การนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยใช้ผงหินปูน-ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

นางสาว นราวัชต์พร นวลสวรรค์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF LABEL WASTE FOR MAKING INTERLOCKING CONCRETE PAVING BLOCK BY USING LIMESTONE POWDER-CEMENT AS BINDER.

Miss Nararatchporn Nuansawan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511743

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ผงหินปูน-ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน
โดย	นางสาว นรารัชต์พร นวลสวรรค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธุ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชวีร์ ลีละวัฒน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นราวัชต์พร นวลสวรรค์ : การนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ผงหินปูน-ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน. (UTILIZATION OF LABEL WASTE FOR MAKING INTERLOCKING CONCRETE PAVING BLOCK BY USING LIMESTONE POWDER-CEMENT AS BINDER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.เพียรพร เชาวกิจเจริญ, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุแทนที่ในมวลรวมละเอียด โดยใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยพิจารณาผลกระทบต่อกระบวนการทำก้อนแข็ง ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมี เช่น การกระจายขนาดคละของมวลรวม ความสามารถในการชะละลาย กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำโดยแปรผันสัดส่วนผสมเป็นร้อยละ 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3.5, 4, 4.5, 5, 7.5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด และแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1 โดยบ่มที่ระยะเวลา 7 และ 28 วันเพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสม ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ10 โดยน้ำหนัก ใช้สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนักตลอดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของวัสดุผสม และพบว่า สัดส่วนวัสดุผสมที่ร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีกำลังรับแรงอัด 55.7 เมกะปาสคาล ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของกระทรวงอุตสาหกรรม นอกจากนี้ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักในน้ำสกัดพบว่าคอนกรีตบล็อก มีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของโลหะหนักทุกชนิดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยต้นทุนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้มีราคา 3.90 บาท มีน้ำหนัก 4.24 กิโลกรัม ต่อก้อนผลิตภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา...2551...

5070570221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: LABEL WASTE/ INTERLOCKING CONCRETE PAVING BLOCK/ LIMESTONE POWDER

NARARATCHPORN NUANSAWAN : UTILIZATION OF LABEL WASTE FOR MAKING INTERLOCKING CONCRETE PAVING BLOCK BY USING LIMESTONE POWDER-CEMENT AS BINDER. ADVISOR : ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAROEN, Ph.D., 125 pp.

This research investigated the utilization of label waste as replacement materials for ingredient in fine aggregate for making interlocking concrete paving block by using limestone powder-cement as binder and determined the factors affecting solidification process in physical and chemical characteristics such as particle size distribution of aggregate, leachability, compressive strength, density and water absorption. A series of experiments was done by varying percent fraction at 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 7.5, 10, and 20 by weight of fine aggregate and varying water to binder ratio was 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1 at 7 and 28 days of curing time. Conditions for making concrete paving blocks were studied by using limestone powder at10 percent by weight replace cement as a binder. A proper ratio of cement : sand : gravel was at 1:1.2:1.8 by weight . The experiment results indicated that by increasing the ratio of label waste to aggregate, consequently, decreasing of fresh concrete's workability. The appropriate aggregate replacement with label waste was at 3.0% by weight of binder, water-binder ratio was at 0.5 by weight and a curing time of 28 days. The proper concrete paving block; had a compressive strength of 55.7 MPa which yielded the physical properties acceptable by the standard of interlocking concrete paving block promulgated by the Ministry of Industry. Moreover; for the extraction test, the concentration of heavy metals were insignificantly lower than that of the standard for concrete paving block. The cost estimation of the aforementioned concrete paving block was at 3.90 baht per 4.24 kilograms of product.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: ...Environmental Engineering... Student's Signature.....Nararatchporn N.....

Field of Study:..Environmental Engineering.... Advisor's Signature.....Petchporn.C.....

Academic Year.....2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถานนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชวีร์ ลีละวัฒน์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีต และทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับความเอื้อเฟื้อทั้งอุปกรณ์ สถานที่ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท แก้วกรุงไทย และบริษัทลิ้มรุ่งเรืองก่อสร้าง ที่อนุเคราะห์วัสดุและข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ความดีของวิทยานิพนธ์ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ อาพร และญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ที่ให้ ความรัก การสนับสนุน ทั้งด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และกำลังใจ ที่มีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน ธัญยธรณ์ ชาริณี ธนพร อิสริยาภรณ์ ศิรน บุญศิริ เพื่อนธรรมศาสตร์ น้องศุภวรรณ น้องฉัตรชัย น้องธัชชา น้องศรุต และน้องวศิน ที่คอยช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฎ

สารบัญภาพ.....ฐ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....ฑ

บทที่

1. บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....1

1.2 ขอบเขตของการวิจัย.....2

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีต.....3

2.1.1 ปูนซีเมนต์.....3

2.1.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น.....6

2.1.3 ผงหินปูน.....9

2.1.3.1 คุณสมบัติของผงหินปูน.....9

2.1.3.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมี.....10

2.1.3.3 การนำไปใช้งาน.....11

2.1.3.4 การผสมผงหินปูนในมอร์ตา.....11

2.1.4 น้ำ.....11

2.1.5 วัสดุผสม.....13

2.2 ส่วนผสมของวัสดุผสม.....14

2.3 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสม.....14

2.3.1 ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์.....14

2.3.2 ความถ่วงจำเพาะแท้จริง.....15

2.3.3 ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง.....15

2.3.4 ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง.....15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.4 ความสามารถในการทำงานได้ 15
2.5 คอนกรีตบล็อก 16
2.5.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง 17
2.5.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 17
2.5.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 19
2.6 ของเสียประเภทฉลาก 21
2.7 โลหะหนักที่คาดว่าจะพบในหมึกพิมพ์ฉลากบรรจุภัณฑ์ 21
2.7.1 โลหะหนัก 22
2.8 การกำจัดโดยการทำเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง 25
2.8.1 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำเสถียร 25
2.8.2 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำก้อนแข็ง 26
2.8.3 วิธีทำก้อนแข็ง 26
2.8.4 กลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง 27
2.8.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำก้อนแข็ง 28
2.8.6 วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท 28
2.8.7 การออกแบบสถานที่ฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว 29
2.9 ความสามารถในการถูกชะละลาย 30
2.9.1 การทดสอบการชะละลาย 30
2.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย 33
3. แผนการดำเนินงานวิจัย
3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับทำวิจัย 39
3.1.1 วัตถุดิบ 39
3.1.2 สารเคมี 40
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ 40
3.1.3.1 การหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง 40
3.1.3.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย 41
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย 43
3.2.1 ตัวแปรอิสระ 43
3.2.2 ตัวแปรตาม 44
3.2.3 ตัวแปรควบคุม 44

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.3 การดำเนินงานวิจัย....44
3.3.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย....44
3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างของเสียประเภทฉลาก....44
3.3.1.2 การเตรียมวัสดุผสม....44
3.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย....44
3.3.2.1 การหาความหนาแน่นปกติของเสียประเภทฉลาก....44
3.3.2.2 การหาองค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก....45
3.3.2.3 วิเคราะห์สมบัติลักษณะสารกัดกร่อนในของเสียประเภทฉลาก....45
3.3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก....45
3.3.2.5 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุผสม....46
3.3.2.6 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ....46
3.3.3 ศึกษาความเหมาะสมในการผลิตบล็อกประสานปูพื้น....46
3.3.3.1 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สัดส่วนวัสดุผสม กำลังรับแรงอัด ระยะเวลาบ่ม....46
3.3.3.2 ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นประเภทเภทอัฐศิลา....47
3.4 ผังสรุปแผนงานวิจัย....48
3.5 ประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น....48
4. ผลการทดลองและการวิจารณ์
4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับทำวิจัย....49
4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย....50
4.2.1 การหาความหนาแน่นปกติของของเสียประเภทฉลาก....50
4.2.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก....50
4.2.3 การวิเคราะห์หาส่วนประกอบของโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก....50
4.2.4 การวิเคราะห์ค่าพีเอช ของน้ำชะละลายในของเสียประเภทฉลาก....51
4.2.5 จัดรหัสของชนิดและประเภทสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว....52
4.2.6 การวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุผสม....52
4.2.7 การหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวม....54
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น....55
4.3.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนของของเสียประเภทฉลากที่ใช้ต่อมวลรวมละเอียด ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น....55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.3.2 ค่ากำลังรับแรงอัด..... 58
4.3.3 ค่าความหนาแน่น..... 60
4.3.4 การดูดซึมน้ำ..... 61
4.4 สมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปอัฐศิลา..... 63
4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตอิฐบล็อกประสานปูพื้น..... 64
5. สรุปผลการวิจัย..... 67
6. ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม
6.1 ประโยชน์ในทางประยุกต์ใช้..... 68
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม..... 68
รายการอ้างอิง..... 70
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีทดสอบอย่างละเอียด..... 76
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง..... 89
ภาคผนวก ค มาตรฐานที่ใช้ในการวิจัย..... 104
ภาคผนวก ง การคำนวณ..... 119
ภาคผนวก จ ข้อมูลราคาวัสดุที่ใช้ในการวิจัย..... 122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 125

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของคอนกรีต 3
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....5
ตารางที่ 2.3 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักปริมาณ 80%.....8
ตารางที่ 2.4 แสดงร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของผงหินปูน.....10
ตารางที่ 2.5 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ.....13
ตารางที่ 2.6 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น..... 20
ตารางที่ 2.8 รายละเอียดกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง 25
ตารางที่ 2.9 รายละเอียดวิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท.....26
ตารางที่ 2.10 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายแบบแบตท์ และ แบบคอลัมน์..... 30
ตารางที่ 3.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสถานะต่างๆ.....43
ตารางที่ 4.1 ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก..... 48
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองขนาดคละของมวลรวม และโมดูลัสความละเอียด..... 49
ตารางที่ 4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและการดูดซึม..... 51
ตารางที่ 4.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและการดูดซึม..... 51
ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน.....54
ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน..... 56
ตารางที่ 4.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน.... 58
ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะหนักในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.....59
ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปอัฐศิลา.....60
ตารางที่ 4.10 ราคาต่อหน่วยกิโลกรัมของวัตถุดิบ.....61
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ.....62
ตารางที่ 4.12 ราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้นรับน้ำหนักต่อก้อน..... 62
ตารางที่ 4.13 ราคาในการกำจัดของเสียประเภทฉลากปริมาณ 1 ตัน.....63
ตารางที่ ก.1 ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้.....76
ตารางที่ ข.1 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 88
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองขนาดคละของมวลรวมและโมดูลัสความละเอียด.....89

หน้า

ตารางที่ ข.3 ความหนาแน่นที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....90
ตารางที่ ข.4 ความหนาแน่นที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0.....91
ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและการดูดซึม.....93
ตารางที่ ข.6 แสดงผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะ ของมวลรวมหยาบและการดูดซึม.....94
ตารางที่ ข.7 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของของเสียประเภทฉลาก.....95
ตารางที่ ข.8 ค่าความหนาแน่นของของเสียประเภทฉลาก.....95
ตารางที่ ข.9 องค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก.....95
ตารางที่ ข.10 ร้อยละการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5.....96
ตารางที่ ข.11กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....98
ตารางที่ ข.12 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....100
ตารางที่ ข.13 ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก เมื่อวิเคราะห์ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น.....102
ตารางที่ ข.14 ปริมาณโลหะหนักในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นวิเคราะห์ด้วยวิธี (WET)..... 104
ตารางที่ ข.15 สมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ 28 วัน..... 105
ตารางที่ จ.1 ข้อมูลราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ขนาดอนุภาคของผงหินปูน....9
รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดช่วงแรกขณะเริ่มเกิดปฏิกิริยา.... 10
รูปที่ 2.3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังเกิดปฏิกิริยาได้ 10 ชั่วโมง.... 10
รูปที่ 2.4 คอนกรีตผสมผงหินปูนอายุ 7 วัน 10
รูปที่ 2.5 คอนกรีตล้วนอายุ 7 วัน.... 11
รูปที่ 2.6 คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ.... 18
รูปที่ 2.7 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้นแต่ละชนิด 19
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของเสียประเภทฉลากซึ่งใช้ในงานวิจัย.... 21
รูปที่ 3.1 ลักษณะของผงหินปูน ทรายละเอียด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.... 40
รูปที่ 3.2 ของเสียประเภทฉลากที่ใช้ในการวิจัย 40
รูปที่ 3.3 แบบหล่อที่ใช้ในงานวิจัย.... 42
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด 43
รูปที่ 3.5 โต๊ะเขย่าสารมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.... 43
รูปที่ 3.6 เครื่องเขย่าคัดขนาด.... 46
รูปที่ 3.7 แผนผังสรุปงานวิจัย.... 48
รูปที่ 4.1 ส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้ในงานวิจัย.... 53
รูปที่ 4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน.... 57
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน.... 57
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5.... 59
รูปที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตเมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก
ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28.... 59
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน.... 61
รูปที่ 4.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน.... 62
รูปที่ 4.8 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.... 64
รูปที่ ก.1 ลักษณะการกองของเสียประเภทฉลากให้เป็นรูปกรวยก่อนที่จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน.. 85
รูปที่ ก.2 การแบ่งของเสียประเภทฉลากเป็น 4 ส่วน และเลือกสุ่มมา 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน.... 85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B	=	วัสดุประสาน (Binder)
C_3A	=	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$)
C_4AF	=	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)
C_2S	=	ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$)
C_3S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$)
C-S-H	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ ซีเมนต์เจล
ICP-ES	=	Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy
LP	=	ผงหินปูน (Limestone Powder)
TCLP	=	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
W	=	น้ำ
WET	=	Waste Extraction Test

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา ดังนั้นการขยายตัวอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรมจึงเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ยังส่งผลให้เกิดสิ่งปฏิกูลอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัญหาที่ตามมาคือปัญหามลภาวะ ซึ่งของเสียประเภทฉลากที่ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิดมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนและบางประเภทจัดเป็นของเสียอันตราย จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ การจัดการของเสียในปัจจุบัน คือการทำให้เป็นของแข็ง (Solidification) การทำให้เสถียร (Stabilization) ก่อนส่งไปยังหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) เนื่องด้วยประเทศไทยมีการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พื้นที่สำหรับฝังกลบมีอย่างจำกัด วิธีการกำจัดดังกล่าวจึงไม่ใช่วิธีเหมาะสมอีกต่อไป แนวคิดการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จะช่วยลดปริมาณของเสียที่จะนำไปกำจัด และเป็นการควบคุมปัญหามลภาวะในระยะยาว ดังนั้นหากนำของเสียชนิดนี้มาใช้ประโยชน์แทนการจัดการรูปแบบเดิม เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ก็เท่ากับเป็นการลดปริมาณของเสียอย่างดีอีกวิธีหนึ่งและเป็นการเพิ่มมูลค่าโดยใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ตลอดจนแนวทางในการนำของเสียประเภทฉลากจากอุตสาหกรรม มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยใช้ผงหินปูนร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน
2. ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ เมื่อเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทั่วไป และคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก
3. ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น จากของเสียประเภทฉลาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองลักษณะทางกายภาพที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยีภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล

1. ของเสียที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ได้แก่ ของเสียประเภทฉลากจากอุตสาหกรรมล้างขวดแก้วโรงงานแก้วกรุงไทย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยต้องทำการไล่ความชื้นและบดที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ร่อนผ่านตะแกรงที่ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแปรค่าอัตราส่วนในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเป็น 0 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของทราย โดยศึกษาความเป็นกรด ด่าง และความสามารถในการชะละลายโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 ปี พ.ศ. 2548 เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน โดยทำการส่งตัวอย่างสารละลายวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1
3. ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด ในอัตราส่วน 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก โดยการทดสอบครั้งละ 3 ตัวอย่างตลอดการทดลอง บ่มด้วยน้ำที่ 7 และ 28 วันรวมทั้งสิ้น 64 ชุดการทดลอง 192 ตัวอย่าง
4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย วิเคราะห์ความหนาแน่นปกติ หาองค์ประกอบ ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก การกระจายขนาดคละ ความถ่วงจำเพาะ และร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อการใช้งานด้านโครงสร้าง และเป็นวัสดุที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะตามต้องการและเหมาะสมกับงาน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบประการหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่นไม้ อิฐ หรือเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ น้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัสดุประสาน รวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ กับทราย หิน หรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ตราบเท่าที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณ 25-40 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแยกออกเป็นปริมาตรของซีเมนต์ 7 -15 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 14-21 เปอร์เซ็นต์ และฟองอากาศแทรกอยู่ในช่องว่างประมาณ 0.5-3 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือจะเป็นปริมาตรของวัสดุผสม (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสม หล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงาน ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัวและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามความต้องการได้	1. ความสามารถรับแรงดึงต่ำ
2. ราคาถูก	2. มีความยืดตัวต่ำ
3. มีความทนทานสูง	3. มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
4. ทนไฟได้ดี และไม่ไหม้ไฟ	4. อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ
5. สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง	

2.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูนหรือดินปูนขาวกับดินเหนียวหรือดินดาน) จนรวมตัวกันจนสุกพอดี

มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียม และอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนขาวซีเมนต์ที่กล่าวนี้หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮโดรลิก (Hydraulic Cement) ที่ผสมกับน้ำตามส่วน และสามารถก่อตัว และแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงทนทาน เมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์เรียกในทางวิชาการว่า "ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)" ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปติน โดยในปี ค.ศ.1824 นายโจเซฟได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่งซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว เมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากการรวมกับน้ำและตัวจะมีสีเหลืองเทาคล้ายหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ขณะนั้นยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวกันไม่ดี (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไปประกอบด้วยสารประกอบดังนี้

ก. **ไตรคัลเซียมซิลิเกต** (C_3S)

มีชื่อย่อว่า C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3 เหมือนคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S จะถูกกระทบโดยยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55%

ข. **ไตรคัลเซียมซิลิเกต** (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายแบบมีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัวที่อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดย ปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆแต่ในระยะยาว จะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35%

ค. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set ทำได้โดยเติมยิปซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A ประมาณ 7-15%

ง. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF ประมาณ 5-10%

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (ชม.)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2.การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 จูล/กรัม)	น้อย (250 จูล/กรัม)	สูงมาก (850 จูล/กรัม)	ปานกลาง (420 จูล/กรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ตัวอย่างสารประกอบรองของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารต่อไปนี้

ก. ยิปซัม ($CaSO_4 . 2H_2O$)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะขึ้นอยู่กับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และK_2O
- ปริมาณ C_3A
- ความละเอียดของปูนซีเมนต์

ข. ปูนขาว (CaO)

ปูนขาว เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

- เมื่อวัตถุดิบมีหินปูนมากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , AL_2O_3 , Fe_2O_3 ได้ทั้งหมด
- ปริมาณหินปูนมีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับ Oxide ต่างๆ ไม่สมบรูณ์ ปูนขาว ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตเกิดการ แตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจากหินปูน

ค. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัว ให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูป MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเหมือนกับ CaO คือปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้ เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
- ขนาดของ MgO ถ้าเล็กมากๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้เร็วโดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

ง. อัลคาไลท์ออกไซด์ (Na_2O, K_2O)

อัลคาไลท์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสียในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ออกไซด์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลของปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวต้นให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นจะต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลท์ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลท์ต่ำ

2.1.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction)

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

ก. อาศัยสารละลายซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

ข. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า Solid State Reaction

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นทั้ง2ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรกดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

คัลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate(CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปและสมการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

$$2(CaO.SiO_2)+6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+3Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_3S+6H \rightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$$

$$2(CaO.SiO_2)+4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O+Ca(OH)_2$$

หรือ $$2C_3S+4H \rightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$$

$Ca(OH)_2$ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี พีเอช ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กสนิมได้อย่างดีมาก

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์ดังสมการ

$$3CaO.Al_2O+6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

หรือ $$C_3A+6H \rightarrow C_3AH_6$$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

$$C_3A+CaSO_4.2H2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O \text{ (Ettingite)}$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A และ C_2A เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากเพิ่มปริมาณของของแข็งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่งขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะ

ก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4CaO.Al_2O_3.CaSO_4.2H_2O+Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3,Fe_2O_3).3CaSO_4$$

เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นปริมาณ 80% ของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักปริมาณ 80%

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

ที่มา: กฤษฎา ปัญญาภรบดี และคณะ (2542)

2.1.3 **ผงหินปูน** (Limstone powder)

หินปูนประกอบด้วยตะกอนของซากสัตว์ และสารเคมีที่ตกตะกอนซึ่งเป็นองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต หินปูนถูกค้นพบครั้งแรกบริเวณท่าเรือน้ำลึกแถวมิชิแกน ตามบทความที่บันทึกไว้ (www.reade.com/Products/Minerals_and_Ores/limestone.html [1997]) ซึ่งได้อ้างอิงจากหนังสือธรณีวิทยาของมิชิแกนที่แต่งโดย Louis Vicat วิศวกรชาวฝรั่งเศสในช่วงปี 1830-1840 หินปูนมีการกำเนิดที่แตกต่างกันหลายวิธี

วิธีแรกจะเกิดจากสภาวะน้ำขึ้น-น้ำลงจนเกิดการตกตะกอนขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปก็จะเกิดหินปูนจำนวนมากขึ้นดังจะเห็นได้บริเวณอ่าวจอดเรือของมิชิแกน

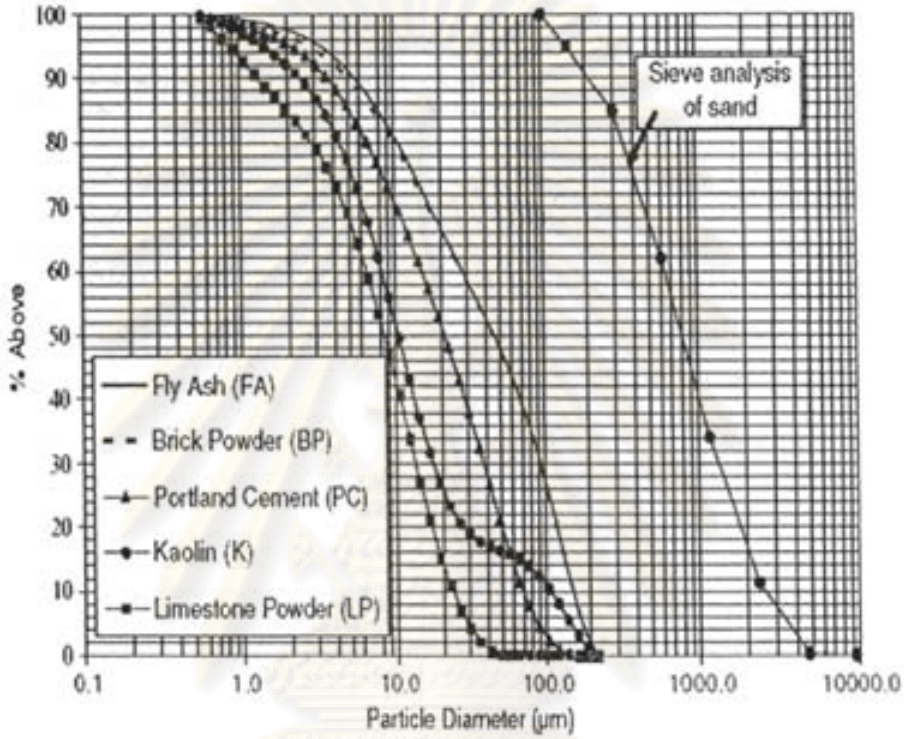
วิธีที่สองเป็นผลมาจากแบคทีเรียและพืชเซลล์เดียวชนิดหนึ่งซึ่งจะทำปฏิกิริยาและเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นส่วนประกอบของหินปูน

วิธีที่สามเกิดจากการวางตัวทับซ้อนเป็นชั้นๆ และมีแรงกดมหาศาลกับส่วนประกอบของหินปูนที่ได้จากซากพืชซากสัตว์

2.1.3.1 **คุณสมบัติของผงหินปูน**

ขนาดอนุภาคของผงหินปูนแบบแห้งพบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจากถ่านหินดังแสดงในรูปที่ 2.1

ขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของผงหินปูนพบว่าองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งแตกต่างจากปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ



รูปที่ 2.1 ขนาดอนุภาคของผงหินปูน (Sahmaran และคณะ, 2005)

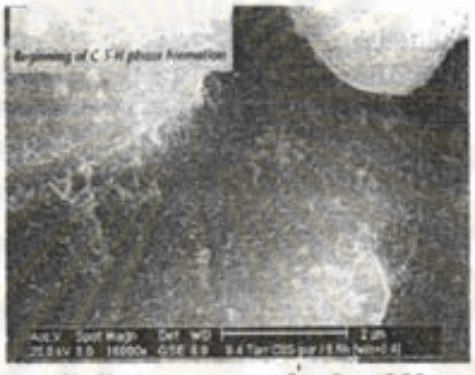
ตารางที่ 2.4 แสดงร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี (Hetal, 2002)

ออกไซด์	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	หินปูน
CaO	62.78	51.45
SiO_2	20.22	5.42
Al_2O_3	5.34	0.59
Fe_2O_3	3.20	0.2
MgO	2.26	1
SO_3	2.38	0.17
Na_2O	0.29	0.24
K_2O	0.11	0.02

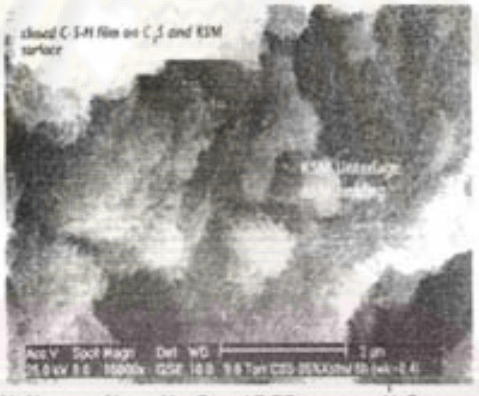
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3.2 **การเกิดปฏิกิริยาเคมี**

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ และผงหินปูนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่าการใช้ผงหินปูนจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้กับปูนซีเมนต์ดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 โดยพบว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Ca^{2+}) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

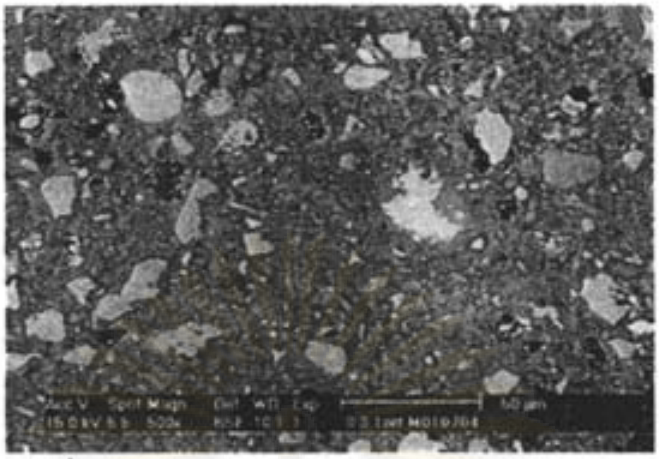


รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังรับแรงอัดอัดช่วงแรกขณะเริ่มเกิดปฏิกิริยา (Omya Company, 2004)



รูปที่ 2.3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังเกิดปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง (Omya Company, 2004)

รูปที่ 2.4 คอนกรีตผสมผงหินปูนอายุ 7 วัน (De Schutter, 2006)



รูปที่ 2.5 คอนกรีตล้วนอายุ 7 วัน (De Schutter, 2006)

2.1.3.3 **การนำไปใช้งาน**

แนวทางในการนำไปใช้ของผงหินปูนพบว่าสามารถนำไปใช้ได้ในงานหลายประเภทขึ้นกับคุณภาพและปริมาณการปนเปื้อนของหินปูน ตัวอย่างการนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้ เช่น การใช้ในงานพลาสติก ยางมะตอย เป็นส่วนประกอบของแก้ว ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นส่วนประกอบของยาฆ่าแมลง ลวดเชื่อมโลหะ ยา ยาสีฟัน ผลิตภัณฑ์เหล็กและในกระบวนการของโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนผสม อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ในการสกัดน้ำตาล ส่วนผสมของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกด้วย อาทิ เช่น เป็นส่วนผสมของอิฐและใช้ผสมในงานมอร์ตาและคอนกรีต

2.1.3.4 **การผสมผงหินปูน ในมอร์ตา**

การผสมผงหินปูนในมอร์ตาแยกเป็น 2 วิธีหลักดังนี้

ก. การแทนที่ (Replacement Method) โดยการใช้ผงหินปูนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์โดยแทนที่ทั้งปริมาตรหรือน้ำหนัก

ข. การผสมเพิ่ม (Addition Method) โดยใส่ผงหินปูนเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตเลย วิธีนี้นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถในการทำงานและกำลังอัดของคอนกรีต

2.1.4 **น้ำ**

น้ำสำหรับผสมคอนกรีตมีหน้าที่หลักคือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยให้ส่วนผสมมีความลื่น มีความข้นเหลวพอดีสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ ดังนั้นคุณภาพและปริมาณน้ำจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตจะต้องเป็นน้ำที่สะอาด ไม่มี

น้ำมัน กรด ด่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ส่วนล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตได้ เช่น ระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด หรือทำให้คอนกรีตมีสีผิวที่ไม่สม่ำเสมอ

ตะกอนที่ทำให้เกิดความขุ่นเกินมาตรฐาน อาจทำให้ต้องใช้น้ำปริมาณมากกว่าปกติ เกิดการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หรือในบางครั้งอาจทำให้เกิดคราบเกลือที่ผิวคอนกรีต (Efflorescence) น้ำตาล ไนเตรท กรดแทนนิค และสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ช้าลง และค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อีกทั้งยังอาจทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมากจนกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในขณะที่คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วเกินไป คอนกรีตที่ได้จึงกำลังรับแรงอัดต่ำ น้ำที่มีซัลเฟตปนอยู่เพียงปริมาณเล็กน้อย สามารถทำให้คอนกรีตกำลังลดลงได้เช่นกัน (ประณต กุลประสูตร, 2541) ปริมาณซัลเฟตที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วันลดลง แต่อาจส่งผลให้การก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีตเร็วขึ้นเนื่องจากเกลือของซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของแอตทริงไจท์ช้าลง ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2540) กล่าวว่าสารละลายเกลืออินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของ สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟต อาร์ซีเนต และบอเรต โดยอนุโลมให้น้ำมีระดับความเข้มข้นของสารเหล่านี้ได้ไม่เกิน 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งสารละลายดังกล่าวพบมากในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ผ่านระบบบำบัด หรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่

ตารางที่ 2.5 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ปริมาณซัลเฟตในน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	กำลังของคอนกรีตที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
0.5	4
1.0	10
มากกว่า 10	ไม่ควรใช้ในการผสมคอนกรีตเนื่องจากทำให้กำลังลดลงอย่างมาก

น้ำที่มีความเป็นกรดหรือด่างเพียงเล็กน้อย อาจไม่ทำให้เกิดปัญหากับคอนกรีต ขณะที่น้ำที่มีปริมาณโซเดียมหรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เกิน 500 ส่วนในล้านส่วนอาจทำให้เกิดการก่อตัวเร็วและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง

คอนกรีตต้องการน้ำปริมาณเพียงพอเพื่อให้สามารถลื่นไหลเข้าแบบหล่อได้ แต่การใส่ปริมาณน้ำมากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว ซึ่งอาจมีความสะดวกต่อการเทแต่ค่ากำลัง

รับแรงอัดที่ได้จะมีค่าต่ำลง จากตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

น้ำสำหรับการบ่มเป็นน้ำที่คอนกรีตต้องการในขณะที่แข็งตัวแล้ว ต้องเป็นน้ำสะอาด เพื่อป้องกันการผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต และรอยเปื้อนที่ผิวอันเกิดจากการใช้น้ำสกปรกบ่มคอนกรีต ส่วนน้ำสำหรับการใช้ล้างวัสดุนั้นไม่จำเป็นต้องสะอาดเหมือนกับน้ำสำหรับส่วนผสม และบ่ม แต่ก็ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอสมควร ไม่มีฝุ่น เกลือ หรือสารอินทรีย์ปนอยู่ เพราะอาจเคลือบผิววัสดุผสมและทำให้คอนกรีตที่ได้กำลังอัดลดลงหรือแข็งตัวช้า

2.1.5 **วัสดุผสม** (Aggregate)

วัสดุผสม หรือบางครั้งเรียกว่ามวลรวม เป็นวัสดุเฉื่อยที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีต โดยจะแทรกประสานกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ มีปริมาณ 70 – 80 เปอร์เซ็นต์ ของส่วนผสมทั้งหมด วัสดุผสมโดยทั่วไปได้แก่ หินย่อย กรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมี ความคงทน ความแข็งแรง (Durability) เพราะวัสดุผสมโดยทั่วไปในธรรมชาติสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าคอนกรีต(วัสดุผสมโดยทั่วไปสามารถรับแรงกดได้ 700 – 3500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ปริมาตรของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (Volume stability) และที่สำคัญยังช่วยให้คอนกรีตมีราคาถูกลง กำลังและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมหลายอย่างมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกวัสดุผสมที่เหมาะสมไม่เพียงประหยัด ยังเท่ากับเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย วัสดุผสมที่ใช้งานคอนกรีตสามารถจำแนกเป็นสองประเภทตามขนาดคือ

ก. วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates) เป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) ได้ แต่ต้องไม่เล็กจนเป็นฝุ่น (0.07 มิลลิเมตร) หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 วัสดุผสมที่ละเอียดที่นิยมใช้คือ ทรายธรรมชาติ และควรเป็นทรายน้ำจืดที่สะอาด มีเหลี่ยมคม และขนาดของเม็ดสม่ำเสมอ

ข. วัสดุผสมหยาบ (Coarse aggregate) คือ วัสดุส่วนใหญ่ที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 อาจมีบางส่วนที่ละเอียดอยู่บ้างแต่ต้องไม่เกินมาตรฐานกำหนด วัสดุผสมหยาบได้แก่ หินย่อย หรือ กรวด หินที่เหมาะในการทำคอนกรีตต้องมีเหลี่ยมมุมแข็ง ผิวขรุขระ ยึดหดตัวต่ำ และทนต่อการสึกกร่อนได้ดี และมีส่วนคละที่เหมาะสม ขนาดของหินโดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่จะอยู่ในช่วง 4.76 – 76.20 มิลลิเมตร (3/16 – 3 นิ้ว) โดยสามารถแบ่งออกเป็นหินย่อยเบอร์ 1 ซึ่งมีขนาด 4.76 – 19.05 มิลลิเมตร (3/16 – 3/4 นิ้ว) หินย่อยเบอร์ 2 มีขนาด 19.05 – 38.10 มิลลิเมตร (3/4 – 1 ½ นิ้ว) และหินย่อยเบอร์ 3 ที่มีขนาดตั้งแต่ 38.10 – 76.20 มิลลิเมตร (1½ - 3 นิ้ว) วัสดุผสม

ต้องมีรูพรุนพอที่จะสามารถดูดซับน้ำและเป็นที่สำหรับการขยายตัวของน้ำเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต

2.2 **ส่วนคละของวัสดุผสม** (Gradation)

ส่วนคละมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละก้อนหรืออนุภาคของวัสดุผสมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่าวัสดุผสมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้วัสดุผสมหยาบและละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมกัน เพื่อให้วัสดุผสมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุผสมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุผสมเข้าไว้ด้วยกัน และอุดช่องว่างระหว่างวัสดุผสม ประณต กุลประสูตร (2541) กล่าวว่า ส่วนคละของวัสดุผสมมีผลต่อเนื้อ และคุณภาพคอนกรีต ปกติอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบกำหนด โดยให้ปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดมากกว่าปริมาตรช่องว่างในวัสดุผสมหยาบประมาณร้อยละ 5 โดยช่องว่างระหว่างวัสดุหยาบอาจมีมากถึงร้อยละ 45 ของปริมาตรวัสดุหยาบแห้ง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะมีการกำหนดปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดให้เท่ากับประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบที่แห้ง แต่เพื่อให้ส่วนผสมของคอนกรีตง่ายต่อการเท จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมหยาบไว้โดยอยู่ระหว่าง 1 : 1 ½ ถึง 1 : 2 ½

2.3 **ความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสม** (Specific Gravity)

ความถ่วงจำเพาะหมายถึงอัตราส่วนของน้ำหนักมวลรวมในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

ค่าความถ่วงจำเพาะของหินทรายขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของมวลรวมและปริมาณช่องว่างของมวลรวม โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 2.4-3.0 ความถ่วงจำเพาะแบ่งออกเป็น หลายประเภท ดังนี้

2.3.1 **ความถ่วงจำเพาะสัมบูรณ์** (Absolute Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งที่ชั่งในอากาศของมวลรวม เทียบกับมวลรวมโดยไม่รวมช่องว่างในมวลรวมทั้งที่เป็นช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ (Capillary pores) และชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นในการหาค่าดังกล่าวจึงต้องทำการบดวัสดุให้ละเอียดก่อน เพื่อป้องกันการนำช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable Pores) มาคิด แต่การหาโดยวิธีดังกล่าว มีความละเอียดเกินไปในงานคอนกรีต ดังนั้นในงานคอนกรีตทั่วไปจะถือว่าช่องว่างใน มวลรวมชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable Pores) นั้นถือเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม โดยช่องว่างในมวลรวม ที่จะกล่าวต่อไปสำหรับการทดสอบนี้ คือ ช่องว่างชนิด ที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores)

2.3.2 **ความถ่วงจำเพาะแท้จริง** (Apparent Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศ เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวมโดยไม่รวมช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\text{น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวมที่ไม่รวมช่องว่างในมวลรวม}}$$

2.3.3 **ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง** (Bulk Specific Gravity-Oven Dry) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวมโดยรวมส่วนที่เป็นเนื้อแข็งและช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\text{น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวม + ช่องว่างในมวลรวม}}$$

2.3.4 **ความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง** (Bulk Specific Gravity-Saturated Surface Dry) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่ชั่งในอากาศของมวลรวม กับน้ำหนักของน้ำภายในช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Capillary pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยสรุปมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\text{น้ำหนักมวลรวมอบแห้ง + น้ำหนักน้ำในช่องว่าง}}{\text{น้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับ เนื้อมวลรวม + ช่องว่างในมวลรวม}}$$

การคำนวณค่าต่าง ๆ ในงานคอนกรีตโดยปกตินั้นถือว่ามวลรวมนั้นอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) เนื่องจากน้ำที่ถูกกักอยู่ในช่องว่างในมวลรวมนั้นไม่ได้มีส่วนในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์เหมือนน้ำที่อยู่ที่ผิว (Free Water) ดังนั้นจึงถือว่าน้ำดังกล่าวนั้นเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม

2.4 ความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

ความสามารถในการทำงานได้เป็นสมบัติประการหนึ่งของคอนกรีตสด ซึ่งมีความสำคัญมาก **ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร** (2539) ได้ให้เหตุผลว่าสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่นค่ากำลังรับแรงอัด การคงตัว ความทนทาน และการซึมของน้ำ เป็นผลมาจากการอัดแน่น และการทำให้คอนกรีตอัดแน่น รวมไปถึงการขนส่ง การเทลงแบบ และการแต่งผิวหน้าโดยไม่มีการแยกตัว (segregation) ซึ่งล้วนแต่เป็นผลมาจาก ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดทั้งสิ้น

โดยนิยามแล้วความสามารถในการทำงานได้ คือปริมาณงานที่ใช้ในการอัดคอนกรีตให้แน่นโดยปราศจากการแยกตัว หรือ ผลรวมของพลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค

ที่จะก่อให้เกิดการอัดแน่นของคอนกรีตอย่างสมบูรณ์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539) แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะสามารถวัดค่าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะแปรผันกับปริมาณช่องว่างที่แทรกอยู่ระหว่างเนื้อคอนกรีต โดยช่องว่างนี้จะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อยลง และส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมากช่องว่างที่เกิดขึ้นเพียงร้อยละ 5 สามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงได้ถึงร้อยละ 30 ช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ช่องว่างที่เกิดจากการจี้เขย่าไม่ดี (Entrapped air) และที่เกิดจากน้ำส่วนเกิน (Excess water) ที่ระเหยออกไป การลดช่องว่างทำได้โดยเลือกใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ วัสดุผสมที่มีส่วนคละดี และที่สำคัญต้องมีการจี้เขย่าคอนกรีตอย่างถูกต้อง และเพียงพอ

การเพิ่มปริมาณของน้ำในส่วนผสมทำให้เกิดการหล่อลื่นของอนุภาคมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีตที่แข็งตัวมากขึ้นด้วย ดังนั้นควรหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม หินและทรายที่มีส่วนคละดีสามารถทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้นถ้าอัตราส่วนผสมต่อซีเมนต์มีค่าลดลง และการใช้ทรายในส่วนผสมมากเกินไปอาจทำให้การทำงานง่ายขึ้น แต่ก็เป็นการสิ้นเปลืองปริมาณซีเมนต์ ถ้าคงค่ากำลังรับแรงอัดไว้เท่าเดิม (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

Rusch (1960) (อ้างถึงโดย Nilson,1997) กล่าวว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอย่างสมบูรณ์นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 25 ของซีเมนต์ แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องเติมน้ำมากขึ้นกว่าสัดส่วนดังกล่าว เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของน้ำในซีเมนต์เพสต์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6

2.5 คอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยใช้ก่อเป็นผนังกั้นหรือกำแพงทั้งภายใน และภายนอกของอาคาร หรือปูเป็นพื้นทางเท้า พื้นถนนเป็นต้น ด้วยสมบัติการทนไฟและระบายความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ขนาดคุณภาพได้มาตรฐาน ทำให้คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากต่องานก่อสร้างคอนกรีตบล็อกที่ดีต้องมีสมบัติได้มาตรฐานที่กำหนดโดย สมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (The American Society for Testing and Materials, ASTM) หรือตามมาตรฐาน มอก.ของประเทศไทยที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อก หมายถึงแท่งคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสม ที่เหมาะสมชนิดต่างๆ เช่น ทราย กรวด หินย่อย และบางครั้งอาจมีสารอื่นที่เหมาะสมปนอยู่ด้วย อัดเข้าแบบมาตรฐานเป็นบล็อกต่างๆ คอนกรีตบล็อกสามารถแบ่งออกกว้างๆ ตามประโยชน์ในการใช้สอยเป็นคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง และคอนกรีตบล็อกสำหรับปูพื้น

2.5.1 **คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง**

คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนังสามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวง (Hollow concrete block) ซึ่งเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีลักษณะกลวงแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถรับน้ำหนักได้ (Load bearing block) ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง และชนิดที่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้ (Non-load bearing block) โดยไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกใดๆ ได้นอกจากน้ำหนักคอนกรีตบล็อกเอง รูปที่ 2.6 แสดงคอนกรีตบล็อกแบบกลวงมาตรฐานที่มีการผลิตและใช้ในประเทศไทย

คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบตัน (Solid concrete block) เป็นคอนกรีตบล็อกที่ผลิตเฉพาะชนิดสามารถรับน้ำหนักได้เท่านั้น

2.5.2 **คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น** (Interlocking concrete paving block)

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีลักษณะเป็นก้อนคอนกรีตตัน ที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้อย่างต่อเนื่อง มีสีตามธรรมชาติหรืออาจมีผงสีเจือปนอยู่ทั้งบล็อกผลิตเฉพาะที่ชั้นผิวหน้าและมีรูปแบบใดก็ได้ เหมาะสำหรับใช้ปูพื้นเช่น ถนน ทางเท้า ลานจอดรถ และลานกองเก็บวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างชั้นพื้นและชั้นรองพื้นให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน

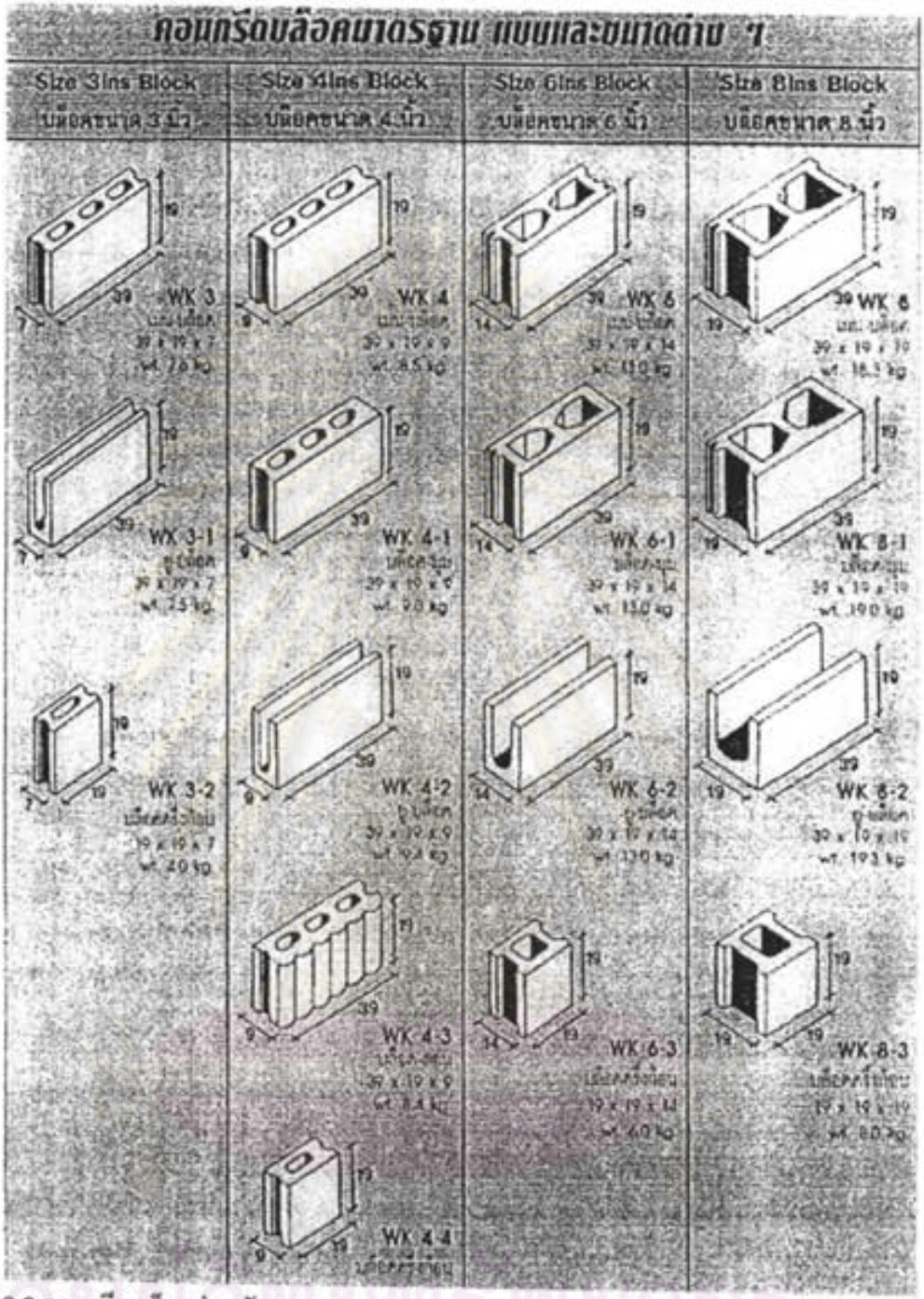
ชนิด และขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภท โดยพิจารณาถึงลักษณะ รูปร่างของคอนกรีตบล็อกซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิตดังนี้

ก. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพ็ค 6 เซนติเมตร สำหรับปูทางเท้า และจอดรถถนนภายในอาคาร

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพ็ค 10 เซนติเมตร สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง อาทิ ลานจอดรถในโรงงาน พื้นโกดังสินค้า ถนนสาธารณะ

ค. ขอบคันหินซีแพ็ค สำหรับก่อทำขอบคันทางเดินหรือขอบของถนนที่ปูด้วยบล็อกชนิดนี้ ให้มีความเรียบร้อยสวยงาม

ง. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปตัว "ไอ" เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการปูข้อนเพื่อทำพื้นถนน



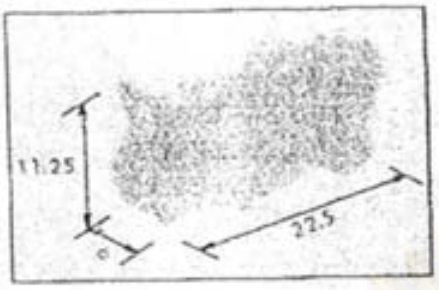
รูปที่ 2.6 คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวงมาตรฐาน แบบและขนาดต่างๆ (หฤษฎ์ ธิตินันท์, 2546)

รายละเอียดของบล็อกแต่ละชนิดให้ดูจากรูป 2.7 ประกอบโดยมีหลักในการเลือกใช้ดังนี้

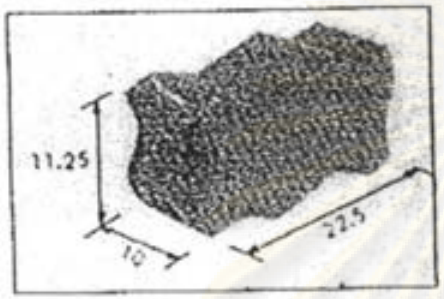
ก. ปูง่ายสะดวกรวดเร็ว เสร็จแล้วใช้งานได้ทันที คอนกรีตบล็อกปูถนน ออกแบบมาให้สามารถล็อกกันได้ในตัว

ข. สะดวก และง่ายในการซ่อมบำรุง ด้วยเหตุที่มีรูปลักษณะเป็นก้อนต่อเนื่องกัน คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจึงไม่มีการแตกหักเป็นรอยร้าวเหมือนพื้นคอนกรีตทั่วไป แต่ในกรณีที่จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซ่อมก็สามารถถอดเปลี่ยนได้เฉพาะก้อน

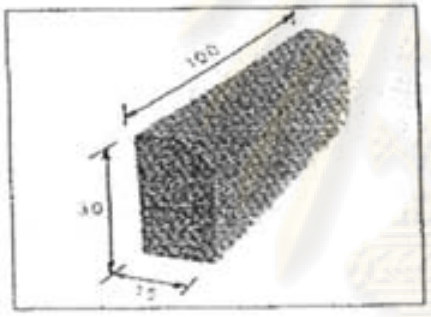
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



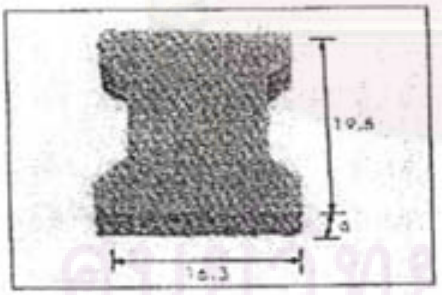
บล็อกปูถนนซีแพ็ค 6 ซม.
สำหรับงานปูทางเท้า จอดรถภายนบ้าน
1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน
ความยาว 22.5 ซม.
ความกว้าง 11.25 ซม. หนา 6 ซม.



บล็อกปูถนนซีแพ็ค 10 ซม.
สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง เช่น ลานจอดรถ
ในโรงงาน โกดังสินค้า ถนนสาธารณะ
1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน
ความยาว 22.5 ซม.
ความกว้าง11.25 ซม. หนา 10 ซม.



ขอบคันหินซีแพ็ค
เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการสร้างถนน ซีแพ็คได้
ผลิตขอบหินสำเร็จรูป ขนาดกว้าง15 ซม.สูง 30 ซม.
ยาว 1 ม. เพื่อใช้ทำขอบถนนทั่วๆไป
เหมาะสมมากสำหรับใช้ควบคู่ไปกับบล็อกปูถนนซีแพ็ค
ทำการติดตั้งได้ง่ายเพียงแต่วางเรียงต่อกันเท่านั้น



บล็อกปูถนนรูปตัว "ไอ"
เป็นบล็อกปูถนนซีแพ็คแบบใหม่ มีลักษณะเป็นรูปตัว
ไอ 1 ตารางเมตรใช้ 35 ก้อน
ความกว้าง 16.3 ซม. ความยาว 19.8 ซม.
หนา 6 ซม. น้ำหนัก 3.8 ซม.

รูปที่ 2.7 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้นแต่ละชนิด (พิภพ สุนทรสมัย, 2530)

2.5.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ก. มิติและความคลาดเคลื่อน ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมให้ตามตารางที่ 2.6 แต่มาตรฐาน ASTM C936-82 ได้กำหนดมิติอย่างกว้างๆ โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อนต้องมีความกว้าง และความยาวไม่เกิน 140 และ 240 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาต้องไม่มากกว่า 140 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้าง และความยาวกำหนดโดย

ASTM C936-82 มีค่า ± 1.6 มิลลิเมตร ขณะที่ความคลาดเคลื่อนของความหนามีค่าเท่ากันหมด คือ ± 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140-96

ตารางที่ 2.6 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด (มิลลิเมตร)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความกว้างและความยาว	ไม่เกิน 295	± 2
ความหนา	60	± 2
	80	± 2
	100	± 3
	120	± 3
ความหนาของชั้นผิวหน้า (เฉพาะชั้นผิวหน้าที่ทำเป็นสี)	ต่ำสุด 3	ต่ำสุด 3

ที่มา: หฤษฎ์ ธิตินันทน์ (2546)

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีเนื้อแน่นไม่ร้าว และสีของชั้นผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ การทดสอบทำโดยการตรวจพินิจ

ค. ความได้ฉาก

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาไม่เกิน 80 มิลลิเมตร จะมีความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาเกิน 80 มิลลิเมตร จะมีความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

ง. ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อน ต้องไม่น้อยกว่า 35 เมกะปาสคาล และค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 40 เมกะปาสคาล ขณะที่ ASTM C936-82 กำหนดให้แต่ละก้อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 50 เมกะปาสคาล โดยให้ค่าเฉลี่ยมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C140-96

จ. ASTM C936 กำหนดให้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุปอซโซลานที่ใช้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C150-95a และ C618-96 ตามลำดับ วัสดุผสมต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนด ASTM C33-93 ยกเว้นสัดส่วนคละที่ไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดโดยสามารถใช้ได้ทั้งวัสดุผสมธรรมดา หรือวัสดุผสมน้ำหนักเบา (Light weight aggregate) การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกต้องไม่มากกว่าร้อยละ 5 โดยในแต่ละก้อนต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 7 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140-96

มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ คอนกรีตบล็อกที่นำมาทดสอบต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วัน

ชวลิต นิตยะ (2524) กล่าวว่า วิธีการสร้างคอนกรีตบล็อกที่ดี หลักใหญ่คือทำให้รับกำลังได้ดีที่สุดในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด และให้ได้ซีเมนต์น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อเป็นการลดค่าวัสดุ และการหดตัวจะได้ลดน้อยลงด้วย

2.6 ของเสียประเภทฉลาก

ของเสียประเภทฉลาก เป็นของเสียจากกระบวนการล้างขวดแก้วเพื่อนำขวดแก้วกลับมาเวียนใช้ใหม่ เพื่อแยกฉลากกระดาษที่ติดกับขวดแก้วออก ของเสียส่วนนี้จะแยกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือฉลากบรรจุภัณฑ์เบียร์ และ เหล้าขาว ซึ่งต่อวันจะมีฉลากมากกว่า10 ผลิตภัณฑ์ สำหรับรูปที่ 2.8 มีลักษณะคล้ายกระดาษที่ยุ่ยซึ่งการยุ่ยเกิดจากน้ำโซดาไฟความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยในส่วนนี้เป็นส่วนที่มีการบีบน้ำล้างฉลากออกมาเพื่อนำน้ำล้างขวดกลับไปใช้ใหม่และมีการควบคุมพีเอชของน้ำให้อยู่ระหว่าง 10.5-11.8 โดยของเสียประเภทฉลากส่วนนี้จะมีประมาณ 500 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งอาจจะมีเศษแก้วซึ่งจากการขัดสีขวด ติดหลุดมาด้วย การจัดการของเสียในส่วนนี้จะทำการฝังกลบภายในบริเวณโรงงาน

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของเสียประเภทฉลากซึ่งใช้ในงานวิจัย (18 เมษายน, 2551)

2.7 โลหะหนักที่คาดว่าจะพบในหมึกพิมพ์ฉลากบรรจุภัณฑ์

หมึกพิมพ์บนฉลากภาชนะบรรจุอาหารมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น ถ้วย ถุง กล่องบรรจุไอศกรีม และผลิตภัณฑ์นม เป็นต้น ภาชนะเหล่านี้ล้วนแต่มีการนำเอาหมึกมาใช้ในการพิมพ์ลวดลายรูปทั้งด้านนอกและด้านในของภาชนะ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2524) ได้ศึกษาถึงพิษภัยของสีหมึก ซึ่งอาจเกิดกับผู้บริโภคได้ จึงวิเคราะห์หาโลหะหนักโดยการเก็บตัวอย่างฉลากหมึกพิมพ์บนภาชนะบรรจุภัณฑ์รวม 56 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 37.8 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่าถ้วยกระดาษรูปโคน บรรจุไอศกรีม 4 ตัวอย่างใช้บรรจุไอศกรีมได้ อีก 4 ตัวอย่างไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุไอศกรีม ถุงกระดาษหนังสือพิมพ์ทุกตัวอย่างไม่เหมาะสำหรับบรรจุ หรือห่อหุ้มอาหาร และหมึกพิมพ์จากโรงพิมพ์พบโลหะหนัก ตะกั่ว ปริมาณ 0.75-1855.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แคดเมียม 0-1.71 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มี 1 ตัวอย่างพบโครเมียม 9.77 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และอีก 1 ตัวอย่างพบ เซเลเนียม 8.25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

2.7.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป และมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โดยลักษณะทั่วไปของโลหะหนักจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ ยกเว้น ปรอท ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาวสะท้อนแสงได้ดี และเหนียว สามารถตีเป็นแผ่นได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีเลขออกซิเดชัน (Oxidation number) ได้หลายค่า จึงสามารถรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโลหะหนักรวมตัวกับสารอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีโลหะเหล่านี้แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งจะสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้ และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจทำให้เกิดความพิการและเสียชีวิตได้ (LaGrega และคณะ, 1994) โลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ (พรรพงศ์ ชื่นศิริ และคณะ, 2540) ได้แก่

ก. แคดเมียมเป็นโลหะอยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 112.4 มีวาเลนซี 2 จุดหลอมเหลว 320.7 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 8.6 กรัม/มิลลิลิตร สามารถระเหิดเป็นไอด้วยความร้อนได้ง่ายและพบว่าแคดเมียมเป็นธาตุที่หายากและมีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนที่พบเป็นปริมาณมากมักเกิดปนอยู่กับแร่สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง และดีบุก ในธรรมชาติมักรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งมีสีเหลือง และมักปนอยู่กับแร่สังกะสีซัลไฟด์ แคดเมียมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว สี ปุ๋ย แบตเตอรี่ เชื่อมโลหะ และใช้ผสมกับเซเลเนียม นิกเกิลในการผลิตสี การสะสมของแคดเมียมในร่างกายในปริมาณสูงทำให้คนเป็นหมันและเป็นมะเร็งได้ นอกจากนี้ยังยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง ทำลายตับ ไต และกระดูก ดังเช่นกรณีชาวบ้านที่อาศัยอยู่บริเวณริมฝั่งแม่น้ำจินต์ซู ประเทศญี่ปุ่น เกิดอาการสายตาผิดปกติ ปวดกระดูกตามน่อง ซี่โครงและสันหลัง ซึ่งชาวญี่ปุ่นเรียกโรคนี้ว่า อิไต-อิไต ผู้หญิงที่มีบุตรหลายคนและหลังจากหมดประจำเดือนแล้วจะเป็นโรคนี้มาก

ช. โครเมียม เป็นธาตุในหมู่ VIB ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 51.996 จุดหลอมเหลว 1,875 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,665 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.19 กรัม/มิลลิลิตร ในปัจจุบันมีการนำ โครเมียมมาใช้ในโรงงานชุบโลหะฟอกหนังสัตว์ ผลิตสีน้ำมัน-สีพลาสติก แบตเตอรี่ น้ำมันทาไม้ ชแล็ค กาว แล็คเกอร์ ฟอกหนังสัตว์ จักรยาน และจักรยานยนต์ เป็นต้น เมื่อหายใจเอาโครเมียมเข้าไปจะทำให้เกิดอาการเนื้องอกในปอดและอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ นอกจากนี้โครเมียมยังทำความระคายเคืองต่อทางเดินอาหารเมื่อรับประทานเข้าไป

ค. ทองแดง เป็นธาตุในหมู่ IB ของตารางธาตุน้ำหนักอะตอม 63.54 จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,595 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 8.96 กรัม/มิลลิลิตร ทองแดงที่พบในสภาวะแวดล้อมมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานชุบโลหะ การหลอม เชื่อม หรือบัดกรีโลหะ สี และมาจากภาชนะบรรจุอาหาร เป็นต้น ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมากเพราะช่วยในการสร้างฮีโมโกลบินและจำเป็นสำหรับ การทำงานของเอนไซม์ แต่ต้องการในปริมาณน้อยคือ ร่างกายต้องการทองแดงเพียงวันละ 2.0 มิลลิกรัม เกลือของทองแดงมีส่วนในการควบคุมการเติบโตของร่างกาย และเป็นตัวเร่งในการออกซิไดซ์แมงกานีส ถ้าร่างกายขาดทองแดงจะเป็นอันตรายต่อตับได้ แต่ถ้าร่างกายได้รับมากเกินไปทำให้เกิดโรคโลหิตจางได้

ง. ตะกั่ว เป็น ธาตุในหมู่ IVA ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 207.19 จุดหลอมเหลว 327.4 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,725 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 11.4 กรัม/มิลลิลิตร นำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การเชื่อมโลหะ ผลิตพลาสติก หล่อตัวอักษรสำหรับพิมพ์ สี แบตเตอรี่รถยนต์ และทำให้ค่าอ็อกเทนของน้ำมันสูงขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณตะกั่วตกค้างสะสมในสิ่งแวดล้อม เพราะทั้งน้ำ พืช และสัตว์ที่ใช้เป็นอาหารมักปนเปื้อนด้วยตะกั่วซึ่งมาจากอุตสาหกรรมดังกล่าว เมื่อตะกั่วเข้าไปในร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าไปในกระแสเลือด จากนั้นนำไปเก็บสะสมที่ตับ ไต และกระดูก ตะกั่ว บางส่วนจะถูกขับออกทางน้ำดีและอุจจาระ ตะกั่วสามารถไปยับยั้งการสร้างเม็ดเลือดแดงของไขกระดูกทำให้เกิดโรคโลหิตจางเมื่อสะสมที่ไตจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของไตลดลงจนเกิดอาการไตวายได้ และยังพบอีกว่าตะกั่วจะเข้าไปทำลายเซลล์สมองและประสาททำให้เกิดอาการต่างๆ ทางสมองเช่น เกิดภาพหลอน เวียนศีรษะ คลุ้มคลั่ง ชัก เป็นอัมพาต ปวดท้องอย่างรุนแรงแต่ตำแหน่งไม่แน่นอน อ่อนเพลีย หมดสติ และตายในที่สุด ดังเช่นในประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ.2518 ประชาชนที่อาศัยอยู่ในอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ เกิดการเจ็บป่วยด้วยอาการพิษของตะกั่ว เนื่องจากมีการนำ แบตเตอรี่ที่เลิกใช้แล้วไปถมถนนเข้าหมู่บ้าน ทำให้น้ำใช้อุปโภคบริโภค ผักบุ้ง ผักกะเฉด และสัตว์น้ำมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง ประชาชนได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายเป็นโรคโลหิตจาง และโรคประสาท จนบางรายถึงแก่ชีวิต

จ. ปรอท เป็นโลหะสีขาวคล้ายเงิน เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายอยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 200.61 จุดหลอมเหลว –38.4 องศาเซลเซียส จุดเดือด 857 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 13.6 กรัม/มิลลิลิตร สามารถแตกตัวเป็นไอออนบวกได้ 2 แบบคือ Hg^{+} (เมอร์คิวรัส) และ Hg^{2+} (เมอร์คิวริก) ไอออนของปรอทสามารถรวมได้กับทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ปรอทที่ก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อมมีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติและจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานผลิตก๊าซคลอรีน และโซดาไฟ เยื่อกระดาษ พลาสติก เภสัชภัณฑ์ สีต่างๆ ไวนิลคลอไรด์ หลอมโลหะจากสารประกอบของปรอทที่ใช้เป็นยากำจัดเชื้อราจากเทอร์โมมิเตอร์ที่ชำรุด จากเซลล์แบตเตอรี่ชนิดแห้งและจากปรอทผสม (amalgum) ที่ใช้อุดฟัน และในบรรดาอุตสาหกรรมดังกล่าวพบว่าโรงงานผลิตก๊าซคลอรีน และโซดาไฟ กับโรงงานผลิตเยื่อกระดาษจะใช้ปรอทเป็นจำนวนมาก และมักจะปล่อยสารปรอทออกมากับน้ำทิ้งหรือน้ำเสีย เมื่อร่างกายได้รับสารปรอทโดยเฉพาะเมทธิวเมอร์คิวรี่ (methyl mercury; CH_3Hg^{+}) จะดูดซึมเข้าสู่ลำไส้ได้ถึงร้อยละ 95 ซึ่งจะทำให้เกิดอาการต่างๆ เช่น การบีบตัวของทางเดินอาหาร กระเพาะลำไส้ทำให้ปวดท้องอาเจียนปวดเมื่อยกล้ามเนื้อและยังอาจมีผลให้เป็นอัมพาต หมดสติ และตายได้ ดังเช่นในประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี พ.ศ.2493 ประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณอ่าวมินามะตะ เสียชีวิตจำนวนมากเนื่องจากบริโภคปลา และหอยที่มีสารเมทธิวเมอร์คิวรี่สูง ซึ่งมีสาเหตุจากโรงงานผลิตไวนิลคลอไรด์ของบริษัทชินโล ปล่อยสารปรอทในรูปของเมทธิวเมอร์คิวรี่คลอไรด์ (methyl mercury chloride; CH_3HgCl) ลงสู่แม่น้ำทำให้ปรอทเข้าไปสะสมในสัตว์น้ำ เมื่อคนรับประทานสัตว์ทำให้เกิดโรคปรอทเป็นพิษ (หรือ เรียกว่าโรคมินามะตะ)

ฉ) เซเลเนียม อยู่ในกลุ่ม VIB ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 78.96 จุด หลอมเหลว 217 องศาเซลเซียส จุดเดือด 685 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 4.79 กรัม/มิลลิลิตร เซเลเนียมที่พบในสิ่งแวดล้อมมีแหล่งกำเนิดมาจากอุตสาหกรรมผลิตสี ถลุงแร่ทองแดง เหล็กกล้า เครื่องเคลือบ การถ่ายภาพ เป็นต้น เซเลเนียมเป็นธาตุที่จำเป็นต่อ ร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเพราะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ Glutathione peroxide โดยทั่วไปร่างกายต้องการรับเซเลเนียมประมาณวันละ 0.01-0.20 มิลลิกรัม แต่ถ้าร่างกายสะสมเซเลเนียมในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดเป็นพิษอย่างรุนแรง และยังพบว่าเป็นธาตุที่ก่อมะเร็งได้ อาการพิษของเซเลเนียมได้แก่ ฟันผุ ผิวหนังซีดเหลือง ผิวหนังลอกออก โรคปวดไขข้อ ระบบการย่อยอาหารผิดปกติผมร่วง

โลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท แคดเมียม สารหนู ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวรซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอนเพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

2.8 การกำจัดโดยการทำเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง

2.8.1 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำเสถียร

การทำเสถียร (Stabilization) หมายถึง กระบวนการจำกัดฤทธิ์หรือลดความเป็นพิษของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous waste) โดยการทำให้ของเสียมีสมบัติที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา วัตถุประสงค์ในการทำเสถียร คือ การทำให้อัตราการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และลดระดับความเป็นพิษของสารอันตรายนั้น LaGrega และคณะ (1994) ได้กล่าวสรุปว่าการทำเสถียร หมายถึงกระบวนการที่มีการเติมสาร (Reagent) เพื่อลดความเป็นพิษ หรือความอันตรายของของเสียนั้น โดยการเปลี่ยนของเสียและส่วนประกอบที่เป็นอันตรายภายในของเสียนั้นให้มีอัตราการเคลื่อนที่ หรือปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง และรวมถึงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลงด้วย สารที่ใช้เติมในกระบวนการทำเสถียรจะช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียหรือสารอันตรายให้สามารถจัดการได้ง่ายขึ้น ลดพื้นที่ผิวเพื่อลดโอกาสที่สารพิษจะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จำกัดค่าการละลายของสารมลพิษ หรือลดความเป็นพิษของสารที่จะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม

2.8.2 คำจำกัดความ และวัตถุประสงค์การทำก้อนแข็ง

สำหรับการทำก้อนแข็ง (Solidification) LaGrega และคณะ (1994) ได้นิยามว่า คือ กระบวนการเติมสารหรือวัสดุประสาน (Binder) ที่ช่วยให้เกิดการแข็งตัวหรือคงรูป ในของเสียที่อันตราย โดยสารที่เพิ่มเติมลงไปจะช่วยเพิ่มกำลัง ลดความสามารถในการถูกบีบอัด (Compressibility) และลดค่าการซึมน้ำของของเสียนั้น

วัตถุประสงค์ของการทำก้อนแข็ง มีดังนี้

- เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายขนส่ง
- ลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อลดการแพร่กระจายของสารพิษ
- จำกัดอัตราการละลายของสารพิษเมื่อสัมผัสกับสารละลาย
- ลดความเป็นพิษ

2.8.3 วิธีทำก้อนแข็ง

วิธีที่ใช้จัดการกับของเสียในกระบวนการทำก้อนแข็งมีมากมาย ดังนี้

ก. วิธีการใช้ซีเมนต์ (Cement – based techniques)

ข. วิธีการใช้ปูนขาว หรือ วัสดุปอซโซลาน (Lime – based techniques / Pozzolanic techniques)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. วิธีการใช้วัสดุที่มีสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self – cementing method)

ง. วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)

จ. วิธีการเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic techniques)

ฉ. วิธีเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting techniques)

ช. วิธีแอนแคปซูเลชัน (Encapsulation techniques)

โดย 4 วิธีแรกเหมาะกับกระบวนการที่ใช้เพื่อจับยึดสารอนินทรีย์ ในขณะที่ 3 วิธีหลังเหมาะกับกระบวนการจับยึดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ประจุลบ รายละเอียดของกระบวนการทำก้อนแข็งตามวิธีต่างๆ ข้างต้น แสดงไว้ในตารางที่ 2.8 เพื่อที่สามารถเลือกวิธีการบำบัดได้อย่างหมาะสมกับชนิดและลักษณะของเสียที่ต้องการบำบัด

2.8.4 กลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง

การทำความเข้าใจพื้นฐานของกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็งเป็นสิ่งที่ควรทราบ เนื่องจากเป็นการประเมินถึงความสามารถหรือประสิทธิภาพของการทำเสถียร โดยที่กลไกการจับยึดในวัสดุมีดังนี้

ก. แมคโครแอนแคปซูเลชั่น (macroencapsulation)

ข. ไมโครแอนแคปซูเลชั่น (Microencapsulation)

ค. การดูดซับ (Absorption)

ง. การดูดซึม (Adsorption)

จ. การทำให้ตกผลึก (Precipitation)

ฉ. การทำให้ความเป็นพิษลดลง (Detoxification)

รายละเอียดของกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็งนั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 รายละเอียดกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง (LaGrega และคณะ, 1994)

กลไกการจับยึด	รายละเอียด
1. แมคโครแอนแคปซูเลชั่น	เป็นวิธีทางกายภาพซึ่งเป็นลักษณะของรูภายในที่ไม่ต่อเนื่องจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระน้อยลง จะใช้เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ และปูนขาว โดยของเสียอันตรายจะถูกจับภายในช่องว่างของวัสดุที่ผ่านการปรับเสถียร
2. ไมโครแอนแคปซูเลชั่น	เป็นวิธีทางกายภาพซึ่งของเสียจะถูกจับภายในโครงสร้างของผลึกโดยจะจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนมาก
3. การดูดซับ	เป็นวิธีทางเคมีซึ่งใช้ในการปรับปรุงลักษณะของก้อนเพื่อให้สะดวกต่อการทำก้อน กระบวนการแรกของวิธีนี้คือการดูดซับของเหลวที่อยู่ในก้อนเสีย
4. การดูดซึม	เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิว และยังเป็นวิธีการทำให้เกิดการจับตัวกันซึ่งอาจจะหมายรวมถึงพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาล์ว มักจะเกิดเมื่อวัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสานของของเสียประเภทอนินทรีย์
5. การทำให้ตกผลึก	เป็นวิธีการทางเคมีเพื่อทำให้เสถียรมากขึ้น โดยเป็นวิธีที่ใช้กับของเสียประเภทอนินทรีย์ สารที่เป็นตัวก่อให้เกิดผลึกได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอเนต และฟอสเฟต
6. การทำให้ความเป็นพิษลดลง	เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการทำเสถียร เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพื่อให้เกิดสารรูปอื่นๆ ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย

2.8.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำก้อนแข็ง

Shin และ Sujiwattana (1988) ได้ศึกษาและกล่าวสรุปว่าตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลาย และการรับแรงอัดของตัวอย่างก้อนแข็ง ได้แก่ ปริมาณของเสียเริ่มต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร และระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ซึ่งกล่าวในรายละเอียดในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8.6 วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท

ตารางที่ 2.9 วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท

ประเภทสิ่งปฏิกูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (additives) ผสมลงไปด้วย
กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึงมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (additives)ผสมลงไปด้วย
กากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วย แคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัด เชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษด้วยตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

ที่มา : ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2531

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8.7 **การออกแบบสถานที่ฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว**

หลุมที่จะใช้ฝัง ต้องได้รับการเตรียมการไว้ดังต่อไปนี้คือ

- ต้องทำการบุด้านล่างและด้านข้างโดยรอบของหลุมที่จะใช้ฝัง (landfill) ด้วยวัสดุกันซึม (liner) เพื่อป้องกันการซึมผ่านของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกสู่น้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดินที่อยู่ใกล้เคียง โดยวัสดุกันซึมนี้ต้องมีความแข็งแรง และหนาเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนักและแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งวัสดุกันซึมดังกล่าวอาจจะเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้งานโดยเฉพาะหรือเป็นวัสดุที่มีอยู่เองตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว ที่ยอมให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ (permeability) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (ประมาณ 0.1 ฟุตต่อปี) หรืออาจจะใช้วัสดุกันซึมทั้งสองประเภทประกอบกันก็ได้

- ระดับก้นหลุมรองสถานที่ฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะต้องอยู่สูงจากระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 5 ฟุต

- ต้องมีระบบรวบรวมน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในหลุมที่ใช้ฝัง และมีระบบบำบัดน้ำเสียหรือนำน้ำเสีย (leachate) ที่เกิดขึ้นออกไปบำบัดที่อื่น

- เมื่อเลิกใช้หลุมที่ฝังแล้ว ให้ทำการปิดหลุมชั้นสุดท้ายด้วยวัสดุกันซึม เพื่อป้องกันการซึมของน้ำหรือของเหลวอื่นๆ เข้าสู่หลุมฝัง แล้วปูทับด้วยดินดีอีกชั้นหนึ่ง พร้อมทั้งปลูกพืชคลุมดิน เพื่อลดความรุนแรงของการพังทะลายของดินอันเนื่องจากฝนและลม พร้อมทั้งจัดให้มีระบบระบายน้ำฝนหรือน้ำที่จะไหลบ่าผ่าน ให้ออกจากบริเวณหลุมฝังกลบได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม

- ในกรณีที่ใช้ดินเหนียวบุปูเป็นวัสดุกันซึม ดินเหนียวต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 60 เซนติเมตร โดยทำการบดอัดดินเหนียวให้แน่นที่ระดับความหนา 30 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ใช้วัสดุอื่นเป็นวัสดุกันซึม หรือจะต้องมีการจัดการเป็นพิเศษจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมเป็นกรณี ๆ ไป

- วัสดุกันซึมที่ใช้ปิดหลุมฝังจะต้องเป็นวัสดุชนิดและความหนาเดียวกับวัสดุกันซึมชั้นล่าง ส่วนชั้นดินปลูกพืชตอนบนต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร และระหว่างชั้นทั้งสองนี้อาจจะจัดให้มีชั้นทรายเพื่อเป็นมาตรการเสริมในการระบายน้ำออกจากส่วนบนของบริเวณที่ใช้ฝังกากให้เร็วยิ่งขึ้นก็ได้

- พืชที่ปลูกคลุมดินจะต้องเป็นพืชประเภทรากสั้น หรือมีเอกสารที่พิสูจน์ได้ว่าความยาวที่สุดของรากจะยาวน้อยกว่า 150 เซนติเมตร

- ต้องจัดสร้างบ่อสังเกตการณ์เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียงตามขนาดและจำนวนที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมเห็นชอบ เพื่อตรวจสอบติดตามผลการดำเนินงานสถานที่ฝัง ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานอยู่ และน้ำใต้ดินจะต้องมีคุณลักษณะไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้ คือ

ชนิดของสาร	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สารหนู	0.05
แคดเมียม	0.05
โครเมียม	0.05
ตะกั่ว	0.05
ปรอท	0.001
นิกเกิล	0.05
แมงกานีส	0.3
ทองแดง	1.0
สังกะสี	5.0

2.9 **ความสามารถในการถูกชะละลาย** (Leachability)

ความสามารถในการถูกชะละลาย หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไปหลังจากผ่านการสกัดต่อความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L = W_l / W_o$$

โดยที่ L = ความสามารถในการถูกชะละลาย

W_l = ความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไป

W_o = ความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น

ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย (E) สามารถเขียนแทนด้วยสมการดังนี้

$$E = (L_o - L_s) \times 100 / L_o$$

โดยที่ E = ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

L_o = ความสามารถในการถูกชะละลายของสารก่อนกระบวนการทำก้อนแข็ง

L_s = ความสามารถในการถูกชะละลายของสารหลังกระบวนการทำก้อนแข็ง

2.9.1 **การทดสอบการชะละลาย**

ก. มาตรฐานการชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ. 2548 ทดสอบการชะละลายของตะกรัน โดยวิธี Waste Extraction Test (WET) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลาย

ออกมา ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy, ICP-ES) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- บดตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงรูกรอง 2 มิลลิเมตร
- ชั่งตัวอย่างหนัก 50 กรัม เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง (สารละลายโซเดียมซิเตรท 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 $\pm$ 0.1)
- นำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที
- เขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- กรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 45 ไมครอน
- นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก

ข. มาตรฐานการชะละลายตามวิธี 3050 ของ U.S.EPA. ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบหาปริมาณและโลหะหนักใน ตะกอน สลัดจ์ และดิน ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น โดยนำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลายออกมา ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำตัวอย่างของเสียประเภทฉลาก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 125 มิลลิลิตร
- เติมกรดไนตริกผสมน้ำกลั่น (อัตราส่วน 1:1) ปริมาณ 10 มล.แล้วนำบีกเกอร์มาตั้งบนเตา อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 นาที
- รอจนตัวอย่างเย็นแล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร แล้วนำมาตั้งบนเตาอีกประมาณ 30 นาที
- รอจนตัวอย่างเย็น แล้วจึงเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และเติม 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตร
- นำบีกเกอร์มาตั้งบนเตา รอกระทั่งฟองอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเปอร์ออกไซด์หายไป แล้วค่อยๆเติม 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศ
- ตั้งบีกเกอร์บนเตาต่อไปจนกระทั่งเหลือปริมาตรกรดประมาณ 2 มิลลิลิตร
- นำบีกเกอร์ลงจากเตาแล้วเติมน้ำกลั่นประมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน รอจนตัวอย่างเย็น
- นำน้ำที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42
- นำน้ำที่ได้มาเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Conway และ Malloy (1981) ได้แบ่งวิธีการทดสอบการชะละลายออกเป็น 2 วิธีคือการทดสอบแบบแบตท์ (Batch tests) และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column tests) โดยการทดสอบแบบแบตท์เป็นการทดสอบการชะละลายโดยให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการชะละลายในภาชนะตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ส่วนการทดสอบแบบคอลัมน์นั้นจะทำการทดสอบในคลัมน์ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทำการทดสอบจนแน่นและป้อนสารที่ใช้ในการชะละลายผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

Josephson (1982) กล่าวว่า การทดสอบการชะละลายแบบคอลัมน์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในสถานที่ฝังกลบ แต่จะเป็นผลที่เกิดกับสภาวะที่ตัวกลางอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated) ในขณะที่สถานที่ฝังกลบจริงมักไม่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ แนะนำให้ใช้การจ่ายสารที่ใช้ชะละลายแบบเป็นหยดให้กับตัวอย่างที่บรรจุในคอลัมน์ขนาดสูง 3 ฟุต เส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 นิ้ว ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายทั้งสองแบบแสดงไว้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายแบบแบตท์ และ แบบคอลัมน์

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบแบตท์	-ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าวิธีแบบคอลัมน์ -สามารถวิเคราะห์ผลซ้ำได้อีก	-สภาวะที่ใช้ต่างจากที่เกิดขึ้นจริงในสถานที่ฝังกลบ -ไม่ได้วัดผลการชะละลายที่แท้จริงแต่วัดความเข้มข้นที่คงที่ -ต้องการระบบการกรองที่เชื่อถือได้
แบบคอลัมน์	-แสดงลักษณะการชะละลายได้ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในสถานที่ฝังกลบ -เป็นตัวที่ช่วยทำนายการปล่อยสารต่างๆ ตามเวลาได้ดี	-อาจเกิปัญหาจากการบรรจุที่ไม่สม่ำเสมอ คือมีการไหลผ่านช่อง -ปัญหาจากการอุดตัน -ผลกระทบจากขอบคอลัมน์ -ใช้เวลานาน -ไม่สามารถวิเคราะห์ผลซ้ำได้

ที่มา: Poon และคณะ (1983)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Shin และ Sujiwatthana (1988) พบว่าความสามารถในการชะลาย และค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างในการทำให้เป็นก้อนแข็ง ขึ้นอยู่กับปริมาณของเสียเริ่มต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร และระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่าง จากการทดลองด้วยการสกัด (Extraction test) โดยการสกัดของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ด้วยกรดอะซิติก พบว่าปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของเสียที่ถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นตามกัน โดยปริมาณของเสียในน้ำชะละลายจะเพิ่มขึ้นต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณของเสียเริ่มต้น และค่ากำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณของเสียเริ่มต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ให้ค่าความสามารถในการชะละลายต่ำที่สุด และค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่าความพรุนของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัด ถ้าปริมาณน้ำที่เติมในซีเมนต์น้อยเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการเกิดผลึกไม่ดี การรั่วไหลของเสียก็จะมากขึ้น การเติมน้ำมากขึ้นก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดีขึ้น แต่หากมีปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เกิดความพรุนโอกาสการรั่วไหลของเสียก็จะมากขึ้นเช่นกัน อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรยิ่งสูง ซีเมนต์เพสต์จะมีโอกาสถูกชะละลายมากขึ้น ระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างนานจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นได้ดี แต่ว่าค่าความสามารถในการถูกชะละลาย ไม่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทั้งนี้การรั่วของของเสียต่างๆ ขึ้นอยู่กับกลไก 2 ประการคือ การดูดซับ-การแทรกผ่าน และการจำกัดการละลายของโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการแปรค่าระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการถูกชะลายของเสีย แต่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดให้กับก้อนตัวอย่าง

Shannag และ Yeginobali (1995) ศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในท้องถิ่นต่อสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตา และคอนกรีต โดยแปรค่าสัดส่วนผสมระหว่าง วัสดุปอซโซลานต่อซีเมนต์เป็น 15 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์ วัสดุปอซโซลานที่ใช้มี 2 ชนิดซึ่งเถ้าภูเขาไฟเหมือนกันแต่เกิดในพื้นที่ต่างกัน (ชนิด A และ B) ชนิด A มีสัดส่วนของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็น 40.1 13.4 และ12.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ชนิด B มีสัดส่วนเป็น 38.5 12.8 และ 11.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีขนาดความละเอียดเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ขนาดที่เล็กลงของวัสดุจะทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น โดยวัสดุชนิดB มีอัตราการทำปฏิกิริยาและประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดA คอนกรีตที่ผสมโดยแทนที่วัสดุปอซโซลานชนิด B ในอัตราส่วนควบคุมที่ใช้ซีเมนต์ปอซโซลานที่จำหน่ายทั่วไป ในขณะที่เมื่อแทนในสัดส่วน 35 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าต่ำกว่ามาก โดยนอกจากค่า

กำลังรับแรงอัดแล้ว Shannag และ Yeginobali ยังได้สรุปผลกระทบที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัว การหดตัว และความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตอีกด้วย

รักษพล ชูชาติ (2538) ได้ทำการวิจัยวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อนวัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิเกต พบว่าปูนซีเมนต์ให้ผลการทดลองดีที่สุดที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 11 และร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สำหรับกากตะกอนจาโรไซต์แบบธรรมดา และกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์เพราะสามารถทำให้สมบัติของก้อนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาวเป็นการทดสอบในคอลัมน์ โดยน้ำชะละลายมีค่า pH ที่ 5.8-6.3 ซึ่งอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

พชรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสวงสิน เกตุโตประการ (2540) ศึกษาการนำกากตะกอนของน้ำสีทาบ้านมาเป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ผลการทดลองพบว่าสามารถผสมเศษสีแห้งเร็ว และกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นได้ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถรับแรงกดสูงสุด 131.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราการชะละลายสูงสุด 0.9 – 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้เบากว่าผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด 1.136 เท่า ส่วนราคาของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์ทั่วไปตามท้องตลาดประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ แต่ราคายังไม่ได้รวมราคาต้นทุนจากการทำเศษสีแห้งเร็ว และกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วแบบเปียกให้แห้ง และบดให้ละเอียด

ณัฐพล เกตุเหล็ก และคณะ (2544) ทดลองนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้ในการผสมบล็อกปูพื้นคอนกรีต เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด หน่วยแรงดัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ โดยแปรค่าปริมาณเส้นใยมะพร้าวเป็น 8 16 และ 24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับหินเกล็ด และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าเมื่อผสมเส้นใยมะพร้าว 8 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างมีความสามารถในการรับกำลังอัดประลัยดีที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น การรับแรงดัด และความหนาแน่น มีความสามารถลดลง แต่ความสามารถในการดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น เพราะว่าเส้นใยมะพร้าวดูดซึมน้ำได้ดี โดยที่บล็อกปูพื้นคอนกรีตธรรมดาจะมีกำลังอัดประลัย 548.83 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีน้ำหนัก 3.146 กิโลกรัม ค่ากำลังดัดประลัย 1,221 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีน้ำหนัก 3.146 กิโลกรัม ค่ากำลังดัดประลัย 1,221 กิโลกรัมที่ค่าความหนาแน่น 2,080 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำ 3.48 เปอร์เซ็นต์ขณะที่บล็อกปูพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าวที่ 8

เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนบล็อกปูพื้นคอนกรีตเส้นใยมะพร้าวที่ 16 และ 24 เปอร์เซ็นต์ มีกำลังอัดลดลงประมาณ 36.9 และ 47.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Hetal (2002) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และผงหินปูนด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคปพบว่าการใช้ผงหินปูนจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้กับปูนซีเมนต์ โดยพบว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต (Ca^{2+}) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์ (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล มาใช้ในกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ และจากนั้นนำมาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมคอนกรีต การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการดูดซับซึ่งได้ศึกษาเวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สมดุล ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อม ไอโซเทอมการดูดซับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ขั้นตอนการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ซึ่งได้ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยชานอ้อยที่ถูกใช้ในการดูดซับสีย้อม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ระยะเวลาบ่ม และค่ากำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่า ขั้นตอนการดูดซับโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 โทนสีได้แก่ สีดำ สีน้ำเงิน และสีแดง ความเข้มข้นเหมาะสมที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชไม่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ช่วงระหว่าง 240-300 นาที ปริมาณเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมอยู่ช่วงระหว่าง 2-4 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 97.72 เปอร์เซ็นต์-99.05 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีความสัมพันธ์กับ ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงมัวร์ ขั้นตอนการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ส่วนประกอบต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ได้แก่ อัตราส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด ต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นคือ 1:1.1:1.9 อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสมคือ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม คือ 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม และมีราคาต้นทุนของการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริชเท่ากับ 3.34 บาทต่อก้อนคอนกรีตน้ำหนัก 3.20 กิโลกรัม

หฤษฎ์ ธิตินันท์ (2546) ศึกษาโดยนำซิลิกา - อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยทำการทดลองศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการทำก้อนแข็ง ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุ เช่น องค์ประกอบ ดัชนีความเป็นปอซโซลาน การกระจายขนาดอนุภาค รวมถึงสมบัติทั่วไปของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นศึกษาโดยแปรค่าสัดส่วนผสมเป็น 2 3 5 8 10 และ 11 เท่าโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน บ่มที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน และแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อวัสดุประสานเป็น 0.05 0.10 0.15 0.25 และ 0.35 ที่ระเวลาบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ของเสียในซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของวัสดุผสมและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน โดยสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 1:1.2:1.8 และการบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนโดยไม่จำเป็นต้องเผาจะทำให้ได้วัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถแทนที่ได้ในซีเมนต์ปริมาณมากขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตสามารถแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ได้ในสัดส่วน 0.15 เท่าของวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีสมบัติทางกายภาพที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยคอนกรีตบล็อกปูพื้นที่กล่าวข้างต้นมีราคา 2 .74 บาทต่อก้อนผลิตภันฑ์น้ำหนัก 4.40 กิโลกรัม

วรวุฒิ หะมาน (2546) ศึกษาการนำกากของเสียจากการเคลือบสีรถยนต์ ได้แก่ เศษสีแห้งเร็ว และกากตะกอน จากระบบบำบัดสีแห้งเร็ว มาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในการทำคอนกรีตบล็อก ทำการทดลองโดยศึกษาอัตราส่วนผสมของกากของเสียต่อมวลรวมของแข็งทั้งหมดซึ่งแปรค่าตั้งแต่ 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.20, 0.30 และ 0.40 โดยใช้อัตราส่วนผสมคอนกรีตบล็อกซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2 : 4 และ 1 : 1 : 2 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นที่ 7 วันและ 28 วัน ตามลำดับ และหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนักได้แก่ โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิล ผลการทดองพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกากของเสียทั้งสองชนิดคือ อัตราส่วนสมของคอนกรีตบล็อกซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2 :4 โดยปริมาตร ใช้เวลาบ่ม 28 วัน โดยพบว่า ที่อัตราส่วนผสมสีแห้งเร็ว 7 เปอร์เซ็นต์โดยมวลรวมของแข็งทั้งหมด สามารถนำมาผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัด 2.9 เมกกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 2,059 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการดูดกลืนน้ำ 28.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนอัตราส่วนที่ผสมด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็ว 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลรวมของแข็งทั้งหมด สามารถนำมาผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7.1 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 2,381 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการดูดกลืนน้ำ 56.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักในน้ำสกัดพบว่าคอนกรีตบล็อกทั้งสองชนิด มีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของโลหะหนัก

ทุกชนิดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีราคาผลิตภัณฑ์เท่ากับ 2.57 และ 2.94 บาทต่อก้อนคอนกรีตบล็อก สำหรับการใช้สีแห้งเร็วและการกตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วตามลำดับ

ผุสดี แพทย์นุเคราะห์ (2546) งานวิจัยศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและควอร์เทอร์ไนซ์ครอสลิงค์ขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับสีรีมาโซล แบล็ค บี มาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกปูผนัง โดยทำการทดลองศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่กำหนดตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกปูผนัง เช่น ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ทดลองโดยใช้อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกร็ดเท่ากับ 1 : 2 : 3 โดยแปรค่าอัตราส่วนของขานอ้อยที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.10, 0.15 และ 0.20 และระยะเวลาบ่มเป็น 7, 14, 21 และ 28 วัน และประเมินค่าใช้จ่ายปี้องต้นของคอนกรีตบล็อกปูผนัง (39 x 19 x 7 เซนติเมตร) ซึ่งสมบัติทางกายภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 7.24 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 1.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำ 4.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประมาณการค่าใช้จ่ายของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 2.82 บาทต่อน้ำหนักคอนกรีตบล็อกปูผนัง 6.7 กิโลกรัม

อรชุดา ดำศรี (2548) ศึกษาสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจากกระบวนการกลั่นน้ำมันจัดเป็นของเสียจากโรงกลั่นน้ำมันชนิดหนึ่ง ในปัจจุบันจึงได้มีการนำสารปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเหล่านี้มาใช้ในงานก่อสร้างเนื่องจากว่ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน อีกทั้งยังสามารถปรับเสถียรโลหะหนักได้อีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกในการยึดจับโลหะหนักในสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค ตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น ทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดโพรงและการชะของโลหะหนักจากก้อนซีเมนต์เพสต์ และได้นำเถ้าถ่านหินมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ อีกด้วย โดยอัตราส่วนที่นำมาใช้ตลอดการทดสอบคือทรายต่อวัสดุประสาน 2.75 : 1 และน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 : 1 ผลจากการวิจัยไม่พบการก่อตัวของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ (ยกเว้นเหล็ก) เป็นเพราะว่าโลหะหนักจะอยู่ในโครงสร้างของ C-S-H ทำให้ไม่สามารถตรวจพบได้ หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชะละลายและความเป็นกรดด่าง พบว่าโลหะหนักในสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วและเถ้าถ่านหินจะถูกชะออกมาได้ดีในระบบที่มีความเป็นด่างสูง แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักจะละลายออกมาตั้งแต่ช่วงแรกของการบ่มเพราะในขณะนั้นค่าพีเอชในซีเมนต์เพสต์อาจสูงถึง 12 ส่วนผลการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักจากก้อนมอร์ตา พบว่าเมื่ออายุการบ่มนานขึ้นอัตราการชะละลายก็ต่ำลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานในสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วและเถ้าถ่านหินนั่นเอง โดยในช่วงเริ่มต้นจะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแต่เมื่อนานขึ้นจะเกิดจากปฏิกิริยา

ไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้โลหะหนังถูกดักจับไว้ในก้อนมอร์ตาได้ดี ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับขนาดของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่เล็กลงอีกด้วย ผลการทดลองยังแสดงว่าการปริมาณการชะละลายของโลหะและขนาดของโพรงจะลดลงมากเมื่อแทนที่สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วในปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แต่สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วผสมกับเถ้าถ่านหินเพียงร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักเท่านั้น

นรารัชต์พร นวลสวรรค์ และคณะ (2549) ศึกษาอิทธิพลของผงหินปูนที่มีผลต่อการคายความร้อน การพัฒนากำลังอัด และอัตราการไหลแผ่ของมอร์ตา ชนิดแห้งและเปียกแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ25 พบว่าแบบแห้งมีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นและดีที่สุดคือที่ร้อยละ 10 ของโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ แบบแห้งคายความร้อนอย่างรวดเร็วเนื่องจากผงหินปูนแบบแห้งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในมอร์ตา ซึ่งมอร์ตาที่ผสมผงหินปูนแบบเปียกพบว่าการคายความร้อนต่ำลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าการไหลแผ่ของมอร์ตาที่ผสมผงหินปูนทั้งแบบแห้งและแบบเปียกจะมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาที่ไม่ได้ผสมผงหินปูน แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำผงหินปูนไปผสมกับปูนซีเมนต์ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

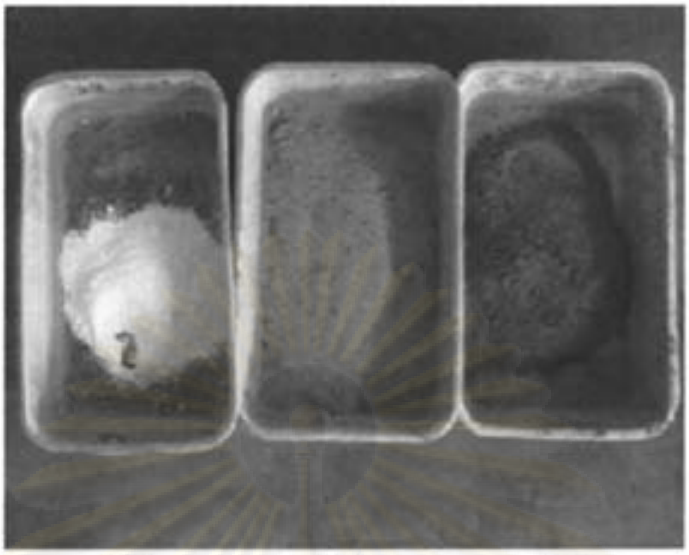
การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ตลอดจนแนวทางในการนำของเสียประเภทฉลากมาใช้เป็นวัสดุร่วมเพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น งานวิจัยนี้สามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 4 การทดลอง ส่วนแรกเป็นการเตรียมวัสดุ ได้แก่ ของเสียประเภทฉลาก และวัสดุผสมสำหรับดำเนินงานวิจัย การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น การกระจายของขนาดอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และการชะละลาย ของวัตถุดิบ การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของเสียประเภทฉลากต่อวัสดุประสาน ตลอดจนระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง และศึกษาประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะหนักในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้ สุดท้ายเป็นการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจากของเสียประเภทฉลาก โดยทำการวิจัยทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการบัณฑิตและวิจัย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล

3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับทำวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

- ผงหินปูน
- ทราย
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- หินเกล็ด
- น้ำประปา
- ของเสียประเภทฉลาก: บริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด (รูป 3.2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ผงหินปูน (ข) ทรายละเอียด (ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

รูปที่ 3.2 ของเสียประเภทฉลากที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2 **สารเคมี**

- โซเดียมซิเตรท
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- กรดไนตริก
- น้ำกลั่น

3.1.3 **เครื่องมือและอุปกรณ์**

3.1.3.1 **การหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง**

- เครื่องชั่ง: ขนาด 3,100 กรัม อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
- กระบอกตวง: ขนาด 500 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร

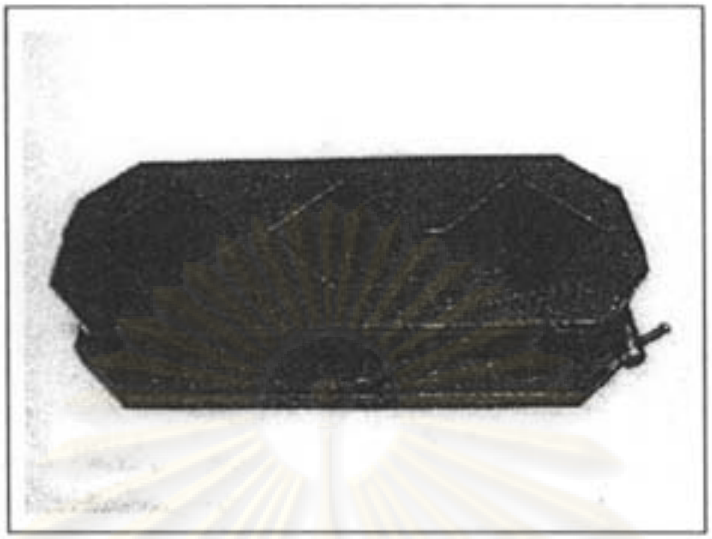
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์: ขนาด 5 เซนติเมตร หรือ 2 นิ้ว แสดงในรูปที่ 3.3 (ก)
- แบบหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นหน้าตัด 8 เหลี่ยม กว้างด้านละ 8 เซนติเมตร หนา 6 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 3.3 (ข)
- เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตา และคอนกรีต
- นาฬิกาจับเวลา
- ตู้อบไฟฟ้า
- ถังน้ำ
- แท่งกระทุ้ง (Temper): ขนาดหน้าตัด 0.5 x 0.5 ตารางนิ้ว ยาว 5-6 นิ้ว ปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนมือจับทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบน ขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100 ถึง 150 มิลลิเมตร
- เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่าง: น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน และ 500 ตัน แสดงดังรูปที่ 3.4
- กรวยเหล็กมาตรฐานสำหรับทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ: เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 40 $\pm$ 3 มิลลิเมตร ด้านล่าง 90 $\pm$ 3 มิลลิเมตร สูง 75 $\pm$ 3 มิลลิเมตร หนาอย่างน้อย 0.8 มิลลิเมตร
- เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve Shaker) ซึ่งประกอบด้วยตะแกรงขนาดต่างๆ ได้แก่ขนาดเบอร์ 1/2 นิ้ว ขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว ขนาดเบอร์ 4 เบอร์ 8 เบอร์ 16 เบอร์ 30 เบอร์ 50 เบอร์ 100 และ ถาดรอง (pan)

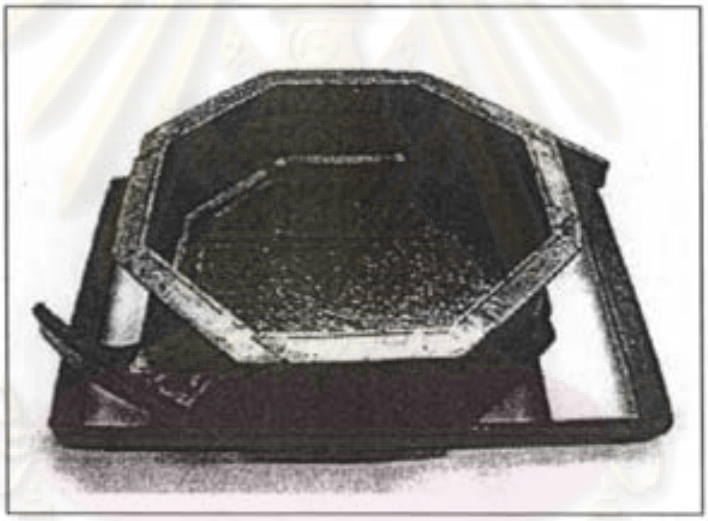
3.1.3.2 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

- ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10)
- เครื่องชั่ง: ขนาด 210 กรัม อ่านค่าได้ละเอียด 0.0001 กรัม
- โต๊ะเขย่าสาร (Table shaker) แสดงดังรูปที่ 3.5
- กระบอกตวง: ขนาด 2,000 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
- กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 – 0.8 ไมครอน
- เครื่องวัดพีเอช
- เครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัพเปิลพลาสมา (ICP-ES)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



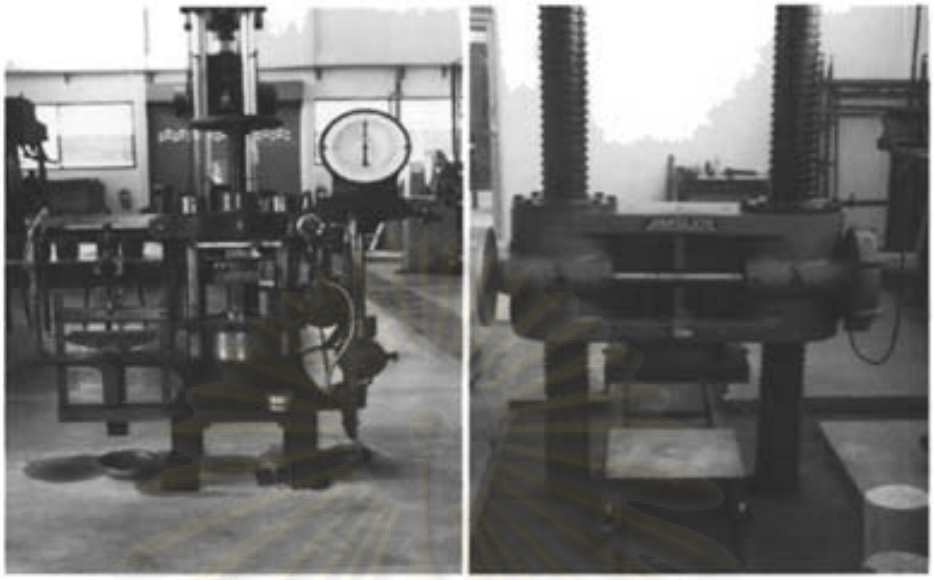
(ข)

รูปที่ 3.3 แบบหล่อที่ใช้ในงานวิจัย

(ก) แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ข) แบบหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นหน้าตัด 8 เหลี่ยม "อัฐศิลา"

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

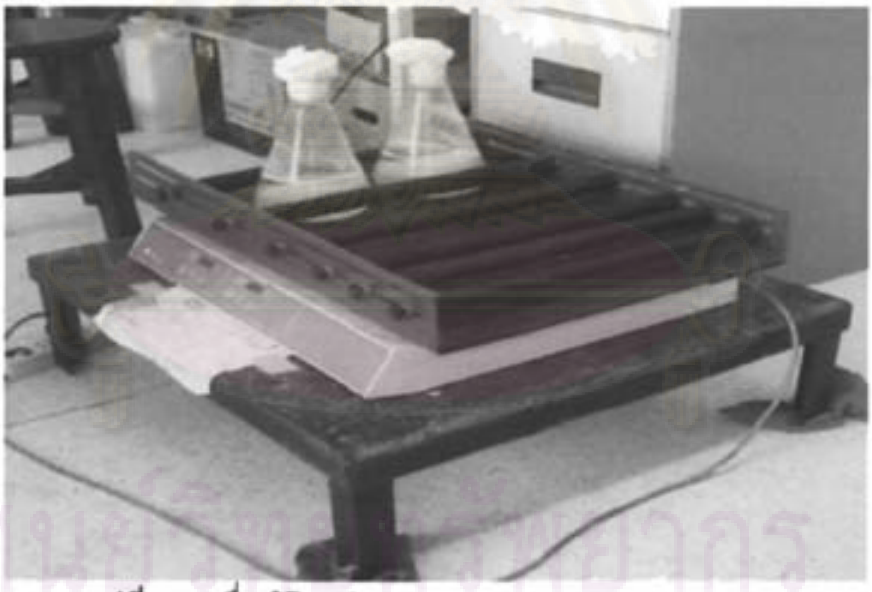


(ก) (ข)

(ก) สำหรับก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน

(ข) สำหับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น น้ำหนักกดสูงสุด 500 ตัน

รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 3.5 เครื่องโต๊ะเขย่าสารมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

- อัตราส่วนผสมของเสียประเภทฉลาก ต่อมวลรวม
- อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสม (Aggregate) และวัสดุประสาน
- ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต

3.2.2 **ตัวแปรตาม**

- ความสามารถในการถูกชะละลาย ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง
- ปริมาณของโลหะหนักในน้ำชะละลาย

3.2.3 **ตัวแปรควบคุม**

- ชนิดและขนาดของวัสดุ
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- อัตราส่วนผสมของผงหินปูนต่อวัสดุประสาน (LP/B)

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 **การทดลองที่ 1** การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

3.3.1.1 **การเตรียมตัวอย่างของเสียประเภทฉลาก**

นำของเสียประเภทฉลากตากแดดให้แห้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกจากของเสียประเภทฉลาก แล้วนำไปบด จากนั้นใช้วิธีการแบ่งสี่ส่วน (ตามภาคผนวก ก.6) เพื่อเป็นตัวแทนของฉลากทั้งกอง คัดแยกเพื่อหาองค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก นำไปบด ประมาณ 15 นาที โดยร่อนให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำส่วนนี้ไปแทนที่ทราย และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อวิเคราะห์การชะละลายหาโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก วิเคราะห์พีเอชในน้ำชะละลายของเสียประเภทฉลากตามวิธี U.S.EPA.9040

3.3.1.2 **การเตรียมวัสดุผสม**

ล้างหินเกล็ดและทรายด้วยน้ำสะอาด อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส ส่วนหนึ่งวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ โดยทรายที่นำมาใช้ทดลองเตรียมโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อนำมาแทนที่ในมวลรวมละเอียด

3.3.2 **การทดลองที่** 2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย (อุดมผล พืชน์ไพบูลย์, 2546)

3.3.2.1 **การหาความหนาแน่นปกติ** (Bulk Density) **ของเสียประเภทฉลาก**

ชั่งน้ำหนักถังตวงเปล่าแล้วจดบันทึกไว้ ประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร คลุกเคล้าของเสียประเภทฉลากให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วตักใส่ภาชนะปริมาตร 60 กิโลกรัม ตวง

ให้เต็ม ยกภาชนะตวงให้สูงจากพื้นดินประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วปล่อยให้กระแทกกับพื้นครบ 3 ครั้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักจะทราบน้ำหนักของเสียประเภทฉลากกับน้ำหนักถังตวง

การคำนวณ

ค่าความหนาแน่นปกติ = น้ำหนักของเสียประเภทฉลาก / ปริมาตรของถังตวง

3.3.2.2 การหาองค์ประกอบ (Composition) ของของเสียประเภทฉลาก

นำของเสียประเภทฉลากที่ยังไม่ได้คัดแยกจาก 3.3.2.1 มาหาองค์ประกอบโดยวิธีการแบ่ง 4 ส่วน (Quartering) (ดังแสดงในภาคผนวก ก.6) โดยคัดเลือกเฉพาะของเสียประเภทฉลาก

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของเสียประเภทฉลาก} = \frac{\text{น้ำหนักของเสียประเภทฉลาก} \times 100}{\text{น้ำหนักของเสียประเภทฉลากร่วมกับขยะอื่นๆ}}$$

3.3.2.3 วิเคราะห์สมบัติลักษณะสารกัดกร่อนในของเสียประเภทฉลาก

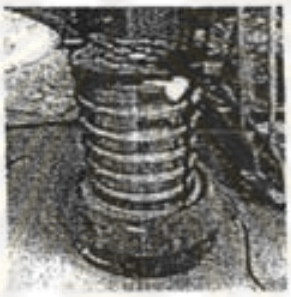
โดยวิธีทดสอบจะพิจารณาค่าความเป็นกรดด่าง ที่มีค่า พีเอช เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดด่าง พีเอช เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ในการวิเคราะห์ว่าเป็นของเสียอันตราย ทำโดยวัดด้วย พีเอช มิเตอร์ ตามวิธีทดสอบของ U.S.EPA. 9040

3.3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก

นำของเสียประเภทฉลากที่ได้จากข้อ 3.3.1.1 ทดสอบการชะละลายโลหะหนักเพื่อหาการชะละลายทั้งหมดของสาร ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้นตามมาตรฐานของ U.S.EPA.3050 (ดังแสดงในภาคผนวก ก.7) แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนัก 8 ธาตุ ได้แก่ นิกเกิล ปรอท สารหนู แคดเมียม เซเลเนียม โครเมียม ทองแดง และ ตะกั่ว ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES) จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการชะละลายโลหะหนักในของเสียประเภทฉลากมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร โดยในการทดสอบสิ่งปฏิกูลที่จะนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกินค่า TTLC (ดังแสดงในภาคภนวก ค.1) โดยจะถือว่าเป็นของเสียอันตราย ก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในของเหลวที่ผ่านการกรองมีค่ามากกว่าค่า STLC ที่ระบุไว้สำหรับสารนั้น แล้วนำมาพิจารณาเพื่อจัดหมวดหมู่ประเภทของเสีย

3.3.2.5 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุผสม

การกระจายขนาดคละของหินเกล็ด และทราย ที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต และทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136 – 93 โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไปช่องเล็กสุดอยู่ล่างตามขนาดโดยใช้เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ ดังนี้ ขนาดเบอร์ 1/2 นิ้ว ขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว ขนาดเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) เบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) เบอร์ 16 (1.18 มิลลิเมตร) เบอร์ 30 (0.6 มิลลิเมตร) เบอร์ 50 (0.3 มิลลิเมตร) เบอร์ 100 (0.15 มิลลิเมตร) แสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องเขย่าคัดขนาด

3.3.2.6 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ

ทดสอบการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2 และ ก.3) ร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวม (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4 และ ก.5) และวัสดุผสมตามมาตรฐาน ASTM C 127 ASTM C128 เพื่อหาความต้องการน้ำของวัสดุ เพื่อเป็นการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาความเหมาะสม ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ของเสียประเภทฉลาก

3.3.3.1 การทดลองที่ 3.1 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน สัดส่วนวัสดุผสม โดยพิจารณากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ระยะเวลาบ่ม และร้อยละการดูดซึมน้ำเป็นเกณฑ์ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยใช้อัตราส่วนของส่วนผสม ซีเมนต์ ต่อทราย ต่อหินเกล็ด 1 : 1.2 : 1.8 (อัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสม ศึกษาโดย หฤษฎ์ ธิตินันท์, 2546) โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 แทนค่าของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของทราย และใช้ของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 0, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของทรายสำหรับแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 การทดลองทั้งหมดแปรผันระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างที่ 7 และ 28 วัน นำมาวัดค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน

ASTM C29 และพิจารณากำลังรับแรงอัด (ภาคผนวก ก.1) เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน โดยใช้ข้อกำหนดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 827-2531 ในการทดสองทั้งสิ้นมีทั้งหมด 192 ตัวอย่าง 64 ชุดการทดลอง โดยแต่ละชุดการทดสองมี 3 ตัวอย่าง

3.3.3.2 **การทดลองที่** 3.2 ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นชนิดอัดศิลา หนา 6 เซนติเมตร โดยทำการหล่อก้อนตัวอย่างทั้งหมด 10 ก้อนใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 827-2531 และใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก 2035-2543 เพื่อจัดประเภทคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามแนวทางในการใช้งาน โดยทำการวัดความได้ฉาก กำลังรับแรงอัด และร้อยละการดูดซึมน้ำ โดยแช่คอนกรีตบล็อกตัวอย่างในน้ำที่มีอุณหภูมิ 27 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส (หรืออุณหภูมิน้ำในห้อง) โดยให้ผิวน้ำอยู่เหนือผิวบนของคอนกรีตบล็อกเป็นเวลา 24 $\pm$ 2 ชั่วโมง นำบล็อกตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ใช้ผ้าชื้นเช็ดน้ำที่ผิวภายนอกให้หมดโดยที่ภายในอิ่มน้ำ แล้วนำไปชั่ง (M_2) วางคอนกรีตบล็อกตัวอย่างในตู้อบโดยที่คอนกรีตบล็อกตัวอย่างต้องห่างจากผิวที่ได้รับความร้อนหรือคอนกรีตบล็อกตัวอย่างอื่นอย่างน้อย 25 มิลลิเมตร อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 $\pm$ 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วชั่ง (M_1) วิธีการคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำเป็นร้อยละ โดยให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 1 จากสูตร

$$\text{การดูดซึมน้ำร้อยละ} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

เมื่อ M_2 คือ มวลคอนกรีตบล็อกตัวอย่างเมื่ออิ่มน้ำ เป็นกรัม

M_1 คือ มวลคอนกรีตบล็อกตัวอย่างอบแห้ง เป็นกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ผังสรุปแผนงานวิจัย

ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด = 1 : 1.2 : 1.8 ใช้ตัวอย่างละ 3 ก้อนต่อ 1 ชุดการทดลอง ในการทดลองทั้งหมด 64 ชุดการทดลอง โดยเลือกเฉพาะค่าที่กำลังรับแรงอัดมากกว่า 40 เมกะปาสคาล นำมาหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นชนิดอัฐศิลา หนา 6 นิ้ว เป็นจำนวน 10 ก้อน โดยทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ แล้วนำมาจัดประเภทคอนกรีตบล็อกตามการใช้งาน

รูปที่ 3.7 ผังสรุปแผนการดำเนินการวิจัย

3.5 ประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

การประมาณค่าใช้จ่ายนี้จะใช้ข้อมูลซึ่งอ้างอิงจากการไฟฟ้านครหลวง ราคาวัสดุพิจารณาจากกรมการค้าภายใน เปรียบเทียบกับราคาคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตขายตามท้องตลาด ต่อก้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจากของเสียประเภทฉลาก โดยการเตรียมวัสดุดังกล่าวด้วยการนำไปผึ่งแดด อบด้วยเตา แล้วนำมาบดให้ละเอียดเพื่อลดขนาดในการแทนมวลรวมละเอียดซึ่งต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งวัสดุผสมต้องอบแห้งเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสม โดยเฉพาะหินเกล็ดที่ใช้ต้องล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นที่เกาะติดผิวเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสมบัติคอนกรีตบล็อกที่ผลิต ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และค่าความด่วงจำเพาะของวัสดุจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานอธิบายกลไกปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นตลอดจนลักษณะของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้ สัดส่วนคละ และการดูดซึมน้ำของวัสดุเป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องทดสอบเพื่อควบคุมการผลิต

ปัจจุบันการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นไม่มีการกำหนดสัดส่วนผสมที่คงที่แน่นอน จึงจำเป็นต้องศึกษาทดลองหาสัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อวัสดุผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา โดยนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยศึกษาสัดส่วนการแทนที่ของเสียประเภทฉลากในมวลรวมละเอียด ระยะเวลาบ่ม ที่สถานะต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เพื่อให้บรรลุตามจุดประสงค์ในการบำบัดของเสียประเภทฉลาก ต้องศึกษาการชะละลายของโลหะหนักเพื่อยืนยันความปลอดภัยในการนำมาใช้งาน และสุดท้ายพิจารณาความคุ้มค่าโดยประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัด พร้อมทั้งประเมินราคาต้นทุนในการผลิต

4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับทำวิจัย

หลังจากที่นำของเสียประเภทฉลากนำไปไล่ความชื้นด้วยการตากแดด และอบ พร้อมทั้งคัดแยกสิ่งเจือปนที่ติดมากับของเสียประเภทฉลากเช่น เศษแก้ว ที่เกิดมาจากกระบวนการขัดขวดแก้วที่นำมาใช้เป็นวัสดุแทนมวลรวมละเอียดเมื่อแห้งแล้ว จากนั้นร่อนวัสดุที่ผ่านการบด พร้อมทั้งร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นมวลรวมคือทราย และหินเกล็ดทำการล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะได้ควบคุมปริมาณน้ำของส่วนผสม และเป็นการกำจัดฝุ่นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านการเพิ่มการหดตัวของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตด้วย

4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.2.1 การหาความหนาแน่นปกติของของเสียประเภทฉลาก

จากงานวิจัยพบว่าของเสียประเภทฉลาก มีค่าความหนาแน่น 0.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รายละเอียดการคำนวณดังแสดงใน (ตารางที่ ข.8)

4.2.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก

การวิเคราะห์องค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก จะทำการวิเคราะห์ภายหลังจากที่ของเสียประเภทฉลากแห้งแล้วโดยคัดเลือกเฉพาะของเสียประเภทฉลากแยกกับสิ่งแปลกปลอม เช่น เศษแก้ว เศษไม้จิ้มฟัน พบว่ามีร้อยละของเสียประเภทฉลากคือ 99.8 ดังแสดงในตารางที่ ข.9 ซึ่งสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งเป็นพวกเศษแก้วที่เกิดจากกระบวนการล้างขัดขวดแก้ว

4.2.3 การวิเคราะห์หาส่วนประกอบของโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก

ผลการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของโลหะหนักที่วิเคราะห์จากน้ำชะละลายเมื่อวิเคราะห์ด้วยกรดไนตริกเข้มข้นของตัวอย่างของเสียประเภทฉลากดังแสดงในตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุทั้งหมดที่คาดว่าจะมีในของเสียประเภทฉลากคือ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม เซเลเนียม โครเมียม สารหนู นิกเกิล และทองแดง พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบมีทั้งสิ้น 4 ธาตุคือ ปรอท โครเมียม นิกเกิล และทองแดง จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเมื่อเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และ Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยกว่าทั้งสิ้น ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 ปี พ.ศ. 2548 กล่าวว่า การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายใดๆ มีค่าไม่เกินค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) แต่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ของสารนั้นที่กำหนด หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้นไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบเมื่อเทียบกับมาตรฐานเบื้องต้นดังตารางที่ 4.1 พบว่าของเสียชนิดนี้ไม่ใช่ของเสียอันตราย ซึ่งไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์สกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก

ปริมาณโลหะหนัก	มิลลิกรัม/ลิตร *	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	มาตรฐาน TTLC** มิลลิกรัม/กิโลกรัม	มาตรฐาน STLC*** มิลลิกรัม/ลิตร
ปรอท	n.d.	n.d.	20	0.2
ตะกั่ว	0.088	8.8	1,000	5
แคดเมียม	n.d.	n.d.	100	1
เซเลเนียม	n.d.	n.d.	100	1
โครเมียม	2.033	203.3	2,500 (+6) 500 (+3)	5 (+6) 5 (+3)
สารหนู	n.d.	n.d.	500	5
นิกเกิล	0.086	8.6	2,000	20
ทองแดง	0.371	37.1	2,500	25

หมายเหตุ * มิลลิกรัม/ลิตร เป็นค่าความเข้มข้นที่ทาง ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวิเคราะห์

** มิลลิกรัม/ลิตร เป็นค่าความเข้มข้นของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด ใช้ในการเทียบกับมาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (การคำนวณดูในภาคผนวก ง.1)

*** มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็นค่าความเข้มข้นของสารในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ใช้ในการเทียบกับมาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) (การคำนวณดูในภาคผนวก ง.2)

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าพีเอช ของน้ำชะละลายในของเสียประเภทฉลาก

จากการนำเอาน้ำชะละลายในของเสียประเภทฉลากมาทดสอบหรือวิเคราะห์ทำโดยวัดด้วย พีเอชมิเตอร์ ตามวิธีทดสอบ U.S.EPA.9040 พบว่าค่า พีเอช ในน้ำชะละลายมีค่า 10.01 ซึ่งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 ปี พ.ศ. 2548 กล่าวว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้เป็นสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดด่าง พีเอช เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดด่าง พีเอช เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า จากการทดสอบค่าพีเอช ของน้ำชะละลายดังกล่าวไม่จัดอยู่ในประเภทสารกัดกร่อน

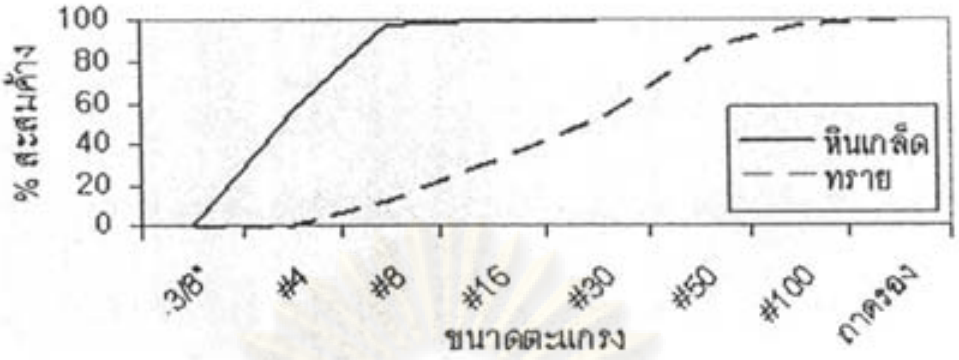
4.2.5 **จัดรหัสของชนิดและประเภทสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว**

จากการวิเคราะห์รหัสของเสียประเภทฉลากซึ่งไม่ใช่ของเสียอันตราย จัดหมวดหมู่โดยใช้รหัสเลข 6 หลักคือ 19 08 99 เลข 2 รหัสแรกคือ 19 บ่งบอกว่าสิ่งปฏิกูลที่ได้นั้นเป็นสิ่งปฏิกูลจากโรงปรับคุณภาพของเสีย ซึ่งใช้กระบวนการทางด้านเคมีคือล้างขวดแก้วโดยการต้มในเตาที่มีการควบคุมค่าพีเอช ให้อยู่ระหว่าง 10.5 – 11.8 เพื่อให้ของเสียเกิดการยุ่ยก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการทางกายภาพคือ บีบน้ำในของเสียประเภทฉลาก เพื่อนำน้ำที่ได้มาหมุนเวียนใช้ใหม่ ส่วนของเสียประเภทฉลากนั้นนำไปฝังกลบ ภายในบริเวณโรงงาน สำหรับรหัส 2 ตัวกลางคือ 08 เป็นสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการใช้งานของสี สารเคลือบเงา สารเคลือบผิว กาว สารติดผนึก และหมึกพิมพ์ ซึ่งหากจัดหมวดหมู่เลข 4 หลักแล้วพบว่า รหัส 19 08 คือของเสียที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งไม่ได้กำหนดไว้ในรหัสอื่น เมื่อนำมาวิเคราะห์เลข 2 ตัวท้ายพบว่า ไม่มีรหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดอื่นๆ ยกเว้นรหัสที่มีเลข 2 รหัสสุดท้ายเป็น 99 จึงสรุปรหัส 6 ตัวคือ 19 08 99

4.2.6 **การวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุผสม**

เพื่อที่จะให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้จึงต้องมีการพิจารณาในเรื่องการกระจายขนาดคละ (Gradation)ของวัสดุผสม วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของหินเกล็ด และทรายใช้การคัดแยกด้วยตะแกรง โดยเครื่องเขย่า (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C33-93 และ ASTM C136-95a ซึ่งวัสดุผสมที่ดีมีผลให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ลดลง ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดดีขึ้น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ และมีส่วนช่วยป้องกันการแยกตัว (Segregation) ของส่วนผสมได้อีกด้วย การวิเคราะห์ส่วนคละของวัสดุผสมแสดงด้วยกราฟแบบ Semi-log scale (ดังรูปที่ 4.1) หินเกล็ดที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียง 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) เท่ากับ 5.55 ขณะที่ทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) เท่ากับ 2.77 เมื่อผสมทรายต่อหินเกล็ดในสัดส่วนทรายต่อหินเท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงแนะนำ (0.55 ถึง 0.70) โดยประณต กุลประสูตร (2541) รายละเอียดของการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ส่วนคละของวัสดุผสมที่ใช้ในงานวิจัย

วินิต ช่อวิเชียร (2544) กล่าวว่า ส่วนผสมที่มีทรายมากเกินไป (หินน้อย) จะช่วยให้ทำงานง่าย แต่จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวง่าย ไม่ทนทาน และไม่ประหยัด ส่วนผสมที่มีหินมากเกินไป (ทรายน้อย) จะทำให้คอนกรีตเป็นรูโพรง เนื้อไม่แน่น และทำงานยาก ซึ่ง หิน และทรายสำหรับผลิตคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 5.5 ถึง 7.5 และ 2.25 ถึง 3.25 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของหิน และทรายที่ใช้ในงานวิจัยเป็นค่าที่อยู่ในช่วงยอมรับได้ขนาดตามกำหนดมาตรฐาน (ASTM C33-93) ซึ่งสามารถเป็นวัสดุผสมสำหรับในงานโครงสร้างได้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองขนาดคละของมวลรวม และโมดูลัสความละเอียด

	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด		ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด	
ขนาดตะแกรง	ทราย	หินเกล็ด	ทราย	หินเกล็ด
3/8"	0	1.09	0	1.09
เบอร์ 4	0	55.28	0	56.37
เบอร์ 8	11.77	41.5	11.77	97.87
เบอร์16	18.9	1.89	30.67	99.76
เบอร์ 30	20.83	0.24	51.5	100
เบอร์ 50	33.68		85.18	100
เบอร์ 100	12.25		97.43	100
ถาดรอง	2.57			
รวม	100	100	276.5	555.5
โมดูลัสความละเอียด (Finess Modulus; F.M.)			276.5/100=2.77	555.5/100=5.55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.7 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุเป็นตัวเลขที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุมีน้ำหนักเป็นกี่เท่าของน้ำขณะที่มีปริมาตรเท่ากัน หลักการวิเคราะห์หาได้จากการคำนวณสัดส่วนมวลต่อปริมาตร มวลได้จากการชั่งน้ำหนัก และปริมาตรหาโดยการแทนที่น้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และความพรุนของอนุภาค ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของทราย และหินเกล็ดแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งได้มาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศ ที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวม โดยรวมส่วนที่เป็นเนื้อแข็ง และช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบคือ 2.57 และ 2.67 ตามลำดับ สำหรับค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง ได้มาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่ชั่งในอากาศของมวลรวม กับน้ำหนักของน้ำภายในช่องว่างที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากัน ณ อุณหภูมิเดียวกัน จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้งของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบคือ 2.59 และ 2.68 ตามลำดับ และค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏได้จากการนำอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของมวลรวมอบแห้งที่ชั่งในอากาศ เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวมโดยไม่รวมช่องว่างในมวลรวมที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ ซึ่งค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏของมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบคือ 2.61 และ 2.72 ตามลำดับ ในงานวิจัยส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมแบบต่าง ๆ และความสามารถที่มวลรวมจะดูดน้ำเพื่อเปลี่ยนจากสภาวะแห้งไปเป็นอิ่มตัวที่ผิวแห้ง อ้างอิงค่าที่แนะนำโดย ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2539) โดยวัสดุผสมหยาบ และละเอียดที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 และ 2.65 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของหินเกล็ดมีค่าระหว่าง 2.67 ถึง 2.72 ส่วนทรายมีค่า 2.57 ถึง 2.61

ร้อยละของการดูดซึมน้ำของวัสดุต่าง ๆ เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากเพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสม เพื่อให้น้ำที่เติมลงไปเป็นน้ำสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีหน้าที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ช่วยให้คอนกรีตสดทำงานได้ และเคลือบผิววัสดุผสมให้ซีเมนต์เพสต์เข้าจับยึด การวิเคราะห์ใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM C128-93 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สำหรับวัสดุผสมละเอียด และสำหรับหินเกล็ดใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.4 และ ก.5 พบว่าค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำของหินเกล็ดมีค่า 0.61 และร้อยละของการดูดซึมน้ำของทรายมีค่า 0.64

ตารางที่ 4.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด และการดูดซึม

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง[1]	2.57 ± 0.01
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง[2]	2.59 ± 0.01
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ[3]	2.61 ± 0.01
ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึม (%)	0.66 ± 0.02

หมายเหตุ [1]ค่าที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°ซ

[2]รูพรุนอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ผิวแห้ง

[3]แห้งในอากาศ แต่อาจมีน้ำในรูพรุน

ตารางที่ 4.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ และการดูดซึม

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง[1]	2.67 ± 0.04
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง[2]	2.68 ± 0.04
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ[3]	2.72 ± 0.02
ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึม (%)	0.61 ± 0.15

หมายเหตุ [1]ค่าที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°ซ

[2]รูพรุนอิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ผิวแห้ง

[3]แห้งในอากาศ แต่อาจมีน้ำในรูพรุน

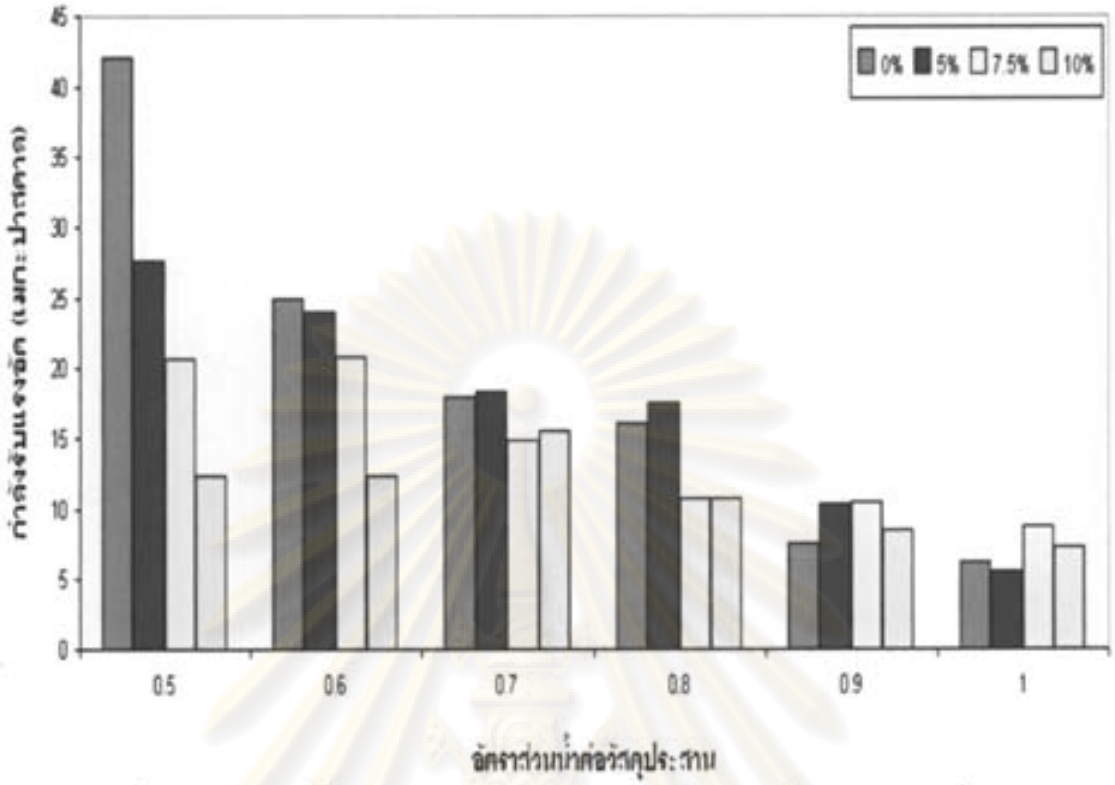
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

4.3.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนของของเสียประเภทฉลากที่ใช้ต่อมวลรวมละเอียดในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

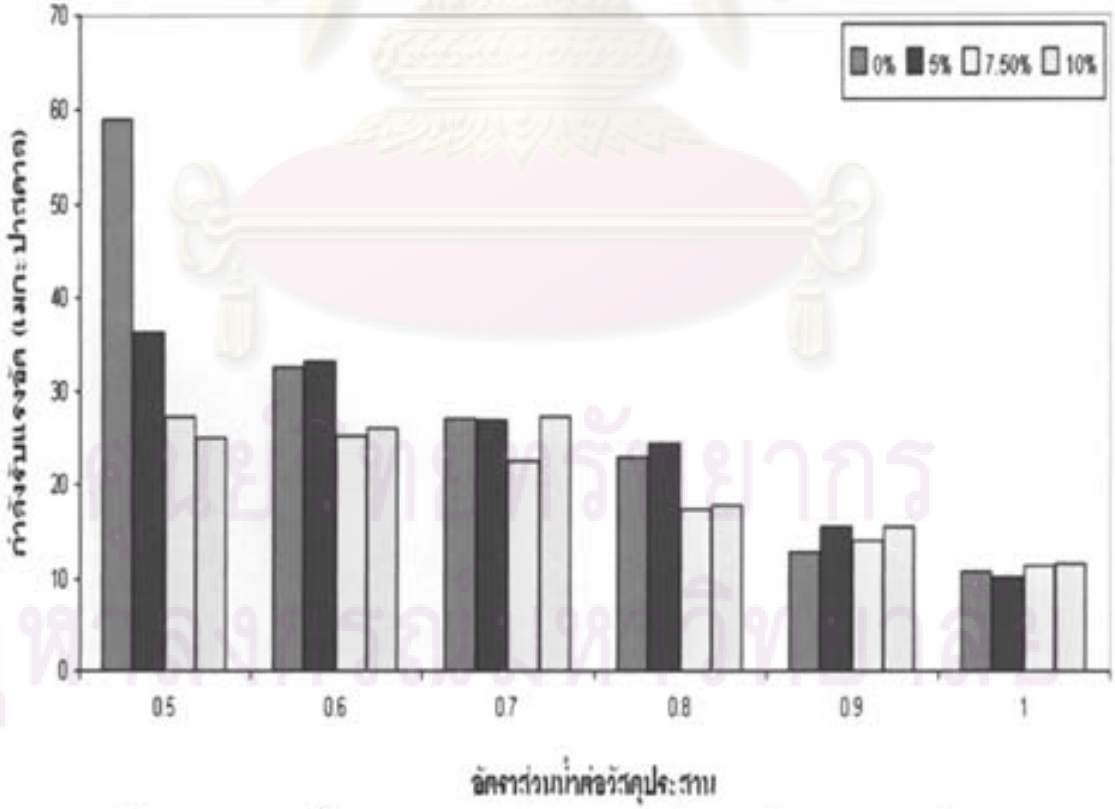
การศึกษาโดยหล่อลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แปรผันอัตราส่วนของเสียประเภทฉลากต่อมวลรวม ที่ ร้อยละ 0, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 7.5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักมวลรวมละเอียด ใช้อัตราส่วนของผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ อัตราส่วนส่วนผสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดเท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก และแปรผันค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ระยะเวลาในการบ่มที่ 7 และ 28 วัน โดยทำการทดลองครั้งละ 3 ซ้ำ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดเป็นเกณฑ์ พบว่าเมื่อแปรผันค่าของเสียประเภทฉลาก และแปรผันอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 0.5 และไม่ได้ผสมของเสียประเภทฉลากกำลังรับแรงอัดที่ทดสอบมีค่ามากที่สุดเนื่องจากไม่มีสิ่งเจือปนของวัสดุผสม วินิต ช่อวิเชียร (2544) กล่าวว่า

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม มีอิทธิพลต่อคุณภาพของคอนกรีต และราคาของคอนกรีต สัดส่วนผสมของคอนกรีต หิน ทราย ที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ต้องสะอาด แข็งแกร่ง ทนทาน มีเหลี่ยมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารหรือสิ่งสกปรกที่จำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพน้อยที่สุด ซึ่งของเสียประเภทฉลากเมื่อนำมาเป็นส่วนผสม เมื่อพิจารณาร่วมกับกำลังรับแรงอัด และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาร้อยละของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 5 พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น เมื่อเราพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนอนกรีตที่ไม่ได้ผสมของเสียประเภทฉลาก เปรียบเทียบกับของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างกันโดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.7 0.8 และ 0.9 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 5 พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่าอัตราส่วนที่ไม่ได้ผสมของเสียประเภทฉลาก เนื่องจากของเสียประเภทฉลากเป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำ ซึ่งสามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และตามปริมาณร้อยละของเสียประเภทฉลาก วินิต ช่อวิเชียร (2544) กล่าวว่าโครงสร้างในแต่ละก้อนของวัสดุผสม ประกอบด้วยเนื่อของแข็ง และช่องว่าง หรือรูพรุน ซึ่งบางส่วนอยู่ในเนื้อวัสดุ และบางส่วนอยู่ที่ผิวของวัสดุ ช่องว่างเหล่านั้นจะดูดความชื้นในอากาศเข้าไปเก็บไว้ การผสมคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมให้ได้ความข้นเหลวคงที่ อันจะทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงอัด และความทนทานของคอนกรีตมาก ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีค่ามากกำลังต้านทานคอนกรีตก็จะต่ำ ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์น้อยลงกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตก็จะสูงขึ้น ดังนั้น ในการผสมคอนกรีต ถ้าสามารถรักษาอัตราส่วนนี้คงที่ ถึงแม้ส่วนผสมอื่นๆ จะเปลี่ยนไปบ้าง กำลังของคอนกรีตจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักฉะนั้น อาจกำหนดกำลังต้านทานของคอนกรีตได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน

4.3.2 **ค่ากำลังรับแรงอัด**

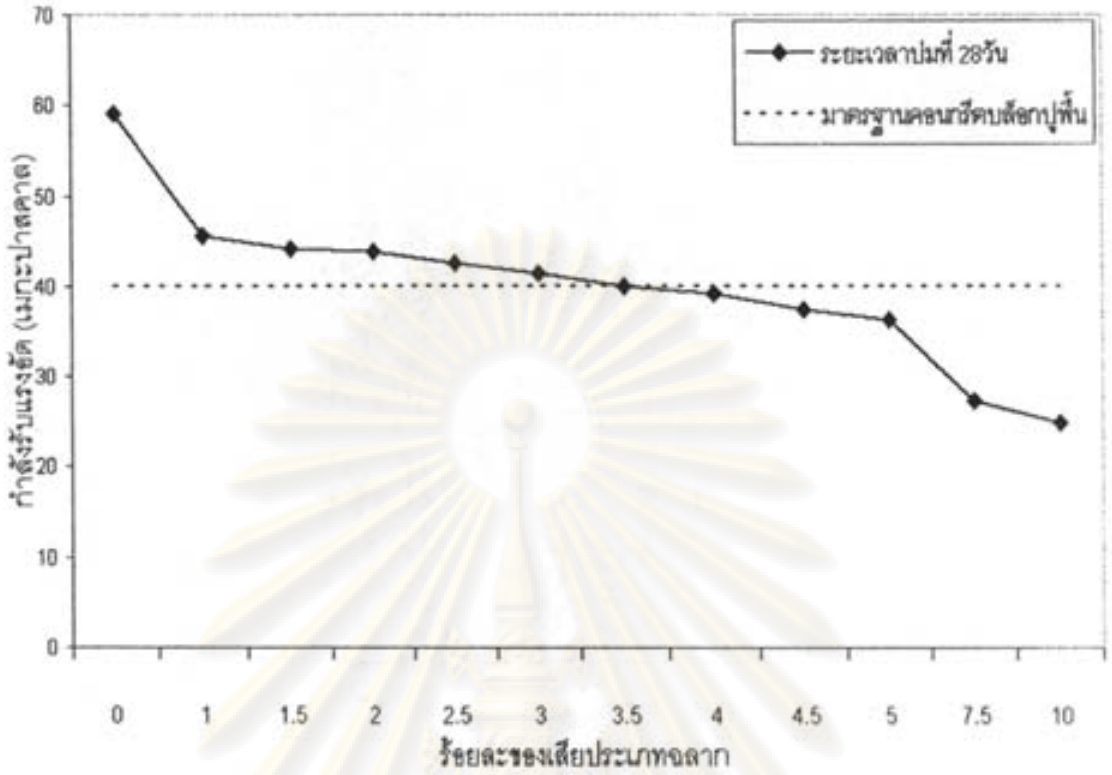
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์มีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนของของเสียประเภทฉลากที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเสียประเภทฉลากที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวขวางกั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้น้อยลง โดยอัตราส่วนของของเสียประเภทฉลากต่อมวลรวมที่น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5 ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีสมบัติทางกายภาพโดยมีกำลังรับแรงอัด 41.5 เมกะปาสคาล สูงกว่าค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนัก (40 เมกะปาสคาล) และเมื่อพิจารณาดังรูปที่ 4.4 อัตราส่วนผสมเดียวกันแต่เพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม

จากระยะเวลาบ่มแสดงตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น เนื่องจากเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ซีเมนต์เจล ซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุประสานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างน้ำกับซีเมนต์มากขึ้น พบว่า อัตราส่วนของเสียประเภทฉลากที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานที่ร้อยละ 3 ที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 41.5 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนัก คือ 40 เมกะปาสคาล จึงมีความเหมาะสมนำไปผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกระสานปูพื้นรับน้ำหนัก

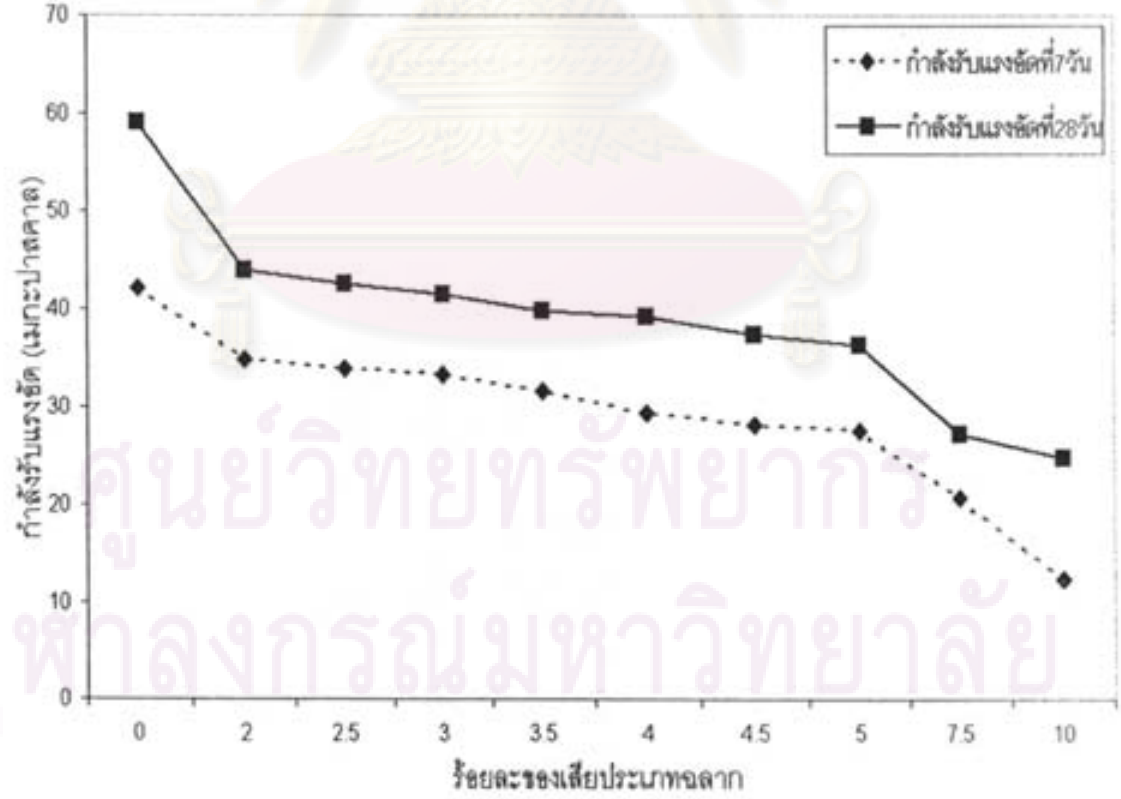
ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ร้อยละของเสียประเภทฉลาก	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	
	ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน	ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน
0	42.1	59.1
1	35.9	45.6
1.5	35.3	44.1
2	34.9	43.9
2.5	33.9	42.6
3	33.3	41.5
3.5	31.6	39.9
4	29.4	39.2
4.5	28.2	37.4
5	27.6	36.3
7.5	20.7	27.3
10	12.4	24.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 28วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.5



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่แปรผันระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

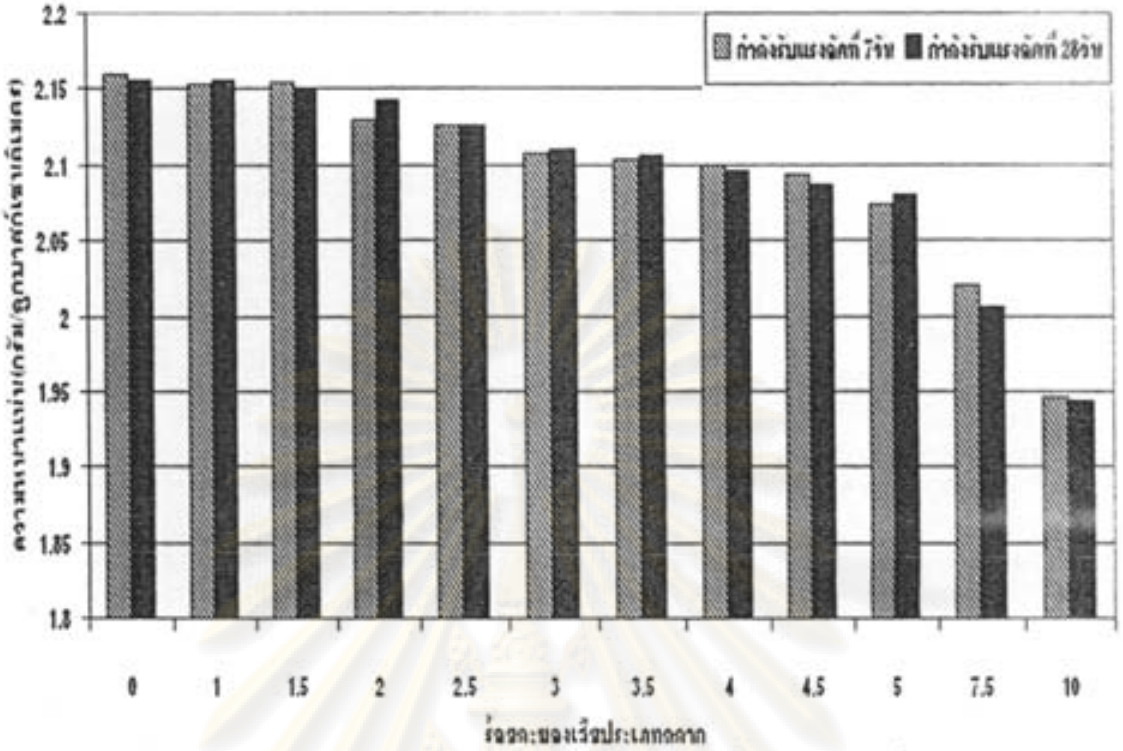
4.3.3 **ค่าความหนาแน่น**

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วันพบว่า ความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเสียประเภทฉลาก เนื่องจากของเสียประเภทฉลากมีความยืดหยุ่น เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจึงเกิดการขยายตัว ทำให้คอนกรีตไม่เกิดการยึดเกาะ ดังนั้น ถ้าผสมของเสียประเภทฉลากในสัดส่วนที่มากขึ้นจะเป็นผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ร้อยละของเสียประเภทฉลาก	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ระยะเวลาบ่ม(วัน)	
	7	28
0	2.16	2.16
1	2.15	2.16
1.5	2.15	2.15
2	2.13	2.14
2.5	2.13	2.13
3	2.11	2.11
3.5	2.10	2.11
4	2.10	2.10
4.5	2.09	2.09
5	2.07	2.08
7.5	2.02	2.01
10	1.95	1.94

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ28 วัน

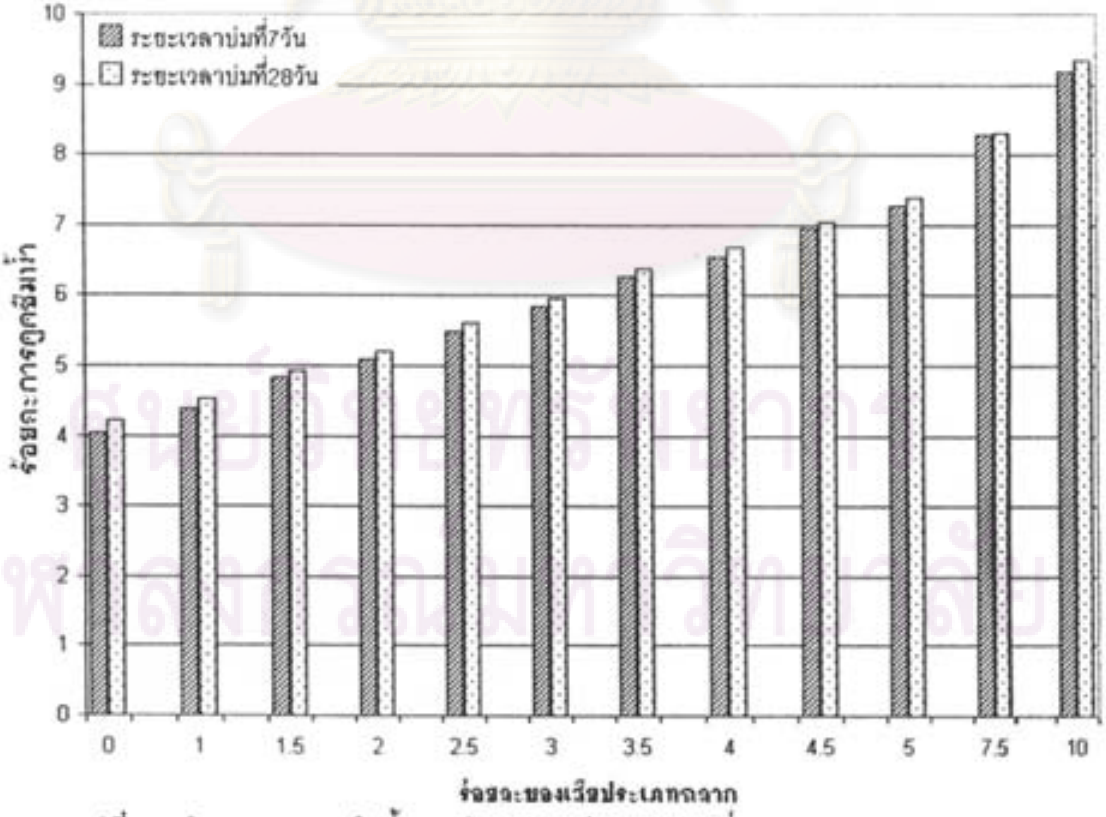
4.3.4 การดูดซึมน้ำ

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7 แสดงร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มเนื่องจากก้อนคอนกรีตลูกบาศก์มีความต้องการน้ำ เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้ก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น จากรูปแสดงร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันเมื่อพิจารณาร้อยละของเสียประเภทฉลากแทนที่ในมวลรวมละเอียด พบว่า ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากของเสียประเภทฉลากมีค่าการดูดซึมน้ำได้ดี จึงทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ร้อยละของเสียประเภทฉลาก	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ	
	ระยะเวลาบ่ม 7(วัน)	ระยะเวลาบ่ม 28(วัน)
0	4.04	4.22
1	4.39	4.52
1.5	4.84	4.94
2	5.10	5.21
2.5	5.49	5.60
3	5.85	5.97
3.5	6.27	6.39
4	6.55	6.70
4.5	6.94	7.05
5	7.27	7.40
7.5	8.28	8.31
10	9.17	9.34



รูปที่ 4.7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ28 วัน

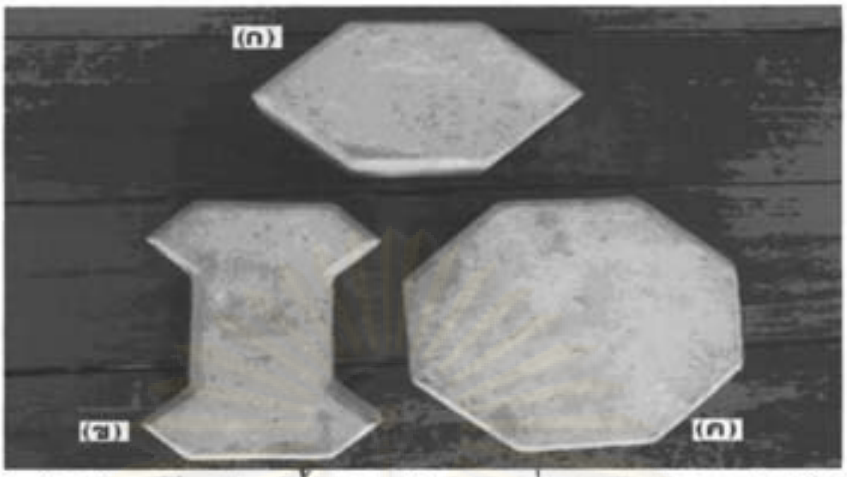
4.4 สมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูป อัฐศิลา

จากการทดสอบสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นหล่อเป็นรูปอัฐศิลา หนา 6 เซนติเมตร โดยใช้โต๊ะเขย่าแทนการกระทุ้งด้วยมือนั้น ทดสอบ 5 ตัวอย่างได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูป อัฐศิลา

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
55.7	1.45	2.37

จากการหล่อคอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร โดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 4.3 คือ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์เป็นร้อยละ 10 แทนที่โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และของเสียประเภทฉลากแทนที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของทราย พบว่า กำลังรับแรงอัดที่ได้ต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตขึ้นมามากซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตซึ่งในการหาสภาวะที่ดีที่สุดเป็นการใช้มือกระทุ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C 109 ซึ่งเมื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์หากใช้มือกระทุ้งจะทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีโพรงเป็นจำนวนมาก ความหนาแน่นต่ำ การดูดซึมน้ำสูง ทำให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้นั้นมีลักษณะเนื้อเรียบเนียน มีสีเทาเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ น้ำหนักเบา และมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยภูพิงค์ ทวีทรัพย์ (2540) กล่าวว่าสาเหตุเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบซัลเฟตในเนื้อสีกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตในปูนซีเมนต์ กลายเป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulphoaluminate) จึงทำให้ปริมาตรที่ได้เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นก่อนนำไปวัดค่ากำลังรับแรงอัดจึงต้องทำการขัดผิวหน้าของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นให้เรียบเสียก่อน ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นประเภทอัฐศิลา มีค่ากำลังรับแรงอัด 55.7 เมกะปาสคาล และค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.45 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 827 ปี 2531 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ต้องได้ค่ากำลังรับแรงอัด 40 เมกะปาสคาล และเป็นไปตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2035 ปี 2543 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก ต้องได้ค่ากำลังรับแรงอัด 50 เมกะปาสคาล) รูปที่ 4.8 แสดงผลิตภัณฑ์ของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่สัดส่วนการผสมซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก ใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และของเสียประเภทฉลากแทนที่ทราย ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของทราย



รูปที่ 4.8 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกปูพื้น (ก) รูปศิลาหกเหลี่ยม (ข) รูปคฑา (ค) รูปอัฐศิลา

4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการนำของเสียประเภทฉลากมาผลิตอิฐบล็อกประสานปูพื้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ การคิดราคาค่าใช้จ่ายของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปอัฐศิลา จะรวมค่าใช้จ่ายที่ใช้สำหรับการเตรียมวัสดุในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 แสดงราคาต่อหน่วยกิโลกรัมของวัตถุดิบ ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (มอก.827-2531) คือ 40 เมกะปาสคาล ซึ่งมีสัดส่วนดังนี้ คือ อัตราส่วนของเสียประเภทฉลากต่อมวลรวมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด เท่ากับ 1: 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 4.12 แสดงราคาวัสดุเพื่อประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนัก (เดือน มีนาคม พ.ศ. 2551)

ตารางที่ 4.10 ราคาต่อหน่วยกิโลกรัมของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	หน่วยราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.344
หินเกล็ด	0.173
ทราย	0.133
ผงหินปูน	2.00
น้ำ	0.013

ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น 1 ก้อนประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ส่วน หินเกล็ด 1.8 ส่วน ทราย 1.18 ส่วน ผงหินปูน 0.1ส่วน ของเสียประเภทฉลาก 0.03 ส่วน และน้ำ โดยมีอัตราส่วนของความต้องการน้ำในการหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ

วัสดุ	การดูดซึมน้ำของวัสดุ
ซีเมนต์-ผงหินปูน	0.5
ของเสียประเภทฉลากกระดาษ	0.71
หินเกล็ด	0.061
ทราย	0.064

คำนวณราคาต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต่อก้อน

คอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของของเสียประเภทฉลากที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยแทนที่น้ำหนักของทราย โดยเฉลี่ยมีน้ำหนักประมาณ 4.24 กิโลกรัมต่อก้อน ตารางที่ 4.12 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนักประเภทอัฐศิลา 1 ก้อน เมื่อเปรียบเทียบราคาส่วนวัสดุผสม พบว่าต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ไม่มีส่วนผสมของผงหินปูน และของเสียประเภทฉลากมีค่า เท่ากับ 2.65 บาท ส่วนต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนักที่มีส่วนผสมของผงหินปูน และของเสียประเภทฉลากมีค่าเท่ากับ 2.60 บาท ในการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์และของเสียประเภทฉลากร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ 4.12 ราคาต้นทุนวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้นรับน้ำหนักต่อก้อน

วัสดุ	คอนกรีตบล็อกที่ไม่มีส่วนผสมของผงหินปูน และของเสียประเภทฉลาก		คอนกรีตบล็อกที่มีส่วนผสมของผงหินปูนร้อยละ 10 และของเสียประเภทฉลากร้อยละ 3	
	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคา (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	0.94	2.20	0.85	1.99
ผงหินปูน	-	-	0.09	0.18
ของเสียประเภทฉลาก	-	-	0.03	-
ทราย	1.13	0.15	1.09	0.14
หินเกล็ด	1.70	0.29	1.69	0.29
น้ำ	0.47	-	0.47	-
รวมราคา (บาท)	-	2.65	-	2.60

ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนัก 1 ก้อน ประเภท อัฐศิลา จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำของเสียประเภทฉลากเป็นส่วนผสม 0.05 บาท ซึ่งเมื่อคิดรวมราคาไฟฟ้าในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นประเภทอัฐศิลา 1 ก้อน ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ง.4 พบว่า ราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีมูลค่าผลิตภัณฑ์ 3.90 บาท ต่อก้อน มีน้ำหนัก 4.24 กิโลกรัมต่อก้อน ซึ่งราคาตามร้านขายวัสดุก่อสร้างทั่วไปอยู่ที่ 8 ถึง 14 บาท สำหรับข้อมูลของกรมการค้าภายในกำหนดราคาไว้ที่ 9.50 บาท เมื่อเปรียบเทียบราคามูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตพบว่าราคาผลิตภัณฑ์มีราคาถูกกว่า 5.60 บาท หากต้องการกำจัดของเสียประเภทฉลากโดยวิธีฝังกลบพบว่าปริมาณของเสีย 1 ตัน จะเสียค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ยต่อตัน 2,666.67 บาท แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียประเภทฉลากโดยวิธีการฝังกลบของเสียไม่อันตราย

การฝังกลบของเสียประเภทฉลาก (บริษัท เบตเตอร์เวิลด์กรีน จำกัด)	
รวมระยะทาง (โรงงาน-บริษัท เบตเตอร์เวิลด์กรีน)	63 กิโลเมตร
ปริมาณของเสียน้ำหนักเปียก (ตันต่อเดือน)	12.5
ปริมาณของเสียน้ำหนักแห้ง (ตันต่อเดือน)	3.6
ราคาเหมาจ่าย อัตราค่าบริการ (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)	บาท
รถบรรทุกขนสิ่งปฏิกูลปริมาณ 3 ตัน ต่อเที่ยว	8,000.00
รวมค่าใช้จ่าย (บาทต่อของเสีย 1 ตัน)	2666.67

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการนำของเสียไปใช้ประโยชน์และสามารถเพิ่มมูลค่าสร้างรายได้ได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยศึกษาแนวทางในการนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำของเสียประเภทฉลากมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นคือ ที่อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 โดยน้ำหนัก โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

2. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้ของเสียประเภทฉลากที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 ของมวลรวมละเอียด สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักที่ต้องการค่ากำลังรับแรงอัด 40 เมกะปาสคาล โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัด 55.7 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 2.30 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 1.45 ซึ่งสามารถนำไปใช้กับงานปูพื้นที่ต้องการรับกำลังหนักได้

3. ผลการทดสอบการชะละลายของของเสียประเภทฉลากพบว่า สมบัติการชะละลายของโลหะหนักทุกชนิด และสมบัติในการกัดกร่อนพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 พ.ศ. 2548 ซึ่งไม่เป็นของเสียอันตราย รหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลคือ 19 08 99

4. ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในด้านส่วนผสมพบว่าการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรับน้ำหนักรูปอัฐศิลา 1 ก้อน หนา 6 เซนติเมตร เมื่อแทนที่ของเสียประเภทฉลากที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม พบว่าราคาเท่ากับ 2.60 บาท ในขณะคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ไม่มีการผสมของเสียประเภทฉลาก และผงหินปูน ในอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าราคาอยู่ที่ 2.65 บาท เมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำและไฟพบว่าราคาของอิฐบล็อกประสานปูพื้นมีราคา 3.90 บาท มีน้ำหนัก 4.24 กิโลกรัม ต่อก้อน ขณะที่ราคาท้องตลาดอยู่ที่ 9.50 บาทต่อก้อน ตามลักษณะของสีผลิตภัณฑ์

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม

6.1 ประโยชน์ในทางประยุกต์ใช้

จากผลการวิจัย พบว่า คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตขึ้นมา สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างได้ ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 40 เมกะปาสคาล และสำหรับงานหนัก 50 เมกะปาสคาล

6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตจากของเสียประเภทฉลากถึงแม้บางค่าจะมีกำลังรับแรงอัดไม่ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น แต่ค่าที่ได้ก็ไม่ต่ำจนเกินไป ดังนั้นอาจนำมาประยุกต์ใช้ปูในพื้นที่ที่ไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกสูง เช่น ทางเท้าคนเดิน เป็นต้น หรืออาจปรับปรุงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการค่ารับแรงอัดสูงมากนัก เช่น คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวง ซึ่งต้องการค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 7 เมกะปาสคาลเท่านั้น ดังนั้นจึงอาจสามารถเติมวัสดุในสัดส่วนที่สูงขึ้นได้อีก

2. งานวิจัยดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อจำกัดและมีความแตกต่างกับการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นผลิตภัณฑ์ควรมีการพัฒนาเพื่อเชื่อมโยงการผลิตไปสู่ระดับอุตสาหกรรมให้ได้ เช่น เครื่องมือในการขึ้นรูประดับโรงงานใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูง ซึ่งในกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกจริงนั้นใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก อัดเป็นก้อนออกมา ทำให้คอนกรีตสามารถอัดได้แน่น โดยไม่จำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมาก ซึ่งมีข้อดีคือ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสม ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นกว่าที่ทำการทดลองได้ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาเชื่อมโยงไปถึงการผลิตจริงด้วย

3. พื้นที่หน้าตัดส่วนรับน้ำหนัก เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต รูปร่างลักษณะที่แตกต่างกันทำให้ความสามารถในการทนรับน้ำหนักไม่เท่ากัน ปัจจุบันคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปร่าง ลักษณะ และความหนา ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติม

ถึงผลกระทบของรูปร่างต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณการแทนที่ของเสียประเภทฉลากที่ใช้แล้ว

4. ควรมีการศึกษาถึงอิทธิพลของปูนซีเมนต์แต่ละประเภท ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้

5. ควรมีการทดลองปรับเปลี่ยนขนาดของมวลรวมที่ใช้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากจะสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่า แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเทส่วนผสมเข้าสู่แบบหล่อและความสะดวกในการขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤษฎา ปัญญาภรบดี, ณัฐ เหลืองคำชาติ และเอกรินทร์ พงศ์พิพัฒนชัย. 2542. การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์. ปริญญานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ชวลิต นิตยะ. 2524. การผลิตและการใช้คอนกรีตบล็อกสำหรับสร้างผนัง. โครงการอบรมทางวิชาการภาคฤดูร้อน 2524. กรุงเทพมหานคร : คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่4.กรุงเทพมหานคร : คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.

ณัฐพล เกตุเหล็ก, ธราพงษ์ พากเพียร และ วีระศักดิ์ มะขามป้อม. 2544. การศึกษาบล็อกปูพื้นคอนกรีตผสมเส้นใยมะพร้าว. ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาก่อสร้างและงานไม้ (เทคโนโลยีโยธา) คณะวิศกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

นรารัชต์พร นวลสวรรค์, ถิรวัธน์ ไชยวานิชผล และสรกิจ จิระเกียรติ์. 2549. อิทธิพลของผงหินปูนที่มีผลต่อการไหลแผ่ของมอร์ตา การคายความร้อน และการพัฒนากำลังอัด. ปริญญานิพนธ์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ประณต กุลประสูตร. 2541. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5.กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

ผุสดี แพทย์นุเคราะห์. 2546. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและควอร์เตอร์เทอร์ไนซ์ครอสลิงค์ชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับสีรีมาโซล แบล็ค บี มาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกปูผนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสวงสิน เกตุโตประการ. 2540. การนำกากตะกอนของสีน้ำทาบ้านมาเป็นส่วนผสมในการทำอิฐบล็อกประสานปูพื้น. ปริญญานิพนธ์. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

พิภพ สุนทรสมัย. 2530. วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ภูพิงค์ ทวีทรัพย์. 2540. การทำเสถียรโลหะหนักในเศษสีด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รักษพล ชูชาติ. 2538. การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ราคาวัสดุก่อสร้าง กรุงเทพมหานคร. 2551. วัสดุผลิตภัณฑ์ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.indexpr.moc.go.th/PRICE_PRESENT/tablecsi_region.html [24 มีนาคม 2551]

วรวุฒิ หะมาน. 2546. การนำกากของเสียจากการเคลือบสีรถยนต์มาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในการทำคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วินิต ช่อวิเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สัมพันธ์พาณิชย์.

วิทยาศาสตร์บริการ, กรม. 2524. หมึกพิมพ์บนภาชนะบรรจุอาหาร. รายงานกิจกรรมของกรมวิทยาศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 39. กรุงเทพมหานคร : กรมวิทยาศาสตร์บริการ.

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. 2546. การนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลมาใช้ในกระบวนการดูดซับสีรีแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

หฤษฎ์ ธิดินันท์. 2546. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรชุดา ดำศรี. 2548. การหล่อแข็งและปรับเสถียรสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน-เถ้าถ่านหินด้วยปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. หลักสูตรสหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุดมผล พืชน์ไพบูลย์. 2546. เทคนิคการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสีย และขยะมูลฝอย. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาวิศวกรรมการประปาและสุขาภิบาล. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2531. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.ฉบับที่ 827. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2531. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.ฉบับที่ 1. กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์กำจัด ฝังทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2543. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2035. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 1. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for concrete aggregates. C33-93. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 10-16.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in or 50-mm cube specimens). C109/C109M-95.Annual book of ASTM standard. 04.01, 4: 69-73.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for density, relative density(specific gravity), and absorption of coarse aggregate. C127-88. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 47-68.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for density,relative density(specific gravity), and absorption of fine aggregate. C128-93. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 69-73.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. C136-95a. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 78-82.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for Portland cement. C 150-95a. Annual book of ASTM standard. 04.01, 4: 130-134.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for sampling and testing concrete masonry units. C140-96. Annual book of ASTM standard. 04.05, 4: 91-98.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for coal fly ash or natural pozzalans for use as a mineral admixture in concrete. C618-96. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 184-190.

American Society for Testing and Materials.1996. Standard specification for solid concrete interlocking paving units. C936-82. Annual book of ASTM standard. 04.05, 4: 596-597.

Conway, R.A. and Malloy, B.C.1981. Harzardous Solid Waste Testing : Firt Conference. ASTM STP 760.

De Schutter, G.2006. Fundamental and practical study of thermal stress in hardening massive concrete elements. Doctoral thesis in Dutch. Ghent University.

Hetal, M.A.2002. Effect of curing time on the physico-mechanical characteristics of the

hardened cement pastes containing limestone. Cement Concrete Research 32: 447-450.

Josephson, J. 1982. Immobilization and Leachability of Hazardous Wastes. Environmental Science and Technology. 4: 219A-223A.

LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., and Evans, J. C. 1994. Stabilization and solidification. In P.H. King (ed.), Hazardous waste management. 641-704. Singapore: McGraw-Hill book.

Lea, F.M. 1970. The chemistry sof cement and concrete. 3rd ed. New York: Chemical publishing.

Omya company. 2004. Advantages of using OMYA Calcium Carbonate in Concrete. Fine Calcium Carbonate for the Concrete Industry.

Poon, C.S., Peter, C.J., and Perry, R. 1983. Use of Stabilization Pricess in the Control of Toxic Wastes. Effluent and Water Treatment Journal. 23 (11): 451-459.

Poppe A.M. 2004. Influence of fillers on hydration and properties of self-compacting concrete. Doctoral thesis(in Dutch). Grant University.

Reade advanced materials. 1997. Reade advanced materials offers limestone powder [online]. Available from: http://www.reade.com/Products/Minerals_and_Ores/limestone.html [20 may 2006]

Sahmaran M., Christianto H. and Yaman I. 2005(October). The effect chemical admixture and mineral additives on the properties of self compacting mortar. Cement and concrete composites.

Shannag, M.J., and Yeginobali, A. 1995(April). Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. Cement and concrete research. 25, 3: 647-657.

Shin, H. S. and Sujiwattana, P.1988.Factors affecting solidification of hazardous wastes materials. Hazadous waste: detection, control, treatment. (n. p.): 1549-1560.

U.S. Environment Protection Agency. 1988 (November). Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils. 68-03-3254.

U.S. Environment Protection Agency. 1995 (January). pH Electrometric Measurement. CD-ROM. Revision 2.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
วิธีการทดลองโดยละเอียด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-86

ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. ทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
2. ทาน้ำมันชนิดเข้มข้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
3. เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
4. ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

การหล่อก้อนตัวอย่าง

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้ขนาดแบบหล่อ 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการผสม
2. การผสมใช้วิธีการผสมโดยเครื่องผสม โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมแล้ว การหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้ แท่งกระทุ้ง กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณและเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งใช้แท่งกระทุ้งกระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันทีและถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่ากำลังรับแรงอัด

ให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เวลาที่ทดสอบ	ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
1 วัน	± ½ ชั่วโมง
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ ในการให้กดกับแท่งตัวอย่าง จะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ที่ 20 – 80 วินาที

การคำนวณ

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในหน่วยของ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.1 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร หรือกิโลปาสคาล โดยคำนวณความละเอียดถึง 10 กิโลปาสคาล

ก้อนตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ในการทดสอบแต่ละครั้ง หากมีผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างใดที่มีค่าเบี่ยงเบนเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย ควรตัดผลการทดสอบนั้นออกและนำก้อนใหม่มาวัดแทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.2 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของทราย

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C128

ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักทรายตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งประมาณ 500 ± 10 กรัม บันทึกค่าน้ำหนักทราย S
2. เททรายลงในขวดทดลองรูปชมพู่ (Volumetric Flask) ใช้น้ำฉีดล้างทรายที่ภาชนะลงไปให้หมดจากนั้น เติมน้ำเพิ่มถึงระดับประมาณ 90% ของปริมาตรขวดทดลอง
3. ไล่ฟองอากาศภายในให้หมด โดยอาศัยการหมุนคว่ำและเขย่า
4. ใช้น้ำฉีดล้างทรายที่คอขวดด้านในแล้วเติมน้ำจนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ นำไปชั่งน้ำหนักบันทึกเป็นค่า C
5. เททรายออกจากขวดใส่ภาชนะนำเข้าตู้อบ อบให้ให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1/2-1 1/2 ชม.
6. นำทรายมาชั่งน้ำหนักจะได้ค่า A
7. เติมน้ำใส่ขวดเปล่าจนถึงระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ชั่งน้ำหนักจะได้ค่า B

การคำนวณ

ค่าตัวอย่าง S = 500 กรัม

C = 960 กรัม

A = 490 กรัม

B = 657 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง (Bulk Specific Gravity)

$$= \frac{A}{B+S-C} = \frac{490}{657+500-960} = 2.49$$

2. ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity)

$$= \frac{S}{B + S - C} = \frac{500}{657 + 500 - 960} = 2.54$$

น้ำหนักทราย SSD = น้ำหนักทรายแห้ง + น้ำหนักน้ำใน Void

3. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

$$= \frac{A}{B + A - C} = \frac{490}{657 + 490 - 960} = 2.62$$

4. ร้อยละการดูดซึม

$$= \frac{\text{น้ำหนักทราย SSD} - \text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักทรายอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{(S - A)}{A} \times 100 = \frac{500 - 490}{490} \times 100 = 2.04$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินเกล็ด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C127

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำมวลรวมหยาบที่เก็บมาประมาณเท่าที่ต้องการ โดยวิธีการแบ่งสี่ (Method of Quartering) ร่อนเอาส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทิ้งไป
2. ล้างมวลรวมหยาบด้วยน้ำ เพื่อขจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกที่ติดตามผิวของมวลรวมหยาบนั้น
3. ชั่งน้ำหนักของวัสดุจนคงที่ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและอบที่อุณหภูมิ 110 $\pm$ 5 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งให้เย็นประมาณ 1-3 ชั่วโมง
4. จากนั้นนำมวลรวมหยาบไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำเอามวลรวมหยาบแต่ละก้อนมาเช็ดถูด้วยผ้า ให้น้ำที่เกาะตามผิวของมวลรวมดูดซับไปโดยที่ผิวของมวลรวมหยาบยังชื้นอยู่ หลีกเลี่ยงอย่าให้มีการระเหยของความชื้นขณะเช็ดถู มวลรวมหยาบจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง
6. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมหยาบในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง
7. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมหยาบในตะกร้าลวดเหล็กแล้วชั่งน้ำหนักในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส
8. จากนั้นเอามวลรวมหยาบนั้นไปอบในเตาอุณหภูมิประมาณ 110 $\pm$ 5องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่แล้วทิ้งเอาไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1-3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปชั่ง

การคำนวณ

ค่าตัวอย่าง B = 336.7 กรัม

C = (น้ำหนักตะกร้าและหินที่ชั่งในน้ำ) - (น้ำหนักตะกร้าเปล่าชั่งในน้ำ)

= 387.6-173.0 กรัม

= 214.6 กรัม

A = 335.8 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง (Bulk Specific Gravity)

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ - น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{A}{B-C} \quad = \frac{335.8}{336.7 - 214.6} \quad = 2.75$$

2. ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity)

$$= \frac{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ - น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{B}{B-C} \quad = \frac{336.7}{336.7 - 214.6} \quad = 2.76$$

3. ความถ่วงจำเพาะแท้จริง (Apparent Specific Gravity)

$$= \frac{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง - น้ำหนักหิน SSD ชั่งในน้ำ}}$$

$$= \frac{A}{A-C} \quad = \frac{335.8}{335.8 - 214.6} \quad = 2.77$$

4. ร้อยละการดูดซึม (Absorption, %)

$$= \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่อยู่ใน Void ของหิน}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{\text{น้ำหนักหิน SSD ชั่งในอากาศ - น้ำหนักหินอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักหินอบแห้ง}} \times 100$$

$$= \frac{B-A}{A} \times 100 \quad = \frac{336.7 - 335.8}{335.8} \times 100 \quad = 0.27$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.4 การหาค่าการดูดซึมน้ำของทราย

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C128-88

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้วัสดุประมาณ 1 กิโลกรัม ในถาดขนาดพอเหมาะ เทน้ำให้ท่วมวัสดุเล็กน้อย ทิ้งไว้ให้ดูดซึมเป็นเวลา 24 $\pm$ 4 ชั่วโมง
2. เกลี่ยตัวอย่างวัสดุให้ทั่วถาดทิ้งไว้กลางแจ้ง ที่มีลมพัดและกวนตัวอย่างเป็นระยะๆ เพื่อให้แห้งทั่วกันจนกระทั่งวัสดุเริ่มไหลได้อย่างอิสระ (Free flow)
3. เทตัวอย่างใส่แบบหล่อกรวยมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางบน 40$\pm$ 3 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางล่าง 90 $\pm$ 3 มิลลิเมตร และสูง 75 $\pm$ 3 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งเบาๆที่ผิวหน้า
4. ดึงแบบหล่อออกในแนวดิ่ง ถ้าวัสดุยังคงรูปกรวยอยู่แสดงว่ายังมีความชื้นอยู่ที่ผิว นำไปไว้กลางแจ้งอีกครั้งและกวนเป็นระยะๆ
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกว่าเมื่อยกแบบหล่อกรวยออกตัวอย่างวัสดุยุบตัวหรือล้ม (ถือว่าวัสดุในขณะนี้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)
6. ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และอบแห้ง
7. คำนวนหาร้อยละการดูดซึมน้ำของวัสดุ

การคำนวณ

ร้อยละการดูดซึมน้ำ = $[(B-A) / A] \times 100$

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (Oven dry weight)

B = น้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง (Saturated surface dry weight)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.5 การหาค่าการดูดซึมน้ำของหินเกล็ด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C127-88

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้วัสดุประมาณ 5 กิโลกรัม ล้างให้สะอาดด้วยน้ำเพื่อกำจัดเศษฝุ่นที่ติดตามผิววัสดุ จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำวัสดุทั้งหมดแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ± 4 ชั่วโมง
2. เมื่อวัสดุออกจากน้ำแล้ว เกลี่ยตัวอย่างวัสดุลงบนผ้าที่ซับน้ำได้ดี สังเกตกระทั่งแผ่นฟิล์มของน้ำที่เคลือบผิวหินเกล็ดหายไป ซึ่งถือเป็นวัสดุที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง
3. ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส
4. คำนวนหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุ

การคำนวณ

ร้อยละการดูดซึมน้ำ = [(B-A) / A] x 100

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (Oven dry weight)

B = น้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง (Saturated surface dry weight)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

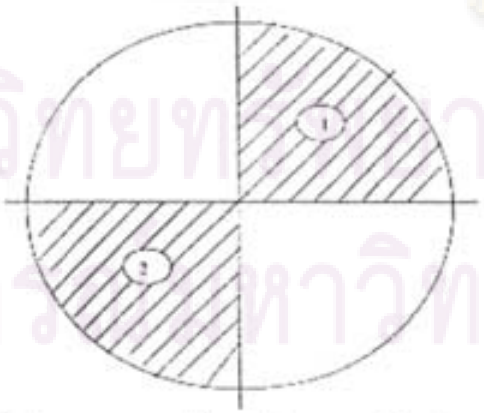
ภาคผนวก ก.6 วิธีการสุ่มและวิเคราะห์ตัวอย่างของเสียประเภทฉลากเบื้องต้น

โดยวิธีแบ่งสี่ส่วน (Quartering Method) (อุดมผล พืชน์ไพบูลย์, 2546)

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำของเสียประเภทฉลากมากักเก็บรวมๆ กันประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร นำไปทดสอบความหนาแน่น แล้วคลุกเคล้ากันให้มากที่สุดดังรูปที่ ก.1
2. แบ่งกองของเสียประเภทฉลากออกเป็น 4 ส่วน โดยเลือกตัวอย่างด้านตรงกันข้ามมารวมกันแล้วคลุกให้เข้ากันอีก เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ กระจายอย่างทั่วถึงดังรูปที่ ก.2
3. ส่วนที่เหลือแยกไปทิ้ง จากนั้นทำเรื่อยๆ ตามวิธีที่ 2 จนเหลือตัวอย่าง 50 ลิตร จากนั้นนำของเสียประเภทฉลากจำนวนนี้ไปทำการแยกองค์ประกอบ และวิเคราะห์ลักษณะอื่นๆ ต่อไป

รูปที่ ก.1 ลักษณะการกองของเสียประเภทฉลากให้เป็นรูปกรวยก่อนที่จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน



รูปที่ ก.2 การแบ่งของเสียประเภทฉลากเป็น 4 ส่วน และเลือกสุ่มมา 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.7 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลาก ด้วยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น อ้างอิงตามมาตรฐาน U.S.EPA.3050

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในของเสียประเภทฉลากโดยย่อยของเสียประเภทฉลากในกรดไนตริกอย่างรุนแรงดังนี้

1. นำตัวอย่างของเสียประเภทฉลาก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกผสมน้ำกลั่น (อัตราส่วน 1:1) ปริมาณ 10 มิลลิลิตรแล้วนำบีกเกอร์มาตั้งบนเตา อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 นาที
3. รอจนตัวอย่างเย็นแล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร แล้วนำมาตั้งบนเตาอีกประมาณ 30 นาที
4. รอจนตัวอย่างเย็น แล้วจึงเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และเติม ร้อยละ30 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 มิลลิลิตร
5. นำบีกเกอร์มาตั้งบนเตา รอกระทั่งฟองอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเปอร์ออกไซด์หายไป แล้วค่อยๆ เติมร้อยละ30 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทีละ 1 มิลลิลิตร จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศ
6. ตั้งบีกเกอร์บนเตาต่อไปจนกระทั่งเหลือปริมาตรกรดประมาณ 2 มิลลิลิตร
7. นำบีกเกอร์ลงจากเตาแล้วเติมน้ำกลั่นประมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน รอจนตัวอย่างเย็น
8. นำน้ำที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 นำน้ำที่ได้มาเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.8 การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี (WET)

เป็นการจำลองสถานการณ์ฝนกรด สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งสามารถบดได้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ.2548 ทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธีWaste Extraction Test (WET) โดยการ นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลายออกมา ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES) มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1.บดตัวอย่างเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 2 มิลลิเมตร

2.ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่ พีเอชเท่ากับ 5.0 $\pm$ 0.1

3.นำตัวอย่างหนัก 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้างอย่างต่อเนื่องด้วยกรดไนตริก ซึ่งเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

4.เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้โต๊ะเขย่า (table shaker) หรือ เครื่องกวนสาร (overhead stirrer) หรือ เครื่องสกัดสารแบบหมุน (rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

5.จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ขวดดูดผนังหนา (thick-walled suction flask) ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ การกรองด้วยความดัน (Pressure filtration) แทน การกรองด้วยสุญญากาศ (vacuum filtration) ได้ สำหรับของแข็งขนาดละเอียดอาจเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง 10,000 x G ก่อนนำไปกรองผ่านเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน- นำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที

6. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างสกัดอยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส

7.ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทธิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)

8. นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักปริมาณน้อยในสิ่งแวดล้อมแบบอินดักทีฟคัฟเปิลพลาสมา (ICP-ES)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

อัตราส่วน	ค่ากำลังรับแรงอัด(เมกะปาสคาล)					ค่าเฉลี่ยร้อยละ10
	วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b[1]0.5	7	42.0	42.8	41.6	42.1	4.21
	28	58.0	59.6	59.6	59.1	5.91
1%w/b 0.5	7	35.7	35.9	36.0	35.9	3.59
	28	45.6	45.3	45.8	45.6	4.51
1.5%w/b 0.5	7	35.1	35.5	35.3	35.3	3.53
	28	44.3	43.9	44.1	44.1	4.41
2%w/b 0.5	7	34.5	35.1	35.0	34.9	3.49
	28	43.9	43.7	44.2	43.9	4.39
2.5%w/b 0.5	7	33.7	33.9	34.0	33.9	3.39
	28	42.7	42.2	43.0	42.6	4.26
3%w/b 0.5	7	33.2	33.1	33.6	33.3	3.33
	28	40.4	41.5	42.7	41.5	4.15
3.5%w/b 0.5	7	31.4	31.6	31.7	31.6	3.16
	28	39.2	40.3	40.1	39.9	3.99
4%w/b 0.5	7	29.7	29.5	28.9	29.4	2.94
	28	38.3	39.6	39.6	39.2	3.92
4.5%w/b 0.5	7	28.2	28.6	27.9	28.2	2.82
	28	36.4	38.2	37.7	37.4	3.74
5%w/b 0.5	7	27.6	27.6	27.6	27.6	2.76
	28	35.3	37.4	36.2	36.3	3.63
7.5%w/b 0.5	7	20.4	20.8	20.8	20.7	2.07
	28	27.4	26.9	27.5	27.3	2.73
10%w/b 0.5	7	13.2	12.4	11.6	12.4	1.24
	28	24.9	25.3	24.6	24.9	2.49

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองขนาดคละของมวลรวม และโมดูลัสความละเอียด

	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด		ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด	
ขนาดตะแกรง	ทราย	หินเกล็ด	ทราย	หินเกล็ด
3/8"	0	1.09	0	1.09
เบอร์ 4	0	55.28	0	56.37
เบอร์ 8	11.77	41.5	11.77	97.87
เบอร์16	18.9	1.89	30.67	99.76
เบอร์ 30	20.83	0.24	51.5	100
เบอร์ 50	33.68		85.18	100
เบอร์ 100	12.25		97.43	100
ถาดรอง	2.57			
รวม	100	100	276.5	555.5
โมดูลัสความละเอียด (Finess Modulus; F.M.)			276.5/100=2.77	555.5/100=5.55

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ความหนาแน่นที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

อัตราส่วน	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b[1]0.5	7	2.17	2.16	2.15	2.16	0.0100
	28	2.15	2.16	2.16	2.16	0.0071
1%w/b 0.5	7	2.15	2.15	2.14	2.15	0.0071
	28	2.16	2.15	2.16	2.16	0.0071
1.5%w/b 0.5	7	2.15	2.14	2.15	2.15	0.0071
	28	2.16	2.14	2.15	2.15	0.0100
2%w/b 0.5	7	2.13	2.12	2.14	2.13	0.0100
	28	2.14	2.14	2.15	2.14	0.0071
2.5%w/b 0.5	7	2.12	2.12	2.14	2.13	0.0122
	28	2.11	2.14	2.13	2.13	0.0158
3%w/b 0.5	7	2.11	2.09	2.12	2.11	0.0158
	28	2.12	2.10	2.11	2.11	0.0100
3.5%w/b 0.5	7	2.09	2.12	2.10	2.10	0.0158
	28	2.10	2.11	2.12	2.11	0.0100
4%w/b 0.5	7	2.10	2.11	2.09	2.10	0.0100
	28	2.11	2.08	2.10	2.10	0.0158
4.5%w/b 0.5	7	2.08	2.11	2.09	2.09	0.0158
	28	2.10	2.08	2.08	2.09	0.0122
5%w/b 0.5	7	2.08	2.08	2.06	2.07	0.0122
	28	2.09	2.07	2.08	2.08	0.0100
7.5%w/b 0.5	7	2.03	2.02	2.01	2.02	0.0100
	28	2.02	2.01	1.99	2.01	0.0158
10%w/b 0.5	7	1.96	1.93	1.95	1.95	0.0158
	28	1.95	1.94	1.94	1.94	0.0071

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

ตารางที่ ข.4 ความหนาแน่นที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0

อัตราส่วน	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b 0.6	7	2.13	2.12	2.12	2.12	0.00707
	28	2.13	2.13	2.14	2.13	0.01581
5%w/b 0.6	7	2.08	2.11	2.09	2.09	0.01581
	28	2.10	2.08	2.08	2.09	0.01224
7.5%w/b 0.6	7	2.06	2.04	2.05	2.05	0.01000
	28	2.06	2.06	2.07	2.06	0.00701
10%w/b 0.6	7	1.97	1.97	1.96	1.97	0.01000
	28	1.99	1.98	1.97	1.98	0.01000
0%w/b 0.7	7	2.09	2.11	2.12	2.10	0.01581
	28	2.11	2.11	2.12	2.11	0.00701
5%w/b 0.7	7	2.10	2.09	2.11	2.10	0.01000
	28	2.11	2.12	2.10	2.11	0.01000
7.5%w/b 0.7	7	1.98	1.96	1.96	1.97	0.01225
	28	1.97	199	1.98	1.98	0.01000
10%w/b 0.7	7	1.98	1.96	1.97	1.97	0.01000
	28	1.98	1.99	1.98	1.98	0.00701
0%w/b 0.8	7	2.04	2.02	2.02	2.03	0.01225
	28	2.03	2.02	2.04	2.03	0.01000
5%w/b 0.8	7	2.10	2.09	2.08	2.09	0.01581
	28	2.09	2.09	2.08	2.09	0.00707
7.5%w/b 0.8	7	1.87	1.84	1.85	1.85	0.01581
	28	1.88	1.86	1.88	1.87	0.01225
10%w/b 0.8	7	1.92	1.91	1.90	1.91	0.01000
	28	1.94	1.92	1.92	1.93	0.01414
0%w/b 0.9	7	1.98	1.97	1.95	1.97	0.01581
	28	1.98	1.96	1.97	1.97	0.01581

ตารางที่ ข.4 ความหนาแน่นที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.6 0.7 0.8 0.9 และ 1.0 (ต่อ)

อัตราส่วน	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
5% w/b[1]0.9	7	1.97	1.96	1.97	1.97	0.00707
	28	1.99	1.98	1.98	1.98	0.00707
7.5%w/b 0.9	7	1.84	1.85	1.85	1.85	0.00707
	28	1.85	1.87	1.86	1.86	0.01000
10%w/b 0.9	7	1.90	1.90	1.89	1.90	0.00707
	28	1.90	1.91	1.90	1.90	0.00707
0%w/b 1.0	7	1.96	1.94	1.94	1.95	0.01225
	28	1.94	1.95	1.96	1.95	0.01000
5%w/b 1.0	7	1.95	1.93	1.94	1.94	0.01000
	28	1.96	1.95	1.95	1.95	0.00707
7.5%w/b 1.0	7	1.75	1.72	1.73	1.73	0.01581
	28	1.74	1.74	1.74	1.74	0.00000
10%w/b 1.0	7	1.84	1.86	1.83	1.84	0.01581
	28	1.85	1.86	1.85	1.85	0.00707
20%w/b 1.0	7	1.43	1.46	148	1.48	0.03000
	28	1.54	1.47	1.52	1.51	0.03605

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด และการดูดซึมน้ำ

จุดยุติ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
ชนิดของตัวอย่าง	ทรายละเอียด	ทรายละเอียด
น้ำหนักของขวดทดลอง, G (กรัม)	155.7	154.6
น้ำหนักของขวดทดลอง+น้ำ, B (กรัม)	651.7	648.0
น้ำหนักทรายที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวที่ผิวแห้ง , S (กรัม)	500.1	500.2
น้ำหนักน้ำ + ทราย + ขวดทดลอง, C (กรัม)	957.6	955.5
ทรายที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่, A (กรัม)	496.9	496.8
ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง	2.56	2.58
ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง	2.58	2.60
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.60	2.62
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	0.64	0.68
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง	2.57	
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง	2.59	
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.61	
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	0.66	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ และการดูดซึมน้ำ

จุดยุติ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
ชนิดของตัวอย่าง	หินเกล็ด	หินเกล็ด
น้ำหนักของหินเกล็ดสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง, B (กรัม)	503.1	405.0
น้ำหนักของตะกร้าในน้ำ (กรัม)	272.5	270.3
น้ำหนักของตะกร้า+หินเกล็ดในน้ำ, S (กรัม)	586.1	526.1
น้ำหนักของหินเกล็ดในน้ำ, C (กรัม)	313.6	255.8
หินเกล็ดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่, A (กรัม)	499.5	403
ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง	2.64	2.70
ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง	2.65	2.71
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.69	2.74
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	0.72	0.50
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง	2.67	
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง	2.68	
ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.72	
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	0.61	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของวัตถุดิบ (ของเสียประเภทฉลาก)

ของเสียประเภทฉลาก	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง + น้ำหนักตัวอย่างที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง +น้ำหนักตัวอย่างที่อบแห้ง (กรัม)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ	
				ร้อยละ	ค่าเฉลี่ย
1	81.426	126.345	73.919	70.92	71.42
2	79.233	127.493	74.161	71.91	
3	76.553	118.206	68.952	71.43	

ตารางที่ ข. 8 ค่าความหนาแน่นของของเสียประเภทฉลาก

น้ำหนักของเสียประเภทฉลาก (กรัม)	ปริมาตรถัง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)
9,698	60,560	0.16014

<u>รายละเอียดการคำนวณ</u>

ปริมาตรถัง 16 แกลลอน = 60.56 ลิตร = 0.06056 ลูกบาศก์เมตร =60,560 ลูกบาศก์เซนติเมตร

น้ำหนักถังเปล่า 2.51 กิโลกรัม = 2,510 กรัม

น้ำหนักถัง + ของเสียประเภทฉลาก = 12,208 กรัม

น้ำหนักของเสียประเภทฉลาก = 9,698 กรัม

ความหนาแน่น = มวล / ปริมาตร = 9,698 กรัม / 60,560 ลูกบาศก์เซนติเมตร

= 0.16 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ข. 9 องค์ประกอบของของเสียประเภทฉลาก

ของเสียประเภทฉลากรวมสิ่งเจือปน (กรัม)	สิ่งเจือปนอื่นๆ (กรัม)	ร้อยละของเสียประเภทฉลาก
6,786	13.6	99.8

<u>รายละเอียดการคำนวณ</u>

ปริมาตรถัง 42.38 ลิตร

น้ำหนักถังเปล่า 1,445.2 กรัม

น้ำหนักถัง + ของเสียประเภทฉลากรวมสิ่งเจือปน (เศษแก้ว ไม้จิ้มฟัน บุหรี่) = 8,232.1 กรัม

น้ำหนักของเสียประเภทฉลากรวมสิ่งเจือปน (เศษแก้ว ไม้จิ้มฟัน บุหรี่) = 6,786 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 ร้อยละการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 28 วัน เมื่อแปรผันของเสียประเภทฉลาก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5

อัตราส่วน	ร้อยละการดูดซึมน้ำของก้อนคอนกรีตลูกบาศก์					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b[1] 0.5	7	4.14	3.96	4.02	4.04	0.09165
	28	4.21	4.19	4.27	4.22	0.04183
1%w/b 0.5	7	4.42	4.40	4.36	4.39	0.03082
	28	4.53	4.44	4.59	4.52	0.07549
1.5%w/b 0.5	7	4.96	4.72	4.86	4.84	0.08544
	28	5.02	4.93	4.89	4.97	0.07246
2%w/b 0.5	7	5.13	5.10	5.07	5.10	0.03000
	28	5.23	5.16	5.25	5.21	0.04743
2.5%w/b 0.5	7	5.49	5.52	5.47	5.49	0.02549
	28	5.61	5.63	5.58	5.60	0.02645
3%w/b 0.5	7	5.82	5.89	5.86	5.85	0.03605
	28	5.97	6.01	5.94	5.97	0.03535
3.5%w/b 0.5	7	6.24	6.31	6.27	6.27	0.03535
	28	6.39	6.37	6.41	6.39	0.02000
4%w/b 0.5	7	6.53	6.51	6.62	6.55	0.05874
	28	6.71	6.68	6.73	6.70	0.02646
4.5%w/b 0.5	7	6.92	6.97	6.95	6.94	0.02646
	28	7.01	7.11	7.04	7.05	0.05148
5%w/b 0.5	7	7.21	7.29	7.33	7.27	0.06164
	28	7.41	7.37	7.43	7.40	0.07681
7.5%w/b 0.5	7	8.23	8.30	8.31	8.28	0.04359
	28	8.27	8.32	8.35	8.31	0.04062
10%w/b 0.5	7	9.17	9.12	9.23	9.17	0.05523
	28	9.32	9.37	9.35	9.34	0.02646

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

ตารางที่ ข.11 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วน	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ค่าเฉลี่ยร้อยละ10
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b[1]0.5	42.0	42.8	41.6	42.1	4.21
0%w/b 0.6	24.4	25.2	25.2	24.9	2.49
0%w/b 0.7	16.8	19.2	17.6	17.9	1.79
0%w/b 0.8	15.2	16.4	16.4	16.0	1.60
0%w/b 0.9	6.9	7.7	8.3	7.6	0.76
0%w/b 1.0	5.4*	6.8	6.4	6.2	0.62
5%w/b 0.5	27.6	27.6	27.6	27.6	2.76
5%w/b 0.6	24.1	24.8	23.2	24.0	2.40
5%w/b 0.7	18.2	18.6*	18.0	18.3	1.83
5%w/b 0.8	17.6	17.5	17.3	17.5	1.75
5%w/b 0.9	10.4	10.8	9.6	10.3	1.03
5%w/b 1.0	6.0	5.6	5.2	5.6	0.56
7.5%w/b0.5	20.4	20.8	20.8	20.7	2.07
7.5%w/b0.6	20.0	20.8	21.6	20.8	2.08
7.5%w/b0.7	15.2	14.8	14.8	14.9	1.49
7.5%w/b0.8	11.2	10.8	10.0	10.7	1.07
7.5%w/b0.9	11.2	10.4	10.0	10.5	1.41
7.5%w/b1.0	9.6	8.8	8.0	8.8	0.88
10%w/b 0.5	12.4	13.2	11.6	12.4	1.24
10%w/b 0.6	14.4	15.2	16.8	12.4	1.24
10%w/b 0.7	14.4	15.2	16.8	15.5	1.55
10%w/b 0.8	10.0	10.8	11.6	10.8	1.08
10%w/b 0.9	7.8	9.4	8.4	8.5	0.85
10%w/b 1.0	7.6	7.0	7.2	7.3	0.73

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

*กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนร้อยละ 10 ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

ตารางที่ ข.12 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วน	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ค่าเฉลี่ยร้อยละ10
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
0% w/b[1]0.5	58.0	59.6	59.6	59.1	5.91
0%w/b 0.6	32.0	33.2	32.8	32.7	3.27
0%w/b 0.7	26.8	26.8	27.6	27.1	2.71
0%w/b 0.8	22.8	23.6	22.4	22.9	2.29
0%w/b 0.9	12.4	12.8	13.2	12.8	1.28
0%w/b 1.0	10.0	11.2	10.8	10.7	1.07
5%w/b 0.5	35.3	37.4	36.2	36.3	3.63
5%w/b 0.6	32.4	34.6	32.9	33.3	3.33
5%w/b 0.7	27.3	26.4	26.8	26.8	2.68
5%w/b 0.8	24.1	24.4	24.3	24.3	2.43
5%w/b 0.9	15.4	15.6	15.1	15.4	1.54
5%w/b 1.0	10.4	10.2	9.6	10.1	1.01
7.5%w/b0.5	27.4	26.9	27.5	27.3	2.73
7.5%w/b0.6	25.5	25.2	24.9	25.2	2.52
7.5%w/b0.7	22.7	22.6	22.1	22.5	2.25
7.5%w/b0.8	17.4	17.1	17.3	17.3	1.73
7.5%w/b0.9	14.2	14.1	13.9	14.1	1.41
7.5%w/b1.0	11.2	11.4	11.4	11.3	1.13
10%w/b 0.5	24.9	25.3	24.6	24.9	2.49
10%w/b 0.6	25.7	26.2	26.0	26.0	2.60
10%w/b 0.7	27.3	27.6	26.8	27.2	2.72
10%w/b 0.8	17.7	17.1	18.3	17.7	1.77
10%w/b 0.9	15.4	15.3	15.7	15.5	1.55
10%w/b 1.0	11.3	11.7	11.5	11.5	1.15

หมายเหตุ [1]อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b=water-binder ratio)

*กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนร้อยละ 10ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

ตารางที่ ข.13 ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลากวิเคราะห์ด้วยวิธีกรดไนตริกเข้มข้น

ธาตุ	ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละสัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร
ปรอท (Hg)	1	0.01066	0.005893	117.6
	2	-0.00326		
	3	0.00677		
	4	-0.00587		
	ความสามารถในการวิเคราะห์ได้ของเครื่องมือ	< 0.04		
ตะกั่ว (Pb)	1	0.04131	0.036108	40.93
	2	0.08871		
	3	0.12922		
	4	0.09363		
	ค่าเฉลี่ย	0.08822		
แคดเมียม (Cd)	1	-0.00113	0.002058	109.6
	2	0.00223		
	3	0.00308		
	4	0.00332		
	ความสามารถในการวิเคราะห์ได้ของเครื่องมือ	< 0.003		
เซเลเนียม (Se)	1	0.1157	0.02648	30.46
	2	0.0596		
	3	0.1025		
	4	0.0700		
	ความสามารถในการวิเคราะห์ได้ของเครื่องมือ	< 0.15		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.13 ปริมาณโลหะหนักในของเสียประเภทฉลากวิเคราะห์ด้วยวิธีกรดไนตริกเข้มข้น (ต่อ)

ธาตุ	ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละสัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร
สารหนู (As)	1	0.02387	0.025170	337.2
	2	-0.01144		
	3	-0.03740		
	4	-0.00489		
	ความสามารถในการวิเคราะห์ได้ของเครื่องมือ	< 0.05		
นิกเกิล (Ni)	1	0.08757	0.001982	2.31
	2	0.08311		
	3	0.08689		
	4	0.08530		
	ค่าเฉลี่ย	0.08572		
ทองแดง (Cu)	1	0.37236	0.010179	2.74
	2	0.38441		
	3	0.36608		
	4	0.36075		
	ค่าเฉลี่ย	0.37090		
โครเมียม (Cr)	1	2.02694	0.082740	4.07
	2	2.14588		
	3	2.01345		
	4	1.94711		
	ค่าเฉลี่ย	2.03334		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.14 สมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ 28 วัน (อัฐศิลา หนา 6 เซนติเมตร)

ตัวอย่างที่	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	54.8	2.29	1.54
2	56.4	2.41	1.40
3	55.1	2.32	1.36
4	57.0	2.47	1.48
5	55.4	2.36	1.46
ค่าเฉลี่ย	55.7	2.37	1.45
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.9273	0.0778	0.0702

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
มาตรฐานที่ใช้ในการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาคผนวก ค.1</u> ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548

รหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ข้อ 1 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ และมีการกำหนดรหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยใช้รหัสเลข 6 หลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 เลข 2 หลักแรกแสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการ หรือชนิดของสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ดังนี้

หมวด 01 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการสำรวจ การทำเหมืองแร่ การทำเหมืองหิน และการปรับสภาพแร่ธาตุโดยวิธีกายภาพและเคมี

หมวด 02 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการเกษตรกรรม การเพาะปลูกพืชสวน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การทำป่าไม้ การล่าสัตว์ การประมง การแปรรูปอาหารต่าง ๆ

หมวด 03 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการแปรรูปไม้ และการผลิตแผ่นไม้ เครื่องเรือน เยื่อกระดาษ กระดาษ หรือกระดาษแข็ง

หมวด 04 สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมเครื่องหนัง ขนสัตว์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ

หมวด 05 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม การแยกก๊าซธรรมชาติ และกระบวนการบำบัดถ่านหินโดยการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน

หมวด 06 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตสารอนินทรีย์ต่าง ๆ

หมวด 07 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตสารอินทรีย์ต่าง ๆ

หมวด 08 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการผลิต การผสมตามสูตร การจัดส่ง และการใช้งานของสี สารเคลือบเงา สารเคลือบผิว กาว สารติดผนึก และหมึกพิมพ์

หมวด 09 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการถ่ายภาพ

หมวด 10 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการใช้ความร้อน

หมวด 11 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการปรับสภาพผิวโลหะและวัสดุต่าง ๆ ด้วยวิธีเคมี รวมทั้งการชุบเคลือบผิว และของเสียจากกระบวนการ non-ferrous hydro-metallurgy

หมวด 12 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการตัดแต่ง และปรับสภาพผิวโลหะ พลาสติก ด้วยกระบวนทางกายภาพ หรือเชิงกล

หมวด 13 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภท น้ำมันและเชื้อเพลิงเหลว ไม่รวมน้ำมันที่บริโภคได้

หมวด 14 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทตัวทำละลายอินทรีย์ สารทำความเย็น สารขับเคลื่อน ที่ไม่รวมไว้ในหมวด 07 และหมวด 08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หมวด 15 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทบรรจุภัณฑ์ วัสดุดูดซับ ผ้าสำหรับเช็ดวัสดุตัวกรอง และชุดป้องกันที่ไม่ได้ระบุไว้ในหมวดอื่น

หมวด 16 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทต่าง ๆ ที่ไม่ได้ระบุในหมวดอื่น

หมวด 17 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากงานก่อสร้างและการรื้อทำลายสิ่งก่อสร้าง รวมถึงดินที่ขุดจากพื้นที่ปนเปื้อน

หมวด 18 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากการสาธารณสุขสำหรับมนุษย์ และสัตว์รวมถึงการวิจัยทางด้านสาธารณสุข

หมวด 19 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากโรงปรับคุณภาพของเสีย โรงบำบัดน้ำเสียโรงผลิตน้ำประปา และ โรงผลิตน้ำใช้อุตสาหกรรม

1.2 เลข 2 หลักกลาง แสดงถึงกระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการนั้น ๆ ที่ทำให้เกิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว หรือเป็นชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

1.3 เลข 2 หลักสุดท้าย แสดงถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น เช่น รหัส 05 07 01 หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (05) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ (07) ที่ปนเปื้อนด้วยปรอท (01) เป็นต้น

ข้อ 2 ในการกำหนดรหัสที่เหมาะสมกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

2.1 ให้พิจารณาว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้น มาจากกระบวนการที่สอดคล้องกับ หมวด 01 ถึง หมวด 12 หรือ หมวด 17 ถึง หมวด 19 หรือไม่ โดยให้หารหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดเหล่านี้ ยกเว้นรหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99

2.2 หากไม่สามารถหารหัสที่เหมาะสมตามข้อ 2.1 ได้ ให้ตรวจสอบรหัสตามชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในหมวด 13 ถึง 15

2.3 ถ้ายังไม่สามารถระบุได้ ให้ตรวจสอบรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในหมวด 16

2.4 หากไม่สามารถระบุรหัสเลข 6 หลักจากหมวด 16 ได้ ให้กลับไปใช้รหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99 ในหมวดที่เกี่ยวข้องในข้อ 2.1

ข้อ 3 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักกำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste – Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ในภาคผนวกที่ 2 สำหรับสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย

ข้อ 1 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

1.1 เป็นของเหลวที่มีจุดวาบไฟ (Flash point) ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารละลายที่มีแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่า 24 % โดยปริมาตร วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดด้วยเครื่องมือ Pensky-Martens Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-93-79 หรือ D-93-80 หรือการวัดด้วยเครื่องมือ Setaflash Closed Cup Tester ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM Standard D-3278-78

1.2 เป็นสารที่ไม่ใช่ของเหลวแต่สามารถลุกเป็นไฟได้ เมื่อมีการเสียดสี หรือเมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเองภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลุกเป็นไฟจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและอย่างต่อเนื่องที่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงได้ ภายใต้อุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส)

1.3 เป็นก๊าซอัดที่จุดระเบิดได้ (Ignitable compressed gas) ซึ่งก๊าซอัดนี้ ให้หมายถึงวัสดุหรือของผสมใด ๆ ที่บรรจุอยู่ในถังบรรจุที่มีความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) มากกว่า 2.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส หรือมีความดันสมบูรณ์ มากกว่า 7.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D-323

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

ข้อ 2 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

2.1 เป็นสารละลาย (Aqueous solution) ที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการวัดด้วย pH-meter ตามวิธีทดสอบของ USEPA Method 9040

2.2 เป็นของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กกล้าชั้น SAE 1020 ได้ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส วิธีทดสอบหรือวิธีวิเคราะห์ทำโดยการใช้วิธีทดสอบของNACE (National Association of Corrosion Engineers) Standard TM-01-69

ข้อ 3 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

3.1 เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและอย่างรุนแรงโดยไม่มีการระเบิดเกิดขึ้น

3.2 เป็นสารซึ่งทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

3.3 เป็นสารซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะได้ของผสมที่จะระเบิดได้

3.4 เป็นสารซึ่งเมื่อผสมกับน้ำ จะทำให้เกิดมีก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.5 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ เมื่อต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่าความ เป็นกรดด่าง (pH) ระหว่าง 2 ถึง 11.5 แล้ว สามารถก่อให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้นในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

3.6 เป็นสารซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อนในที่จำกัดจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดรุนแรงได้

3.7 เป็นสารซึ่งสามารถระเบิดได้ทันที หรือเกิดปฏิกิริยาระเบิดได้ ในสภาวะอุณหภูมิ และความดันมาตรฐาน (ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) จะมีปฏิกิริยารุนแรง

ข้อ 4 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารพิษ (Toxic substances) ที่มีลักษณะ และคุณสมบัติ ดังนี้

4.1 เป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสุขอนามัยหรือสิ่งแวดล้อม เพราะมีคุณสมบัติของความเป็นสารก่อมะเร็ง สารพิษแบบเฉียบพลัน สารพิษแบบเรื้อรัง สารที่มีคุณสมบัติสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หรือตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม เช่น สารเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งตามบัญชีรายชื่อในกลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2A และกลุ่มที่ 2B ของ International Agency for Research on Cancer เป็นต้น

4.2 เป็นสารที่มีค่าความเป็นพิษ ดังต่อไปนี้

เป็นสารที่มีค่า Acute oral LD50 น้อยกว่า 2,500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัมเมื่อใช้หนู (Rat) เป็นสัตว์ทดลอง หรือมีค่า Acute inhalation LC50 น้อยกว่า 10,000 ส่วนในล้านส่วนในสภาพของไอหรือก๊าซ หรือเมื่อใช้กระต่ายเป็นสัตว์ทดลอง มีค่า acute dermal LD50 น้อยกว่า 4,300 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวหนึ่งกิโลกรัม ทั้งนี้ ค่า LD50 หมายถึง ค่า(ปริมาณ)เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal dosage) ที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LD50 มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของสารพิษต่อน้ำหนักตัวสัตว์ทดลองหนึ่งกิโลกรัม และค่า LC50 หมายถึง ค่า (ความเข้มข้น) เฉลี่ยของสารพิษ (Medium lethal concentration) ในตัวกลางที่ทำให้สัตว์ที่ใช้ในการทดลองเสียชีวิตไปครึ่งหนึ่ง (50%) ค่า LC50 มีหน่วยเป็นส่วน (โดยปริมาตรหรือน้ำหนัก) ของสารพิษต่อล้านส่วน (โดยปริมาตร หรือน้ำหนัก) ของตัวกลาง

4.3 เป็นสารที่มีค่า Acute aquatic 96-hour LC50 น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อวัดในน้ำอ่อน (ความกระด้างทั้งหมด เท่ากับ 40-48 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต) กับปลา fathead minnows (Pimephales promelas) ปลา rainbow trout (Salmo gairdneri) หรือ

ปลา golden shiners (Notemigonus crysoleucas) ตามที่กำหนดใน Part 800 ของ the "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (16th Edition)," American Public Health Association, 1985

4.4 เป็นสารที่มีองค์ประกอบของสารที่ระบุข้างล่างนี้ ในปริมาณความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่ง หรือปริมาณรวมของสารทั้งหมด มากกว่าหรือเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก

4.4.1 2-Acetylaminofluorene (2-AAF)

4.4.2 Acrylonitrile

4.4.3 4-Aminodiphenyl

4.4.4 Benzidine and its salts

4.4.5 bis (Chloromethyl) ether (BCME)

4.4.6 Methyl chloromethyl ether

4.4.7 1,2-Dibromo-3-chloropropane (DBCP)

4.4.8 3,3'-Dichlorobenzidine and its salts (DCB)

4.4.9 4-Dimethylaminoazobenzene (DAB)

4.4.10 Ethyleneimine (EL)

4.4.11 alpha-Naphthylamine (1-NA)

4.4.12 beta-Naphthylamine (2-NA)

4.4.13 4-Nitrobiphenyl (4-NBP)

4.4.14 N-Nitrosodimethylamine (DMN)

4.4.15 beta-Propiolactone (BPL)

4.4.16 Vinyl chloride (VCM)

ข้อ 5 สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ที่กำหนดไว้ดังนี้

5.1 เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตราย และสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับ หรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

แอนติโมนี และ/สารประกอบแอนติโมนี (Antimony and/or antimony compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู (Arsenic and/or arsenic compounds)	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แบเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม	10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(ยกเว้นแบไรท์ และแบเรียมซัลเฟต)

(Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate)

เบริลเรียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม	75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Beryllium and/or beryllium compounds)	
แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Cadmium and/or cadmium compounds)	
สารประกอบของโครเมียมเฮกซาวาแลนท์	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Chromium (VI) compounds)	
โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนท์	2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Chromium and/or chromium (III) compounds)	
โคบอลท์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลท์	8,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Cobalt and/or cobalt compounds)	
ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง	2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Copper and/or copper compounds)	
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts)	18,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว	1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Lead and/or lead compounds)	
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท	20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Mercury and/or mercury compounds)	
โมลิบดินัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดินัม	3,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(ไม่รวมโมลิบดินัมซัลไฟด์) (Molybdenum and/or molybdenum compounds;	
excluding molybdenum disulfide)	
นิกเกิล และ/หรือ สารประกอบนิกเกิล	2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Nickel and/or nickel compounds)	
ซิลิเนียม และ/หรือสารประกอบซิลิเนียม	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Selenium and/or selenium compounds)	
เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน	500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Silver and/or silver compounds)	
ธาลเลียม และ/หรือสารประกอบธาลเลียม	700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
(Thallium and/or thallium compounds)	
วาเนเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม	2,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วาเนเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	2,400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แอลดริน (Aldrin)	1.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คลอเดน (Chlordane)	2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี(DDT, DDE, DDD)	1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดีลดริน (Dieldrin)	8.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไดออกซิน(Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เอนดริน (Endrin)	0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor)	4.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
คีโปน (Kepone)	21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ลินเดน (Lindane)	4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เมททอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไมเร็ก (Mirex)	21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล(Polychlorinated biphenyls (PCBs))	50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	2,040 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ซิลเว็ก (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

หมายเหตุ - ค่าที่กำหนดของสารอินทรีย์ เป็นค่าที่วัดความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ

- ในกรณีของเอสเบสตอส และโลหะธาตุ ค่าที่กำหนดไว้ให้ใช้กับสารที่อยู่ในสภาพร่วนเป็นผงละเอียดเท่านั้น ทั้งนี้ แอสเบสตอส จะรวมถึง chrysotile amosite crocidolite tremolite anthophyllite และ actinolite

5.2 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (2548) เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร (Waste Extraction Test, WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

สารหนู และ/หรือสารประกอบของสารหนู	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Arsenic and/or arsenic compounds)

แบลเรียม และ/หรือสารประกอบแบเรียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ยกเว้นแบไรท์และแบเรียมซัลเฟต)

(Barium and/or barium compounds (excluding barite and barium sulfate)

เบริลเรียม และ/หรือสารประกอบเบริลเลียม 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Beryllium and/or beryllium compounds)

แคดเมียม และ/หรือสารประกอบแคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Cadmium and/or cadmium compounds)

สารประกอบของโครเมียมเฮกซาวาแลนท์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Chromium (VI) compounds)

โครเมียม และ/หรือ สารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนท์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Chromium and/or chromium (III) compounds)

โคบอลท์ และ/หรือ สารประกอบของโคบอลท์ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Cobalt and/or cobalt compounds)

ทองแดง และ/หรือ สารประกอบทองแดง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Copper and/or copper compounds)

สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์ (Fluoride salts) 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกั่ว และ/หรือสารประกอบตะกั่ว 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Lead and/or lead compounds)

ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Mercury and/or mercury compounds)

โมลิบดินัม และ/หรือสารประกอบโมลิบดินัม 350 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ไม่รวมโมลิบดินัมซัลไฟด์)

(Molybdenum and/or molybdenum compounds; excluding molybdenum disulfide)

นิกเกิล และ/หรือ สารประกอบนิกเกิล 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Nickel and/or nickel compounds)

ซิลิเนียม และ/หรือสารประกอบซิลิเนียม 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Selenium and/or selenium compounds)

เงิน และ/หรือสารประกอบของเงิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

(Silver and/or silver compounds)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธาลเลียม และ/หรือสารประกอบธาลเลียม (Thallium and/or thallium compounds)	7.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
วาเนเดียม และ/หรือสารประกอบวานาเดียม (Vanadium and/or vanadium compounds)	24 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี และ/หรือสารประกอบสังกะสี (Zinc and/or zinc compounds)	250 มิลลิกรัมต่อลิตร
แอลดริน (Aldrin)	0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี(DDT, DDE, DDD)	0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดีลดริน (Dieldrin)	0.8 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
ไดออกซิน(Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.001 มิลลิกรัมต่อ ลิตร
เอนดริน (Endrin)	0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor)	0.47 มิลลิกรัมต่อลิตร
คีโปน (Kepone)	2.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร
เมททอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไมเร็ก (Mirex)	2.1 มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟนอล (Pentachlorophenol)	1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล(Polychlorinated biphenyls (PCBs))	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	204 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซิลเว็ก (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(หมายเหตุ – ค่าที่กำหนดของสารอินทรีย์ เป็นค่าที่วัดความเข้มข้นของธาตุ ไม่ใช่ของสารประกอบ)

5.3 การทดสอบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) จะทำขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเข้มข้นทั้งหมด (Total Concentration) ของสารอันตราย ใดๆ มีค่าไม่เกินค่า TTLC ในข้อ 1 แต่มีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าค่า STLC ของสารนั้นที่กำหนดใน ข้อ 2 หรือเมื่อต้องการนำสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ

ข้อ 6 การหาค่าความเข้มข้นทั้งหมด การสกัดสาร และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด ให้ใช้วิธี ดังต่อไปนี้

6.1 ในการเตรียมตัวอย่างสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ที่ต้องการทดสอบหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Total Concentration) หรือปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (Extractable Concentration)

ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

6.1.1 ชนิดที่ 1 – สำหรับสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้ จะต้องนำไปร่อน หรือไปบดเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานก่อนนำไปวิเคราะห์ หากตัวอย่างมีวัสดุที่ไม่สามารถบดได้ และร่อนไม่ผ่านตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ และเป็นวัสดุที่ปนเปื้อนมาไม่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะเดิมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ให้แยกออกแล้วทิ้งเสีย ส่วนที่เหลือของตัวอย่างให้นำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ก่อนจะนำไปรวมและผสมกันอย่างทั่วถึงกับส่วนของตัวอย่างที่ไม่ต้องผ่านการบด เพื่อรอการวิเคราะห์ ต่อไป

6.1.2 ชนิดที่ 2 – สำหรับสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวที่สามารถนำไปกรองได้ โดยมีองค์ประกอบของของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จะต้องทำการกรองตัวอย่างเพื่อแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยการกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน จากนั้นทำการวัดปริมาณของส่วนที่กรองได้และเก็บไว้ โดยส่วนนี้จะถือว่าเป็น Initial Filtrate ส่วนของแข็งที่แยกได้จะนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (สิ่งแปลกปลอมจะถูกแยกทิ้งไป) และนำไปผสมกับของแข็งที่ผ่านตะแกรงโดยไม่ต้องบด ซึ่งส่วนที่เป็นของแข็งนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีในข้อ 6.4 โดยสัดส่วนของน้ำสกัด (extraction solution) ที่ใช้ คือ 10 มิลลิลิตรของน้ำสกัดต่อหนึ่งกรัมของของแข็ง เมื่อเสร็จสิ้นการสกัดแล้ว สารละลายที่สกัดได้จะถูกนำไปกรองและไปผสมกับ Initial Filtrate อย่าง ทั่วถึงก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีในข้อ 6.5.2

6.1.3 ชนิดที่ 3 – สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นกากตะกอน (sludge) เลน (slurry) หรือเป็นน้ำมัน (oily) น้ำมันดิน (tarry) หรือ resinous material ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ หลังจากแยกสิ่งแปลกปลอมออกแล้ว ตัวอย่างที่เหลือทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป

6.1.4 หากจำเป็นต้องมีการตากแห้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง หรือองค์ประกอบของแข็งก่อนทำการร่อน บด หรือแยกสิ่งแปลกปลอมออก หรือได้มีการทำให้ของเสียนั้นแห้งก่อนทำการวิเคราะห์ จะต้องทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่หายไป และต้องบันทึกสภาพของการทำให้แห้งไว้ด้วย

6.1.5 ให้ใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ในการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นในกรณีที่เป็นการหาค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 มิลลิเมตร

6.2 สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของเหลว หรือมีของแข็งที่ไม่ละลายน้ำปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จะไม่ต้องนำมาสกัดโดยวิธี Waste Extraction Test (WET) แต่สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าของสารต่างๆ ได้โดยตรง และจะถือว่าเป็นของเสียอันตราย ก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของสารใดๆ มีค่ามากกว่าค่า TTLC ที่กำหนดไว้สำหรับสารนั้นอย่างไรก็ตาม หากค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในหน่วยมิลลิกรัม ต่อกิโลกรัมของสารนั้น มีค่าน้อยกว่าค่า TTLC แต่มากกว่า ค่า STLC เมื่อคิดเป็นความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องนำตัวอย่างของเหลวนั้นมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้น โดยจะถือว่าเป็นของเสียอันตราย ก็ต่อเมื่อค่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารอันตรายในของเหลวที่ผ่านการกรองมีค่ามากกว่าค่า STLC ที่ระบุไว้สำหรับสารนั้น

6.3 ให้ใช้ สารละลาย 0.2 M sodium citrate ที่ pH 5.0 ± 0.1 เป็นน้ำสกัดที่ใช้ในวิธี WET (WET extraction solution) โดยเตรียมจากการนำสารละลาย citric acid ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วย สารละลาย 4.0 N NaOH สารละลาย citric acid สามารถเตรียมได้โดยนำเอา analytical grade citric acid ไปละลายใน deionized water สำหรับการวิเคราะห์หาค่าเฮกซาวาเลนท์โครเมียม (chromium (VI)) ให้ใช้ deionized water เป็นน้ำสกัด

หลักเกณฑ์ และวิธีการในการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ข้อ 1 ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่ประสงค์จะดำเนินการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศนี้ภายในบริเวณโรงงาน ต้องดำเนินการดังต่อไปนี้

1.1 การฝังกลบ ให้ดำเนินการฝังกลบ โดยจัดให้มีระบบกันซึม ระบบการตรวจสอบการรั่วไหล ระบบระบายก๊าซและระบบบำบัดน้ำเสีย ตามความเหมาะสมของชนิดหรือประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้นๆ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 การเผาสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติไม่เป็นของเสียอันตรายให้ดำเนินการเผาโดยควบคุมค่ามาตรฐานของมลสารที่ระบายออกจากปล่อง ให้เป็นไปตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ลงวันที่ 17 มิถุนายน 2540 ห้ามเผาสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย เว้นแต่จะได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 การจัดการโดยวิธีอื่นๆ เช่น การหมักทำปุ๋ย การถมที่ การนำกลับไปใช้ประโยชน์อีก เป็นต้น จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ข้อ 2 ให้ใช้รหัสเลข 3 หลักที่กำหนดสำหรับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (Treatment and Disposal codes) ในการแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามแบบ สก.3 และในการขออนุญาตนำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกนอกบริเวณโรงงาน ดังต่อไปนี้

2.1 การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว สามารถแบ่งเป็น 8 ประเภท ดังนี้

2.1.1 ประเภท 01 การคัดแยก (Sorting)

2.1.2 ประเภท 02 การกักเก็บในภาชนะบรรจุ (Storage)

2.1.3 ประเภท 03 การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse)

2.1.4 ประเภท 04 การนำกลับมาใช้ประโยชน์อีก (Recycle)

2.1.5 ประเภท 05 การนำกลับคืนมาใหม่ (Recovery)

2.1.6 ประเภท 06 การบำบัด (Treatment)

2.1.7 ประเภท 07 การกำจัด (Disposal)

2.1.8 ประเภท 08 การจัดการด้วยวิธีอื่นๆ

2.2 รหัสเลข 3 หลัก สำหรับการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว 8 ประเภทในข้อ 2.1 มีดังนี้

011 คัดแยกประเภทเพื่อจำหน่ายต่อ (sorting)

021 กักเก็บในภาชนะบรรจุ (storage) ให้ระบุลักษณะการกักเก็บและภาชนะบรรจุ

031 เป็นวัตถุดิบทดแทน (use as raw material substitution) ให้ระบุกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์

032 ส่งกลับผู้ขายเพื่อกำจัด (return to original producer for disposal) ให้ระบุชื่อผู้ขายที่รับคืน

033 ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำกลับไปบรรจุใหม่หรือใช้ซ้ำ (reuse container; to be refilled) ให้ระบุชื่อผู้ขายที่รับคืน

039 นำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีอื่นๆ (other reuse methods) ให้ระบุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

041 **เป็นเชื้อเพลิงทดแทน** (use as fuel substitution or burn for energy recovery)

042 **ทำเชื้อเพลิงผสม** (fuel blending)

043 **เผาเพื่อเอาพลังงาน** (burn for energy recovery) **ให้ระบุลักษณะการเผา**

044 **เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์** (use as co-material in cement kiln or rotary kiln) **ให้ระบุผลิตภัณฑ์**

049 **นำกลับมาใช้ประโยชน์อีกด้วยวิธีอื่นๆ** (other recycle methods) **ให้ระบุ**

051 **เข้ากระบวนการนำตัวทำละลายกลับมาใหม่** (solvent reclamation/regeneration)

052 **เข้ากระบวนการนำโลหะกลับมาใหม่** (reclamation/regeneration of metal and metal compounds)

053 **เข้ากระบวนการคืนสภาพกรด/ด่าง** (acid/base regeneration)

054 **เข้ากระบวนการคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา** (catalyst regeneration)

059 **นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วอื่นๆ กลับคืนมาใหม่** (other recovery unlisted materials) **ให้ระบุ**

061 **บำบัดด้วยวิธีชีวภาพ** (biological treatment)

062 **บำบัดด้วยวิธีทางเคมี** (chemical treatment)

063 **บำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ** (physical treatment)

064 **บำบัดด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ** (physico-chemical treatment)

065 **บำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ** (physico-chemical treatment of wastewater)

066 **เข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวม** (direct discharge to central wastewater treatment plant)

067 **ปรับเสถียรด้วยวิธีทางเคมี** (chemical stabilization)

068 **ปรับเสถียร/ตรึงทางเคมีโดยใช้ซีเมนต์หรือวัสดุ** pozzolanic (chemical fixation using cementitious and/or pozzolanic material)

069 **วิธีบำบัดอื่นๆ เพื่อลดค่าความเป็นอันตราย** (other detoxification methods) **ให้ระบุ**

071 **ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล** (sanitary landfill) **เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น**

072 **ฝังกลบอย่างปลอดภัย** (secure landfill)

073 **ฝังกลบอย่างปลอดภัย เมื่อทำการปรับเสถียรหรือทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว** (secure landfill of stabilized and/or solidified wastes)

074 เผาทำลายในเตาเผาขยะทั่วไป (burn for destruction) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น

075 เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย (burn for destruction in hazardous waste incinerator)

076 เผาทำลายร่วมในเตาเผาปูนซีเมนต์ (co-incineration in cement kiln)

077 อัดฉีดลงบ่อ ใต้ดิน หรือชั้นดินใต้ทะเล (Deepwell or underground injection; sea-bed insertion)

079 กำจัดด้วยวิธีอื่นๆ (other disposal methods) ให้ระบุ

081 รวบรวมและส่งออกนอกประเทศ (collect and export)

082 ถมทะเลหรือที่ลุ่ม (land reclamation) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น

083 หมักทำปุ๋ยหรือสารปรับปรุงคุณภาพดิน (composting or soil conditioner) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น

084 ทำอาหารสัตว์ (animal feed) เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นของเสียอันตรายเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
การคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.1 การแปลงความเข้มข้นจาก ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (µg/ml) เป็น มิลลิกรัม/ลิตร (mg/l)

ไมโครกรัม/มิลลิลิตร $= 10^{-6}$ กรัม / 10^{-3} ลิตร

$= 10^{-6} \times 10^{3}$ กรัม / ลิตร

$= 10^{-3}$ กรัม / ลิตร

= มิลลิกรัม / ลิตร

ภาคผนวก ง.2 การแปลงความเข้มข้นจาก ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (µg/ml) เป็น มิลลิกรัม/กิโลกรัม (mg/kg)

จากวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ U.S.EPA.3050 ระบุว่าใช้ตัวอย่าง 1 กรัม และจะได้น้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ดังนั้น

กำหนดให้ ตัวแปร A คือค่าความเข้มข้นที่วัดได้ในหน่วย ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ดังนั้น

ตัวอย่าง 1 กรัม มีปริมาณโลหะหนัก $= A$ ไมโครกรัม/มิลลิลิตร x 100 มิลลิลิตร

$= 100A$ ไมโครกรัม

ถ้าตัวอย่าง 1 กิโลกรัมจะมีปริมาณโลหะหนัก $= 100A$ ไมโครกรัม / 10^{-3} กิโลกรัม

$= (100 \times 10^{3})A$ ไมโครกรัม / 10^{-3} กิโลกรัม

$= A \times 10^{5}$ ไมโครกรัม / กิโลกรัม

$= A \times 10^{5} \times 10^{-3}$ มิลลิกรัม/กิโลกรัม

$= A \times 10^{2}$ มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ภาคผนวก ง.3 การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด

กำหนดให้ ตัวแปร B คือค่าน้ำหนักกดที่วัดได้มีหน่วยเป็น ตัน (ton) และ ก้อนตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร ดังนั้น

ค่ากำลังรับแรงอัด = แรงกด / พื้นที่รับแรง

$= \frac{\text{B (ตัน)} \times 10^{3} \text{ (กิโลกรัม/ตัน)} \times 9.81 \text{ (เมตร/วินาที}^{2})}{0.05 \text{ (เมตร)} \times 0.05 \text{ (เมตร)}}$

$= B \times 3.924 \times 10^{6}$ นิวตัน/เมตร^{2}

$= B \times 3.924 \times 10^{6}$ ปาสคาล

$= B \times 3.924$ เมกะปาสคาล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.4 แสดงรายการคำนวณราคาคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ข้อมูลพื้นฐาน

-ค่าไฟฟ้าคิดราคาเฉลี่ย 3.12 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง)

-กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ เครื่องผสม 0.75 กิโลวัตต์ ตู้อบ 1.50 กิโลวัตต์

โต๊ะเขย่า 0.75 กิโลวัตต์ เครื่องคัดขนาด 0.30 กิโลวัตต์ เครื่องบดวัสดุ0.37 กิโลวัตต์

- เครื่องผสม (0.75 กิโลวัตต์) x (5/60 ชั่วโมง) x (3.12 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) x (1/4.19 ครั้งต่อกิโลกรัม) = 0.046 บาทต่อกิโลกรัม
- ตู้อบ (1.5 กิโลวัตต์) x (3 ชั่วโมง) x (3.12 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) x (1/1 ครั้งต่อกิโลกรัม) = 14.04 บาทต่อกิโลกรัม
- เครื่องคัดขนาด (0.3กิโลวัตต์) x (1 ชั่วโมง) x (3.12 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) x (1/5 ครั้งต่อกิโลกรัม) = 0.19 บาทต่อกิโลกรัม
- เครื่องบดวัสดุ (0.37กิโลวัตต์) x (15/60 ชั่วโมง) x (3.12 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) x (1/1 ครั้งต่อกิโลกรัม) = 0.29 บาทต่อกิโลกรัม
- โต๊ะเขย่า (0.75 กิโลวัตต์) x (4/60 ชั่วโมง) x (3.12 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) x (1/1 ครั้งต่อกิโลกรัม) = 0.156 บาทต่อกิโลกรัม

การคิดราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปอัฐศิลา

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบอัฐศิลามีน้ำหนักประมาณ 4.24 กิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของเครื่องผสม = (0.042 บาทต่อกิโลกรัม) x (4.24 กิโลกรัม)
  = 0.178 บาทต่อก้อน
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของตู้อบ = (14.04 บาทต่อกิโลกรัม) x (0.03 กิโลกรัม)
  = 0.42 บาทต่อก้อน
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของเครื่องคัดขนาด = (0.019 บาทต่อกิโลกรัม) x (2.42 กิโลกรัม)
  = 0.04 บาทต่อก้อน
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของเครื่องบดวัสดุ = (0.29 บาทต่อกิโลกรัม) x (0.03 กิโลกรัม)
  = 0.009 บาทต่อก้อน
- ค่าใช้จ่ายต่อก้อนของโต๊ะเขย่า = (0.156 บาทต่อกิโลกรัม) x (4.24 กิโลกรัม)
  = 0.661 บาทต่อก้อน

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบอัฐศิลา 1 ก้อน

= ค่าใช้จ่ายของวัสดุ + ค่าใช้จ่ายของเครื่องผสม + ค่าใช้จ่ายของตู้อบ + ค่าใช้จ่ายของเครื่องคัดขนาด + ค่าใช้จ่ายของเครื่องบด + โต๊ะเขย่า

= 2.60 + 0.176 + 0.42 + 0.04 + 0.009 + 0.661 บาท = 3.90 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ
ราคาวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.1 ข้อมูลราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ จ.1 แสดงราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น			ราคาต่อก้อน
รูปดอกทิช	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	4.75
รูปดอกทิช	หนา 6 ซม.	สีแดง ตราชีแพค	6.25
รูปดอกทิช	หนา 6 ซม.	สีเหลือง ตราชีแพค	6.25
รูปดอกทิช	หนา 6 ซม.	สีดำ ตราชีแพค	6.25
รูปดอกทิช	หนา 10 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	8.50
รูปดอกทิช	หนา 10 ซม.	สีแดง ตราชีแพค	9.75
รูปตัวไอ	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	7.75
รูปตัวไอ	หนา 6 ซม.	สีแดง ตราชีแพค	9.50
รูปตัวไอ	หนา 6 ซม.	สีส้ม ตราชีแพค	9.50
รูปรวงผึ้ง	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	8.25
รูปรวงผึ้ง	หนา 6 ซม.	สีแดง ตราชีแพค	10.25
รูปอัฐศิลา	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	9.50
รูปอัฐศิลา	หนา 6 ซม.	สีส้ม ตราชีแพค	10.75
รูปอัฐศิลา	หนา 6 ซม.	สีน้ำตาล ตราชีแพค	10.75
รูปอัฐศิลา	หนา 6 ซม.	สีดำ ตราชีแพค	10.75
รูปอัฐศิลา	หนา 6 ซม.	สีฟ้า ตราชีแพค	19.00
รูปจัตุรัส	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	3.20
รูปจัตุรัส	หนา 6 ซม.	สีส้ม ตราชีแพค	3.80
รูปจัตุรัส	หนา 6 ซม.	สีน้ำตาล ตราชีแพค	3.80
รูปจัตุรัส	หนา 6 ซม.	สีดำ ตราชีแพค	3.80
รูปจัตุรัส	หนา 6 ซม.	สีฟ้า ตราชีแพค	6.29
รูปตา	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	5.50
รูปตา	หนา 6 ซม.	สีส้ม ตราชีแพค	6.75
รูปตา	หนา 6 ซม.	สีน้ำตาล ตราชีแพค	6.75
รูปตา	หนา 6 ซม.	สีดำ ตราชีแพค	6.75
รูปตา	หนา 6 ซม.	สีฟ้า ตราชีแพค	10.75
รูปศิลาหกเหลี่ยม	หนา 6 ซม.	สีเทา ตราชีแพค	5.25
รูปศิลาหกเหลี่ยม	หนา 6 ซม.	สีส้ม ตราชีแพค	6.00
รูปศิลาหกเหลี่ยม	หนา 6 ซม.	สีน้ำตาล ตราชีแพค	6.00
รูปศิลาหกเหลี่ยม	หนา 6 ซม.	สีดำ ตราชีแพค	6.00
รูปศิลาหกเหลี่ยม	หนา 6 ซม.	สีฟ้า ตราชีแพค	11.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทรายละเอียด ลูกบาศก์เมตรละ 346.25 บาท

หินเกล็ด ลูกบาศก์เมตรละ 465.00 บาท

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตราเพชร (สระบุรี) 2,344 บาท ต่อตัน

หมายเหตุ ราคาวัสดุก่อสร้าง กรุงเทพมหานคร (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) เดือน มีนาคมปี 2551

อ้างอิงจาก

ราคาวัสดุก่อสร้าง กรุงเทพมหานคร. 2551.วัสดุผลิตภัณฑ์ [online]. แหล่งที่มา: http://www.indexpr.moc.go.th/PRICE_PRESENT/tablecsi_region.html [2551,มีนาคม 24]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนรารัชต์พร นวลสวรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม 2527 จบการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2549 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ได้รับการคัดเลือกเป็นผลงานวิจัยโดดเด่นแสดงโปสเตอร์ และตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยลงในบทความการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 5 วันที่ 8-9 ธันวาคม 2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย