

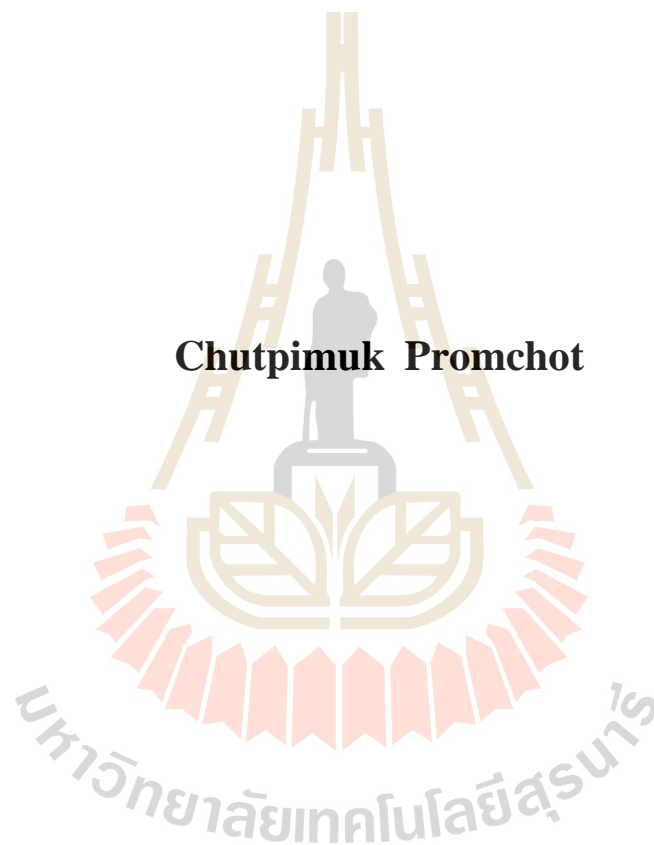
การชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน



นางสาวชัชพิมุข พรหมโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**LEACHING OF HEAVY METALS FROM
LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING
MELAMINE WASTE**



Chutpimuk Promchot

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2018**

การชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กัญชลา สุตตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



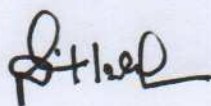
(ผศ. ดร.วรรณวนษ์ บุ่งสุด)

กรรมการ



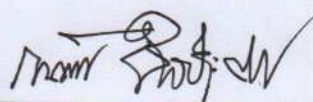
(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัชพิมพ์ พรหมโชติ : การชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน
(LEACHING OF HEAVY METALS FROM LIGHTWEIGHT CONCRETE
CONTAINING MELAMINE WASTE) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตตาชาติ, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลขนาดเศษของเสี้ยนเมลามีนต่อการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดต่อน้ำเท่ากับ 2:2:1 และควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เศษของเสี้ยนเมลามีนจะถูกบดให้มีขนาดเล็กและร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดคละที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 เท่ากับ FM1.25 FM1 FM0.75 และ FM0.5 ชั้นทดสอบจะถูกบดและนำมาทดสอบการชะละลายโลหะหนัก 5 ชนิด คือ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียมและสังกะสี ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยใช้น้ำสกัด 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ($H_2SO_4 : HNO_3 = 80:20$) และน้ำสกัด TCLP ตามมาตรฐาน U.S. EPA Leachability Test Method 1311 จากผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก พบว่า เมื่อผสมเศษของเสี้ยนเมลามีนในคอนกรีตมวลเบาทำให้ปริมาณความเข้มข้นของโลหะทั้ง 5 ชนิด ที่ชะละลายออกมา มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด โดยปริมาณการชะละลายของโลหะหนักอาร์ซีนิก แคดเมียม และตะกั่วของทุกชั้นทดสอบมีค่าไม่เกินมาตรฐานของ U.S.EPA ในส่วนของไทเทเนียมและสังกะสีที่ไม่มีการกำหนดมาตรฐาน มีปริมาณการชะละลายออกมาต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นการนำเศษของเสี้ยนเมลามีนมาใช้แทนที่ทรายบางส่วนในการผลิตคอนกรีตมวลเบาจึงไม่เป็นอันตรายหากมีการนำไปใช้งานจริง

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ชัชพิมพ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กชชลา

CHUTPIMUK PROMCHOT : LEACHING OF HEAVY METALS FROM
LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING MELAMINE WASTE.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KANCHALA SUDTACHAT, Ph.D.,

96 PP.

LEACHING/HEAVY METAL/MELAMINE WASTE/TCLP/LIGHTWEIGHT
CONCRETE

This research was aimed to investigate the influence of aggregate fineness modulus on leaching of heavy metals from lightweight concrete containing melamine waste as fine aggregate. Melamine waste was used to partially replace sand at the rate of 25% by weight. The mixed ratio of cement: aggregate: water was set at 2:2:1 by weight. Density of fresh concrete was controlled at 1,100 and 1,300 kilogram per cubic meter. The melamine waste was crushed and sieved to achieve 4 levels of fineness modulus (FM) at FM1.25, FM1.0, FM0.75 and FM0.5. The leaching test of 5 heavy metals; namely, As, Cd, Pb, Ti and Zn was investigated using Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Three leachants, including deionized water (DI), synthetic acid rain ($H_2SO_4:HNO_3 = 80:20$) and TCLP solution (U.S.EPA SW-856 Method 1311) were used as leaching media. The result of leaching heavy metals indicated that the concentration of 5 kinds of heavy metals leached from concrete containing melamine waste in all medias was lower than controlled concrete. The concentration of As, Cd, and Pb were not exceed the limitation specified by the U.S.EPA in all specimens. Although Ti and Zn were not specified by the U.S.EPA, but

Ti and Zn were present in the leachates at concentrations lower than 1 milligram per liter. Therefore, the replacement of sand with melamine waste 25% by weight in lightweight concrete was non-hazardous for use.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ชัชฌิมา

Advisor's Signature Ab J

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัยจนสำเร็จ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้เสียสละอันมีค่าในการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิภาพวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต รวมถึงเพื่อนๆปริญญาโททุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลและคำแนะนำที่จำเป็นต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และทุกคนในครอบครัวที่สนับสนุน ให้โอกาสในการศึกษา และเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ชัชพิมุข พรหมโชติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากของเสียอุตสาหกรรม	5
2.1.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม.....	5
2.1.2 การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว. 5	
2.1.3 กากของเสียที่ไม่อันตราย (Non Hazardous Waste)	7
2.1.4 ลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เป็นของเสียอันตราย.....	8
2.2 เมลามีน (Melamine).....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	โลหะหนัก	14
2.3.1	การสะสมของโลหะหนัก.....	15
2.3.2	สารพิษจากโลหะหนัก.....	16
2.3.3	โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
2.4	การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม.....	22
2.4.1	การปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification).....	22
2.4.2	การบำบัดและการจัดการด้วยความร้อน (Thermal).....	32
2.4.3	การฝังกลบกากของเสียอุตสาหกรรม.....	32
2.5	ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต.....	32
2.5.1	ความหมาย.....	32
2.5.2	ส่วนประกอบของคอนกรีต.....	33
2.6	การชะละลาย.....	35
2.6.1	ความหมาย.....	35
2.6.2	เกณฑ์การพิจารณาสำหรับการทดสอบการชะละลาย.....	37
2.6.3	กลไกของการเกิดการชะละลาย.....	38
2.6.4	ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย.....	43
2.6.5	การทดสอบการชะละลาย.....	46
2.7	ปริทรรศน์วรรณกรรม.....	49
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1	บทนำ.....	55
3.2	วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.2.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.2.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.2.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.3	การเตรียมสารเคมี.....	58

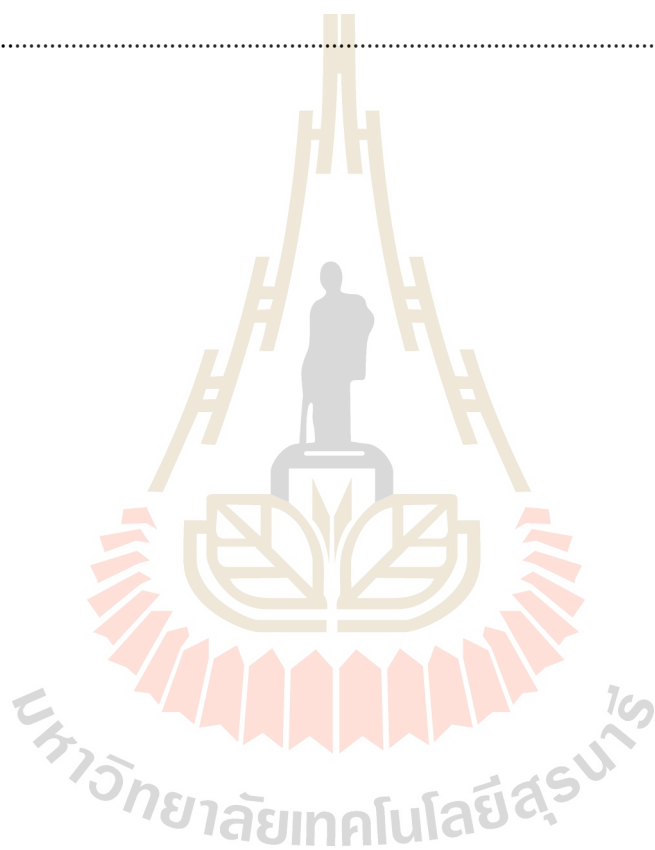
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การเตรียมสารละลายฝนกรด.....	58
3.3.2 การเตรียมน้ำสกัด TCLP.....	59
3.4 การเตรียมตัวอย่าง.....	59
3.5 วิธีการทดสอบ.....	60
3.5.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด.....	60
3.5.2 ศึกษาการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสีย เมลามีน.....	60
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 บทนำ.....	63
4.2 สมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด.....	63
4.2.1 สมบัติทางกายภาพ.....	63
4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	64
4.3 ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP.....	66
4.3.1 การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะเป็นน้ำปราศจากไอออน.....	66
4.3.2 การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะเป็นน้ำสกัด TCLP.....	68
4.3.3 การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะเป็นน้ำฝนกรดสังเคราะห์.....	70
4.4 การชะละลายกับมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure.....	72
4.5 สารชะละลายกับการชะละลาย.....	73
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทนำ	88
5.2 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP.....	88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ระหว่างศึกษา.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	96



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ตัวเลข 2 หลักแรกที่แสดงถึงประเภทของของการประกอบกิจการหรือชนิดของ สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว..... 6
2.2	แสดงลักษณะทางกายภาพของเมลามีน..... 13
2.3	ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์..... 21
2.4	มาตรฐาน Toxicity Characteristic Constituents and Regulatory Levels..... 37
2.5	ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลาย..... 43
3.1	อัตราส่วนผสมคอนกรีต..... 59
3.2	อัตราส่วนผสมตามค่าโมดูลัสความละเอียดของเศษของเสียมลามีน..... 59
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง..... 60
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด..... 65
4.2	มาตรฐาน Toxicity Characteristic Constituents and Regulatory Levels..... 73
4.3	ความเข้มข้นของการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียม ลามีนด้วยวิธี TCLP..... 75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างเคมีของเมลามีน.....12
2.2	เศษของเสียเมลามีนที่ได้จากการบด..... 13
3.1	ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP..... 56
3.2	เศษของเสียเมลามีนก่อนบดและหลังบด..... 57
3.3	เครื่อง ICP-OES (Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry)..... 62
4.1	ภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....64
4.2	เศษของเสียเมลามีนก่อนบดและหลังบด..... 64
4.3	ปริมาณโลหะหนักในน้ำปราศจากไอออนที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 67
4.4	ปริมาณโลหะหนักในน้ำปราศจากไอออนที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 68
4.5	ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด TCLP ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 69
4.6	ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด TCLP ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 70
4.7	ปริมาณโลหะหนักในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 71
4.8	ปริมาณโลหะหนักในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 72
4.9	ภาพรวมการชะละลายของแคดเมียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 77
4.10	ภาพรวมการชะละลายของแคดเมียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร..... 78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ภาพรวมการชะละลายของตะกั่วในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	79
4.12 ภาพรวมการชะละลายของตะกั่วในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	80
4.13 ภาพรวมการชะละลายของอาร์ซีนิคในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	81
4.14 ภาพรวมการชะละลายของอาร์ซีนิคในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	82
4.15 ภาพรวมการชะละลายของไทเทเนียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	83
4.16 ภาพรวมการชะละลายของไทเทเนียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	84
4.17 ภาพรวมการชะละลายของสังกะสีในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	85
4.18 ภาพรวมการชะละลายของสังกะสีในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบา ที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Al_2O_3	=	อะลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา
ASTM	=	American society for testing and materials
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
C_3A	=	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C_4AF	=	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
CC	=	คอนกรีตควบคุม
$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$	=	เมลามีน
CH_2O	=	ฟอร์มัลดีไฮด์
C_o	=	ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด
C_i	=	ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด
C_2S	=	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C_3S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
Di	=	Deionized water
DLT	=	Dynamic Leaching Test
Fe_2O_3	=	เฟอร์ริกออกไซด์
FM	=	Fineness Modulus
<u>FMXXDXX</u>	=	คอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษของเสียเมลามีนที่ค่าโมดูลัสความละเอียด <u>XX</u> เป็นมวลรวมละเอียด ที่ความหนาแน่น <u>XX</u>
ICP-OES	=	Inductively coupled plasma - optical emission spectrometry
K_2O	=	โพแทสเซียมออกไซด์
L	=	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย หน่วยร้อยละ
MF	=	melamine formaldehyde
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์
OPC	=	ordinary Portland cement
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา
SO_3	=	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TCLP	=	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
TiO ₂	=	ไทเทเนียมออกไซด์
USEPA	=	United States Environment Protection Agency
W ₀	=	ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด
W _i	=	ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด
w/b	=	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน
XRF	=	x-ray fluorescence



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม บ้านเรือน ชุมชนเกินขีดจำกัด ซึ่งของเสียที่เป็นอันตรายอาจมีได้หลายลักษณะ เช่น อยู่ในรูปของกากน้ำมัน กากตะกอน สารอินทรีย์ หรือ สารอนินทรีย์ สารตัวทำละลาย สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด-ด่าง ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน หรือเสื่อมคุณภาพ เป็นต้น ซึ่งการนำของเสียเหล่านี้มาใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาหรือใช้เป็นวัสดุคืบร่วมในการผลิตปูนซีเมนต์อาจก่อให้เกิดโลหะหนักตกค้าง

ของเสียจากกระบวนการผลิตจะมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น อาร์เซนิก (As) ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) เนื่องจากในหลายภาคส่วนมีการนำโลหะหนักมาเป็นวัสดุคืบ เช่น ในด้านอุตสาหกรรม ใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางการเกษตร โลหะหนักใช้เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง (พรพรรณ, 2549) โดยของเสียเหล่านี้จะถูกกำจัดด้วยวิธีการเผา ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือฝังกลบ (Soroushian, 1999) ซึ่งเป็นวิธีที่อันตรายเนื่องจากอัตราการย่อยสลายช้าและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงมีการเสนอให้มีการกักเก็บสารพิษจากของเสียไม่ให้แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย โดยมีการศึกษาวิจัย (Xue, 2017) ในการนำของเสียมาผสมกับวัสดุยึดประสาน เพื่อลดการแพร่กระจายโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยการทำเป็นก้อนหล่อแข็ง

การหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการกำจัดของเสียอันตราย ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือช่วยป้องกันการละลายของสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ช่วยลดขนาดพื้นที่ผิวของของเสีย โดยสารอันตรายเหล่านี้จะช่วยกักเก็บไว้ในโครงสร้างของวัสดุยึดประสานด้วยการเกิดพันธะทางเคมี ทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว โดยจะใส่สารที่ทำให้วัสดุแข็งตัวผสมกับของเสียอันตราย ทำให้ได้ของแข็งที่มีความแข็งแรง รับแรงกดได้มากขึ้น และช่วยลดความสามารถของน้ำซึมผ่านได้ วัสดุยึดประสานที่ช่วยกักเก็บแข็งตัว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปอชโซลาน ดินเหนียวดัดแปลง พอลิเมอร์อินทรีย์ เทอร์โมพลาสติก เป็นต้น ส่งผลให้ของเสียมีเสถียรภาพดีขึ้น (เกรียงศักดิ์, 2553) หลังจากกระบวนการหล่อแข็งของเสียอันตรายแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบคุณภาพของก้อนหล่อแข็ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกักเก็บโลหะหนัก ด้วยการทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

เป็นต้น ซึ่งวิธีที่นิยมในการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก คือ วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เนื่องจากวิธี TCLP เป็นการทดสอบของเสียอันตรายสำหรับการฝังกลบและเป็นการเลียนแบบสภาวะของการชะละลายในหลุมฝังกลบจริงที่ได้รับการยอมรับทางด้านสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาที่นำเศษของเสียเมลามีนจากระบวนการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานมาแทนที่ทรายบางส่วน และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน โดยทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP ซึ่งใช้สารชะเป็นกรดอะซิติก และประยุกต์ใช้สารชะเป็นฟลักตสังเคราะห์และน้ำปราศจากไอออน และทำการเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของโลหะหนักกับมาตรฐานของ United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว เพื่อดูว่าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่ หากมีการนำไปใช้งานจริงในด้านต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะการชะละลายของ โลหะหนักที่ปนเปื้อนในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของ โลหะหนักที่ชะละลายออกจากคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีนกับมาตรฐานของ U.S.EPA

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เศษของเสียเมลามีนที่ใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตมวลเบาเป็นเศษของเสียเมลามีนที่ได้จากกระบวนการ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) โดยเศษของเสียเมลามีนที่ได้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ซึ่งได้จากเศษของเสียที่ไม่ได้มาตรฐานในการผลิตโดยการนำมาบดเพื่อให้ได้เป็นเศษของเสียเมลามีนขนาดเล็ก

1.3.2 ทำการทดสอบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีนโดยการแทนที่ทรายด้วยเศษของเสียเมลามีนในสัดส่วนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของทราย ด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

1.3.3 สารละลายที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) สารละลายฟลักต และน้ำสกัด TCLP

1.3.4 ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma- Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูล ปรัชญานวัตกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 กำหนดขอบเขตการทดลองและแผนการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 เตรียมอุปกรณ์และวัสดุทดสอบ

- ทำการบดเศษของเสียเมลามีนให้มีขนาดเล็ก และร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาด

กละที่เหมาะสมตามมาตรฐาน เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด

1.4.4 เตรียมชิ้นทดสอบโดยการผสมตามส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้

1.4.5 หล่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษของเสียเมลามีน

- 50×50×50 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

1.4.6 การทดสอบการชะละลายของคอนกรีตมวลเบา

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.8 สรุปผลการทดลอง

1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.4.10 เผยแพร่และตีพิมพ์งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน)

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมวัสดุและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

- เครื่องบดพลาสติก (Plastic recycling machinery)

- เครื่องร่อนแยกขนาด (Sieve Shaker)

- ชุดตะแกรงร่อน (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM C33

- เครื่องชั่งดิจิตอล

- แบบหล่อมาตรฐาน

- เครื่องสร้างโฟม (Foam generator)

- เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

1.6.2 เครื่องมือสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

- เครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence: XRF)

1.6.3 เครื่องมือสำหรับทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

- เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)
- เครื่องวัดค่าพีเอช
- เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ทราบลักษณะการชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิด
- 1.7.2 ทราบปริมาณและชนิดของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาและระดับความปนเปื้อนเมื่อเทียบกับมาตรฐานของ U.S.EPA
- 1.7.3 สามารถลดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้
- 1.7.4 สามารถนำเศษของเสียเมลามีนมาประยุกต์ใช้กับคอนกรีตมวลเบาโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

พิธีศรัทธากรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากของเสียอุตสาหกรรม

2.1.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต หรือสิ่งของที่เสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้ หรือไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งอาจมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ โดยจะแบ่งของเสียอุตสาหกรรมตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.2 การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ และมีการกำหนดรหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยใช้รหัสเลข 6 หลัก เลข 2 หลักแรกแสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว แสดงในตารางที่ 2.1 เลข 2 หลักกลางแสดงถึงกระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการนั้น ๆ ที่ทำให้เกิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว หรือเป็นชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และเลข 2 หลักสุดท้ายแสดงถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น เช่น รหัส 05 07 01 หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (05) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ (07) ที่ปนเปื้อนด้วยปรอท (01) เป็นต้น

ในการกำหนดรหัสที่เหมาะสมกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วให้ปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

1. ให้พิจารณาว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้น มาจากกระบวนการที่สอดคล้องกับ หมวด 01 ถึง หมวด 12 หรือ หมวด 17 ถึง หมวด 19 หรือไม่โดยให้หารหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดเหล่านี้ ยกเว้นรหัส ที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99
2. หากไม่สามารถหารหัสที่เหมาะสมตามข้อ 1 ได้ให้ตรวจสอบรหัสตามชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหมวด 13 ถึง 15
3. ถ้ายังไม่สามารถระบุได้ ให้ตรวจสอบรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหมวด 16

4. หากไม่สามารถระบุรหัสเลข 6 หลักจากหมวด 16 ได้ให้กลับไปใช้รหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99 ในหมวดที่เกี่ยวข้องในข้อ 1

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักกำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste – Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ถือเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้

ตารางที่ 2.1 ตัวเลข 2 หลักแรกที่แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548)

หมวด 01	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการสำรวจการทำเหมืองแร่ การทำเหมืองหิน และการปรับสภาพแร่ธาตุโดยวิธีกายภาพและเคมี
หมวด 02	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการเกษตรกรรม การเพาะปลูกพืชสวน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การทำป่าไม้ การล่าสัตว์ การประมง การแปรรูปอาหารต่าง ๆ
หมวด 03	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการแปรรูปไม้และการผลิตแผ่นไม้ เครื่องเรือน เยื่อกระดาษ กระดาษ หรือกระดาษแข็ง
หมวด 04	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมเครื่องหนัง ขนสัตว์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ
หมวด 05	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม การแยกก๊าซธรรมชาติและกระบวนการบำบัดถ่านหินโดยการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน
หมวด 06	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่าง ๆ
หมวด 07	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่าง ๆ
หมวด 08	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการผลิต การผสมตามสูตร การจัดส่งและการใช้งานของสีสารเคลือบเงา สารเคลือบผิวแก้ว สารติดฉนวนและหมึกพิมพ์
หมวด 09	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพ

ตารางที่ 2.1 ตัวเลข 2 หลักแรกที่แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548) (ต่อ)

หมวด 10	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากกระบวนการใช้ความร้อน
หมวด 11	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการปรับสภาพผิวโลหะและวัสดุต่าง ๆ ด้วยวิธี เคมีรวมทั้งการชุบเคลือบผิวและของเสียจากกระบวนการ non-ferroushydro- metallurgy
หมวด 12	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการตัดแต่งและปรับสภาพผิวโลหะพลาสติกด้วย กระบวนการทางกายภาพ หรือเชิงกล
หมวด 13	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทน้ำมันและเชื้อเพลิงเหลวไม่รวมน้ำมันที่ บริโภคได้
หมวด 14	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทตัวทำละลายอินทรีย์สารทำความเย็นสาร ชุบเคลือบ ที่ไม่รวมไว้ในหมวด 07 และหมวด 08
หมวด 15	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทบรรจุภัณฑ์ วัสดุดูดซับ ผ้าสำหรับเช็ดวัสดุ ตัวกรองและชุดป้องกันที่ไม่ได้ ระบุไว้ในหมวดอื่น
หมวด 16	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทต่าง ๆ ที่ไม่ได้ระบุในหมวดอื่น
หมวด 17	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากงานก่อสร้างและการรื้อทำลายสิ่งก่อสร้างรวมถึง ดินที่ขุดจากพื้นที่ปนเปื้อน
หมวด 18	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากการสาธารณสุขสำหรับมนุษย์และสัตว์รวมถึง การวิจัยทางด้านสาธารณสุข
หมวด 19	สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจากโรงปรับคุณภาพของเสียโรงบำบัดน้ำเสียโรง ผลิตน้ำประปาและโรงผลิตน้ำใช้อุตสาหกรรม

2.1.3 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียที่ไม่อันตราย หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วหรือกากของเสีย ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการ รวมถึงของเสียจากวัตถุดิบและกากของเสียที่ไม่ใช่แล้ว

แต่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของบุคคล สิ่งแวดล้อมและทรัพย์สิน ได้แก่ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากสำนักงาน บ้านพักอาศัยและร้านอาหารในบริเวณโรงงาน (ได้รับการยกเว้น) หรือเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่ได้มีการกำหนดไว้

2.1.4 ลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

2.1.4.1 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances)

1. เป็นของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารละลายที่แอลกอฮอล์ ผสมอยู่น้อยกว่า 24 % โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ ทำโดยการวัด ด้วยเครื่องมือ Pensky-Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-93-79 หรือ D-93-80 หรือ การวัดด้วยเครื่องมือ Setafash Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-3278-78

2. เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสีหรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลุกเป็นไฟ จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่องที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

3. เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้จะหมายถึง วัสดุหรือของผสมใดๆ ที่บรรจุในถังที่มีความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสัมบูรณ์มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์จะทำตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D-323

4. เป็นสารออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) โดยสามารถไปกระตุ้นให้สารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้ได้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก Chlorate permanganate inorganic peroxide และ Nitrate

2.1.4.2 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances)

1. เป็นสารละลาย (Aqueous solution) ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ ทำโดยวัดด้วย pH meter ตามวิธีทดสอบของ US EPA Method 9040

2. เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิเคราะห์ทำโดยวิธีทดสอบของ NACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

2.1.4.3 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances)

1. เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว รุนแรง โดยไม่มีการระเบิดเกิดขึ้น
2. เป็นสารที่ทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ
3. เป็นสารที่รวมกับน้ำแล้วได้ของผสมที่เกิดการระเบิดได้
4. เป็นสารที่ผสมกับน้ำแล้วก่อให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้
5. เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ เมื่อต้องอยู่ในสถานะแวดล้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว สามารถก่อให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้
6. เป็นสารที่เมื่อถูกทำให้ร้อนในพื้นที่ที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยารุนแรง
7. เป็นสารที่สามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ในสถานะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) และมีปฏิกิริยารุนแรง

2.1.4.4 สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances)

1. เป็นสารที่มีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม เพราะมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง เป็นพิษแบบเฉียบพลัน เป็นพิษแบบเรื้อรัง มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม
2. เป็นสารที่มีความเป็นพิษ คือ เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD₅₀ น้อยกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัมเมื่อใช้หนูเป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC₅₀ น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วนในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระต่ายเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า Acute กัมพทพส LD₅₀ น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม ทั้งนี้ค่า LD₅₀ หมายถึง ค่า(ปริมาณ)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal dosage) ที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD₅₀ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของสารพิษต่อน้ำหนักตัว

สัตว์ทดลองหนึ่งกิโลกรัม และค่า LC_{50} หมายถึง ค่า(ความเข้มข้น)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LC_{50} มีหน่วยเป็นล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของสารพิษต่อล้านส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

3. เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC_{50} น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมดเท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) กับปลา fathead minnows (*Pimephales promelas*) ปลา rainbow trout (*Salmo gairdneri*) หรือปลา golden shiners (*Notamigonus crysoleucas*) ตามที่กำหนดใน Part 800 ของ “Standard Method for the Examination of Waste and Wastewater (16th Edition),” American Public Health Association, 1985

4. เป็นที่มีองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่ง หรือปริมาณรวมของสารทั้งหมดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก สารนั้นได้แก่

- 2-Acetylaminofluorene (2-AAF)
- Acrylonitrile
- 4-Aminodiphenyl
- Benzidine and its salts
- bis (Chloromethyl) ether (BCME)
- Methyl chloromethyl ether
- 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP)
- 3,3'-Dichlorobenzidine and its salts (DCB)
- 4-Dimethylaminoazobenzene (DAB)
- Ethyleneimine (EL)
- alpha-Naphthylamine (1-NA)
- beta-Naphthylamine (2-NA)
- 4-Nitrobiphenyl (4-NBP)
- N-Nitrosodimethylamine (DMN)
- beta-Propiolactone (BPL)
- Vinyl chloride (VCM)

2.1.4.5 สิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่องค์ประกอบของสิ่งเจือปน

1. เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (มก./กก. โดยน้ำหนัก) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548

2. เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548

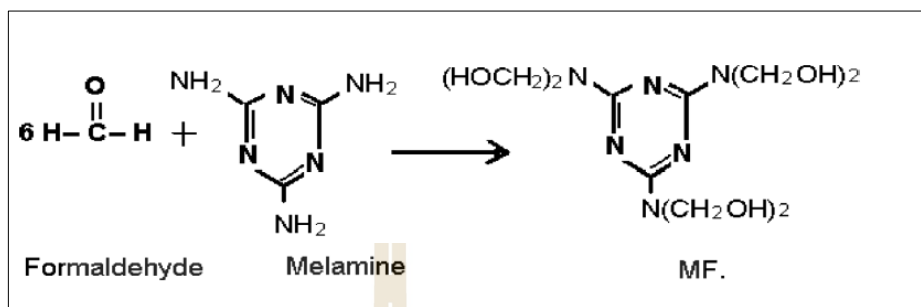
3. การทดสอบสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ที่นำมาสกัดโดยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration) ของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกิน TTLC แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ของสารนั้นที่กำหนดไว้ หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปนื้อกหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

2.2 เมลามีน (Melamine)

พลาสติกเทอร์โมเซตไม่สามารถหลอมได้และไม่สามารถรีไซเคิลได้ เพราะการสร้างพันธะเคมีแบบเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ ปัญหาขยะมูลฝอยของพลาสติกเทอร์โมเซตเป็นปัญหามากกว่าเทอร์โมพลาสติกเพราะว่ามีรูปร่างแบบเดียวเป็นรูปร่างถาเวไม่สามารถหลอมใหม่หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ในส่วนนี้วัสดุจะถูกแปลงเป็นของแข็ง ไม่ละลายน้ำและไม่หลอมละลาย พลาสติกเทอร์โมเซตประกอบด้วยโมเลกุลที่มีการเชื่อมโยงกันถาวรระหว่างเส้นสายโซ่ที่ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายของแข็งสามมิติ ซึ่งไม่สามารถไหลได้

สารเมลามีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกโดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus Von Liebig ในปี ค.ศ. 1834 ซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของไดไซอะนามัย (dicyanamide) เป็นแคลเซียมไซอะนามัย (calcium cyanamide) โดยการให้ความร้อน จนถึงอุณหภูมิละลายซึ่งได้เป็นแอมโมเนียและเมลามีน

มีน เมลามีนเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย ลักษณะเป็นผงสีขาว สูตรเคมีคือ $C_3H_6N_6$ มีไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ 66% โดยมวล มีชื่อทางเคมีว่า 1, 3, 5-triazine-2, 4, 6-triamine.



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเมลามีน

การนำเมลามีนมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ สารเมลามีนเป็นผงสีขาว ลักษณะคล้าย นมผงจนแยกไม่ออก เมื่อนำไปละลายน้ำ หรือผสม ในนมจะตรวจพบปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งการจะตรวจว่านมมีโปรตีนสูงหรือไม่ จะวัดจากค่าของไนโตรเจน ดังนั้นถ้าผสมสารเมลามีนซึ่งมีไนโตรเจน สูงเข้าไปในนม จะถูกทำให้เข้าใจว่านมมีโปรตีนสูง มีการนำเมลามีนผสมในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็น แหล่งโปรตีนเพื่อช่วยเพิ่มค่าไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน ที่แท้จริง (Non-protein nitrogen; NPN) อีกด้านหนึ่ง เมลามีนเป็นพลาสติกที่นิยมนำมาทำ ภาชนะใส่อาหารทนความร้อนกันอย่างแพร่หลาย พลาสติกเมลามีนนี้มีสารฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นองค์ประกอบ โฟน สารทำความสะอาด และ ผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยาสามารถใช้เมลามีน ใน กาว สารทนไฟ สีย้อมในหมึก (ให้สีเหลืองเป็นหลัก) นอกจากนี้ยังพบในการทำปุ๋ย บางอนุพันธ์ของมัน ยังพบในสารหนู (arsenical drug) ป้องกันพยาธิใน เม็ดเลือดด้วย รวมถึงพบในยาฆ่าแมลงด้วย

การขึ้นรูป MF แบบผงโดยทั่วไปจะเตรียมจากน้ำเชื่อมที่มีเรซินกับ MF อัตราส่วน โมลของเรซินตัวเติมคือ 2 ถึง 1 รวมกับฟิลเลอร์ สีน้ำมัน สารหล่อลื่น สารคงตัว และในบางกรณีที่มีการเติมสารเร่งในรูปแบบสารแข็งผสมเพื่อให้ขึ้นรูปผงได้เข้ากันมากขึ้น จึงนำเซลลูโลสมาใช้เป็นสารตัวเติม บางครั้งมีการใช้แป้งไม้ฟอกขาว(Beached wood flour) ปริมาณเล็กน้อยมาเป็นตัวเติมเพื่อลดการหดตัวและรอย (Hasan, 2008)

สมบัติทั่วไปของเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์พลาสติก คือ มีเนื้อแข็งมาก ทนทานต่อการขีดข่วน เหนียวไม่แตกง่าย ผสมสีได้ดี ทนทานต่อน้ำยาฟอกสี ผงซักฟอก น้ำมัน ไม่ติดไฟ ไม่อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อถูกความร้อนสูงจะไหมเกรียม เป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ดูดความชื้น ผลิตภัณฑ์ที่

สำคัญที่ทำจากเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ได้แก่ งาน ชาม ถ้วยกาแฟ เครื่องใช้ภายในครัว สวิตช์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า เป็นต้น โดยสมบัติทางกลและทางกายภาพของเมลามีนฟอรัมาลดีไฮด์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของเมลามีน

ลักษณะคุณสมบัติ	คุณสมบัติ
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.48
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength), MPa	60
การยืดตัวแรงดึง (Tensile elongation), %	0.79
ความทนแรงกระแทก (Notched izod impact), J/m	16.0
ความต้านทานอุณหภูมิ (Temperature resistance), °C	300
การดูดซึมน้ำ (Water absorption), %	5.6

จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ร้อนข้อมูลข้างต้นที่ได้ นำเสนอไปนั้นพบว่า ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนดังกล่าว ก่อให้เกิดขยะและของเสียโดยเฉพาะของเสียจากงานชามเมลามีน ของเสียเมลามีนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเศษของเสียเมลามีนที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) และเมื่ออบจะได้รูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เศษของเสียเมลามีนที่ได้จากการอบ

อันตรายของสารเมลามีนต่อร่างกาย สารฟอร์มัลดีไฮด์ที่เป็นองค์ประกอบใน พลาสติกทำมาจากเมธานอล (แอลกอฮอล์ที่รับ ประทานไม่ได้) มีจุดเดือดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากนำภาชนะเมลามีนทุกประเภทใส่อาหาร เข้าเตาไมโครเวฟ หรือนำอาหารที่ปรุงด้วยความ ร้อนสูง เสร็จใหม่ๆ หรือใส่น้ำร้อนมากๆ จะทำให้มีการซึมของสารฟอร์มัลดีไฮด์ออกมาในปริมาณที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ สารเมลามีนในปริมาณต่ำมีความเป็นพิษ ต่ำ ไม่มีพิษต่อสารพันธุกรรม และไม่เป็นสารก่อกลายพันธุ์ ในปี ค.ศ. 1999 หน่วยงานวิจัยด้านมะเร็งสากล (International Agency for Research on Cancer) ได้ประเมินให้เมลามีนไม่อยู่ในกลุ่มสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (ยูฟา และประสงค์, 2553)

2.3 โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึงกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสง เหนียว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ธาตุที่จัดเป็นโลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิด ได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก โครเมียม ทังสแตน พลวง แคลเซียม ปรอท บิสมัท พลวง ไททาเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิกเกิล แมงกานีส โมลิบดีนัม และเบอรัมัสเนียม โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ ได้ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organ metallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ เช่น แบริลเลียม แคลเซียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซมิก แอนติโมนี เซเลเนียม แทลเลียม และปรอท เป็นต้น ในจำนวนนี้ ปรอท แคลเซียม อาเซนิกและตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษฉวย ไม่สามารถเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ ซึ่ง ในปัจจุบัน โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากของเสียก่อนทิ้ง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

2.3.1 การสะสมของโลหะหนัก

สารพิษโลหะหนักต่าง ๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดิน ตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่าง ๆ กัน ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมและการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้ (โสภภาพรรณ, 2534)

1) การสะสมของโลหะหนักในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปสารแขวนลอย ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปแขวนลอยจะมีเวลาอยู่ในน้ำยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ

2) การสะสมโลหะหนักในดินตะกอน การสะสมโลหะหนักในดินตะกอนส่วนหนึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดจากการสะสมตามธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างพวกเกลือแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้นตามสภาพทางธรณีวิทยา แล้วละลายออกมาปะปนอยู่ในน้ำได้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้และการปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำอันเป็นผลมาจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยทั่วไปโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมอยู่ในดินตะกอนโดยมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำมาก เนื่องจากมีขบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งทางด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ องค์ประกอบในดินตะกอนที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักได้แก่ พวกคาร์บอนต ออกไซด์ของแมงกานีส และเหล็ก ตลอดจนองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่าง ๆ

3) การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำ การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำจะสะสมด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลาย หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชเหล่านั้นด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกันก็จะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักแตกต่างกัน

4) การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหารในลักษณะต่าง ๆ ตามชนิดของสัตว์น้ำนั้น การสะสมของโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้น้อยมาก การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภค

2.3.2 สารพิษจากโลหะหนัก

2.3.2.1 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีสีฟ้าอมเทา มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 327°C สามารถพบได้ที่ผิวโลกในปริมาณน้อย ตะกั่วพบได้ในทุกส่วนของสิ่งแวดล้อม โดยมากมาจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงการซื้อเพลิง เหมืองแร่ และอุตสาหกรรม ตะกั่วมีการใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น ในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ กระจก รังระบายน้ำ ท่อส่งน้ำ ซึ่งตะกั่วนั้นสามารถละลายได้เมื่อพีเอชของน้ำลดลง หรือน้ำที่ถูกส่งผ่านมีกรดคาร์บอนิกสูงทำให้ต้องมีการกำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่ม

เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ทางปากโดยรับประทานอาหารและน้ำดื่มที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทางหายใจโดยเฉพาะจากไอเสียรถยนต์ ส่วนการดูดซึมทางผิวหนัง ส่วนมากเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ โดยตะกั่วอินทรีย์ถูกดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดี มีการสำรวจดินและฝุ่นบริเวณริมถนน ที่เป็นชุมชนหนาแน่นพบว่าปริมาณตะกั่วสูงถึง 7,500 ppm ขณะที่ค่าเฉลี่ยของผิวดิน โลกเพียง 5-25 ppm และมีการกำหนดค่าตะกั่วในน้ำดื่ม โดยไม่ควรเกิน 100 ppb ซึ่งกำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (WHO)

อาการพิษเรื้อรังที่พบบ่อย คือ อาการของระบบย่อยอาหาร จะเกิดการปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหารคลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก อาการพิษทางประสาท และสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ชิมไม่รู้สึกรสชาติ ชัก มือและเท้าตก เป็นอัมพาต สลบ และอาจตายได้

2.3.2.2 สังกะสี

สังกะสีเป็นหนึ่งในธาตุพื้นฐานที่พบได้มากบนโลกทั้งในอากาศ ดิน และน้ำ และยังมีอยู่ในอาหารแทบทุกชนิด สังกะสีบริสุทธิ์ที่เป็นโลหะที่มีความเงา มีสีขาวออกฟ้า ส่วนใหญ่จะนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การชุบโลหะ การทำบรอนซ์ ภาชนะโลหะเคลือบ สีน้ำยารักษาคุณภาพไม้ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น โลชั่นบำรุงผิว ยาสระผมกันรังแค ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค ในทางการเกษตรนำมาใช้เป็นสารคลุกเมล็ด ฆ่าเชื้อรา สังกะสีสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นๆเพื่อสร้างรูปสารประกอบ โดยทั่วไปสารประกอบของสังกะสีจะสามารถพบได้ในพื้นที่ที่เป็นของเสียอันตราย

สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในอาหาร สังกะสีที่น้อยเกินไปสามารถทำให้เกิดปัญหา ในขณะที่เดียวกันสังกะสีที่มากเกินไปก็ก่อให้เกิดอันตรายได้ อันตรายที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแล้วจะเริ่มตั้งแต่ 10-15 เท่าของที่มนุษย์ต้องการสำหรับการมีสุขภาพที่ดี การกินสังกะสีในปริมาณมาก ถึงแม้จะเป็นช่วงสั้นๆ แต่ก็สามารถทำให้เกิดอาการตะคริวที่ท้อง คลื่นไส้ และอาเจียน หากได้รับนานขึ้นจะทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง ระดับคอเรสเตอรอลที่ลดลง สังกะสีที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมนั้นเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่บำบัดไม่หมดหรือ การผลิตภัณฑ์ที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ ซึ่งมลพิษที่ปนเปื้อนสังกะสีมักอยู่ในรูปของฝุ่นหรือไอสารที่ลอยในอากาศ ซึ่งมีโอกาสสัมผัสและได้รับสารได้ง่าย ฝุ่นหรือไอของซิงค์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ส่วนการสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานานจะทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรง ที่เรียกว่า โรคออกไซด์พ็อกซ์ (oxide pox)

2.3.2.3 แคลเมียม

แคลเมียมเป็นธาตุตามธรรมชาติที่พบได้ทั่วไปในโลก โดยทั่วไปอยู่ในรูปแร่ที่รวมตัวกับธาตุอื่น เช่น ออกซิเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ แคลเมียมมีความเป็นพิษมาก แต่ก็มีการนำไปใช้ประโยชน์มาก เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่น สารกันสนิม ทำสี แบตเตอรี่ และลวดเชื่อม ในธรรมชาติแคลเมียมเป็นสารเจือปนในสินแร่สังกะสี (อาจมากถึง 3%) เช่น แร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite, ZnS) และคาลาไมน์ (calamine, ZnCO₃)

การหายใจเอาแคลเมียมที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่ร่างกาย โดยทั่วไปแล้วจะทำความเสียหายแก่ปอด และอาจทำให้เสียชีวิตได้ แคลเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำและอาหารเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้ามและไต และสะสมเพิ่มขึ้นในปริมาณสูงจะทำให้เกิดมะเร็ง ไตทำงานผิดปกติ และยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ปวดกระดูกต้นหลัง แขนขา ซึ่งจะทำให้ไตพิการได้ อาการพิษเฉียบพลันจากการกิน มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ มีน้ำลายไหล ปวด ท้อง ช็อค ไตและตับถูกทำลาย อาการพิษเรื้อรังจากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนัก ลด โลหิตจาง (anemia) หายใจลำบาก ฟันมีคราบเป็นสนิมสีเหลือง ตับและไตอาจถูกทำลาย

แคลเมียมยังเป็นอันตรายต่อสัตว์อีกด้วย เพราะพืชที่สะสมแคลเมียมจะไม่แสดงอาการเป็นพิษ ออกมา จึงทำให้สัตว์ที่กินพืชที่มีการสะสมแคลเมียมเข้าไปอาจตายได้ เพราะแคลเมียมจะไปยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์ สำหรับมนุษย์ถ้าได้รับแคลเมียมในระยะสั้นจะส่งผลต่อระบบการย่อยอาหาร และต่อระบบปอด ส่วนในระยะยาวจะทำให้มีผลต่อระบบไต (ศุภมาศ, 2540)

2.3.2.4 โครเมียม

โครเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติพบมากในหิน ดิน สัตว์ ต้นไม้ ฝุ่นและก๊าซของภูเขาไฟ โครเมียมที่ปรากฏในธรรมชาติมีอยู่หลายรูปแบบ โดยรูปแบบที่พบมากที่สุดได้แก่ โครเมียม (0) โครเมียม (III) และโครเมียม (IV) โดยโครเมียม (III) เกิดขึ้นตามธรรมชาติและเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย เพื่อสนับสนุนการทำงานของอินซูลินในเนื้อเยื่อของร่างกาย ซึ่งทำให้สามารถนำน้ำตาล โปรตีนและไขมันไปใช้ประโยชน์ได้ โครเมียม (0) และโครเมียม (IV) เกิดโดยกระบวนการผลิตจากอุตสาหกรรม โครเมียม (0) ปกติเป็นโลหะแข็งสีเทา มีจุดหลอมเหลวสูง ใช้สำหรับทำเหล็กกล้าและทำอัลลอยด์ชนิดอื่น สำหรับโครเมียม (III) ใช้ทำเป็นยาแนวอิฐในเตาที่มีความร้อนสูง ใช้ทำโลหะและอัลลอยด์ นอกจากนี้ยังใช้ทำสารประกอบเคมี สารประกอบโครเมียมเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของโครเมียม (III) และโครเมียม (IV) ผลิตโดยโรงงานเคมีและใช้ในงานชุบโครเมียม อุตสาหกรรมผลิตเม็ดสีและสีย้อม อุตสาหกรรมฟอกหนัง งานรักษาเนื้อไม้ ปริมาณที่น้อยลงมาถูกใช้ในงานขุดเจาะ ตัวป้องกันสนิมและการกัดกร่อน สิ่งทอ และเป็นโทนเนอร์ในเครื่องถ่ายเอกสาร

โครเมียมนั้นจัดเป็นสารก่อมะเร็งที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งจะได้รับจากการบริโภคหรือการหายใจ เข้าไปและยังส่งผลต่อสัตว์และพืช โดยจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์ และทำให้พืชออกผลผลิตออกมาได้น้อยลงและพบว่าพืชสะสมโครเมียมไว้ได้มากที่สุดในการ องค์กรอนามัยโลกจึงได้กำหนดค่าความปลอดภัยของโครเมียมในอาหารต้องไม่เกิน 2 มก./กก. (นลิน, 2547)

โครเมียมเป็นสารอันตราย ร่างกายได้รับโครเมียมและสารประกอบโครเมียมจากการสูดดมเอาฝุ่น ละอองหรือควัน จะทำให้ระบบทางเดินหายใจถูกทำลาย และทำให้เป็นมะเร็งที่ปอด นอกจากนั้นการสัมผัสกับฝุ่นละออง หรือสารละลายของกรดโครมิกทำให้ผิวหนังอักเสบได้ (จิระนัทร, 2555)

2.3.2.5 พรอท

พรอทเกิดในธรรมชาติจากการปล่อยก๊าซของเปลือกโลกในการปะทุของภูเขาไฟ ปกติแล้วพรอทอยู่ใน 3 รูปแบบคือ พรอทที่เป็นธาตุ เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ พรอทมีแหล่งกำเนิดสำคัญจากการทำเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมกระดาษ พรอทในบรรยากาศจะกระจายไปทั่วโลกโดยอาศัยลม และกลับสู่พื้นโลกโดยฝน เกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำและปลาในทะเลสาบ สารประกอบของพรอทใช้เดิมในสีเพื่อเป็นสารกำจัดราตั้งแต่ปี 1990 แม้ว่าปัจจุบันสารประกอบตัวนี้จะถูกห้ามใช้ แต่สีเก่าๆและสีที่ทาไปแล้วก็ยังคงอยู่ นอกเหนือจากนี้ยังมีการใช้พรอทในเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมสแตด และอลัมกัมซึ่งใช้ในงานทันตกรรม

โดยส่วนใหญ่ปรอทเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ ปรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์พร้อมที่จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยกระเพาะและลำไส้ (ร้อยละ 90-100) ส่วนปรอทในรูปของสารอนินทรีย์ แม้จะถูกดูดซึมในปริมาณที่น้อยกว่าแต่ก็มีความสำคัญ (ร้อยละ 7-15) อวัยวะเป้าหมายคือ สมองแลไต พิษเฉียบพลันของปรอทอาจเกิดขึ้นได้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ และการผลิตยาฆ่ารา เทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมสตัด ปรอทเหลวเป็นสิ่งที่ดึงดูดใจต่อเด็ก ๆ เพราะความที่เป็นสีเงิน และมีพฤติกรรมเฉพาะเวลาที่หก

2.3.2.6 อาร์เซนิก

อาร์เซนิกเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติกระจายอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก ในธรรมชาติอาร์เซนิกจะรวมตัวกับออกซิเจน คลอรีน และซัลเฟอร์ เพื่อสร้างรูปสารประกอบอาร์เซนิกอนินทรีย์ อาร์เซนิกในสัตว์และพืชจะรวมตัวกับคาร์บอน และไฮโดรเจน เพื่อสร้างรูปสารประกอบอาร์เซนิกอินทรีย์ สารประกอบอาร์เซนิกอนินทรีย์โดยมากแล้วใช้ในการรักษาเนื้อไม้ สารประกอบระหว่างอาร์เซนิก โครเมต และทองแดง (CCA) นั้นใช้ในการผลิตไม้อัด

การดูดซึมสารประกอบอาร์เซนิกอนินทรีย์ในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดอาการเจ็บคอและระคายเคืองต่อปอด การรับประทานอาร์เซนิกในปริมาณมากส่งผลแก่ชีวิตได้ สำหรับการได้รับอาร์เซนิกในปริมาณที่ต่ำกว่าทำให้เกิดอาการอาเจียน และคลื่นไส้ ลดการผลิตเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว หัวใจเต้นผิดจังหวะ เกิดความเสียหายต่อหลอดเลือด และอาจทำให้เกิดความรู้สึกเจ็บปวดเหมือนโดนเข็มทิ่มแทงที่มือและเท้า การรับประทานหรือสูดดมอาร์เซนิกอนินทรีย์ในปริมาณที่ต่ำเป็นเวลานานอาจทำให้ผิวหนังมีสีคล้ำขึ้น และเกิดตาปลาหรือหูดขึ้นที่ฝ่ามือฝ่าเท้า และตามร่างกาย การสัมผัสโดยตรงกับสารประกอบอาร์เซนิกอนินทรีย์อาจทำให้เกิดอาการบวมและแดงได้ ส่วนสารประกอบอาร์เซนิกอินทรีย์นั้นมีความเป็นพิษน้อยกว่า แต่การได้รับในปริมาณมากก็ส่งผลเช่นเดียวกัน

2.3.2.7 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะหนักที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เป็นธาตุที่สำคัญทั้งกับพืชและสัตว์ รวมถึงมนุษย์ด้วย ทองแดงถูกใช้ในการทำเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สายไฟ ท่อน้ำ และแผ่นโลหะ นอกจากนี้ยังสามารถนำทองแดงมาผสมกับโลหะอื่นเพื่อทำเป็นทองเหลือง ทองแดง และก๊อคน้ำ สารประกอบทองแดงโดยทั่วไปใช้ในการเกษตรเพื่อรักษาโรคเชื้อราในพืช การปรับปรุงคุณภาพน้ำ งานรักษาเนื้อไม้ งานเครื่องหนังและสิ่งทอ

การดูดดมทองแดงที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดการระคายเคืองที่จมูก และลำคอ ส่วนการรับประทานทองแดงในปริมาณมากทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง ความเข้มข้นที่สูงมากๆสามารถทำอันตรายต่อไต ตับ และอาจถึงแก่ชีวิตได้

2.3.2.8 ไทเทเนียม

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่พบในชั้นที่ทับถมกันของแร่ที่กระจายอยู่ทั่วไป ในเปลือกโลกและธรณีภาค ส่วนใหญ่จะเป็นรูไทล์และอิลเมไนต์ และยังพบในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด หิน แหล่งน้ำ และดิน ในรูปของสารประกอบที่พบส่วนมากจะเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ที่นิยมและใช้ในการสร้างสารสี (pigment) ขาว ส่วนรูปสารประกอบอื่น ได้แก่ ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหมอกควันและตัวเร่งปฏิกิริยา และไทเทเนียมไตรคลอไรด์ ($TiCl_3$) ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตโพลีโพรพิลีน ไทเทเนียมสามารถผลิตเป็นโลหะเจือด้วยการผสมกับเหล็ก อะลูมิเนียม วานาเดียม โมลิบดีนัม และธาตุอื่นๆ เพื่อผลิตโลหะเจือที่แข็งแรงแต่น้ำหนักเบาสำหรับใช้ในยานอวกาศหรืออากาศยาน (เครื่องยนต์เจ็ท จีปนาอูธ และยานอวกาศ) การทหาร กระบวนการทางอุตสาหกรรม (สารเคมี สารเคมีจากปิโตรเลียม ระบบผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล (desalination plant) เชื้อกระดาษ และกระดาษ) ยานยนต์ อาหารจากเกษตรกรรม กายอุปกรณ์ทางการแพทย์ กระดูกเทียม เครื่องมือทางทันตกรรม ฟันปลอมรากเทียม สิ้นค้าทางการกีฬา อัญมณี โทรศัพท์มือถือ และการประยุกต์ใช้อื่นๆ

อนุภาคนาโนขนาดเล็กของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบอนาเทส ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ก่อให้เกิดโรคได้ นอกจากนี้การบาดเจ็บต่อเซลล์ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ยิ่งขนาดอนุภาคเล็กความเป็นพิษก็ยิ่งมากขึ้น โดยขนาด 70 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ ขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้ และขนาด 30 นาโนเมตร สามารถแทรกเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลางได้ และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในฐานะที่เป็นสารกันแดดมีขนาดเล็กอาจจะสามารถแทรกผ่านเซลล์ และนำไปสู่การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสภายในเซลล์ได้ และก่อให้เกิดความเสียหายแก่ DNA

2.3.3 โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างโลหะกับปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ การดูดติด (sorption) การตกผลึก (precipitation) การรวมเข้าใน โครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของปูนซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (จิราภรณ์, 2543) พฤติกรรมของโลหะแต่ละตัวในระบบซีเมนต์ (cementitious system) ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับโลหะมี

อิทธิพลอย่างมากไม่เพียงแต่เฉพาะคุณภาพหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังขั้นอื่น ๆ อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความเสถียรของโลหะหนักที่รวมตัวกับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ผสมจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลในเรื่องความเสถียรของโลหะหนักโดยเฉพาะความสามารถในการชะละลายในขณะที่ใช้งานและสิ้นอายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสถานภาพของโลหะหนักหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสิ่งที่น่าศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถหาวิธีในการป้องกันหรือกำจัดโลหะหนักในการปฏิบัติงานจริง โลหะหนักที่อยู่ในปูนซีเมนต์นอกจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์เองแล้วสารเจือปนเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระยะยาว

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Dalton, 2004)

โลหะหนัก	ผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์และคุณสมบัติของซีเมนต์
สารหนู	โดยทั่วไปจะรวมเข้าไปในเม็ดปูน ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
โครเมียม	ลดความเหนียวของปูนซีเมนต์เหลว สามารถลดอุณหภูมิของการจัดรูปเป็น C3S ถ้ามีมากกว่า 3 % และมีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และการเกิดปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในเม็ดปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (2.5-5 % โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ตะกั่ว	เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ สามารถสะสมในเม็ดปูนโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบถ้ามีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนต่อล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ง่าย สามารถหลุดออกมาจากที่ดักจับก๊าซได้ ปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตปูนซีเมนต์ได้
สังกะสี	การจัดรูปที่แตกต่างกันสามารถทำให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน ปริมาณที่เพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็ดปูนและลดความสามารถในการบด มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลัก

	ในเม็คปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (2.5-5% โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
วานเดียม	เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็คปูน และลดความสามารถในการบด

2.4 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตหรือในขั้นตอนต่างๆของแต่ละอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณของเสียได้ นอกจากการใช้หลักการในการควบคุมการกำเนิดกากของเสียอุตสาหกรรมแล้ว หากจำเป็นต้องมีการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิต ทั้งที่เป็นกากของเสียอุตสาหกรรมที่อันตราย หรือกากของเสียอุตสาหกรรมทั่วไป ควรมีการเลือกแนวทางในการกำจัดในแต่ละประเภทที่เหมาะสม โดยกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.4.1 การปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

ส่วนใหญ่ใช้ในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมหรือเพื่อปรับสภาพกากของเสียก่อนนำไปฝังกลบ โดยมีการเติมสารเคมีลงไปในกากของเสียนั้น เพื่อลดความเป็นพิษของสิ่งปนเปื้อนไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อม และลดความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนไม่ให้ออกไปปนเปื้อนยังแหล่งอื่นๆ กากของเสียอุตสาหกรรมจะถูกเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพโดยการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็ง ซึ่งต้องได้รับการทดสอบเพื่อให้แน่ใจและมั่นใจได้ว่าจะไม่มีการรั่วไหลของสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบความคงทน การทดสอบ Freeze and thaw และ wet and dry ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำส่วนเกินที่มีอยู่ในก้อนหล่อแข็งเนื่องจากหลักการทำให้เสถียรและหล่อก้อนแข็งแล้วต้องนำไปฝังกลบ การบำบัดโดยการทำให้เสถียรและการหล่อก้อนแข็งเป็นการรวม 2 ปฏิบัติการเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมีขึ้นพร้อมกัน และเมื่อบำบัดกากของเสียอันตรายด้วยวิธีนี้จะเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการชะละลายของโลหะหนัก หรืออาจนำกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างได้

2.4.1.1 การปรับเสถียร (Stabilization)

การทำเสถียร คือ กระบวนการที่มีการเติมสารเคมีผสมรวมกับกากของเสียอันตราย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบภายในกากของเสียนั้น เพื่อเป็นการลดการเคลื่อนที่ รวมถึงลดความเป็นพิษให้น้อยลง โดยเปลี่ยนแปลงลักษณะของการเคลื่อนที่และมีการเปลี่ยนกากของเสียที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของแข็ง เนื่องจากกากของเสียที่อยู่ในรูปสารละลายจะกระจายอยู่ในช่องว่างและสามารถรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ การ

ตกตะกอนเป็นปฏิกิริยาหลัก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการลดการเคลื่อนที่ของสิ่งเจือปน ซึ่งเมื่ออากาศของเสี่ย อันตรายถูกปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งแล้วจะมีค่าความเป็นกรดต่างสูง (pH) ภายในก้อน ซีเมนต์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ของน้ำกับปูนซีเมนต์ ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในอากาศของ เสี่ยถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮดรอกไซด์ หรือ Mixed hydroxide solids อาจเกิดการตกตะกอนของ ซัลไฟด์ โดยเฉพาะซัลไฟด์ที่มีการผสมกากตะกอนเตาถลุง (Blast furnace slag) หรือวัสดุเชื้อ ปรุสสานที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

2.4.1.2 รูปแบบกลไกในการปรับเสถียร (mechanisms)

ในการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งอากาศของเสี่ยแต่ละชนิดมีความ จำเป็นในการศึกษาและทำความเข้าใจถึงกลไกทางด้านกายภาพและทางเคมี เพื่อควบคุม ประสิทธิภาพของสารเคมีที่จะใช้ในการทำเสถียร ซึ่งนอกจากเป็นเทคโนโลยีในการจัดการอากาศของ เสี่ยอันตรายแล้ว ยังเป็นการพัฒนาสารเคมี หรือการปรับปรุงสารเคมีที่ใช้อยู่เดิม และมีการดัดแปลง เพื่อใช้กับอากาศของเสี่ยชนิดใหม่หรืออากาศของเสี่ยที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถแบ่งเป็น กลไกในการปรับเสถียรอากาศของเสี่ยอันตรายได้ดังนี้

1. Macro encapsulation เป็นวิธีการบำบัดทางกายภาพ โดยอากาศของเสี่ย จะถูกบรรจุอยู่ใน โครงสร้างขนาดใหญ่ของแม่แบบ (matrix) ซึ่งอากาศของเสี่ยจะอยู่ในรูพรุนที่มีอยู่ ภายในก้อนแข็งที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยก้อนแข็งนี้จะมีการสึกกร่อนทางด้านกายภาพ (break down) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคก่อนการทำเสถียรและยังมีการแตกสลายในเชิง กายภาพของก้อนแข็ง ซึ่งอากาศของเสี่ยที่อยู่ในรูพรุนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ก้อน หล่อแข็งยังสามารถถูกทำลายได้จากการพังทลาย (ซึ่งทำการวัดแบบ geologic time scale) เนื่องจาก ก้อนหล่อแข็งอยู่ภายใต้แรงกดดันของสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งรวมถึงวัฏจักรของ wetting และ Drying หรือ Freezing และ Thawing การไหลผ่านของของเหลวและการรับแรงของก้อนหล่อแข็ง ด้วยเหตุนี้อากาศของเสี่ยที่ถูกปรับเสถียรด้วยวิธี Macro encapsulation เพียงอย่างเดียวอาจจะเกิดการ รั่วไหลของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ถ้าก้อนหล่อแข็งนั้นไม่ได้รับการรักษาให้คงสภาพเดิม ไว้

2. Micro encapsulation กากของเสี่ยอยู่ใน โครงสร้างผลึกของก้อนหล่อ แข็งในระดับที่เล็กมาก ซึ่งอากาศของเสี่ยอันตรายจะถูกย่อยสลายจนได้อนุภาคนาโนที่เล็กมาก เช่น กากของเสี่ยที่เป็นน้ำมัน ได้ถูกผสมกับเถ้าลอย ปูนขาวและปูนซีเมนต์ จนทำให้น้ำมันอยู่ภายใน ช่องว่างของแคลซูล วึ่งส่วนใหญ่แล้วจะถูกกักเก็บไว้คล้ายกับกรณีของการทำ Macro encapsulation เนื่องจากอากาศของเสี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการยึดจับทางเคมี อัตราการรั่วไหลจะ เพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคและพื้นที่ผิวที่ถูกสัมผัส

3. Adsorption เป็นลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของแข็งและมีการยึดเกาะกันแบบเคมี-ไฟฟ้า (Electrochemical) โดยวัสดุหรือสารปรับเสถียรเกิดแรงยึดแบบ Hydrogen bonding หรือแบบ Van der wal ทำให้การรั่วไหลหรือการหลุดลอกออกจากพื้นผิวของแข็งมีน้อยกว่าแบบที่บรรจุอยู่ในแคปซูล

4. Absorption เป็นการดูดกลืน โดยที่กากของเสียอันตรายจะถูกดูดซึมเข้าไปภายในตัวดูดซึม ซึ่งวิธีการนี้จะใช้สารชนิดต่างๆทำการดูดของเหลวออกจากกากของเสียอันตราย ทำให้กากของเสียอันตรายอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งมากขึ้น

5. Precipitation การตกตะกอนผลึกหรือการนำกากของเสียอันตรายมาผสมรวมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ซึ่งต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเป็นตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ เช่น Hydroxides Sulfides Silicates Carbonates Phosphates เป็นต้น โดยทั่วไปเป็นการกำจัดโลหะด้วยการปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ให้สูงขึ้นหรือให้เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนผลึก

6. Detoxification เป็นการกำจัดสารพิษหรือความเป็นพิษออกจากกากของเสียอันตราย ด้วยการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การรีดิวซ์ของโครเมียม โดยการเปลี่ยน Cr^{+6} ซึ่งมีความเป็นพิษมากเป็น Cr^{+3} ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า โดยอาจใช้ Ferrous sulfate หรือใช้ Ferrous sulfate ร่วมกับ Sodium sulfate

2.4.1.3 การหล่อก้อนแข็ง (Solidification)

การหล่อก้อนแข็ง คือ กระบวนการที่ทำให้กากของเสียเป็นก้อน ผลจากการหล่อก้อนแข็งจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกากของเสีย ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติในการรับแรง ทำให้การขนย้ายสะดวกขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการบำบัดกากของเสียอันตรายที่เป็นของเหลวหรือสัจฉัที่มีความข้นสูง นอกจากนี้กากของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงเมื่อทำการกำจัด เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบที่เป็นของเหลวที่สามารถเกิดการรั่วไหลปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ และก้อนของเสียที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่ากากของเสียก่อนการบำบัดเป็นผลให้มีขนาดพื้นที่ต่อปริมาตรเล็กลง การรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมก็ลดลงด้วย กากของเสียที่บำบัดแล้วจะลดการซึมผ่านของน้ำและลดการไหลผ่านก้อนของเสีย ถ้ากากของเสียที่ทำเป็นก้อนแข็งแล้วมีการซึมน้ำต่ำกว่าวัตถุที่อยู่โดยรอบในบริเวณเดียวกันที่กำจัดกากของเสีย ของเหลวที่มีอยู่ในบริเวณนั้นจะไหลไปรอบๆ มากกว่าที่จะไหลผ่านก้อนของแข็ง ซึ่งจะเป็นการลดอัตราการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนได้ ปัจจัยหลักในการศึกษาและประยุกต์การทำเสถียรและการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ คือ เพื่อลดปัญหาการรบกวนจากสารประกอบที่มีอยู่ในกากของเสียที่มีต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสารประกอบหลายชนิดได้มีการ

รายงานการวิจัยว่าสามารถเร่งหรือขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Taylor,1990) และสารประกอบที่พบว่าอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อปูนซีเมนต์ เช่น สารอินทรีย์ องค์ประกอบทางเคมีที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นส่วนผสม โลหะและซัลเฟต ซึ่งต้องหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกากของเสียและวัสดุเชื่อมประสาน และถือว่าเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาเทคโนโลยีการทำเสถียรและก้อนหล่อแข็งสำหรับกากของเสียบางชนิด (Batchelor, 2006)

2.4.1.4 เทคนิคการหล่อก้อนแข็งกากของเสีย (Pojasek, 1980)

1. Cement-Based Techniques

เป็นการหล่อก้อนแข็งกากตะกอนที่ใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึดประสาน เป็นกระบวนการตรึง กากของเสียทางเคมีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของการหล่อแข็ง จึงเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ผสมร่วมกับซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลานผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนและมีค่าพีเอชสูง ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในส่วนผสมอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ อีออนของโลหะอาจเข้าไปเกาะอยู่ในโครงผลึกของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีผลต่อการรื้อซึม โดยไปลดการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในเนื้อก้อนหล่อแข็ง

ข้อดี

- ซีเมนต์มีอยู่มากมายและราคาไม่แพง
- การผสมและการจัดการซีเมนต์ได้รับการพัฒนาอย่างดี และอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหาได้ทั่วไป ไม่ต้องการผู้ชำนาญเป็นพิเศษ
- กากตะกอนไม่จำเป็นต้องทำให้แห้งหรือเอาน้ำออกก่อน และสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณของซีเมนต์ตามปริมาณน้ำที่มีอยู่ได้ในช่วงกว้าง
- ซีเมนต์มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ความเป็นกรดต่างของซีเมนต์ สามารถทำให้กรดในของเสียเปลี่ยนสภาพเป็นกลางได้ นอกจากนี้ซีเมนต์ไม่ถูกกระทบกระเทือนโดยสารออกซิแดนท์พวกไนเตรทหรือคลอเรท

ข้อเสีย

- ในกระบวนการต้องใช้ซีเมนต์ปริมาณมาก ทำให้ปริมาตรและน้ำหนักสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งมากกว่าเทคนิคอื่น เช่น Thermoplastic หรือ Polymer
- ซีเมนต์มีกำลังต่ำไม่ทนต่อการถูกชะโดยสารละลายกรดภายใต้สภาวะที่รุนแรง สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของก้อนหล่อแข็ง และเร่งการถูกชะละลายของสิ่งปนเปื้อน

- จำเป็นต้องมีการใช้การบำบัดชั้นดิน ซีเมนต์ชนิดที่มีราคาแพงหรือสารเติมแต่งที่มีราคาแพง สำหรับการทำให้คงตัวของของเหลวที่มีสิ่งเจือปนที่มีผลต่อการแข็งตัวของซีเมนต์

2. Lime-Based Techniques

เป็นการใช้ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก กลไกการทำให้คงตัวเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะอิสระเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งสามารถสะเทินของเสียที่เป็นกรดได้ นอกจากการเติมปูนขาวโดยตรงแล้ว วัสดุอื่นที่สามารถใช้แทนปูนขาวได้ทั้งยังมีคุณสมบัติและกลไกในการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าจากการเผาซีเมนต์ การใช้วัสดุนี้จึงเป็นการนำเอาของเสียจากเตาเผากลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง วิธีการนี้เป็นการใช้ ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสียโดยอาจเพิ่มสารผสมที่มีส่วนประกอบของซิลิกา เช่น เถ้าลอยหรือ เถ้าแกลบ เมื่อเปรียบเทียบกับกรหล่อแข็งด้วย Cement-Based พบว่า ก้อนแข็งที่ได้จาก Lime-Based ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า

ข้อดี

- วัสดุราคาไม่แพงและหาได้ทั่วไป
- อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการใช้งานง่ายและหาได้ทั่วไป
- การเอาน้ำออกไม่จำเป็น เพราะที่ต้องการน้ำในการแข็งตัว
- ปฏิกิริยาของปูนขาวและวัสดุปอซโซลานเป็นที่รู้จักดี

ข้อเสีย

- ปูนขาวและสารเติมแต่งอื่นๆจะไปเพิ่มน้ำหนักของของเสียที่ถูกขนส่งหรือฝังกลบ

- วัสดุที่ใช้ในการฝังกลบต้องออกแบบพิเศษ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการรั่วซึม

3. Thermoplastic Techniques

เป็นการหล่อแข็งที่ใช้บิวทเมน พาราฟิน หรือ โพลีเอธิลีน ผสมกับกากตะกอนของ เสียที่แห้ง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจึงได้ก้อนหล่อแข็งซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติมักใช้ กับกากกัมมันตรังสี ไม่สามารถใช้กับสารอินทรีย์หรือสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง

ข้อดี

- อัตราการรั่วซึมของสารปนเปื้อนต่ำกว่ากระบวนการ Cement-Based หรือ Lime-Based

- ปริมาตรรวมของของเสี้ยวอาจจะลดลง เพราะว่าจำเป็นต้องเอาน้ำออกจากของเสี้ยวก่อนที่จะใช้เทคนิค Thermoplastic

- ยึดเกาะได้ดีในการห่อหุ้มกากของเสี้ยว
- ก้อนหล่อแข็งมีความทนทานต่อสารละลาย ทำให้เกิดการสลายตัวด้วยจุลินทรีย์ต่ำ

- วัสดุคิบที่ใช้สามารถเอากลับมาใช้ใหม่ได้ถ้าจำเป็น
- น้ำหนักของก้อนหล่อแข็งที่ได้จะเบากว่าถ้าใช้ระบบ Cement-Based เพราะว่า น้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกน้อยกว่า ทำให้ความหนาแน่นน้อยซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

ข้อเสีย

- อุปกรณ์มีราคาแพงและจำเป็นต้องใช้ผู้ชำนาญเป็นพิเศษสำหรับกระบวนการ

- ไม่สามารถใช้กับสารที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกพวกซีเทรท

- วัสดุเทอร์โมพลาสติกคิดไฟได้เมื่ออยู่ใกล้บริเวณที่มีสารอินทรีย์พวกปิโตรเลียมที่อุณหภูมิสูง

- ระหว่างการให้ความร้อน สารผสมบางชนิดที่มีสารอินทรีย์ระเหยจะสามารถผลิตน้ำมันและกลิ่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะทางอากาศ

- ของเสี้ยวจะต้องทำให้แห้งก่อนนำมาผสมกับวัสดุเทอร์โมพลาสติก ทำให้ต้องการพลังงานในปริมาณมาก

- สารออกซิเดนต์ที่แรงไม่เหมาะสำหรับกระบวนการนี้ เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารออกซิเดนต์และวัสดุยึดประสาน

- เกลลี่ที่เอาน้ำออกแล้วที่อยู่ในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกจะเอาน้ำเข้าไปอย่างช้าๆ ถ้าก้อนหล่อแข็งจมอยู่ในน้ำ ทำให้ก้อนหล่อแข็งแตกหัก ซึ่งจะเพิ่มอัตราการละลาย

4. Organic polymer Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยการนำสารอินทรีย์โมโนเมอร์เติมลงไปของเสี้ยวที่ต้องการทำให้คงตัว แล้วผสมให้เข้ากันจากนั้นจึงเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการรวมตัวของโมโน

เมอร์กลายเป็น โพลีเมอร์อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ของเสียจะถูกจับไว้ใน โครงสร้าง โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้น ของเสียที่นำมาทำให้แข็งตัวโดยวิธีนี้อาจอยู่ในรูปของแข็งหรือกึ่งของแข็งก็ได้ วิธีกรนี้เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และไม่เหมาะสมสำหรับของเสียที่ปนเปื้อนด้วย โลหะ เนื่องจากโลหะละลายได้ดีในกรดแก่ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นโลหะบางส่วนจึงไม่ถูก จับไว้ใน โครงสร้างของ โพลีเมอร์แต่ละลายปนออกมากับตัวเร่งปฏิกิริยา

ข้อดี

- ใช้วัสดุในการตริงน้อยกว่าเทคนิค Cement-Based และ Lime-Based
- ของเสียจะถูกเอาน้ำออกและไม่จำเป็นต้องแห้งสมบูรณ์ เนื่องจาก โพลีเมอร์แข็งที่เสร็จแล้วจะต้องถูกทำให้แห้งก่อนกำจัด ทำให้ช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัด
- ก้อนหล่อแข็งที่ได้มีความหนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ (ความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.3) ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง
- สารหล่อแข็งพวกเรซินไม่ติดไฟ และการทำเรซินไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง

ข้อเสีย

- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการ ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นกรดแก่ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่ละลายได้ที่พีเอชต่ำ จึงสามารถปนออกมากับน้ำ ไม่ถูกจับไว้ระหว่าง กระบวนการ โพลีเมอร์ไรเซชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะกัดกร่อนสูง และยังต้องการอุปกรณ์ผสม ถึงปฏิกิริยา ภาชนะบรรจุ เป็นต้น ที่พิเศษ
- สาร โพลีเมอร์บางชนิดถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้
- จำเป็นต้องบรรจุในถังเหล็กก่อนทิ้ง ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

5. Encapsulation Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบ ด้วยสาร โพลีเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำและสภาพแวดล้อมได้ดี

ข้อดี

- ก้อนหล่อแข็งแยกจากสิ่งแวดล้อม และไม่จำเป็นต้องใส่ภาชนะก่อนทิ้ง เพราะกากของเสียถูกหุ้มอย่างมิดชิด และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

ข้อเสีย

- วัสดุที่ใช้สำหรับห่อหุ้มมีราคาแพง
- ต้องการพลังงานปริมาณมากสำหรับการทำให้แห้ง การหลอมวัสดุ ยึดประสานและการหล่อ

- วัสดุที่ใช้หุ้มเผาใหม่ได้
- ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ
- ต้องใช้ผู้ชำนาญเป็นพิเศษในการทำอุปกรณ์การหล่อและการหลอม

6. Self-Cementing Techniques

ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลไซต์ 8-10% ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คล้ายปูนพลาสเตอร์

ข้อดี

- ไม่ต้องมีการเติมสารเติมแต่งตลอดกระบวนการ
- ระยะเวลาในการหล่อสั้นกว่าเมื่อเทียบกับระบบ Cement-Based และ Lime-Based
- สามารถกักเก็บโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ระบบนี้ไม่ต้องการของเสียที่แห้งสมบูรณ์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต้องใช้น้ำ

ข้อเสีย

- ใช้ได้เฉพาะกากของเสียที่ปนเปื้อนซัลเฟตและซัลไฟด์สูง
- กากของเสียของกระบวนการนี้มีลักษณะการชะละลายเหมือนกับกระบวนการ Cement-Based และ Lime-Based
- ต้องการพลังงานสูงในการเกิดซีเมนต์
- ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ
- ต้องใช้ผู้ชำนาญเป็นพิเศษและอุปกรณ์พิเศษในการผสมของเสียกับสารเติมแต่ง

7. Glassification

เป็นการนำของเสียมาผสมกับซิลิกาหรือทรายแก้วแล้วให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูง ถึง $1,600^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดการหลอมตัวแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นโครงสร้างคล้ายแก้ว ซึ่งมีความคงตัวสูงมาก ของเสียอันตรายจะถูกจับอยู่ในผลิตภัณฑ์และไม่สามารถถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคนิคสูงมากและมีราคาแพง จึงเหมาะสำหรับการหล่อแข็งของเสียที่มีความเป็นอันตรายสูง เช่น ของเสียกัมมันตรังสี ซึ่งมีระดับรังสีสูงมาก

ข้อดี

- ให้คุณภาพดีและสารเติมแต่งมีราคาถูก

ข้อเสีย

- ต้องใช้พลังงานสูง เนื่องจากต้องให้ความร้อนถึง 1350°C เพื่อให้แก้วหลอมรวมกับของเสีย

- สารประกอบบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะอาจระเหย เนื่องจากอุณหภูมิสูงก่อนที่จะรวมกับซิลิกาที่หลอมในแก้ว

- ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษและบุคลากรที่ได้รับการฝึกฝน

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Cement-Based เนื่องจากค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีอื่น ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีและเครื่องมือที่ยุ่งยาก และสามารถบำบัดกากตะกอนโลหะหนักได้ นอกจากนี้ US Environmental Protection Agency ได้ยอมรับว่าเทคโนโลยีการหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์นั้นเป็น best demonstrated available technology

2.4.1.5 หลักในการพิจารณาการกักของเสียในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง

ในการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง (Spence, 2005) กากของเสียอันตรายควรพิจารณาลักษณะและคุณสมบัติต่างๆของกากของเสีย รวมถึงวัสดุประสาน ซึ่งก่อนที่จะทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งควรมีการพิจารณาเกี่ยวกับกากของเสียต่อไปนี้

1. ความสามารถเข้ากันได้ระหว่างปูนซีเมนต์และกากของเสีย (Compatibility between cement and waste materials)

2. การยึดเกาะกากของเสียด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical fixation contaminants)

3. ลักษณะการห่อหุ้มกากของเสียอันตรายหรือดินที่ปนเปื้อนทางด้านกายภาพ (Physical encapsulation of contaminated waste and soil)

4. การชะละลายกากของเสียอันตรายหรือดินที่ปนเปื้อนหลังจากผ่านขั้นตอนการบำบัดแล้ว (Leachability of contaminants from the treated waste and soil)

5. ความคงทนของก้อนหล่อแข็งหรือวัสดุเมื่อใช้ในการบำบัดกากของเสียหรือวัตถุที่ปนเปื้อนกากของเสีย (Durability of the treated waste or contaminated materials)

6. การคำนวณราคาในการบำบัดด้วยวิธีการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็งกากของเสียอันตราย (Cost-effectiveness of stabilization and solidification)

2.4.1.6 การทดสอบกากของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็ง (Batcher, 2006)

เมื่อนำกากของเสียอันตรายมาปรับเสถียรและหล่อก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานชนิดอื่นๆแล้ว ควรมีการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งที่ผ่านการบำบัดแล้ว ตัวแปรนี้ได้นำเข้าไปพิจารณาในรายละเอียดของการบำบัดด้วยวิธีการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง (Stabilization/Solidification) ซึ่งเป็นการกำหนดลักษณะทางกายภาพ อย่างไรก็ตามการรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของการกำจัดกากของเสีย

2. ความคงทนในระยะยาว (Long-term stability) สิ่งที่สำคัญนอกจากความสามารถในการรับแรงแล้วต้องมีการประมาณความคงทนในระยะยาวของก้อนแข็งด้วย กากของเสียที่อยู่ในรูปก้อนแข็งที่แข็งกว่ามีแนวโน้มรักษาสภาพได้ดีกว่ารูปที่อ่อนกว่า แม้ว่าจะไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำ การคงสภาพอยู่ได้ในระยะยาวมีความสำคัญมาก เนื่องจากก้อนของเสียที่สึกกร่อนจนหลุดออกเป็นอนุภาคเล็กๆ จะเกิดการรั่วไหลอย่างรวดเร็ว

3. Wet-dry และ Freeze-thaw durability tests มีความสำคัญในการนำมาทำนายความคงทนแม้ว่าจะมีการทำนาย Long term performance ของวัสดุก่อสร้างอยู่แล้ว แต่ยังมีข้อสงสัยเนื่องจากในสถานะของแหล่งกำจัดของเสีย อาจมีของเสียที่แตกต่างกัน จึงมีการจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการทดสอบ

4. ค่าความซึมผ่านของน้ำ (Permeability) การทดสอบนี้ใช้เพื่อการทำนายการไหลผ่านของของเหลวผ่านวัสดุหรือก้อนแข็งจากการบำบัดกากของเสียในสถานที่จำกัด

5. โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) เนื่องจากการบรรจุสิ่งปนเปื้อนลงในรูปของกากของเสีย โดยส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในรูพรุน ก้อนของเสียที่มีรูลักษณะที่ซับซ้อนรูพรุนไม่ติดต่อกัน จะช่วยให้สิ่งปนเปื้อนรั่วไหลออกมาได้ช้าลง

2.4.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการรั่วไหลของสิ่งปนเปื้อนจากก้อนหล่อแข็ง

การชะละลายเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนในการทำความเข้าใจ โดยต้องใช้ความรู้ที่เกี่ยวข้องในหัวข้อเหล่านี้ประกอบเพื่อทำการศึกษา ได้แก่ Mineral Chemistry, เทอร์โมไดนามิก, Reaction Kinetics และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Mass Transport เป็นต้น เพื่อการประเมินการรั่วไหลในระยะยาวได้อย่างถูกต้อง ปัจจัยทางด้านกายภาพและทางเคมีมีผลต่อการชะละลาย รวมถึงทิศทางการสึกกร่อนของก้อนหล่อแข็ง ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการชะละลายของก้อนหล่อแข็งที่เป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่

1. ลักษณะเฉพาะของก้อนหล่อแข็ง (matrix characteristics) เช่น matrix mineralogy ค่าความซึมน้ำ และ Acid neutralization capacity (ANC)

2. สภาพแวดล้อมโดยรอบก้อนหล่อแข็ง (environmental condition) เช่น การซึมผ่าน (infiltration) และส่วนประกอบของน้ำชะละลาย (Leachant composition)

3. ปฏิกริยาระหว่างก้อนของเสี้ยนและสิ่งแวดลอมรอบๆ เช่น acid attack carbon dioxide uptake sulfate attack ในบริเวณที่มีการจัดการกากของเสี้ยนอันตรายที่เป็นก้อนหล่อแข็ง

2.4.2 การบำบัดและการกำจัดด้วยความร้อน (Thermal)

ในประเทศไทยการบำบัดและการกำจัดด้วยความร้อนนั้นส่วนใหญ่ คือ การเผาไหม้ (Combustion or Incineration) ซึ่งจะทำให้กากอุตสาหกรรมกลายเป็นขี้เถ้า ไอเสี้ยน ควัน หรือเศษที่ไม่ไหม้ไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้กากอุตสาหกรรม คือ 600-1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งการเผาไหม้ที่ดีและเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ต้องมีออกซิเจนที่เพียงพอและอย่างทั่วถึงภายในเตาเผา เพื่อให้กากของเสี้ยนสัมผัสกับความร้อนได้อย่างทั่วถึง

2.4.3 การฝังกลบกากของเสี้ยนอุตสาหกรรม

การฝังกลบจะเป็นวิธีสุดท้าย หลังจากมีการกำจัดกากของเสี้ยนอุตสาหกรรมด้วยการเผาไหม้หรือการปรับเสถียรและการหล่อก้อนแข็งแล้ว ซึ่งต้องดำเนินการตามหลักวิชาการที่เหมาะสมและสามารถยืนยันความปลอดภัย รวมถึงมีขั้นตอนการป้องกันความเป็นพิษของกากของเสี้ยนอุตสาหกรรมที่อาจมีการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงควรพิจารณาในการเลือกพื้นที่ และการเตรียมความพร้อมก่อนการดำเนินการฝังกลบกากของเสี้ยน รวมถึงการปฏิบัติดูแลหลังการฝังกลบอย่างต่อเนื่อง และมีการเตรียมพร้อมเพื่อรับสถานการณ์ฉุกเฉินหลังจากการปิดหลุมฝังกลบ แต่ในปัจจุบันเกิดปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ หรือหากมีการเลือกพื้นที่ในการฝังกลบพื้นที่บริเวณนั้น และพื้นที่ใกล้เคียงจะสูญเสียมูลค่าไปในที่สุด ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาเพื่อหาทางเลือกอื่นในการกำจัดกากของเสี้ยนอุตสาหกรรมเหล่านี้

2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต

2.5.1 ความหมาย

“คอนกรีต” ในความหมายทางวิศวกรรม หมายถึง ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำ และสารผสมเพิ่ม (ปริญา และชัย, 2552) สำหรับความหมายในพจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542 หน้าที่236 “คอนกรีต” เป็นคำนาม หมายถึง วัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยซีเมนต์ ทราย หินและน้ำผสมเคล้าเข้าด้วยกันเมื่อแห้งแข็งตัวแล้วจะเป็นวัสดุที่แข็งแรงมาก

2.5.2 ส่วนประกอบของคอนกรีต

2.5.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้จากการเผาส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยออกไซด์ของธาตุแคลเซียมจำพวกหินปูน (limestone) ออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียมจำพวกดินเหนียว (Argillaceous materials) ออกไซด์ของธาตุเหล็กจำพวกลูกรัง (laterite) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส จนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปหมดได้เป็นเม็ดปูนซีเมนต์ (Clinker) แล้วนำเม็ดปูนซีเมนต์ไปบดเป็นผงละเอียด เมื่อไปผสมกับน้ำจะได้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่แข็งแรง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้

ประเภทที่ 1 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement หรือ Standard Portland Cement) ปูนชนิดนี้เป็นชนิดมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างปกติทั่วไป เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กในงานอาคาร สะพาน ถนน สนามบิน และอื่น ๆ

ประเภทที่ 2 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้กับงานประเภทที่ต้องการทนต่อเกลือซัลเฟตได้บ้างพอสมควร เช่น งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดิน หรือบริเวณที่โดนน้ำเค็มเป็นครั้งคราวไม่ตลอดไป

ประเภทที่ 3 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็วหรือให้กำลังเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เหมาะกับงานที่ต้องใช้เร่งด่วน เช่น ถนนที่มีการจราจรคับคั่ง, ลานบิน ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังเร็วมาก ในช่วงอายุ 24 ชั่วโมง จะมีความแข็งแรงเท่ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 3 วัน และอายุ 7 วัน จะเท่ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อายุ 28 วัน เป็นต้น

ประเภทที่ 4 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำขณะเดียวกันก็ให้กำลังเพิ่มขึ้นช้า ๆ เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างเขื่อน และงานที่ใช้คอนกรีตหลามาก ๆ

ประเภทที่ 5 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับการก่อสร้างในบริเวณใกล้ทะเล หรือใช้กับงานโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาของการแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ซึ่งรวมกันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันใน

ระหว่างการเกิดปูนเม็ด จะเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S), ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C4AF)

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาแก่ คุณสมบัติของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต คือ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ให้กำลังค่อนข้างดี โดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณ ไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณร้อยละ 45-55

2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C2S) เป็นสารประกอบที่มีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะอยู่ในรูปเบต้า ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม มีคุณสมบัติยืดยาว เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนา กำลังอัดค่อนข้างช้า และช้ากว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกตมาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ ไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณ ไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 15-35

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดความรุนแรงมาก และทำให้ก่อตัวทันที (flash set) การพัฒนา กำลังเร็วภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับ ไตรแคลเซียมซิลิเกตและ ไตรแคลเซียมซิลิเกต โดยปริมาณ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 7-15

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C4AF) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวเร็ว แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีปริมาณร้อยละ 5-10

2.5.2.2 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม หมายถึง วัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) แล้วได้เป็นคอนกรีต สำหรับจำกัดความของซีเมนต์เพสต์ คือ ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ซึ่งมวลรวมมีความสำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต เนื่องจากเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณมากที่สุด โดยทั่วไปมีประมาณร้อยละ 75 ของปริมาตรรวม มวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทราย กรวด และหินย่อย นอกจากนี้ยังมีมวลรวมจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเตาถลุง อิฐย่อย เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้มวลรวมที่เกิดตามธรรมชาติผสมทำคอนกรีต สำหรับคุณสมบัติสำคัญที่ต้องคำนึงถึงของมวลรวมคือ ความแข็งแรง ความสะอาด และขนาดคละ

2.5.2.3 น้ำ (Water)

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในงานคอนกรีต คุณภาพของน้ำที่ใช้โดยทั่วไปจึงควรเป็นน้ำจืดที่สะอาด เช่น น้ำประปา เนื่องจากน้ำที่มีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มาก หากนำไปใช้ผสมคอนกรีตแล้วอาจจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัว กำลังที่ต่ำลง ตลอดจนความคงทนของคอนกรีต

2.5.2.4 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer)

สารลดน้ำพิเศษเป็นสารเคมีผสมเพิ่มที่สำคัญในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปนิยมใช้เพิ่มความสามารถในการเท การทำคอนกรีตไหล การทำคอนกรีตกำลังสูง และการทำคอนกรีตที่มีเนื้อละเอียดปริมาณมากเป็นส่วนผสม สารลดน้ำพิเศษสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (ปริญญา, 2553)

1. ซัลโฟเนตเตดเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Melamine formaldehyde Condensates)
2. ซัลโฟเนตเตดแนฟทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Naphthalene formaldehyde Condensates)
3. สารลดน้ำพิเศษอื่น เช่น กรดซัลโฟนิคเอสเทอร์ (Sulfonic Acid Ester) โมดิฟายด์ลิกโนซัลโฟเนต (Modified Lignosulfonates) คาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์ (Carbohydrate Esters) และโพลีคาร์บอกซิลอีเธอร์ (Polycarboxyl Ether)

2.6 การชะละลาย (Wiles, 1990)

2.6.1 ความหมาย

กระบวนการชะละลายเป็นลักษณะที่สารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ปนเปื้อน หรืออะตอมที่ปล่อยรังสีได้เกิดการรั่วไหล เช่นจากสถานะของแข็งเข้าสู่สถานะของเหลวภายใต้อิทธิพลของแรงธาตุ การละลาย การดูดซับ กระบวนการที่ซับซ้อนโดยเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช ปฏิกิริยารีดอกซ์ การละลายของสารอินทรีย์และการกระทำของแบคทีเรีย โดยกระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั่วไปเมื่อน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน สัมผัสหรือผ่านของเสียน้ำจะซึมผ่านเข้าไปทำให้ของเสียบางส่วนละลายออกมาจากผิวภายนอกของเสียน้ำหรืออาจเกิดจากภายใน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความพรุนของของเสียน้ำที่ทำการพิจารณา ซึ่งสามารถวัดอัตราการละลายได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การชะละลาย (Leaching) โดยเรียกน้ำว่า สารชะ เรียกน้ำปนเปื้อนที่ผ่านออกมาว่า leachate และเรียกความสามารถของของเสียน้ำในการถูกชะว่า ความสามารถในการชะละลาย (Leachability)

การชะละลาย คือ อัตราที่องค์ประกอบที่อันตราย หรือองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ เคลื่อนที่จากของเสีย และผ่านไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยผ่านทาง leachate โดยปกติแล้วอัตรานี้จะวัด และแสดงในรูปของความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กล่าวคือ การชะละลายของ สารพิษอาจบอกในรูปของความสามารถในการชะละลาย ซึ่งมักประเมินได้จากการเปรียบเทียบ ความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กับในของเสียเริ่มต้น ซึ่งจะสามารถบอกถึง สัดส่วนขององค์ประกอบที่ละลายออกมาระหว่างการทดสอบ ซึ่งก็เป็นการวัดความสามารถในการ ชะละลายนั่นเอง

นั่นคือ ความสามารถในการชะละลาย (L) เท่ากับ ความเข้มข้นของสารพิษที่ ออกมา จากตัวอย่างหลังการสกัด (C_i) หารด้วยความเข้มข้นของสารพิษเริ่มต้น (C_0)

$$L = C_i / C_0$$

โดยที่

L = ความสามารถในการชะละลาย(มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 = ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด

C_i = ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด

หรือ ความสามารถในการชะละลาย (L) เท่ากับ ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลัง การสกัด (W_i) หารด้วยปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (W_0)

$$L = W_i / W_0$$

โดยที่

W_0 = ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด(กรัม)

W_i = ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (มิลลิกรัม)

การทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผ่านการทำเสถียรและหล่อก้อนแข็ง มี วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการชะละลายที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้สภาวะ จำลองที่อาจจะเกิดการรั่วไหลได้ และยังเป็นการพัฒนารูปแบบในการกำจัดของเสียอันตรายอีกด้วย ซึ่งสามารถประเมินได้จากประสิทธิภาพของการบำบัด หรือเพื่อทำให้กากของเสียอยู่ในเกณฑ์ที่ กำหนดเหมาะสำหรับการกำจัดทิ้ง การทดสอบการชะละลายก้อนหล่อแข็งอาจใช้วิธีทดสอบมากกว่า หนึ่งวิธี เพื่อใช้ในการทำนายถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสิ่งปนเปื้อน (Trace contaminants) ที่มี อยู่ภายในก้อนแข็ง เช่น ยาปราบศัตรูพืช สารอินทรีย์ โลหะหนัก และ radio nuclides เป็นต้น

2.6.2 เกณฑ์การพิจารณาสำหรับการทดสอบการชะละลาย

การทดสอบความสามารถในการชะละลายเป็นสิ่งที่ใช้กำหนดว่า ความเข้มข้นขององค์ประกอบใน leachate เป็นค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ ความเข้มข้นที่สามารถยอมรับได้ คือ ความเข้มข้นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก สำหรับของเสียที่ไม่ได้อยู่ในรายการของเสียอันตราย ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม สำหรับองค์ประกอบที่เป็นพิษยังไม่มีข้อกำหนดไว้ มีเพียงแต่ข้อกำหนดของความเป็นพิษสำหรับการสกัดด้วยวิธี TCLP (ตารางที่ 2.2) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นที่ยอมรับได้ขององค์ประกอบใน leachate จะต่างกันไปตามวิธีทดสอบ

ตารางที่ 2.4 มาตรฐาน Toxicity Characteristic Constituents and Regulatory Levels

Hazardous waste number	Contaminant	Regulatory Level (mg/L)
D004	Arsenic	5
D005	Barium	100
D018	Benzene	0.5
D006	Cadmium	1
D019	Carbon tetrachloride	0.5
D020	Chlordane	0.03
D021	Chlorobenzene	100
D022	Chloroform	6
D007	Chromium	5
D025	p-Cresol	200.0
D026	Cresol	200.0
D016	2,4-D	10
D008	Lead	5
D013	Lindane	0.4
D009	Mercury	0.2

2.6.3 กลไกของการเกิดการชะละลาย

ในเทอมของการชะละลายจะแบ่งวัตถุที่เกิดการชะละลายได้เป็น 2 ชนิด คือ วัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) และวัตถุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (Granular) ในวัตถุที่เป็นก้อนแข็งจะมีกลไกการแพร่เป็นตัวควบคุมการชะละลาย คือ การชะละลายเกิดจากการแพร่ ส่วนวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆจะมีการไหลผ่านของของเหลวเป็นตัวควบคุมการชะละลาย คือ ชะละลายออกมาเนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านวัตถุ ตัวอย่างของวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากซีเมนต์ (คอนกรีต อิฐ วัสดุที่ใช้สำหรับปกคลุม) การชะละลายของวัตถุทั้ง 2 ชนิดได้รับอิทธิพลจากลักษณะของวัตถุและปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม

ในทางปฏิบัติทุกๆไปจะใช้ร่วมกันทั้งกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ โดยกระบวนการและปัจจัยที่มีความสำคัญอธิบายได้ดังต่อไปนี้

กระบวนการทางเคมีและทางกายภาพเกิดจากการชะละลายของสารประกอบในวัตถุไปสู่ น้ำ โดยมีกลไกที่คอยควบคุมกระบวนการชะละลายคือ

1. กระบวนการทางเคมี ได้แก่ การแตกตัวของธาตุ การดูดซับ การมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้
2. กระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ การพา (Advection) การชะล้างที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว และการแพร่

2.6.3.1 กระบวนการทางเคมี

1. กลไกทางเคมีพื้นฐาน มีกลไกทางเคมี 3 ตัวที่คอยควบคุมการชะละลายของสารปนเปื้อน ได้แก่ การแตกตัวของธาตุ (ควบคุมโดยการละลาย) กระบวนการดูดซับ (ควบคุมโดยการดูดซับ) และการมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้ในวัตถุ ตัวอย่างของการควบคุมโดยการละลายคือ การแตกตัวของออกไซด์ของโลหะในวัตถุ เช่น ออกไซด์ของสังกะสี ในโครงสร้างของสารปนเปื้อนบางตัวจะมีแรงดึงดูดของการดูดซับ ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าประจุบวกของโลหะหนัก (Cu^{2+}) ไม่ได้ควบคุมโดยการแตกตัวของธาตุ แต่จะถูกควบคุมโดยการดูดซับโดยประจุลบที่ผิวหน้าของวัตถุ เช่น สารอินทรีย์และปริมาณออกไซด์ที่ผิว เป็นต้น

จำนวนของสารประกอบอินทรีย์จะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาและไม่ได้ถูกควบคุมโดยการละลายและการดูดซับ ตัวอย่างเช่น เกลือที่ละลายได้ เช่น โซเดียมคลอไรด์ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะละลายทันทีและสามารถวัดปริมาณได้ โดยการชะละลายจะถูกควบคุมโดยการมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้

2. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าพีเอชของวัตถุและค่าพีเอชของสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญมากในการหาการชะละลายของสารประกอบ ค่าพีเอชของของเหลวที่อยู่

รอบๆ ตัวอย่าง จะใช้หาความเข้มข้นสูงสุดของของเหลวรอบวัตถุที่ค่าพีเอชนั้นๆ และแต่ละวัตถุจะมีค่าพีเอชที่มีผลต่อการชะละลาย โดยรูปแบบของการชะละลายจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัดในแต่ละกลุ่มของธาตุ คือ กลุ่มที่มีประจุบวก ประจุลบ และเกลือ รูปแบบของการชะละลายของธาตุที่กลุ่มต่างกันสำหรับวัตถุทุกประเภทนั้นเป็นระบบมาก จะต่างกันเพียงปริมาณการชะละลายสุดท้าย

3. รูปแบบทางเคมีของสารประกอบในวัตถุ นอกเหนือจากกลไกทางเคมีพื้นฐานแล้ว รูปแบบทางเคมีของสารประกอบจะทำให้หาคุณลักษณะของพฤติกรรมของการชะละลายสารปนเปื้อนอาจอยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ เช่น โครเมียมอาจอยู่ในรูป CrO_2^- หรือ Cr^{3+} ซึ่งเป็นตัวที่มีความสำคัญในการชะละลาย โลหะหนักที่มีรูปแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนกับสารอินทรีย์ในธรรมชาติในแหล่งน้ำธรรมชาติ ในดิน และในวัสดูธรรมชาติ เช่น ไม้ รูปแบบที่ซับซ้อนของโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการละลายได้สูงและจะชะละลายออกมาได้เร็วกว่ารูปแบบที่ไม่ซับซ้อน (Organic matter)

4. สารประกอบทั้งหมดของวัตถุ (Total composition) ในรูปมิลลิกรัมของธาตุต่อกิโลกรัมของวัตถุจะมีข้อจำกัดของการชะละลายของธาตุส่วนใหญ่ ยกเว้นเกลือละลายที่ไม่ทำปฏิกิริยา ปริมาณที่ชะละลายออกมาได้สูงสุดต่อเวลา คือ ปริมาณสารประกอบที่มีอยู่ในวัตถุ ในเบื้องต้นการชะละลายของธาตุอื่นๆจะมีสาเหตุมาจากกลไกทางเคมีธรณี (Geochemical) และปัจจัยทางกายภาพ และด้วยเหตุนี้ปริมาณที่ชะละลายออกมาจึงแทบไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณทั้งหมด

5. การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน ของวัตถุหรือของสิ่งแวดล้อม มีอิทธิพลต่อรูปแบบทางเคมีของสารปนเปื้อน สำหรับโลหะหนักการเกิดออกซิเดชันในขั้นแรกจะลดประสิทธิภาพในการชะละลาย ในขณะที่การเกิดรีดักชันจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

6. บัฟเฟอร์ของกรด-ด่าง (Acid-base buffering) ของวัตถุ คือ การหาค่าพีเอชต่อเวลา ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยภายนอก ตัวอย่างคือ การทำให้ซีเมนต์มีค่าเป็นกลางเพื่อดูซึมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ในบางกรณี เช่น อัลคาไลน์ การหาความจุบัฟเฟอร์ของซีเมนต์ คือ การหาเวลาที่ต้องการจนกว่าพีเอชจะลดลงจากค่าแก่ (พีเอชประมาณ 12) จนมีค่าเป็นกลาง (พีเอชประมาณ 8)

7. สารอินทรีย์และสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย ของแข็งและสารอินทรีย์ละลายน้ำ หรือสารฮิวมิก (Humic substance) มักนิยมใช้คำว่า DOC, Dissolved Organic Carbon (คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ) ประกอบไปด้วยโมเลกุลที่ซับซ้อนที่มีแรงดึงดูดอย่างแรงกับโลหะหนัก การเกิดคาร์บอนอินทรีย์ละลายสามารถปรับปรุงการชะละลายได้ เนื่องจากจะเกิดการรวมตัวระหว่างคาร์บอนอินทรีย์ละลายและโลหะหรือโลหะอิสระ สารคาร์บอนอินทรีย์ละลายจะพบใน

วัตถุที่ใช้ในการก่อสร้างที่มาจากธรรมชาติ เช่น ดิน ตะกอน แม้แต่คอนกรีตจะมีคาร์บอนอินทรีย์ละลายอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มาจากสารเดิม คือ สารหน่วงการก่อตัว

8. ส่วนประกอบของของเหลวรอบวัตถุและความแรงไอออน เคลือที่อยู่ ในสารละลายในวัตถุหรือในสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการละลายของสารประกอบ โดยทั่วไป ปริมาณที่สูงของเกลือจะทำให้สารปนเปื้อนชะละลายออกมาได้มากขึ้น ส่วนประกอบอื่นๆที่อยู่ใน สารละลายอาจเป็นสาเหตุในการปรับปรุงการชะละลายจากการเกิดสารที่ซับซ้อน เช่น โลหะ เชนจ์ซ้อนกับคลอไรด์หรือคาร์บอเนต

9. อุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การละลายสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราการแพร่เพิ่มขึ้น

10. เวลา เป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณการชะละลาย คือ อัตราของปฏิกิริยา ที่กำลังดำเนินการอยู่จะมีข้อจำกัดในการชะละลาย ในกรณีที่ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้าหรือเกิดการ แพร่ช้า นั่นคือธาตุมีการแตกตัวได้ช้า และอาจจะไม่ยอมให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้สำเร็จ ดังนั้นเวลา ในการชะละลายอาจจะใช้ระยะเวลาานานมาก การเปลี่ยนคุณสมบัติของวัตถุหรือการเปลี่ยนแปลง สภาพแวดล้อมเมื่อเวลาผ่านไป เช่น การเกิดคาร์บอเนชันจึงวัตถุที่มีความเป็นด่าง หรือการเพิ่มของ พื้นที่ผิวของวัตถุที่เป็นก้อนแข็งเนื่องจากการกัดกร่อน

2.6.3.2 อิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพต่อการเคลื่อนที่ของสารประกอบจากวัตถุ ไปสู่ของเหลวรอบวัตถุ

1. กลไกการเคลื่อนที่พื้นฐาน นอกจากกระบวนการทางเคมีแล้ว กระบวนการเคลื่อนที่ทางกายภาพจะใช้หาการเคลื่อนที่ของสารประกอบจากวัตถุสู่ของเหลวรอบ วัตถุ กลไกพื้นฐาน 3 ข้อ สามารถบอกความแตกต่างได้พอสังเขป ดังนี้ กระบวนการที่สารประกอบ เมื่อสัมผัสกับน้ำ (ฝน) โดยที่มีการไหลผ่านวัตถุจะเรียกว่าการพา (Advection) น้ำที่ไหลผ่านวัตถุ เป็นประจำมักจะมีสาเหตุมาจากการที่ฝนตกและเกิดการชะละลายจนมีผลกระทบต่อดิน และน้ำใต้ ดิน เนื่องจากการแพร่ของสารประกอบ การไหลผ่านวัตถุจะเป็นไปได้เฉพาะวัตถุที่มีรูพรุนเท่านั้น เช่น วัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ

การแพร่ คือ การเคลื่อนที่ของสารประกอบเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลในขณะที่ไม่มีการไหล นี่ก็คือคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุที่มีการอัดและมีความสามารถในการซึมผ่านและมีค่าความพรุนต่ำมาก (น้ำในรูพรุนจะหนืดจึงไม่มีการเคลื่อนที่) เมื่อเกิดการชะ ละลายและเป็นการเคลื่อนที่แบบการแพร่ ภายใต้สถานการณ์การแพร่อาจถูกจำกัดการเคลื่อนที่ ก่อนที่สารประกอบจะสามารถรวมตัวเพื่อเกิดการพา อัตราการแพร่จะขึ้นอยู่กับเกรเดียนท์ของ องค์กรประกอบระหว่างวัตถุ และส่วนที่สัมผัสกับของเหลว และขึ้นกับเวลา การชะล้างที่ผิวสัมผัส

ระหว่างของเหลวและของแข็ง คือ กระบวนการที่คล้ายกับการเกิดการพา โดยในเทอมของการชะล้างที่ผิวสัมผัสจะใช้หาการชะล้างของสารละลายบนผิวภายนอกของวัตถุที่เป็นก้อนแข็งภายหลังจากการชะล้างที่ผิวสัมผัส การแพร่ คือ กลไกการเคลื่อนที่หลักของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

2. วัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆและวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ความสำคัญของความแตกต่างระหว่างวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ และวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง คือ สาเหตุของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แตกต่างกัน พฤติกรรมการชะละลายเนื่องจากการสัมผัสกับของเหลว คือ การไหลผ่านจะมีอิทธิพลกับวัตถุที่มีขนาดเล็กๆ และการแพร่จะมีอิทธิพลต่อวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ส่วนปริมาณของการชะละลายจะขึ้นกับเวลาในการแพร่ขององค์ประกอบจากของแข็งสู่ของเหลวสำหรับวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง

3. ขนาดของอนุภาค สำหรับวัตถุที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ จะใช้ขนาดของอนุภาคในการหาระยะทางต่อสารปนเปื้อนที่ต้องเคลื่อนที่จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคไปสู่ของเหลวรอบๆ การเกิดปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ที่เร็วในอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ โดยมีแนวโน้มจะเกิดการแพร่ได้มากกว่า

4. ความพรุน ช่องว่างหรือความพรุน (ช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด) คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของสารประกอบไปสู่ของเหลวรอบ ทั้งวัตถุที่เป็นก้อนแข็งและวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ การเคลื่อนที่ของน้ำในตัวกลางที่มีความพรุนสูงจะเกิดได้ง่ายกว่าในตัวกลางที่มีความพรุนต่ำ ดังนั้นถ้าวัตถุมีความพรุนมากก็จะยิ่งชะละลายได้มาก

5. ความสามารถในการซึมผ่าน หรือสภาพนำน้ำ (Hydraulic conductivity) เป็นการหาว่าทำอะไรให้น้ำซึมเข้าไปในวัตถุ และทำอะไรสารปนเปื้อนจึงจะชะละลายออกมาได้เร็ว ความสามารถในการซึมผ่านอาจเป็นประเด็นสำคัญสำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่น เช่น ดินเหนียว หรือวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง น้ำจะไหลรอบวัตถุด้วยความสามารถในการซึมผ่านต่ำมากกว่าที่จะซึมเข้าไปภายใน ทำให้วัตถุที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำจึงมีการแพร่เป็นควบคุมการชะละลาย

6. ความคดเคี้ยว สำหรับในวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ซึ่งมีการแพร่เป็นควบคุมการชะละลาย ปัจจัยอื่นที่ใช้หาอัตราการแพร่ คือ ความคดเคี้ยว โดยเป็นการหาค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นทางจริงและเส้นทางที่ปรากฏการแพร่ผ่านวัตถุ (Actual Path Length) ต่อสารประกอบตัวที่เคลื่อนที่ระหว่างสองจุด และระยะทางที่เป็นเส้นตรงระหว่างสองจุดนี้ วัตถุที่มีช่องว่างที่ละเอียด โดยโครงสร้างของรูพรุนภายในจะมีความคดเคี้ยวสูง ทำให้มีผลคือ มีอัตราการชะละลายของสารต่ำ

7. ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง ปริมาณของสารที่ชะละลายออกมาจากวัตถุโดยการแพร่ จะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะรูปร่างของวัตถุ ปัจจัยนี้มีผลโดยตรงกับปริมาณพื้นที่ผิวของวัตถุ คดขยเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการแพร่ การแพร่จะเกิดขึ้นได้เร็วในวัตถุที่มีค่าพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูง การทดสอบการแพร่และเกณฑ์การแพร่จะอยู่บนพื้นฐานของคุณลักษณะของตัวอย่างวัตถุก้อนแข็ง คือ ต้องมีความหนาพอที่จะเก็บความเข้มข้นของสารภายในกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างให้อยู่ในระดับเริ่มต้น ทั้งนี้ที่แกนกลางของตัวอย่างมีระดับของสารประกอบลดลงหรือหมดลงจะมีผลกระทบต่อผลการทดสอบ

8. ความไวต่อการกักคร่อน สำหรับวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง การกักคร่อนและการสึกกร่อนจากอิทธิพลของน้ำและการแข็งตัว จะมีผลต่อการชะละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากสองปัจจัยโดยอันดับแรก คือ การกักคร่อนจะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น อันดับสอง คือ พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกรเดียนท์ของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การชะละลายเพิ่มขึ้น

9. การแทรกซอนของเกลือ (Salt Intrusion) เช่น คลอไรด์แทรกเข้าสู่โครงสร้างของคอนกรีตเสริมเหล็กอาจเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง เนื่องจากการออกซิเดชันของเหล็ก ทำให้ตัวคอนกรีตแตกร้าว ส่งผลให้พื้นที่ผิวและเกิดการชะละลายเพิ่มขึ้น

2.6.3.3 ปัจจัยภายนอกหลายๆตัวมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการชะละลาย

ภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้น ปัจจัยภายนอกหลายๆตัวมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณของเหลวที่วัสดุสัมผัสในช่วงเวลาที่แน่นอน เช่น อัตราการไหลของของเหลวในวัตถุที่เป็นก้อนแข็ง และการเกิดเส้นทางการไหลในวัตถุที่เป็นเม็ดเล็กๆ ปัจจัยภายนอกนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ เช่น วัสดุมีการปกคลุมหรือไม่ ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ การลดลงของอิทธิพลของสารในวัตถุหรือการลดลงของสารเนื่องจากอิทธิพลของแสง

ปัจจัยต่างๆที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการชะละลายทั้งภายใต้สภาวะการทดลองและภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลาย (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004)

ปัจจัยทางเคมี	ปัจจัยทางกายภาพ	ปัจจัยภายนอก
การแตกตัว	การไหลผ่านวัตถุ	ปริมาณของสารสกัด
พีเอช	การแพร่	เวลาในการสัมผัส
รูปแบบของสารประกอบ	การชะล้างที่ผิวสัมผัส	พีเอชของสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลาย (Van der Sloot และ Dijkstra, 2004) (ต่อ)

ปัจจัยทางเคมี	ปัจจัยทางกายภาพ	ปัจจัยภายนอก
ปริมาณสารประกอบ/การมีอยู่ของอนุภาคที่ละลายได้	วัตถุที่เป็นเม็ดเล็ก/วัตถุที่เป็นก้อนแข็ง	คาร์บอนอินทรีย์ละลาย/การดูดซับ
การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน	ความพรุน	อุณหภูมิ
บัฟเฟอร์ของกรด-ด่าง	ความสามารถในการซึมผ่าน	การรับ-จ่ายอิเล็กตรอน
ส่วนประกอบของสารสกัด/ความแรงไอออน	ขนาด (อนุภาคหรือก้อนตัวอย่าง)	
อุณหภูมิและเวลา	การกักกร่อน	

2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลายแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

2.6.4.1 ปัจจัยที่เกี่ยวกับวิธีการทดสอบ

1. พื้นที่ผิวของของเสีย สภาวะในการทดสอบการชะละลายของก้อนหล่อแข็งของเสียควรจะคล้ายคลึงกับสภาวะในหลุมฝังกลบมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถเป็นไปได้ ดังนั้นวิธีทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวอย่าง โดยการบดเพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบจะต้องตระหนักว่าวิธีการบดตัวอย่างนั้นเราไม่สามารถควบคุมได้เพียงพอ เนื่องจากการบดสามารถกำหนดขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดได้ แต่ไม่สามารถกำหนดขนาดที่เล็กที่สุดและการกระจายของขนาดได้ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติเหล่านี้ด้วย

2. เทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเขย่า วิธีทดสอบส่วนมากจะใช้การเขย่าเพื่อให้ถึงสมดุลระหว่างของเสียและสารชะเร็วขึ้น วิธี EP Tox ไม่ได้กำหนดไว้ทั้งเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ เพียงแต่การเขย่าจะต้องไม่ทำให้เกิดการแยกชั้น และจะต้องแน่ใจว่าผิวหน้าของตัวอย่างทั้งหมดสัมผัสกับสารละลายที่ใช้สกัดอยู่ตลอดเวลา ส่วนวิธี TCLP กำหนดให้ใช้อุปกรณ์ในการเขย่าแบบหมุนรอบ อย่างไรก็ตามเทคนิคการเขย่าอาจจะทำให้เกิดขังกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบบ้าง เนื่องจากโดยปกติแล้วในหลุมฝังกลบสารชะคงที่หรือไหลเข้ามาอยู่รอบอนุภาคของของเสีย

3. ธรรมชาติของการชะ ตามหลักการแล้วการชะควรจะเหมือนกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบแต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้ เนื่องจากค่าพีเอชและองค์ประกอบของสารชะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และมักจะไม่สามารถทราบความถูกต้องของค่าเหล่านั้น ดังนั้นแนวทางของวิธีทดสอบในปัจจุบันจะใช้สารชะที่รุนแรงมีค่าพีเอชต่ำปานกลาง เช่น สารชะของวิธี EP Tox และวิธี TCLP สารชะที่ใช้จะต้องสามารถหาได้ทุกวันในห้องปฏิบัติการ เช่น รีเอเจนต์ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และเป็นสารที่เตรียมได้ง่าย ตัวอย่างสารชะ ได้แก่ กรดคาร์บอนิก (น้ำที่อิมัลชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์), กรดอะซิติก หรืออะซิเตตบัฟเฟอร์

4. อัตราส่วนของสารชะต่อของเสีย ไม่มีอัตราส่วนใดที่สามารถเป็นตัวแทนสำหรับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบที่ทุกเวลาใด ๆ ได้ ของเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการบำบัดด้วยวิธีหล่อแข็งจะมีองค์ประกอบที่เมื่อละลายน้ำจะทำให้เกิดไอออนและแรงดึงดูดระหว่างไอออน ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการชะละลายขององค์ประกอบดังกล่าวลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารชะต่อของเสียต่ำ ดังนั้นอัตราส่วนที่สูงกว่าจึงเหมาะสมมากกว่า

5. จำนวนครั้งในการชะ วิธีทดสอบบางวิธี เช่น Multiple Extraction Procedure (MEP) ของเสียจะถูกสกัดด้วยสารชะเพียงครั้งเดียว แต่บางวิธีถูกออกแบบมาเพื่อให้ใกล้เคียงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบส่วนมาก นั่นคือ มีการเปลี่ยนสารชะใหม่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปสันนิษฐานว่าสารที่ถูกชะออกมารั้งแรกจะมีความเข้มข้นขององค์ประกอบสูงสุด เพราะสารชะสัมผัสกับความเข้มข้นสูงสุดบนผิวหน้าของของเสีย แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของโลหะไม่จำเป็นต้องเป็นเช่นนี้เสมอ ปัจจุบันวิธีการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้การชะครั้งเดียว

6. ระยะเวลาในการสัมผัส มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเวลาพบว่าค่าที่ยอมรับได้ในเกือบทุกสถานการณ์เป็น 24 ชั่วโมง วิธีทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้ค่านี้เป็นมาตรฐาน แต่ปัจจุบัน EPA ดัดแปลงระยะเวลาสำหรับวิธี TCLP โดยการลดเวลาในการทดสอบเป็น 18 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าไม่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบมากนัก

7. อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการละลายขององค์ประกอบต่างๆ โดยที่อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ความลึก สถานที่ และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ ซึ่งในการทดสอบไม่สามารถทราบสภาวะเหล่านี้ได้ ดังนั้นอุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้กันปกติ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ 20°C – 25°C

8. การปรับพีเอช ตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการทดสอบด้วยวิธี EP Tox คือ กระบวนการปรับพีเอช วิธีนี้จะรักษาพีเอชไว้ที่ 5.0 ± 0.2 แต่เนื่องจากอัตรากรดอะซิติก 0.5 นอร์มัล เพื่อปรับพีเอชนั้นไม่ได้มีการกำหนดไว้จึงทำให้เกิดการแปรปรวนได้อย่างมาก ความสามารถในการละลายของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะไฮดรอกไซด์ค่อนข้างไวต่อการ

เปลี่ยนแปลงของพีเอช และจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ วิธี TCLP จึงมีการปรับปรุงให้ไม่มีการปรับพีเอช โดยการใช้สารชะเป็นกรดอะซิติก หรือบัฟเฟอร์ขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของของเสีย การควบคุมพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการประเมินความสามารถในการชะละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโลหะ ควรจะบันทึกค่าพีเอชสุดท้ายของสารชะเมื่อสิ้นสุดการทดสอบไว้เสมอ เพราะว่าเป็นค่าที่มักจะใช้ตัดสินว่าของเสียเป็นไปตามมาตรฐานบังคับสำหรับโลหะหรือไม่

9. การแยกสารที่สกัดได้ โลหะหลายชนิดสามารถคงอยู่ในของเสียและในสารผสมของของเสียกับสารชะในสถานะคอลลอยด์ จึงมีการใช้กระบวนการกรองเพื่อแยกคอลลอยด์เหล่านี้ออก แต่ไม่ได้ต้องทำเสมอ ถ้าสารที่สกัดได้ขุ่นจึงต้องกรอง เพราะว่าการกรองที่ใช้เวลาช่วงหนึ่ง ดังนั้นถ้าใช้เวลานานของเสียก็ยังสัมผัสกับสารชะนานขึ้น

10. การวิเคราะห์ leachate ที่ได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้วิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ด้วย

2.6.4.2 ปัจจัยเกี่ยวกับของเสีย

1. การควบคุมพีเอช การควบคุมพีเอชมีความสำคัญมาก ถ้าสภาวะในการหล่อแข็งไม่ มีการควบคุมพีเอชที่เพียงพออาจจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางชนิด โดยปกติแล้วการหล่อแข็งต้องการสภาวะที่พีเอชสูง เพราะโลหะไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดในช่วงพีเอช 7.5 – 11 แต่อย่างไรก็ตามโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม มีคุณสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกซึ่งมีความสามารถในการละลายสูงกว่าทั้งที่พีเอชต่ำและพีเอชสูง นอกจากนี้ โลหะทุกชนิดไม่ได้มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดที่พีเอชช่วงเดียวกัน ดังนั้นสภาวะในการหล่อแข็งจึงยอมให้เป็นพีเอชใด ๆ ได้

2. การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ การมีตัวออกซิเดนต์และตัวรีดิวซ์ที่แรงอยู่ จะสามารถเปลี่ยนวาเลนซ์ของโลหะซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะนั้น ตัวอย่างเช่น โครเมียม

3. ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต ซัลไฟด์ซิลิเกต และอื่น ๆ รวมถึงในรูปสารเชิงซ้อน นอกจากนี้อีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) ที่มักจะเกิดขึ้นในดิน ซึ่งจะช่วยให้การชะละลายโดยการเกิดสารเชิงซ้อนแอนไอออนิกที่ละลายน้ำจากแคทไอออนของโลหะ แต่อย่างไรก็ตามลิแกนด์อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พัลวิก และกรดฮิวมิก อาจจะช่วยการตรึงโดยการดูดซับบนอนุภาคของของแข็ง

2.6.5 การทดสอบการชะละลาย (Van der Sloot and Dijkstra, 2004)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งการทดสอบการชะละลายออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Static Extraction tests และ Dynamic Extraction tests โดยการทดสอบแบบ Static Extraction นั้น การทดสอบจะใช้สารละลายเดียวที่กำหนดปริมาตร ส่วนการทดสอบแบบ Dynamic Extraction นั้น สารละลายที่ใช้มีการเปลี่ยนใหม่ตลอดช่วงการทดสอบ

2.6.5.1 การทดสอบแบบ Static Extraction

ทดสอบโดยใช้สารละลายที่กำหนดปริมาตรแน่นอนสัมผัสกับของเสียที่มีปริมาณตามที่กำหนดตลอดช่วงเวลาการทดสอบที่ระบุไว้ โดยไม่มีการเปลี่ยนสารละลาย โดยทั่วไปคือสิ้นสุดการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป การทดสอบแบบ Static Extraction มีสมมติฐานว่าสถานะคงตัว (Steady state condition) เกิดขึ้นที่จุดสิ้นสุดของการทดลอง ชนิดของการทดสอบรวมมีทั้งการทดสอบแบบที่มีการเขย่า (Agitated) ไม่เขย่า (Non-agitated) การสกัดแยก (Sequential chemical extraction tests) และการทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Buildup tests)

1. การทดสอบแบบเขย่า

ในการทดสอบแบบเขย่านั้น ของเสียและสารละลายผสมเข้าด้วยกัน และเกิดการเขย่า ดังนั้นการทดสอบนี้จึงถึงสถานะคงตัวได้เร็วเท่าที่จะเป็นไปได้ ในการทดสอบโดยมากจะต้องมีขั้นตอนการลดขนาดของของเสียเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้น จึงทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการเข้าถึงสถานะคงที่ การทดสอบแบบเขย่าจะวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของระบบของเสีย/สารละลายมากกว่าทางฟิสิกส์และกลไกควบคุมอัตราการชะละลาย ด้วยเหตุผลนี้การทดสอบประเภทนี้จึงให้ผลที่เกินความเป็นจริงในการประเมินการปลดปล่อยของสารองค์ประกอบในช่วงสั้นตัวอย่างการทดสอบแบบเขย่านั้นรวมถึง TCLP, EP Tox, California EPA WET, SPLP และ CEN292

2. การทดสอบแบบไม่เขย่า ของเสียและสารละลายได้รับการผสมกันแต่ไม่เขย่า โดยการทดสอบแบบดังกล่าวนี้เป็นการวิเคราะห์ทางด้านฟิสิกส์ และกลไกควบคุมอัตราการชะละลายมากกว่าสมบัติทางเคมีของเสีย/สารละลาย ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าความสมบูรณ์ของโครงสร้างของของเสียส่งผลกระทบต่อปริมาณขององค์ประกอบที่จะชะละลายออกมาจากโครงสร้าง การทดสอบแบบไม่เขย่านั้นใช้เวลายาวนานกว่าในการเข้าสู่สถานะคงที่เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบเขย่า ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้ คือ Strategic Leach Test (MCC-1) และ High Temperature Static Leach Test (MCC-2) ทั้งสองวิธีมาจากประเทศแคนาดา

3. การทดสอบด้วยการสกัดทางเคมี เป็นการทดสอบแบบอนุกรมของการสกัดด้วยการเขย่าโดยการใช้สารสกัดที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีการทดสอบ 2 แบบ แบบแรก

เตรียมการทดสอบหลายครั้ง แต่ละการทดสอบนั้นจะใช้สารสกัดต่างกันไป โดยสมมุติว่าสารสกัดแต่ละชนิดนั้นสามารถสกัดองค์ประกอบที่สารสกัดที่มีความรุนแรงน้อยกว่าสกัดออกมาได้ร่วมกับสิ่งปนเปื้อนที่เพิ่มออกมาอีกปริมาณหนึ่งหรือจำนวนมาก อีกวิธีหนึ่ง คือ ของเสียที่มีปริมาณเดียวกันสามารถนำมาใส่ในสารชะละลายแต่ละลำดับ โดยสมมุติว่าสารชะละลายในลำดับถัดมานั้นจะสกัดสารบางอย่างที่สารสกัดลำดับก่อนหน้านี้ออกมาไม่ได้ ในแต่ละกรณีอยู่ในสมมุติฐานที่ว่า การเพิ่มความรุนแรงของสารสกัดจะส่งผลให้สามารถสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาได้เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างการทดสอบด้วยการสกัดทางเคมี คือ ASTM's Sequential Batch Extraction of Wastes with Acidic Extraction Fluid ส่วนการทดสอบอื่นๆยังอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนา

4. การทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น วิธีการสำหรับการทดสอบแบบสร้างความเข้มข้น (Concentration build-up tests) กระทำได้โดยการนำของเสียที่มีปริมาณเท่ากันไปสัมผัสกับสารสกัดชนิดเดิมซ้ำๆที่อัตราสารชะละลายต่อของแข็งที่ต่ำ การทดสอบประเภทนี้จำลองของเหลวปริมาณหนึ่งที่ไหลผ่านเนื้อของเสียด้วยความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้นในสารสกัด การทดสอบนี้อาจเป็นการจำลองที่คิดของรูป รุน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของของเสีย ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้ คือ Wisconsin's Standard Leach Test ขึ้นตอน C

2.6.5.2 การทดสอบแบบ Dynamic Extraction

สารชะละลายจะได้รับการเปลี่ยนใหม่ แบบชนิดต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อรักษาแรงขับในกระบวนการชะละลาย เนื่องจากความมั่นคงทางกายภาพของของเสีย โดยทั่วไปยังคงรักษาไว้ได้ในช่วงระหว่างการทดสอบ และข้อมูลที่ได้แปรผันตามเวลา การสกัดแบบ Dynamic ให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าทางจลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของสิ่งปนเปื้อน โดยทั่วไปการทดสอบแบบ Dynamic นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น Serial batch tests, Flow-around tests, Flow-through tests และ Soxhlet tests

1. การทดสอบแบบ Serial batch ก็คือตัวอย่างที่นำมาทดสอบจำนวนหนึ่งจะถูกทำให้แตกเป็นก้อนเล็กๆและนำไปผสมกับสารชะละลายก่อนทำการเขย่าตามเวลาที่กำหนดไว้ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา สารชะละลายจะถูกแยกออกและเปลี่ยนสารชะละลายใหม่กลับไปเข้าไป การทดสอบเกิดขึ้นซ้ำๆ จนกว่าจะครบตามจำนวนของช่วงการทดสอบที่กำหนดไว้ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่วัดได้ในสารชะละลายแบบอนุกรมให้ข้อมูลทางจลศาสตร์เกี่ยวกับการละลายของสารปนเปื้อน ตัวอย่างการทดสอบประเภทนี้ คือ Multiple Extraction Procedure (SW-856 Method 1320), NEN 7341 Availability Test (เนเธอร์แลนด์), NEN 7349 Serial Batch Test (เนเธอร์แลนด์) และ Graded Serial Batch Test (US Army)

2. การทดสอบแบบ Flow-around เป็นการทดสอบแบบไหลรอบที่ปกติใช้ทดสอบกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง (Monolithic) โดยวางก้อนตัวอย่างลงในหลอดทดสอบ ซึ่งมีพื้นที่ว่างอยู่โดยรอบก้อนตัวอย่าง และเติมสารชะละลายซึ่งจะไหลรอบก้อนตัวอย่าง สารชะละลายดังกล่าวอาจทำการเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องในกรณีที่ศึกษาเป็นช่วงเวลา หรืออาจเปลี่ยนสารชะละลายเป็นครั้งคราว ในแต่ละกรณีนั้นอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารชะละลายต่อพื้นที่ผิวของก้อนตัวอย่าง ตัวอย่างของการทดสอบประเภทนี้คือ The ISO Leach Test 6961, ANSI 16-1, NEN 7345 Monolithic Diffusion Test (เนเธอร์แลนด์) และ ASTM C1220-92 (Static Leaching of Monolithic Waste Forms for disposal of Radioactive Wastes)

3. การทดสอบแบบ Flow-Through การทดสอบแบบไหลผ่านมีความแตกต่างกับการทดสอบแบบไหลรอบ (Flow-around) ตรงที่สารชะละลายนั้นจะไหลผ่านก้อนตัวอย่าง ซึ่งแปลว่าก้อนตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบนั้นจะต้องมีความพรุนมากกว่าตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (Monolithic) พอสมควร นอกเหนือจากนั้นการทดสอบกระทำคล้ายกับการทดสอบแบบไหลรอบ โดยทั่วไปแล้วการทดสอบแบบไหลผ่านนิยมติดตั้งในรูปของคอลัมน์ (Column) โดยมีช่องทางให้สารชะละลายไหลผ่าน การเปลี่ยนแปลงของการไหลอาจเกิดขึ้นได้จากความนำไฟฟ้าของสารชะละลายหรือการอุดตันของระบบเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กรวมไปถึงการเจริญเติบโตทางชีววิทยา (Biological growth) แต่การทดสอบแบบไหลผ่านสามารถติดตั้งเลียนแบบสภาวะจริงที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างการทดสอบประเภทนี้คือ Waste Interface Leach Test (แคนาดา), NVN 7344 Column Test และ ASTM's Column Test

4. การทดสอบแบบ Soxhlet สามารถใช้ในการชะละลายของเสียโดยการให้ของเสียสัมผัสกับสารชะละลายอย่างต่อเนื่องในการทดสอบประเภทนี้สารชะละลายจะถูกเปลี่ยนใหม่อย่างต่อเนื่องด้วยสารชะละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle leachant) จากสารชะละลายก่อนหน้าที่น่าสิ่งปนเปื้อนออกไปแล้ว การทดสอบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อสกัดสิ่งปนเปื้อนออกมาให้ได้ปริมาณมากที่สุดและเร็วเท่าที่จะทำได้ ตัวอย่างการทดสอบคือ Soxhlet test (MCC-5s) (แคนาดา)

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกวิธีการทดสอบแบบเขย่า คือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เนื่องจากวิธี TCLP เป็นการทดสอบของเสียอันตรายสำหรับการฝังกลบที่ได้รับการยอมรับทางด้านสิ่งแวดล้อม และเป็นการเลียนแบบสภาวะของการชะละลายในหลุมฝังกลบจริง โดยใช้สารชะเป็นกรดอะซิติก เนื่องจากในหลุมฝังกลบจะเกิดสารอินทรีย์ขึ้นระหว่างการสลายตัว และประยุกต์ใช้สารชะเป็นฝนกรดสังเคราะห์และน้ำปราศจากไอออน

2.7 บริหารสนั้วรณกรรม

สุรชาติพิทย์ อินทรวงศ์ (2545) ศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งจากตะกอนของโรงชุบโลหะประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และถั่วลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน ใช้กากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และถั่วลอยลิกไนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมต่ำกว่ามาตรฐานที่ USEPA กำหนด สังกะสีและเหล็กไม่มีมาตรฐานกำหนดแต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 มล./ล และ 1.5 มล./ล ตามลำดับ และผลการทดสอบด้วยวิธี DLT พบว่าความเข้มข้นสะสมของเหล็กและโครเมียมในน้ำชะวันที่ 43 มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3-4 มล./ล และ 0.4 มล./ล ตามลำดับ ในขณะที่สังกะสีตรวจไม่พบ สำหรับการทดสอบด้วยวิธีควบคุมพีเอช ความเข้มข้นของโลหะทั้ง 3 ชนิด จะสูงสุดเมื่อพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 และมีค่าลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณโลหะทั้ง 3 ชนิด ในสารละลายที่สกัดจากตัวอย่างที่บดจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่บด

ชญัญญา หาวารี (2549) ศึกษาศักยภาพในการนำกากตะกอนอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ โดยศึกษาลักษณะสมบัติของตะกอนอุตสาหกรรมจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง ของการนิคมอุตสาหกรรมจำนวน 3 แห่ง ทำการทดสอบและศึกษาถึงผลการชะละลายปริมาณของโลหะหนักจากตะกอน โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedures (TCLP) เปรียบเทียบกับวิธีการสกัดตามลำดับขั้น วิธีย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟ และวิธีการสกัดสาร Extraction Procedure เพื่อตรวจสอบว่าตะกอนจัดเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ ไมโครเวฟ พบว่ามีปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี อยู่ค่อนข้างสูง และเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น พบว่ามีปริมาณทองแดง สังกะสี แมงกานีส และเหล็ก สกัดออกมาในขั้นที่ 3 และ 4 สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น และพบว่ามีปริมาณโลหะหนักเหลืออยู่ (residual) ในขั้นที่ 5 มากที่สุด แสดงให้เห็นถึงปริมาณโลหะหนักในตะกอนไม่สามารถสกัดออกมาได้ทั้งหมด ผลการทดสอบการชะละลายพบว่า ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของตะกอนจากวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedures (TCLP) และ วิธีการสกัดสาร Extraction Procedure มีค่าไม่เกินมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัด

ชญัญชนก ภารกุล(2551) ศึกษาเกี่ยวกับผลการชะละลายระยะยาวของโลหะหนักห้าชนิด คือ โครเมียม แคดเมียม ทองแดง เหล็กและนิกเกิล ในก้อนมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์จากการเผา ร่วมกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนักโดยการสังเคราะห์ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 1,400 และ 1,450 องศาเซลเซียส เวลา 30 60 และ 75 นาที และทดสอบการชะละลายระยะยาวประยุกต์ใช้การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004 และใช้น้ำสกัด 3 ชนิด

ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ($H_2SO_4:HNO_3 = 80:20$) และน้ำสกัด TCLP (มาตรฐาน US EPA SW-846 Method 1311) ระยะเวลาในการทำการทดสอบการชะละลาย ได้แก่ 0.25 1 2.25 4 9 16 36 และ 64 วันเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน EA NEN 7375: 2004 ที่น้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีการชะละลายของโลหะหนักไม่เกินมาตรฐานน้ำประปา ส่วนน้ำสกัด TCLP มีปริมาณโลหะหนักชะละลายออกมาเกินมาตรฐานน้ำประปา

วรวรรณชัย สายวาริน(2556) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ในงานอ้อยและแก้วเคลือบที่เป็นวัสดุพอลิซิลิโคนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน ทำการศึกษาการรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) พบว่า เมื่อผสมภาคตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่มีอายุการบ่มนานขึ้นจะมีการชะละลายของโลหะหนักน้อยลง และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US EPA กำหนด หรือกล่าวได้ว่า ความสามารถในการตรึงโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งมีสูง จึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตกตะกอนอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ถูกชะละลายออกมาต่ำ

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 โดยศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว เพื่อศึกษาถึงกลไกของการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว โดยทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Batch Leaching Test และวิธี Column Leaching Test ซึ่งนำตัวอย่างมาดัดให้มีขนาดต่างๆกัน แล้วใช้สารชะเป็นกรดอะซิติกพบว่า แคลเซียมถูกชะละลายออกมามากกว่าโครเมียม และตะกั่วเนื่องจากละลายน้ำได้มากที่สุด ดังนั้นจึงสันนิษฐาน ได้ว่าแคลเซียมน่าจะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วพบว่ามีรูปแบบของการถูกชะละลายคล้ายคลึงกับซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วควรจะถูกยึดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนหรืออาจมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ มากกว่าจะเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุนหรือเกาะติดอยู่บนผนังของรูพรุน และจากการที่พบว่าการชะละลายของโครเมียมและตะกั่วจะเกิดขึ้นที่ pH ต่ำๆ ต่ำกว่า pH ในการชะละลายของแคลเซียม ทำให้อัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ จึงแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาหรืออาจทำปฏิกิริยากับซิลิเกตเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และจะถูกชะละลายออกเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย และการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของ

เสียน้อยอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้ ชนิดของโลหะ การเกิดซีเมนต์ ขนาดของอนุภาคและความสามารถในการดูดซับบนอนุภาคซีเมนต์ ชนิดของสารชะ และระยะเวลาการสัมผัสสารชะ

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแท่งซีเมนต์ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก โดยหล่อซีเมนต์เป็นรูปทรงกลมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และกากตะกอนโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet digestion/AA Method ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า บริเวณผิวของตัวอย่างอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยกรดอะซิติก แคดเมียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่และสารดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดซับได้ดี ดังนั้น โลหะหนักที่ละลายออกไปจะถูกดูดซับผิวที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้ และจากผลการวิจัยในครั้งนี้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียม มีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดซับได้ดี ทำให้โลหะหนักถูกชะละลายออกมาได้น้อย และจากงานวิจัยเดิมที่ทราบว่าวัสดุพอลิโซลันมีองค์ประกอบออกไซด์ของซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียมอยู่ในปริมาณสูง จึงส่งผลให้การนำวัสดุพอลิโซลันมาใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้สามารถลดการชะละลายของโลหะหนักได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

Matthew T และคณะ (1996) ศึกษาการชะละลายโลหะหนักระยะยาวจากคอนกรีตที่ทำจากกระดาษทรายที่ใช้แล้ว ทดสอบด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น (Sequential Extractions) โดยใช้ใช้น้ำสกัดจากกรดและน้ำทะเล ผลการทดสอบพบว่า

1. คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลจะทำให้โลหะมีปริมาณน้อยกว่าคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับสารชะล้างที่เป็นกรด
2. ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำชะล้างไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการชะล้างโลหะที่อยู่ในผลิตภัณฑ์คอนกรีตได้อย่างถูกต้องตามการทดสอบการชะล้าง
3. สภาพแวดล้อมที่รุนแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการสกัดด้วยกรดตามลำดับส่งผลให้มีการชะล้างความเป็นด่างจากคอนกรีตออกเป็นหลายส่วน ระดับของกรดหลุดร่วงต่ำกว่า 4 ซึ่งโลหะมีความสามารถละลายได้สูง
4. ความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำทะเลมีค่าน้อยกว่าการสกัดด้วยกรด
5. การทดสอบการชะละลายด้วยกรดทำให้เกิดสภาวะที่รุนแรงมากขึ้นกว่าผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดขึ้นได้ในโลกแห่งความเป็นจริง

S.Y.Wang และ C. Vipulanandan (1996) ศึกษาความเป็นไปได้ในการจะทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยชนิด C เพื่อตรึงตะกั่ว และศึกษาการชะละลายของตะกั่วด้วยวิธี TCLP จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ตะกั่วในเตรทเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน โดยใช้วัสดุยึดประสาน 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอย พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งจะลดลงตามการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยและตะกั่วในเตรท ตะกั่วที่ทำให้แข็งด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะถูกชะออกมาน้อยกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นวัสดุยึดประสาน และการเติมเถ้าลอยในวัสดุยึดประสานจะทำให้ปริมาณตะกั่วในสารชะลดลง

C.M. Sangha (1999) และคณะศึกษาการรั่วไหลของโลหะที่เป็นพิษในระยะยาวจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสภาพแวดล้อมที่เป็นของเหลว ทดสอบโดยวิธี NVN 5432 พบว่าผลการชะล้างโลหะที่เป็นพิษไม่พบในสารละลายใด ๆ ที่เกิดจากการชะล้าง การทดสอบนี้ใช้กับคอนกรีตทุกชนิดที่ผ่านการทดสอบแล้ว ซึ่งหมายความว่าสำหรับแต่ละคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบแต่ละตัวอย่างน้ำชะล้าง 7 ชนิดที่ผลิตในการตรวจสอบ 256 วัน ไม่มีโลหะที่เป็นพิษมากกว่าขีดจำกัดชัดเจน

X.D. Li (2000) ศึกษาลักษณะทางเคมีและพฤติกรรมของการชะละลายของโลหะหนักในวัสดุเหลือใช้จากซีเมนต์ โดยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้นที่แตกต่างกัน(TCLP) และการทดสอบ TCLP แบบกึ่งน้ำหนักความเข้มข้นของ Pb ในการทดสอบ TCLP มาตรฐานอยู่ในระดับต่ำกว่า ยกเว้นขยะและตัวอย่าง SW1 (มีการเติม PFA เท่านั้น) ความเข้มข้นของ Cu ในการทดสอบ TCLP มีค่าสูงสำหรับขยะมูลฝอยและตัวอย่าง SW1 นอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายสังกะสีในน้ำชะขยะมีจำนวนน้อย สำหรับตัวอย่างของเสียอื่น ๆ S/S ค่าความเข้มข้นของ Cu และ Zn ในการทดสอบ TCLP มาตรฐานทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าขีด จำกัด การตรวจจับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทดสอบ TCLP มาตรฐานไม่สามารถแยกแยะความสามารถในการกรองของสารปนเปื้อน โลหะในวัสดุที่ใช้วัสดุจากซีเมนต์ต่างๆได้

Amal (2003) ได้ศึกษาผลของค่าการชะล้างต่างๆของการชะล้าง Pb และ Cd จากเศษซีเมนต์ด้วยวิธี TCLP โดยใช้ น้ำสกัดจากกรดอะซิติกและกรดไนตริก พบว่า การชะละลาย Pb มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้กรดอะซิติกเป็น leaching fluid ที่ความเข้มข้นของกรด 1.6M การชะละลายกรดไนตริกทำให้เกิดการหลอมของ Pb มากขึ้น และผลการวิจัยพบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างสุดท้ายของสารละลายน้ำชะควบคุมความสามารถในการทำมาสะอาดของโลหะเนื่องจากมีผลต่อความสามารถในการละลาย ความเป็นด่างสูงของน้ำเสียที่เกิดจากการใช้ซีเมนต์ช่วยลดปริมาณสารละลายที่มีค่า pH ซึ่ง

โลหะส่วนใหญ่จะไม่ละลาย พบว่า TCLP ส่งผลให้เกิดสถานะที่ไม่สมจริงสำหรับของเสียที่เกิดจากซีเมนต์เนื่องจากมีค่าความเป็นกรด – ด่างสูง

G. Fava (2004) ทำการประเมินความเป็นไปได้ในการนำเศษวัสดุรีไซเคิลมาใช้ใหม่จากการก่อสร้าง หรือการรื้อถอนของเสีย (C & D) เพื่อทดแทนการรวมตัวของธรรมชาติในการผลิตคอนกรีต ด้วยวิธี dynamic leaching test ผลการทดสอบพบว่า การรวมตัวของรีไซเคิลช่วยเพิ่มความสามารถในการกรองของไอออนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (Na, K, Cl) ในขณะที่แคลเซียมทดแทนมีผลให้การชะล้างสุทธิต่ำลง ทั้งๆที่ความต้านทานเชิงกลลดลง

Sophia และ Swamimnathan (2005) ทำการประเมินกลไกการทำเสถียรและการชะละลายของกากของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่มีโครเมียม นิกเกิล สังกะสี แมงกานีส และตะกั่วเป็นส่วนประกอบผสมกับปูนซีเมนต์และถั่วลยทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP และ NEN 7341 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพียงอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมถั่วลย และความเข้มข้นของการชะละลายด้วยวิธี TCLP ของโครเมียมในน้ำชะต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด และในส่วนของผลการชะละลายด้วยวิธี NEN 7341 พบว่า โครเมียมถูกชะละลายออกมาได้น้อยมากในก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการบำบัด เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัด

Malviya และ Chaudhary (2006) ศึกษาพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักที่ผ่านการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง โดยใช้ตะกอนที่มีโลหะหนักจากโรงงานผลิตโลหะ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างตะกอนแห้งต่อปูนซีเมนต์ 0 0.16 0.5 1 2 4 5 6 7 และ 8 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบการชะละลายด้วยวิธี NEN 7345 แล้วนำน้ำชะที่เก็บในช่วงเวลา 0.6 1 2.25 4 9 16 32 และ 64 วัน ไปวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่าที่อัตราส่วนของตะกอนแห้งต่อปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชและความแข็งแรงจะยิ่งลดลง แต่ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบการชะละลายพบว่า การชะละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตะกอนโลหะหนักที่มีอยู่ โดยจะชะออกมามากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 12 สังกะสีจะชะออกมาเพียงร้อยละ 0.1-2.3 เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกจับอยู่ในปูนเม็ด แมงกานีสมีแนวโน้มการชะละลายเพิ่มมากขึ้นหากมีปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น ส่วนโซเดียม โพแทสเซียม และคลอไรด์จะชะละลายออกมาร้อยละ 99 เกือบทุกอัตราส่วน

Pereira และคณะ (2007) ศึกษาการชะละลายระยะสั้นและระยะยาวของก้อนแข็งที่นำปูนซีเมนต์ ปูนขาว และถั่วลยมาทำเสถียรและหล่อก้อนแข็งฝุ่นจากเตาไฟฟ้า ทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ผลการทดสอบพบว่า ในบางกรณีลักษณะการก่อตัวของส่วนผสมมีอิทธิพลต่อการชะละลายของน้ำชะ และทำการประเมินก้อนหล่อแข็งที่อายุ 9 ปี พบว่าค่าพีเอชของน้ำชะลดลง

จึงทำให้เกิดการชะละลายมากขึ้น เนื่องจาก carbonation ของก้อนแข็งและการลดลงของค่าความเป็นด่างอย่างต่อเนื่อง

O. Sanusi et al. (2016) ศึกษาการชะละลายโลหะหนักของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วยเถ้าลอยและเศษคอนกรีตจากการรื้อถอนอาคาร โรงเรียนในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 40 50 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมมวลรวมคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลการชะละลายพบว่าความเข้มข้นของ As มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของมวลรวมคอนกรีต และความเข้มข้นของ Ba Cd Cr และ Pb มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของ TCLP



บทที่ 3

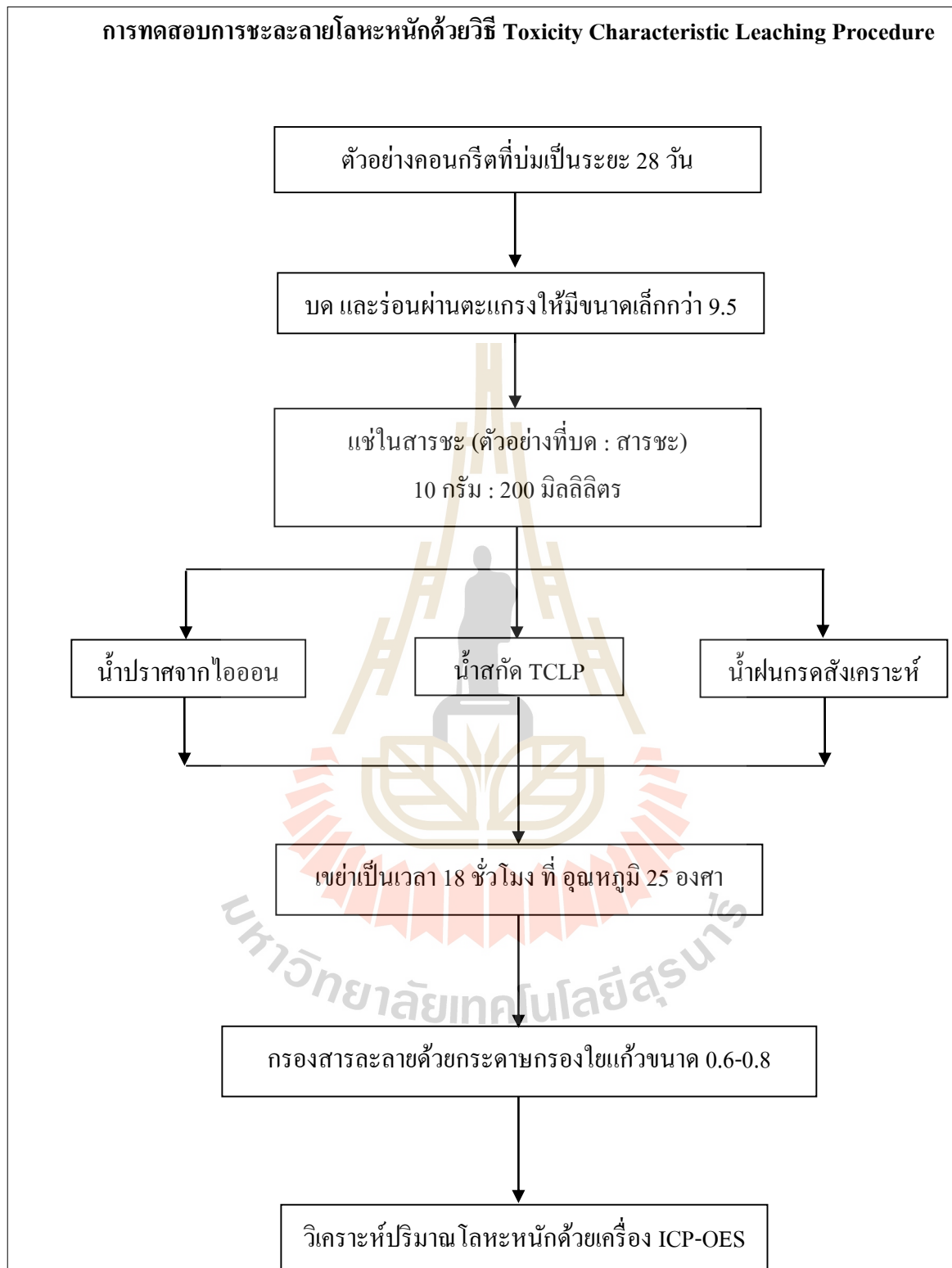
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการชะละลายโลหะหนักในคอนกรีตมวลเบาที่นำเศษของเสียมะลามีนมาแทนที่ทรายบางส่วน โดยในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมวัสดุ และวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยจะแบ่งขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเศษของเสียมะลามีน

ขั้นที่ 2 ศึกษาการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามีนด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP

3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

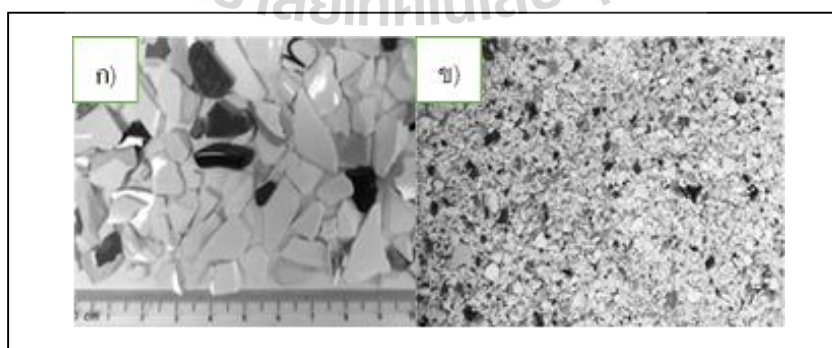
1. ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง หรือที่เรียกกันว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement; OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150

2. ทราย ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำ (river sand) ซึ่งร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 ตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยมีค่าความโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.67

3. เศษของเสียมลามีนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเศษของเสียมลามีนที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนของบริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) เศษของเสียมลามีนในรูปที่ 3.2ก จะถูกนำไปบดเพื่อให้มีขนาดเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 3.2ข จากนั้นใช้เครื่องเขย่าตะแกรงร้อนคู่กับชุดตะแกรงร้อนมาตรฐาน ASTM E11 เพื่อหามวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ก่อนนำเศษของเสียมลามีนไปผสมในคอนกรีตมวลเบา โดยสารเติมแต่ง (Additives) ในเศษของเสียมลามีน (ไม่รวมส่วนที่เป็นพอลิเมอร์และไฟเบอร์)

4. น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตคือ น้ำประปาสะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

5. สารก่อโฟม (foaming agent) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นสารก่อโฟมชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC สูตร 1 โดยถูกนำมาเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เป็นโฟมด้วยเครื่องสร้างโฟมที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศที่มีฟองอากาศขนาดเล็กตั้งแต่ 0.1-1.0 มิลลิเมตร ซึ่งความหนาแน่นของโฟมประมาณ 50 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีต



รูปที่ 3.2 ก) เศษของเสียมลามีนก่อนบด ข) เศษของเสียมลามีนหลังบด

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดอะซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 58
2. กรดไนตริก ความเข้มข้นร้อยละ 68
3. กรดซัลฟูริก ความเข้มข้นร้อยละ 98
4. สารละลายมาตรฐาน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโลหะที่ใช้ทดสอบ
5. น้ำปราศจากไอออน

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. หลอดทดลอง
2. หลอด centrifuge
3. ขวดรูปชมพู่
4. บีเปดส์
5. บีกเกอร์
6. กระจกกรองใยแก้วพูน 0.6-0.8 ไมครอน
7. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง
8. เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)
9. เครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry
10. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy
11. ชุดตะแกรงร่อน
12. เครื่องชั่งละเอียด
13. เครื่องวัดค่าพีเอช
14. แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร
15. ถังมือยาง
16. หน้ากากอนามัย

3.3 การเตรียมสารเคมี

3.3.1 การเตรียมสารละลายฝนกรด

นำน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนักจนค่าพีเอชมีค่าคงที่เท่ากับ 5

3.3.2 การเตรียมน้ำสกัด TCLP

นำกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ใสลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตรถ้าเตรียมถูกต้องค่าพีเอชจะประมาณ 2.88

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

สัดส่วนการผสมคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ เศษของเสียมลามี้น โดยสารเพิ่มฟองอากาศทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยมีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดต่อน้ำเท่ากับ 2:2:1 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เศษของเสียมลามี้นใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (Chaitongrat and Srichaiyo, 2018) ที่ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) เท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสม (กรัม)	คอนกรีตควบคุม	คอนกรีตผสม MF
ปูนซีเมนต์	2,000	2,000
ทราย	2,000	1,500
เศษของเสียมลามี้น	0	500
น้ำ	1,000	1,000

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมตามค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus: FM) ของเศษของเสียมลามี้น

โมดูลัสความละเอียด	เศษของเสียมลามี้น (กรัม)			
	ขนาดตะแกรงร่อน			
	30	50	100	pan
0.5	0	50	150	300
0.75	25	50	200	225
1	50	100	150	200
1.25	50	125	225	100

3.5 วิธีการทดสอบ

3.5.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray

Fluorescence Spectroscopy (XRF)

3.5.2 ศึกษาการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามิน

3.5.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบการชะละลายโลหะหนักในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมะลามิน สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ตัวอย่างที่นำมาทดสอบการชะละลาย	1. ก้อนคอนกรีตผสมเศษของเสียมะลามินที่ผ่านการบด จำนวน 30 ตัวอย่าง
2. เวลาที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย	2. เขย่าสาร 18 ชั่วโมง
3. อัตราส่วนระหว่างสารชะละลายต่อตัวอย่าง	3. ตัวอย่าง 10 กรัม ในสารชะ 200 มิลลิลิตร
4. ชนิดของสารชะละลาย	4.1 น้ำปราศจากไอออน (Deionize water) พีเอชพีเอชเท่ากับ 5 4.2 น้ำสกัด TCLP พีเอชประมาณ 2.88 4.3 น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain) พีเอชเท่ากับ 5
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ส่วนผสมในการหล่อก้อนตัวอย่าง	1.1 เศษของเสียมะลามินใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนักที่ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus: FM) เท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 1.2 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดต่อ น้ำเท่ากับ 2:2:1 1.3 ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
2. วิธีการทดสอบการชะละลาย	2. วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP ตามมาตรฐานการชะละลายของ U.S.EPA SW-846 Method 1311
3. เวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่าง	3. บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน
ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้	ข้อมูล
1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ	1. ที่อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างด้วยเครื่อง ICP-OES	1.1 ปริมาณโลหะหนัก As Cd Pb Ti และ Zn 1.2 พีเอชหลังการทดสอบ 1.3 ลักษณะการชะละลายที่เกิดในสารชะต่างๆ 1.4 เปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐานของ U.S. EPA

3.5.2.2 ทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP)

ซึ่งเป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. นำก้อนคอนกรีตที่ผสมเศษของเสียเมลามีนมาบดให้เป็นผงละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 9.5 มิลลิเมตรหรือน้อยกว่า
2. เติมน้ำสกัดลงในขวดแล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง โดยน้ำสกัดที่ใช้คือ น้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP และน้ำฝนกรดสังเคราะห์
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสารชะ (Leachate) ด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน

5. นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาปรับค่าพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริก จากนั้นนำไปวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-OES



รูปที่ 3.3 เครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)
ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F10)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการชะละลายโลหะหนักในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามีน โดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในการแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก การแทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามีนที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 ซึ่งจะควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำการบ่มก้อนคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จึงนำก้อนคอนกรีตมาทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสี โดยใช้สารชะ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) น้ำฝนกรดตั้งเคราะห์ ($H_2SO_4:HNO_3 = 80:20$) และน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา

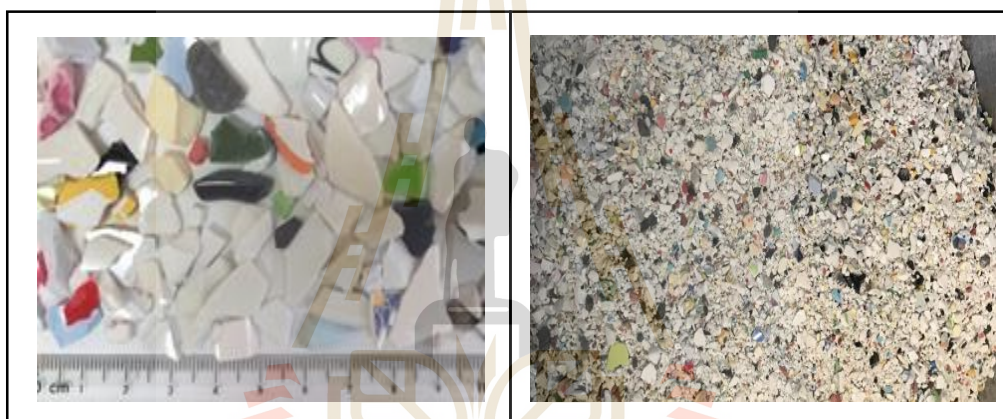
4.2 คุณสมบัติของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุยึดประสาน ดังรูปที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา และเศษของเสียมลามีน ซึ่งเป็นมวลรวมละเอียด โดยเศษของเสียมลามีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของบริษัท ศรีไทย ซุปเปอร์แวร์จำกัด (มหาชน) ดังในรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งเมื่อทำการบดให้มีขนาดเล็กลงและร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C33 เศษของเสียมลามีนจะมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดจนถึงผงสีเทา ดังในรูปที่ 4.2 (ข)



รูปที่ 4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.2 (ก) เศษของเสียเมลามีนก่อนบด รูปที่ 4.2 (ข) เศษของเสียเมลามีนหลังบด

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุยึดประสาน และเศษของเสียเมลามีนที่ ซึ่งเป็นมวลรวมละเอียด ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence: XRF) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบออกไซด์หลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์หรืออลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับร้อยละ 65.35 20.55 4.77 และ 4.23 โดยมวลตามลำดับ ซึ่งออกไซด์ทั้ง 4 รวมกันได้เท่ากับ 94.91 ส่วนออกซึ้งรองได้แก่ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และออกไซด์ของอัลคาไล (K_2O) และมีส่วนประกอบของออกไซด์ อื่นผสมอยู่

บ้าง เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) เป็นต้น

สำหรับเศษของเสียเมลามีน มีองค์ประกอบทางเคมีหลักของสารเติมแต่ง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าเท่ากับร้อยละ 78.426 และ 11.842 โดยมวล ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ดังแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและมวลรวมละเอียด

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เศษของเสียเมลามีน
	ร้อยละโดยมวล	
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.35	11.84
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.55	4.26
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.78	2.33
เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	4.23	1.05
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	3.81	0.81
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.57	77.44
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.44	N.D
แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)	0.11	N.D
สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	0.08	2.17
สตรอนเทียมออกไซด์ (SrO)	0.05	0.10
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	0.04	N.D
$\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	89.82	-

N.D = Not Detected

4.3 ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP

จากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียมลามี้นด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐาน U.S.EPA SW-856 Method 1311 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสี โดยใช้สารชะ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP และน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ผ่านเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry : ICP-OES) ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.3.1 การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะเป็นน้ำปราศจากไอออน

จากผลการทดลองการชะละลายปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสีที่ชะละลายออกมาหลังจากสัมผัสกับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามี้น 25% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุมวลรวมมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 และควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้สารชะเป็นน้ำปราศจากไอออน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไทเทเนียมที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรทุกค่าโมดูลัสความละเอียดที่ชะออกมาไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากไม่ว่าจะผสมเศษของเสียมลามี้นหรือไม่ ไม่มีผลต่อการชะละลายของไทเทเนียม

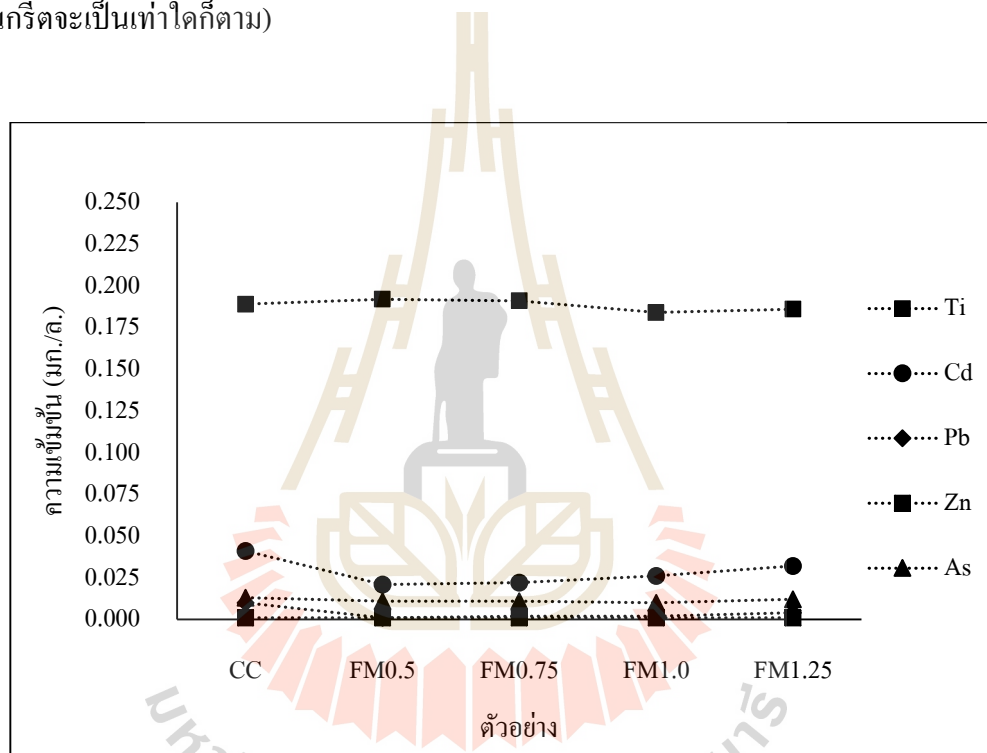
การชะละลายของอาร์ซีนิก พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของอาร์ซีนิกที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.013 และ 0.014 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมียุคมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

การชะละลายของแคดเมียม พบว่า ในคอนกรีตตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.041 และ 0.046 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ แต่ยังมีปริมาณความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มก./ล. แสดงว่า การแทนที่ของเสียมลามี้นในคอนกรีตมวลเบาสามารถลดการชะละลายของแคดเมียมได้

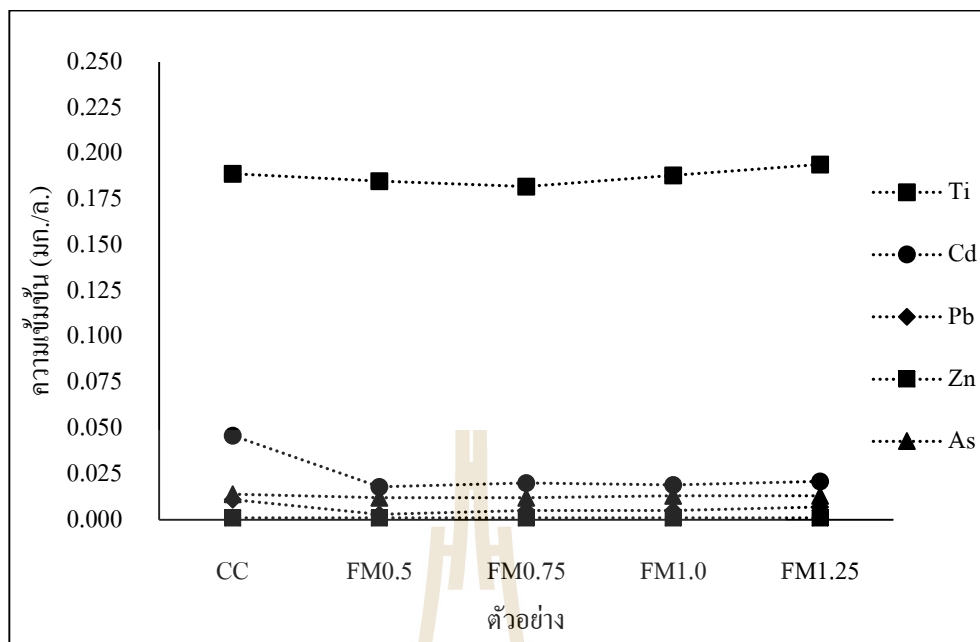
การชะละลายของตะกั่ว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีค่าความเข้มข้น

ใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.010 และ 0.011 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามีที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

การชะละลายของสังกะสี พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรทุกค่าโมดูลัสความละเอียด มีปริมาณความเข้มข้นน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ I. Serclerat พบว่า การชะละลายของสังกะสีจากก้อนหล่อแข็งของเสียมที่สัมผัสกับน้ำปราศจากไอออน ต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ (ไม่ว่าปริมาณเริ่มต้นของโลหะหนักในคอนกรีตจะเป็นเท่าใดก็ตาม)



รูปที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำปราศจากไอออนที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.4 ปริมาณโลหะหนักในน้ำปราศจากไอออนที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4.3.2 การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะเป็นน้ำสกัด TCLP

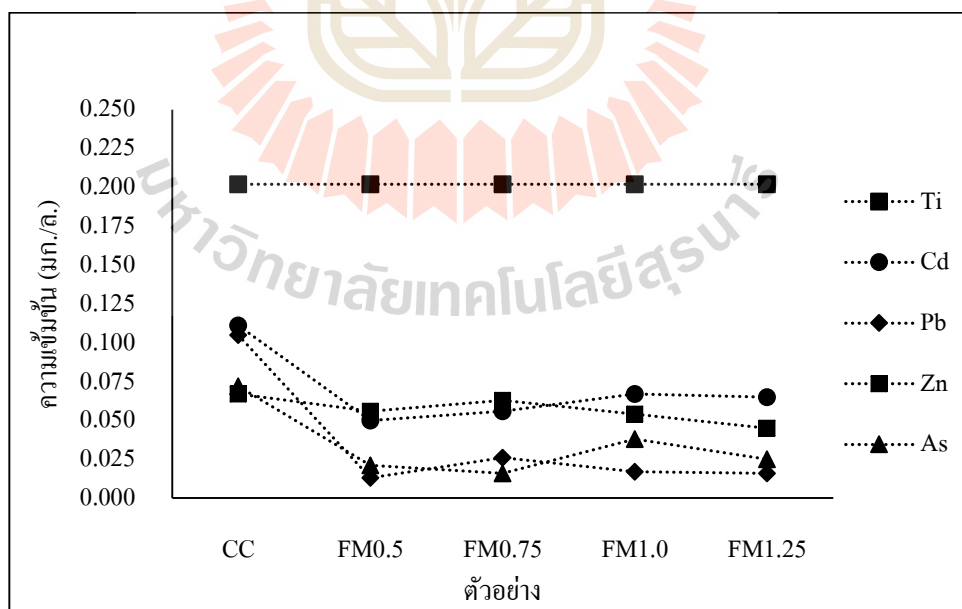
จากผลการทดลองการชะละลายปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคลเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสีที่ชะละลายออกมาหลังจากสัมผัสกับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามีน 25% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุผสมรวมมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 และควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้สารชะเป็นน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไทเทเนียมที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารชะ

การชะละลายของอาร์ซีนิก พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของอาร์ซีนิกที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.072 และ 0.098 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามีนที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

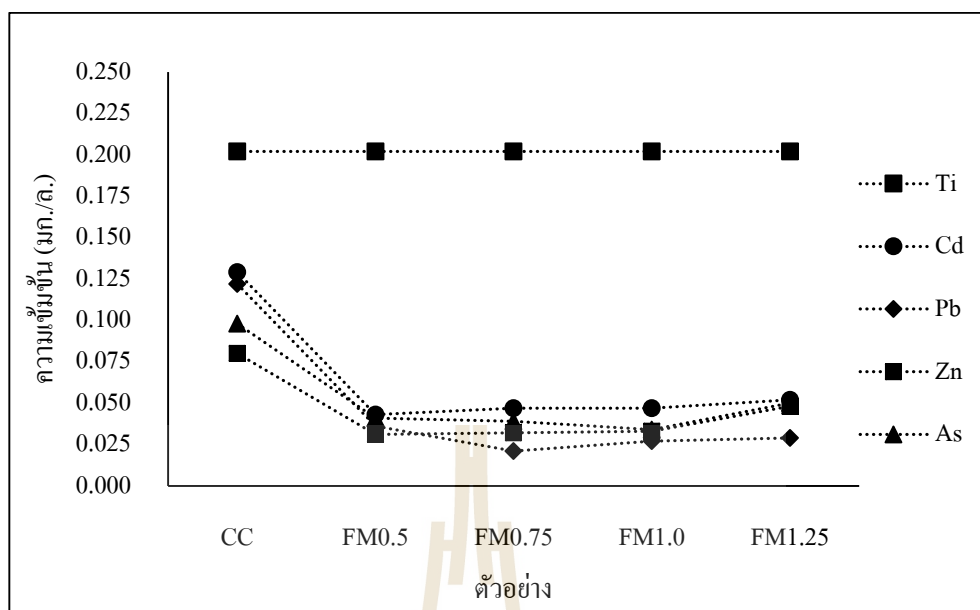
การชะละลายของแคดเมียม พบว่า ในคอนกรีตตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.111 และ 0.129 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ แต่ยังมีปริมาณความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มก./ล. แสดงว่า การแทนที่ของเสียมลามี้นในคอนกรีตมวลเบาสามารถลดการชะละลายของแคดเมียมได้

การชะละลายของตะกั่ว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.105 และ 0.122 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

การชะละลายของสังกะสี พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.067 และ 0.080 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ



รูปที่ 4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) ที่คอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.6 ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติคเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) ที่คอนกรีตมวลเบา ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4.3.3 การทดสอบการชะละลายด้วยสารจะเป็นน้ำฝนกรดสังเคราะห์

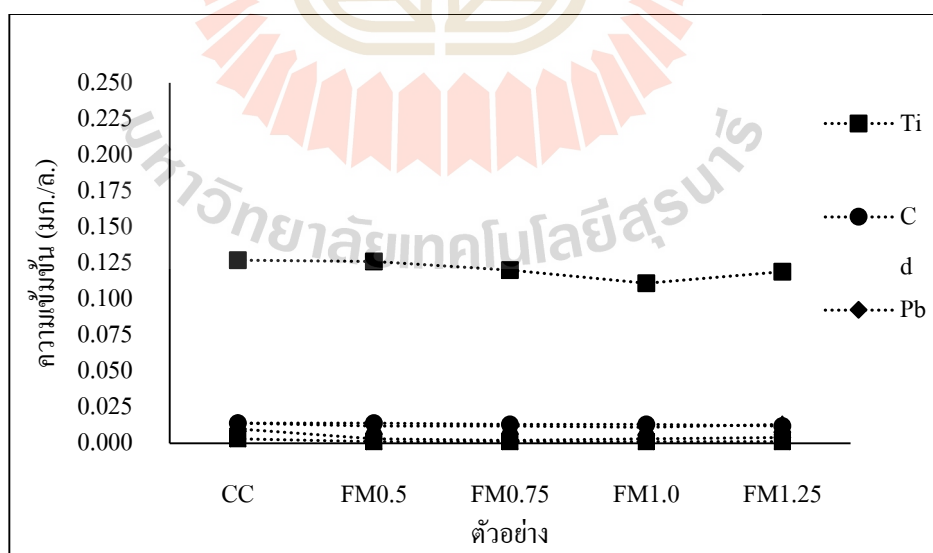
จากผลการทดลองการชะละลายปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคลเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสีที่ชะละลายออกมาหลังจากสัมผัสกับตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามีน 25% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุมวลรวมมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 และควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้สารจะเป็นน้ำฝนกรดสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของไทเทเนียมที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์ ที่ชะออกมาให้ผลเช่นเดียวกับการใช้สารจะเป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำสกัด TCLP เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

การชะละลายของอาร์ซีนิก พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของอาร์ซีนิกที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามีนที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีค่าความเข้มข้นเท่ากันเท่ากับ 0.014 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามีนที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

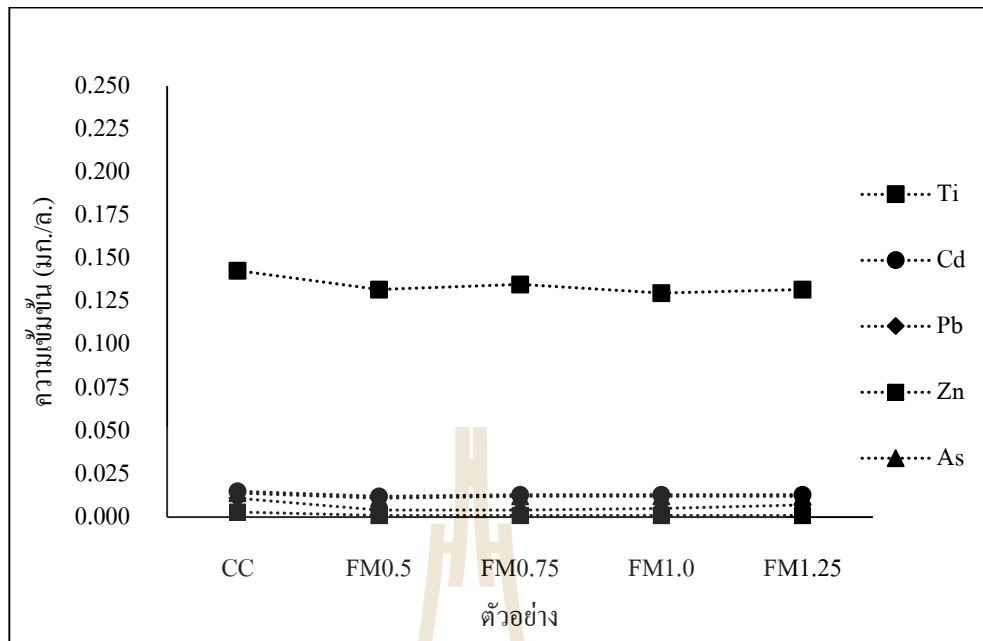
การชะละลายของแคดเมียม พบว่า ในคอนกรีตตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมเมลามีนที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 0.014 และ 0.015 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมเมลามีนที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ แต่ยังมีปริมาณความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับผลการชะละลายในน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากค่าพีเอชของน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 5

การชะละลายของตะกั่ว พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมเมลามีนที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.010 และ 0.111 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเศษของเสียมเมลามีนที่ค่าโมดูลัสความละเอียดต่างๆ

การชะละลายของสังกะสี พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมาในตัวอย่างคอนกรีตที่ความหนาแน่นทั้ง 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรทุกค่าโมดูลัสความละเอียด มีปริมาณความเข้มข้นน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ ซึ่งมีผลการทดลองเช่นเดียวกับการชะละลายในน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 5 จึงทำให้มีแนวโน้มของผลการทดลองเหมือนกัน



รูปที่ 4.7 ปริมาณโลหะหนักในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.8 ปริมาณโลหะหนักในน้ำฝนกรดสังเคราะห์ที่คอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4.4 การชะละลายกับมาตรฐาน Toxicity Characteristic Leaching Procedure ตามข้อกำหนดของ U.S.EPA (U.S. Environmental Protection Agency)

การกำจัดกากของเสียอันตรายโดยการทำเป็นก้อนหล่อแข็งในรูปคอนกรีต ปัจจุบันเป็นการนำไปฝังกลบหรือการนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนเหล่านี้ต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารพิษเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งหากมีการรั่วไหลเกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำมาตรฐาน TCLP ตามข้อกำหนดของ U.S.EPA มาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสี เพื่อประเมินความปลอดภัยในกรณีที่มีการชะละลายเกิดขึ้นจริงในหลุมฝังกลบหรือในกรณีที่นำไปใช้จริงในงานก่อสร้างต่างๆ โดยมาตรฐาน TCLP ไม่มีมาตรฐานระบุไว้สำหรับโลหะไทเทเนียมและสังกะสี จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมากับมาตรฐาน TCLP แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ทุกตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษของเสียเมลามีนที่ใช้สารชะทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP และน้ำฝนกรดสังเคราะห์ มีความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยการชะละลายของอาร์เซนิก แคดเมียม ตะกั่ว พบว่า ไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่า

ความเข้มข้นเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร 1 มิลลิกรัม/ลิตร และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 0.098 0.129 และ 0.122 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ในสารชะที่เป็นน้ำสกัด TCLP ในตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สำหรับโลหะไทเทเนียมและสังกะสีไม่มีมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าความเข้มข้นของไทเทเนียมเท่ากับ 0.202 มิลลิกรัม/ลิตร ทุกตัวอย่างในสารชะที่เป็นน้ำสกัด TCLP และความเข้มข้นสูงสุดของสังกะสีเท่ากับ 0.080 มิลลิกรัม/ลิตร ในสารชะที่เป็นน้ำสกัด TCLP ที่ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีส่วนผสมของเศษของเสียมลามี้นที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำเศษของเสียมลามี้นมาแทนที่ทรายบางส่วนในการหล่อคอนกรีตมวลเบาไม่ก่อให้เกิดอันตรายทั้งในการนำไปฝังกลบหรือนำไปใช้ในการก่อสร้างต่างๆ

ตารางที่ 4.2 มาตรฐาน Toxicity Characteristic Constituents and Regulatory Levels

ปริมาณสาร โลหะหนักในสารชะละลายไม่มากกว่า (มิลลิกรัม/ลิตร)				
As	Cd	Pb	Ti	Zn
5.0	1.0	5.0	N/A	N/A

N/A = ไม่มีมาตรฐานกำหนด

4.5 สารชะละลายกับการชะละลาย

การทดสอบการชะละลายโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสีในคอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ทรายด้วยเศษของเสียมลามี้น 25% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุมวลรวมมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 และควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้สารชะละลายต่างชนิดกัน ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) และน้ำฝนกรดสังเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการชะละลายของโลหะหนักในสารชะชนิดต่างๆ พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมาในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยที่สารชะละลายเป็นน้ำปราศจากไอออนและฝนกรดสังเคราะห์มีปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมาน้อย เนื่องจากมีค่าพีเอชเริ่มต้นใกล้เคียงกันเท่ากับ 5 และเนื่องจากฝนกรดสังเคราะห์มีปริมาณกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในปริมาณน้อย ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (H+) ที่แตกตัวจากกรดมีปริมาณน้อยตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณการชะละลายโลหะหนักออกมามีค่าต่ำ แต่ในทางตรงกันข้ามสารชะละลายที่เป็นน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) มีค่าพีเอช

เริ่มต้นเท่ากับ 2.88 ซึ่งโลหะหนักจะละลายได้ดีในสภาวะความเป็นกรด (ศุภฤกษ์, 2556) ทำให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการชะละลายโลหะหนักออกมาในปริมาณมากกว่าสารละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและฝนกรดสังเคราะห์ โดยหลังการทดสอบการชะละลายพบว่าสารละลายในน้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP และน้ำฝนกรดสังเคราะห์ มีค่าพีเอชเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 11.3 10.5 และ 10.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจาก ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำปราศจากไอออน น้ำสกัด TCLP และน้ำฝนกรดสังเคราะห์แพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของชิ้นตัวอย่าง ทำให้เกิดการละลายของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีสมบัติเป็นเบส จึงทำหน้าที่ในการสะเทินกรด ส่งผลให้ค่าพีเอชของสารละลายทั้ง 3 ชนิดเพิ่มสูงขึ้น (Asavapisit, 2001) โดยที่ค่าพีเอชของสารละลายจากคอนกรีตมวลเบาที่ผสมเศษของเสียมลามีนจะมีค่ามากกว่าสารละลายจากคอนกรีตมวลเบาอ้างอิง เนื่องจากในเศษของเสียมลามีนมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์อยู่ถึงร้อยละ 11.84 ของสารเต็มแต่ง ตามตารางที่ 4.1 ส่งผลให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายออกมามากขึ้น (Sanusi, 2016) โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลายชะละลายออกมาน้อย



ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของการชะละลายโลหะหนักที่ในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสี้ยน

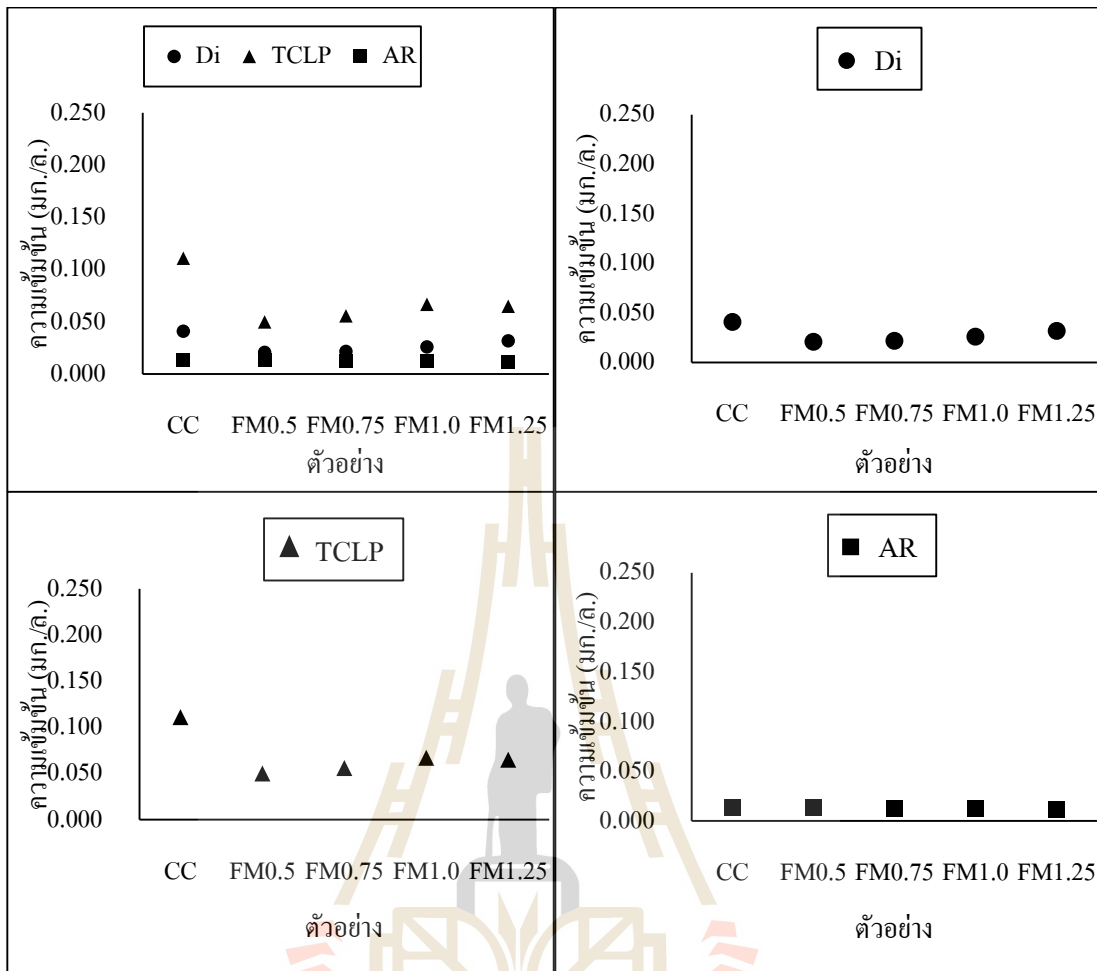
เมลามีนด้วยวิธี TCLP

สารชะ	ตัวอย่าง	pH ก่อน	pH หลัง	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)				
				Cd	Pb	As	Ti	Zn
น้ำ ปราศจาก ไอออน	CCD11	5	11.0	0.041	0.01	0.013	0.189	0.001
	FM0.5D11		11.6	0.021	0.001	0.011	0.192	0.001
	FM0.75D11		11.1	0.022	0.002	0.011	0.191	0.001
	FM1.0D11		11.4	0.026	0.002	0.01	0.184	0.001
	FM1.25D11		11.3	0.032	0.004	0.012	0.186	0.001
	CCD13		11.1	0.046	0.011	0.014	0.189	0.001
	FM0.5D13		11.2	0.018	0.003	0.012	0.185	0.001
	FM0.75D13		11.7	0.02	0.005	0.012	0.182	0.001
	FM1.0D13		11.4	0.019	0.005	0.013	0.188	0.001
	FM1.25D13		11.2	0.021	0.007	0.013	0.194	0.001
น้ำสกัด TCLP	CCD11	2.88	10.4	0.111	0.105	0.072	0.202	0.067
	FM0.5D11		10.6	0.05	0.013	0.021	0.202	0.056
	FM0.75D11		10.9	0.056	0.026	0.016	0.202	0.063
	FM1.0D11		10.8	0.067	0.017	0.038	0.202	0.054
	FM1.25D11		10.7	0.065	0.016	0.025	0.202	0.045
	CCD13		10.1	0.129	0.122	0.098	0.202	0.080
	FM0.5D13		10.2	0.043	0.036	0.041	0.202	0.031
	FM0.75D13		10.6	0.047	0.021	0.039	0.202	0.032
	FM1.0D13		10.3	0.047	0.027	0.034	0.202	0.033
	FM1.25D13		10.4	0.052	0.029	0.05	0.202	0.048

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของการชะละลายโลหะหนักที่ในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสี้ยน
เมลามีนด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

สารชะ	ตัวอย่าง	pH ก่อน	pH หลัง	ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)				
				Cd	Pb	As	Ti	Zn
น้ำฝนกรด สังเคราะห์	CCD11	5	10.2	0.014	0.01	0.014	0.127	0.003
	FM0.5 D11		10.8	0.014	0.003	0.012	0.126	0.001
	FM0.75 D11		10.4	0.013	0.002	0.012	0.12	0.001
	FM1.0 D11		10.9	0.013	0.003	0.011	0.111	0.001
	FM1.25 D11		10.5	0.012	0.004	0.013	0.119	0.001
	CCD13		10.3	0.015	0.011	0.014	0.143	0.003
	FM0.5D13		10.8	0.012	0.004	0.011	0.132	0.001
	FM0.75D13		10.5	0.013	0.004	0.012	0.135	0.001
	FM1.0D13		10.5	0.013	0.005	0.012	0.13	0.001
	FM1.25D13		10.6	0.013	0.007	0.012	0.132	0.001

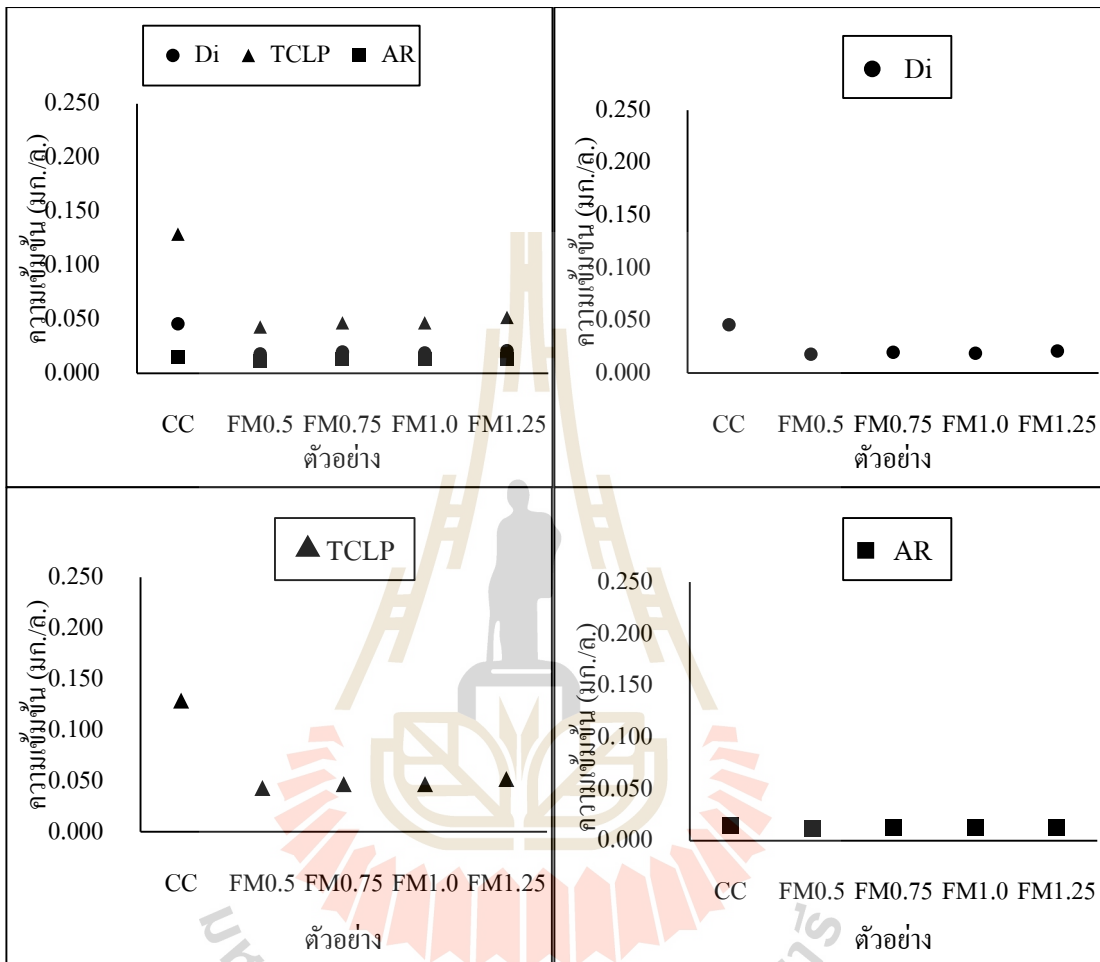




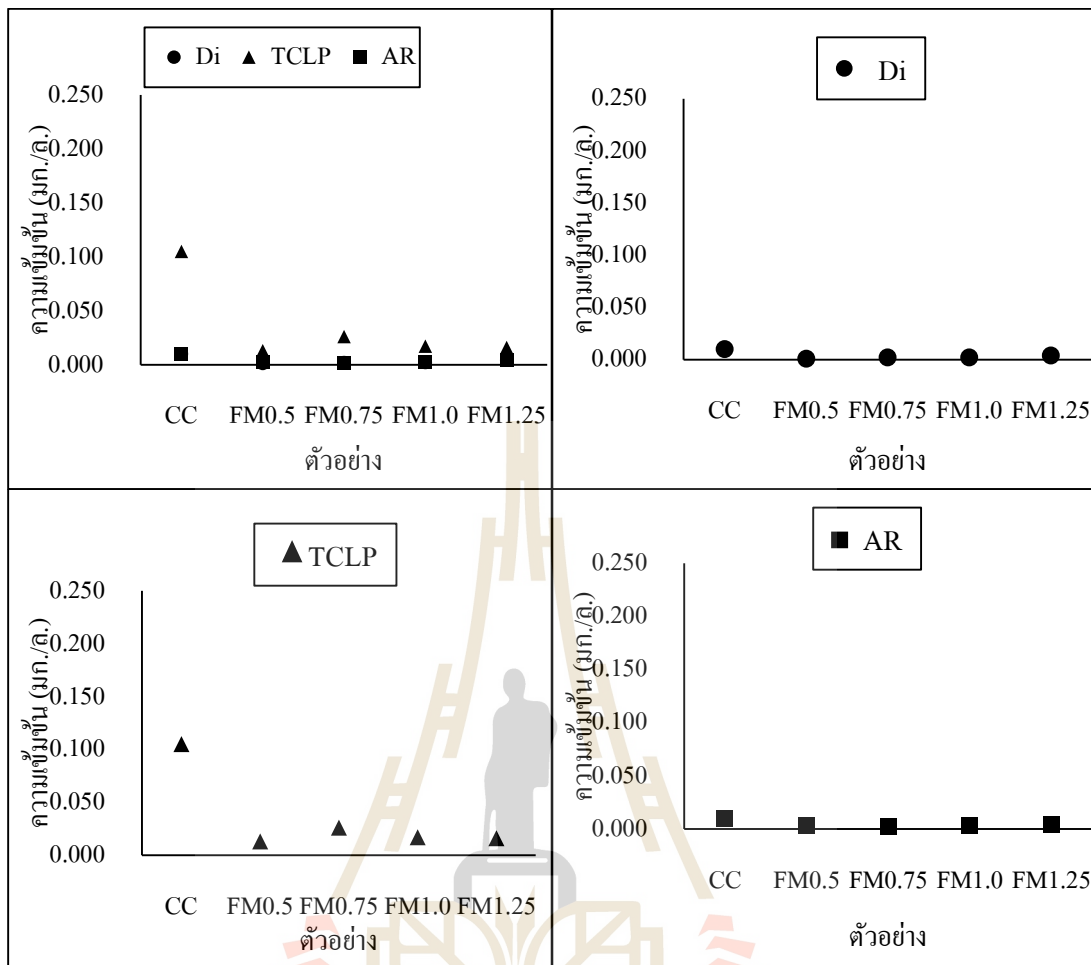
รูปที่ 4.9 ภาพรวมการชะละลายของแคดเมียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าคอนกรีตมวลเบาทั้ง 2 ความหนาแน่นมีแนวโน้มการชะละลายของแคดเมียม (Cd) ลักษณะเดียวกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยจะพบว่าในสารละลายที่เป็นน้ำฝนกรดสังเคราะห์ให้ผลการชะละลายที่มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำปราศจากไอออนและน้ำสกัด TCLP ที่ให้ผลการชะละลายที่สูงกว่า โดยผลการชะละลายของแคดเมียมในน้ำปราศจากไอออนและน้ำสกัด TCLP จะพบว่าเมื่อผสมเศษของเสียมอลามีนในคอนกรีตมวลเบาจะมีการชะละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ถูกแทนที่ด้วยไฮดรเจนไอออน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลายชะละลายออกมาน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Halim และคณะ (2004) ที่พบว่าแคดเมียมติดอยู่ในช่องว่างของ

ซีเมนต์และถูกปล่อยออกมาภายหลัง โดยแคดเมียมในสารชะละลายขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cd}(\text{OH})_2$)



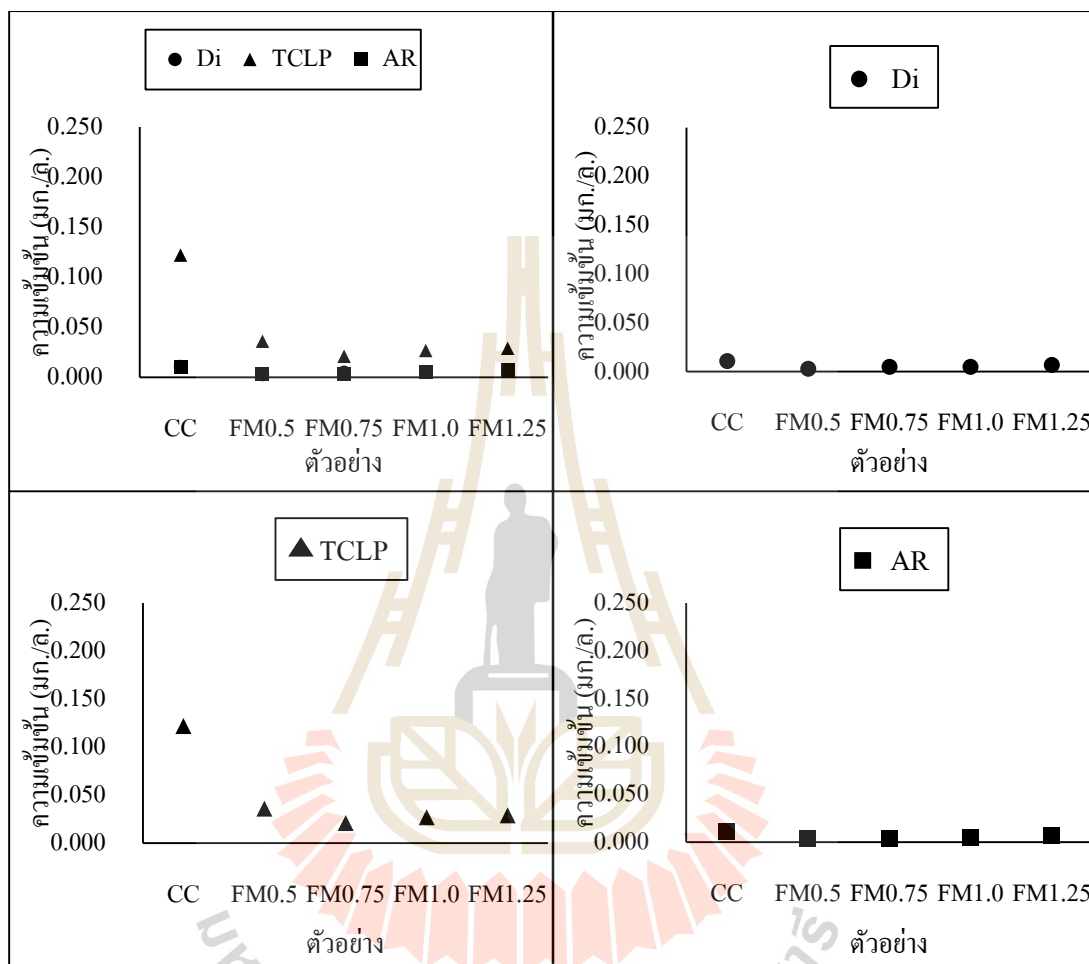
รูปที่ 4.10 ภาพรวมการชะละลายของแคดเมียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



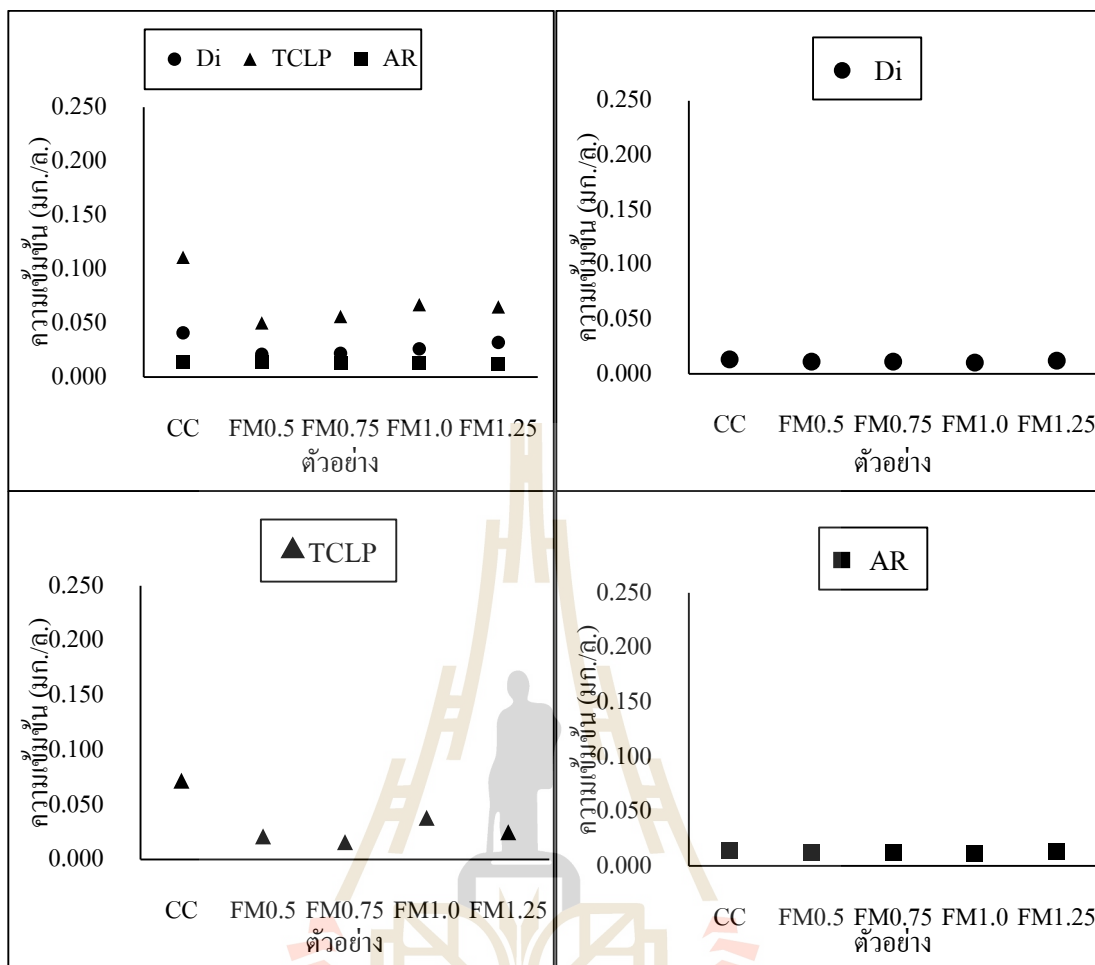
รูปที่ 4.11 ภาพรวมการชะละลายของตะกั่วในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าคอนกรีตมวลเบาทั้ง 2 ความหนาแน่นมีแนวโน้มการชะละลายของตะกั่ว (Pb) ลักษณะเดียวกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยจะพบว่าในสารละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ให้ผลการชะละลายที่ใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำสกัด TCLP ที่ให้ผลการชะละลายที่สูงกว่า โดยผลการชะละลายของตะกั่วในน้ำสกัด TCLP จะพบว่าเมื่อผสมเศษของเสียมลามีในคอนกรีตมวลเบาจะมีการชะละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลายชะละลายออกมาน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malviya และ Chaudhary (2006) ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจากการ

ละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ตะกั่วตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$)



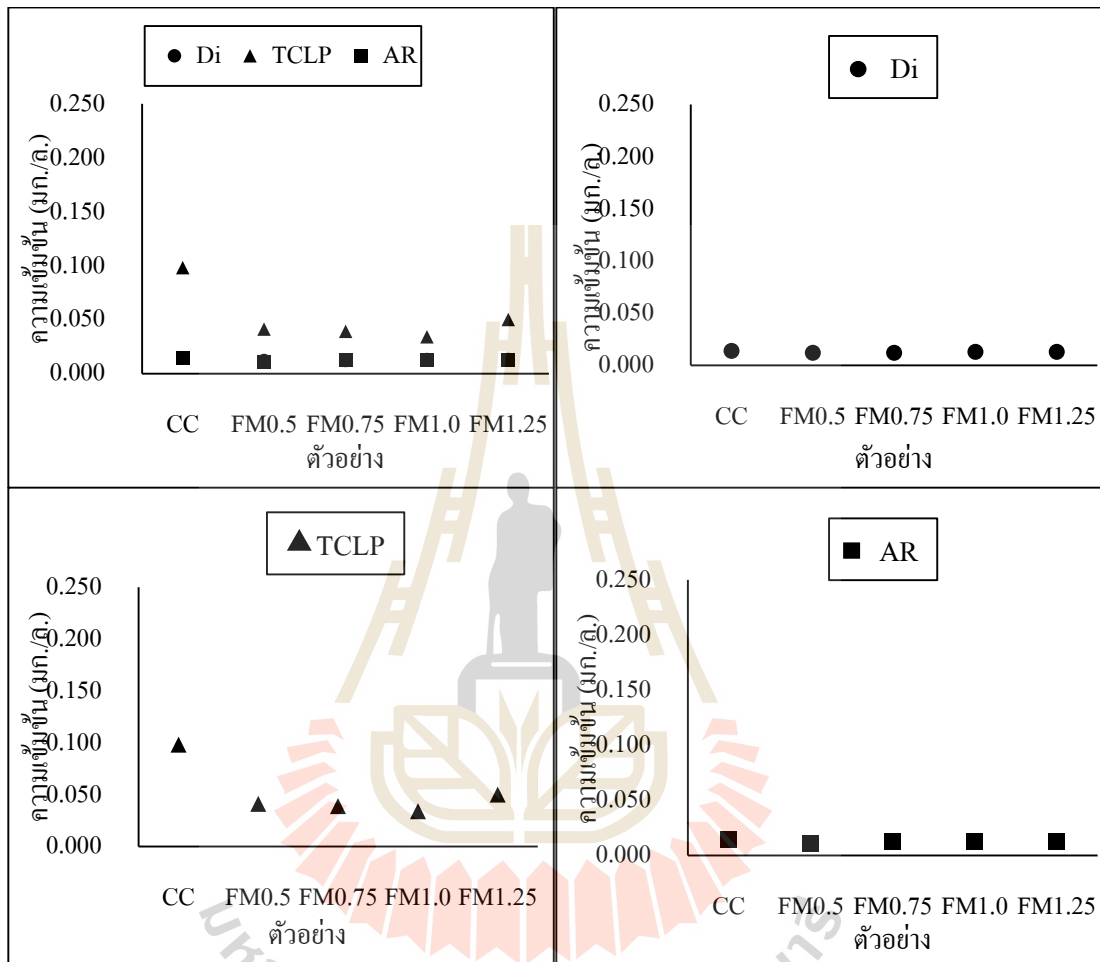
รูปที่ 4.12 ภาพรวมการชะละลายของตะกั่วในสารละลายชนิดต่างๆ ในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



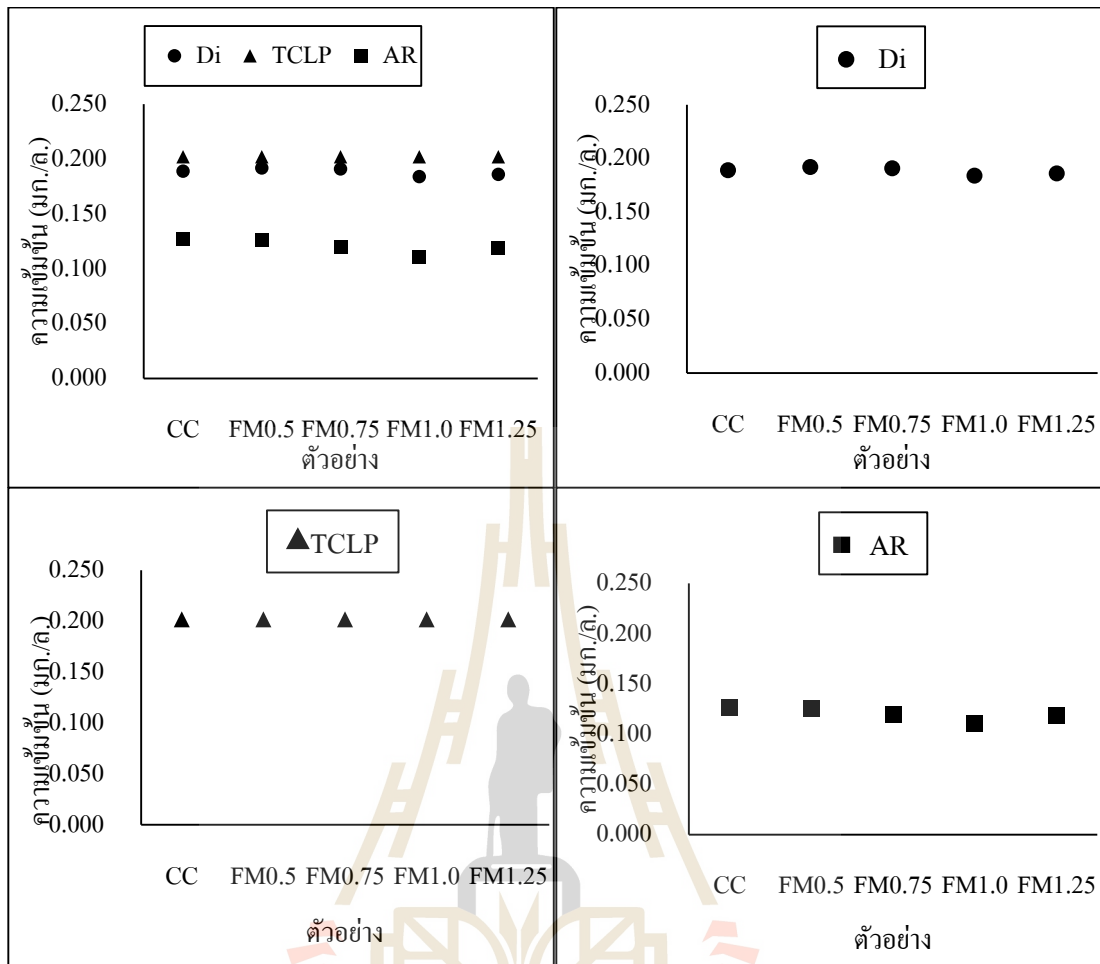
รูปที่ 4.13 ภาพรวมการชะละลายของอาร์เซนิกในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าคอนกรีตมวลเบาทั้ง 2 ความหนาแน่นมีแนวโน้มการชะละลายของอาร์เซนิก (As) ลักษณะเดียวกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยจะพบว่าในสารละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ให้ผลการชะละลายที่ใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำสกัด TCLP ที่ให้ผลการชะละลายที่สูงกว่า โดยผลการชะละลายของอาร์เซนิกในน้ำสกัด TCLP จะพบว่าเมื่อผสมเศษของเสียมลามีนในคอนกรีตมวลเบาจะมีการชะละลายที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลายชะละลายออกมาน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duntre และ Vandecasteele (1997) พบว่าการเติมซีเมนต์ลงในของเสียมลามีการปนเปื้อนสารหนู

นั้น แคลเซียมจากซีเมนต์จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของสารหนู โดยการสร้างรูปที่ไม่ละลายน้ำของ CaHAsO_3

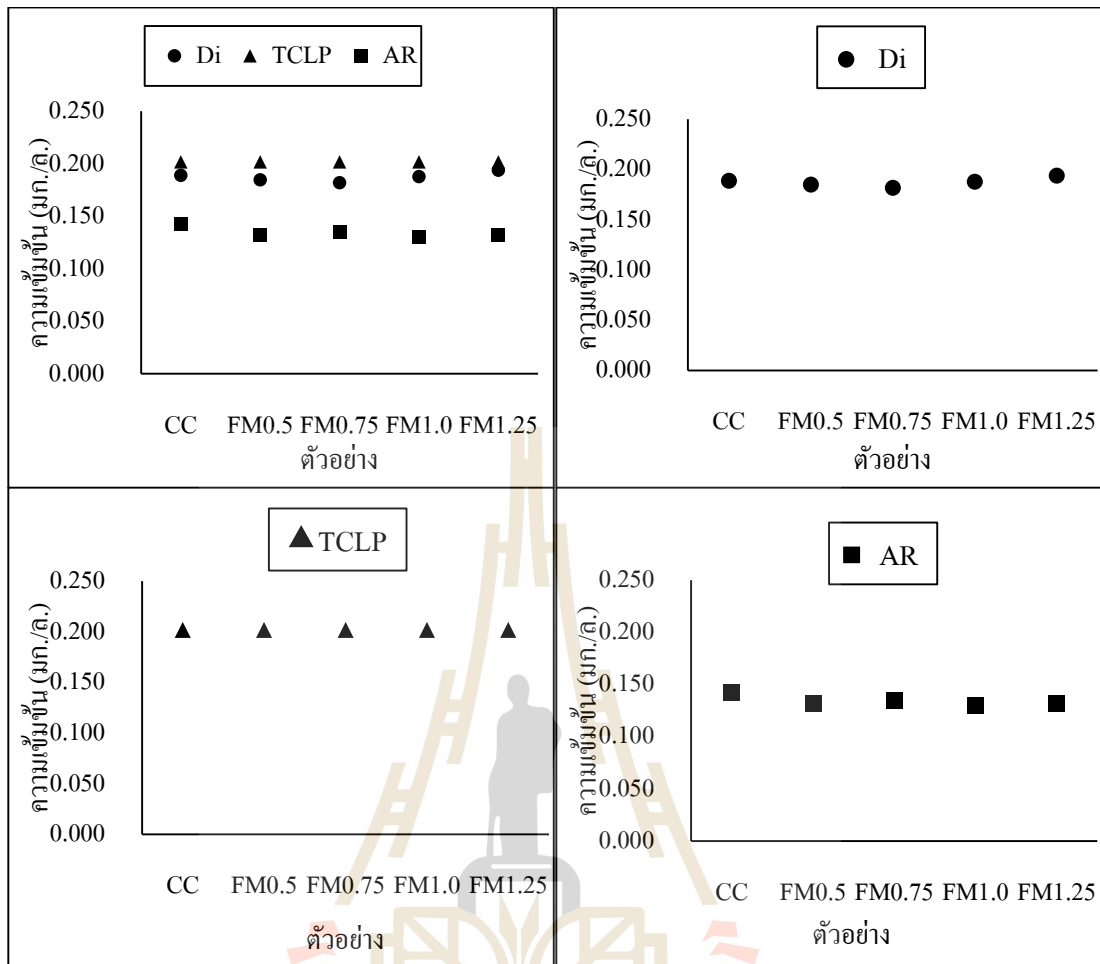


รูปที่ 4.14 ภาพรวมการชะละลายของอาร์เซนิกในสารชะละลายชนิดต่างๆ ในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

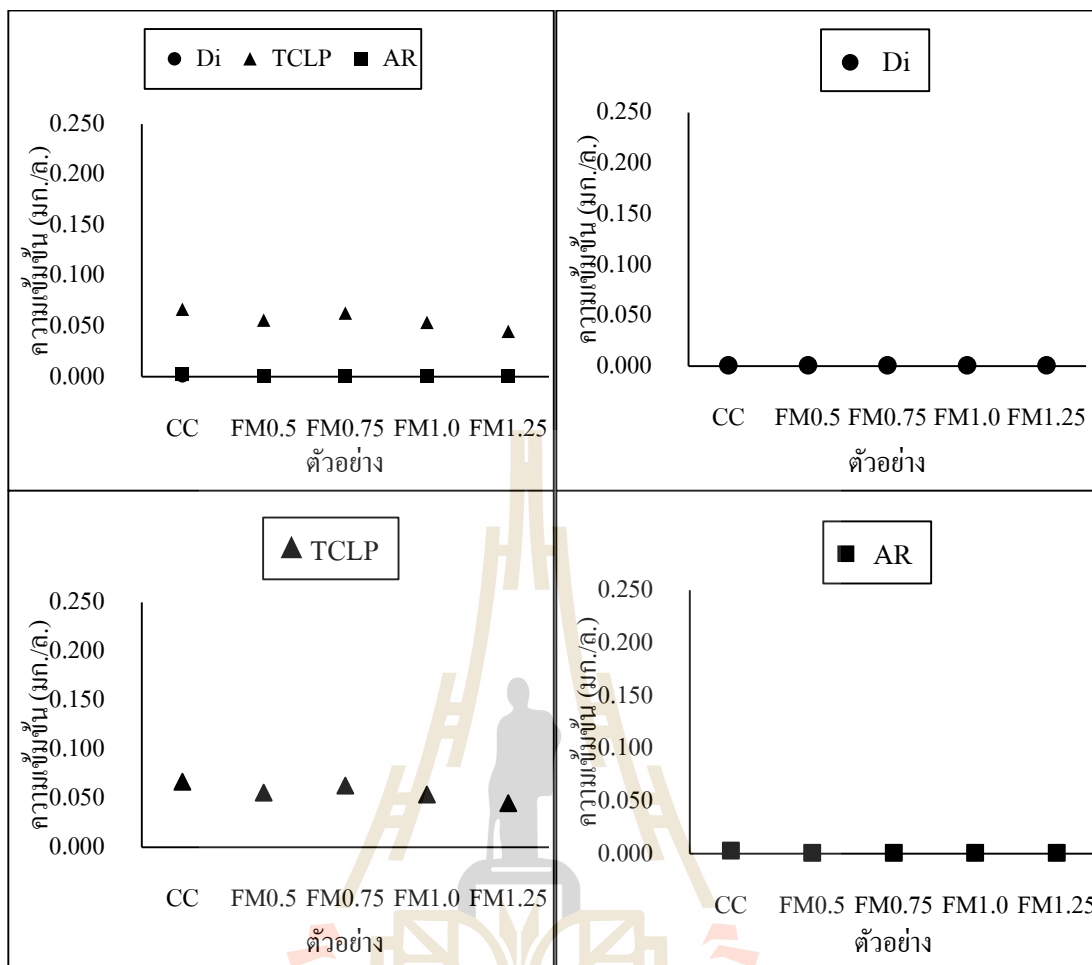


รูปที่ 4.15 ภาพรวมการชะละลายของไทเทเนียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าคอนกรีตมวลเบาทั้ง 2 ความหนาแน่นมีแนวโน้มการชะละลายของไทเทเนียม (Ti) ลักษณะเดียวกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยจะพบว่าการผสมเศษของเสียมลามีในคอนกรีตมวลเบาไม่ส่งผลต่อการชะละลายของโลหะไทเทเนียม เนื่องจากมีผลการชะละลายที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการชะละลายของโลหะไทเทเนียมอยู่ในระดับไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร และไม่ได้ถูกระบุไว้ในมาตรฐานของ U.S.EPA



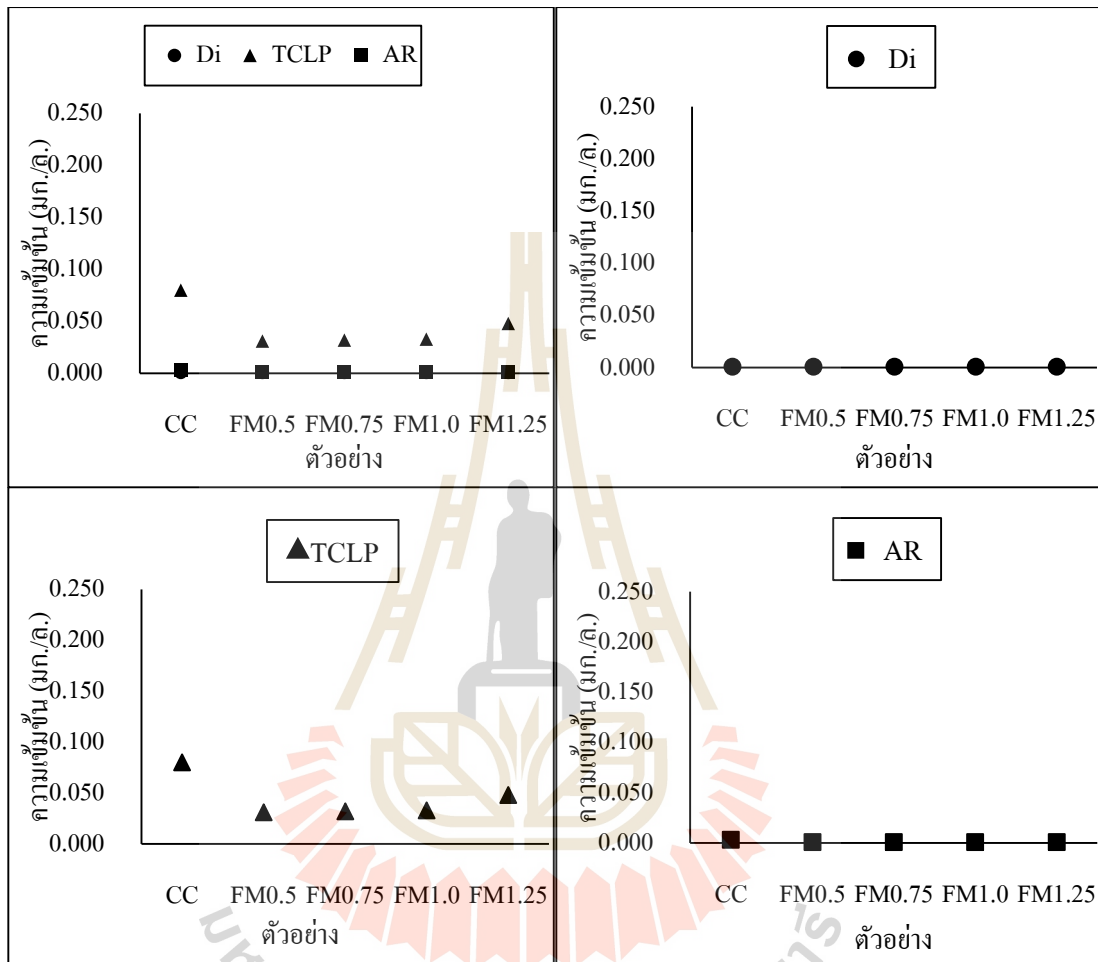
รูปที่ 4.16 ภาพรวมการชะละลายของไทเทเนียมในสารละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.17 ภาพรวมการชะละลายของสังกะสีในสารละลายชนิดต่างๆ ในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าคอนกรีตมวลเบาทั้ง 2 ความหนาแน่นมีแนวโน้มการชะละลายของสังกะสี (Zn) ลักษณะเดียวกันในสารละลายทั้ง 3 ชนิด โดยจะพบว่าในสารละลายที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ให้ผลการชะละลายที่ใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำสกัด TCLP ที่ให้ผลการชะละลายที่สูงกว่า โดยผลการชะละลายของสังกะสีในน้ำสกัด TCLP จะพบว่าเมื่อผสมเศษของเสียมลามีนในคอนกรีตมวลเบาจะมีการชะละลายที่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออน ทำให้โลหะหนักตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลายชะละลายออกมาน้อย ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Todorovic และ Ecke (2004) ที่พบว่า สังกะสีจะอยู่ในรูปซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) ซึ่งเป็นรูปที่ละลายได้น้อย



รูปที่ 4.18 ภาพรวมการชะละลายของสังกะสีในสารชะละลายชนิดต่างๆในคอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากการเปรียบเทียบผลการชะละลายของโลหะหนักในสารชะละลายทั้ง 3 ชนิด ที่คอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 1,100 และ 1,300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่าโลหะแคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) อาร์ซีนิก (As) และสังกะสี (Zn) ในน้ำปราชจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ แสดงผลการชะละลายที่ต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำสกัด TCLP ที่ให้ผลการชะละลายที่สูงกว่า โดยผลการชะละลายในน้ำสกัด TCLP จะพบว่าเมื่อผสมเศษของเสียมละมึนในคอนกรีตมวลเบาจะมีการชะ

ละลายที่ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุม ในส่วนของโลหะไทเทเนียม (Ti) มีการชะละลายไม่แตกต่างกัน จึงไม่ส่งผลต่อการชะละลาย



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เศษของเสียมลามีนเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดมาแทนที่ทราย 25% ที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM1.25 FM1.0 FM0.75 และ FM0.5 นำมาทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสี โดยใช้สารชะ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) น้ำฝนกรดสังเคราะห์ ($H_2SO_4 : HNO_3 = 80:20$) และน้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

5.2 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP

การทดสอบด้วยวิธี TCLP สำหรับการใช้น้ำสกัด TCLP (กรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล) เป็นสารชะละลาย พบว่า โลหะหนักทั้ง 5 ชนิด มีปริมาณถูกชะออกมามากกว่าการใช้สารชะเป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ เนื่องจาก น้ำสกัด TCLP มีสภาพเป็นกรดแก่ ทำให้โลหะหนักชะละลายออกมามาก ในส่วนของโลหะไทเทเนียมที่ถูกชะออกมาไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากไม่ว่าจะผสมเศษของเสียมลามีนหรือไม่ ไม่มีผลต่อการชะละลายของโลหะไทเทเนียม สำหรับสารชะที่เป็นน้ำปราศจากไอออนและน้ำฝนกรดสังเคราะห์ มีแนวโน้มของผลการทดลองใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าพีเอชเริ่มต้นของสารชะทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นสภาวะไม่รุนแรง และปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว ไทเทเนียม และสังกะสี ที่ชะละลายออกมาในสารชะทั้ง 3 ชนิด ไม่เกินมาตรฐานที่ U.S.EPA กำหนดไว้ โดยมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับ อาร์ซีนิก แคดเมียม ตะกั่ว คือ 5 มิลลิกรัม/ลิตร 1 มิลลิกรัม/ลิตร และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนไทเทเนียมและสังกะสี ถึงแม้ไม่มีมาตรฐานกำหนดไว้ แต่ค่าความเข้มข้นที่ชะละลายออกมามีปริมาณต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ดังนั้นการนำเศษของเสียมลามีนมาใช้แทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบาจึงไม่เป็นอันตรายหากมีการนำไปฝังกลบหรือใช้งานจริงในงานก่อสร้างต่างๆ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการศึกษาการชะละลายโลหะหนักในระยะยาว และประยุกต์ใช้สารชะละลายชนิดต่างๆเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นต่อไป

5.3.2 ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบในการบ่มคอนกรีตที่มีผลต่อการชะละลายโลหะหนัก

5.3.3 ควรมีการศึกษ้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งต่างๆ เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณสารชะละลายที่มีผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด



รายการอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์ (2553). การจัดการของเสียอันตราย. เทคนิคเครื่องกล ไฟฟ้า อุตสาหกรรม. ปีที่ 27 ฉบับที่ 312 หน้า 108-114.
- จิระนัทร ศรีแสน (2555). ผลกระทบของโครเมียมและสารประกอบโครเมียมต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189
- จิราภรณ์ นิจจันทร์พันธ์ (2543). การศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ในน้ำทิ้งโดยใช้ซีโอไลต์. โครงการวิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยทักษิณ
- ชนัญญา หาวารี (2549). การประเมินศักยภาพการนำกากตะกอนอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์โดยการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ธัญชนก ภารกุล (2551). การชะละลายระยะยาวของโลหะหนักในมอร์ต้าที่ทำด้วยปูนซีเมนต์จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีกากอุตสาหกรรมปนโลหะหนัก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นลิน ชลชาญกิจ (2547). ชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนจากกำรข้อมลัผลละมุดของเกษตรกรจังหวัดสุโขทัย. หน้า 13-16
- ปริญญา จินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2552). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2553). เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). ขอนแก่น: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
- พรพรรณ พนาปวุฒิกุล (2549). โลหะหนัก: ตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม. สารเคมีภัณฑ์
- ยุพา ชาญวิกรัย และประสงค์ เทียนบุญ (2553). เมลามีน. วารสารคลินิกอาหารและโภชนาการ (วคอก) ปีที่ 4 ฉบับที่ 2
- วรวรรณชัย สายวาริน, ชูวิทย์ นาเพีย และธีรวัฒน์ สินศิริ (2553). การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อย. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 หน้า 1-10
- ศุภฤกษ์ ถวิลลาภ (2556). พิษสารโลหะหนัก (Heavy metal poisoning). สรุปรายงานการเฝ้าระวังโรค ประจำปี 2556 . หน้า 154
- ศุภมาศ พินิชศักดิ์พัฒนา (2540). ภาวะมลพิษของดินจากกำรใช้สารเคมี. มหาลัยเกษตรศาสตร์ : กรุงเทพมหานคร.

- สุรชาติพิทย์ อินทรวงศ์ (2545). การเปรียบเทียบวิธีการชะละลายโลหะหนัก จากก้อนหล่อแข็งของเสียมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นวัสดุยึดประสาน. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา และคณะ (2547). การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต. ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 หน้า 5-13.
- โสภภาพรรณ จิรนิติศิษย์ (2534). ปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียมและสังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่าง ๆ ของลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Batchelor, B. (2006). **Overview of waste stabilization with cement.** Waste Management, 26, 689-698.
- Chaitongrat, C. and Siwadamrongpong, S. (2018). **Recycling of melamine in lightweight concrete as aggregate replacement.** Songklanakarin Journal of Science and Technology, 40, 39-45.
- Cheng, K.Y., Bishop, P. (1992). **Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching** Journal Hazardous Waste & Hazardous Materials, 9, 163-171.
- Comer, J.R. (1990). **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes.** Van Nostrand Reinhold, New York.
- Dalton, J.L., Gardner, K.H., Seager, T.P., Weimer, M.L., Spear, J.C.M., and Magee, B.J. (2004). **Properties of Portland cement made from contaminated sediments.** Resources, Conservation and Recycling, 41(3), 227-241.
- Dutre, V. and Vandecasteele, C. (1997). An evaluation of the solidification/stabilization of industrial arsenic containing waste using extraction and semi-dynamic leach tests. Waste Management, 16, 625-631.
- Halim, C. E., Amal, R., Beydoun, D., Scott, J. A., & Low, G. (2003). **Evaluating the applicability of a modified toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) for the classification of cementitious wastes containing lead and cadmium.** Journal of Hazardous Materials, 103(1), 125-140.

- Halim, C. E., Amal, R., Beydoun, D., Scott, J. A., & Low, G. (2004). **Implications of the structure of cementitious wastes containing Pb(II), Cd(II), As(V), and Cr(VI) on the leaching of metals.** *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1093-1102.
- Hasan, S. D., Mohamed, M. Z. and Mohammed, S. (2008). **Hadidoun. Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste.** *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*.
- Hillier, S. R., Sangha, C. M., Plunkett, B. A., & Walden, P. J. (1999). **Long-term leaching of toxic trace metals from Portland cement concrete.** *Cement and Concrete Research*, 29(4), 515-521.
- Li, X. D., Poon, C. S., Sun, H., Lo, I. M. C., & Kirk, D. W. (2000). **Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials.** *Journal of Hazardous Materials*, 82(3), 215-230.
- Malviya, R. and Chaudhary, R. (2006). **Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized product.** *Journal of Hazardous Materials B137*, 207-217.
- Matthew, T. Webster and Raymond, C. Loehr Fellow, ASCE. (1996). **Long-Term Leaching of Metals from Concrete Products.** *Journal of Environmental Engineering*, 122(8), 714-721
- Paul, L. Bishop. (1988). **Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilization /Solidified Hazardous Waste.** *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 5(2), 129-143.
- Pereira, C.F, Galiano, Y.L., Rodriguez-Pinero, M.A., and Parapar, J.P. (2017). **Long and short-term performance of a stabilized / solidified electric arc furnace dust.** *Journal of Hazardous Materials*, 148, 701-707.
- Pojasek, R.B. (1980). **Chemical engineering.** New York, McGraw-Hill, 307-311.
- Sani, D., Moriconi, G., Fava, G., & Corinaldesi, V. (2005). **Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates.** *Waste Management*, 25(2), 177-182.
- Sanusi, O., Tempest, B., Ogunro, V. O. and Gergely, J. (2016). **Leaching Characteristics of Geopolymer Cement Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates.** *Journal of Hazardous Waste and Hazardous Materials*, 20(3).
- Serclerat, I., Moszkowicz, P., & Pollet, B. (2000). **Retention mechanisms in mortars of the trace metals contained in Portland cement clinkers.** *Waste Management*, 20(2), 259-264.

- Spence, R. and Shi, C. (2005). **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Waste**. CRC Press.
- Sophaï, A.C., and Swaminathan, K. (2005). **Assessment of the mechanical stability and chemical leachability electroplating waste**. *Chemosphere*, 58, 75-82.
- Soroushian, P., Eldarwish, A. I., Tlili, A. and Ostowari, K. (1999). **Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete**. *Magazine of Concrete Research*, 51, 27-33.
- Srichaiyo, S., Chaitongrat. C and Siwadamrongpong. S. (2018). **Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Melamine Formaldehyde Waste Using Full Factorial Design**. *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, 59, 1216-1219.
- Todorovic, J. and Ecke, H. (2004). **Diffusion tests for assessment of mobility of inorganic contaminants from solidified incineration residues**. Division of Waste Science & Technology. Luleå University of technology. Luleå. Sweden.
- Van der Sloot, H.A. and Dijkstra, J. J. (2004). **Development of Horizontally Standardized Leaching tests for Construction Materials: A Material Based or Release Based Approach Identical Leaching Mechanisms for Different Materials**. ECN Clean Fossil. ECN-C-04-060.
- Wang, S.Y. and Vipulanadan, C. (1996). **Leachability of Lead from Solidified Cement-Fly Ash Binders**. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 895-905.
- Wiles, C.C. (1990). **Solidification and stabilization technology**, U.S.EPA, USA.
- Xue, Q., et al. (2017). **Investigation of the leaching behavior of lead in stabilized/solidified waste using a two-year semi-dynamic leaching test**. *Chemosphere*, 166, 1-7.



ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Chutpimuk Promchot, Kanchala Sudtachat, Somsak Siwadamrongpong and Chalermchai Chaitongrat. (2019). **Leaching of heavy metals from lightweight concrete containing recycled melamine waste.** INTERNATIONAL CONGRESS ON RECENT ADVANCES IN SCENCES AND TECHNOLOGY. 20-22 February 2019, Kuala Lumpur, Malaysia.

ชัชพิมุข พรหมโชติ, พรพรรณ เนติฉาย, กัญชลา สุดตาชาติ, สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และเฉลิมชัย ไชยขจรรัตน์ (Accepted). อิทธิพลขนาดผลของมวลรวมที่ส่งผลต่อการรับแรงอัดและการชะละลายโลหะหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษของเสียเมลามีน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - เมษายน 2562.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวชัชพิมุข พรหมโชติ เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2537 ที่อำเภอเมืองนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุชนวัฒนา จังหวัดนครสวรรค์ มัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนโพธิสารศึกษา และมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนสตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2559

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2559 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ปรากฏดังภาคผนวก

