

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยความอนุเคราะห์ จากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553 โดยผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ นางสาวอุไรวรรณ วิเศษวิสัย นายปฐพน ภูขมา นางสาวศุภณัฐ รัฐเมือง ที่ช่วยเหลือในการทำงานทุกอย่าง

ขอขอบคุณบริษัท เอส ซี จี เปเปอร์ จำกัด (ขอนแก่น) ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ้ำล่อยและกากปูนขาว สำหรับใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ ขอขอบคุณ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดและคุณสมบัติ พัวพิทยาธร ที่ให้คำแนะนำและให้การช่วยเหลือในการใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด

ขอขอบคุณ คุณสุกัญญา ข้ามหก และคุณพนิดา พันธุ์สมบัติ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ การใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการทางเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกๆแรงกำลังใจจากบิดา-มารดาและญาติพี่น้อง ผู้สนับสนุนทุนวิจัย ผู้แต่ง ผู้เขียน ผู้เรียบเรียงหนังสือ ที่ให้ข้าพเจ้าได้นำหนังสือของท่านมาทำการอ้างอิงในครั้งนี้ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามด้วย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้วิจัย

ชื่อโครงการ เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ของเสียอุตสาหกรรม

Utilization Technology of Industrial Waste

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปี 2553 จำนวนเงิน 296,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2553 ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2554

ชื่อผู้วิจัย นางสาวธรรพร บุศย์น้ำเพชร

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทรศัพท์ 043-742135

นายนิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทรศัพท์ 043-742135

นางสาวพนิดา พันธุ์สมบัติ

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทรศัพท์ 043-742135

อิฐมวลเบา ปัจจุบันเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ เบา และให้ความแข็งแรงทนทานเทียบเท่าอิฐบล็อกทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันอิฐมวลเบายังมีราคาแพง เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญและคอนกรีตธรรมดากว่าไป ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาหาวัสดุที่มีราคาถูกเพื่อใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา ซึ่งตะกอนประปาจากระบบสาธารณูปโภค ถ้ำลอยและกากปูนขาวจากโรงงานกระดาษ เป็นของเสียที่คณะผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอิฐมวลเบา เนื่องจากกากปูนขาวจะมีองค์ประกอบทางเคมีโดยส่วนใหญ่คือ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ ส่วนถ้ำลอยและดินตะกอนประปาจะมีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกาและอลูมินาสามารถเป็นวัสดุพอใช้ได้ โดยการศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตอิฐมวลเบาจากของเสียจากระบบสาธารณูปโภค และโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของเสียและลดภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัดต่อไป

สำหรับแผนงานนี้ จะประกอบด้วยโครงการย่อย 2 โครงการ คือ

1. การทำอิฐมวลเบาด้วยซีเมนต์ ตะกอนประปาและปูนขาว
2. การใช้กากปูนขาวและถ้ำลอยเป็นส่วนผสมในการทำอิฐมวลเบาโดยการกระตุ้นทางเคมี

ผลการศึกษา โครงการที่ 1 พบว่า การทำอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของตะกอนประปา : ปูนขาว : ซีเมนต์ : ทราย : น้ำ : ผงอลูมิเนียม บ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทดลองค่าการรับกำลังอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของซีเมนต์ : ตะกอนประปา : ปูนขาว : ทราย : น้ำ : ผงอลูมิเนียม เท่ากับ 1.0 : 0.20 : 0.50 : 0.50 : 0.60 : 0.0030 มีค่าการรับกำลังอัดสูงที่สุดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน เท่ากับ 61 และ 65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ โดยผ่านมาตรฐาน มอก 58-2530 ที่เป็นมาตรฐานคอนกรีตบล็อกมวลเบาไม่รับน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกอัตราส่วนในทุกอายุบ่ม

ส่วนค่าความหนาแน่นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี 2548 และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ตามมาตรฐานของ USEPA ในตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

สำหรับโครงการที่ 2 เป็นการศึกษาการใช้ประโยชน์จากของเสีย คือ ถ้ำลอยและกากปูนขาว ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ มาใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนของ ทราช ปูนซีเมนต์ ถ้ำลอย กากปูนขาว ปริมาณผงอลูมิเนียมและอายุบ่มที่เหมาะสม และศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่ได้ รวมถึงปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยและกากปูนขาวที่นำมาใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนของทราช : ปูนซีเมนต์ : ถ้ำลอย : กากปูนขาว ในอัตราส่วน 50 : 27 : 3 : 20 โดยน้ำหนัก ปริมาณผงอลูมิเนียม 1 % อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งพบว่าให้ค่ากำลังรับแรงอัด 101.5 กก./ซม.<sup>2</sup> ค่าความหนาแน่น 1,050 กก./ลบ.ม. ค่าการดูดซึมน้ำ 322 กก./ลบ.ม. ปริมาณทองแดง สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียมและนิเกิลในถ้ำลอยและกากปูนขาว ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปริมาณสูงสุดที่ยอมมีได้ของสารอันตรายที่ปนเปื้อนในสารละลายจากการทดสอบการถูกชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และผ่านเกณฑ์มาตรฐานปริมาณสูงสุดที่สารอันตรายที่ยอมให้มีได้ในน้ำสกัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548) ดังนั้นจึงสามารถนำถ้ำลอยและกากปูนขาวไปใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาได้

จากการศึกษาทั้งสองโครงการสามารถสรุปได้ว่า การใช้ของเสียจากระบบสาหร่ายปลูกและของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในชุมชนมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอิฐมวลเบา มีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ แต่ยังพบปัญหาในส่วนของค่าความหนาแน่นของก้อนอิฐมวลเบา ที่ยังมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งต้องทำการศึกษาหาเทคนิคเพื่อลดค่าความหนาแน่นให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานต่อไป แต่ยังคงให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเหมือนเดิม

คำสำคัญ ตะกอนประปา ปูนขาว ซีเมนต์เพสต์ อิฐมวลเบา กากปูนขาว ถ้ำลอย  
การกระตุ้นทางเคมี

Lightweight block is now extensively used as construction material because there are outstanding qualities; light and strength as same as general cement block. However, it is still more expensive if comparing with conventional brick and concrete block so this leads researchers being interested in studying and searching low cost material to produce lightweight block. And what the researchers were interested to study for using as material in producing lightweight block are water supply sludge from infrastructure system, fly ash and lime mud from the pulp paper mills because main chemical composition of lime mud are calcium carbonate and calcium oxide and main chemical composition of fly ash and water supply sludge are silica and alumina which can be pozzolanic material. Therefore, main objective of this research is to study optimum proportion of each waste matter from infrastructure system and industrial factory for lightweight block producing and this is an idea of value adding and disposal cost reducing.

This project is consisting of two sub-projects as follows.

1. Lightweight block from Cement ,Water Supply Sludge and Hydrate Lime
2. Utilization of Lime mud and Fly ash for Lightweight Brick Production by Chemical Activation

Result of the sub-project1: It was found that to produce lightweight block sample which has water supply sludge ,hydrate lime, cement, sand ,water, aluminium powder and curing at room temperature for checking compressive strength, density, and water absorption of a sample which were curing at 7 and 28 day, proportion of cement : water supply sludge : hydrate lime : sand : water : aluminium powder is equal to 1.0: 0.20: 0.50: 0.50: 0.60: 0.0030. The highest value of compressive strength at 7 and 28 day of curing time is 61 and 65 a kg/ cm<sup>2</sup> when curing at room temperature consequently. It was passed TIS 58-1987 which is the standard of lightweight block. Water absorption was not over standard but density was under standard. Besides, Waste Extraction Test (WET) following Notification of the Ministry of Industry on Disposal of waste or unusable materials B.E.2548 and Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) as per standard of USEPA of sample 28 days ages was not over than determined standard.

The sub-project 2 was studied about utilization of fly ash and lime mud which are solid waste generated from the pulp and paper mills industry to produced lightweight brick. Objective was to study optimum mix proportion of sand, cement, fly ash, lime mud, aluminum powder and appropriate curing time, including studied quality of the lightweight brick sample and heavy metal in fly ash and lime mud. The result was found that optimum mix proportion of sand : cement : fly ash : lime mud, at

percentage 50 : 27 : 3 : 20 by weight, 1% of aluminum powder and water to binder ratio of 0.5 was the most appropriate proportion, by consideration of compressive strengths and density at 28 days of curing time. This gave mix yielded compressive strength 101.5 kg./cm<sup>3</sup>, density 1,050 kg./m<sup>3</sup> and water absorption 322 kg./m<sup>3</sup>. Quantity of Copper, Zine, Lead, Cadmium, Chromium and Nickel in fly ash and lime mud were passed the standard of Notification of the Ministry of Industry on Disposal of waste or unusable materials B.E.2548. Therefore, fly ash and lime mud which are industrial wastes have potential to be developed to material for making lightweight block.

In conclusion of both sub-projects research, there is possibility to use wastes from infrastructure system and industrial wastes to produce lightweight block. However, there is some problem about density of lightweight block which has not been passed the standard. This is needed to continue studying/researching to reduce density to meet the standards but to remain standard of compressive strength.

Key word : Water supply sludge, Hydrate, Cement paste, Lightweight Brick, Lime mud waste,  
Fly ash, Chemical activation

## สารบัญเรื่อง

| เรื่อง                                                                    | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ                                                           | ก    |
| บทคัดย่อ                                                                  | ข    |
| สารบัญ                                                                    | ฅ    |
| สารบัญตาราง                                                               | ญ    |
| สารบัญภาพ                                                                 | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ                                                              | 1    |
| ความสำคัญ และที่มาของปัญหา                                                | 1    |
| วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย                                           | 2    |
| รายละเอียดความเชื่อมโยงระหว่างโครงการวิจัยย่อย                            | 2    |
| ประโยชน์ที่ได้รับ                                                         | 2    |
| หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์                                      | 3    |
| บทที่ 2 โครงการย่อยที่ 1 การการทำอิฐมวลเบาด้วยซีเมนต์ ตะกอนประปาและปูนขาว | 4    |
| บทคัดย่อ                                                                  | 4    |
| บทนำ                                                                      | 5    |
| ความสำคัญและที่มาของปัญหา                                                 | 5    |
| วัตถุประสงค์                                                              | 5    |
| ขอบเขตการศึกษา                                                            | 6    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                 | 6    |
| การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง                                             | 7    |
| อิฐมวลเบา                                                                 | 7    |
| การผลิตอิฐมวลเบา                                                          | 7    |
| ตัวยึดประสานในงานซีเมนต์                                                  | 10   |
| วัสดุป่อซีเมนต์                                                           | 12   |
| ปูนขาว                                                                    | 17   |
| การผลิตน้ำประปา                                                           | 18   |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                     | 22   |

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

| เรื่อง                                               | หน้า |
|------------------------------------------------------|------|
| ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย                         | 27   |
| วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ                                | 27   |
| อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ                              | 27   |
| การเตรียมวัสดุ                                       | 28   |
| การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม                          | 28   |
| การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่าง                         | 30   |
| เตรียมตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา   | 30   |
| ผลการวิจัย อภิปรายและวิจารณ์ผล                       | 36   |
| การศึกษาคุณสมบัติของตะกอนประปา                       | 36   |
| เกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์ ตะกอนประปาและปูนขาว      | 37   |
| การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการศึกษาทำคอนกรีตมวลเบา | 37   |
| ผลการศึกษาการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม                | 38   |
| อิทธิพลของปริมาณทราย                                 | 38   |
| อิทธิพลของปริมาณน้ำ                                  | 40   |
| อิทธิพลของตะกอนประปา                                 | 44   |
| อิทธิพลของปูนขาว                                     | 47   |
| อิทธิพลของปริมาณผงอูมิเนียม                          | 50   |
| การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนัก                        | 53   |
| สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ                          | 55   |
| สรุป                                                 | 55   |
| ข้อเสนอแนะ                                           | 55   |
| บรรณานุกรม                                           | 56   |
| ภาคผนวก ก                                            | 59   |
| ภาคผนวก ข                                            | 81   |

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

| เรื่อง                                                                           | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 3 การใช้กากปูนขาวและเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในการทำอิฐมวลเบาโดยการกระตุ้นทางเคมี | 87   |
| บทคัดย่อ                                                                         | 87   |
| บทนำ                                                                             | 89   |
| ปัญหาและความสำคัญของปัญหา                                                        | 89   |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                                          | 90   |
| ขอบเขตการศึกษา                                                                   | 91   |
| การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง                                                    | 92   |
| อิฐมวลเบา                                                                        | 92   |
| กากปูนขาว                                                                        | 97   |
| เถ้าลอย                                                                          | 101  |
| วัสดุปอชโซลาน                                                                    | 103  |
| ปฏิกิริยาปอชโซลาน                                                                | 103  |
| ปฏิกิริยาไฮเดรชัน                                                                | 104  |
| การบ่มคอนกรีต                                                                    | 105  |
| การชะละลาย (Leaching)                                                            | 106  |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                            | 110  |
| ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย                                                        | 114  |
| เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์                                                        | 114  |
| วิธีการทดลอง                                                                     | 114  |
| สถิติที่ใช้ในการทดลอง                                                            | 117  |
| ผลการวิจัย อภิปรายและวิจารณ์ผล                                                   | 118  |
| ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยและกากปูนขาว                                    | 118  |
| ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) เบื้องต้น                                  | 119  |
| ศึกษาปริมาณเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์                                          | 121  |
| ศึกษาปริมาณกากปูนขาวที่เหมาะสม                                                   | 128  |
| ศึกษาปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสม                                                | 134  |

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

| เรื่อง                                 | หน้า |
|----------------------------------------|------|
| สรุปและข้อเสนอแนะ                      | 140  |
| สรุป                                   | 140  |
| ข้อเสนอแนะ                             | 141  |
| บรรณานุกรม                             | 142  |
| ภาคผนวก                                | 145  |
| บทที่ 4 บทสรุป                         | 160  |
| สรุปผลโครงการสรุปผลโครงการ             | 160  |
| ปัญหาและอุปสรรค ข้อจำกัด               | 161  |
| การนำไปใช้ประโยชน์                     | 162  |
| ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป | 162  |
| ประวัตินักวิจัย                        | 163  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                            | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2-1 คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี และองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                                                                    | 11   |
| 2-2 ชนิดของวัสดุป่อชโซลานธรรมชาติ                                                                                                   | 13   |
| 2-3 ข้อกำหนดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและข้อกำหนดเสริมของวัสดุป่อชโซลานประเภทต่างๆตามมาตรฐาน ASTM C 618                          | 14   |
| 2-4 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุป่อชโซลานประเภทต่างๆในงานคอนกรีต                                                            | 17   |
| 2-5 ปริมาณการผลิตตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาบางเขนระหว่างปี 2542-2546                                                                   | 21   |
| 2-6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา                                                                                                  | 21   |
| 2-7 การศึกษาปริมาณทรายที่เหมาะสม                                                                                                    | 28   |
| 2-8 ศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสม                                                                                                        | 28   |
| 2-9 ศึกษาปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม                                                                                                 | 29   |
| 2-10 ศึกษาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสม                                                                                                    | 29   |
| 2-11 ศึกษาปริมาณผงอูมิเนียมที่เหมาะสม                                                                                               | 29   |
| 2-12 การศึกษาคุณสมบัติของตะกอนประปาคด้วยเครื่อง (XRF)                                                                               | 36   |
| 2-13 ส่วนผสมที่ออกแบบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเมื่อเพิ่มปริมาณทราย                                                                        | 41   |
| 2-14 ส่วนผสมที่ออกแบบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ                                                                         | 43   |
| 2-15 ส่วนผสมที่ออกแบบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนประปา                                                                  | 46   |
| 2-16 ส่วนผสมที่ออกแบบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาว                                                                      | 49   |
| 2-17 ส่วนผสมที่ออกแบบสำหรับคอนกรีตมวลเบาเมื่อเพิ่มปริมาณผงอูมิเนียม                                                                 | 52   |
| 2-18 ผลการทดสอบค่าการรั่วไหลของโลหะ (WET)                                                                                           | 53   |
| 2-19 ผลการทดสอบค่าการรั่วไหลของโลหะ (TCLP)                                                                                          | 54   |
| 3-1 ตารางเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับเถ้าลอย (Fly Ash)                                           | 102  |
| 3-2 ขั้นตอนคุณภาพการใช้ Fly Ash ตามมาตรฐาน ASTM                                                                                     | 103  |
| 3-3 ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของสารอันตรายที่ปะปนในสารละลายจากการทดสอบการถูกชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) | 109  |
| 3-4 ส่วนผสมที่ใช้สำหรับศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเบื้องต้น                                                                     | 115  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                                                                                               | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3-5 อัตราส่วนผสมสำหรับการศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์<br>สำหรับการผลิตอิฐมวลเบา                        | 116  |
| 3-6 อัตราส่วนผสมสำหรับการศึกษาผลของปริมาณกากปูนขาว สำหรับการผลิตอิฐมวลเบา                                              | 117  |
| 3-7 อัตราส่วนผสมสำหรับการศึกษาผลของปริมาณผงอลูมิเนียม สำหรับการผลิตอิฐมวลเบา                                           | 117  |
| 3-8 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยและกากปูนขาวที่ใช้ในการทดลอง                                                                | 118  |
| 3-9 ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเบื้องต้น                                                                      | 119  |
| 3-10 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.50<br>และ 0.55 ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน | 122  |
| 3-11 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.50<br>และ 0.55 ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน    | 126  |
| 3-12 ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.50<br>และ 0.55 ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน  | 127  |
| 3-13 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนการใช้ปริมาณกากปูนขาวต่างๆ กัน                                           | 130  |
| 3-14 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาที่มีการใช้ปริมาณกากปูนขาวต่างๆ กัน<br>ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน                      | 131  |
| 3-15 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐมวลเบาที่มีการใช้ปริมาณกากปูนขาวต่างๆ กัน<br>ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน                     | 133  |
| 3-16 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนการใช้ปริมาณผงอลูมิเนียมต่างๆ กัน<br>ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน         | 135  |
| 3-17 ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาที่มีการใช้ปริมาณผงอลูมิเนียมต่างๆ กัน<br>ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน                   | 136  |
| 3-18 ค่าการดูดซึมน้ำของอิฐมวลเบาที่มีการใช้ปริมาณผงอลูมิเนียมต่างๆ กัน<br>ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน                  | 138  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2-1 อัตราการเกิดความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์                             | 12   |
| 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนขาวกับปริมาณซิลิกาและอลูมินา                                               | 16   |
| 2-3 กระบวนการผลิตน้ำประปา                                                                                  | 20   |
| 2-4 ตะกอนประปา                                                                                             | 22   |
| 2-5 ขั้นตอนการศึกษาตัวอย่างและการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา                                            | 31   |
| 2-6 ขั้นตอนการทดสอบการดูดกลืนน้ำ ตาม TIS 1505-2541                                                         | 33   |
| 2-7 ขั้นตอนการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)                               | 34   |
| 2-8 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (EPA method 1311) | 35   |
| 2-9 ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณทราย อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน                            | 39   |
| 2-10 ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณน้ำอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน                             | 40   |
| 2-11 ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณตะกอนประปาอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน                      | 44   |
| 2-12 ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณปูนขาวอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน                          | 47   |
| 2-13 ค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่เพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน                    | 50   |
| 3-1 กระบวนการผลิตเชื้อกระดาษและกระบวนการทำแผ่นเชื้อ                                                        | 100  |
| 3-2 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่ได้จากการทดลองที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน                  | 120  |
| 3-3 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน     | 123  |
| 3-4 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน     | 123  |
| 3-5 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน     | 124  |
| 3-6 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน     | 124  |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                                                                    | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3-7 ค่าความหนาแน่นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 10, 20 และ 30 วัน                       | 125  |
| 3-8 ค่าการดูดกลืนน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 10, 20 และ 30 วัน                     | 128  |
| 3-9 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 15, 20, 25 และ 30                            | 129  |
| 3-10 ค่าความหนาแน่นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 5, 10, 15 และ 20                               | 132  |
| 3-11 ค่าการดูดซึมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 5, 10, 15 และ 20                              | 134  |
| 3-12 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 20 ปริมาณผงอลูมิเนียม 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 | 135  |
| 3-13 ค่าความหนาแน่นที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 20 ปริมาณผงอลูมิเนียม 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0    | 137  |
| 3-14 ค่าการดูดซึมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ที่ปริมาณการปริมาณกากปูนขาวร้อยละ 20 ปริมาณผงอลูมิเนียม 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0   | 139  |