสามารถลดการใช้น้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 6 รวมทั้งจากการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิตของน้ำมันดีเซลพบว่า ซีเรียมออกไซด์สามารถลดผลกระทบอย่างมากเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลทั่วไป (HEI, 2001) อนุภาคนาโนซีเรียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเผาไหม้จึงเรียกว่า combustion-driven nanoparticles (CDNP)

อย่างไรก็ดีจากการที่ซีเรียมออกไซด์เป็นสารที่มีขนาดเล็กและหากใช้สารนี้ในขนาดระดับนาโน จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคนาโนขึ้นในรูปของฝุ่นทั้งในส่วนที่เป็นฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 (PM2.5) และ 10 ไมครอน (PM10) (Pope และคณะ, 1999) ซึ่งฝุ่นเหล่านี้จัดได้ว่าเป็นปัญหาต่อสุขภาพที่สำคัญซึ่งทำให้ต้องมีการศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโนซีเรียมไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งผลของความเป็นพิษของอนุภาคนาโนซีเรียมออกไซด์ในรูป CDNP นั้น ส่วนใหญ่ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัย (Ray และคณะ, 2009)

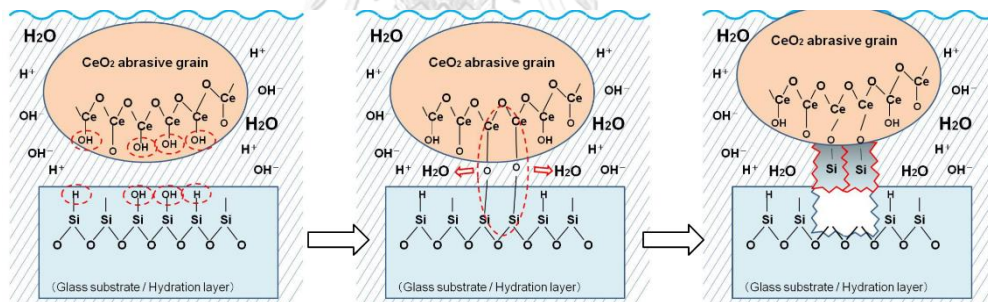
2.5.3 กระบวนการขัดกระจกด้วยซีเรียม

ในกระบวนการขัดจะนำแผ่นกระจก นำมาขัดบนฐานขัดโดยใช้ซีเรียมที่มีลักษณะชั้นเหลวเติมลงบนฐานขัด ดังภาพที่ 2-5 โดยการขัดผิวของกระจกนั้นเป็นการขัดโดยใช้ขัดโดยใช้

กลไกทางเคมี ระหว่างการขัดจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเรียม (Ce^{4+} และ Ce^{3+}) กับแผ่นกระจก (Si-O-H) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนำไปสู่การสร้างสะพาน (Si-O-Ce) ระหว่างแก้วกับอนุภาคของซีเรียม (Borra C.R. และคณะ, 2018) โดยแบ่งเป็นสามขั้นตอนย่อยคือ 1.บนผิวแก้วเกิดปฏิกิริยาไฮเดรต 2. เกิดปฏิกิริยากันระหว่างซีเรียมกับผิวแก้ว โดยมีน้ำเป็นตัวช่วยให้การทำปฏิกิริยา โดยจะเชื่อมกันเป็น (Si-O-Ce) 3. วัสดุบนพื้นผิวแก้วหรือร่องรอยที่อยู่บนผิวกระจกจะถูกกำจัดออกโดยการรวมกันข้างต้น (T. Yamazaki และคณะ, 2010) ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2- 5 กระบวนการขัดแก้วโดยใช้ซีเรียมเป็นตัวขัด



ภาพที่ 2- 6 กลไกการขัดแก้วโดยใช้ผงขัดซีเรียม

2.5.4 การได้รับซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกาย

การได้รับซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกายมีเพียงสองทางหลัก (ดังตารางที่ 2-5) คือ การได้รับทางปาก และการได้รับทางการหายใจ โดยการได้รับทางปากนั้น เมื่อซีเรียมออกไซด์ผ่านระบบทางเดินอาหาร จะเกิดการดูดซับในระบบทางเดินอาหารและในลำไส้เกิดขึ้นต่ำมาก ซีเรียมออกไซด์จึงถูกขับออกทางปัสสาวะหากมีการได้รับทางปาก (Limbach และคณะ, 2005) เส้นทางการได้รับพิษที่สำคัญของซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกายมนุษย์จึงมีเพียงการหายใจเท่านั้น ในขณะที่การได้รับซีเรียมออกไซด์ในเส้นทางปากและผิวหนังนั้นจะถูกขับออกจากร่างกาย และมีผลของความเป็นพิษต่ำ ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตาม

ตามผู้ปฏิบัติงานควรมีการระมัดระวังในการปฏิบัติงานไม่ให้มี การได้รับซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกาย ไม่ว่าจะเป็นเส้นทางใดก็ตาม

ตารางที่ 2- 5 เส้นทางารได้รับ อากาศ และการป้องกันเมื่อซีเรียมออกไซด์เข้าสู่ร่างกาย

เส้นทางการรับเข้าสู่ร่างกาย	อาการ	การป้องกัน
ทางการหายใจ	ระคายเคืองทางเดินหายใจ อาจมีอาการไอ จาม คัดจมูก หายใจลำบาก ซีเรียมออกไซด์ อาจจะเข้าสู่ปอดได้ หากได้รับต่อเนื่องอาจ ทำให้ปอดอักเสบ (pneumonitis) เนื่องจาก ปอดเต็มไปด้วยฝุ่นผง และหายใจได้น้อยลง	ใส่หน้ากากป้องกันการหายใจ ที่ปิดทั้งในส่วนจมูกและปาก ทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน
ทางปาก	ทำให้เกิดการระคายเคืองในระบบทางเดิน อาหาร อาเจียนและท้องเสีย	ใส่หน้ากากป้องกันการหายใจ ที่ปิดทั้งในส่วนจมูกและปาก ทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน
ทางผิวหนัง	ถ้ารับทางผิวหนังอาจเกิดการระคายเคืองมี ผื่นขึ้น เกิดอาการอักเสบทางผิวหนังได้	ใส่เครื่องแต่งกายที่มิดชิดทุก ครั้งขณะปฏิบัติงาน
ทางดวงตา	ถ้าเข้าสู่ดวงตาจะทำให้ตาแดง	สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันดวงตา ทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน

(ที่มา : Limbach LK, 2005)

2.5.5 ของเสียจากการใช้ซีเรียมในการขัด

ของเสียจากตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการขัดกระจกประกอบด้วยแร่ธาตุซีเรียมและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น เหล็ก อลูมิเนียม สังกะสี โซเดียม ซิลิกอน เป็นต้น โดยความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่แร่ธาตุแอร์รี่ โดยจะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของแก้ว สารเติมแต่ง หรือสารเคมีในการ ตกตะกอน โดยคุณสมบัติของผงขัดจะค่อยๆลดลง เนื่องจากมีการผสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพในทางลบของผงขัด โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นหลังจากการขัดจะถูกส่งไปตกตะกอนของแข็ง หลังจากนั้นแยกส่วนน้ำกับตะกอน ตะกอนส่งไปรีดน้ำออกแล้วส่งไปกำจัดที่หลุมฝังกลบ ซึ่งจากการที่นำตะกอนที่มีส่วนผสมของซีเรียมไปทิ้งที่หลุมฝังกลบนี้เป็นการนำไปสู่การสูญเสียแร่ธาตุแอร์รี่ที่มีค่า นอกจากนี้ในการกำจัดยังเสียค่าใช้จ่ายอีกด้วย

2.6 คอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านราคาและคุณสมบัติต่าง ๆ คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หินทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะคือ ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste), ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar) และมอร์ต้าผสมกับหินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete) เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง ที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยซีเมนต์เพสต์จะช่วยเสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม และช่วยหล่อลื่นคอนกรีตขณะหล่ออีกทั้งให้กำลังแก่คอนกรีต รวมถึงป้องกันการซึมผ่านของน้ำมวลรวมเป็นตัวแทรกประสานอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน น้ำช่วยในการผสมคอนกรีต ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ และหล่อลื่นคอนกรีตให้เหลวสามารถเทได้ และน้ำยาผสมคอนกรีต จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นการก่อตัว ความสามารถในการเท กำลังอัด เป็นต้น

2.6.1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีเป็นสิ่งที่สำคัญที่ควรศึกษาเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์และเลือกใช้ปูนซีเมนต์ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับงาน

2.6.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากตารางที่ 2-6 แสดงถึงองค์ประกอบและสัญลักษณ์ของออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งออกไซด์หลัก (Major Oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นองค์ประกอบรอง (Minor Oxides) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Na₂O และ K₂O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P₂O₅) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูป ของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่างคือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, และย่อว่า C_3S
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, และย่อว่า C_2S
3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) คือ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ และย่อว่า C_3A
4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$

และย่อว่า C_4AF

ตารางที่ 2- 6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ตัวอย่างที่ ปูนซีเมนต์
CaO	C	60 - 67	64.1
SiO ₂	S	17 - 25	20.2
Al ₂ O ₃	A	3 - 8	5.9
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6.0	3.2
MgO	M	0.1 - 4.0	1.0
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8	0.1
K ₂ O	K	0.1 - 1.8	0.4
SO ₃	S	0.5 - 3.0	2.6
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5 - 3.0	0.8
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	LOI	0.1 - 3.0	1.2
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)	-	0.20 - 0.75	0.5

(ที่มา: ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

2.6.1.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF เนื่องจากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติที่สำคัญได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2- 7 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

(ที่มา: ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต

C₃S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม สีเทาแก่ ที่อุณหภูมิในเตาเผา 1,250 องศาเซลเซียส C₃S สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลาย ตัวนี้ค่อนข้างช้า และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C₃S จะมีเสถียรภาพและ จะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ เมื่อผสม C₃S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก ปฏิกิริยาระหว่าง C₃S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต

C₂S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C₂S บริสุทธิ์มีอยู่ 4 รูปแบบ คือ C₂S ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเมื่อเย็นตัวลงจะแปลงสภาพเป็น 'C₂S ซึ่งเปลี่ยนเป็น C₂S ที่อุณหภูมิต่ำลงและแปลงสภาพเป็น C₂S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ C₂S อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้การแปลงสภาพจาก C₂S เป็น C₂S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น C₂S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C₂S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิง (Twinning) เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CS ค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ C₂S ค่อนข้างช้าและช้ากว่า C₃S มาก คือ เริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป

3) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่าง เป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน ปฏิกริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เฟสตั้งตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมาก คือ กว่า 880 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมาก คือสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S

4) เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์

C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกริยาและทำให้เฟสตั้งตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมากเช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อย

2.6.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่าง ๆ มาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2-8

ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้ว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตห่อ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและใช้ในการก่อสร้าง ตาม ปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานราก ของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูง ในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เช่น ปูน ซีเมนต์ตราช้าง ปูนซีเมนต์ตราที่พีไอ สีแดง ปูนซีเมนต์ตราภูเขา ปูนซีเมนต์ตราอินทรีเพชร เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็น ปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) และ ให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลาย ซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ทำให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง เพราะมีปริมาณ C_3S สูง และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม หรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาค้ำคอนกรีต เสาค้ำไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เช่น ปูนซีเมนต์ตราช้างรับกำลังอัดเร็ว เป็นต้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมาก เพราะมีปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูง คือโดยเฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้งานในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อนคอนกรีตหรือตอม่อขนาดใหญ่ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทยต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิต

ตารางที่ 2- 8 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1-5

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C_3S	49	46	56	25	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน ($\text{ชม.}^2/\text{กรัม}$)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน ($\text{กก.}/\text{ชม.}^2$)	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน ($\text{จูล}/\text{กรัม}$)	400	330	430	270	310

(ที่มา: ปรินญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

2.6.2 ปฏิกริยาทางเคมีที่เกี่ยวกับคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ง่ายได้ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)” ทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดใน 2 ลักษณะ คือ 1) อาศัยสารละลาย โดยปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนเหล่านี้ผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ 2) ปฏิกริยาระหว่างของแข็ง โดยเกิดขึ้นที่ผิวของของแข็งโดยตรงไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ส่วนอีกปฏิกิริยาหนึ่ง คือ “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)” ซึ่งช่วยให้เกิดการแข็งตัว และยึดเกาะกับวัสดุผสมได้ดีขึ้น เป็นการช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีต โดยสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และน้ำ (H_2O) โดยปฏิกิริยาทั้งสองที่เกิดขึ้น มีดังนี้

1.ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

เกิดจากแคลเซียมซิลิเกต ($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), ทำปฏิกิริยากับ น้ำ (H_2O) ก่อให้เกิด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการที่ (1) และ (2)



2.ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่ไม่มีความสามารถเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะตัวเป็นวัสดุประสานเสริมความแข็งแรง ซึ่งส่วนประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน คือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ได้ผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มเสริมความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต ดังสมการที่ (3) และ (4)



2.7 มอร์ตาร์

มอร์ตาร์ (Mortar) เป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ประเภทลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสม และหน่วงการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 494 มอร์ตาร์ ถูกออกแบบเพื่อใช้สำหรับงานเทพื้นระดับพื้นผิวคอนกรีต ที่ไม่ต้องการกำลังอัด หรือ เทหล่อเลี้ยง ท่อก่อนการลำเลียงคอนกรีตโดยการใช้ปั๊ม ปัจจุบันมีสินค้าให้เลือกตามปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสม ตั้งแต่ 300 กก. จนถึง 450 กก. ที่ค่าการยุบตัว 5.0 -10.0 ซม. การรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ เป็นสิ่งที่แสดงความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ถ้าการรับกำลังอัดได้สูง ก็สามารถแสดงได้ว่า ปูนซีเมนต์ นั้นมีคุณภาพดี ซึ่งในอาคารประเภทต่าง ๆ จะให้ส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตนี้ ทำหน้าที่รับแรงอัด เป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นความแข็งแรงของปูนซีเมนต์จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาให้รับ กำลังได้ตามที่กำหนดไว้ การทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์นี้ จะใช้อัตราส่วนของส่วนผสมตาม มาตรฐานที่จะใช้ทดสอบ จะใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน และน้ำในปริมาณ หนึ่งโดยน้ำหนัก ทำการผสมตามวิธีมาตรฐานเครื่องผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ ก่อนทดสอบจะหล่อเป็น ก้อนลูกบาศก์มาตรฐานขนาด 2x2x2 นิ้ว (50x50x50 มิลลิเมตร) (เรื่องรุชดี ชีระโรจน์, 2559)

2.8 มวลรวม

มวลรวม (Aggregates) คือ วัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต เช่น หิน, กรวด และ ทราย เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตรมากถึง 70 – 80 % ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของ คอนกรีตอย่างมาก จึงมีความจำเป็นจะต้องให้ความสำคัญกับมวลรวมไม่น้อยไปกว่าปูนซีเมนต์

มวลรวมเป็นวัสดุผสมที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมอื่น ๆ จึงมีการนำมวลรวมมาใช้ เป็นวัสดุแทรกในคอนกรีต โดยกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีต ซึ่งมวลรวมที่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ บางส่วนมาจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เช่น แถาลอย, ของเสียจากชุมชน, และ รีไซเคิลคอนกรีต เป็นต้น มวลรวมไม่ได้เป็นเพียงวัสดุเฉื่อยหรือวัสดุที่แทรกในเนื้อคอนกรีต เท่านั้น แต่ยังมีความสำคัญอื่นๆ อีก ได้แก่

1. **ทำให้คอนกรีตมีต้นทุนหรือราคาต่ำลง** มวลรวมเป็นวัสดุผสมคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่า ปูนซีเมนต์ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมและการเลือกใช้มวลรวมที่มีคุณภาพดีจะช่วย ลดปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลง มีผลให้ต้นทุนหรือราคาคอนกรีตลดลง

2. มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยพื้นฐาน คุณสมบัติของมวลรวมเป็นตัวกำหนดหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight), โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) และความคงตัวของปริมาตร (Volume Stability) ของคอนกรีต นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติของมวลรวมอีกหลายประการที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพสดและแข็งตัวแล้ว

คุณสมบัติของมวลรวมที่สำคัญ ได้แก่ ความพรุน (Porosity), ขนาดคละ หรือ การกระจายของขนาด (Grading or Size Distribution), การดูดซึมความชื้น (Moisture Absorption), รูปร่างและลักษณะผิว (Shape and Surface Texture), กำลังวัสดุ (Crushing Strength), และชนิดของสารเจือปนที่เป็นอันตราย (Type of Deleterious Substance)

2.9 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีต คือ สัดส่วนโดยปริมาตรหรือโดยน้ำหนักของวัสดุต่าง ๆ ที่นำมาผสมเป็นคอนกรีต โดยทั่วไปประกอบด้วย ปริมาณปูนซีเมนต์ น้ำผสมคอนกรีต มวลรวม และอาจจะมีน้ำยาผสมคอนกรีตหรือผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ ด้วย โดยส่วนผสมของคอนกรีตที่ดีควรใช้ปริมาณน้ำให้น้อยที่สุด โดยแค่เพียงพอกับความสามารถในการเทเพียงพอกับลักษณะการใช้งาน เช่น กำลังรับแรง, ความคงทน และความชื้นน้ำ เป็นต้น

อัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ (Water cement ratio) จัดเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อย จะแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์มาก แต่ส่วนผสมของคอนกรีตก็ควรจะต้องมีความชื้นเพียงพอเพื่อให้สะดวกในการเทคอนกรีตลงแบบ โดยในการกำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ควรคำนึงถึงองค์ประกอบ ได้แก่ ความแข็งแรงของคอนกรีต ความเหมาะสมกับงานก่อสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 2-9 และค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ยังจัดแบ่งตามค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุครบ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2- 9 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้สำหรับงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ

ประเภทของงาน	ในสภาวะแวดล้อมปกติ			ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง		
	ถูกแดด ถูกฝน					
	ชั้นส่วน บาง	ชั้นส่วน ปาน กลาง	ชั้นส่วน หนา	ชั้นส่วน บาง	ชั้นส่วน ปาน กลาง	ชั้นส่วน หนา
งานคอนกรีตที่ต้องสัมผัส กับน้ำแต่ไม่ได้ยู่ใต้น้ำ	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55
งานคอนกรีตใต้น้ำเปียก บ้างแห้งบ้าง	0.50	0.55	0.55	0.55	0.60	0.65
งานคอนกรีตทั่วไป เช่น อาคาร สะพาน	0.55	0.60	0.65	0.55	0.65	0.70
งานคอนกรีตที่จมอยู่ใต้น้ำ	0.55	0.60	0.65	0.55	0.60	0.65
งานคอนกรีตสำหรับถนน	0.50	0.55	0.60	0.55	0.60	0.65

(ที่มา: ประณต กุลประสูต, 2556)

ตารางที่ 2- 10 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเมื่อมีอายุครบ 28 วัน สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่าง ๆ

อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (ลิตร ต่อ กิโลกรัม)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเมื่อมีอายุครบ 28 วัน (กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
0.35	500	420
0.40	450	380
0.45	410	340
0.50	350	280
0.55	320	250
0.60	280	210
0.65	250	190
0.70	210	170

(ที่มา: ประณต กุลประสูต, 2556)

ส่วนคละของวัสดุผสม คือ ส่วนคละระหว่างหินย่อยกับทราย ซึ่งในการผสมที่ถูกต้องจะทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอและมีคุณภาพดี เนื่องจากช่องว่างระหว่างวัสดุผสมมีน้อยลง ส่งผลให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์กับน้ำลดลง และเป็นการทำให้คอนกรีตที่ทำมีราคาถูกลง อีกทั้งยังทำให้มีกำลังสูงขึ้น ยังสามารถช่วยป้องกันการแยกตัวของวัสดุผสมในขณะเท ทั้งยังทำให้การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การผสมคอนกรีตทำได้สะดวก อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 2-11 และอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2- 11 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ

ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบ	อัตราส่วนของวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
10 มิลลิเมตร หินเกล็ด	0.55	0.70
20 มิลลิเมตร หิน 1	0.40	0.60
25 มิลลิเมตร หิน 2	0.30	0.50

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2556)

ตารางที่ 2- 12 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานประเภทต่าง ๆ

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตร	ประเภทของงาน
1 : 1.5 : 3	เสาและส่วนของโครงสร้างที่ต้องการความทึบน้ำ
1 : 2 : 4	งานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป
1 : 2.5 : 4	งานถนนทางเท้า ฐานรากอาคาร เชื่อมกันดิน
1 : 3 : 5	งานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากขนาดใหญ่ หรือผนังที่หนา

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2556)

3.9.1 การจำแนกประเภทของมวลรวม

การจำแนกประเภทของมวลรวมตามขนาด

1. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หินหรือกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้างอยู่บนตะแกรง มาตรฐานเบอร์ 4) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลผสมคอนกรีต หรือ มอก. 566 ยอมให้มวลรวมหยาบมีส่วนที่ละเอียดกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง

2. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) โดยมาตรฐาน มอก. 566 ยอมให้มวลรวมละเอียดมีส่วนที่หยาบกว่านี้ผสมอยู่ได้บ้าง ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียด ซึ่งมีอยู่ปริมาณน้อยมากในมวลรวม สามารถแบ่งได้เป็น Silt มีขนาดประมาณ 0.07 มิลลิเมตร และ Clay มีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 - 0.05 มิลลิเมตร ส่วนคำว่า “มวลรวมคละ (All-In-Aggregate)” นั้นหมายถึง มวลรวมที่ ประกอบด้วยมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

การจำแนกประเภทของมวลรวมตามหน่วยน้ำหนัก

1. มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มวลรวมที่มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk Density) น้อยกว่า 1,120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.3 - 1.1)

2. มวลรวมปกติ (Normal-weight Aggregate) ได้แก่ หินย่อย, กรวด, และทราย มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk Density) อยู่ในช่วงประมาณ 1,300 - 1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.4 - 3.0) และทำให้คอนกรีตที่มีน้ำหนักตามปกติ (Normal-weight Concrete) มีหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) ประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มวลรวมที่มีความหนาแน่นแบบคิวหลวม (Bulk Density) มากกว่า 2080 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 40)

การจำแนกประเภทของมวลรวมตามแหล่งกำเนิด

1. มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เป็นมวลรวมที่เกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ ได้แก่ หิน, กรวด, และทราย

2. มวลรวมสังเคราะห์ (Artificial Aggregate หรือ Synthetic Aggregate) เป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน เช่น Expanded Clay ที่ใช้ทำมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate), มวลรวมที่ทำจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม (Industrial By-products) เช่น Blast-furnace Slag, เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นต้น, มวลรวมที่ทำจากของเสียชุมชน และมวลรวมที่เกิดจากการนำซากอาคารและถนนคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ (Recycled Concrete) เป็นต้น

2.10 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่มคอนกรีต (Curing) คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยการบ่มเป็นการให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยการบ่มมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ข้อหลัก คือ เพื่อพัฒนา

คุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของคอนกรีต และป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มแรก โดยการรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด โดยคอนกรีตควรได้รับการบ่มทันทีหลังจากเสร็จสิ้นการแต่งผิวหน้าและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ควรบ่มต่อจนกระทั่งคอนกรีตมีกำลังตามต้องการ โดยหลักการบ่มที่ดีคือการป้องกันไม่ให้คอนกรีตเสียความชื้น ไม่ให้สัมผัสกับสารเคมี ไม่ให้ถูกชะล้างด้วยฝน เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้คอนกรีตได้รับความเสียหาย

ในการบ่มคอนกรีตควรบ่มให้นานที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้ได้กำลังของคอนกรีตสูงตามต้องการ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้นานนัก เพราะข้อจำกัดทางเรื่องการก่อสร้างและค่าใช้จ่าย โดยในการบ่ม 7 วัน สามารถได้กำลังของคอนกรีตเท่ากับ 28 วัน ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาจึงแนะนำให้บ่มที่ 7 วัน สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2-13 หรือเวลาจำเป็นเพื่อให้ได้กำลัง 70% ของกำลังอัดที่กำหนด ส่วนงานคอนกรีตหยาบ เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ ควรบ่มอย่างน้อย 2 สัปดาห์

ตารางที่ 2- 13 เวลาในการบ่มคอนกรีต

ประเภทของงาน	คอนกรีตที่ใช้		
	ปูนซีเมนต์ผสม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3
งานธรรมดา			
- เสา คาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
- พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน ฯลฯ	8 วัน	8 วัน	4 วัน
- ถนนชั้นหนึ่ง ลานจอดหรือทางวิ่งของเครื่องบิน	-	14 วัน	7 วัน
- เสาเข็มสำหรับจะนำไปตอกเป็นรากฐาน	21 วัน	14 วัน	7 วัน
งานพิเศษ			
- แผ่นพื้นบาง ๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
- รูปหล่อที่เล็กบางซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ผสมมาก	-	21 วัน	7 วัน

(ที่มา : CPAC Concrete Technology,)

2.11 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.11.1 งานวิจัยเกี่ยวกับ Material Flow Analysis: MFA

พิชิต อินโองการ (2555) ทำการศึกษาปริมาณ องค์ประกอบของขยะและสถานการณ์การจัดการขยะ แล้ววิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการไหลของวัสดุเพื่อทราบสถานการณ์ปัญหาและหาแนวทางเลือกที่เหมาะสมในการจัดการขยะของ อบต.ร่มเย็น จากผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณขยะในพื้นที่ 2,551 กิโลกรัมต่อวัน (2.55 ตันต่อวัน) อัตราการเกิดขยะ 0.22 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน และขยะมีความหนาแน่น 222 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขยะในพื้นที่แบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ขยะย่อยสลายได้ร้อยละ 63.50 ขยะรีไซเคิลร้อยละ 30.73 ขยะทั่วไปร้อยละ 3.58 และขยะอันตรายร้อยละ 2.19 งานวิจัยนี้เสนอแนวทางจัดการขยะ 3 แนวทาง ได้แก่ แนวทางที่ 1 การรีไซเคิล ทำปุ๋ยหมักผลิตเชื้อเพลิงขยะและฝังกลบ แนวทางที่ 2 การรีไซเคิล หมักแบบไร้อากาศ ผลิตเชื้อเพลิงขยะและฝังกลบ และแนวทางที่ 3 การรีไซเคิล หมักแบบไร้อากาศ เผาในเตาเผาขยะ และฝังกลบ จากการเปรียบเทียบทั้งสามแนวทางพบว่าแนวทางที่ 3 เหลือขยะฝังกลบน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 3.40 ในขณะที่แนวทางที่ 2 มีผลพลอยได้ที่มีศักยภาพทางพลังงานมากที่สุดร้อยละ 22.06

กนกวรรณ สุขรักษ์ (2557) ทำการศึกษาเส้นทางและปริมาณการไหลของสารปรอทจากอะมัลกัมที่ใช้ในงานทันตกรรม โดยการเก็บตัวอย่างและทำสมดุลมวลของอะมัลกัมที่ใช้อุดฟันคนไข้ พบว่า มีปรอทที่ติดกับฟัน (In Teeth) ประมาณร้อยละ 43.76 ส่วนที่เหลือจากการบั่นผสม (RA) ร้อยละ 31.49 และส่วนเกินจากการขัดแต่ง (Carving) ร้อยละ 24.73 โดยแบ่งเป็นส่วนที่ติดกับสำลี (SW) คิดเป็นร้อยละ 14.95 และส่วนที่ติดไปกับน้ำทิ้งจากการบ้วนและเครื่องดูดน้ำลาย (DWW) ร้อยละ 9.78 และพบปรอทติดอยู่ในส่วนของเปลือกแคปซูลและถุงพลาสติกที่บรรจุปรอทภายในแคปซูลร้อยละ 0.02 หรือ 0.082 มิลลิกรัมต่อแคปซูล เมื่อนำมาคิดเป็นสัดส่วนการปล่อยปรอทสู่สิ่งแวดล้อม โดยอนุมานว่า ในปี พ.ศ.2557 มีจำนวนฟันที่ได้รับการอุดด้วยอะมัลกัมจำนวน 31,800,326 ซี่ จะพบว่า มีปริมาณปรอทส่วนที่ติดกับสำลี ส่วนที่หลุดรอดไปกับน้ำทิ้ง ส่วนที่เหลือจากการบั่นผสม และส่วนที่ติดไปกับเปลือกแคปซูลเกิดขึ้นประมาณ 2.18 1.43 4.11 และ 0.002516 ตันต่อปี ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณปรอทที่ระบายสู่สิ่งแวดล้อมจากการอุดฟันสูงเท่ากับ 7.71 ตันต่อปี และจากการศึกษาแนวทางในการบริหารจัดการเพื่อลดการปล่อยสารปรอทสู่สิ่งแวดล้อมโดยการติดตั้งระบบดักจับอะมัลกัม ในหน่วยทันตกรรม 6 แห่ง เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ระบบสามารถลดการปล่อยปรอทสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของมลพิษทางน้ำได้ประมาณร้อยละ 81.95

สุบรรณ พูวัน (2555) ทำการศึกษาการจัดการขยะเทศบาลตำบลป่าซาง อำเภอแม่จัน จังหวัด เชียงราย ไม่สามารถที่จะดำเนินการกำจัดขยะได้เอง จึงว่าจ้างบริษัทเอกชนดำเนินการ แต่ทว่าใน อนาคตความสามารถในการจัดการขยะของเอกชนอาจมีขีดจำกัด ทางเทศบาลตำบลป่าซางจึงมีความ จำเป็นต้องเตรียมตัวพร้อมรับกับปัญหาดังกล่าว ด้วยการศึกษาถึงกระบวนการกำจัดขยะของ บริษัทเอกชนที่รับกำจัดขยะให้เทศบาลตำบลป่าซาง โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การไหลของมวลสาร (Material Flow Analysis) จากข้อมูลปริมาณขยะมี 2 แหล่งหลักคือขยะชุมชนในพื้นที่มีปริมาณ เฉลี่ย 8.01 ตัน/วัน และขยะอินทรีย์จากเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตอาหารกระป๋องจากโรงงาน โครงการหลวงดอยคำ มีปริมาณเฉลี่ยวันละ 1.19 ตัน/วัน เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยเทคนิค วิเคราะห์การไหลของมวลสาร ในกระบวนการกำจัดขยะ ณ ปัจจุบัน ทำให้ทราบว่า การคัดแยกขยะรีไซเคิลไปขายยังร้านรับซื้อของเก่าด้วยแรงงานคนทำให้มีปริมาณขยะคงค้างจากการคัดแยก 8.04 ตัน/วัน และถูกกองไว้ในที่โล่งซึ่งเป็นวิธีการกำจัดที่ไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาล เพื่อต้องการหา กระบวนการกำจัดขยะที่เหมาะสมสำหรับเทศบาลตำบลป่าซางในอนาคต โดยเพิ่มกระบวนการกำจัด ขยะในรูปแบบการนำร่องต่างๆ 4 รูปแบบ ซึ่งแต่ละกระบวนการมีส่วนผสมมวลสารแตกต่างกัน โดยแบบที่ 1 มีปริมาณขยะคงค้างในระบบ 5.90 ตัน/วัน แบบที่ 2 มี 1.90 ตัน/วัน แบบที่ 3 มี 0.74 ตัน/วัน แบบที่ 4 มี 0.54 ตัน/วัน

วิกานดา คำชู (2560) ทำการศึกษาการจัดการขยะพีวีซี โดยประเทศไทยนั้นผลิตภัณฑ์จาก พลาสติกพีวีซีมีปริมาณมากกว่า 400,000 ตันต่อปีที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการ ภายในประเทศ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหลังจากการใช้งานของขยะผลิตภัณฑ์พลาสติกพีวีซีหากไม่ได้ รับการจัดการถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อที่จะรับมือกับขยะพีวีซีที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศได้อย่าง ถูกต้องและเหมาะสมในงานวิจัยในระยะที่ 1 และ 2 ได้พัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์การไหลของวัสดุ เพื่อวิเคราะห์การไหลของผลิตภัณฑ์พีวีซีดังกล่าวหลังการใช้งานและประเมินปริมาณขยะผลิตภัณฑ์ พลาสติกพีวีซีในประเทศ ในเบื้องต้นข้อมูลปฐมภูมิถูกเก็บจากร้านรีไซเคิลพีวีซีและบ่อฝังกลบเพื่อ ประเมินปริมาณขยะพีวีซีที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนที่ถูกรีไซเคิล เพื่อที่จะประเมินปริมาณผลิตภัณฑ์พีวีซี หลังการใช้งานในประเทศได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงได้มีการศึกษาในระยะที่ 3 โดยการป้อนข้อมูลของ การผลิตพีวีซีในประเทศจากปี พ.ศ. 2514 ถึงปี 2559 ในโมเดลร่วมกับการประมวลผลของอายุการ ใช้งานเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ รวมทั้งพิจารณาปัจจัยพฤติกรรมของผู้บริโภคกับเศรษฐกิจร่วมด้วย และผลิตภัณฑ์ต่ำมาตรฐานการผลิต เพื่อการประมวลผลที่แม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้เพิ่ม

ผลิตภัณฑ์ซีทและฟิล์มเข้ามาในการศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมช่วงของผลิตภัณฑ์พีวีซีในประเทศในให้มากขึ้นถึง 93 % ของทั้งหมด และยังได้รับข้อมูลปฐมภูมิที่มากขึ้นจากร้านรีไซเคิลและกลุ่มแปรรูปพลาสติกกรีไซเคิล เพื่อประมาณปริมาณขยะพีวีซีที่ถูกรีไซเคิลในปี พ.ศ. 2558 และ 2559 และหาสัดส่วนการรีไซเคิลของแต่ละผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวางแผนจัดการขยะผลิตภัณฑ์พลาสติกพีวีซีในประเทศเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

Panida Leelaparang (2010) ทำการศึกษาผังการไหลด้วยวิธีการ Mass Flow Analysis เพื่อศึกษาการไหลของไนโตรเจนที่เกิดจากการบริโภคอาหาร และการผลิตจากภาคส่วนอุตสาหกรรมและการเกษตร เพื่อการบริหารจัดการน้ำในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา โดยการศึกษาแบ่งเป็นช่วงฤดูกาล 2 ฤดูกาล คือ ฤดูแล้งช่วงระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน และฤดูฝนช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ครอบคลุมทั้งภาคการเกษตร ภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน ในพื้นที่ 11 จังหวัด ซึ่งแบ่งกลุ่มลักษณะกิจกรรมเป็น พื้นที่เพาะปลูก ปศุสัตว์ เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับอาหาร ปุ๋ยอินทรีย์ การบริโภคในครัวเรือน โรงบำบัดน้ำเสีย การฝังกลบ และการผลิตน้ำประปา

จากการศึกษาพบว่ากิจกรรมหลักของการไหลของไนโตรเจนคือ พื้นที่เพาะปลูกและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยถ้าเรียงลำดับตามการไหลของไนโตรเจนประจำปีจากการวิเคราะห์แบบ Mass Flow Analysis พบว่า การให้อาหารของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณไนโตรเจนสูงสุด รองลงมา เป็นปริมาณอาหารที่เหลือจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ผลิตภัณฑ์จากพื้นที่เพาะปลูกไปสู่อุตสาหกรรม การใส่ปุ๋ย และการให้อาหารปศุสัตว์ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามฤดูกาลแล้ว พบว่า กระแสไนโตรเจนจากกิจกรรมในฤดูร้อนส่วนใหญ่จะสูงกว่าในฤดูฝน ยกเว้นการชะผิวหน้าจากพื้นที่ เพาะปลูกซึ่งสูงกว่าฤดูร้อน 3 เท่า โดยมีปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำ 116,739 ตัน ไนโตรเจน มี Uncertainty Factors อยู่ที่ 3-24 เปอร์เซ็นต์ โดยผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการแก้ไข ปัญหา คือ การนำน้ำเสียจากปศุสัตว์ และน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาเป็นปุ๋ยในการเพาะปลูก รวมถึงการนำของเสียจากขยะชุมชนและบ่อเกรอะมาใช้เป็นปุ๋ยด้วย

Monika Chaffner (2007) เป็นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การไหลของสาร (Material flow analysis) เพื่อประเมินมลพิษทางน้ำและวิธีบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นโดยการศึกษากิจกรรมด้านการเกษตร กิจกรรมด้านเลี้ยงสัตว์ กิจกรรมจากภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ในลุ่มน้ำท่า

จีน ภาคกลางของประเทศไทย โดยศึกษาปริมาณการไหลไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่ากิจกรรมที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านต่างๆ ต่อระบบนิเวศน้ำต่อคุณภาพของแม่น้ำท่าจีน ดังนี้ ในส่วนของฟอสฟอรัส กิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำคือการปลูกข้าว และในส่วนของไนโตรเจน กิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำ คือการปลูกข้าว

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับซีเรียม

เขาวเลข และคณะ (2554) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาเปรียบเทียบการสกัดแยกธาตุซีเรียม ออกจากธาตุหายากหรือแรเอิร์ท ผสมที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่ โมนาไซต์ ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุเรซิน IDMOWEX™ HCR-S ขนาดระหว่าง 50 – 16 เมช และใช้ ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA) ความเข้มข้น (0.015 M ช่วง pH 8.2-84 เป็นตัวชะล้างสารละลายแรเอิร์ทที่แยกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจากคอลัมน์นี้ ด้วย อัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นได้วิเคราะห์ธาตุซีเรียมเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณ ธาตุ พบว่าซีเรียมมีความเข้มข้นสูงสุด 1,650 ppm หรือความบริสุทธิ์ 90 % ขึ้นไปหลังการสกัดแยกสำหรับการ ตกตะกอนแยกซีเรียมออกจากแรเอิร์ทผสม โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น pH 4.5-5.0 และใช้ 10% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่า สามารถแยกซีเรียมได้ความบริสุทธิ์ 60 % จากผลการศึกษา การสกัดแยกธาตุซีเรียมนี้ พบว่าการสกัดแยกซีเรียมด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนจะได้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมมากกว่าวิธีตกตะกอน แต่เนื่องจาก วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ใช้เวลานานกว่า 6 เดือน การศึกษานี้สามารถนำไปขยายผลในการสกัดแยกซีเรียม โดยการ ตกตะกอนซีเรียมก่อนแล้วจึงผ่านคอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออนเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้สูงขึ้น

Kim และคณะ (2011) ทำการวิจัยศึกษาการนำกลับธาตุซีเรียม จากของเสียกระบวนการขัดกระจก เพื่อนำซีเรียมที่ผลิตได้นั้นกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตต่อไป โดยซีเรียมนั้นสามารถแยกได้เหมือนกับการแยกอนุภาคต่างๆไป ซึ่งสามารถใช้การนำกลับจากตะกอนเหลวที่ทำการขัดกระจก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การแยกซีเรียมโดยการทำ Oxidative thermal treatment โดยนำของเสียทั้งหมดมาเข้ากระบวนการกวนช้า หลังจากนั้นนำไปปรืดกจดนแห้ง แล้วนำไปเติมกรดออกซาลิก แล้วเขย่าเพื่อกำจัดเศษแก้ว และแก้วที่เหลือจะถูกกำจัดอีกทีโดย NaOH หลังจากนั้นทำการคัดขนาดแล้วนำไปอบแห้งที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จะได้เป็นผงออกมา นำผงที่ได้เข้าเตาเผา 600

องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วนำผงที่ผ่านการเผาด้วย H_2SO_4 (6N) 100 g/L หลังจากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดธาตุอื่นที่ไม่ใช่ซีเรียมโดยใช้ Na_2SO_4 เผาที่ 500 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-AES โดยผลสุดท้ายได้ซีเรียมกลับคืนมาถึง 94 เปอร์เซ็นต์

Poscher และคณะ (2013) ทำงานวิจัยการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมและแลนทานัมในตะกอนเหลวชั้นจากกระบวนการขุดเจาะแก้วโดยใช้การอบ และการเผาเข้ามาช่วย โดยในตะกอนเหลวชั้นที่มีซีเรียมและแลนทานัมนั้น มีสารปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ซิลิกอน สังกะสี โซเดียม แคลเซียม และตะกั่ว โดยในขั้นแรกจะใช้กรดไฮโดรคลอริกในการชะล้างแล้วให้ความร้อน ตามด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสามารถชะล้างซีเรียมได้ถึง 97% ส่วนแลนทานัมไม่สามารถสกัดได้เช่นเดียวกับซีเรียม ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการละลายของแลนทานัมทำได้ต่ำในสภาวะที่มีฟลูออรีน จากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งผลผลิตในการสกัดซีเรียมที่ดีที่สุดเกิดจากการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 5.5 คือใช้กรด 32% กรดไฮโดรคลอริก 273.5 กรัม และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 กรัม ให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตซีเรียมต่อแลนทานัมได้มากกว่า 99% ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตสารขัดกระจกได้

Abhilash และคณะ (2014) ทำการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุแลนทานัม และซีเรียมจากโคลนแดงอินเดีย ในกรดซัลฟิวริก ในการศึกษาทดลองประกอบด้วย การชะละลายโคลนแดงด้วยกรด โดยทำการทดลองในสภาพของเหลว โดยชะละลายโลหะออกมาด้วยกรดอินทรีย์ต่างชนิดกันเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสกัด และการแยก โดยแร่ธาตุแลนทานัมที่นำกลับมาได้นั้นมากถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้กรด 3M ของกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวที่ใช้คือ 10 กรัมต่อลิตร ทำการปั่นเหวี่ยงที่ 200 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง ในขณะเดียวกันธาตุซีเรียมสามารถนำกลับได้ 99.9 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ 3 โมลาร์ กรดซัลฟิวริก อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส สัดส่วนของแข็งต่อของเหลวคือ 10 กรัมต่อลิตรเช่นกัน โดยในการทดลองพบว่ามี ความเข้มข้นของซีเรียมต่ำมาก จึงมีการใช้สารเร่งการสกัด คือ 0.15 M ของ DEHPA, Cyanex 272 และ Cyanex 301 เพื่อหาประสิทธิภาพ และความจำเพาะของสารสกัดเหล่านี้ พบว่า การใช้สารเร่งสกัด ตัว Cyanex 301 ใช้ได้ดีกว่า DEHPA, Cyanex 272

ปรารธนา คิวสุวรรณ และคณะ (2537) ทำการศึกษาวิเคราะห์แร่ธาตุหายากที่ผสมกันอยู่ในแร่โมนาไซต์ โดยใช้เทคนิคไอซีพี โดยนำแร่โมนาไซต์ที่ทราบความเข้มข้นมาทำการย่อยด้วยกรดชนิด

ต่างๆ คือ กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น, กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น, กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น และ กรดกรดซัลฟิวริกเข้มข้น โดยใช้อุณหภูมิในการย่อยต่างกัน หลังจากการย่อยนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 41 แล้วเจือจางปรับปริมาตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีไอซีพี จากการผลการทดลองพบว่ากรดซัลฟิวริกสามารถย่อยแร่ธาตุหายากได้ดีที่สุด ส่วนกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริก หรือผสมกับกรดไฮโดรคลอริก พบว่าสามารถย่อยธาตุหายากได้เพียง 5-6 เปอร์เซ็นต์ ความยาวคลื่นในการวิเคราะห์ธาตุหายากแต่ละตัวมีความแตกต่างกันจะต้องเลือกให้เหมาะสม ผลจากการย่อยด้วยกรดแล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-AES พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ส่วนผลรวมของธาตุหายากแต่ละตัวในตัวอย่าแร่โมนาไซต์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-AES มีค่าใกล้เคียงกับค่า Total rare earth oxide ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมออกซาลาเลท

2.11.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุมวลรวม

พลวัต คงสรรค์เสถียร (2559) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตสีน้ำโดยนำมาผลิตเป็นบล็อกประสาน โดยใช้กากตะกอนแทนที่ทราย แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก 58-2533 และ มผช 602/2547 จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบมากที่สุดถึงร้อยละ 18.99 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.63 จากการวิเคราะห์ขนาดมวลรวมละเอียดพบว่ามึขนาด 0.6 – 1.18 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าผ่านค่ามาตรฐานทุกอัตราส่วน และทุกอายุที่ทดลอง ทำการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำพบว่าผ่านค่ามาตรฐานทุกอายุการบ่ม การทดสอบความหนาแน่นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนมากขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นบล็อกประสานลดลง การทดสอบการยัดหดตัวพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนมากขึ้น และทำการบ่มบล็อกประสานเป็นเวลานานขึ้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความยาวจะเพิ่มขึ้น การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี WET และ TCLP พบว่าค่าการรั่วไหลของ Pb Cu Cd Zn และ Fe มีค่าไม่เกินตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

เอกชัย ลิ่มพัฒนสกุล (2553) ทำการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตอิฐตัวหนอนจากกากตะกอนน้ำเสียที่รับมาฝั่งกลบ ของบริษัท แวกซ์ กาเบ็ง รีไซเคิล เซ็นเตอร์ จำกัด และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิต โดยทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทาง

กายภาพของกากตะกอนน้ำเสียโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer พบว่ากากตะกอนมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญในการทำอิฐ ตัวหนอน ได้แก่ อะลูมิเนียม 10.10%, เหล็ก 0.889%, ซิลิคอน 4.38% และ แคลเซียม 1.16% ในการ ทดลองทำอิฐตัวหนอน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐตัวหนอน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น และกากตะกอนน้ำเสีย โดยทำการผลิตด้วยกัน 3 อัตราส่วน คือ Control (1:5:0), S1 (1:4:1) และ S2 (1:3:2) จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.2035-2543 ผลการทดสอบพบว่าอิฐตัวหนอนทดลองทั้ง 3 แบบ มีค่าความต้านทานแรงอัดลดลงตาม ปริมาณการใช้กากตะกอนน้ำเสียแต่ยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน มอก.2035-2543 ที่กำหนดไว้ โดย อัตราส่วน S2 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในการทำการผลิต โดยมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 1.70 บาท/ก้อน สามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้ 0.08 บาท/ก้อน หรือคิดเป็น 5% จากต้นทุนการผลิต ต่อก้อน

กรองแก้ว และคณะ (2556) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทน ปูนซีเมนต์ โดยใช้กากตะกอน 2 แบบคือ กากตะกอนผิ่แห้งที่ได้รับมา และ กากตะกอนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาสมบัติกากตะกอน และแปรค่าหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมในการทำซีเมนต์ก้อน ในการทำซีเมนต์ก้อนชุดควบคุมวัสดุผสมทำจากปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ททราย 2.75 ส่วน และน้ำ 0.825 ส่วน โดยน้ำหนัก ส่วนซีเมนต์ก้อนชุดทดลองแปรค่ากากตะกอนตามอัตราส่วนต่างๆ เป็น 10, 20 และ 30% เข้าทดแทนปูนซีเมนต์ เมื่อทำการหล่อซีเมนต์ก้อน และทำการบ่มในน้ำประปาจนมีอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จึงทำการทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และ ตะกั่ว (Pb) ด้วยวิธีทดสอบ การสกัดของเสีย (Waste Extraction Test, WET) และวิธีทีซีแอลพี (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) ผลการทดลอง พบว่า ซีเมนต์ก้อนชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่าในน้ำที่บ่มซีเมนต์ก้อนจากกากตะกอนมีค่าพีเอชเป็นเบสช่วง 11 - 12 ทำให้ไม่เกิดการละลายของโลหะหนักออกมา ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอยู่ในช่วง 5 - 7 mS/cm² อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำซีเมนต์ก้อนเมื่อเทียบกับชุดควบคุม คือ 10 % มีค่าการรับกำลังแรงอัดสูงสุด ที่ 28 วันเท่ากับ 253.81 Kg/cm² ค่าความชื้น 4.73 % เมื่อทดสอบค่าการชะละลายโลหะหนักทุกชนิดมีค่าผ่านมาตรฐานที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมาตรฐานตามที่ US

EPA กำหนด สามารถนำกากตะกอนแห้ง อัตราส่วน 10 % เหมาะสมไปประยุกต์ในการผลิตกระถางปลูกต้นไม้ได้

Mohamed Matar (2008) มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาคือหาวิธีในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียปริมาณมากในเมืองกาซา ซึ่งคาดการณ์ไว้ว่าในปี 2025 จะมีมากถึง 55.74 ตันต่อวัน ปริมาณที่มากของกากตะกอนเกิดจากการที่ประชากรเพิ่มขึ้นอย่างหนาแน่น ทำให้เกิดปัญหาด้านเกี่ยวกับด้านตะกอน โดยในงานวิจัยนี้จะนำกากตะกอนน้ำเสียไปใช้ในการก่อสร้างโดยใช้กากตะกอนในรูปแบบแห้งนำมาผลิตเป็นบล็อกประสาน จากการศึกษาพบว่าแรงอัดของบล็อกประสานจะลดลงเมื่อสารอินทรีย์ในตะกอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น พบว่ามีการสูญเสียแรงอัด 17% เมื่อมีการเพิ่มของสารอินทรีย์ 10% โดยน้ำหนัก โดยผลการทดลองทำให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอนทำให้ความแข็งแรงลดลงเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่มีมากในตะกอน ผลการศึกษาสรุปได้ว่ากากตะกอนแห้งสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนผสมในคอนกรีตได้ ซึ่งบล็อกประสานเป็นตัวเลือกหนึ่งในการกำจัดกากตะกอนจากเมืองกาซา และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตต่อไป

Jamshidi และคณะ (2012) ทำการศึกษากากตะกอนแห้งจากการบำบัดน้ำเสียในการนำมาทำวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากการบำบัดตะกอนเหล่านี้ในการถมที่ หรือทำปุ๋ยการเกษตรเป็นไปได้ยาก เพราะมีโลหะหนักมาก งานวิจัยนี้สนใจนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมมาทำคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 และ 0.45 กากตะกอนวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้การวิเคราะห์ XRF , XRD และคุณสมบัติทางความร้อน โดยในการนำไปใช้แทนซีเมนต์ในปริมาณ 0, 5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการผสมกากตะกอนแห้งมีผลต่อแรงอัดในแต่ละช่วงอายุการบ่ม โดยบ่มที่ 3, 7, 28 และ 90 วัน โดยพบว่าการใช้ตะกอนแห้งที่ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าการรับแรงอัดลดลงประมาณ 9, 14.5 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน และ 3.5, 8 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่ม 90 วัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตตัวควบคุม

Srinivasan และคณะ (2016) ทำการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแหล่งสำรองของมวลรวมละเอียด โดยใช้กากตะกอนจากกาบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 และ 2 นำมาศึกษา โดยในการศึกษาคอนกรีตในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีต คือ 0.45 โดยใช้กากตะกอนแทนที่ลงไป 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดแทนด้วย SEM และ EDX และทำการทดสอบสมบัติเชิงกล คือ การต้านทานแรงอัด, การแยกตัว และความยืดหยุ่น โดยทำการ

บ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน โดยค่าการต้านทางแรงอัดมากที่สุดมีค่า 41.2 เมกะปาสคาล ส่วนค่าความยืดหยุ่นมากที่สุดมีค่า 7.5 เมกะปาสคาล จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่ด้วยกากตะกอนนั้นให้ค่าความแข็งแรงดีมากเมื่อแทนที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อแทนที่กากตะกอนที่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง

ตารางที่ 2- 14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

ชื่อผู้วิจัย	ผลการวิจัย
พิชิต อินโองการ (2555)	MFA เข้ามาช่วยในการจำแนกองค์ประกอบ และปริมาณของขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเสนอแนวทางการจัดการขยะแต่ละประเภท
กนกวรรณ สุขรักษ์ (2557)	MFA เข้ามาใช้ในการดูสารปรอทจากอะมัลกัมในการทำฟันว่าปลายทางไปสู่แหล่งไหนบ้าง หลังจากนั้นติดตั้งเครื่องดักจับสารปรอท ตั้งแต่ต้นทาง เพื่อจำกัดการกระจายของสารปรอทสู่ภายนอก
สุบรรณ พูวัน (2555)	MFA เข้ามาช่วยในการคัดแยกประเภทของขยะมูลฝอย รวมถึงวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยแต่ละประเภท หลังจากนั้นใช้ข้อมูลมาช่วยในการปรับปรุงวิธีการในการกำจัดขยะมูลฝอยที่ยังกำจัดอย่างไม่ถูกต้อง
วิกานดา คำชู (2560)	MFA เข้ามาช่วยดูวิธีการในการกำจัดของขยะพีวีซีในประเทศ หลังจากนั้นดูข้อมูลการผลิตเทียบกับปลายทางการกำจัด แล้วหาวิธีในการกำจัดขยะพีวีซีที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น ไม่เหลือขยะตกค้างที่ยังไม่ได้รับการกำจัด
Leelaparang (2010)	MFA ช่วยในเรื่องการดูแลแหล่งกิจกรรมหลักที่เป็นที่มาของการแพร่กระจายของแร่ธาตุไนโตรเจนที่ก่อให้เกิดปัญหา พบว่ามาจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และเพาะปลูกเยอะที่สุด หลังจากนั้นจึงเสนอแนวทางแก้ไขโดยการนำน้ำเสียจากทั้งสองแหล่งนำมาทำเป็นปุ๋ยในการเพาะปลูก
Monika Chaffner (2007)	ใช้ MFA เพื่อดูว่ากิจกรรมใดที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากที่สุด ได้แก่ การปลูกข้าว หลังจากนั้นหาแนวทางในการจัดการกับการก่อมลพิษที่เกิดจากการปลูกข้าว

ตารางที่ 2- 15 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม

ชื่อผู้วิจัย	วิธีการศึกษา	ผลการวิจัย
ชาวเลข และคณะ (2554)	ทำการทดลอง 2 วิธี 1. แลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน และใช้ EDTA ชะล้าง 1 ลิตรต่อชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หา Cerium 2. วิธีการตกตะกอนโดยใช้กรด HNO_3 ที่ pH 4.5-5.0 ต่อด้วยการเติม H_2O_2 เป็นตัว oxidize	- การแลกเปลี่ยนไอออนได้ซีเรียมบริสุทธิ์มากกว่า 90% แต่ใช้เวลานาน 6 เดือน - การตกตะกอนด้วยกรด HNO_3 ได้ความบริสุทธิ์ 60-70% แต่ใช้เวลาน้อยกว่า แต่สามารถทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นโดยการทำซ้ำหลายๆรอบ
Kim, J.-Y. และคณะ (2011)	ใช้การเติมสารเคมีช่วยในการกำจัดเศษกระจก ต่อด้วยการคัดแยกเศษกระจกที่เหลือด้วยตะแกรง หลังจากนั้นนำไปอบตามด้วยการเผา ตามด้วยการกำจัดแร่ธาตุอื่นที่ไม่ใช่ซีเรียมด้วยการเติมสารเคมี	- ได้ซีเรียมที่บริสุทธิ์กว่า 94% - อุณหภูมิที่ใช้ในการเติมสารเคมีถ้าสูงขึ้นผลผลิตจะลดลง แต่ความบริสุทธิ์มาก เพราะสารชนิดอื่นถูกกำจัดออกไป - การเผาทำให้ได้ความบริสุทธิ์ที่มากกว่าทำที่อุณหภูมิปกติ
Poscher และคณะ (2013)	ใช้การเติมกรด HCl แล้วต้ม ตามด้วยการเติม H_2O_2 แล้วปั่นกวน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้มาเติมกรดออกซาลิก ตามด้วยการอบและเผา	- ได้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมกว่า 99% ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นผงขัดแก้วได้
Abhilash และคณะ (2014)	- ใช้การเติมกรด และควบคุมอุณหภูมิเขย่าตลอดเวลา หลังจากนั้นนำไปกรองแล้วนำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย ICP-OES - กรณีที่ซีเรียมเข้มข้นต่ำมาก จะใช้สารเร่งการสกัด คือ DEHPA, Cyanex 272 และ Cyanex 301	- การใช้กรด H_2SO_4 ทำให้ได้ซีเรียมกว่า 99% ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส - การนำกลับซีเรียมจะลดลง เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำลง - การใช้สารเร่งสกัด ตัว Cyanex 301 ใช้ได้ดีกว่า DEHPA, Cyanex 272
ปรารณา คิ้วสุวรรณ และคณะ (2537)	ใช้การเติมกรดแต่ละชนิดได้แก่ กรดเปอร์คลอริก, กรดไฮโดรฟลูออริกผสมไนตริก, กรดไฮโดรฟลูออริกผสมไฮโดรคลอริก, กรดซัลฟิวริก ให้ความร้อนที่ 150-250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปกรอง หลังจากนั้นเจือจางแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย ICP-AES	- การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นสามารถย่อยตะกอนได้ดีที่สุด ส่วนกรดชนิดอื่นสามารถย่อยได้เพียง 6%

ตารางที่ 2- 16 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุก่อสร้าง

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
พลวัต คงสรรค์ เสถียร (2559)	มวลรวม ได้แก่ ททราย	-ปูน:มวลรวม ละเอียด:กาก ตะกอน:หินฝุ่น = 1:2:0:4 -น้ำ 5% โดย น้ำหนัก	-12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5, 100 % โดยน้ำหนัก	-ค่ากำลังรับ แรงอัดผ่านค่า มาตรฐานทุกอายุ การบ่ม และทุก อัตราส่วน -ค่าความ หนาแน่นลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ ตะกอน
เอกชัย ลิ้มพัฒน์ สกุล (2553)	มวลรวม ได้แก่ หินฝุ่น	-ปูน:หินฝุ่น:กาก ตะกอน = 1:5:0	20, 40 % โดย น้ำหนัก	-ค่าความ ต้านทานแรงอัด ลดลง เมื่อเพิ่ม ปริมาณตะกอน -ประหยัดต้นทุน ได้ 0.08 บาท/ ก้อน ในการทำ อิฐตัวหนอน
กรองแก้ว และ คณะ (2556)	ปูนซีเมนต์	-ปูน:ทราย:น้ำ = 1:2.75:0.825 โดยน้ำหนัก	0, 10, 20, 30 % โดยน้ำหนัก	-สามารถแทนที่ ปูนซีเมนต์ได้ 10% -ค่ากำลังรับ แรงอัดลดลงเมื่อ เพิ่มปริมาณกาก ตะกอน

ตารางที่ 2-16 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุก่อสร้าง

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
Mohamed Matar (2008)	ปูนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียดได้แก่ ทราย	-	0, 15, 20, 25, 50, 100 % โดยน้ำหนัก	-กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอน -ความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดลงเมื่อในตะกอนมีสารอินทรีย์ปริมาณมาก
Jamshidi และคณะ (2012)	มวลรวมละเอียดได้แก่ ทราย	ปูน:กรวด:ทราย:ตะกอน = 1:2.39:2.36:0 โดยน้ำหนัก	0, 5, 10, 20, 30, 100 % โดยน้ำหนัก	-การเพิ่มปริมาณกากทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง -กากตะกอนสามารถแทนที่ทรายได้ 20%
Srinivasan. และคณะ (2016)	มวลรวมละเอียด		0, 5, 10, 15, 20, 25 % โดยน้ำหนัก	-กากตะกอนสามารถแทนที่มวลละเอียดได้ดีที่สุดที่ 20%

บทที่ 3

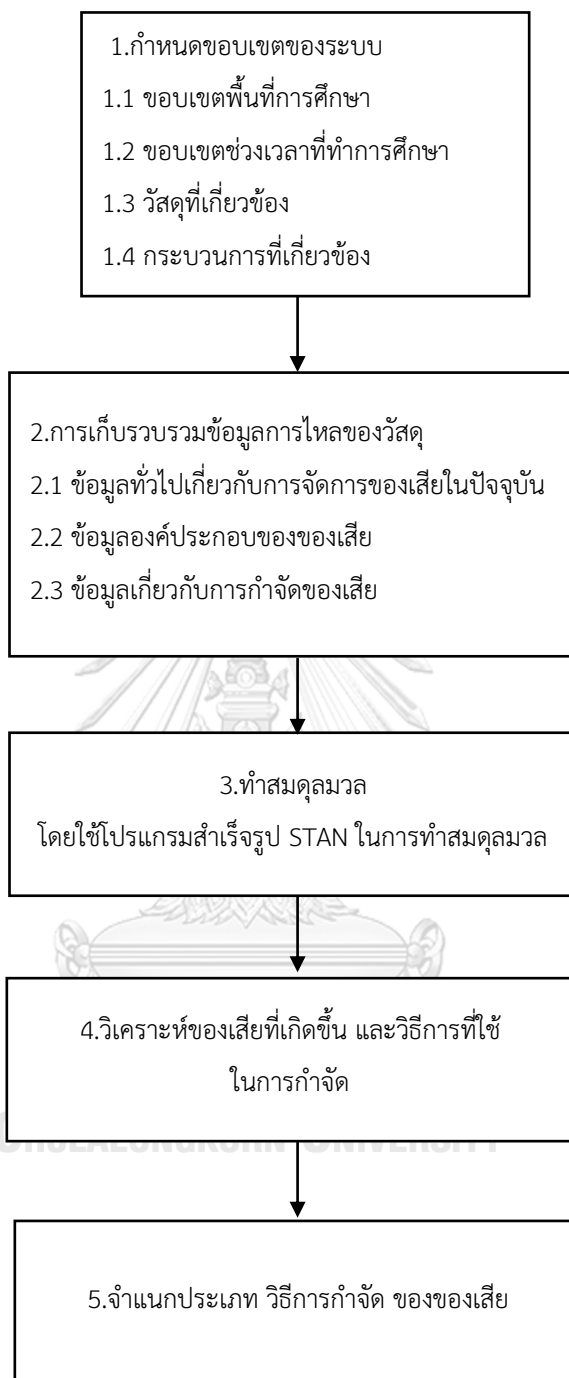
แผนการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ในช่วงแรกศึกษาการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis) เพื่ออธิบายเส้นทางการไหลของวัสดุเลนส์แว่นตาพลาสติกที่ผ่านเข้า-ออก จากจุดเริ่มต้นที่วัสดุเข้ามาในเส้นการผลิต ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ผ่านการเจีย การขัดผิว ตกแต่ง และทำการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ในรูปของของเสีย โดยอาศัยหลักการทำสมดุลมวลสาร (Mass Balance) เพื่อช่วยในการประเมินวัสดุตั้งแต่เข้า จนกลายเป็นของเสียขาออก และปริมาณวัสดุที่สะสมในระบบทั้งหมด เพื่อนำข้อมูลมาศึกษาการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกที่ปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ช่วงที่สอง ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากของเสียกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย โรงแม่พิมพ์ และ ช่วงที่สาม ศึกษาหาอัตราส่วน และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมต่อการผลิตอิฐบล็อกจากเศษของเสียกากตะกอนจากกระบวนการเจียแม่พิมพ์เลนส์แว่นตา และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยงานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย การทดลองที่ 2 ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ การทดลองที่ 3 ศึกษาการนำตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมนำมาทำเป็นวัสดุผสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสาร และของเสียอันตราย และห้องปฏิบัติการคอนกรีตของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3.2 การศึกษาการไหลของวัสดุ (Material Flow Analysis)

ในการดำเนินงานวิจัยใช้หลักวิเคราะห์การสมดุลมวล เข้ามาใช้ในการศึกษา และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAN 2.6.801 เข้ามาช่วยในการทำสมดุลมวลสาร



ภาพที่ 3- 1 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ

3.2.1 ขอบเขตพื้นที่การศึกษา

ทำการศึกษาการจัดการของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตา โดยทำการศึกษา ณ บริษัท ไทย ออพติคอลล กะรุ๊ป จำกัด (มหาชน)

3.2.2 ขอบเขตช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

ศึกษาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2560 และศึกษาปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม พ.ศ. 2558-2560

3.2.3 การเก็บข้อมูลการไหลของวัสดุ

เก็บข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการผลิตภายในโรงงาน รวมถึงเก็บข้อมูลการจัดการของเสียแต่ละประเภทที่เกิดขึ้น จนถึงปลายทางของของเสีย

ตารางที่ 3- 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับการจัดการของเสีย ณ ปัจจุบัน

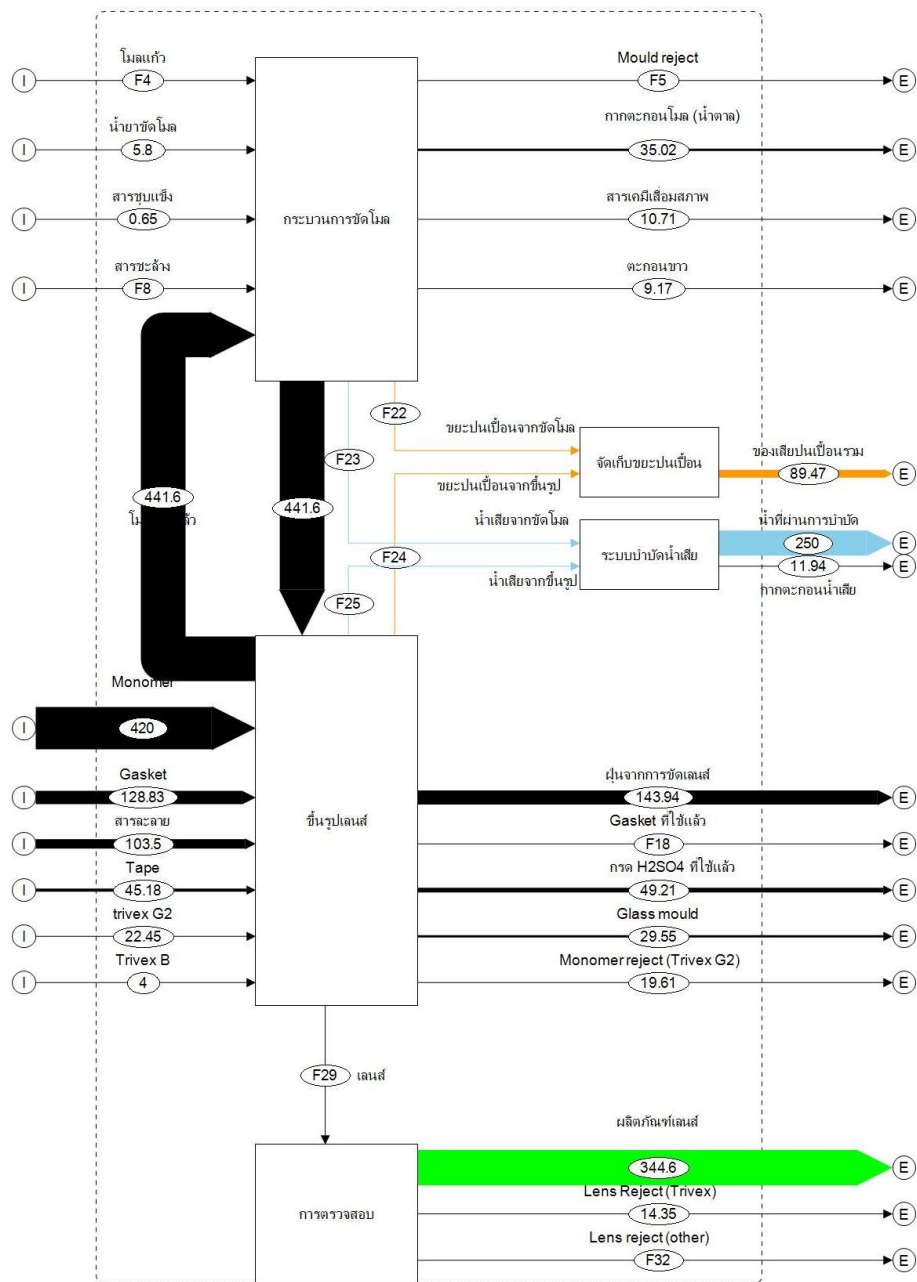
ข้อมูล	แหล่งที่มา
กระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก	โรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก
ปริมาณของเสียของโรงงานในปี	โรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก
วิธีการจัดการของเสียภายในโรงงาน	โรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

3.2.4 การทำสมดุลมวล

หลักในการวิเคราะห์ จะใช้หลักการทำ สมดุลมวลสาร (Mass Balance) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐาน ของกฎการอนุรักษ์มวลว่ามวลสารไม่สูญหาย หรือถูกทำลายไป สมการทั่วไป ของสมดุลมวลสาร ในแต่กระบวนการ (หน่วย) ย่อย และระบบรวมคือ

$$\text{สารที่สะสมในระบบ} = \text{สารที่เข้าสู่ระบบ} - \text{สารที่ออกจากระบบ}$$

โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAN เวอร์ชัน 2.6.801



ภาพที่ 3- 2 ตัวอย่างการทำสมดุลมวลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAN เวอร์ชัน 2.6.801

3.2.5 วิเคราะห์สถานการณ์เกี่ยวกับการจัดการของเสียภายในโรงงาน

จากการศึกษาการไหลของวัสดุ จะทำให้สามารถจำแนกของเสีย และวิธีในการกำจัดของเสียแต่ละชนิด จะทำให้สามารถเลือกของเสียที่ต้องการศึกษาในลำดับต่อไปได้

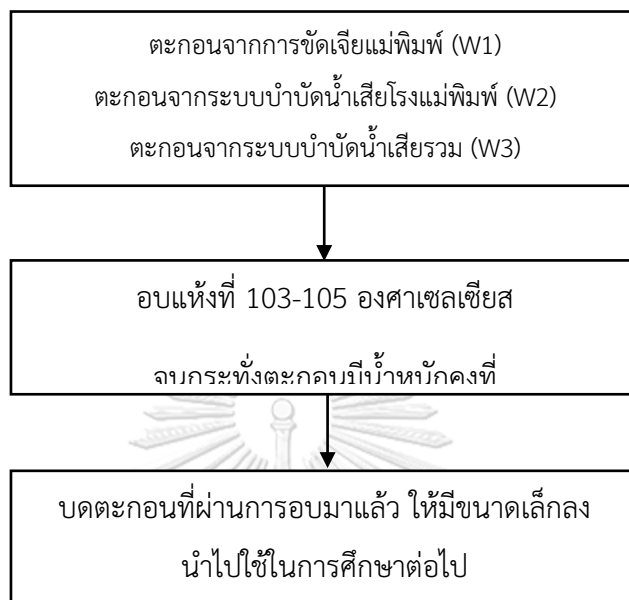
ตารางที่ 3- 2 วิธีการจัดการของเสียแต่ละชนิดของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

ชนิดของเสีย	รหัสของเสีย	ปริมาณ (ตัน)	วิธีกำจัด
Trivex G2 lens	07 02 13	19.61	ฝังกลบ
Trivex lens	16 03 06	14.35	
Glass mold	16 03 04	114.35	
กากดำ	19 08 14	11.94	
กากแดง	12 01 14	35.02	
กากขาว	19 08 14	9.17	
หลอดไฟ	16 02 15	0.08	
ภาชนะปนเปื้อน	15 01 10 HM	3.25	
Solvent	16 05 08	46.59	
Monomer	12 01 05	11.93	
วัสดุปนเปื้อน	15 02 02	89.47	
KNO ₃	16 05 07	10.71	
H ₂ SO ₄	06 01 01	49.21	คืนสภาพกรด
ฝุ่นขัดเลนส์	12 01 05	143.94	เชื้อเพลิง RDF
ถัง 200 ลิตร	15 01 10	59.15	รีไซเคิล
แกลลอน	15 01 10	6.09	
กระดาษ	15 01 01	21.99	
พลาสติก	15 01 02	12.39	
Gasket	15 01 02	127.62	
Metals	17 04 07	17.26	

3.3 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) ของเสี่ย 3 ชนิด



- 2) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 3) ทราฮายาบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ขนาดอนุภาคไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร
- 4) น้ำประปา มีความขุ่นไม่เกินมาตรฐาน และปราศจากกรดและด่าง (ใช้ในการผสมปูน)
- 5) น้ำปราศจากไอออน (ใช้ในการทดลองการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม)

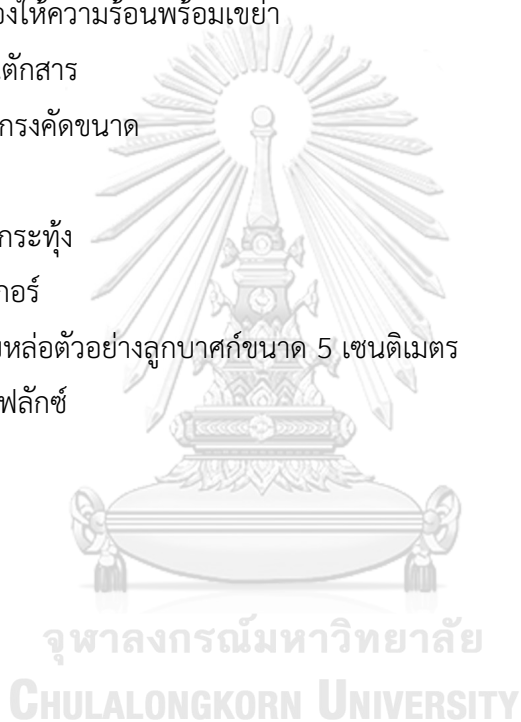
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

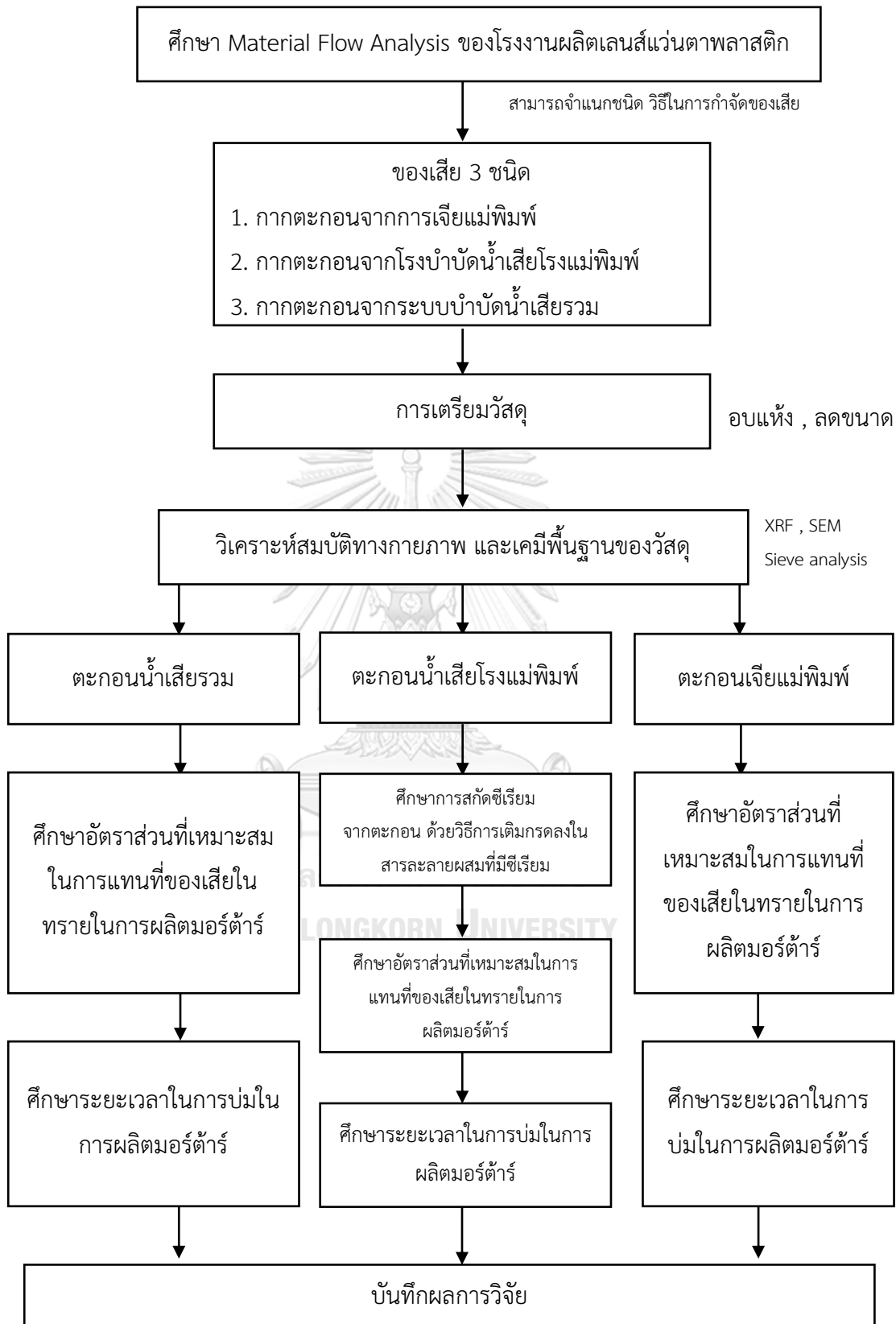
3.3.2 สารเคมี

1. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
2. สารละลายกรดออกซาลิก ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)
3. สารละลายกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)
4. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
5. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)

3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระจกบอกดวง
2. ครกบดตะกอน
3. เครื่องชั่ง
4. เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด
5. เครื่องปั่นเหวี่ยง
6. เครื่องผสม
7. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค
8. เครื่องให้ความร้อนพร้อมเขย่า
9. ซ้อนตักสาร
10. ตะแกรงคัดขนาด
11. ตู้อบ
12. แผงกระทิ้ง
13. ปีกเกอร์
14. แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร
15. ชุดรีฟลักซ์





ภาพที่ 3- 3 ขั้นตอนในการวิจัย

3.4 การดำเนินการวิจัย

3.4.1 การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย

ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray Fluorescence (XRF) ซึ่งสารประกอบที่วิเคราะห์จะแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุ โดยทำการวิเคราะห์สารประกอบ เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์มาใช้ในการอธิบายถึงคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่ทำขึ้น

3.4.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ของตะกอนทั้ง 3 ชนิด

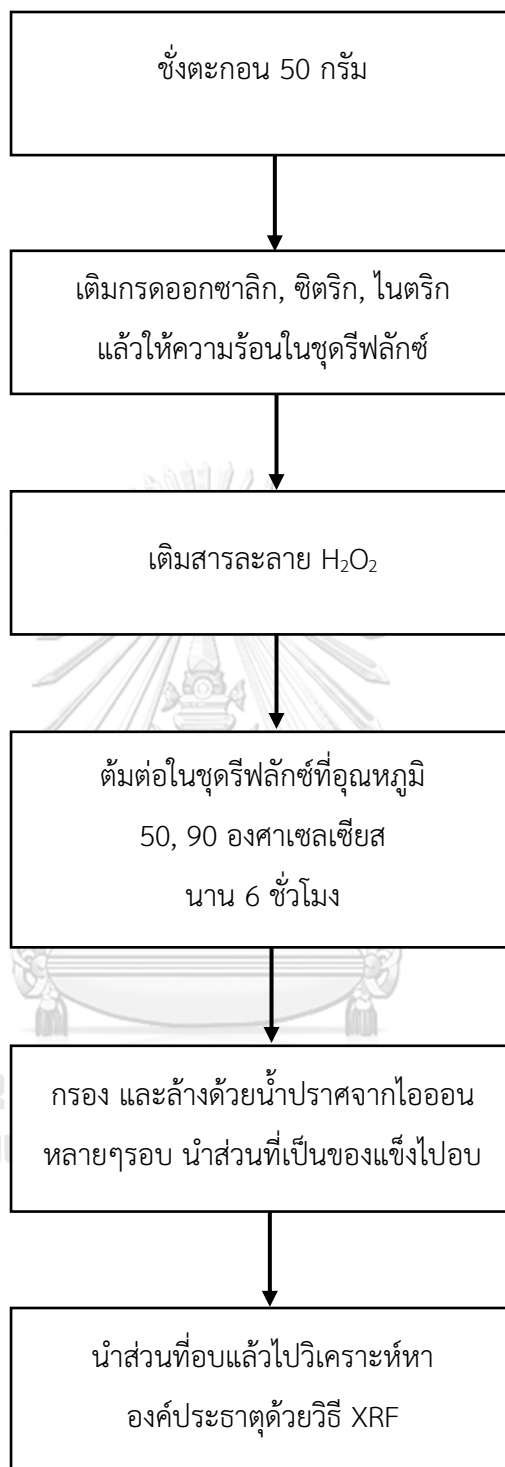
ทำการคัดแยกขนาดอนุภาคของตะกอนทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ โดยทำการแยกโดยใช้ตะแกรงเขย่าคัดขนาด (Sieve Analysis) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33-93

3.4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

3.4.2.1 ศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

ทำการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมที่ผสมอยู่ในตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ โดยนำตะกอนบำบัดน้ำเสียที่มีตะกอนซีเรียมปะปนอยู่ มาผ่านกระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้ (Poscher และคณะ, 2013)

1. นำตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ที่ผ่านการอบ และบดเพื่อลดขนาดแล้ว ชั่งมาจำนวน 50 กรัม
2. เติมกรดไนตริก 57.75 มิลลิลิตร
3. ค่อยๆเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนครบ 90.1 มิลลิลิตร
4. ต้มในชุดรีฟลักซ์ ที่อุณหภูมิ 50, 90 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง
5. กรองตะกอน หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆรอบ
6. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่ 120 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
7. วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของซีเรียมด้วยวิธี XRF



ภาพที่ 3- 4 ขั้นตอนการนำกลับซีเรียม

3.4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียดกตะกอน

3.4.3.1 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียดกตะกอน

ทำการเตรียมตัวอย่างของมอร์ตาร์ โดยมีอัตราส่วนตามตารางที่ 3-3 หลังจากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 305 อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ 0.50 และ 0.55 หลังจากนั้นเทใส่แบบแม่พิมพ์ทิ้งไว้จนคงตัว แล้วนำไปผึ่งต่อให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อด้วยการนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 3- 3 จำนวนตัวอย่างที่ทำการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียดกตะกอน

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ของเสียดกตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม (ตะกอนสีดำ)					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
1	ดำ 10	10	5	5	5
2	ดำ 20	20	5	5	5
3	ดำ 30	30	5	5	5
4	ดำ 40	40	5	5	5
5	ดำ 50	50	5	5	5
6	BLANK	0	5	5	5
รวม					90
การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ของเสียดกตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ (ตะกอนสีขาว)					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดย น้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
7	ขาว 10	10	5	5	5
8	ขาว 20	20	5	5	5
9	ขาว 30	30	5	5	5

10	ขาว 40	40	5	5	5
11	ขาว 50	50	5	5	5
12	BLANK	0	5	5	5
รวม					90
การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ท ที่มีการแทนที่ของเสียดกตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ (ตะกอนสีน้ำตาล)					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
13	น้ำตาล 10	10	5	5	5
14	น้ำตาล 20	20	5	5	5
15	น้ำตาล 30	30	5	5	5
16	น้ำตาล 40	40	5	5	5
17	น้ำตาล 50	50	5	5	5
18	BLANK	0	5	5	5
รวม					90
รวมทั้งหมด					270

หมายเหตุ คำ คือ มอร์ตาร์ทที่ผสมตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม
 ขาว คือ มอร์ตาร์ทที่ผสมตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์
 น้ำตาล คือ มอร์ตาร์ทที่ผสมตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

3.4.3.2 การทดสอบสมบัติของวัสดุก่อสร้าง

การทดสอบสมบัติของตัวอย่างอิฐมอร์ตาร์ทเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15-2547 ประกอบด้วย ลักษณะทั่วไป, ความต้านทานแรงอัด และการดูดซึมน้ำ

ลักษณะทั่วไป

สังเกตดูลักษณะของมอร์ตาร์ทโดยรอบ ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว อาจบิ่นได้เล็กน้อย

ค่ากำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างมอเตอร์ดาร์ที่ผ่านการบ่มแล้วนั้น นำออกมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาด หลังจากนั้นวางก้อนมอเตอร์ดาร์ไว้ตรงกลางเครื่องทดสอบ หลังจากนั้นให้แรงอัดกับมอเตอร์ดาร์ จนกระทั่งตัวอย่างแตก จดบันทึกค่าแรงอัดที่ได้จากเครื่อง แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณหาค่าความต้านแรงอัด ได้จาก

$$P = \frac{F}{A}$$

P คือ ค่าความต้านแรงอัดโดยพื้นที่หน้าตัดตามขวาง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างมอเตอร์ดาร์ หน่วย ตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัดประลัย หน่วย กิโลกรัม

การดูดซึมน้ำ

นำตัวอย่างมอเตอร์ดาร์ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาก่อออกมาชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกค่าไว้เป็นน้ำหนักของมอเตอร์ดาร์ที่อิมตัว หลังจากนั้นนำตัวอย่างมอเตอร์ดาร์ไปอบที่ตู้อบอุณหภูมิประมาณ 100-110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกมาไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง พร้อมบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ โดยสามารถคำนวณค่าการดูดกลืนน้ำได้จาก

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M₁ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กรัม

M₂ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ หน่วย กรัม

การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ เป็นไปตาม มอก.1505-2541 โดยตัดชิ้นทดสอบที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างให้มีขนาด 100 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร โดยให้มีความคลาดเคลื่อน ± 1 มิลลิเมตร กรณีชิ้นทดสอบหนาน้อยกว่าที่กำหนดให้อนุโลมใช้รูปลูกบาศก์ที่มีมิติเท่ากับความหนา โดยให้วัดปริมาตรและมวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$\text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ (Kg)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (m}^3\text{)}}$$

3.4.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์ที่การแทนที่ด้วยตะกอน

3.4.4.1 การชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Prodedure (TCLP)

วิธีการทดลอง

1. นำตะกอนที่ผ่านการบดแล้วมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างตะกอน 1 กรัม ต่อสารละลายกรดอะซิติก (0.1 นอร์มัล) 20 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Centrifuge tube 50 มิลลิลิตร
3. นำเข้าเครื่องเขย่านาน 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมากรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูกรอง 0.6-0.8 ไมโครเมตร
4. เก็บส่วนของเหลวในขวดพลาสติก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก และคัดเลือกของเสียที่ส่งไปยังหลุมฝังกลบแต่ยังสามารถนำมาทำให้เกิดประโยชน์ได้อีก คือ กากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงทำแม่พิมพ์ และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ซึ่งหลังจากวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีองค์ประกอบของแร่ธาตุซีเรียมร้อยละ 13 ซึ่งใช้ในการขัดเจียกระจกแม่พิมพ์ คาดว่าอาจจะสามารถนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนนี้ได้ และยังทำการศึกษหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกากตะกอนทั้งสามชนิดมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตวัสดุก่อสร้าง โดยทำการเตรียมกากตะกอนโดยนำไปอบ เพื่อควบคุมความชื้นของกากตะกอน และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน หลังจากนั้นศึกษาคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้าง คือ ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อสร้าง และยังทำการศึกษการชะละลายโลหะหนักจากวัสดุก่อสร้างที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนทั้งสามชนิด

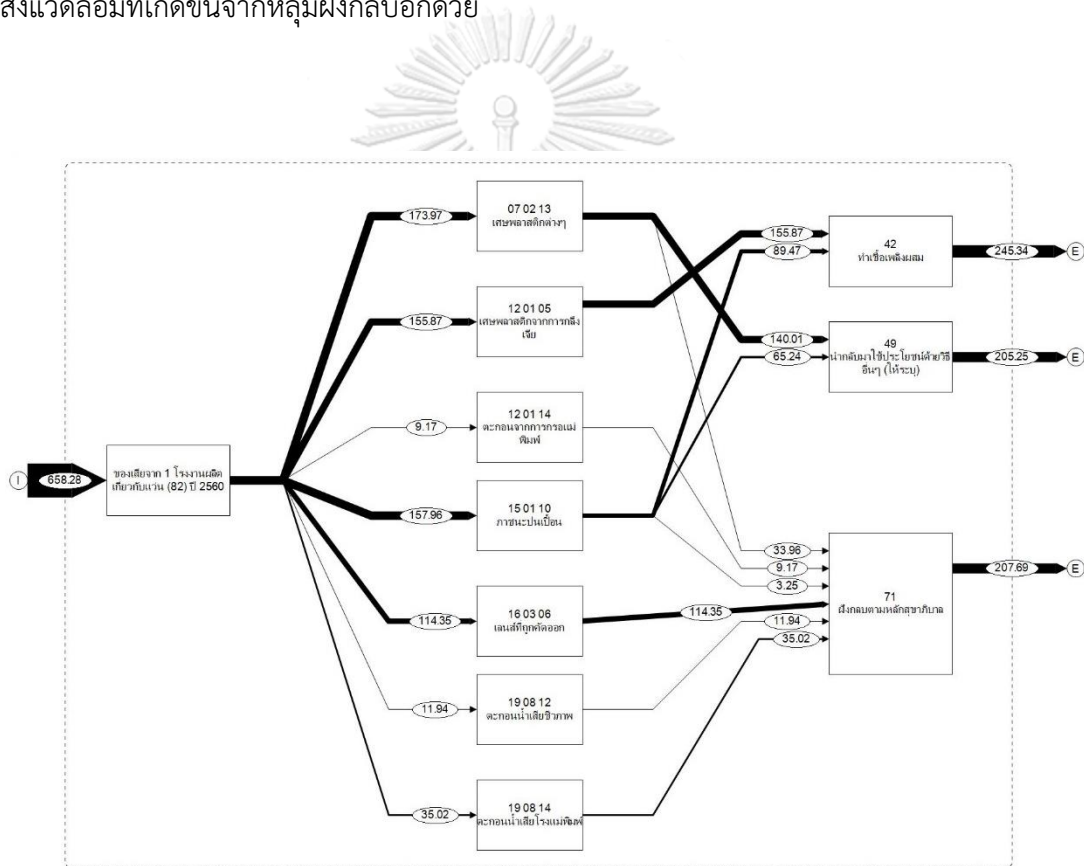
4.1 การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก

การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้โปรแกรม STAN เวอร์ชัน 2.6.801 โดยทำผังการไหลของของเสียเริ่มจากจุดที่ของเสียไปเกิดขึ้น และศึกษาปลายทางสุดท้ายที่ของเสียแต่ละชนิดถูกกำจัดโดยใช้ข้อมูลของเสีย และแหล่งกำจัดจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม และโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การศึกษาผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

ผลการศึกษาผังการไหลของของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก เป็นข้อมูลของเสียที่โรงงานรายงานในปี พ.ศ 2560 ผลการศึกษาดังภาพที่ 4-1 โดยเรียงตามลำดับมากไปน้อยจะเห็นว่าของเสียถูกส่งไปกำจัดมากที่สุด ลำดับที่ 1 คือวิธีการรีไซเคิล 244.5 ตัน คิดเป็นร้อยละ 37.27 ลำดับที่ 2 คือ การกำจัดด้วยวิธีหลุมฝังกลบ 207.77 ตัน คิดเป็นร้อยละ 31.55 ลำดับที่ 3 คือการทำเชื้อเพลิงผสม 158.7 ตัน คิดเป็นร้อยละ 31.18 จากแผนผังการไหลของของเสียไปสู่แหล่งกำจัดจะ

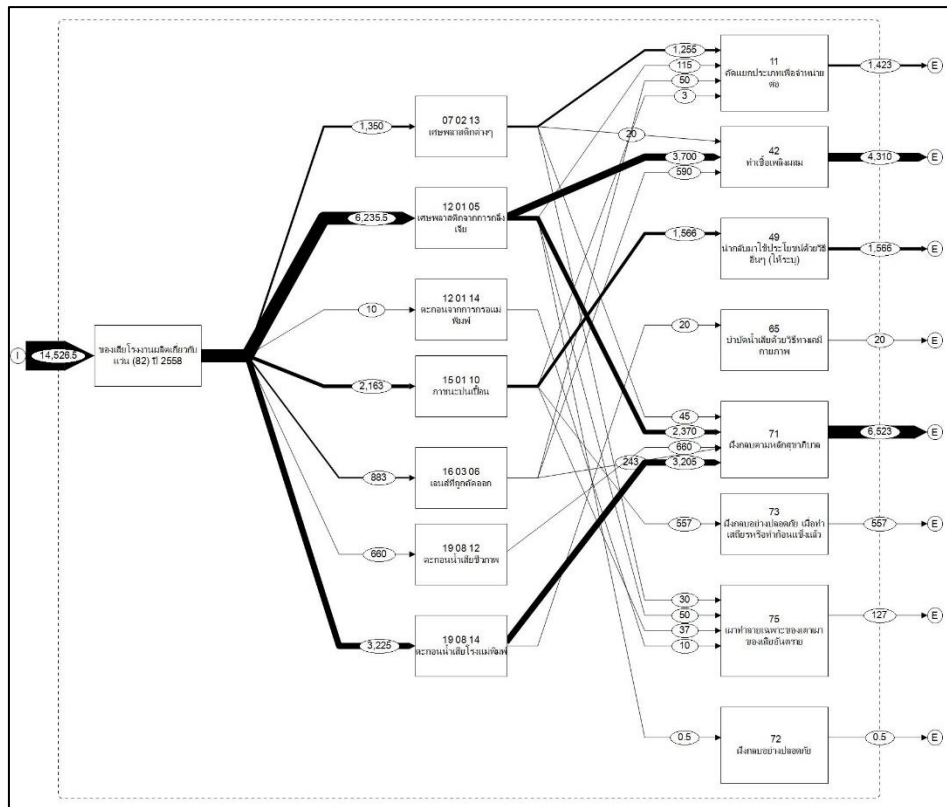
เห็นได้ว่าวิธีการกำจัดของเสียลำดับที่ 1 และ 3 เป็นวิธีการกำจัดของเสียที่ทำให้ของเสียเกิดประโยชน์สามารถนำไปใช้ได้จริง ยกเว้นการกำจัดของเสียในลำดับที่ 2 คือการกำจัดของเสียด้วยการส่งไปยังหลุมฝังกลบ ซึ่งของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบประกอบด้วย เลนส์นิรภัย แม่พิมพ์เลนส์ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย กากตะกอนเจียแก้ว หลอดไฟ และภาชนะปนเปื้อน ของเสียเหล่านี้บางประเภทยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้วยการรีไซเคิลได้ หากเพิ่มการรีไซเคิลของเสียเหล่านี้ให้มากขึ้น จะทำให้ของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบมีปริมาณลดน้อยลง อีกทั้งยังเป็นการลดภาระหลุมฝังกลบเพื่อเก็บพื้นที่ไว้ฝังกลบของเสียที่ทำประโยชน์อื่น ๆ ไม่ได้แล้ว และยังเป็นการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบอีกด้วย



ภาพที่ 4- 1 ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน โดยใช้ข้อมูลจาก บริษัท ไทยออปติคอลล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ปี 2560

4.1.2 การศึกษาผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

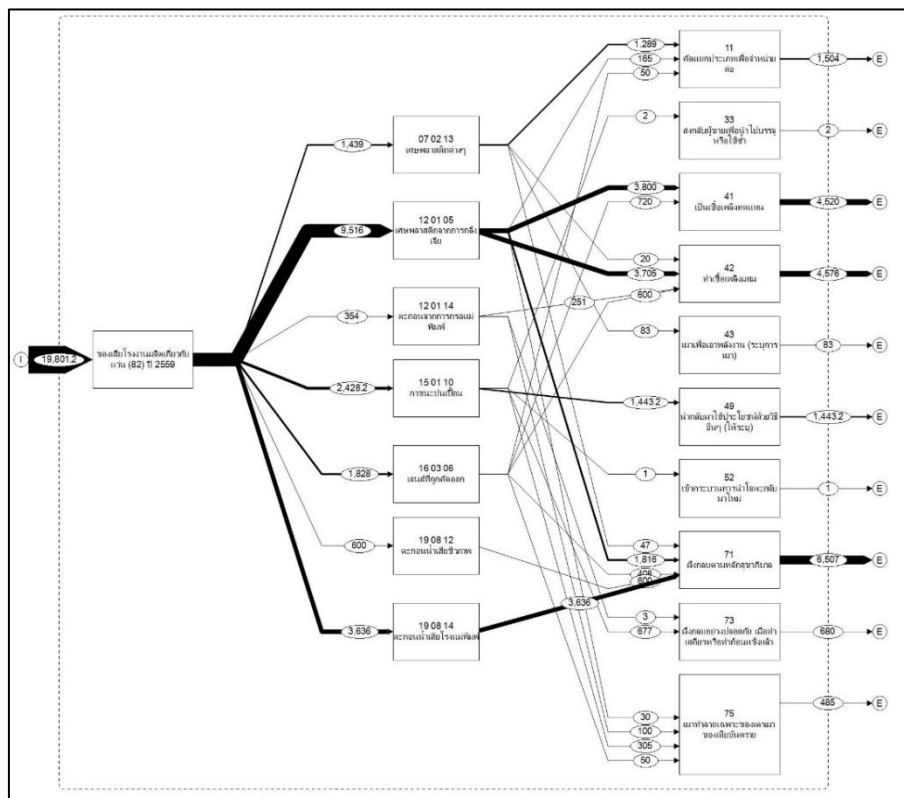
ผลการศึกษาการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมในส่วนที่ 2 นี้ ใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมในการทำผังการไหลของของเสีย โดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี พ.ศ.2558 – พ.ศ.2560 ข้อมูลที่นำมาใช้นั้น ใช้ประเภทของเสียเดียวกับการทำผังการไหลในส่วนแรกที่ใช้ข้อมูลจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก เพื่อดูเปรียบเทียบว่าในระดับประเทศของเสียเหล่านี้ถูกส่งกำจัดไปยังแหล่งกำจัดปลายทางแหล่งใด ดังภาพที่ 4-2 แสดงผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ.2558 แสดงให้เห็นเส้นทางของของเสียที่ถูกส่งไปยังแหล่งกำจัดต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ลำดับที่ 1 ฝังกลบตามหลักรัฐบาล (071) 6,523 ตัน คิดเป็นร้อยละ 44.90 ลำดับที่ 2 ทำเชื้อเพลิงผสม (042) 4,310 ตัน คิดเป็นร้อยละ 29.67 ลำดับที่ 3 การนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ (049) 1,566 ตัน คิดเป็นร้อยละ 10.78 ลำดับที่ 4 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ (011) 1,423 ตัน คิดเป็นร้อยละ 9.80 ลำดับที่ 5 ฝังกลบอย่างปลอดภัย (073) 557 ตัน คิดเป็นร้อยละ 3.83 ลำดับที่ 6 เผาทำลายในเตาเผาของเสียอันตราย (075) 127 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.87 ลำดับที่ 7 บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ (065) 20 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.14 ลำดับที่ 8 ฝังกลบอย่างปลอดภัย (072) ฝังกลบอย่างปลอดภัย (072) 0.5 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.003 จากเส้นทางของของเสียไปสู่ปลายทางแหล่งกักทั้งหมดนั้น จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มีการส่งกำจัดของเสียมากที่สุดคือ ฝังกลบตามหลักรัฐบาล (071) คิดเป็นร้อยละ 44.90 ซึ่งมีปริมาณของเสียที่ถูกส่งไปกำจัดด้วยวิธีหลุมฝังกลบปริมาณ 6,523 ตัน เมื่อดูรายละเอียดประเภทของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบพบว่าประกอบด้วย เศษพลาสติก เศษพลาสติกจากการเจีย ตะกอนน้ำเสียชีวภาพ เลนส์ที่ถูกคัดออก และตะกอนน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ จะเห็นได้ว่าของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติก และตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งของเสียเหล่านี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ได้อีก ซึ่งจากผังการไหลการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ มีเพียงร้อยละ 10.78 ซึ่งน้อยมาก



ภาพที่ 4- 2 ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2558

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ข้อมูลปี พ.ศ.2559 ดังภาพที่ 4-3 แสดงผังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ.2559 แสดงให้เห็นเส้นทางของของเสียที่ถูกส่งไปยังแหล่งกำจัดต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ลำดับที่ 1 ผังกลบตามหลักสุขาภิบาล (071) 6,507 ตัน คิดเป็นร้อยละ 32.86 ลำดับที่ 2 ทำเชื้อเพลิงผสม (042) 4,576 ตัน คิดเป็นร้อยละ 23.11 ลำดับที่ 3 ทำเชื้อเพลิงทดแทน (041) 4,520 ตัน คิดเป็นร้อยละ 22.83 ลำดับที่ 4 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ (011) 1,504 ตัน คิดเป็นร้อยละ 7.60 ลำดับที่ 5 นำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ (049) 1,443.2 ตัน คิดเป็นร้อยละ 7.29 ลำดับที่ 6 ผังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำเสถียรหรือทำก้อนแข็งแล้ว (073) 680 ตัน คิดเป็นร้อยละ 3.43 ลำดับที่ 7 เผาทำลายในเตาเผาของเสียอันตราย 485 ตัน คิดเป็นร้อยละ 2.45 ลำดับที่ 8 เผาเพื่อเอาพลังงาน (043) 83 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.42 ลำดับที่ 9 ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำไปบรรจุหรือใช้ซ้ำ (033) 2 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.01 และลำดับที่ 10 เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

(052) 1 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.005 จากข้อมูลของเสียที่ถูกส่งไปแหล่งกำจัดต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าของเสียถูกส่งไปกำจัดมากที่สุดด้วยวิธีฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล คิดเป็นร้อยละ 32.86 โดยของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบประกอบด้วย เศษพลาสติก เศษพลาสติกจากการเจีย เลนส์ที่ถูกคัดออก ตะกอนน้ำเสียชีวภาพ ตะกอนน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ ของเสียแบ่งเป็นสองประเภทหลักๆ คือ พลาสติก และ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียทั้งสองประเภทนี้สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่นๆ ได้อีก ซึ่งจากผังการไหลจะเห็นว่าการนำกลับไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ของของเสียมีเพียงร้อยละ 7.29 ซึ่งยังมีปริมาณที่น้อยมาก



ภาพที่ 4- 3 ผังการไหลของของเสียจากจุดกำเนิดของเสียไปสู่แหล่งกำจัด ของโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2559

ผลการศึกษามังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก โดยใช้ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ข้อมูลปี พ.ศ.2560 ดังภาพที่ 4-4 แสดงมังการไหลของของเสียโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ.2560 แสดงให้เห็นเส้นทางของของเสียที่ถูกส่งไปยังแหล่งกำจัดต่าง ๆ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ลำดับที่ 1 ลำดับที่ 1 ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล (071) 6,299 ตัน คิดเป็นร้อยละ 24.36

ลำดับที่ 2 เป็นวัตถุติดทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (044) คิดเป็นร้อยละ 20.11 ลำดับที่ 3 เป็นเชื้อเพลิงทดแทน (041) 5,020 ตัน คิดเป็นร้อยละ 19.41 ลำดับที่ 4 ทำเชื้อเพลิงผสม (042) 4,310 ตัน คิดเป็นร้อยละ 16.66 ลำดับที่ 5 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ (011) 1,802 ตัน คิดเป็นร้อยละ 6.97 ลำดับที่ 6 นำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ (049) 1,590.1 ตัน คิดเป็นร้อยละ 6.15 ลำดับที่ 7 ฝังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำเสถียรหรือทำก้อนแข็งแล้ว (073) 746.5 ตัน คิดเป็นร้อยละ 2.89 ลำดับที่ 8 เมาทำลายในเตาเผาของเสียอันตราย 465 ตัน คิดเป็นร้อยละ 1.80 ลำดับที่ 9 หมักทำปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดิน (083) 400 ตัน คิดเป็นร้อยละ 1.55 ลำดับที่ 10 เมาเพื่อเอาพลังงาน 27 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.10 ลำดับที่ 11 ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำไปบรรจุหรือใช้ซ้ำ (033) 2 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.01 และลำดับที่ 12 เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ 1 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.004 จากผังการไหลโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี พ.ศ.2560 จะเห็นว่าของเสียถูกส่งไปกำจัดด้วยวิธีหลุมฝังกลบมากที่สุดถึงร้อยละ 24.36 โดยของเสียที่ถูกส่งไปกำจัดด้วยหลุมฝังกลบประกอบด้วย เศษพลาสติก เศษพลาสติกจากการเจีย เกล็ดที่ถูกคัดออก ตะกอนน้ำเสียชีวภาพ ตะกอนน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ โดยของเสียแบ่งเป็นสองประเภทหลักๆ คือ พลาสติก และ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียทั้งสองประเภทนี้สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ได้อีก ซึ่งจากผังการไหลจะเห็นว่า การนำกลับไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ของของเสียมีเพียงร้อยละ 6.15 ซึ่งยังมีปริมาณที่น้อยมาก

จากการทำผังการไหลของของเสียจากการใช้ข้อมูลจากโรงงาน 1 โรงงาน และข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2558-2560 พบว่าหากเพิ่มการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น จะทำให้ของเสียที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบมีปริมาณลดน้อยลง อีกทั้งยังเป็นการลดภาระหลุมฝังกลบเพื่อเก็บพื้นที่ไว้ฝังกลบของเสียที่ทำประโยชน์อื่น ๆ ไม่ได้แล้ว และยังเป็น การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบอีกด้วย

จากการนำข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม และข้อมูลของเสียจากบริษัท ไทยออปติคอลล กิ๊ป จำกัด (มหาชน) นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผังการไหลของของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty) จากตารางที่ 4-1 พบว่าค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลจากปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกทั้งประเทศ มีค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลร้อยละ 7.18 เนื่องจากข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลของเสียภายในปี 2560 เท่านั้น อีกทั้งวิธีในการเก็บข้อมูลของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกันไป ไม่ได้มีความละเอียดที่มากพอ และปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน มีค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลร้อยละ 2.55 เนื่องจากข้อมูลของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกเป็นข้อมูลที่เก็บเพียง 1 โรงงานเท่านั้น มีความน่าเชื่อถือในแง่ของการเก็บข้อมูลจึงทำให้ความน่าเชื่อถือของข้อมูลปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน มีความน่าเชื่อถือมากกว่า

ตารางที่ 4- 1 ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก

ชนิดข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล	ความไม่แน่นอนของข้อมูล (%)
ปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติกทั้งประเทศ	กรมโรงงานอุตสาหกรรม	7.18
ปริมาณของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน	บริษัท ไทยออปติคอลล กิ๊ป จำกัด (มหาชน)	2.55

4.2 การศึกษาองค์ประกอบกายภาพ และเคมีพื้นฐานของของเสีย

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสีย

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของของเสียด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4-2 โดยแสดงส่วนประกอบทางเคมีของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม รวมถึงปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และทราย เพื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้ง 3 ชนิดกับทราย และปูน จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอน พบว่าตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนบำบัดน้ำเสีย

โรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 0.0923, 1.95, 6.99 ตามลำดับ ส่วนปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าร้อยละ 64.1 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ คือ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตะกอนทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในตะกอนทั้ง 3 ชนิด ที่น้อยกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ตะกอนทั้งสามชนิดจึงไม่เหมาะสมในการแทนที่ปูนในการผลิตมอร์ตาร์

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้ง 3 ชนิด พบว่าตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 59.4, 26.8 และ 21 ตามลำดับ ส่วนปริมาณซิลิกาออกไซด์ในทรายมีปริมาณร้อยละ 99.5 จะเห็นว่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้งสามชนิดมีแนวโน้มที่จะใกล้เคียงกับองค์ประกอบของทรายมากกว่า จึงคาดว่าตะกอนทั้งสามชนิดนี้สามารถนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในการแทนที่ทรายในการผลิตมอร์ตาร์ได้

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ พบว่ามีองค์ประกอบของซีเรียออกไซด์ร้อยละ 13.8 เป็นสารที่ใช้ในการขัดเจียกระจกแม่พิมพ์ ช่วยให้กระจกแม่พิมพ์มีความเรียบความใสที่มากขึ้น ซึ่งคาดว่าตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์มีศักยภาพสามารถนำกลับแร่ธาตุซีเรียกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4- 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ปูซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และทราย

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)				
	ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์	ตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์	ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)	ทราย (วิชัย วรยศ อำไพ, 2542)
SiO ₂	59.4	26.8	21	20.2	99.5
Al ₂ O ₃	3.09	35.9	22.1	5.9	0.7
Fe ₂ O ₃	0.318	0.328	4.14	3.2	0.1
CaO	0.0923	1.95	6.99	64.1	-
MgO	3.29	1.6	2.29	1.0	-
Na ₂ O	7.8	2.7	0.916	0.1	-
P ₂ O ₅	0.0253	0.441	20.9	-	-
Cl	0.0157	0.161	0.219	-	-
La ₂ O ₃	-	6.95	2.3	-	-
CeO ₂	-	13.8	4.53	-	-

หมายเหตุ: “ - ” คือ ไม่พบองค์ประกอบนี้ในวัสดุ

4.2.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

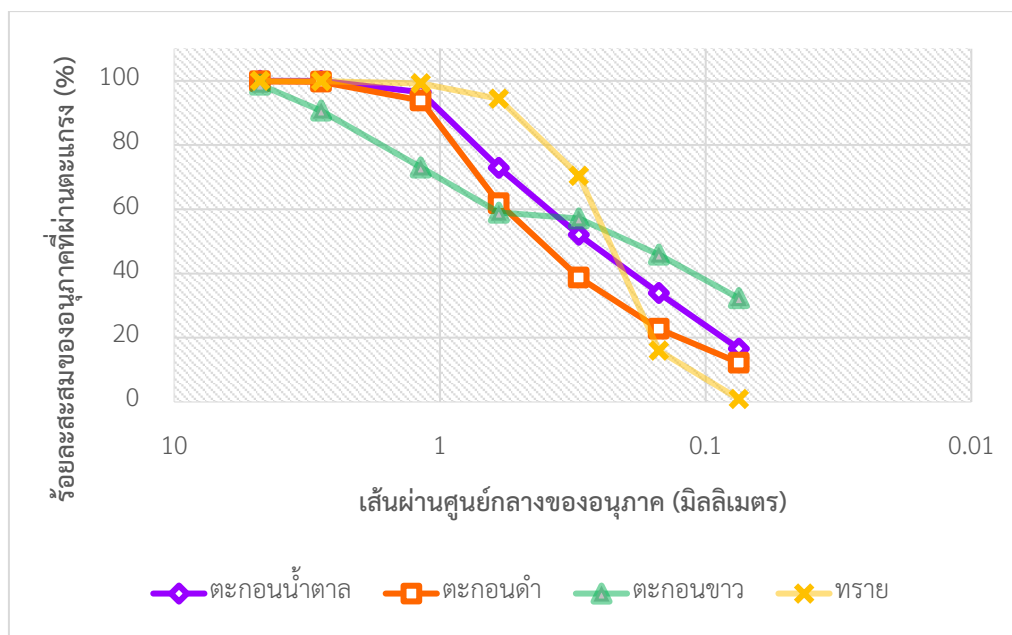
การศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์เลนส์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ทำการศึกษาโดยใช้การคัดแยกด้วยตะแกรงหลังจากนั้นใส่เครื่องเขย่าเพื่อคัดขนาด (Sieve Analysis) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33-93 และ ASTM C136-95a ดังตารางที่ 4-3 ตารางแสดงการกระจายขนาดของอนุภาคตะกอนทั้งสามชนิด พบว่าร้อยละการผ่านสะสมของตะกอนตัวอย่าง มีค่าดังนี้ โดยผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 7, 16, 30, 50, 100 และ 200 ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าเท่ากับ 98.80, ตะแกรงเบอร์ 7 มีค่าเท่ากับ 90.73, ตะแกรงเบอร์ 16 มีค่าเท่ากับ 73.30, ตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าเท่ากับ 59.00, ตะแกรงเบอร์ 50 มีค่าเท่ากับ 57.16, ตะแกรงเบอร์ 100 มีค่าเท่ากับ 45.90 และตะแกรงเบอร์ 200 มีค่าเท่ากับ 32.30 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าเท่ากับ 99.80, ตะแกรงเบอร์ 7 มีค่าเท่ากับ 99.70, ตะแกรงเบอร์ 16 มีค่าเท่ากับ 93.90, ตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าเท่ากับ 61.86, ตะแกรงเบอร์ 50 มีค่าเท่ากับ 38.13 ตะแกรงเบอร์ 100 มีค่า

เท่ากับ 22.73 และตะแกรงเบอร์ 200 มีค่าเท่ากับ 12.23 และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าเท่ากับ 100.00, ตะแกรงเบอร์ 7 มีค่าเท่ากับ 99.96, ตะแกรงเบอร์ 16 มีค่าเท่ากับ 96.50, ตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าเท่ากับ 72.92, ตะแกรงเบอร์ 50 มีค่าเท่ากับ 52.06, ตะแกรงเบอร์ 100 มีค่าเท่ากับ 33.90 และตะแกรงเบอร์ 200 มีค่าเท่ากับ 16.60

ผลจากตารางจะเห็นได้ว่าตะกอนทั้งสามชนิดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้เกือบทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า มวลรวมละเอียดนั้น ได้แก่ ทราย ที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 200 (ซิวาล เศรษฐบุตร, 2543) จึงคาดว่าตะกอนทั้ง 3 ชนิด เหมาะสมในการนำไปแทนที่ทรายมากกว่าแทนที่ในปูนซีเมนต์ เนื่องจากองค์ประกอบของปูนซีเมนต์นั้นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ที่ผ่านมาพบว่าปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกาออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งองค์ประกอบในตะกอนทั้งสามชนิดนั้น องค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของทราย ส่วนปูนซีเมนต์นั้น องค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งพบในตะกอนทั้งสามชนิดในปริมาณที่น้อย และจากภาพที่ 4-5 แสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคของตะกอนทั้งสามชนิดเปรียบเทียบกับทราย จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งมีแนวโน้มการกระจายขนาดไปในทิศทางเดียวกันจึงสามารถสรุปได้ว่าควรที่จะนำตะกอนทั้งสามชนิดไปแทนที่ทรายในการผลิตมอร์ตาร์

ตารางที่ 4- 1 ค่าการกระจายขนาดของตะกอนทั้ง 3 ชนิด ทราย และมวลรวมละเอียด

ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิด	ตะกอน				ทราย	มวลรวมละเอียด (มอก.566)
		ตะกอนดำ	น้ำตาล	ตะกอนขาว			
4	4.75	99.80	100.0	98.80	100.0	95-100	
7	2.80	99.70	99.96	90.73	99.90	80-100	
16	1.18	93.90	96.50	73.03	99.23	50-85	
30	0.60	61.86	72.93	59.00	94.43	25-60	
50	0.30	38.73	52.06	57.16	70.46	5-30	
100	0.15	22.73	33.90	45.90	15.96	0-10	
200	0.075	12.23	16.60	32.30	0.93	0-3	



ภาพที่ 4- 5 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยน้ำหนักของของเสียทั้ง 3 ชนิด

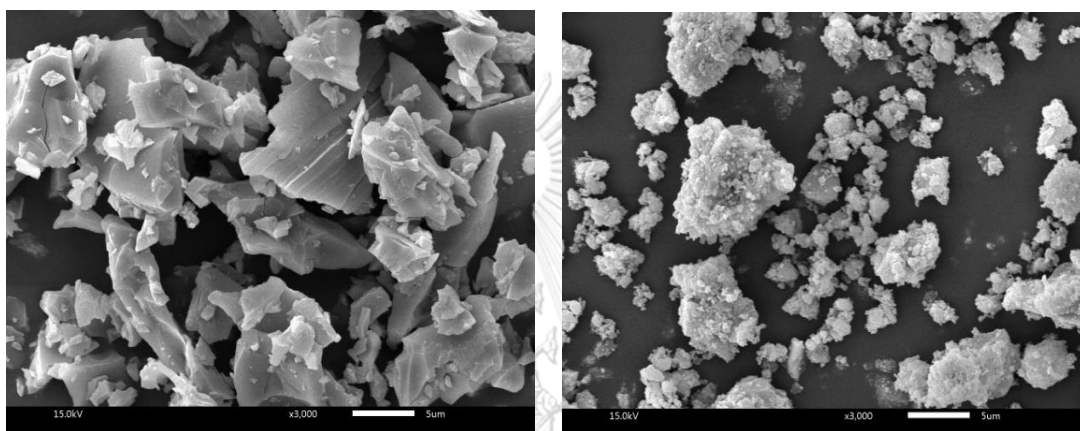
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์

ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม

การศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตะกอนทั้งสามชนิดมีรูปร่างลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4-6 (ก) ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคจะเห็นว่าเป็นลักษณะของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีความเหลี่ยมขอบคม และมีลักษณะแบน ไม่มีรูพรุนในโครงสร้างทำให้ตัวตะกอนดูดซึมน้ำได้ไม่ดี แต่ส่งผลดีต่อการนำไปเป็นวัสดุผสมในทรายเนื่องจากตัวตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ไม่ดูดซึมน้ำไว้ทำให้น้ำสามารถไปทำปฏิกิริยาภายในส่วนผสมทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งช่วยให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียดซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

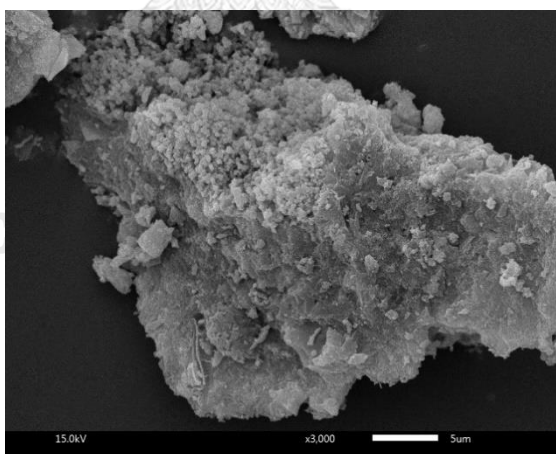
จากภาพที่ 4-6 (ข) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน แต่พื้นผิวมีความขรุขระ และมีรูพรุน ทำให้เกิดช่องว่างภายในส่วนผสมในการทำมอร์ต้าร์ ซึ่งรูพรุนเหล่านี้ทำให้ความหนาแน่นภายในเนื้อมอร์ต้าร์มีความน้อยไปด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงเนื่องจากช่องว่างภายในโครงสร้าง

จากภาพที่ 4-6 (ค) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม กำลังขยาย 3,000 เท่า ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวมีรูพรุน และมีความขรุขระ ทำให้เกิดช่องว่างจำนวนมากจากการที่มีรูพรุนในเนื้อโครงสร้าง ตะกอนมีลักษณะดูดซึมน้ำได้ดีจากการที่มีช่องว่างและรูพรุน ซึ่งส่งผลให้น้ำที่เติมลงไปในส่วนผสมไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากพอ ทำให้แรงมีแรงยึดเกาะที่น้อยระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียด จะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่น้อยตามไปด้วย



ก) ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์

ข) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

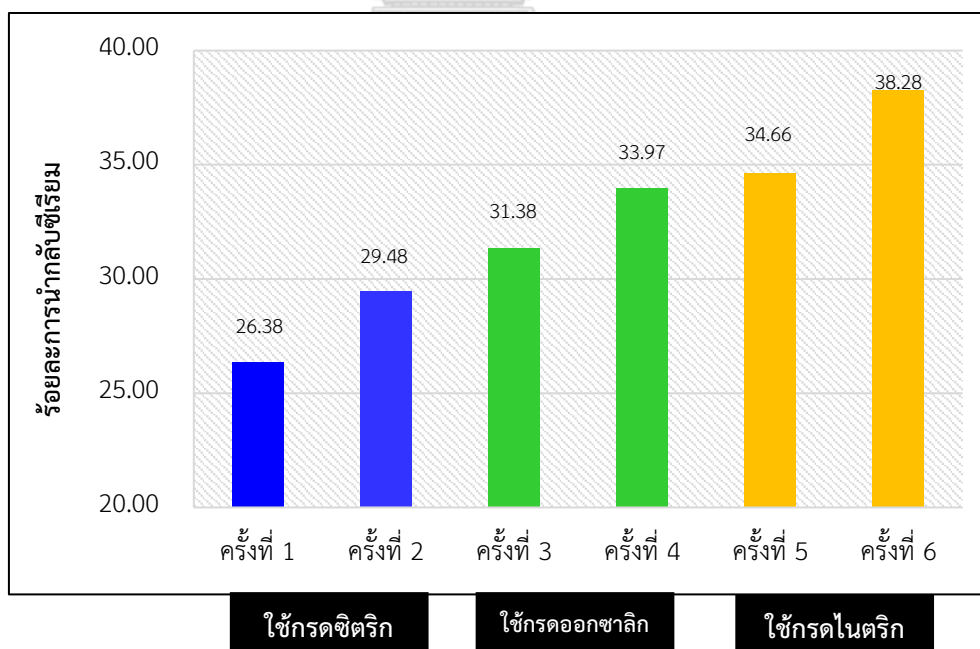


ค) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม

ภาพที่ 4- 6 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของ (ก) ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ (ข) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และ (ค) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม

4.3 การศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์

ผลการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ ดังภาพที่ 4-7 ทำการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมโดยใช้การเติมกรดเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ปนมากับแร่ธาตุซีเรียมโดยใช้กรด 3 ชนิด คือ กรดซिटริก กรดออกซาลิก และกรดไนตริก ทำที่อุณหภูมิ 50 และ 90 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองโดยใช้กรดซिटริกที่อุณหภูมิ 50 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ค่าร้อยละการนำกลับซีเรียม 26.38 และ 29.48 ตามลำดับ ผลการทดลองโดยใช้กรดออกซาลิกที่อุณหภูมิ 50 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ค่าร้อยละการนำกลับซีเรียม 31.38 และ 33.97 ตามลำดับ และผลการทดลองใช้โดยกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 50 และ 90 องศาเซลเซียส ได้ค่าร้อยละการนำกลับซีเรียม 34.66 และ 38.28 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความแรงกรดที่มากขึ้น และเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองที่มากขึ้นจะส่งผลให้ได้ค่าร้อยละของซีเรียมที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความแรงของกรดที่มากขึ้นสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ปนมากับตะกอนได้มากขึ้นตามไปด้วย ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิที่มากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีมากขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Posher และคณะ 2014 ทำการทดลองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก อีกทั้งยังทดลองใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงพบว่าชนิดของกรด และอุณหภูมิมีผลต่อการนำกลับซีเรียม



ภาพที่ 4- 7 ร้อยละการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมโดยใช้กรดซिटริก กรดออกซาลิก และกรดไนตริก ครั้งที่ 1-6

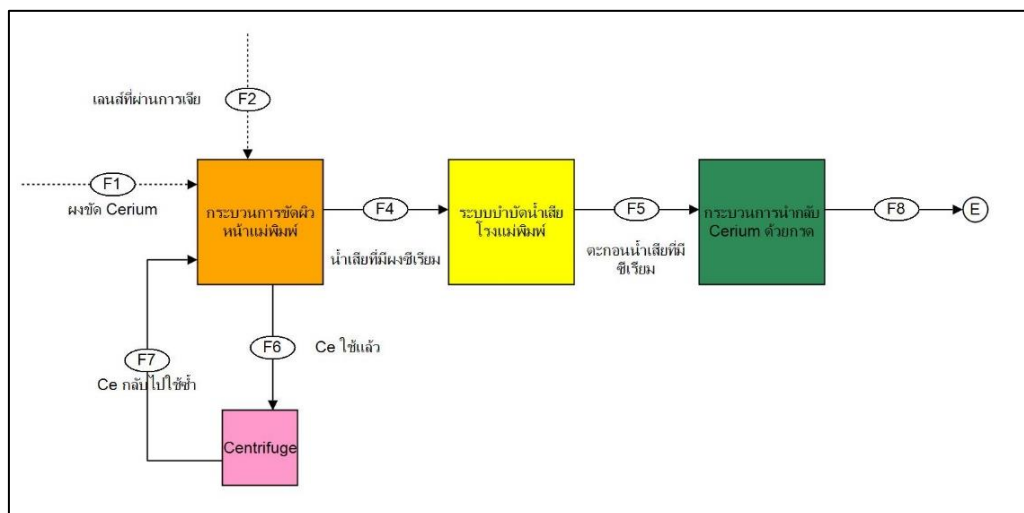
จากการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จึงทำการคำนวณความคุ้มค่าของการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม โดยคำนวณจากราคาสารเคมี และกระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม และเทียบกับราคาซีเรียมในท้องตลาด ผลการคำนวณตามตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าจากการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับซีเรียม ประกอบด้วยค่ากรดไนตริก ค่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าไฟฟ้าในการใช้เครื่องมือ และค่าวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF ประมาณเป็นมูลค่าได้เท่ากับ 805 บาท ต่อการนำกลับ 1 ครั้ง ได้ตะกอนซีเรียมประมาณ 30 กรัม เมื่อเทียบกับราคาผงซีเรียมในปัจจุบันที่มีราคาเมื่อเทียบกับที่น้ำหนัก 30 กรัม ราคา 109 บาท ซึ่งมีราคาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการนำกลับจากการทดลอง จึงสรุปได้ว่าการนำกลับซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ด้วยวิธี รีฟลักซ์ไม่คุ้มค่า และยังได้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ซื้อในตลาด

ตารางที่ 4- 3 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการศึกษาการนำกลับซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ด้วยวิธีรีฟลักซ์

รายการ	ราคา (บาท)	ราคาวิเคราะห์ต่อ 1 ครั้ง (บาท)
กรดไนตริก 70% 2.5 L (60ml/ครั้ง)	1,300	31
H ₂ O ₂ 30% 2.5 L (90ml/ครั้ง)	2,660	96
วิเคราะห์ XRF	595	595
ค่าไฟฟ้า	10	10
รวมค่าวิเคราะห์ 1 ครั้ง		
ได้ตะกอน 30 g. หลังการนำกลับ	-	732

จากการศึกษาฝั่งการไหลของซีเรียมจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก ได้แผนผังดังภาพที่ 4-8 จะเห็นว่าจากผลการศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ซึ่งได้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมออกมามากที่สุดเพียงร้อยละ 38.28 ซึ่งเป็นผลมาจากตะกอนที่มีแร่ธาตุซีเรียมปะปนอยู่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาก่อนซึ่งทำให้มีสารปนเปื้อนจากการเติมสารช่วยในการตกตะกอนในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งหากนำตะกอนที่มีซีเรียมปะปนจาก

หมายเลข F4 มาทำการศึกษาค่าได้ อาจจะทำให้สามารถนำกลับแร่ธาตุซีเรียมและทำให้ได้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมมากขึ้นตามไปด้วย

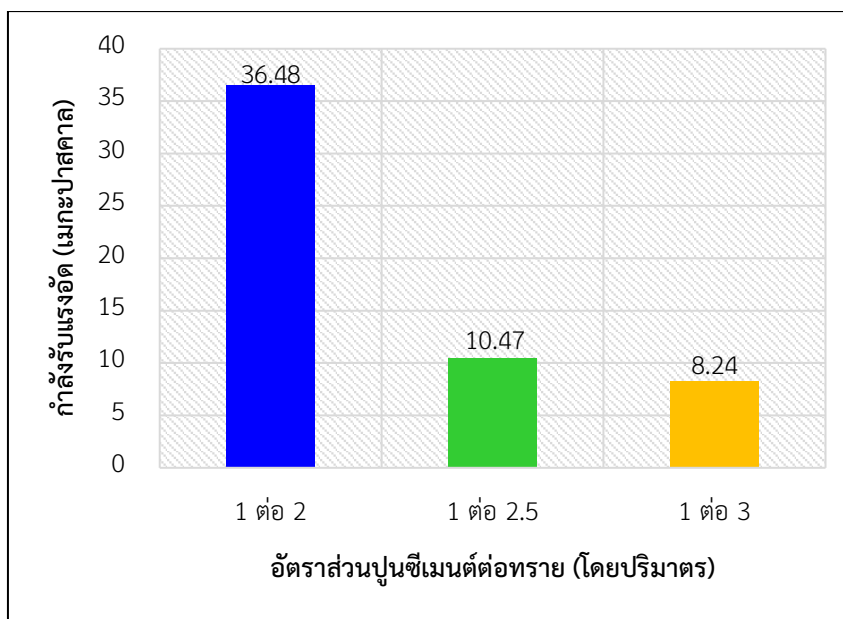


ภาพที่ 4- 8 ผังแสดงการไหลของแร่ธาตุซีเรียมในกระบวนการผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก

4.4 การศึกษาหาอัตราส่วนพื้นฐานที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนทั้ง 3 ชนิด

4.4.1 การศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ต้าร์

ผลการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ต้าร์ โดยการผสมปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ ขึ้นรูปเป็นมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร โดยในการศึกษาจะใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ใกล้เคียงกัน 3 อัตราส่วน คือ 1:2, 1:2.5 และ 1:3 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูน 1:2 ในทุกชุดการทดลอง ใช้ระยะเวลาในการบ่มมอร์ต้าร์ 7 วัน หลังจากครบ 7 วันนำมอร์ต้าร์ไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตามภาพที่ 4-9 จากกราฟ แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2, 1:2.5 และ 1:3 มีค่ากำลังรับแรงอัด 36.48, 10.47 และ 8.24 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากค่ากำลังรับแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่มากที่สุด คือ 1:2 และจากภาพยังแสดงอีกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทรายมากขึ้นในการผสมจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย

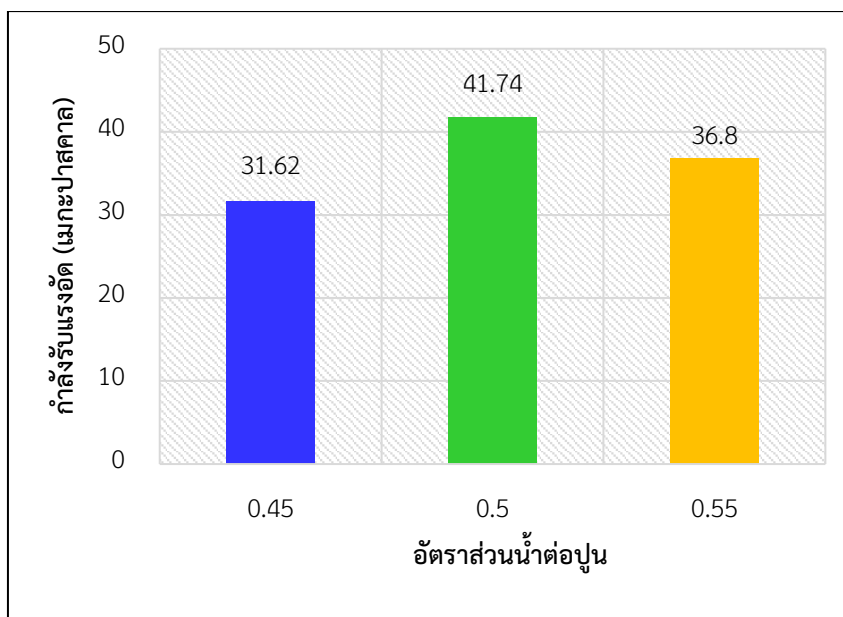


ภาพที่ 4- 9 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50)

4.4.2 การศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์

ทำการศึกษหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์โดยการหล่อมอร์ต้าขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) จากภาพที่ 4-10 ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1:2.22, 1:2 และ 1:1.82 มีค่ากำลังรับแรงอัด 31.62, 41.74 และ 36.80 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:2 และจากกราฟแสดงให้เห็นอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูน 1:2.22 เป็นอัตราส่วนที่น้อยเกินไปจะส่งผลให้ขึ้นรูปมอร์ตาร์ได้ยาก และกำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดเนื่องจากน้ำที่น้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อย ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1:1.82 เป็นอัตราส่วนที่มากเกินไป ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากพอ แต่ในการขึ้นรูปมอร์ตาร์นั้นลักษณะเนื้อในการขึ้นรูปจะมีลักษณะแฉะจนเกินไป ทำให้ขึ้นรูปได้ยาก

ดังนั้นในการหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการผลิตมอร์ตาร์ คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:2 และนำอัตราส่วนนี้ไปใช้ต่อในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียจากตะกอน

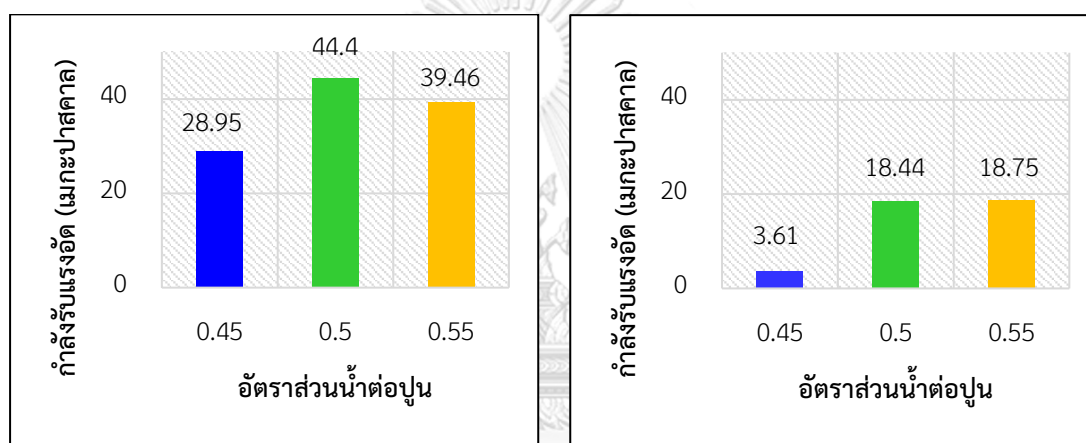


ภาพที่ 4- 10 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2)

4.4.3 การศึกษาหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับตะกอนแต่ละชนิดในการผลิตมอร์ตาร์

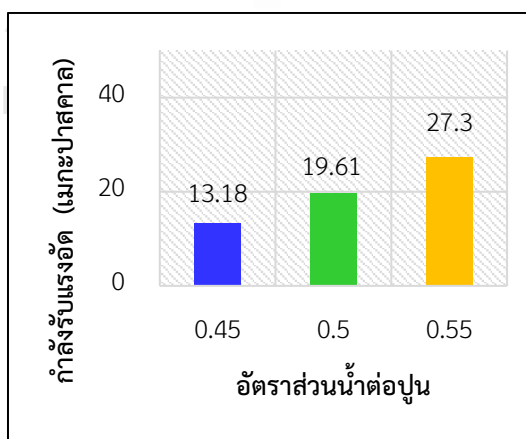
เนื่องจากตะกอนแต่ละชนิดมีการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกัน จึงทำการทดลองหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับตะกอนแต่ละชนิด โดยทำการหล่อมอร์ต้าขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1 ต่อ 2 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน โดยมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม แทนที่ร้อยละ 10 ลงในมอร์ตาร์ แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) จากภาพที่ 4-11 ก) แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1:2.22, 1:2 และ 1:1.82 มีค่ากำลังรับแรงอัด 28.95, 44.4 และ 39.46 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากภาพที่ 4-11 ข) แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1:2.22, 1:2 และ 1:1.82 มีค่ากำลังรับแรงอัด 3.61, 18.44 และ 18.75 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และจากภาพที่ 4-11 ค) แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1:2.22, 1:2 และ 1:1.82 มีค่ากำลังรับแรงอัด 13.18, 19.61 และ 27.30 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

ดังนั้นจากค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ว่า ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 44 เมกะปาสคาล ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ คือ 1:2 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 18.75 เมกะปาสคาล ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนที่เหมาะสมกับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม คือ 1:1.82 และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 27.3 เมกะปาสคาล ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อปูนที่เหมาะสมกับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ คือ 1:1.82 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนที่เหมาะสมของแต่ละตะกอนนี้จะถูกนำไปใช้โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนทั้งสามชนิด



ก) กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์

ข) กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม



ค) กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

ภาพที่ 4- 11 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับแต่ละตะกอน ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (ใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2)

4.5 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนทั้ง 3 ชนิด

4.5.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ทำการทดลองโดยการหล่อนำมอร์ตาร์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนทั้ง 3 ชนิด โดยแนวโน้มของค่าความหนาแน่นจะลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยของเสียที่มากขึ้น ยกเว้นการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนสูงสุดจนถึงร้อยละ 30 หลังจากการแทนที่ที่ร้อยละ 30 ไปแล้วนั้นพบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอน ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.94, 1.95 และ 1.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

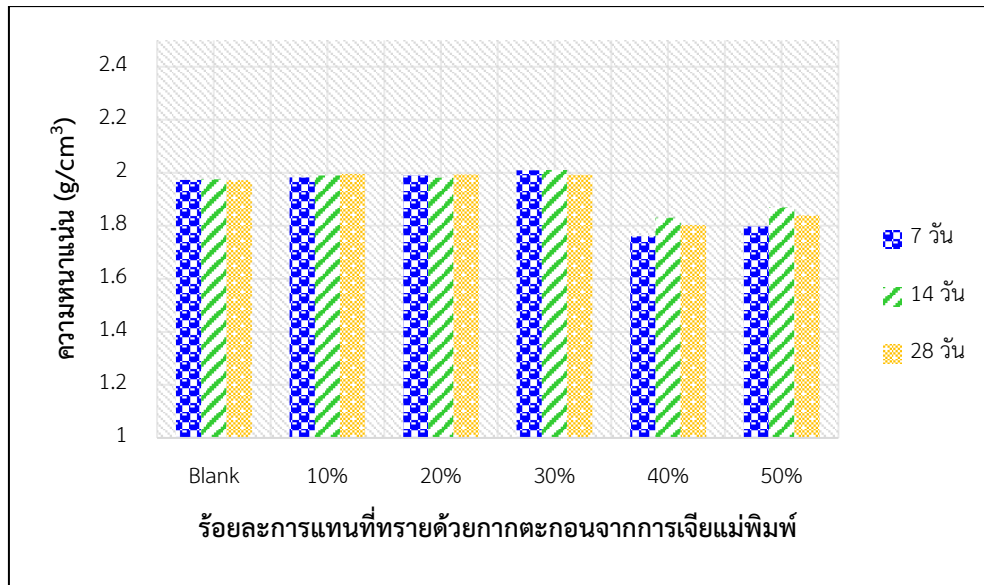
จากภาพที่ 4-12 แสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีแทนที่ด้วยกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.98, 1.99, 2.00, 1.76 และ 1.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.98, 2.00, 2.01, 1.83 และ 1.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.99, 2.00, 1.99, 1.80 และ 1.84 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-13 แสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.80, 1.66, 1.49, 1.27 และ 1.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.81, 1.68, 1.47, 1.29 และ 1.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.81, 1.69, 1.48, 1.27 และ 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

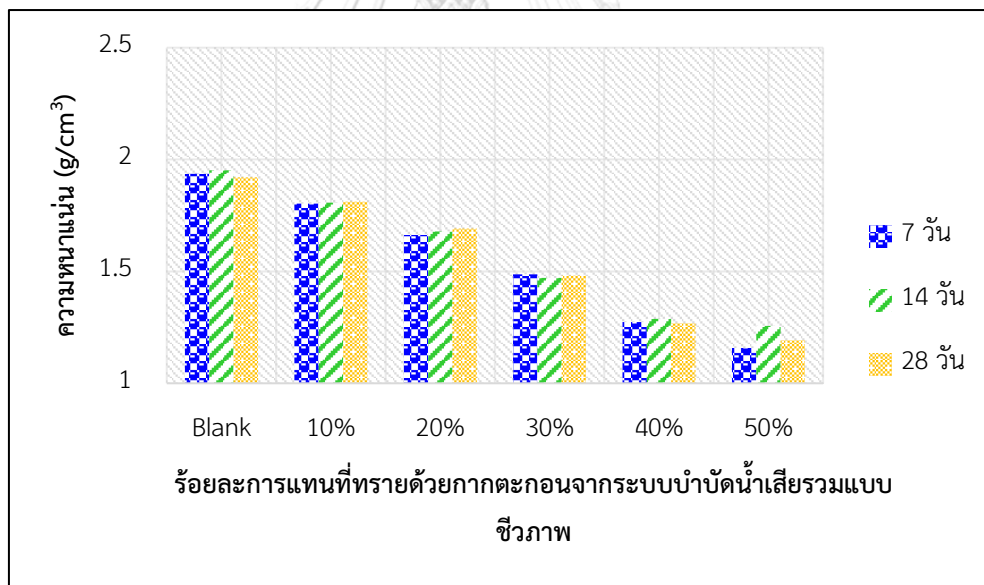
จากภาพที่ 4-14 แสดงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7

วัน มีค่าความหนาแน่น 1.86, 1.83, 1.71, 1.45 และ 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.89, 1.74, 1.72, 1.38 และ 1.39 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่น 1.88, 1.74, 1.71, 1.46 และ 1.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ๆ

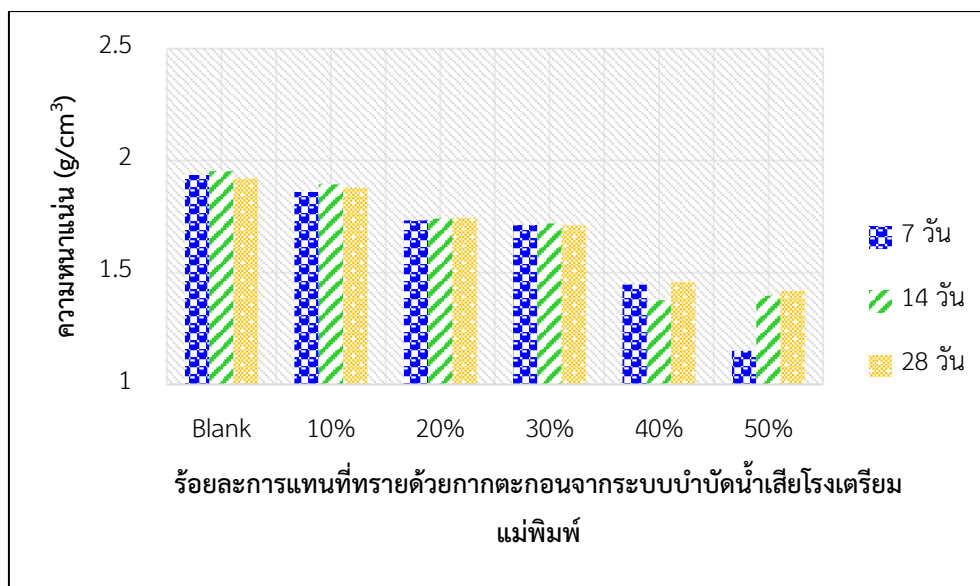
จากค่าความแน่นของมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ จะเห็นว่าจากการเพิ่มการแทนที่มากขึ้นด้วยตะกอนจากการจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จะทำให้ความหนาแน่นของมอร์ต้ามีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจาก ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ มีน้ำหนักที่เบากว่าทราย ทำให้โครงสร้างของมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนทั้งสองชนิดเกิดช่องว่างมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของมอร์ต้าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (พลวัต คงสรรค์ เสถียร, 2559) ทำการศึกษาทดแทนตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียกระบวนการผลิตสีน้ำทดแทนลงในการผลิตบล็อกประสาน ผลจากการแทนที่ตะกอนที่มากขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่น เนื่องจากขนาดอนุภาค และลักษณะทางกายภาพ ทำให้ความหนาแน่นของบล็อกประสานมีค่าลดลง ส่วนมอร์ต้าที่มีการแทนที่มากขึ้นด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์จะเห็นว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงจุดหนึ่งและลดต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจาก ในช่วงแรกตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ และทรายมีองค์ประกอบของซิลิกา ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งเมื่อถึงจุดหนึ่งเนื่องจากมีการแทนที่เพิ่มมากขึ้นและปริมาณทรายน้อยลงทำให้ปริมาณซิลิกาจากทรายน้อยลงไปด้วย ทำให้ส่งผลต่อความหนาแน่นของมอร์ต้าจึงทำให้กราฟตกลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Elagra และRustom, 2018) ทำการศึกษานำผงจากการเจียกระจกแทนที่ในการผลิตก้อนซีเมนต์ผลของการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์ลดลงไปเนื่องจากการเกิด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ลดน้อยตามลงไป



ภาพที่ 4- 12 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 13 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 14 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

4.5.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

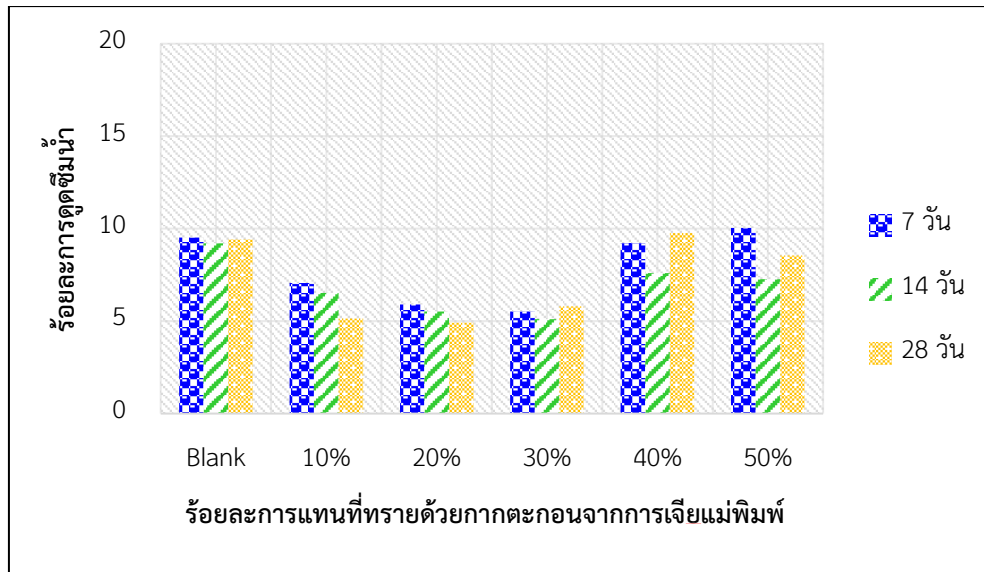
การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำทำการทดลองโดยหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร โดยแทนที่ตะกอนทั้งสามชนิดลงในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ผลค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์แสดงในภาพที่ 4-15 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ที่ไม่มีแทนที่กากตะกอน ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 9.51, 9.19 และ 9.41 และค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 7.07, 5.90, 5.52, 9.22 และ 10.04 ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 6.53, 5.51, 5.11, 7.59 และ 7.26 ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.13, 4.92, 5.80, 9.75 และ 8.56 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-16 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.39, 15.00, 21.38, 31.44 และ 0 (ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากมอร์ต้าร์แตก) ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.17, 13.60, 22.20, 0 และ

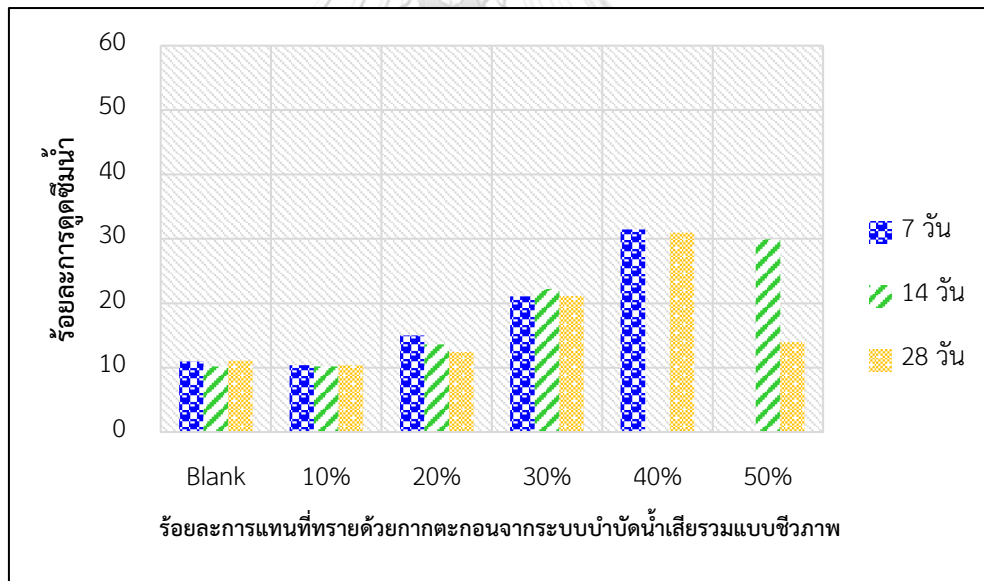
29.91 ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.40, 12.43, 21.13, 30.98 และ 13.96 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-17 แสดงค่าการดูดซึมน้ำมอร์ตาที่มีการแทนที่ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.95, 14.62, 15.59, 22.38 และ 52.16 ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 10.44, 14.25, 15.52, 21.66 และ 25.67 และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.51, 13.28, 16.43, 19.91 และ 23.59 ตามลำดับ

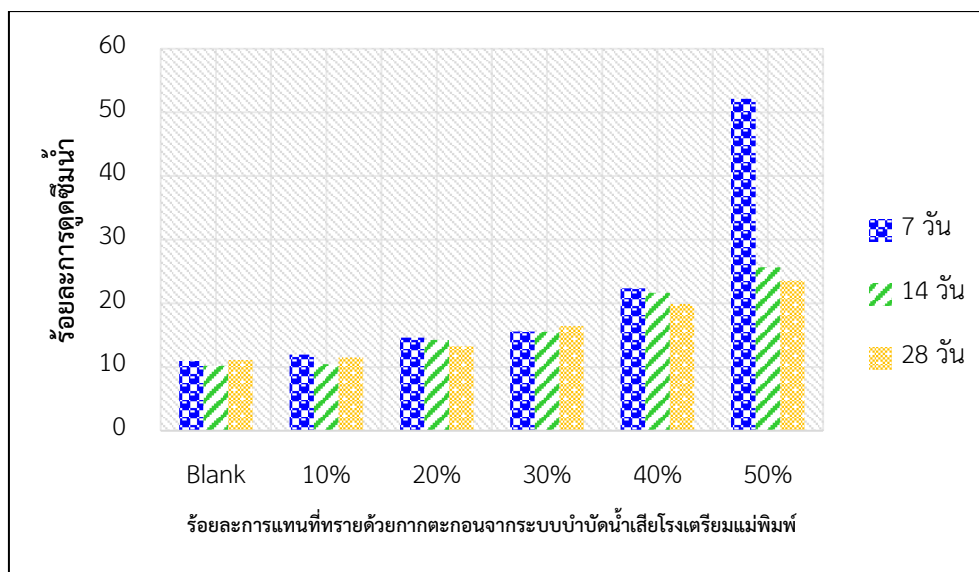
จากผลค่าการดูดซึมน้ำที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกทั้งสามชนิด จะเห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มากขึ้นด้วยตะกอนจากการระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากการระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จะส่งผลให้ค่าการซึมน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก ลักษณะโครงสร้างของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์มีโครงสร้างของตะกอนที่รูพรุนในโครงสร้างทำให้รูพรุนนี้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในตัวตะกอนได้มาก ทำให้เมื่อเพิ่มการแทนที่ตะกอนในอัตราส่วนที่มากขึ้นจึงสามารถดูดซึมน้ำไว้ในมอร์ตาร์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (ปาณิสรา นามจันทร์, 2560) ซึ่งนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ซึ่งลักษณะโครงสร้างของตะกอนมีรูพรุนเช่นกัน จึงทำให้มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามากขึ้น ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์จะเห็นว่าค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงจนถึงจุดหนึ่งและเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก ลักษณะโครงสร้างของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นลักษณะแบนแหลมโครงสร้างรูพรุนน้อย จึงทำให้ดูดซึมน้ำได้ไม่ดี แต่เมื่อถึงจุดหนึ่ง พบว่าสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเป็นผลจากการที่ปริมาณทรายลดลงไปมาก ๆ จากการแทนที่ด้วยด้วยตะกอนที่มากขึ้น ตะกอนลักษณะแบนเหล่านี้นี้เมื่อมาเจอกันทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อของมอร์ตาร์ได้เช่นกัน แต่ค่าการดูดซึมน้ำก็อยู่ในค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยตะกอน ไม่ได้มีค่าสูงมากเกินไปเหมือนกันตะกอนสองชนิดข้างต้น



ภาพที่ 4- 15 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 16 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 17 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

4.5.3 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดทำการศึกษาโดยหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร โดยแทนที่ตะกอนทั้งสามชนิดลงในมวลรวมละเอียดร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแสดงในภาพที่ 4-18 โดยค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่กากตะกอน ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 มีค่ากำลังรับแรงอัด 32.40, 36.01 และ 36.05 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 มีค่ากำลังรับแรงอัด 36.25, 39.06 และ 40.25 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 45.35, 52.01, 56.41, 26.36 และ 43.39 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 46.29, 52.88, 56.64, 37.19 และ 48.01 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 47.86, 56.56, 65.04, 38.68 และ 54.21 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-19 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน

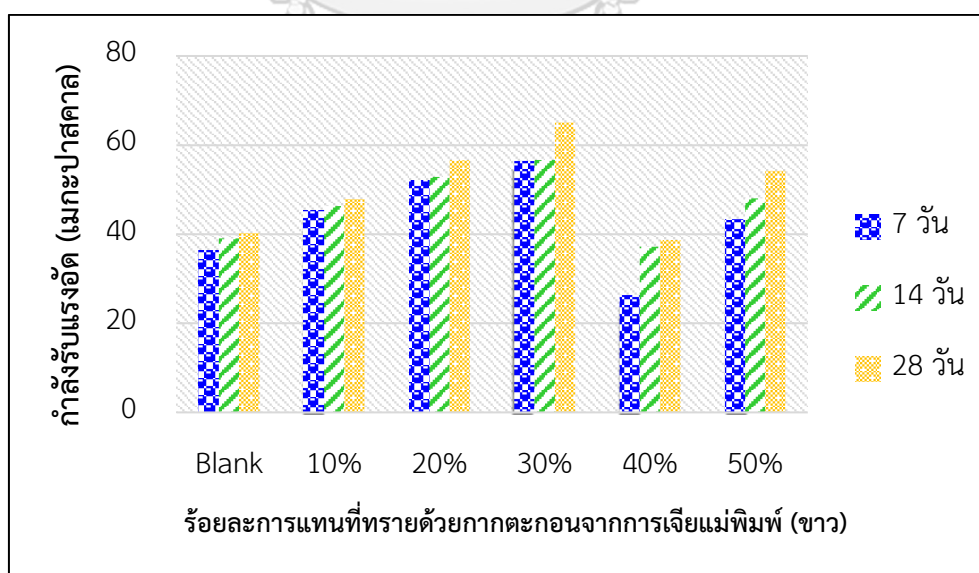
มีค่ากำลังรับแรงอัด 14.51, 4.47, 1.88, 0, 0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 16.87, 5.33, 2.12, 0.03 และ 0 กิโลปาสคาล ตามลำดับ และระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 18.67, 6.04, 2.43, 0.1 และ 0.03 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-20 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ โดยแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 25.34, 17.65, 13.89, 1.68 และ 0.21 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 25.65, 17.42, 13.34, 0.17 และ 0.18 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

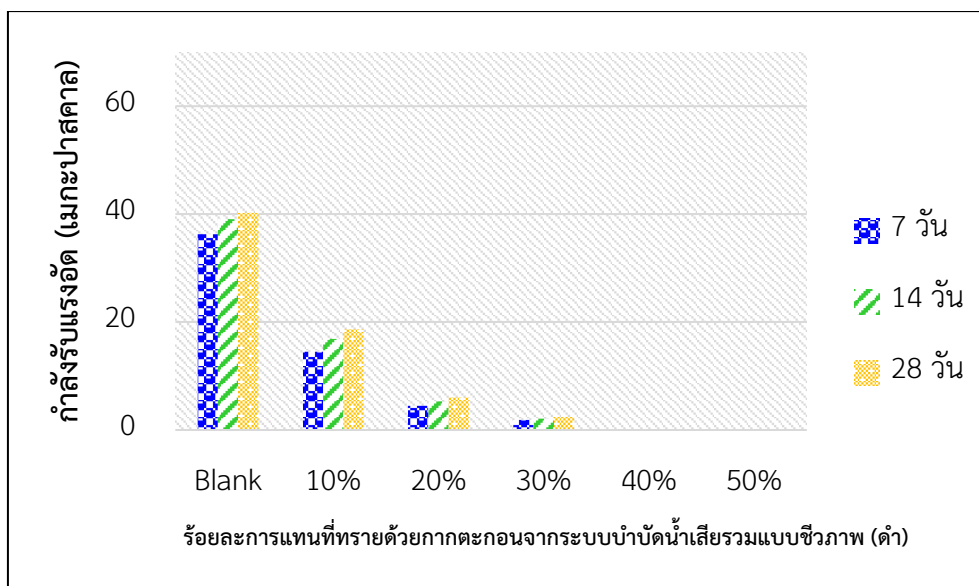
จากผลค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียทั้งสามชนิด จะเห็นว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มากขึ้นด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ โครงสร้างของตะกอนมีลักษณะรูพรุนในโครงสร้างมาก ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในมอร์ตาร์ที่มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงด้วย และการแทนที่ที่มากขึ้นของตะกอนทั้งสองชนิดยังเป็นการลดลงของทรายซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกา ถึงแม้ในตัวตะกอนทั้งสองชนิดจะมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ แต่มีสัดส่วนที่น้อยกว่าทราย ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ไม่ดี ทำให้เกิดการเชื่อมประสานภายในเนื้อของมอร์ตาร์ลดน้อยลงไปด้วย จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง สอดคล้องกับกับงานวิจัยของ (พลวัต คงสรรค์เสถียร, 2559) ทำการศึกษาแทนที่ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงผลิตสีน้ำ พบว่าเมื่อแทนที่ตะกอนมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ เป็นผลมาจากโครงสร้างของตะกอนที่มีรูพรุนมาก ทำให้เก็บน้ำในช่องว่างได้มาก และช่องว่างเหล่านั้นทำให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ลดลงตามไปด้วย ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์พบว่าทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง และลดต่ำลงมา ซึ่งเป็นผลมาจาก องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบมากที่สุดทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นตัวเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้นจากตัวเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นนี้ ประกอบกับตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีโครงสร้างที่เป็นลักษณะยาวแหลม โครงสร้างไม่มีรูพรุนทำให้ไม่อุ้มน้ำ ส่งผลให้เกิดช่องว่างในมอร์ตาร์น้อยทำให้กำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามไปด้วย และจากค่ากำลังรับ

แรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมพบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดในการแทนที่ด้วยตะกอนทั้ง 3 ตัว เนื่องตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพซึ่งมีสารอินทรีย์อยู่ในเนื้อตะกอนจำนวนมากเนื่องจากเป็นตะกอนชีวภาพของจุลินทรีย์ที่ผ่านการตกตะกอนมาแล้วทำให้มีองค์ประกอบของจุลินทรีย์จากการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสารอินทรีย์นั้นสามารถดูดซึมน้ำได้มากซึ่งจากการดูดซึมน้ำมากนี้ส่งผลให้เกิดช่องว่างในเนื้อมอร์ตาร์ทำให้เกิดความเปราะ ส่งผลต่อความแข็งแรงของมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohamed Matar, 2008 ซึ่งนำตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนมาแทนที่ในมวลรวมโดยพบว่าตะกอนบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์มากจะให้ดูดซึมน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้น้ำเข้าไปอยู่ภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตได้ หลังจากนั้นระเหยไป เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงของคอนกรีตทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดซึ่งเป็นผลจากสารอินทรีย์ในตะกอน

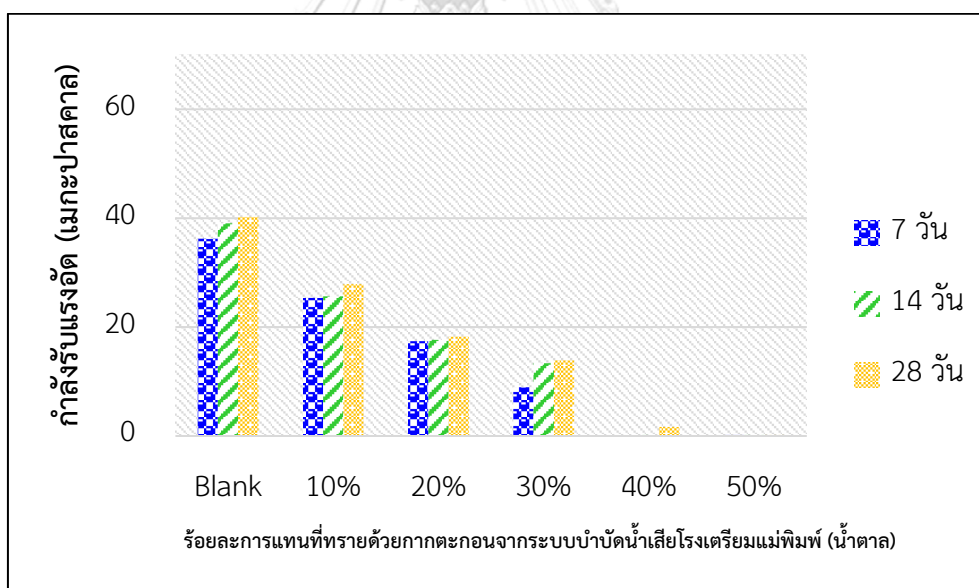
จากการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 15-25XX กำหนดว่ามอร์ตาร์ที่การบ่ม 7 และ 28 วัน ควรมีค่ากำลังรับแรงอัด 19 และ 28 เมกะปาสคาล ซึ่งพบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ผ่านตามมาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ พบว่าไม่ผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 4- 18 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 19 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



ภาพที่ 4- 20 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

4.5.4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์

เนื่องจากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ที่นำมาใช้ประโยชน์ในการทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตมอร์ตาร์ ซึ่งตะกอนเหล่านี้อาจจะมีส่วนประกอบของโลหะหนักบางชนิดที่สามารถชะละลายได้ และอาจจะรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จึงทำการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์ทำการทดลองชะละลายด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristics Leaching Procedure) และเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว จากตารางที่แสดงผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากมอร์ตาร์

จากตารางที่ 4-4 แสดงค่าโลหะหนักที่วัดด้วย Inductively Coupled plasma – optical Emission spectrometer (ICP-OES) ทำการวัดโลหะหนัก ได้แก่ As (อาร์ซีนิก) เนื่องจากพบว่าในตะกอนตั้งต้นในตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์พบอาร์ซีนิกเพียงชนิดเดียว และหลังจากทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์แล้วพบว่ามอร์ตาร์ที่ทำการศึกษานั้นผ่านค่ามาตรฐานกำลังรับแรงอัดมีเพียงมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ จึงคัดเลือกมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ในอัตราที่สูงสุดคือร้อยละ 50 เพื่อไปทดสอบการชะละลายโลหะหนักในมอร์ตาร์ จากผลการวิเคราะห์ค่าอาร์ซีนิกในสารละลายกรดที่ทำการชะจากมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยของเสียจากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์พบว่ามีค่าอาร์ซีนิก น้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีความปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม จากการรั่วไหลของโลหะหนัก

ตารางที่ 4- 4 ค่าโลหะหนักจากการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักจากก้อนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอน

ธาตุโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน* (mg/L)	ตะกอนขาว	มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วย ตะกอนขาว	หมายเหตุ
อาร์ซีนิก (Arsenic)	5.0	0.0221	< 0.005	ผ่านค่ามาตรฐาน
แบเรียม (Barium)	100.0	-	-	-
แคดเมียม (Cadmium)	1.0	-	-	-
โครเมียม (Chromium)	5.0	-	-	-
ตะกั่ว (Lead)	5.0	-	-	-
ปรอท (Mercury)	0.2	-	-	-
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	-	-	-
เงิน (Silver)	5.0	-	-	-

4.5.5 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ท

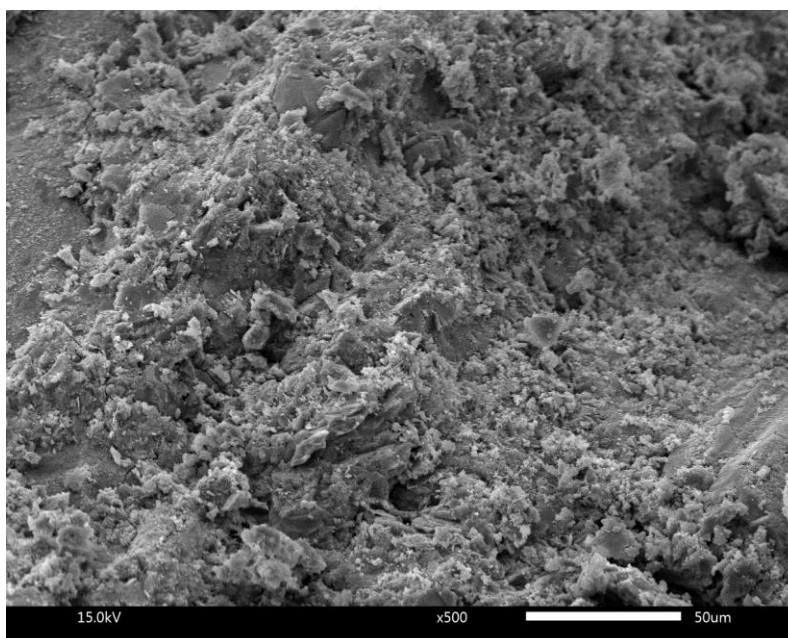
การศึกษาค้นคว้าโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ท ทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า หลังจากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยตะกอน มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ นำมาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของพื้นผิวของมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนแต่ละชนิด โดยภาพจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด แสดงในภาพที่ 4-21,22,23

ผลการศึกษาจากภาพที่ 4-21 พบว่าลักษณะสัญญาณของมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสียลักษณะผิวจะเรียบไม่มีรอยช่องว่างหรือรูพรุนจากรูปจะเห็นเป็นเศษเล็กๆของส่วนผสมที่ติดอยู่ที่ผิว และจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสียยังพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดจากการที่ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับมวลรวมจนเกิดการเชื่อมประสานช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์ท ถ้าทำการเปรียบเทียบมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย กับมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยของเสียที่ทำให้เกิดช่องว่างในมอร์ตาร์ทจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตะกอนเหล่านั้นมีลักษณะผิวโครงสร้างมีรูพรุนส่งผลให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ทลดลงตามไปด้วย

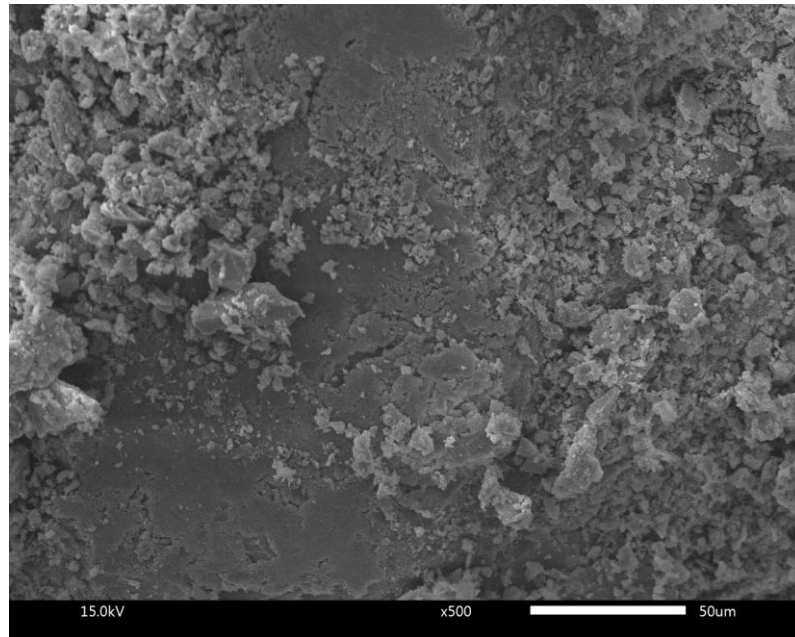
ผลการศึกษาจากภาพที่ 4-22 พบว่าลักษณะสัญญาณของมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ที่ร้อยละ 30 มีลักษณะผิวที่เรียบมากยิ่งขึ้นกว่ามอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ที่ร้อยละ 30 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดสูงว่ามอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย ซึ่งเป็นมาจากโดยปกติลักษณะสัญญาณของทรายจะมีลักษณะกลมโดยส่วนใหญ่สามารถเกิดช่องว่างในมอร์ตาร์ทได้เล็กน้อยเช่นกัน แต่ลักษณะโครงสร้างของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มีลักษณะเรียวยาวคม สามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างที่มีอยู่ภายในเนื้อมอร์ตาร์ทได้ อีกทั้งยังพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันบนพื้นผิวของมอร์ตาร์ทอีกด้วยซึ่งเป็นตัวช่วยยึดประสานปูนซีเมนต์กับมวลรวมให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ผ่านค่ามาตรฐานเพียงตะกอนชนิดเดียวที่นำมาศึกษา ในทุก ๆ อัตราส่วนที่ทำการศึกษา

ผลการศึกษาจากภาพที่ 4-23 และ 4-24 พบว่าลักษณะสัญญาณของมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จากพื้นผิวสามารถเห็นได้ชัดเจนว่ามีลักษณะของช่องว่างเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมอร์ตาร์ท ซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของตะกอนทั้งสองชนิดนั้น โครงสร้างมีรูพรุนมาก และลักษณะขรุขระ ทำให้เมื่อมารวมตัวกันเกิดเป็นช่องว่างภายในเนื้อมอร์ตาร์ท อีกทั้งช่องว่างเหล่านี้ยังทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ เมื่อเวลา

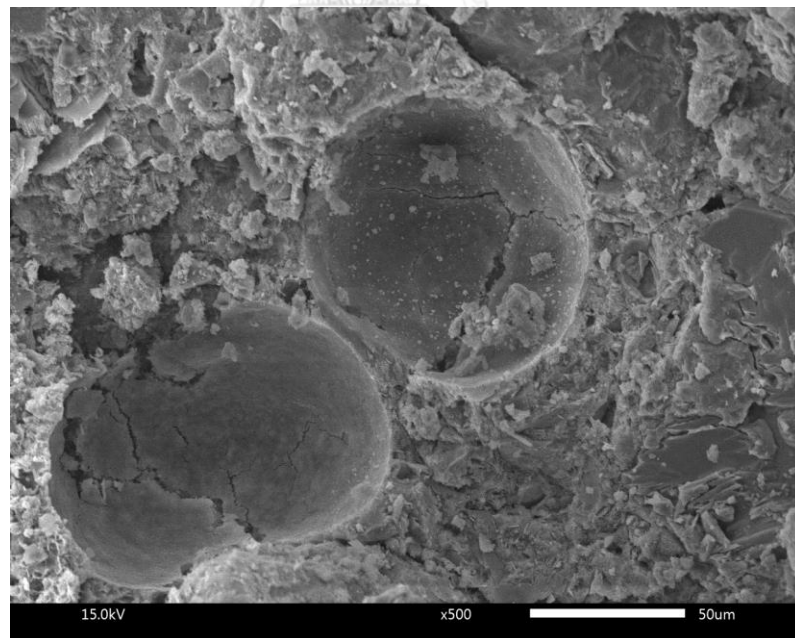
ผ่านไปน้ำระเหยออกไปทำให้ช่องว่างเหล่านั้นยังคงอยู่ ซึ่งช่องว่างเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าที่ลดลงไปด้วย เนื่องจากความแข็งแรงของมอร์ตาร์ได้หายไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นนั้น อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้งสองชนิดนี้ยังพบปริมาณซิลิกาที่น้อยกว่าตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์อาจจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้การเชื่อมประสานเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ จึงเป็นเหตุให้มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์นี้ไม่ผ่านค่ามาตรฐานตามที่ มอก. 15-2547 กำหนดไว้อีกด้วย



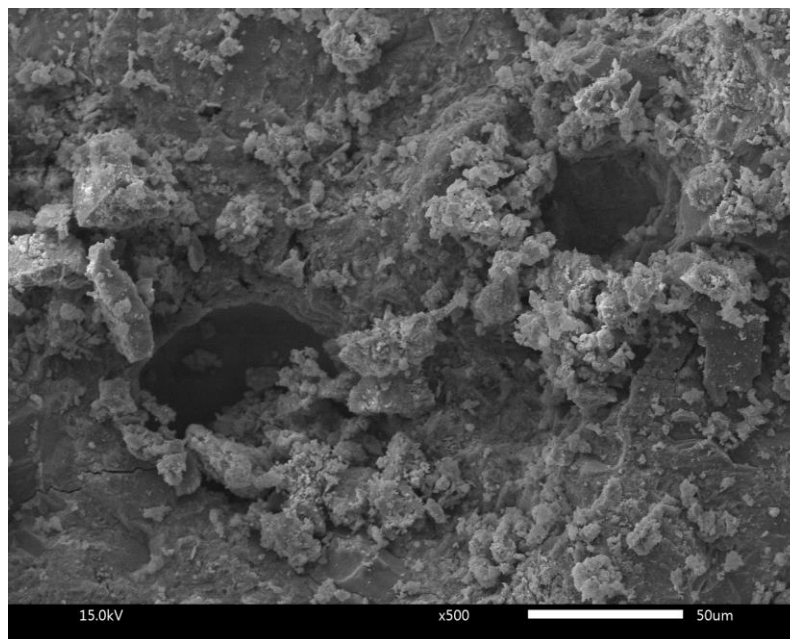
ภาพที่ 4- 21 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย



ภาพที่ 4- 22 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย
ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์



ภาพที่ 4- 23 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย
ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม

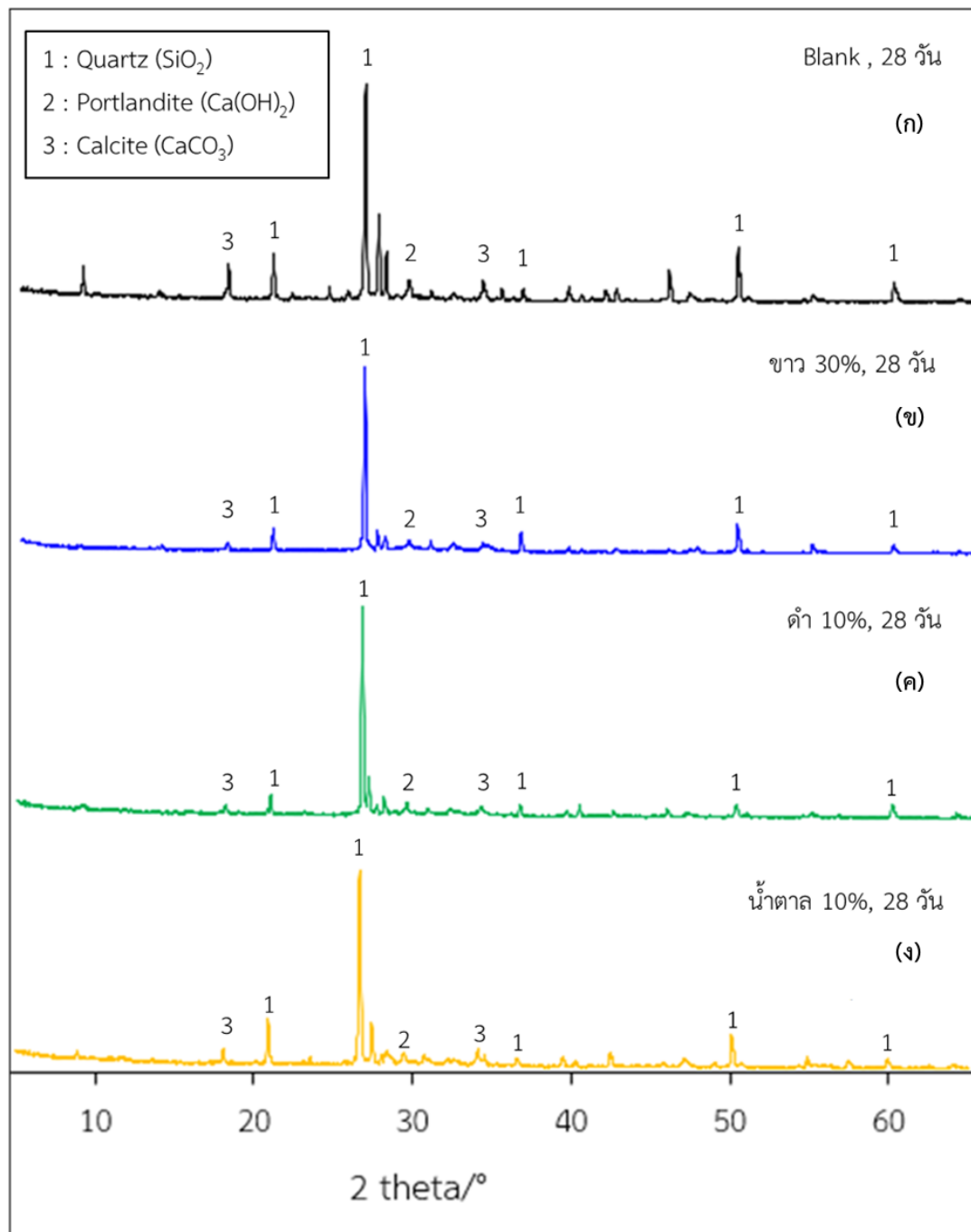


ภาพที่ 4- 24 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์

4.5.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์ทำการทดลองโดยนำเศษมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดมาแล้ว นำเศษของมอร์ตาร์ไปวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยวิธี X-Ray Diffraction: XRD ซึ่งจากการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียจากตะกอนทั้ง 3 ชนิด ในการผลิตมอร์ตาร์ ซึ่งผลจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการแทนที่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ลดลง เป็นผลมาจากส่วนประกอบในตะกอนเองนั้นมี ส่วนประกอบที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปอซโซลานได้น้อย ซึ่งทำให้ไม่เกิดผลึกที่สามารถเชื่อมประสานกันระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวม ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์นี้เพื่อเป็นการช่วยยืนยันข้อสันนิษฐานข้างต้น

จากภาพที่ 4-25 แสดงโครงสร้างผลึกของมอร์ตาร์ ศึกษาโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) Model D8-Discover โดยศึกษาในช่วง 5° ถึง 65° ซึ่งจากรูปแสดงค่าพีค (Peak) ของผลึก โดยรูปแบบผลึกมีดังนี้ ผลึกควอตซ์ (Silicon dioxide: SiO_2) ปรากฏใน 2Theta ที่ 20.09° , 26.67° , 36.62° , 50.13° และ 59.98° ผลึกแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) ปรากฏใน 2Theta ที่ 29.44° และผลึกพอร์ตแลนด์ไดต์ (Portlandite, $\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ปรากฏใน 2Theta ที่ 18.06° และ 34.11°



ภาพที่ 4- 25 โครงสร้างผลึกในมอร์ตาร์ ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ด้วยวิธี XRD (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสี้ยว (ข) มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ร้อยละ 30 (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ร้อยละ 10 และ (ง) มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตรียมแม่พิมพ์ ร้อยละ 10

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกในมอร์ตาร์ท โดยใช้ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน โดยทำการเปรียบเทียบมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ร้อยละ 30 มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ร้อยละ 10 และมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพร้อยละ 10 จะเห็นว่าจากรูปที่ 4-25 ผลึกที่เกิดขึ้น ได้แก่ ผลึกควอทซ์ ผลึกพอร์ตแลนด์ไดไฮดรอกไซด์ และผลึกแคลไซต์ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นระหว่างมอร์ตาร์ทที่ไม่มีการแทนที่ด้วยของเสีย และมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ มอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และมอร์ตาร์ทที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ มีความไม่แตกต่างกัน ผลึกเหล่านี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลง แม้แทนที่ด้วยตะกอนทั้งสามชนิดแล้ว ก็ยังสามารถทำให้เกิดผลึกเหล่านี้ได้ สามารถสรุปได้ว่ามีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น หรือลดน้อยลงไปจากงานที่ตะกอนทั้ง 3 ชนิด ลงในมอร์ตาร์ท โดยการเกิดขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาพอสโซลาน มาจากสารตั้งต้นของปฏิกิริยานั้นคือ ปูนซีเมนต์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา จากตะกอนทั้ง 3 ชนิด ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกต หรือ แคลเซียมอลูมิเนต ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานภายในมอร์ตาร์ท ซึ่งของเสียที่แทนที่ลงในทรายในการผลิตมอร์ตาร์ทนั้นส่วนหนึ่งสามารถเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างของทรายที่มีในมอร์ตาร์ท จึงทำให้ของเสียสามารถนำมาใช้ในการทดแทนทรายได้ แต่หากมีการแทนที่ที่อัตราส่วนมากเกินไปจะส่งผลให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ทลดลง จึงควรเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ตะกอนลงในมอร์ตาร์ท

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก

การศึกษาผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากโรงงานผลิตเลนส์แว่นตาพลาสติก 1 โรงงาน ปี 2560 และใช้ข้อมูลของเสียโดยเทียบรหัสของเสียโรงงาน 1 โรงงาน จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ปี 2558-2560 โดยของเสียประกอบด้วย 070213 เศษพลาสติก 120105 เศษพลาสติกการการกลึงหรือเจีย 120114 ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ 150110 ภาชนะปนเปื้อน 160306 เลนส์ที่ถูกคัดออก 190812 ตะกอนน้ำเสียชีวภาพ และ 190814 ตะกอนน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จากการทำผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากโรงงาน 1 โรงงาน พบว่ามีวิธีการจัดการของเสีย ดังนี้ วิธีรีไซเคิล ร้อยละ 37.27 การทำเชื้อเพลิงผสม ร้อยละ 31.18 และการกำจัดด้วยการฝังกลบคิดเป็นร้อยละ 31.55

จากผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2558 พบว่ามีวิธีการจัดการของเสียดังนี้ ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลร้อยละ 44.9 ทำเชื้อเพลิงผสมร้อยละ 29.67 การนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ร้อยละ 10.78 คัดแยกเพื่อจำหน่ายต่อร้อยละ 9.80 ฝังกลบอย่างปลอดภัยร้อยละ 3.83 เผาทำลายในเตาเผาของเสียอันตรายร้อยละ 0.87 บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีกายภาพร้อยละ 0.14 และฝังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำเสถียรแล้วร้อยละ 0.003

จากผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2559 พบว่ามีวิธีการจัดการของเสียดังนี้ ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลร้อยละ 32.86 ทำเชื้อเพลิงผสมร้อยละ 23.11 ทำเชื้อเพลิงทดแทนร้อยละ 22.83 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อร้อยละ 7.60 นำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีอื่น ๆ ร้อยละ 7.29 ฝังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำเสถียรหรือทำก้อนแข็งแล้วร้อยละ 3.43 เผาทำลายในเตาเผาของเสียอันตรายร้อยละ 2.45 เผาเพื่อเอาพลังงานร้อยละ 0.42 ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำไปบรรจุหรือใช้ซ้ำร้อยละ 0.01 และ เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 0.005

จากผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2560 พบว่ามีวิธีการจัดการของเสียดังนี้ ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลร้อยละ 24.36 เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ร้อยละ 20.11 เชื้อเพลิงทดแทนร้อยละ 19.41 ทำ

เชื้อเพลิงผสมร้อยละ 16.66 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อร้อยละ 6.97 นำกลับมาใช้ประโยชน์ ด้วยวิธีอื่น ๆ ร้อยละ 6.15 ฝังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำเสถียรหรือทำก้อนแข็งแล้วร้อยละ 2.89 เผาทำลายในเตาเผาของเสียอันตรายร้อยละ 1.80 หมักทำปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดินร้อยละ 1.55 เผาเพื่อเอาพลังงานร้อยละ 0.10 ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำไปบรรจุหรือใช้ซ้ำร้อยละ 0.01 และ เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 0.004

จากการทำผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกโดยใช้ข้อมูลของเสียจากโรงงาน 1 โรงงาน ปี 2560 และใช้ข้อมูลของเสียจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าของเสียมีการจัดการด้วยวิธีต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับของเสีย เช่น การนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีต่างๆ การนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง หรือการนำไปเผาพร้อมกับเตาเผาปูนซีเมนต์ เป็นต้น แต่มีการจัดการของเสียวิธีหนึ่งที่ของเสียไม่ถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์อีกทั้งยังเปลืองพื้นที่ในการกำจัดของเสีย คือ การจัดการของเสียด้วยหลุมฝังกลบ เมื่อพิจารณาของเสียที่ถูกส่งไปสู่หลุมฝังกลบพบว่า ประกอบด้วยของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากภายในโรงงาน ในส่วนของเสียประเภทพลาสติกในปัจจุบันมีการนำกลับมารีไซเคิลตามประเภทพลาสติกจำนวนมาก แต่ของเสียกากตะกอนยังมีการนำกลับมาใช้ประโยชน์น้อย ส่วนใหญ่จากโรงงานส่งไปยังหลุมฝังกลบทั้งหมด จากการทำผังการไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติกนี้ จึงทำให้สามารถคัดเลือกของเสียประเภทกากตะกอน 3 ชนิด เพื่อนำไปทำการศึกษาต่อไป ได้แก่ ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ

5.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทั้ง 3 ชนิด

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ ด้วยวิธี XRF พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในตะกอนทั้งสามชนิด ประกอบด้วย ซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก สอดคล้องกับองค์ประกอบของทราย มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก จึงคาดว่าจะสามารถนำตะกอนทั้งสามชนิดไปแทนที่ในทรายในการผลิตมอร์ตาร์ได้ และในตะกอนจากการระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ยังพบว่ามีองค์ประกอบของแร่ธาตุซีเรียมผสมอยู่ จึงนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์มาศึกษาแนวทางในการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม

5.3 การศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์

การศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ จากการตรวจองค์ประกอบเคมีเบื้องต้นของตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ทำให้พบว่ามีปริมาณ

ซีเรียมอยู่ที่ร้อยละ 13.8 จึงได้ทำการศึกษาการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์นี้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความบริสุทธิ์ของซีเรียมที่สามารถนำกลับได้คือร้อยละ 38.28 ชนิดของกรดและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำการทดลองมีผลต่อความบริสุทธิ์ของซีเรียมกล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อใช้ชนิดของกรดที่มีความแรงมากขึ้นส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของซีเรียมมากขึ้นเช่นกัน

5.4 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการแทนที่ตะกอนทั้ง 3 ชนิดลงในมวลรวมละเอียดหรือทราย โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 สำหรับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ตะกอนทั้งสามชนิดแทนที่ในทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง และยังส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้น และเมื่อแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงการแทนที่ที่ร้อยละ 30 หลังจากนั้นจะลดต่ำลง ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ที่มากขึ้น พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ หลังจากนั้นนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากมอร์ตาร์เทียบกับมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (มอก. 15-2547) พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ และมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ไม่ผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์พบว่าผ่านค่ามาตรฐานทุกอัตราส่วนที่ทำการศึกษา หลังจากนั้นนำมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ไปศึกษาการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พบว่าค่าการชะละลายโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ และสามารถสรุปได้ว่าอัตราการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดด้วยตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนการแทนที่ทรายที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 30 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ในการศึกษาแนวทางการนำกลับแร่ธาตุซีเรียมจากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงแรมพิมพ์ เนื่องจากตะกอนที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีมาแล้ว จึงทำให้ตะกอนมีส่วนผสมของสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยในการตกตะกอนปนอยู่ ดังนั้น หากสามารถนำตะกอนส่วนที่ยังไม่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีมาศึกษาแนวทางในการนำกลับแร่ธาตุซีเรียม คาดว่าน่าจะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์ของแร่ธาตุซีเรียมที่มากขึ้น

2. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อกำหนดในหลายๆปัจจัย ทั้งด้านเครื่องมือ ส่วนผสม และประสบการณ์ต่าง ๆ จึงมีความแตกต่างกับการทำงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องมือที่เหมาะสมในการผสม มีเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป เครื่องจักรที่ใช้ในการกดอัดให้ได้รูปมอร์ต้าร์ที่แน่น ซึ่งทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่มีค่าคงที่ และค่าสูงกว่าการทำในห้องปฏิบัติการได้

3. องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนแต่ละชนิดอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขึ้นกับแหล่งที่มาของตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากอาจจะเป็นตะกอนคนละรอบการจับเก็บ ซึ่งในการทำการวิจัยที่ผ่านมาในการแทนที่ทรายในการผลิตมอร์ต้าร์ไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเชื่อมประสานของวัสดุ และสามารถให้ความแข็งแรงกับวัสดุก่อสร้างได้

4. ในการศึกษาวิจัยต่อไป ควรมีการนำสถานะ อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ต้าร์ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมจริง เพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่มากขึ้นในการนำของเสียไปใช้ประโยชน์

5. จากการศึกษาการผลิตมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ทรายด้วยของเสียจากตะกอนทั้ง 3 ชนิด คอนกรีตที่ได้จากการแทนที่ของเสียเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องใช้ความแข็งแรงของโครงสร้างมากนัก เช่น ใช้เป็นปูนฉาบ หรือปิดผิวโครงสร้างอิฐจากภายนอก เป็นต้น



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
วิธีการทดลองโดยละเอียด
ภาคผนวก ก.1
การนำกลับแร่ธาตุซีเรียม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ที่ผ่านการอบ และบดลดขนาดแล้ว จำนวน 50 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมที่มีจุกเปิดสามารถเติมสารเคมี และวัดอุณหภูมิได้
2. ต่อขวดก้นกลมที่มีตะกอนเข้ากับชุดรีฟลักซ์ หลังจากนั้นค่อยๆเติมกรดไนตริก หรือ กรดออกซาลิก หรือ กรดซिटริก ลงไป โดยควบคุมอุณหภูมิการทดลองชุดแรกที่ 50 องศาเซลเซียส และชุดการทดลองที่ 2 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
3. ค่อย ๆ เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเติมทีละน้อยด้วยหลอดหยด จนหมด
4. ให้ความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนดไปเรื่อย ๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็น แล้วนำตะกอนที่อยู่ในขวดก้นกลมไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลาย ๆ ครั้ง
5. แยกส่วนตะกอน และของเหลวออกจากกันโดยใช้การปั่นเหวี่ยง แล้วนำส่วนตะกอนไปอบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 105 °C หลังจากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ XRF เพื่อดูความบริสุทธิ์ของซีเรียม

ภาคผนวก ก.2

การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. นำแบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร มาทาด้วยปิโตรเลียมเจลให้ครบทุกช่องที่จะทำการหล่อมอร์ต้าร์ เพื่อให้ตัวอย่างไม่ติดกับแบบหล่อ สะดวกในการแกะออกจากแบบหล่อ

การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์

1. นำส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หินทราย น้ำ และตะกอนทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมในเครื่องผสมในอัตราส่วนที่กำหนดไว้แต่ละอัตราส่วน
2. ผสมทั้งหมดเข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงใส่ลงในแบบหล่อที่ทำจากปิโตรเลียมเจลไว้แล้วในส่วนแรก
3. ค่อยๆ ใส่ทั้งหมดลงในแบบหล่อทีละชั้น แล้วใช้ไม้กระทุ้งกระทุ้งให้มีความแน่น ไม่เหลือช่องว่างหรือโพรง ทำจนเต็มแบบหล่อ
4. ใช้เกียงปาดส่วนเกินออกให้เรียบเสมอขอบของแบบหล่อ
5. นำส่วนผสมที่ใส่แบบหล่อไว้แล้วนั้นไปบ่มเพื่อให้เกิดการก่อตัวโดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดมอร์ต้าร์ออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ เมื่อครบกำหนดการบ่มจึงนำมอร์ต้าร์ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป

การหาค่ากำลังรับแรงอัด

1. นำก้อนมอร์ต้าร์ตัวอย่างที่จะทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดมาชั่งน้ำหนัก และนำมาวัดด้านความกว้างและความยาว เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของผิวที่เราจะการกดหาค่ากำลังรับแรงอัด
2. นำมอร์ต้าร์ที่หาพื้นที่หน้าตัดแล้ว วางลงกึ่งกลางของแท่นทดสอบ
3. กดตัวอย่างมอร์ต้าร์จนแตก แล้วบันทึกค่าที่ได้จากเครื่อง

การคำนวณ

การหาค่ากำลังรับแรงอัดสามารถคำนวณได้จากแรงอัดประลัยสูงสุดประลัยหน่วยเป็น กิโลกรัมหารด้วยพื้นที่หน้าตัด โดยสามารถคำนวณหาค่าความต้านแรงอัดได้จาก

$$P = \frac{F}{A}$$

P คือ ค่าความต้านแรงอัดโดยพื้นที่หน้าตัดตามขวาง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ หน่วย ตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัดประลัย หน่วย กิโลกรัม

ภาคผนวก ก.3

การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. นำแบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร มาทาด้วยปิโตรเลียมเจลลี่ให้ครบทุกช่องที่จะทำการหล่อมอร์ต้าร์ เพื่อให้ตัวอย่างไม่ติดกับแบบหล่อ สะดวกในการแกะออกจากแบบหล่อ

การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์

1. นำส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ และตะกอนทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมในเครื่องผสมในอัตราส่วนที่กำหนดไว้แต่ละอัตราส่วน
2. ผสมทั้งหมดเข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงใส่ลงในแบบหล่อที่ทำกรทปิโตรเลียมเจลลี่แล้วในส่วนแรก
3. ค่อยๆ ใส่ทั้งหมดลงในแบบหล่อทีละชั้น แล้วใช้ไม้กระทุ้งกระทุ้งให้มีความแน่น ไม่เหลือช่องว่างหรือโพรง ทำจนเต็มแบบหล่อ
4. ใช้เกียงปาดส่วนเกินออกให้เรียบเสมอบนของแบบหล่อ
5. นำส่วนผสมที่ใส่แบบหล่อไว้แล้วนั้นไปบ่มเพื่อให้เกิดการก่อตัวโดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดมอร์ต้าร์ออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ เมื่อครบกำหนดการบ่มจึงนำมอร์ต้าร์ไปทดสอบความหนาแน่นต่อไป

การหาความหนาแน่น

1. อบตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
2. หลังจากครบ 24 ชั่วโมง นำมอร์ต้าร์ออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักหลังอบ
3. วัดปริมาตรของมอร์ต้าร์ซึ่งได้จาก ความกว้าง \times ความยาว \times ความสูง ของมอร์ต้าร์

การคำนวณ

การคำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ต้าร์ สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในหน่วยกิโลกรัม หารด้วยปริมาตรของมอร์ต้าร์ในหน่วยลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นไปตามสูตรดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ (Kg)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (m}^3\text{)}}$$

ภาคผนวก ก.4

การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. นำแบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร มาทาด้วยปิโตรเลียมเจลให้ครบทุกช่องที่จะทำการหล่อมอร์ต้าร์ เพื่อให้ตัวอย่างไม่ติดกับแบบหล่อ สะดวกในการแกะออกจากแบบหล่อ

การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์

1. นำส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หินทราย น้ำ และตะกอนทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมในเครื่องผสมในอัตราส่วนที่กำหนดไว้แต่ละอัตราส่วน
2. ผสมทั้งหมดเข้าด้วยกันจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงใส่ลงในแบบหล่อที่ทำการปิโตรเลียมเจลไว้แล้วในส่วนแรก
3. ค่อยๆ ใส่ทั้งหมดลงในแบบหล่อทีละชั้น แล้วใช้ไม้กระทุ้งกระทุ้งให้มีความแน่น ไม่เหลือช่องว่างหรือโพรง ทำจนเต็มแบบหล่อ
4. ใช้เกียงปาดส่วนเกินออกให้เรียบเสมอบนของแบบหล่อ
5. นำส่วนผสมที่ใส่แบบหล่อไว้แล้วนั้นไปบ่มเพื่อให้เกิดการก่อตัวโดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นถอดมอร์ต้าร์ออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ เมื่อครบกำหนดการบ่มจึงนำมอร์ต้าร์ไปทดสอบการดูดซึมน้ำต่อไป

การหาค่าการดูดซึมน้ำ

1. นำมอร์ต้าร์ไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนับขึ้นจากน้ำพักทิ้งไว้จนแห้งไม่ น้ำหยด หรืออาจจะใช้ผ้าซับน้ำออก แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักมอร์ต้าร์อิ่มตัวด้วยน้ำ
2. นำมอร์ต้าร์ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำมาทิ้งไว้ให้เย็น หรือน้ำหนักของมอร์ต้าร์คงที่ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนักมอร์ต้าร์ที่แห้ง
3. นำค่าน้ำหนักมอร์ต้าร์อิ่มตัวด้วยน้ำ และน้ำหนักมอร์ต้าร์แห้ง ไปคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ

การคำนวณ

การคำนวณค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากค่าน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่สภาพแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M₁ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กรัม

M₂ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิ่มตัว หน่วย กรัม



ภาคผนวก ข.
ภาพการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ ข- 1 ตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์กระจก



ภาพที่ ข- 2 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมแบบชีวภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข- 3 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงเตีรียแม่พิมพ์



ภาพที่ ข- 4 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5 เซนติเมตร



ภาพที่ ข- 5 ชุดการทดลองแนวทางการนำกลับซีเรียม



ภาพที่ ข- 6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Amsler 30 ton)



ภาพที่ ข- 7 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร



ภาคผนวก ค.
ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค.1

การศึกษาหาความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนแต่ละชนิด

ตารางที่ ค- 1 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์
ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสีย	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ขาว 10	7	1.937	1.964	1.981	2.032	1.999	1.983
	14	1.970	1.986	1.967	2.012	2.015	1.990
	28	2.002	2.003	2.003	2.012	1.963	1.997
ขาว 20	7	2.021	1.957	2.027	1.976	2.010	1.998
	14	2.017	2.030	1.967	1.989	2.025	2.006
	28	1.990	2.022	2.011	1.999	2.026	2.009
ขาว 30	7	1.988	2.019	1.987	2.026	2.029	2.010
	14	1.998	2.022	2.027	1.995	2.007	2.010
	28	1.975	2.005	2.010	1.982	1.988	1.992
ขาว 40	7	1.872	1.667	1.749	1.768	1.746	1.760
	14	1.757	1.849	1.849	1.874	1.827	1.831
	28	1.817	1.832	1.851	1.760	1.753	1.803
ขาว 50	7	1.858	1.823	1.778	1.765	1.767	1.798
	14	1.890	1.848	1.872	1.843	1.895	1.869
	28	1.798	1.840	1.813	1.875	1.871	1.839

ตารางที่ ค- 2 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม
ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสีย	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ดำ 10	7	1.797	1.804	1.807	1.784	1.826	1.804
	14	1.827	1.797	1.767	1.811	1.835	1.807
	28	1.815	1.802	1.800	1.837	1.806	1.812
ดำ 20	7	1.524	1.663	1.714	1.683	1.733	1.663

	14	1.537	1.687	1.704	1.736	1.726	1.678
	28	1.560	1.686	1.695	1.776	1.741	1.692
ค่า 30	7	1.472	1.475	1.457	1.525	1.505	1.487
	14	1.469	1.482	1.481	1.451	1.477	1.472
	28	1.495	1.462	1.463	1.478	1.507	1.481
ค่า 40	7	1.279	1.252	1.325	1.310	1.203	1.274
	14	1.286	1.229	1.344	1.334	1.249	1.288
	28	1.264	1.239	1.282	1.305	1.247	1.267
ค่า 50	7	1.076	1.179	1.213	1.127	1.196	1.158
	14	1.276	1.272	1.219	1.274	1.245	1.257
	28	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192	1.192

ตารางที่ ค- 3 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสีย	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
น้ำตาล 10	7	1.837	1.869	1.852	1.873	1.865	1.859
	14	1.884	1.894	1.905	1.886	1.905	1.895
	28	1.864	1.890	1.874	1.885	1.886	1.880
น้ำตาล 20	7	1.747	1.738	1.724	1.737	1.716	1.732
	14	1.780	1.728	1.721	1.757	1.723	1.742
	28	1.760	1.698	1.732	1.789	1.742	1.744
น้ำตาล 30	7	1.765	1.737	1.797	1.635	1.629	1.712
	14	1.754	1.756	1.760	1.655	1.677	1.720
	28	1.739	1.776	1.748	1.649	1.642	1.711
น้ำตาล 40	7	1.455	1.422	1.478	1.446	1.431	1.446
	14	1.454	1.468	1.454	1.093	1.416	1.377
	28	1.467	1.441	1.468	1.470	1.438	1.457
น้ำตาล 50	7	1.325	1.375	0.946	0.948	1.160	1.151
	14	1.382	1.428	1.391	1.379	1.404	1.397
	28	1.402	1.419	1.425	1.429	1.416	1.418

ภาคผนวก ค.2

การศึกษาการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ดที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนแต่ละชนิด

ตารางที่ ค- 4 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ดที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละการแทนที่ของเสี้ยน	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ขาว 10	7	7.886	7.380	6.506	6.731	6.832	7.067
	14	6.677	6.608	6.625	6.144	6.571	6.525
	28	6.025	5.145	4.554	4.768	5.167	5.132
ขาว 20	7	5.667	6.392	5.197	5.810	6.425	5.898
	14	4.725	5.249	6.727	5.559	5.321	5.516
	28	4.868	4.755	5.865	4.979	4.131	4.920
ขาว 30	7	6.495	5.104	5.114	5.556	5.342	5.522
	14	2.742	5.107	5.485	6.520	5.675	5.106
	28	5.885	5.836	5.561	5.704	6.015	5.801
น้ำขาว 40	7	8.223	10.303	8.946	9.643	8.975	9.218
	14	7.570	7.477	7.601	7.421	7.881	7.590
	28	7.279	6.064	5.606	15.032	14.782	9.753
ขาว 50	7	8.786	8.754	10.803	11.014	10.853	10.042
	14	6.571	7.831	7.407	7.532	6.971	7.262
	28	9.179	8.412	8.677	8.327	8.187	8.556

ตารางที่ ค- 5 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ดที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละการแทนที่ของเสี้ยน	ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ดำ 10	7	10.319	10.437	10.456	10.416	10.314	10.388
	14	10.222	10.415	10.183	10.246	9.772	10.168
	28	10.508	9.690	10.585	10.682	10.545	10.402
ดำ 20	7	20.404	13.896	13.992	14.143	12.583	15.004

	14	25.367	14.778	12.781	10.107	4.959	13.598
	28	17.021	11.790	11.877	11.038	10.448	12.435
คำ 30	7	21.405	20.594	22.475	20.089	20.855	21.084
	14	22.968	21.842	21.817	22.506	21.862	22.199
	28	20.563	20.365	20.477	21.664	22.582	21.130
คำ 40	7	30.988	34.468	37.820	25.988	27.960	31.445
	14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	28	33.124	35.162	27.963	28.615	30.038	30.981
คำ 50	7	-	-	-	-	-	-
	14	27.958	29.357	32.881	28.656	30.722	29.915
	28	11.271	16.407	13.374	13.838	14.890	13.956

ตารางที่ ค- 6 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มีมวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสี้ยน	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
น้ำตาล 10	7	12.125	11.882	11.982	11.867	11.936	11.959
	14	10.745	10.374	10.631	10.140	10.326	10.443
	28	11.496	11.552	11.537	11.364	11.620	11.514
น้ำตาล 20	7	14.328	15.285	14.737	14.421	14.309	14.616
	14	13.945	14.577	14.274	14.130	14.326	14.250
	28	13.079	13.496	13.459	13.124	13.241	13.280
น้ำตาล 30	7	14.722	14.686	14.672	15.306	18.549	15.587
	14	14.936	15.146	14.853	15.539	17.129	15.520
	28	15.557	15.046	15.262	17.027	19.244	16.427
น้ำตาล 40	7	22.190	21.720	22.603	22.530	22.860	22.381
	14	23.121	21.400	21.960	20.832	20.990	21.660
	28	19.323	20.121	19.913	20.842	19.373	19.914
น้ำตาล 50	7	23.613	23.380	83.996	84.071	45.729	52.158
	14	25.651	24.741	25.940	26.672	25.342	25.669
	28	22.875	22.832	25.107	23.295	23.839	23.589

ภาคผนวก ค.3

การศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนแต่ละชนิด
 ตารางที่ ค- 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากการเจียแม่พิมพ์
 ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสี้ยน	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ขาว 10	7	22.751	44.718	51.387	55.310	52.564	45.346
	14	48.641	47.072	48.249	49.033	38.442	46.287
	28	27.851	56.486	54.917	48.249	51.779	47.856
ขาว 20	7	57.663	51.387	49.033	48.641	53.348	52.014
	14	52.956	56.094	57.663	49.426	48.249	52.877
	28	55.702	54.917	55.702	56.879	59.624	56.565
ขาว 30	7	58.840	48.641	57.271	53.740	63.547	56.408
	14	49.426	62.763	56.094	48.641	66.293	56.643
	28	54.917	76.492	63.155	62.763	67.862	65.038
ขาว 40	7	43.149	14.906	26.282	21.182	26.282	26.360
	14	24.713	40.011	41.188	44.718	35.304	37.187
	28	47.072	45.895	48.641	26.674	25.105	38.677
ขาว 50	7	38.050	43.149	37.658	52.956	45.111	43.385
	14	49.818	54.917	49.033	43.149	43.149	48.013
	28	55.702	45.503	54.917	53.740	61.193	54.211

ตารางที่ ค- 8 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม
 ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสี้ยน	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
ดำ 10	7	15.298	14.906	16.083	12.553	13.729	14.514
	14	12.945	20.790	15.298	17.652	17.652	16.867
	28	20.398	19.613	19.221	18.829	15.298	18.672
ดำ 20	7	1.569	3.923	5.492	4.707	6.669	4.472

	14	2.354	3.923	6.669	7.845	5.884	5.335
	28	3.138	7.061	6.276	6.669	7.061	6.041
ด่ำ 30	7	1.569	1.961	1.569	1.569	2.746	1.883
	14	2.354	1.961	1.569	1.961	2.746	2.118
	28	2.746	3.138	1.961	1.569	2.746	2.432
ด่ำ 40	7	0.118	0.000	0.314	0.047	0.008	0.097
	14	-	-	-	-	-	-
	28	0.024	0.008	0.047	0.063	0.008	0.030
ด่ำ 50	7	-	-	-	-	-	-
	14	-	-	-	-	-	-
	28	0.078	0.055	0.000	0.000	0.000	0.027

ตารางที่ ค- 9 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

ร้อยละ การ แทนที่ ของเสีย	ระยะเวลา ในการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
น้ำตาล 10	7	24.713	23.144	24.320	27.066	27.459	25.340
	14	19.613	25.890	24.320	27.851	30.597	25.654
	28	27.066	26.478	24.320	30.989	30.597	27.890
น้ำตาล 20	7	18.044	17.260	20.398	18.044	13.337	17.417
	14	15.298	19.613	18.044	17.652	17.652	17.652
	28	10.513	19.613	20.790	22.163	18.044	18.225
น้ำตาล 30	7	9.414	11.925	10.120	7.532	5.649	8.928
	14	19.613	17.260	13.729	7.845	8.238	13.337
	28	16.083	18.437	20.006	7.845	7.061	13.886
น้ำตาล 40	7	0.165	0.110	0.173	0.259	0.086	0.158
	14	0.196	0.298	0.220	0.000	0.141	0.171
	28	1.177	1.098	1.961	3.138	1.020	1.679
น้ำตาล 50	7	0.157	0.188	0.157	0.165	0.173	0.168
	14	0.149	0.196	0.133	0.220	0.180	0.176
	28	0.220	0.173	0.196	0.243	0.216	0.209



ภาคผนวก ง.
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง.1

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15-2547)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ขอบข่าย

1. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดเฉพาะข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 5.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “ปูนซีเมนต์” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ได้จากการบดปูนเม็ดกับแคลเซียมซัลเฟตรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูป อาจเติมหินปูน วัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ และวัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ได้
- 5.2 ปูนเม็ด (clinker) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวกันสุกพอดี มีส่วนเคมีที่สำคัญ คือ ไฮดรอลิกแคลเซียมซิลิเกต (hydraulic calcium silicate)
- 5.3 หินปูน (limestone) หมายถึง หินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งมีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate – CaCO_3) หรือคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นส่วนใหญ่ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ
 - (1) หินปูนที่มีแคลเซียมสูง (high-calcium limestone) มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0% ถึง 5%
 - (2) หินปูนแมกนีเซียม (magnesium limestone) มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต มากกว่า 5% ถึง 35%
 - (3) หินปูนโดโลไมต์ (dolomitic limestone) มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต มากกว่า 35% ถึง 46%

3. ประเภท

- 3.1 ปูนซีเมนต์ แบ่งเป็น 5 ประเภท คือ
 - 3.1.1 ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ

- 3.1.2 ประเภท 2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตปานกลางหรือเกิดความร้อนปานกลางขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ
- 3.1.3 ประเภท 3 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความต้านทานทางอัดสูงได้เร็ว
- 3.1.4 ประเภท 4 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความร้อนต่ำขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ
- 3.1.5 ประเภท 5 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตสูง

4. วัสดุ

- 4.1 ปูนซีเมนต์จะมีวัสดุผสมเพิ่มได้ไม่เกินระบุไว้ ดังต่อไปนี้
- 4.1.1 น้ำหรือแคลเซียมซัลเฟตอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างในปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และ ปริมาณน้ำหนักระหว่างการเผา (loss on ignition) ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 1
- 4.1.2 หินปูนในปริมาณไม่เกิน 5.0% โดยมวลของปูนซีเมนต์ หินปูนต้องเป็นวัสดุตามธรรมชาติ ประกอบด้วยแร่ธาตุอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่น้อยกว่า 7096 โดยมวล ตามบทนิยามข้อ 2.3
- 4.1.3 วัสดุผสมเพิ่มอนินทรีย์ (Inorganic processing additions) ในปริมาณไม่เกิน 5.09% โดยมวล ของปูนซีเมนต์ วัสดุผสมเพิ่มอนินทรีย์ใส่ได้ไม่มากกว่าหนึ่งชนิดในแต่ละครั้ง ปริมาณที่ใส่ถ้ามากกว่า 1.096 โดยรวมของปูนซีเมนต์ ต้องเป็นไปตาม มอก. 15 เล่ม 20 ถ้ามีวัสดุผสมเพิ่มอนินทรีย์ต้องรายงานปริมาณที่ใช้เป็นร้อยละของมวลปูนซีเมนต์พร้อมกับออกไซด์ของวัสดุผสมเพิ่มอนินทรีย์
- 4.1.4 วัสดุผสมเพิ่มอินทรีย์ (organic processing additions) ต้องเป็นไปตาม มอก. 15 เล่ม 20 ในปริมาณไม่เกิน 1.09% โดยมวลของปูนซีเมนต์

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

- 5.1 สมบัติทางเคมี
- ปูนซีเมนต์ต้องมีสมบัติทางเคมีเป็นไปตามตารางที่ 1 แต่อาจเพิ่มเติมรายการตามตารางที่ 2 ได้ ถ้ามีการตกลง กันระหว่างผู้ทำกับผู้ซื้อ การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 15 เล่ม 18 หรือวิธีอื่นที่เทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีทดสอบตาม มอก. 15 เล่ม 18 เป็นวิธีตัดสิน
- 5.2 สมบัติทางฟิสิกส์
- ปูนซีเมนต์ต้องมีสมบัติทางฟิสิกส์เป็นไปตามตารางที่ 3 แต่อาจเพิ่มเติมรายการตามตารางที่ 4 ได้ถ้ามีการตกลงกันระหว่างผู้ทำกับผู้ซื้อ

ตารางที่ ง-1 สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์

รายการ การ ที่	สมบัติ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด				
			ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
1	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃) ไม่มากกว่า			6.0			
2	ไอร์ออน (III) ออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) ไม่มากกว่า			6.0		6.5	
3	แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไม่มากกว่า		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
4	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) ไม่มากกว่า						
	4.1 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃) ไม่มากกว่า 8		3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
	4.2 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃) มากกว่า 8		3.5		4.5		
	น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ไม่มากกว่า						
5	5.1 เมื่อผสมหินปูน	ร้อยละ	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
	5.2 เมื่อผสมหินปูน	โดย	3.75	3.5	3.5	3.5	3.5
6	กากที่ไม่ละลายในกรดและต่าง ไม่มากกว่า	มวล	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
7	ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO ₂) ไม่มากกว่า					35	
8	ไดแคลเซียมซิลิเกต (2CaO.SiO ₂) ไม่น้อยกว่า					40	
9	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (3CaO.Al ₂ O ₃) ไม่มากกว่า			8	15	7	5
10	เทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอโรไรต์บวกสองเท่าของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ + 2(3CaO.Al ₂ O ₃] หรือสารละลายของแข็งของเทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอโรไรต์บวกไดแคลเซียมเฟอโรไรต์ (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ + 2CaO.Fe ₂ O ₃) แล้วแต่กรณี ไม่มากกว่า						25

ตารางที่ ง- 2 สมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์

รายการที่	สมบัติ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด					วิธีทดสอบตาม
			ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5	
1	ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์” ไม่มากกว่า	ร้อยละโดยปริมาตร	12	12	12	12	12	มอก.15 เล่ม 13
2	ความละเอียด พื้นผิวจำเพาะ (Specific surface) - ทดสอบด้วยสภาพความซึมผ่านอากาศ (air permeability test) ไม่น้อยกว่า	m ² /Kg	260	260	260	260	260	มอก.15 เล่ม 6
3	การขยายตัวโดยรีโอโตเคสฟ (autoclave expansion) ไม่มากกว่า	ร้อยละ	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	มอก.15 เล่ม 11
4	ความต้านแรงอัด ไม่น้อยกว่า อายุ 1 d อายุ 3 d อายุ 7 d อายุ 28 d	Mpa	12.0	10.0	12.0	24.0	8.0	
5	ระยะเวลาก่อตัว - ทดสอบแบบไวแคต (Vicat test) การก่อตัวระยะต้น ไม่น้อยกว่า การก่อตัวระยะปลาย ไม่มากกว่า	Mpa	19.0	17.0	7.0	15.0	21.0	
		Mpa	45	45	45	45	45	มอก.15 เล่ม 9
		Min	375	375	375	375	375	
		min						

ตารางที่ 4-3 สมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ที่อาจเพิ่มเติมได้

รายการ การ ที่	สมบัติ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด					วิธีทดสอบตาม
			ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5	
1	การก่อตัวผิดปกติ	ร้อยละ	50	50	50	50	50	มอก. 15 เล่ม 15
2	การก่อตัวผิดปกติ ระยะเวลาปลาย ไม่น้อยกว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ไม่มากกว่า วิธีไอโซเทอร์มัลคอนกรีตขั้นแคสซิเมตรี อายุ 3 d อายุ 7 d หรือ - วิธีวัดความร้อนของสารละลาย อายุ 7 d อายุ 28 d ความต้านแรงอัด ไม่น้อยกว่า อายุ 28 d	Cal/g Cal/g	60	60	50	50	50	ASTM C 1702
3	การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต ไม่มากกว่า อายุ 14 d	Mpa	28.0	28.0				มอก. 15 เล่ม 12
4	ระยะเวลาก่อตัว	ร้อยละ					0.40	มอก. 15 เล่ม 14
5	- ทดสอบแบบกิลโมร์ (Gilmore test) การก่อตัวระยะต้น ไม่น้อยกว่า การก่อตัวระยะปลาย ไม่มากกว่า ความละเอียด พื้นผิวจำเพาะ (Specific surface) - ทดสอบด้วยเทอร์บูริมิเตอร์ (turbidimeter) ไม่น้อยกว่า	Min Min	60	60	60	60	60	มอก. 15 เล่ม 10
6		mm ² /kg	150	150			150	มอก. 15 เล่ม 5

ภาคผนวก ง.2

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535

เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 13 (3) ข้อ 13(3)(ก) และข้อ 13(3)(ข) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 1 ท้ายประกาศนี้ ต้องดำเนินการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามที่กำหนด ในข้อ 2 และข้อ 3

ข้อ 2 ห้ามมิให้นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามข้อ 1 ออกนอกบริเวณโรงงาน เว้นแต่จะได้รับการอนุญาตจากอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม หรือผู้ซึ่งอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมมอบหมายให้ นออกไป เพื่อการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังด้วยวิธีการและสถานที่ ตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนดในภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศนี้

ข้อ 3 ต้องแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับชนิด ปริมาณ ลักษณะ คุณสมบัติและสถานที่เก็บสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ๆ พร้อมทั้งวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้งฝัง เคลื่อนย้าย และการขนส่งตามแบบ รง.6 ท้ายประกาศนี้ต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรมภายในกำหนด 90 วันนับแต่ประกาศนี้มีผลใช้บังคับ ยกเว้น ผู้ประกอบกิจการโรงงานซึ่งประกอบกิจการโรงงานภายหลังจากประกาศนี้มีผลใช้บังคับ ให้แจ้งภายในกำหนด 90 วันนับแต่วันที่เริ่มประกอบกิจการโรงงาน

ต้องแจ้งรายละเอียดตามวรรคหนึ่งครั้งต่อไปทุกปีภายในวันที่ 30 ธันวาคม และการแจ้งให้สามารถส่งทางไปรษณีย์ลงทะเบียนตอบรับได้โดยให้ถือว่าวันที่พนักงานไปรษณีย์ได้ส่งเป็นวันที่แจ้ง ทั้งนี้ ตั้งแต่วันถัดจากวันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ.2540

(นายกร ทัพพะรังสี)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 114 ตอนพิเศษ 106ง ลงวันที่ 13 พฤศจิกายน 2540

ภาคผนวกที่ 1

บัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

หมวด 1

สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable Substances) สารกัดกร่อน (Corrosive Substances) สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) สารพิษ (Toxic substances) และสารที่ถูกละล้างได้ (Leachable substances)

ข้อ 1 สารไวไฟ (Ignitable substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

1.1 เป็นของเหลวที่มีจุดวาบ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส (140 องศาฟาเรนไฮท์) แต่ไม่ รวมถึงสารละลายในน้ำ (Aqueous solution) ที่มีปริมาณของแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่าร้อยละ 24 โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือ Pensky Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบ ของมาตรฐาน ASTM D-93-79 หรือ D-93-80 หรือการวัดด้วยเครื่องมือ Setafash Closed Cup Tester ตามวิธี ทดสอบของมาตรฐาน ASTM D-3278-78

1.2 เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสี หรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้นและเมื่อเกิดลุกเป็นไฟจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่อง ที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

1.3 เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้ ให้หมายถึงวัสดุหรือ ของผสมใด ๆ ที่บรรจุอยู่ในถังบรรจุที่มีความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร (40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส (70 องศาฟาเรนไฮท์) หรือมีความดันสัมบูรณ์มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (14 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (130 องศาฟาเรนไฮท์) วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM D-323

1.4 เป็นสารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) ซึ่งให้ออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วและสามารถไปกระตุ้นให้ เกิดการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ขึ้นได้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก chlorate permanganate inorganic peroxide และ nitrate

ข้อ 2 สารกัดกร่อน (Corrosive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

2.1 เป็นสารที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (Aqueous) ที่มีค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัด ด้วย pH-12meter ตามวิธีทดสอบของ US EPA Method 9040

2.2 เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตร (0.250 นิ้ว) ต่อปีที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (130 องศาฟาเรนไฮท์) วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำ โดยการใช้วิธีทดสอบ ของ NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

ข้อ 3 สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

3.1 เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและอย่างรุนแรงโดยไม่มี การ ระเบิดเกิดขึ้น

3.2 เป็นสารซึ่งทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

3.3 เป็นสารซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะได้ของผสมที่จะระเบิดได้

3.4 เป็นสารซึ่งเมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.5 เป็นสารที่ประกอบด้วยไฮยาไดรอกไซด์หรือซัลไฟด์ เมื่อมีค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว จะทำให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่อาจก่อให้เกิด อันตรายต่อสุขภาพบุคคลและ สิ่งแวดล้อมได้

3.6 เป็นสารซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้นในที่จำกัดจะมีปฏิกิริยาระเบิดรุนแรง หรือเมื่ออยู่ในที่ ซึ่งมี อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) จะมี ปฏิกิริยาอย่างรุนแรงและ รวดเร็วและอาจระเบิดได้

ข้อ 4 สารพิษ (Toxic substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

4.1 เป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของบุคคล โดยทำให้ถึงตายได้ ในปริมาณที่มี เพียงเล็กน้อย วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการใช้วิธีทดสอบ toxicity test แบบ US EPA Method

4.2 เป็นสารที่มีค่าความเป็นพิษ ดังต่อไปนี้

เมื่อใช้หนู (Rat) เป็นสัตว์ทดลอง LD₅₀ (พิษทางปาก, Oral LD₅₀) น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม หรือ LC₅₀ (พิษทางการหายใจ, Inhalation LC₅₀) น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วนในสภาพ ของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระต่ายเป็นสัตว์ทดลอง LD₅₀ (พิษโดยผ่านทางผิวหนัง, Dermal Rabbit LD₅₀) น้อยกว่า 43 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม ทั้งนี้ ค่า LD₅₀, หมายถึง ค่า (ปริมาณ) เฉลี่ยของวัตถุที่มีพิษ (Medium lethal dosage) ที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD₅₀ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของวัตถุ มีพิษต่อน้ำหนักตัวสัตว์ทดลองหนึ่ง กิโลกรัมและค่า LC₅₀ หมายถึง ค่า (ความเข้มข้น) เฉลี่ยของวัตถุที่มีพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LC₅₀ มีหน่วยเป็นส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของวัตถุที่มีพิษต่อล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

4.3 เป็นสารที่เกิดจากกระบวนการในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีหรือเจือปนด้วยสารเคมีที่ก่อให้เกิด มะเร็งตามบัญชีรายชื่อในกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2A และกลุ่มที่ 2B ของ International Agency for Research on Cancer

4.4 เป็นสารที่มีค่าความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ทดลอง (Aquatic LC₅₀) น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเวลา 96 ชั่วโมง

4.5 เป็นสารที่เมื่อถูกเจือจางให้มีความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 20 แล้ว ยังก่อให้เกิดความเป็นพิษ LC₅₀ ต่อสัตว์ที่ทดลองในเวลา 96 ชั่วโมง

ข้อ 5 สารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable substances) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 3 ของภาคผนวกที่ 2 ทำยประภาคนี้แล้ว มีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุที่มีพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่า ค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบนซีน (Benzene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร

คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	6.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
พารา-ครีซอล (para-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2-4 ดี (2-4 D)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	7.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,1-ไดคลอโรเอทิลีน (1,1-Dichloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
เอลดริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรบิวตาไดเอิน (Hexachlorobutadiene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรอีเทน (Hexachloroethane)	3.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมธอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ไนโตรโทลูอีน (2,4-Nitrotoluene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไพริดีน (Pyridine)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

เตทตราคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5 ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	400.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5 ทีพี (ซิลเว็กซ์) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl chloride)	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร



บรรณานุกรม

ภาษาอังกฤษ

Abhilash, et al. (2014). "Extraction of lanthanum and cerium from Indian red mud." International Journal of Mineral Processing 127: 70-73.

Alexander Posher, et al. 2013. Extraction of Cerium and Lanthanum From Spent Glass Polishing Agent. 52nd Conference of Metallurgists (COM). Montreal, Canada.

Baccini, P. and Bader, H.-P. 1996. Regionaler stoffhaushalt: erfassung, bewertung und steuerung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Baccini, P. and Brunner, P.H. 1991. Metabolism of the anthroposphere. Springer-Verlag. Berlin.

Brunner, P.H. and Rechberger, H. 2004. Practical handbook of material flow analysis. Lewis Publishers, Boca Raton .

Elaqra, H. and R. Rustom (2018). "Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste." Construction and Building Materials 179: 326-335.

Kim, J.-Y., et al. 2011. "Recovery of cerium from glass polishing slurry." Journal of Rare Earths 29(11): 1075-1078.

Kwonpongsagoon, S., Bader, H.-P., Scheidegger, R., and Moore, S. 2007. "Modelling the cadmium flows in Australia on the basis of a Substance Flow Analysis." Clean Technology and Environmental Policy 9: 313-323.

Limbach LK. 2005. Environmental Science Technology, 9370.

M. Jamshidi , et al. 2012. "Application of sewage dry sludge in concrete mixtures." Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) 13: 365-375.

Mohamed Matar. 2008. Use of wastewater sludge in concrete mixes. Department of civil

engineering Faculty of Engineering The Islamic university of Gaza, Palentine

Moore, S. 1997. Environmental concerns and Management of cadmium in Europe and Australia. Proceedings of Australian Workshop on the Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries, 8 December 1997, Canberra.24 April 2001. Environment Australia.

Pinida, L., Material Flow Analysis of Nitrogen through Food Production and Consumption for Watershed Management in Chaophraya River Delta, Thailand, in Department of Urban Engineering Graduate School of Engineering. 2010, The University of Tokyo.

Srinivasan. K , et al. 2016. "Replacement of fine aggregate using sludge in concrete." International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 3(5): 1989-1993.

ภาษาไทย

กนกวรรณ สุขรัชช์. 2557. การวิเคราะห์การไหลของสารปรอทจากอะมัลกัมในงานทันตกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 3283 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานมาตรฐานเลขที่ มอก.15 เล่ม 1. กระทรวงอุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กระทรวงอุตสาหกรรม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2560. รายงานแบบคำขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงานปี 2558-2560.

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุต. 2543. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จ ซีแพค.
- เขาวนวิศ วรรณานิติ. 2555. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำลิเซอโรลดิบให้บริสุทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวี เปรมเล็ก และคณะ. รอบรู้เรื่องแวนตา. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา <https://bit.ly/2DXEAzR> [21 เมษายน 2561]
- ปาณิสรา นามจันทร์. 2560. การนำของเสียจมนวนหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะเป็นวัสดุผสมในกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรารธนา คิ้วสุวรรณ และคณะ. 2537. การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุหายากในแรมโมนาไซด์โดยเทคนิคไอซีพี. การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ ครั้งที่ 5, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.
- พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และคณะ, 2555. คู่มือความปลอดภัยในการทำงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุนาโน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- พิชิต อินโองการ. 2555. การศึกษาแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนที่เหมาะสมโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของวัสดุ: กรณีศึกษาองค์การบริหารส่วนตำบลร่มเย็น อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา.
- วิกานดา คำชู. 2560. การวิเคราะห์การไหลของวัสดุเพื่อศึกษาการจัดการอย่างยั่งยืนของขยะพีวีซีในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันพลาสติก. 2559. ผลิตภัณฑ์เลนส์แวนตา. ฐานข้อมูลโครงสร้างอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์วัสดุ

อุปกรณ์ทางการแพทย์, สถาบันพลาสติก.

สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม. 2555. คู่มือการจัดการของเสียภายในโรงงาน. สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

สุบรรณ ฟูวัน, 2555. การวิเคราะห์หาแนวทางจัดการขยะอย่างยั่งยืนของเทศบาลตำบลป่าซาง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของวัสดุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา.

สุพัต ควรพงษากุล. การวิเคราะห์การไหลของสาร (Substance Flow Analysis – SFA). [ออนไลน์] 2552. แหล่งที่มา <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a8.shtml>. [3 เมษายน 2561]

สุริยา ชัยเดชทยากุล. 2544. การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร, มหาวิทยาลัยมหิดล.

อุบลทิต จังதியานนท์. 2545. การดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพโดยใช้กากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง. สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร, มหาวิทยาลัยมหิดล.

เอกชัย ลิมพัฒนสกุล. 2553. การศึกษาประสิทธิภาพในการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นอิฐตัวหนอน กรณีศึกษา: บริษัท แวกซ์ กาเบจ รีไซเคิล เซ็นเตอร์ จำกัด. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

เรืองรุชดี ซีระโรจน์. 2559. การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://tunjai.com/sumfile/index.php?uid=1&pid=57&menutype=rboard_2&qid=16&qid2=7&swidth= [11 ธันวาคม 2562]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศรัณย์พร อุ่นเพชร
วัน เดือน ปี เกิด	25 มกราคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	- ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา - ปีการศึกษา 2560 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	277/6 หมู่ 3 ตำบลบางโปรง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ผลงานตีพิมพ์	ศรัณย์พร อุ่นเพชร และ สุธา ขาวเขียว. 2562. การวิเคราะห์การไหลของของเสียจากอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตาพลาสติก. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 18, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 23-24 พฤษภาคม 2562, หน้า 47-48.