

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของรูปโครงเมี่ยมต่อการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง  
ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



T107780



นายชรัตน์ ชูเชิด  
นายวราวุธ วัดขนาด  
นายสุพจน์ ทองย่น

212 ๗  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 107780  
วัน,เดือน,ปี..... 14 พ.ศ. 2553

b. 1221257X  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

**Effect of various form of chromium on Stabilization and Solidification  
with Portland cement**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for  
the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2006**

โครงการพิเศษเรื่อง ผลของรูปโคจรเมื่อยมต่อการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง  
ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นักศึกษา นายชรัตน์พลศ์ ชูเชิด  
นายวราวุธ วัดขนาด  
นายสุพจน์ ทองยูน

ภาควิชา เคมี  
สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2549  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พรชชวรณ ศรีนาค

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

| คณะกรรมการตรวจสอบ                     | ลายมือชื่อ   |
|---------------------------------------|--|
| ประธานกรรมการ ผศ.คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ |  |
| กรรมการ อาจารย์สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล  |  |
| กรรมการ ผศ.พรชชวรณ ศรีนาค             |  |



(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>โครงการพิเศษเรื่อง</b> | ผลของรูปโครเมียมต่อการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ |
| <b>นักศึกษา</b>           | นายชรัตพลค์ ชูเชิด<br>นายวรารุณ วัดขนาด<br>นายสุพจน์ ทองยูน                  |
| <b>ภาควิชา</b>            | เคมี   |
| <b>สาขาวิชา</b>           | เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  |
| <b>ปีการศึกษา</b>         | 2549   |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>   | ผศ.พระราชวรรณ ศรีนาค   |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาผลของรูปโครเมียมคือ โครเมต  $[\text{CrO}_4^{2-}]$ , โครเมียม (III)  $[\text{Cr}^{3+}]$  และ โครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์  $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$  ต่อการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยศึกษาผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ พบว่า โครเมียมทุกรูปจะไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนานขึ้น ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำการทดสอบความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย พบว่า โครเมียม (III) จะมีความเข้มข้นในสารละลายน้อยที่สุด และสามารถเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาได้เร็วกว่าโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และ โครเมต ตามลำดับ การศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่ระยะเวลาปม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า โครเมียม (III) มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าโครเมียมอีก 2 รูป โดยโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด และจากการศึกษาความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์ พบว่า โครเมียม (III) มีความเข้มข้นที่ถูกชะออกมาน้อยใกล้เคียงกับโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาดังกล่าวจะได้ว่า โครเมียม (III) และโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ เป็นรูปที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยโครเมียม (III) เป็นรูปที่ดีที่สุด แต่เพื่อเป็นการลดปริมาณของเสียจากห้องปฏิบัติการและปูนซีเมนต์ที่ใช้ ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกวิธีการปรับเสถียรของเสียโครเมียมด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

**คำสำคัญ :** การปรับเสถียร, การทำเป็นก้อนแข็ง, โครเมียม, ปฏิกิริยาไฮเดรชัน, ค่ากำลังรับแรงอัด

|                              |   |           |
|------------------------------|---|-----------|
| <b>Special Project Title</b> | Effect of various form of chromium on Stabilization and Solidification with Portland cement |           |
| <b>Name</b>                  | Mr.Charatpol  | Choocherd |
|                              | Mr.Warawut  | Watkanard |
|                              | Mr.Supot  | Thongyoon |
| <b>Department</b>            | Chemistry   |           |
| <b>Major Program</b>         | Environmental Resource Chemistry  |           |
| <b>Academic Year</b>         | 2006  |           |
| <b>Project Advisor</b>       | Asst.Prof. Passawan Srinak  |           |

#### Abstract

This special project studied effect of various form of chromium is chromate  $[\text{CrO}_4^{2-}]$ , chromium(III)  $[\text{Cr}^{3+}]$  and chromium hydroxide  $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$  on stabilization and solidification with Portland cement. For study effect of hydration reaction with cement, the results showed that every form of chromium were retard cement hydration by longer initial setting time. During hydration reaction occurred, chromium in solution were test. The results showed that  $\text{Cr}^{3+}$  were incorporate in reaction faster than  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  and  $\text{CrO}_4^{2-}$  respectively by lowest concentration in solution. Compressive strength and TCLP leaching test of cement containing studied various form of chromium at 3, 7, 14 and 28 days curing time were compressive strength of  $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{OPC}$  cement were lowest while  $\text{Cr}^{3+}/\text{OPC}$  were higher than two forms. From TCLP test,  $\text{Cr}^{3+}/\text{OPC}$  cement released lower  $\text{Cr}^{3+}$  into the solution and very close to  $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{OPC}$  cement. This study showed that  $\text{Cr}^{3+}$  and  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  form were suitable for stabilization/solidification (S/S) with OPC and  $\text{Cr}^{3+}$  is the best. To reduce volume of waste from laboratory and OPC used, This study stabilized chromium waste by hydroxide precipitation and solidification with OPC.

**Keyword:** Stabilization/Solidification,Chromium,Hydration reaction,Compressive strength

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ ที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษนี้ คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.พรชวรพรรณ ศรีนาค อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้ความรู้ แนะนำในสิ่งดี ๆ ดูแลเอาใจใส่ ช่วยเหลือ ตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.คณิดา ตั้งคนานูรักษ์ และ อาจารย์สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษนี้ ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการเบิกอุปกรณ์ต่าง ๆ และการติดต่อสำนักงานที่เกี่ยวข้องในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณประสิทธิ์ แผ้วบาง เจ้าหน้าที่ภาคชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำวิธีการใช้เครื่องอะตอมมิคแอนบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ และ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่เชื้อเชิญ สถานที่ อุปกรณ์ และให้ความช่วยเหลือพร้อมแนะนำวิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้อง และเพื่อน ๆ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย และคอยเป็น กำลังใจ สนับสนุนจนกระทั่งทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จ รวมไปถึงคำแนะนำและติชมต่าง ๆ

นายชรัตพลส์ ชูเชิด

นายวราวุธ วัดขนาด

นายสุพจน์ ทองย่น

## นิยามคำศัพท์

|           |  |
|-----------|--|
| AAS       | Atomic Absorption Spectroscopy               |
| aq        | aqueous                                      |
| ASTM      | American Society for Testing and Material    |
| g.        | กรัม   |
| kg.       | กิโลกรัม                                     |
| mg.       | มิลลิกรัม                                    |
| MPa       | เมกะพาสคัล                                   |
| N         | นอร์มอล                                      |
| OPC       | Ordinary Portland Cement                     |
| ppm.      | ส่วนในล้านส่วน                               |
| S/S       | Stabilization and Solidification             |
| SD        | Standard Deviation                           |
| TCLP      | Toxicity Characteristic Leaching Procedure   |
| U.S. EPA. | United State Environmental Protection Agency |
| W/C       | อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์                       |
| °C        | องศาเซลเซียส                                 |
| µm.       | ไมโครเมตร                                    |
| กก.       | กิโลกรัม                                     |
| ชม.       | ชั่วโมง                                      |
| ตร.ชม.    | ตารางเซนติเมตร                               |
| นน.       | น้ำหนัก                                      |
| มม.       | มิลลิเมตร                                    |
| มล.       | มิลลิลิตร                                    |
| ลบ.ชม.    | ลูกบาศก์เซนติเมตร                            |

## สารบัญ

|   | หน้า     |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย   | ก        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ  | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ   | ค        |
| นิยามคำศัพท์  | ง        |
| สารบัญ  | จ        |
| สารบัญตาราง   | ช        |
| สารบัญรูป   | ฎ        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ                        | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์  | 2        |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย  | 2        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                               | 3        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>                              | <b>4</b> |
| 2.1 โครเมียม  | 4        |
| 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี                          | 4        |
| 2.1.2 การผลิตและการนำมาใช้ประโยชน์                          | 4        |
| 2.1.3 การแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อม                         | 5        |
| 2.1.4 ความเป็นพิษและผลต่อสุขภาพ                             | 6        |
| 2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม                            | 6        |
| 2.3 การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง                       | 8        |
| 2.3.1 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง | 9        |
| 2.3.2 การทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์                       | 10       |
| 2.3.3 กลไกการผสมของโครเมียมในก้อนปูนซีเมนต์                 | 10       |
| 2.4 ปูนซีเมนต์  | 11       |
| 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมี                                     | 11       |
| 2.4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา                            | 13       |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.4.3 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ   | 13        |
| 2.4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์  | 16        |
| 2.4.5 การบ่มคอนกรีต   | 17        |
| 2.4.6 สมบัติของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างซีเมนต์                                       | 19        |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง   | 20        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>  | <b>22</b> |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย   | 22        |
| 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย   | 22        |
| 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย   | 23        |
| 3.2 แผนการดำเนินงานวิจัย  | 24        |
| 3.2.1 ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์                      | 25        |
| 3.2.2 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์                          | 27        |
| 3.2.3 ศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์                              | 28        |
| 3.2.4 ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์ | 29        |
| 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย   | 30        |
| 3.3.1 ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์                      | 30        |
| 3.3.2 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์                          | 32        |
| 3.3.3 ศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์                              | 34        |
| 3.3.4 ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์ | 35        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์</b>   | <b>39</b> |
| 4.1 รูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์                                  | 39        |
| 4.1.1 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ซีเมนต์                           | 39        |
| 4.1.2 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์                 | 41        |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| 4.2 ผลของระยะเวลาป้อนต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์                                   | 45        |
| 4.3 ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์                                   | 49        |
| 4.4 ผลของการปรับเสถียรและการทำงานเป็นก้อนแข็งของของเสี้ยวจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์ | 54        |
| 4.4.1 ลักษณะของเสี้ยว  | 54        |
| 4.4.2 การบำบัดของเสี้ยว  | 54        |
| 4.4.3 การทำงานเป็นก้อนแข็งของตะกอนของเสี้ยว  | 55        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>   | <b>57</b> |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง   | 57        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 58        |
| <b>บรรณานุกรม</b>  | <b>59</b> |
| <b>ภาคผนวก</b>   | <b>62</b> |
| ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ทางเคมี   | 63        |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง   | 68        |
| ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณ   | 91        |
| ภาคผนวก ง เกณฑ์มาตรฐาน   | 93        |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| <b>ตารางที่ 2.1</b> องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  | 12   |
| <b>ตารางที่ 4.1</b> ผลของรูปโครเมียมต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เฟสดี   | 39   |
| <b>ตารางที่ 4.2</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดี  | 42   |
| <b>ตารางที่ 4.3</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดีเฉลี่ย ที่สัดส่วน 0.01-0.04 molCr/kgOPC                       | 44   |
| <b>ตารางที่ 4.4</b> ผลของระยะเวลาบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของโครเมียมรูปต่าง ๆ   | 46   |
| <b>ตารางที่ 4.5</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์ของโครเมียมรูปต่าง ๆ  | 49   |
| <b>ตารางที่ 4.6</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์เฉลี่ยที่สัดส่วน 0.05-0.20 molCr/kgOPC  | 52   |
| <b>ตารางที่ 4.7</b> ลักษณะทั่วไปของของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี   | 54   |
| <b>ตารางที่ 4.8</b> การบำบัดของเสียโดยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์  | 55   |
| <b>ตารางที่ 4.9</b> ผลการทำเป็นก้อนแข็งของตะกอนของเสีย  | 55   |
| <b>ตารางที่ ข.1</b> ผลการหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดีโดยใช้เข็มไวแคต  | 68   |
| <b>ตารางที่ ข.2</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมตในสารละลายระหว่างการก่อตัว  | 69   |
| <b>ตารางที่ ข.3</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียม(III) ในสารละลายระหว่างการก่อตัว  | 70   |
| <b>ตารางที่ ข.4</b> ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายระหว่างการก่อตัว  | 72   |
| <b>ตารางที่ ข.5</b> ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของชุดควบคุม   | 73   |
| <b>ตารางที่ ข.6</b> ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมต สัดส่วน 0.05 molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC | 74   |
| <b>ตารางที่ ข.7</b> ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมต สัดส่วน 0.10 molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC | 75   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

|               |  | หน้า |
|---------------|--|------|
| ตารางที่ ข.8  | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมต สัดส่วน 0.15 molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC  | 75   |
| ตารางที่ ข.9  | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมต สัดส่วน 0.20 molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC  | 76   |
| ตารางที่ ข.10 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.05 molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC         | 77   |
| ตารางที่ ข.11 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.10 molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC         | 78   |
| ตารางที่ ข.12 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.15 molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC         | 78   |
| ตารางที่ ข.13 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.20 molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC         | 79   |
| ตารางที่ ข.14 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.05 molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC | 80   |
| ตารางที่ ข.15 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.10 molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC | 81   |
| ตารางที่ ข.16 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.15 molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC | 81   |
| ตารางที่ ข.17 | ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียม<br>ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.20 molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC | 82   |
| ตารางที่ ข.18 | ผลของสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของของเสียจากห้องปฏิบัติการ   | 83   |
| ตารางที่ ข.19 | ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมตในน้ำชะของก้อนซีเมนต์  | 83   |
| ตารางที่ ข.20 | ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมียม(III) ในน้ำชะ<br>ของก้อนซีเมนต์  | 85   |
| ตารางที่ ข.21 | ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ในน้ำชะ<br>ของก้อนซีเมนต์  | 86   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

|               | หน้า   |    |
|---------------|--|----|
| ตารางที่ ข.22 | ผลของค่าพีเอชในน้ำชะของก้อนซีเมนต์                             | 87 |
| ตารางที่ ข.23 | ผลของการชะละลายของซีเมนต์ที่มีตะกอนของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ | 90 |
| ตารางที่ ค.1  | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของโครเมียม   | 91 |
| ตารางที่ ง.1  | เกณฑ์มาตรฐานระยะเวลาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C150                  | 93 |
| ตารางที่ ง.2  | เกณฑ์มาตรฐานกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C150                 | 93 |
| ตารางที่ ง.3  | เกณฑ์มาตรฐานการชะละลายตามมาตรฐานของ US.EPA. Method 1311        | 94 |



## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| <b>รูปที่ 2.1</b> การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น  | 7    |
| <b>รูปที่ 2.2</b> สัดส่วนผสมสารประกอบหลัก CaO, SiO <sub>2</sub> และ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ของปูนซีเมนต์                             | 12   |
| <b>รูปที่ 2.3</b> การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ   | 15   |
| <b>รูปที่ 2.4</b> การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟสดี  | 16   |
| <b>รูปที่ 2.5</b> ผลของการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต  | 18   |
| <b>รูปที่ 3.1</b> แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย   | 24   |
| <b>รูปที่ 3.2</b> การหาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสดี  | 25   |
| <b>รูปที่ 3.3</b> การหาความเข้มข้นของโครเมียมในการสารละลายระหว่างการก่อตัว   | 26   |
| <b>รูปที่ 3.4</b> การหาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์   | 27   |
| <b>รูปที่ 3.5</b> การหาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์   | 28   |
| <b>รูปที่ 3.6</b> การหากำลังรับแรงอัดและการปลดปล่อยไอออนในน้ำชะจากการปรับเสถียร และการทำเป็นของแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์ | 29   |
| <b>รูปที่ 3.7</b> เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine)   | 36   |
| <b>รูปที่ 3.8</b> เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ                      | 36   |
| <b>รูปที่ 3.9</b> เครื่องผสม   | 37   |
| <b>รูปที่ 3.10</b> เครื่องปั่นเหวี่ยง (rotary agitation device)  | 37   |
| <b>รูปที่ 3.11</b> ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement ; OPC)   | 37   |
| <b>รูปที่ 3.12</b> แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.   | 37   |
| <b>รูปที่ 3.13</b> ก้อนซีเมนต์หลังจากถอดแบบหล่อ  | 38   |
| <b>รูปที่ 3.14</b> การบ่มก้อนมอร์ตาร์ซีเมนต์   | 38   |
| <b>รูปที่ 3.15</b> การทดสอบการก่อตัวโดยเข็มไวแคต   | 38   |
| <b>รูปที่ 3.16</b> น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ  | 38   |
| <b>รูปที่ 4.1</b> ผลของสัดส่วน molCr/kgOPC กับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เฟสดี   | 41   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| <b>รูปที่ 4.2</b> การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์โพสท์ที่ลัดสั้น molCr/kgOPC ต่าง ๆ           | 43   |
| <b>รูปที่ 4.3</b> การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์โพสท์เฉลี่ย ที่ลัดสั้น 0.01-0.04 molCr/kgOPC | 45   |
| <b>รูปที่ 4.4</b> ระยะเวลาปมต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่ลัดสั้น molCr/kgOPC ต่าง ๆ   | 47   |
| <b>รูปที่ 4.5</b> ระยะเวลาปมต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฉลี่ยที่ลัดสั้น 0.05 – 0.20 molCr/kgOPC  | 48   |
| <b>รูปที่ 4.6</b> ระยะเวลาในการชะละลายกับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะที่ลัดสั้น molCr/kgOPC ต่าง ๆ                                    | 51   |
| <b>รูปที่ 4.7</b> ผลของเวลาการชะละลายต่อความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์เฉลี่ยที่ลัดสั้น 0.05 – 0.20 molCr/kgOPC                | 53   |
| <b>รูปที่ ค.1</b> กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมกับค่าการดูดกลืนแสง  | 91   |

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์
2. ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์
3. ศึกษาผลของการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์
4. ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

โครเมียมที่ศึกษา คือ โครเมียม(III) และ โครเมียม(VI)

รูปสารละลาย ได้แก่  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$  และ  $\text{K}_2\text{CrO}_4$

รูปตะกอน ได้แก่  $\text{Cr}(\text{OH})_3$

ปริมาณโครเมียมรูปต่าง ๆ ที่ศึกษา เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โมลของโครเมียมต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ( $\text{molCr/kgOPC}$ )

ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่

ก. ทดสอบการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยเข็มไวแคต (Vicat Needle) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C191

ข. ทดสอบความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15 และ 20 นาที ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)

2. ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

ระยะเวลาบ่มที่ศึกษา ได้แก่ 3, 7, 14 และ 28 วัน ทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเครื่องกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine) ปริมาณโครเมียมรูปต่าง ๆ ที่ศึกษา เท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20  $\text{molCr/kgOPC}$

3. ศึกษาการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์

ทำการทดสอบน้ำชะของซีเมนต์ที่ทำการบ่มเป็นเวลา 3 วัน ที่ระยะการชะละลายเวลา 0.5, 1, 9 และ 18 ชั่วโมง ด้วยวิธีทดสอบ TCLP ปริมาณโครเมียมรูปต่าง ๆ ที่ศึกษา เท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20  $\text{molCr/kgOPC}$

#### 4. ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการ ด้วยปูนซีเมนต์

เตรียมตัวอย่างของเสียที่มีโครเมียมให้อยู่ในรูปที่เหมาะสม แล้วทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ จากนั้นนำมาทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะ เช่นเดียวกับข้อ 2 และข้อ 3 โดยใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นทางเลือกในการเลือกรูปและสภาวะที่เหมาะสมของโครเมียม เพื่อใช้ในการบำบัดด้วยการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง
2. สามารถลดการปนเปื้อนของโลหะหนักโครเมียมที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์
3. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ใช้เป็นแนวทางสำหรับการบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากห้องปฏิบัติการ หรือโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 โครเมียม (สมีง,วินัย และจินตนา 2541)

##### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

โครเมียมเป็นโลหะธาตุ สีเทา ขาว มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 51.996 g/mol ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) เท่ากับ 7.20 จุดหลอมละลาย (melting point) เท่ากับ 1900 °C จุดเดือด (boiling point) เท่ากับ 2642 °C เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก

โครเมียมสามารถแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมีได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. Chromium metal และ alloy กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และ chromium-contains alloy โดยทั่วไปกลุ่มนี้มีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

2. Divalent chromium compound ( $\text{Cr}^{2+}$ ) หรือ chromous compound ได้แก่ chromous chlorides ( $\text{CrCl}_2$ ) และ chromous sulfate ( $\text{CrSO}_3$ ) กลุ่มนี้มีความเป็นพิษน้อย

3. Trivalent chromium compound ( $\text{Cr}^{3+}$ ) หรือ chromic compound เป็นที่ทราบกันว่า trivalent chromium เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในกระบวนการ glucose metabolism ส่วนสารประกอบอื่น ๆ ที่พบในกลุ่มนี้ เช่น chromic oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), chromic sulfate ( $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ ) และ chromic chlorides ( $\text{CrCl}_3$ )

4. Hexavalent chromium compound ( $\text{Cr}^{6+}$ ) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

1) กลุ่มที่ละลายน้ำ (water-soluble hexavalent chromium compound)

ได้แก่ chromic acid anhydride of chromic acid monochromate dichromate of sodium

2) กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble hexavalent chromium compound)

ได้แก่ zinc chromate, calcium chromate, lead chromate และ barium chromate

##### 2.1.2 การผลิตและการนำมาใช้ประโยชน์

โครเมียมถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1797 และถูกนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ โดยในธรรมชาติโครเมียมจะเกิดจากการทำเหมืองแร่และการถลุงแร่

### การนำมาใช้ประโยชน์

1. ใช้ในการทำอุตสาหกรรมเหล็กกล้า (steel) โดยเฉพาะ ferrochromium ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)
2. ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม (alloy) เช่น cobalt-chromium-tungsten alloy ซึ่งมีความเหนียวและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในรถยนต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด
3. ใช้ในกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ เช่น นำมาใช้เป็นตัวยับยั้งฝุ่นและป้องกันการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ดีเซล ใช้ในกระบวนการ oxidation ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ และใช้ในกระบวนการทำให้สารเคมีมีความบริสุทธิ์
4. ใช้เป็นส่วนประกอบของ inorganic pigment ในการผลิตสีที่ใช้เคลือบผลิตภัณฑ์ไม้ กระดาษ และเซรามิค นอกจากนี้ยังใช้ทำให้เกิดสีในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว
5. ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ในขั้นตอนการฟอกหนังที่มีการใช้สารประกอบโครเมียมทำปฏิกิริยากับโปรตีนในหนังเพื่อเปลี่ยนสภาพไม่ให้หนังเน่าเปื่อย
6. ใช้ในการชุบและเคลือบโลหะ (electroplating)
7. ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น
  - ผสมสารฆ่าเชื้อราและน้ำยารักษาเนื้อไม้
  - กระบวนการผลิตอิฐที่ใช้ก่อสร้างเตาที่ทนความร้อนสูง

### **2.1.3 การแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อม**

แหล่งที่แพร่กระจายโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่

1. จากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารประกอบโครเมียมในกระบวนการผลิต ถ้าโรงงานเหล่านี้ไม่มีกระบวนการบำบัดน้ำก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการปนเปื้อนได้
2. จากอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ จะทำให้เกิดฝุ่นในอากาศและแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมใกล้เคียง โดยเฉพาะในกระบวนการบดและคัดเลือกแร่ จะมีฝุ่นโครเมียมเกิดขึ้น
3. จากการเผาของที่เหลือใช้ ซึ่งมีโครเมียมหรือสารประกอบโครเมียมเป็นส่วนประกอบ เช่น ไม้ แก้ว พลาสติก ยางรถยนต์ เป็นต้น
4. จากตะกอนของน้ำทิ้ง โดยเฉพาะ hexavalent chromium compound จะมีทั้งส่วนที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ในส่วนที่ไม่ละลายน้ำก็จะสะสมอยู่ในตะกอนน้ำทิ้ง เมื่อนำมาใช้ในกิจการอื่น ๆ จะเกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น

## 2.1.4 ความเป็นพิษและผลต่อสุขภาพ

1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (Acute toxicity) ความรุนแรงมักพบในรายที่รับประทาน hexavalent chromium หรือ chromic acid หรือ dichromate เข้าไป ในระดับที่ทำให้เสียชีวิตได้คือ 1-3 กรัม (ในผู้ใหญ่) โดยจะพบอาการต่าง ๆ เหล่านี้ คือ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย เลือดออกในกระเพาะอาหาร ถ้าเป็นมากอาจทำให้เกิดสภาวะช็อกและเสียชีวิตได้

### 2. ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic toxicity)

- ความเป็นพิษต่อผิวหนัง มีสาเหตุมาจากการสัมผัส hexavalent chromium ในระยะเวลาสั้น ปัญหาที่พบบ่อยมาก คือ เกิดอาการผดผื่นที่ผิวหนัง โดยเกิดแผลที่บริเวณสัมผัสบ่อย ๆ

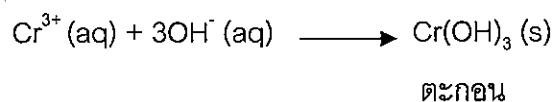
- ความเป็นพิษต่อปอด chromium trioxide ในอากาศจะถูกดูดซึมอย่างรวดเร็วจากระบบทางเดินหายใจ นอกจากนี้อัตราการดูดซึมสารประกอบโครเมียมยังขึ้นกับปัจจัยอื่นอีกด้วย เช่น คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแต่ละอนุภาค เป็นต้น

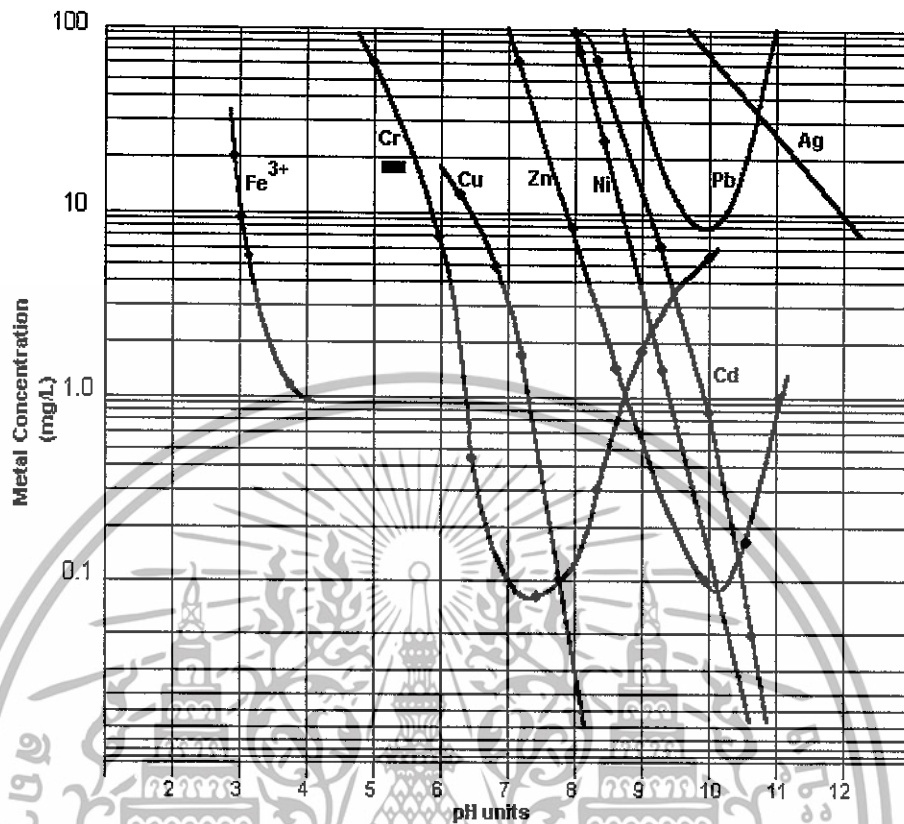
- การเป็นสารก่อมะเร็ง มีรายงานความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดมะเร็งปอดกับคนงานในโรงงานที่ต้องสัมผัสกับ chromate chrom-pigment และ ferrochrome chromium-plating เป็นจำนวนมาก ส่วนการเกิดมะเร็งที่อวัยวะอื่นยังมีข้อมูลสนับสนุนค่อนข้างน้อย แต่นักวิชาการก็คิดว่ามีแนวโน้มเกิดได้ เช่น มะเร็งที่จมูก หรือระบบทางเดินอาหาร เป็นต้น

## 2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม

### การบำบัดโครเมียม (III) (ยู่พา, 2548)

โครเมียม(III) มักมีความเป็นพิษและพบได้น้อยกว่าโครเมียม (VI) แต่อย่างไรก็ตามโครเมียม (III) ก็ยังเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงต้องมีการบำบัดด้วยวิธีที่เหมาะสม โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้ คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งโครเมียม(III) จะละลายน้ำได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 6.0 แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นค่าการละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วและละลายได้น้อยสุดที่พีเอช 7.5 - 8.5 โดยโครเมียม(III) จะสามารถรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการ



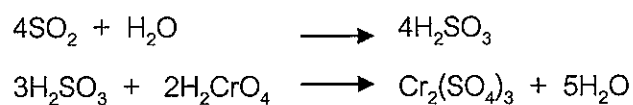


รูปที่ 2.1 การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (Eckenfelder, 1989)

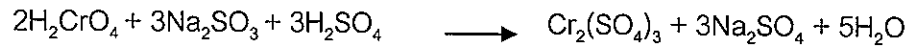
#### การบำบัดโครเมียม(VI) (จันทพร,สายสุนีย์ และศิริพันธ์ 2546)

โครเมียม(VI) เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในระบบนิเวศน์ ดังนั้นควรจะทำการบำบัดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำ วิธีที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย คือ วิธีรีดักชัน-พรีซิพิตชัน (reduction and precipitation) โดยลดพีเอชของน้ำเสียให้เป็น 3.0 หรือต่ำกว่าด้วยกรดซัลฟิวริกแล้วรีดิวซ์โครเมียม(VI) ไปเป็นโครเมียม(III) โดยใช้สารเคมี (reducing agent) เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ หรือเฟอร์รัสซัลเฟต แล้วกำจัดโครเมียม(III) ออกโดยทำให้ตกตะกอนด้วยปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 8.0 - 10.0 ปฏิกริยาเป็นดังนี้

ก. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) นิยมใช้เพราะราคาถูก แต่เป็นแก๊สพิษซึ่งสามารถรั่วซึมออกมาสู่ภายนอกได้ โดยทำปฏิกริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟิวรัส ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) จึงไม่ต้องเติมกรดอีก ดังสมการ



ข. สารประกอบซัลไฟต์ ใช้แทน  $\text{SO}_2$  ได้แก่ โซเดียมไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) , โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟต์ ( $\text{NaHSO}_3$ ) และโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) การใช้สารประกอบซัลไฟต์เป็นตัวรีดิวซ์จะทำให้เกิดต่างขึ้นจึงต้องเติมกรดให้มีพีเอช 2-3 ดังสมการ



ค. เฟอร์รัสซัลเฟต อยู่ในรูปของแข็งหรืออาจเตรียมเป็นสารละลายก่อนใช้รีดิวซ์โครเมียม(VI) โดยใช้ร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่พีเอช 2-3 แต่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตจะทำให้เกิดตะกอนมากกว่าการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือสารประกอบซัลไฟต์ เนื่องจากเหล็ก(II) จะถูกออกซิไดส์เป็นเหล็ก(III) เมื่อทำปฏิกิริยากับโครเมียม(VI) และกรดซัลฟิวริก ดังสมการ



### 2.3 การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification, S/S)

(ชมพูนุท, 2548)

การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพและทางเคมีชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ลดมลพิษและลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม จึงนิยมนำมาใช้แก้ปัญหาดินที่ปนเปื้อนและปรับสภาพกากของเสียอันตรายที่ออกมาจากระบบบำบัดก่อนนำไปทำการฝังกลบ

**การปรับเสถียร (Stabilization)** คือ กระบวนการที่มีการเติมวัสดุหรือสารเคมีลงไปของเสีย ทำให้คุณสมบัติของของเสียเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถจัดการกับของเสียได้ง่ายขึ้น เช่น การเคลื่อนย้ายง่ายขึ้นและยังช่วยลดพื้นที่ฝังฝังของของเสียลงส่งผลให้สารปนเปื้อนหลุดออกจากของเสียได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าการละลายได้ในน้ำและความเป็นพิษของสารปนเปื้อนได้

**การทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification)** คือ กระบวนการที่มีการเติมวัสดุหรือสารเคมีลงไปของเสีย ทำให้ของเสียมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถทนแรงกดและลดความสามารถในการซึมผ่านน้ำได้

### 2.3.1 กลไกที่เกี่ยวข้องกับการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง

#### 1. การจับแบบแคปซูลระดับแมกโคร (Macroencapsulation)

ของเสี่ยจะถูกห่อหุ้มล้อมด้วยวัสดุหรือสารเคมีที่เติมลงไปด้วยกลไกทางกายภาพ เมื่อมีการทำให้วัสดุแตกออกของเสี่ยจะถูกปล่อยออกมาได้ง่าย

#### 2. การจับแบบแคปซูลระดับไมโคร (Microencapsulation)

ของเสี่ยจะถูกห่อหุ้มล้อมด้วยวัสดุหรือสารเคมีที่เติมลงไปด้วยกลไกทางกายภาพ เช่นเดียวกับการจับแบบแคปซูลระดับแมกโคร แต่แตกต่างกันตรงที่ของเสี่ยจะถูกจับอยู่ในโครงสร้างของวัสดุเลย ซึ่งจะเป็นการจับที่แน่นกว่าระดับแมกโคร เมื่อมีการทำให้วัสดุแตกออกของเสี่ยจะถูกปล่อยออกมาได้ยากกว่า

#### 3. การดูดซึม (Absorption)

ของเสี่ยจะถูกดูดเข้าไปภายในตัวดูดซึม เช่นเดียวกับฟองน้ำดูดน้ำไว้ ตัวดูดซึมที่สามารถนำมาใช้ได้มีมากมาย เช่น ดิน ถั่วลย ฝุ่นจากเตาเผาซีเมนต์ ฝุ่นจากเตาเผาปูนขาว ฟาง ขี้เลื่อย และดินเหนียวชนิดต่าง ๆ

#### 4. การดูดซับ (Adsorption)

ของเสี่ยจะถูกยึดติดที่ผิวของตัวดูดซับด้วยพันธะเคมีต่าง ๆ เช่น วันเดอวาล์ว ไฮออนิก หรือไฮโดรเจน เป็นต้น การดูดยึดลักษณะนี้จะค่อนข้างแข็งแรง ตัวดูดซับที่สามารถนำมาใช้ เช่น ดินเหนียวดัดแปลง ถ่านคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

#### 5. การตกตะกอน (Precipitation)

เป็นการเติมสารเคมีลงไปของเสี่ยประเภทสารอนินทรีย์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอนเนต และฟอสเฟต เป็นต้น โดยค่าพีเอชจะมีผลต่อการตกตะกอนอย่างมาก

#### 6. การลดพิษ (Detoxification)

ของเสี่ยจะถูกทำให้เปลี่ยนรูปไปหรือเปลี่ยนค่าออกซิเดชัน เช่น การรีดิวซ์โครเมียม(VI) ซึ่งมีพิษมากกว่าไปเป็นโครเมียม(III) ที่มีพิษน้อยกว่า เป็นต้น

#### 7. ไวตรีฟิเคชัน (Vitrification)

เป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมวัสดุลงไปของเสี่ย หลักการก็คือ ให้ความร้อนกับของเสี่ยที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะทำให้ของเสี่ยหลอมตัวหลังจากนั้นทำให้ของเสี่ยเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของเสี่ยจะกลายเป็นผลึกแข็ง วิธีนี้อาจนำไปใช้แก้ปัญหาดินปนเปื้อนโดยอาจขุดดินไปบำบัดหรือจะบำบัดในพื้นที่ก็ได้

### 2.3.2 การทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ (กุสุมา, พัฒนธิดา และสิริรุช 2545)

ของเสี้ยวจะถูกผสมกับปูนซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจนของเสี้ยวแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์ โดยโลหะหนักหลายชนิดในของเสี้ยวจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซัลเฟตซึ่งไม่ละลายน้ำ

#### ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมปูนซีเมนต์และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีที่มีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการทำให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงไปของเสี้ยว
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

#### ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางอย่างซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในภาวะที่เป็นกรด
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสี้ยวโดยการหล่อตัวด้วยซีเมนต์ จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเพื่อนำไปกำจัดเพิ่มมากขึ้น

### 2.3.3 กลไกการผสมของโครเมียมในก้อนปูนซีเมนต์

Cohen and Petrie (1997) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกลไกการผสมของโครเมียมใน cement-based s/s product สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. โครเมียม(III) และโลหะอื่น ๆ จะไม่ละลายที่พีเอชปานกลาง ซึ่งความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มหรือลดพีเอช โดยเป็นลักษณะ amphoteric
2. โครเมียม(III) ถูกคาดว่าน่าจะพบในรูปของตะกอน  $Cr(OH)_3$  ในผลิตภัณฑ์ S/S ส่วนโครเมียม(VI) จะละลายอยู่ในช่องว่างของผลิตภัณฑ์ S/S เรียกว่า pore solution
3. แม้ว่าจะมีหลายงานวิจัยที่แสดงถึงการปลดปล่อยโลหะออกจากผลิตภัณฑ์ S/S เนื่องจากผลของพีเอช แต่พีเอชก็ไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่จะต้องทำการควบคุมยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น การแพร์ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

## 2.4 ปูนซีเมนต์ (ปริญญา และชัย 2547)

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้

### 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมี

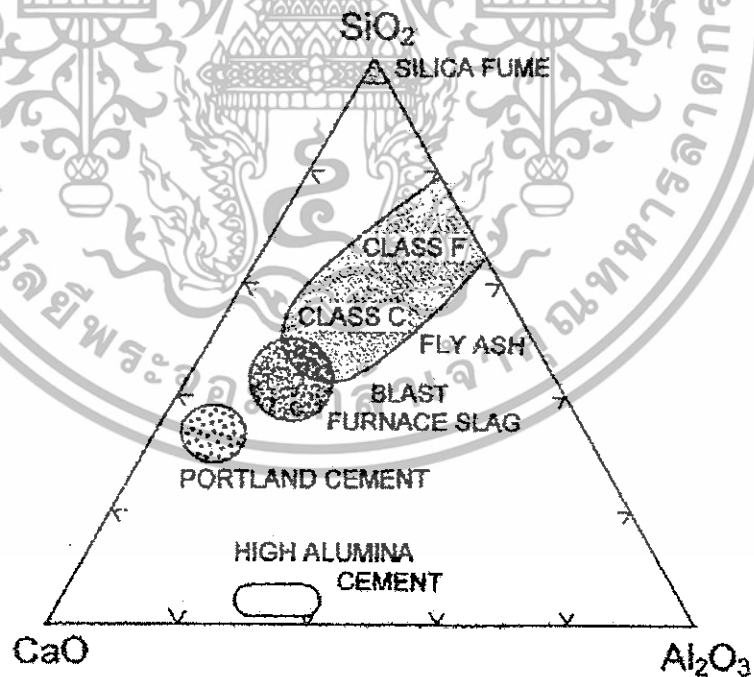
องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ออกไซด์หลัก (major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) และมีส่วนของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดหรือด่าง (insoluble residue) แสดงองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.1 ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ โดยสารประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่าง คือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  และย่อว่า C<sub>3</sub>S
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  และย่อว่า C<sub>2</sub>S
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  และย่อว่า C<sub>3</sub>A
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  และย่อว่า C<sub>4</sub>AF

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าองค์ประกอบที่มีปริมาณมากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 60-67 , ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 17-25 และ อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 3-8 ตามลำดับ ถ้าองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิด นี้มีสัดส่วนแตกต่างกันออกไป ก็จะได้วัสดุผสมชนิดใหม่ เช่น ซีเมนต์ที่มีอลูมินาปริมาณสูง (High Alumina Cement) จะมีสัดส่วนอลูมินาสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา และชัย 2547)

| องค์ประกอบทางเคมี                                  | สัญลักษณ์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|--|-----------|------------------|
| CaO  | C         | 60-67            |
| SiO <sub>2</sub>                                   | S         | 17-25            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | A         | 3-8              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | F         | 0.5-6            |
| MgO  | M         | 0.1-4            |
| Na <sub>2</sub> O                                  | N         | 0.1-1.8          |
| K <sub>2</sub> O                                   | K         | 0.1-1.8          |
| SO <sub>3</sub>                                    | S'        | 0.5-3            |
| สารประกอบอื่น ๆ                                    | -         | 0.5-3            |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(loss on ignition) | LOI       | 0.1-3            |
| กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)     |           | 0.2-0.75         |



รูปที่ 2.2 สัดส่วนผสมสารประกอบหลัก CaO, SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของปูนซีเมนต์

(F.P. Glasser, 1997)

## 2.4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement : OPC)

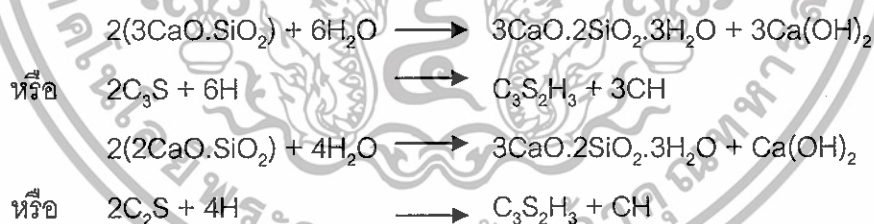
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้กันมากในงานคอนกรีต ซึ่งประมาณร้อยละ 90 เป็นปูนซีเมนต์ประเภทนี้ โดยใช้สำหรับงานคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษมากและใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร และถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว และตราฟิไอเขียว เป็นต้น

## 2.4.3 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration reaction)

ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เฟสต์ ปฏิกริยานี้จะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ที่มีหลายชนิด โดยที่สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกริยาต่อกันและกัน ทำให้ปฏิกริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิกริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ ดังนั้นการศึกษาปฏิกริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี

### 1. ปฏิกริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกต( $C_3S$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต( $C_2S$ ) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกริยาได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide,  $Ca(OH)_2$  หรือ CH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate,  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ CSH) ดังสมการ



การทำปฏิกริยาทางเคมีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยา คือ ถ้ามีการทำปฏิกริยามากก็จะมีคายความร้อนมาก

ขั้นตอนการทำปฏิกริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 ก.

**ขั้นที่ 1** เมื่อผสม  $C_3S$  กับน้ำ แคลเซียมไอออน( $Ca^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สารละลายที่ได้มีความเป็นด่างสูงคือมีพีเอชมากกว่า 12 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งมีมากในระยะแรกและลดลงอย่าง

รวดเร็วภายใน 15 นาทีแรก แต่ปฏิกิริยายังคงดำเนินต่อไป การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{OH}^-$  ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น

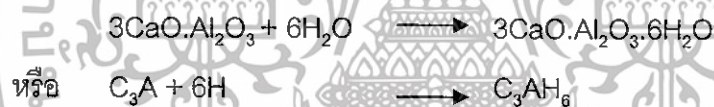
ขั้นที่ 2 ระยะสงบ (dormant period) ในช่วงนี้ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อย แต่ยังคงมีอยู่ตลอด โดยเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งที่ความเข้มข้นของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{OH}^-$  สูงพอจะทำให้เกิดการตกผลึกของ CH

ขั้นที่ 3 เมื่อมีการตกผลึกของ CH ในเวลาเดียวกัน  $\text{C}_3\text{S}$  จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของ  $\text{C}_3\text{S}$  ทำให้ได้ CSH จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ยากขึ้น แต่ยังคงมีต่อไป

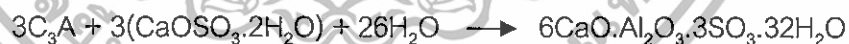
ปฏิกิริยาของ  $\text{C}_2\text{S}$  เป็นทำนองเดียวกันกับ  $\text{C}_3\text{S}$  แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้ากว่า เพราะ  $\text{C}_2\text{S}$  ว่างไว้ต่อการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า  $\text{C}_3\text{S}$

## 2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) ดังสมการ



ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องเติมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะ  $\text{C}_3\text{A}$  จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนได้แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (calcium sulfoaluminate hydrate,  $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  หรือ Ettringite) ดังสมการ



ยิปซัม

Ettringite

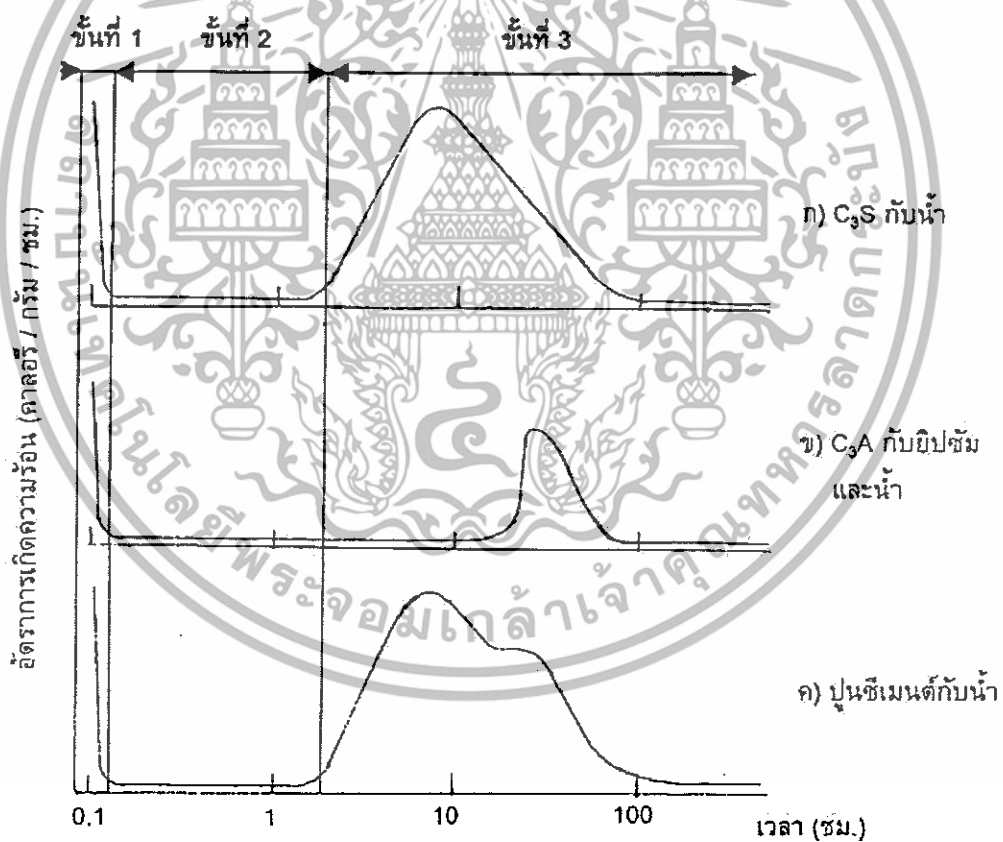
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมและน้ำก็สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้น ดังรูปที่ 2.3ข.

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอพทริงไคต์ที่มีลักษณะยาวคล้ายเข็มรอบ  $\text{C}_3\text{A}$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยาก จากนั้นปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง

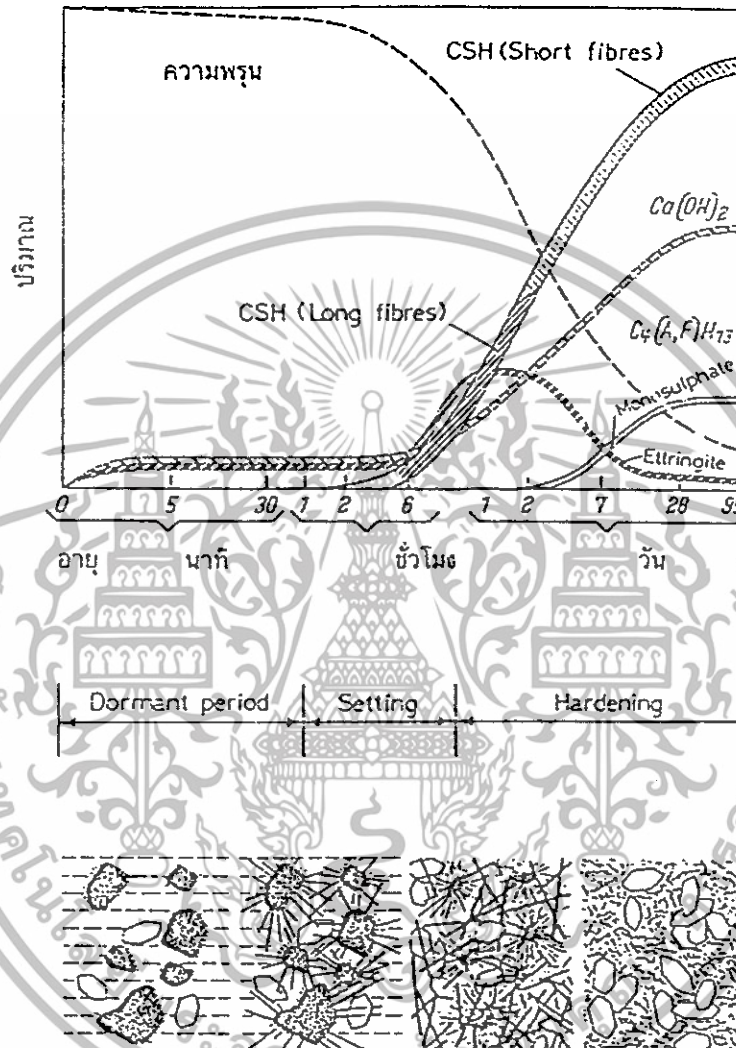
ขั้นที่ 3 เมื่อซัลเฟตไอออนทำปฏิกิริยาหมด  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไคต์ ทำให้เอททริงไคต์มีซัลเฟตน้อยลง กลายเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต (calcium monosulfaluminate,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 12 - 36 ชั่วโมง

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot C_4AF$ ) จะเกิดปฏิกิริยาคล้ายกับ  $C_3A$  แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า ซึ่งสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ , F) จะทำปฏิกิริยาคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ , A) และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่า  $C_3A$  โดยปฏิกิริยาระหว่าง  $C_4AF$  และยิปซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ( $6CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$ ) ซึ่งมีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายกับเอททริงไคต์ และสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำได้



รูปที่ 2.3 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (ปริญา และชัย 2547)

**ซีเมนต์เพสต์ (cement paste)** คือ ส่วนที่ใช้เรียกเมื่อทำการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ (ราชพร, ลักษณะ และสมศักดิ์ 2543)

**2.4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ (นิธิพร และธีรพัฒน์ 2548)**

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จนกระทั่งซีเมนต์เริ่มก่อตัวหรือแข็งตัวไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ ปกติระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะเวลาคือ การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การก่อดั้วระยะต้น** คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวแคตได้ โดยเข็มไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์โดย 25 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที

**การก่อดั้วระยะปลาย** คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักได้บ้าง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1-5 จะต้องมีเวลาก่อดั้วระยะต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และไม่เกิน 8 ชั่วโมงสำหรับการก่อดั้วระยะปลาย เมื่อวัดโดยใช้เครื่องมือไวแคต ระยะเวลาการก่อดั้วของปูนซีเมนต์ จะผันแปรไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ส่วนผสมของเนื้อปูนซีเมนต์ ความละเอียด อุณหภูมิ ความชื้นขณะทดลอง และปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เป็นต้น

โดยทั่วไปการก่อดั้วจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพราะอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมมีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อดั้วและแข็งตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อดั้วจึงได้กำหนดให้ใช้ปริมาณน้ำเพื่อผสมปูนซีเมนต์ ให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่ภาวะมาตรฐานคงที่เสมอ เรียกว่า ภาวะนี้ว่า ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ต้องการที่จะทำให้เข็มไวแคตขนาดมาตรฐานจมลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที ของการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกัน

นอกจากนี้ ส่วนผสมและขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ยังมีผลต่อระยะเวลาการก่อดั้วอีกด้วย ถ้าลดปริมาณของยิปซัมลง ระยะเวลาการก่อดั้วจะน้อยลง นั่นคือซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัวเร็วขึ้น ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดกว่าจะทำปฏิกิริยาทางเคมีเร็วขึ้นทำให้ก่อดั้วเร็วขึ้นด้วย

### 2.4.5 การบ่มคอนกรีต (บัญชา และไพบูลย์ 2546)

การบ่ม (Curing) คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการคือให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

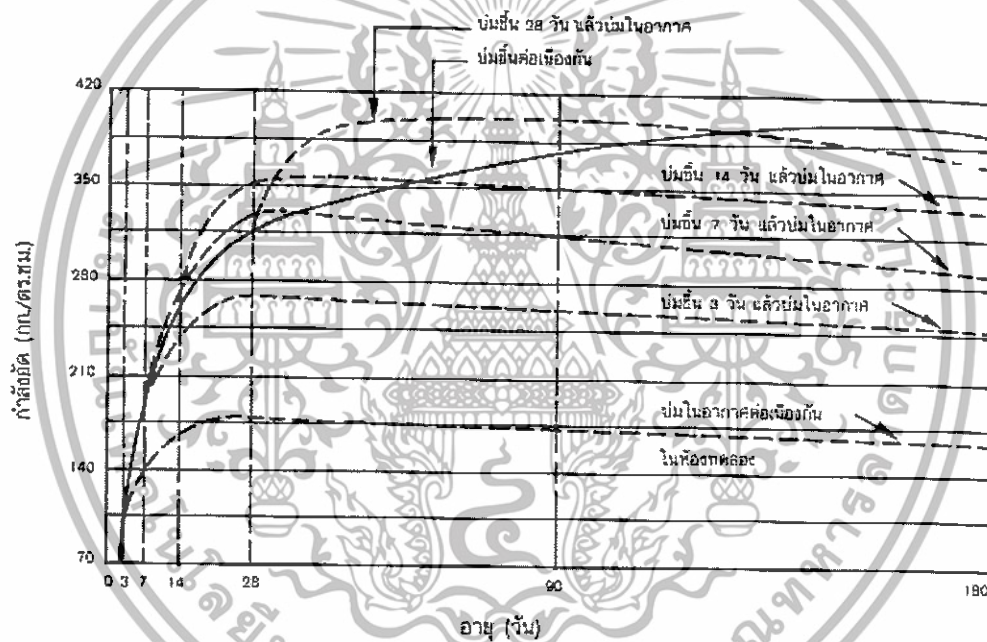
หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ

- 1) ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
- 2) รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

- 1) เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน
- 2) เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีตโดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจทำให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว



**รูปที่ 2.5** ผลของการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต (บัญชา และไพบุลย์ 2546)

การแสดงผลของอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังของคอนกรีต สรุปได้ดังนี้

- 1) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก ๆ ที่ได้รับการบ่ม ซึ่งชี้ถึงความสำคัญของการบ่มในระยะแรก
- 2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีโอกาสเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังอายุการบ่ม 28 วัน โดยอัตราการเพิ่มของกำลังรับแรงอัดจะช้าลง แต่ก็ยังเพิ่มขึ้นตลอดเวลา

3) หากขาดความชื้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มสักกระยะหนึ่ง เพราะความชื้นที่เหลืออยู่ แต่หลังจากนั้นกำลังรับแรงอัดจะไม่เพิ่มขึ้นอีก เช่น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้รับการบ่ม 3 วัน จะมีกำลังเพียง 75 – 80 % ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มขึ้นครบ 28 วัน

จะเห็นได้ว่า เราควรบ่มคอนกรีตให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ นั่นคือ บ่มจนกว่าคอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามที่ต้องการ ในทางปฏิบัติมักไม่สามารถบ่มคอนกรีตได้นานนัก ทั้งนี้ก็เพราะข้อจำกัดในเรื่อง กำหนดการก่อสร้างและค่าใช้จ่าย จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าการบ่มขึ้นถึง 7 วัน ทำให้เราสามารถได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงทัดเทียมกับกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่บ่มและทดสอบในสภาพขึ้นถึง 28 วัน ตามมาตรฐานอเมริกาแนะนำให้ใช้เวลาบ่มขึ้น 7 วัน สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป หรือเวลาที่จำเป็นเพื่อให้ได้กำลัง 70 % ของกำลังรับแรงอัดหรือกำลังดัดที่กำหนดแล้วแต่ว่าเวลาใดน้อยกว่ากัน แต่สำหรับคอนกรีตที่มีปริมาณมาก ๆ เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ เราจำเป็นต้องบ่มนานถึงอย่างน้อย 2 สัปดาห์

ในกรณีที่มีการบ่มต้องหยุดชะงักไประยะเวลาหนึ่งด้วยเหตุผลใด ๆ ก็ตาม เมื่อคอนกรีตได้รับความชื้น ปฏิกริยาไฮเดรชันก็สามารถเกิดขึ้นต่อไป ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงเพิ่มขึ้นไปอีก

#### 2.4.6 สมบัติของสารละลายที่อยู่ในช่องว่างซีเมนต์(pore solution expression)

Cohen and Petrie (1997) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครเมียมที่ผสมอยู่ใน pore solution ของ cement-based s/s product สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. พีเอชของ pore solution อยู่ระหว่าง 10.5 – 12.6 ซึ่งต่ำกว่าพีเอชการแข็งตัวของซีเมนต์โพสท์ (ประมาณ 13.6) การที่การแข็งตัวของซีเมนต์โพสท์และผลิตภัณฑ์ S/S มีพีเอชสูง เนื่องจากความสามารถในการละลายได้ของไฮดรอกไซด์ รวมทั้งมี Ca และ Zn อยู่ในช่องว่าง ซึ่งถ้าองค์ประกอบของ pore solution และความเข้มข้นมีความแตกต่างกัน จะทำให้ระดับการละลายของไฮดรอกไซด์แตกต่างกันได้ และค่าพีเอชก็จะแตกต่างกันด้วย

2. โครเมียมทั้งหมดประมาณร้อยละ 1 จะละลายอยู่ในช่องว่าง ซึ่งก็คือโครเมียม (VI) ส่วนโครเมียมที่เหลือคาดว่าน่าจะอยู่ในรูปโครเมียมออกไซด์ที่ไม่ละลาย โดยจะถูกตกตะกอนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโครเมียม(III) เช่น  $Cr(OH)_3$  ที่พีเอชประมาณ 11 ส่วนโครเมียมทั้งหมดคือร้อยละ 99 ของผลิตภัณฑ์ S/S ไม่ได้ผสมอยู่ใน pore solution ซึ่งจะต้องทำการทดสอบต่อไปด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) , Equilibrium Extraction (EE) และ Sequential Chemical Extraction (SCE)

3. ความเข้มข้นของโครเมียมใน pore solution มีแนวโน้มว่าจะสูงกว่าในน้ำของ filter cake ก่อนที่จะนำไปทำเป็นก้อนแข็ง แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้จาก 3 ปัจจัย

1) น้ำจาก filter cake ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ หรือการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้ pore solution มีความเข้มข้นมากขึ้น

2) อนุภาคของของเสี้ยวจะประกอบอยู่ในชั้นขอบของธาตุที่ระเหยได้ ซึ่งจะถูกลดออกไปบนผิวของแท่งซิลิเกต เมื่อแท่งซิลิเกตสัมผัสกับน้ำชั้นขอบดังกล่าวจะสามารถแลกเปลี่ยนกับสารละลายได้ โดยเกิดการละลายอย่างรวดเร็วของเกลือบางตัว ทำให้โลหะจากอนุภาคของเสี้ยวหลุดออกมา จากการวิเคราะห์น้ำของ filter cake หลังจาก 1 ชั่วโมง ในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป ชั้นขอบของแท่งซิลิเกตที่มีอนุภาคของของเสี้ยวเคลือบอยู่จะมีการปลดปล่อยสารประกอบต่าง ๆ และโครเมียมออกมาได้

3) การเพิ่มขึ้นของโครเมียมใน Pore solution เกิดจากการออกซิเดชันโครเมียม(III) ไปเป็นสารละลายโครเมียม(VI) ได้มากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ที่ค่าพีเอชมากกว่า 2 และถูกเร่งปฏิกิริยาด้วย  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ S/S อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างเป็นไปได้ช้า

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสียที่มีโครเมียมโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ มีดังนี้

**Chong; Seong and Chang (1999)** ทำการวิจัยเกี่ยวกับโครเมียมไอออน และเลดไอออนที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของ slag paste เพื่อหาความคงตัวและความแข็งในระหว่างกระบวนการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  5% เป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้แก้วลอยและยิปซัมแทนซีเมนต์ และหาค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) และการชะละลาย (Leaching tests) พบว่า เลดไอออนจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งยิปซัมจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและทำให้เลดไอออนถูกชะออกมาลดลง ส่วนโครเมียมไอออนจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้เกิด aluminates hydrates หลังจากนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง เนื่องจากสูญเสียไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ไปเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโครเมียมและทำให้ความเป็นด่างลดลง ซึ่งโครเมียมไอออนส่วนใหญ่จะเข้าไปแทนที่ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแคลเซียมอลูมินาตไฮเดรต

**Rajan; et. al. (1995)** ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนของของเสียโลหะหนักจากถ้ำลอย เพื่อหาค่าระยะเวลาการบ่ม กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะ โดยทำการทดลองผสมโลหะในเตรทกับโลหะหนัก ได้แก่  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  และ  $As^{5+}$  พบว่า ความเป็นต่างของของเสียสามารถยึดจับโลหะหนักที่เป็นพิษไว้ในโครงสร้างได้ และการชะละลายของโลหะหนักมีค่าต่ำเนื่องจากมี  $CaO$  และ  $CaSO_4$  ในปริมาณที่สูง ทำให้พีเอชสูงจึงสามารถทำลายฤทธิ์ของโลหะหนักได้ โดยการฟอร์มตัวเป็นคาร์บอนเนต, ซัลเฟต, ออกไซด์, หรือสารประกอบไฮดรอกไซด์

**Shively; Bishop and Brown (1986)** ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำเป็นก้อน เพื่อทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก (Leaching Tests) และกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยศึกษาโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว พบว่า การทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 สามารถสรุปผลได้ว่า ในช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนัก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $Ca(OH)_2$ ] ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัด ทำให้พีเอชมีค่ามากกว่า 10 และการละลายของสารในซีเมนต์จะเกิดเพียงเล็กน้อย ต่อจากนั้นโลหะหนักจะมีค่าการละลายสูงสุด เนื่องจากพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6 และ จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน พบว่า อาร์เซนิก และแคดเมียม จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ลดลง ทั้งสองอัตราส่วน แต่เมื่อทำเป็นของเสียผสมจะสามารถลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะอัตราส่วน w/c 0.5 เท่านั้น ส่วนโครเมียม และตะกั่ว จะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

**S.Wang and C.Vipulanandan (1999)** ทำการวิจัยเกี่ยวกับความสามารถในการชะละลายของโครเมียม(VI) โดยกระบวนการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ โดยการศึกษาเวลาในการก่อตัว (setting time) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และการชะละลาย (Leaching tests) ของโครเมียม(VI) โดยจะทดสอบเป็น 4 ชุดทดลอง โดยโครเมียมในของเสียโพแทสเซียม โครเมตต่อซีเมนต์ เป็น 0, 0.5, 2.0, 5.0 % พบว่าโครเมียม(VI) จะหน่วงเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์ โดยที่ 5% จะก่อตัวช้าสุด และมีประสิทธิภาพในการบำบัด 80 เปอร์เซ็นต์ โดยผลที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกของโครเมียม(VI) จะถูกยึดไว้ในโครงสร้างผลึกเกิดเป็นสารเชิงซ้อนร่วมกับ แคลเซียม( $Ca^{2+}$ ) เป็น  $CaCrO_4$  ซึ่งมีค่าการละลายต่ำ และการชะของโครเมียม(VI) จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโครเมียม(VI) เริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการชะ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. บีกเกอร์ ขนาด 150, 250 มล.
2. บีกเกอร์พลาสติก ขนาด 150 มล.
3. กระบอกตวง ขนาด 10, 100, 500 มล.
4. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100, 1000 มล.
5. ขวดพลาสติก ขนาด 25, 100 มล.
6. แท่งแก้วคนสาร
7. หลอดหยดสาร
8. ขวดฉีดน้ำกลั่น
9. เกรียงเหล็ก
10. แท่งกระทุ้ง (Tampor)
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ซ้อนตักสาร
13. ถูมียอยาง
14. กระจกขยายแก้วเบอร์ 42
15. กระจกทรงขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
16. แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.
17. เทอร์โมมิเตอร์
18. เครื่องวัดพีเอช
19. เครื่องชั่ง สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม
20. เครื่องผสม
21. เครื่องกรองสุญญากาศ
22. เครื่องปั่นเหวี่ยง (rotary agitation device)
23. เครื่องทดสอบแบบไวแคต (Vicat Needle)

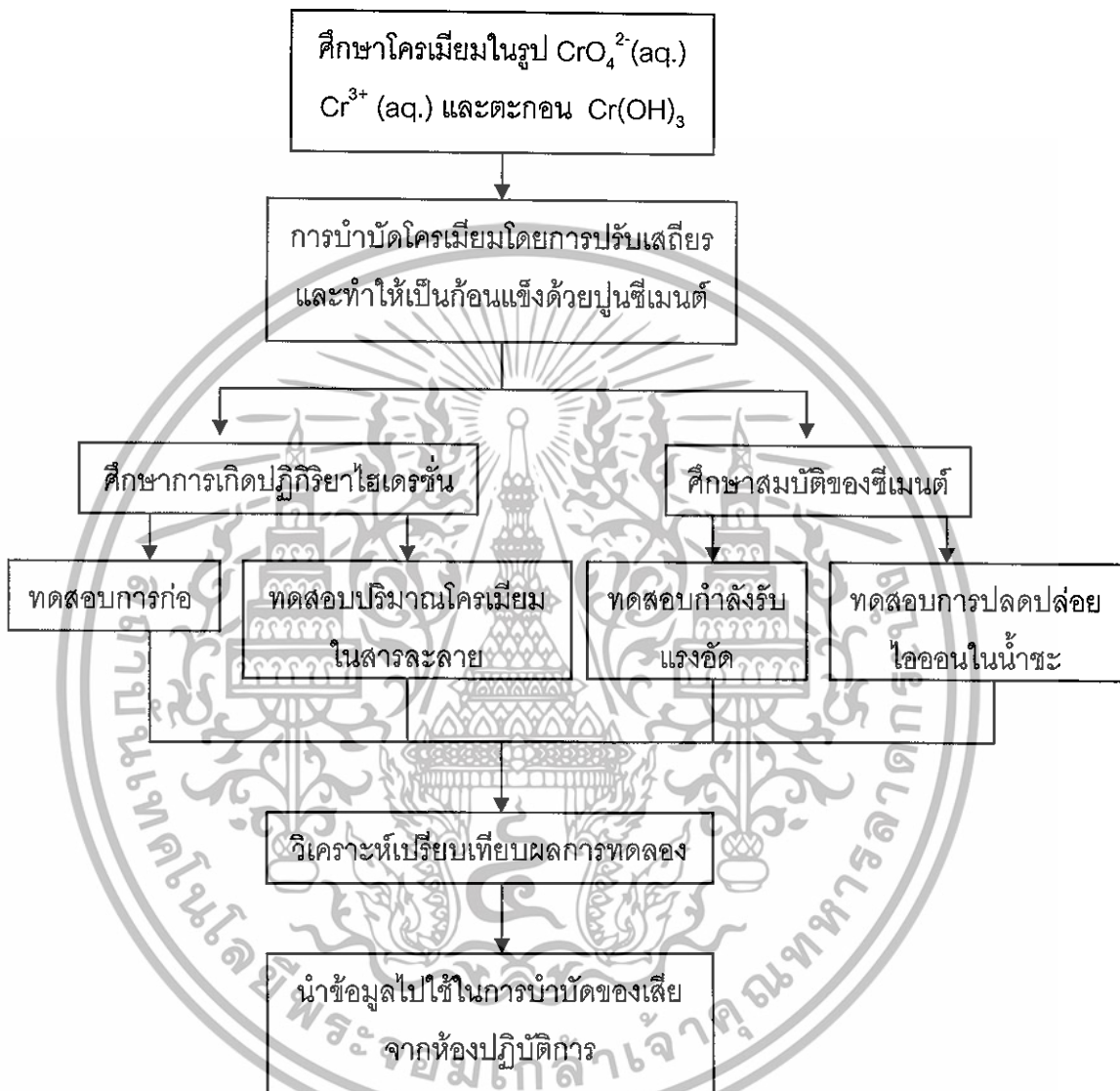
24. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine) ยี่ห้อ Controls Microprocessor Digital System
25. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ ประเทศออสเตรเลีย

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น (glacial  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกรดวิเคราะห์
2. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์
3. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 นอร์มอล (1 N  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc.  $\text{NaOH}$ ) เกรดวิเคราะห์
5. โครเมียมไนเตรต ( $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ ) เกรดวิเคราะห์
6. โพแทสเซียมโครเมต ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์
7. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ตราช้าง
8. น้ำกลั่น

### 3.2 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

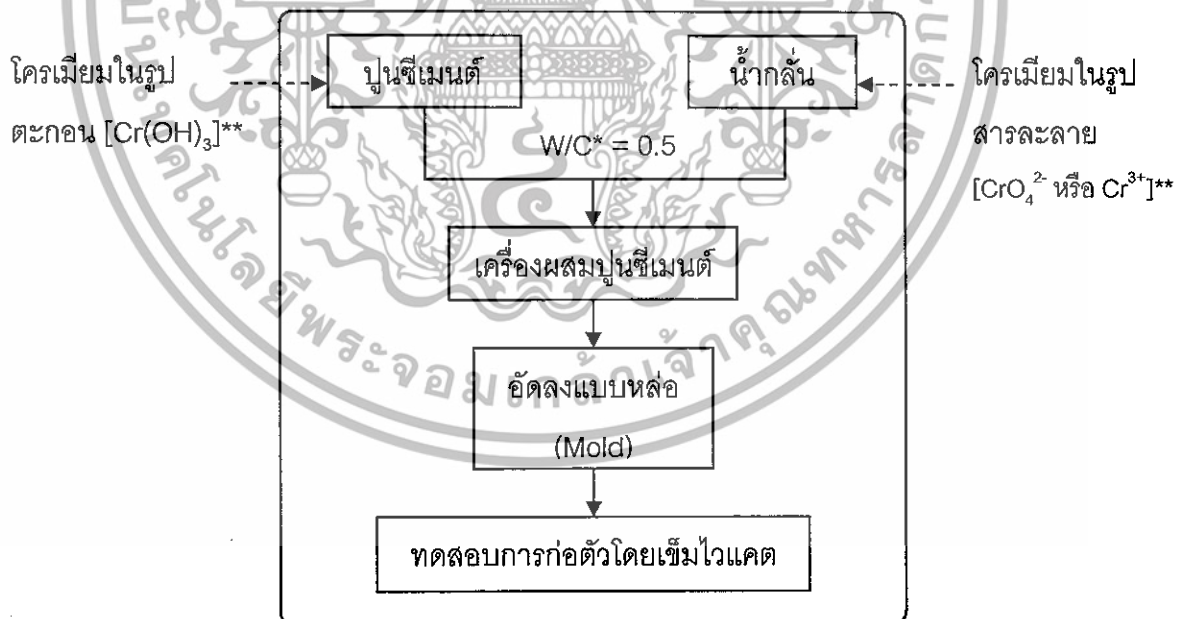
การวิจัยประกอบไปด้วยการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ดังนี้

- 1). ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์,
  - การก่อตัวของซีเมนต์เฟส
  - ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย (excess water) ระหว่างการก่อตัว
- 2). ศึกษาผลของระยะเวลาปมต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์
- 3). ศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์
- 4). ศึกษาผลของการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

### 3.2.1 ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

#### 1) การก่อตัวของซีเมนต์เฟส

การเตรียมซีเมนต์เฟสเพื่อศึกษาการก่อตัว ทำการทดลองโดยผสมซีเมนต์กับน้ำกลั่น ดังแผนภาพสำหรับชุดควบคุม ส่วนตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  จะผสมกับปูนซีเมนต์ก่อนผสมกับน้ำกลั่น และในรูป  $\text{CrO}_4^{2-}$  หรือ  $\text{Cr}^{3+}$  จะผสมกับน้ำกลั่นก่อนผสมกับซีเมนต์ ดังรูปที่ 3.2

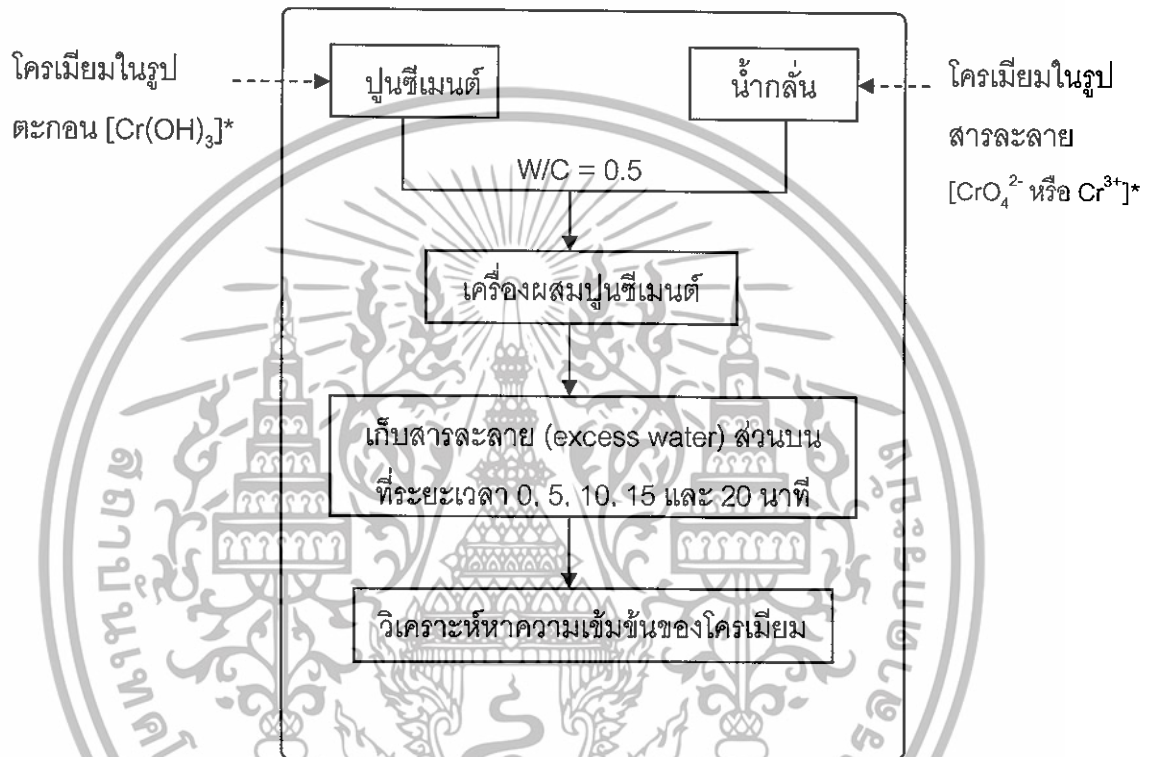


\* W/C คือ อัตราส่วนของน้ำ(water ; W) ต่อซีเมนต์(cement ; C)

\*\* ใช้โครเมียมในแต่ละรูปที่สัดส่วน molCr/kgOPC เท่ากับ 0, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04

รูปที่ 3.2 การหาการก่อตัวของซีเมนต์เฟส

2) การหาความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย (excess water) ระหว่างการก่อตัว  
 นำสารละลาย(excess water) ระหว่างการเกิดการก่อตัวของซีเมนต์  
 มาวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมที่ระยะเวลา 0, 5, 10, 15 และ 20 นาที  
 มีรายละเอียดดังนี้

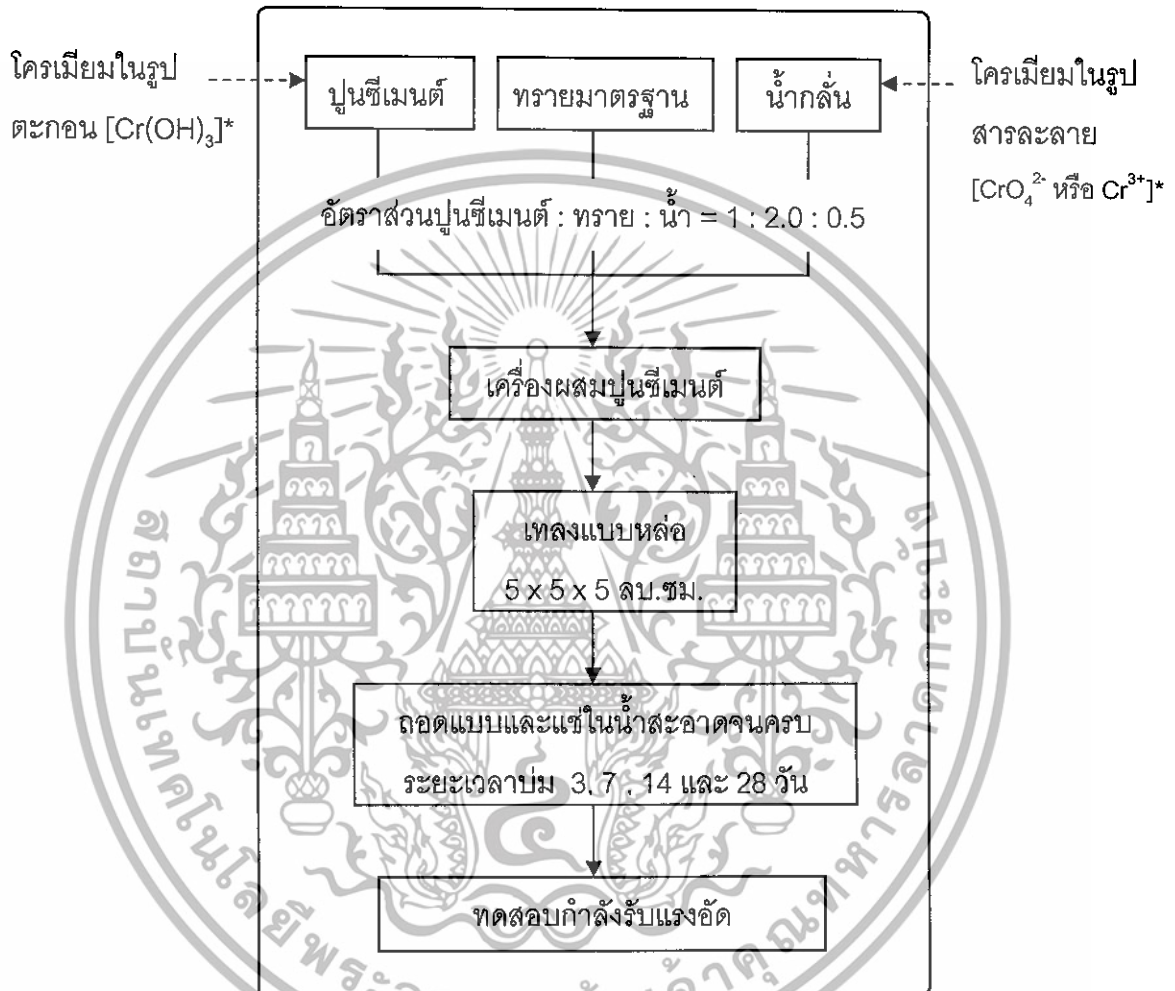


\* ใช้โครเมียมในแต่ละรูปที่สัดส่วน molCr/kgOPC เท่ากับ 0, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04

**รูปที่ 3.3** การหาความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัว

### 3.2.2 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

การเตรียมซีเมนต์เพื่อศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM C109 ในการทดลองศึกษาที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน มีรายละเอียดดังนี้



\* ใช้โครเมียมในแต่ละรูปที่สัดส่วน  $\text{molCr}/\text{kgOPC}$  เท่ากับ 0, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20

**รูปที่ 3.4** การหาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

### 3.2.3 ศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

นำก้อนปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน มาหาค่าปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม โดยการชะละลายตามวิธี TCLP test (U.S. EPA Method 1311) ที่ระยะเวลาการชะละลาย 0.5, 1, 9 และ 18 ชั่วโมง (ทั้งหมด 4 ชุดการทดลองโดยแบ่งตามระยะเวลาที่เขย่า) มีรายละเอียดดังนี้



**รูปที่ 3.5** การหาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

### 3.2.4 ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

ทำการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ของของเสียจากห้องปฏิบัติการในรูปที่เหมาะสม แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM C109 ที่ระยะเวลาปม 7 วัน และทดสอบการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะตามวิธี TCLP test (U.S. EPA. Method 1311) ที่ระยะเวลา 18 ชั่วโมง มีรายละเอียดดังนี้



**รูปที่ 3.6** การหาลำดับรับแรงอัดและการปลดปล่อยไอออนในน้ำชะจากการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

ก. การหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เข็มไวแคต (ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C191)

การเตรียมซีเมนต์เพสต์ (ชุดควบคุม)

- 1) ชั่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา 300 กรัม
- 2) ตวงน้ำกลั่นด้วยกระบอกตวงขนาด 500 มล. ที่ปริมาตร 150 มล.

(อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5)

- 3) เตรียมภาชนะผสมและใบพายสภาพที่แห้งสนิท
- 4) เทปูนซีเมนต์ที่ชั่งไว้ลงในภาชนะผสม
- 5) ค่อย ๆ เทน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ลงในภาชนะผสมและปล่อยให้ 30 วินาที เพื่อให้ปูนซีเมนต์ดูดน้ำ พร้อมบันทึกเวลาเริ่มต้นผสม
- 6) เดินเครื่องผสมในอัตราเร็วต่ำ เป็นเวลา 30 วินาที และหยุดเดินเครื่อง 15 วินาที ให้ชุดปูนซีเมนต์ที่ติดอยู่ข้างภาชนะผสมลงไปรวมกันไว้
- 7) เดินเครื่องผสมอีกครั้งด้วยอัตราเร็วปานกลาง เป็นเวลา 1 นาที แล้วหยุดเครื่องพร้อมนำส่วนผสมไปใช้งาน

การเตรียมซีเมนต์เพสต์ที่มีโครเมียมในรูปแบบต่าง ๆ เจือปน

- 1) ชั่งโครเมียมในรูปแบบ  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  จาก  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  หรือ  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$  ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 ผสมลงในน้ำกลั่นก่อนผสมกับปูนซีเมนต์ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์เพสต์ของชุดควบคุม (ข้อ 1 - 7) แต่เปลี่ยนจากผสมน้ำกลั่นเป็นผสมสารละลายโครเมียมที่เตรียมไว้แทน
- 2) ชั่งโครเมียมในรูปแบบตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (วิธีเตรียมตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ดังภาคผนวก ก) ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์เพสต์ของชุดควบคุม (ข้อ 1 - 7) โดยผสมตะกอนโครเมียมกับปูนซีเมนต์ก่อนทำการผสมน้ำกลั่น

### การหล่อตัวอย่าง

1) สวมถุงมือยางนำซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมไว้ปั้นเป็นก้อนกลม โยนไปมา 6 ครั้ง โดยที่ให้มีมือทั้งสองข้างอยู่ห่างกันประมาณ 15 ซม.

2) วางภาชนะหล่อปูนซีเมนต์ (Mold) ให้ปลายด้านใหญ่ลงบนแผ่นกระจก

3) อัดก้อนปูนซีเมนต์ลงในภาชนะหล่อแล้วใช้เกรียงเหล็กปาดปูนซีเมนต์ที่ล้นออกมาจากด้านบนให้เรียบ เก็บไว้ในห้องขึ้น โดยไม่มีการกระทบกระเทือนจนครบ 30 นาที

### การหาระยะเวลาในการก่อตัว

1) วางภาชนะหล่อปูนซีเมนต์ที่บรรจุซีเมนต์ไว้ได้เข็มไวแคะขนาด 1 มม. เลื่อนเข็มให้ปลายเข็มไวแคะสัมผัสผิวซีเมนต์และปรับเข็มสเกลบอกระดับที่ขีดศูนย์

2) ปลดเข็มให้เข็มไวแคะจมลงในซีเมนต์เพสต์ พร้อมอ่านค่าระยะการจมของเข็มสเกลหลังจากปล่อยแล้ว 30 วินาที

3) ทำซ้ำเช่นเดิมทุก ๆ 15 นาที จนกว่าได้ระยะการจมของเข็มสเกลบอกระยะเท่ากับ 25 มม. พร้อมบันทึกระยะเวลา

4) การปล่อยเข็มไวแคะแต่ละครั้ง ปลายเข็มไวแคะจะต้องอยู่ห่างจากรอยเข็มเก่าไม่น้อยกว่า 5 มม. และห่างจากขอบภาชนะหล่อปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 10 มม.

5) ระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงเวลาที่เข็มไวแคะจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มม. คือค่าการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

### ข. การหาความเข้มข้นในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

#### การเตรียมซีเมนต์เพสต์ (ชุดควบคุม)

1) ชั่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 50 กรัม

2) ตวงน้ำกลั่นด้วยกระบอกตวงที่ปริมาตร 25 มล. (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5)

3) เทปูนซีเมนต์ที่ชั่งไว้ลงในบีกเกอร์พลาสติกขนาด 150 มล. ในสภาพที่แห้งสนิท ค่อย ๆ เทน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ปล่อยทิ้งไว้ 30 วินาที กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันภายในระยะเวลา 1 นาที

### การเตรียมซีเมนต์โพสท์ที่มีโครเมียมในรูปแบบต่าง ๆ เจือปน

1) ชั่งโครเมียมในรูปแบบ  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  จาก  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  หรือ  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$  ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน molCr/kgOPC เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 ผสมลงในน้ำกลั่นก่อนผสมกับปูนซีเมนต์ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์โพสท์ของชุดควบคุม (ข้อ 1 - 3) แต่เปลี่ยนจากผสมน้ำกลั่นเป็นผสมสารละลายโครเมียมที่เตรียมไว้แทน

2) ชั่งโครเมียมในรูปแบบตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (วิธีเตรียมตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ดังภาคผนวก ก) ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน molCr/kgOPC เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์โพสท์ของชุดควบคุม (ข้อ 1 - 7) โดยผสมตะกอนโครเมียมกับปูนซีเมนต์ก่อนทำการผสมน้ำกลั่น

### การหาความเข้มข้นในสารละลายระหว่างการทำตัวของซีเมนต์โพสท์

1) นำสารละลาย(excess water) ส่วนบน ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 0 นาที (เป็นเวลานับตั้งแต่การกวนผสมในระยะเวลา 1 นาที) ไปกรองแบบสุญญากาศ และรักษาสภาพโดยการเติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ควบคุมให้ pH ต่ำกว่า 2 เก็บส่วนที่กรองใส่ขวดพลาสติก HDPE ขนาด 60 มล.

2) นำไปหาความเข้มข้นของโครเมียม โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)

3) ทำการทดลองทั้งหมดซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

4) ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็น 5, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ

### **3.3.2 ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์**

#### การเตรียมมอร์ตาร์สำหรับหล่อตัวอย่าง (ชุดควบคุม)

1) ชั่งปูนซีเมนต์ 340 กรัม, ทราเยมาตรฐาน 680 กรัม และ น้ำปริมาตร 170 มล. (อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ทราเยมาตรฐาน : น้ำกลั่น เท่ากับ 1 : 2.0 : 0.5 โดยน้ำหนัก)

2) เตรียมภาชนะผสมและใบพายในสภาพที่แห้งสนิท

3) เทปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ลงในภาชนะผสมและค่อย ๆ เทน้ำกลั่นที่ตวงไว้ลงไป จากนั้นเดินเครื่องผสมในอัตราเร็วต่ำเป็นเวลา 30 วินาที ขณะเดินเครื่องให้เติมทรายที่เตรียมไว้ให้

หมดภายในเวลา 30 วินาที หยุดเดินเครื่องผสมทิ้งไว้ในภาชนะผสม 90 วินาทีและให้ปาดมอร์ตาร์ที่ติดตามข้างอ่างลงไป แล้วเดินเครื่องผสมในอัตราเร็วปานกลางอีกครั้ง 15 วินาที จากนั้นให้รึบนำส่วนผสมไปใส่แบบหล่อที่เตรียมไว้

การเตรียมมอร์ตาร์สำหรับหล่อตัวอย่างที่มีโครเมียมในรูปแบบต่าง ๆ เจือปน

1) ชั่งโครเมียมในรูปแบบ  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  จาก  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  หรือ  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$  ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  เท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ผสมลงในน้ำกลั่นก่อนผสมกับปูนซีเมนต์ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์เพสต์ของชุดควบคุม (ข้อ 1-3) แต่เปลี่ยนจากผสมน้ำกลั่นเป็นผสมสารละลายโครเมียมที่เตรียมไว้แทน

2) ชั่งโครเมียมในรูปแบบตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (วิธีเตรียมตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ดังภาคผนวก ก) ในปริมาณต่าง ๆ ตามสัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  เท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมซีเมนต์เพสต์ของชุดควบคุม (ข้อ 1-7) โดยผสมตะกอนโครเมียมกับปูนซีเมนต์ก่อนทำการผสมน้ำกลั่น

การหล่อแบบตัวอย่าง

1) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลบ.ซม. และทาน้ำมันบางๆ

2) เติชมอร์ตาร์ที่เตรียมไว้ในช่องแบบหล่อทุกช่องหนาประมาณ 25 มม. กระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง (Tampers) ช่องละ 32 ครั้งภายในเวลาประมาณ 10 วินาที กระทุ้งช่องละ 4 รอบ รอบละ 8 ครั้ง โดยแต่ละรอบกระทุ้งให้ตั้งฉากทั่วทั้งแบบหล่อ

3) ใส่มอร์ตาร์ที่เหลือในช่องแบบหล่อทุกช่องให้สูงสูงกว่าขอบ แล้วกระทุ้งเช่นเดียวกับขั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วมอร์ตาร์ควรสูงกว่าขอบเล็กน้อย

4) ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ผิวหน้าแบบหล่อให้เรียบตลอดความยาวของแบบหล่อ

5) นำไปเก็บไว้ในห้องบ่มขึ้นจนครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบ แล้วนำไปแช่ในน้ำสะอาดจนครบระยะเวลาบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM C109)

1) นำตัวอย่างออกจากห้องบ่ม ทำความสะอาดโดยปัดเม็ทรายและสะเก็ดที่ติดผิวออกให้หมด เช็ดผิวให้แห้งแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด

2) วัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อน

3) นำก้อนทดสอบไปวางให้อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของเบ้าทดสอบของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดและเคลื่อนเบ้ากดให้สัมผัสกับผิวก้อนตัวอย่าง จากนั้นให้เพิ่มแรงอัดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาทดสอบระหว่าง 20 - 80 วินาที

4) บันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบและคำนวณหากำลังรับแรงอัด ไม่ควรให้กำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างแตกต่างกันกว่า 10 % จากค่าเฉลี่ยของทั้งหมด ทำการทดลองทั้งหมดซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.3 ศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

หาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมโดยการชะละลายตามวิธีของ TCLP test (มาตรฐาน U.S. EPA Method 1311)

- 1) เตรียมก้อนปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน เช่นเดียวกับการทดลองข้อ 3.3.2 (ทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีรูปของโครเมียมเจือปน)
- 2) บดก้อนตัวอย่างและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ที่มีขนาดรูตะแกรง 9.5 มม. จำนวน 5 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มล.
- 3) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 96.5 มล. คนให้เข้ากัน และเทใส่ขวดพลาสติกขนาด 100 มล.
- 4) นำไปชะละลายด้วยสารละลายของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ที่มี pH ประมาณ 2.8 ปรับปริมาตรให้ได้สารละลาย 100 มล. (อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่างปูนซีเมนต์) หรือ เติมเป็นปริมาตร 3.5 มล.
- 5) นำตัวอย่างเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง (rotary agitation device) ที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที
- 6) กรองสารละลายที่ผ่านการเขย่าด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรู 0.6 - 0.8 ไมครอน
- 7) นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)
- 8) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย
- 9) ทำการทดลองเช่นเดิม (ข้อ 1 - 8) แต่เปลี่ยนระยะเวลาเป็น 1, 9 และ 18 ชม. ตามลำดับ (โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลองตามระยะเวลาหมุนเหวี่ยง)

### 3.3.4 ศึกษาการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

#### ก. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

1) นำของเสียจากห้องปฏิบัติการมาทำการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลาปรม 7 วัน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 3.3.2

2) ทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM C109

3) บันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบและคำนวณหาลังรับแรงอัด ไม่ควรให้กำลังรับแรงอัดของแต่ละตัวอย่างแตกต่างกันกว่า 10 % จากค่าเฉลี่ยของทั้งหมด ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

#### ข. การศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะ

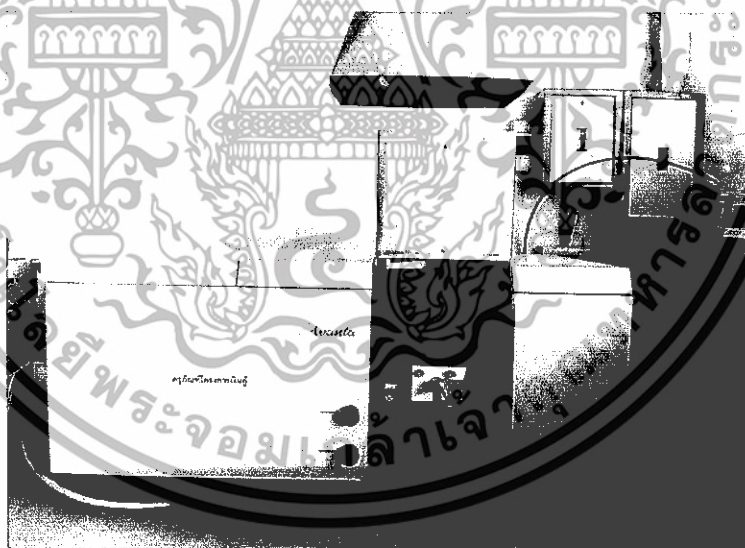
1) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 3.3.3 (ตามวิธีของ TCLP test มาตรฐาน U.S.EPA. Method 1311) แต่เปลี่ยนมาใช้ก้อนปูนซีเมนต์ของข้อ ก. ในการทดลองข้อ 3.3.4

2) นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)

3) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine)



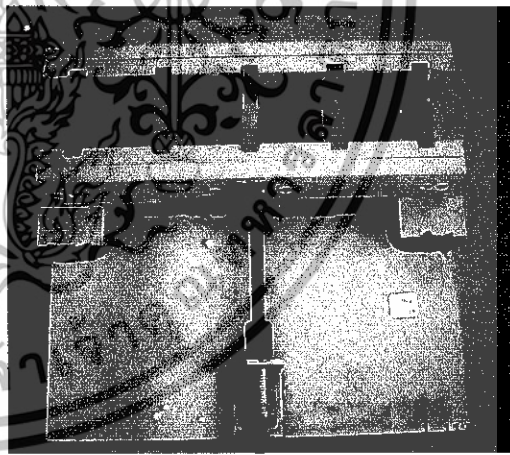
รูปที่ 3.8 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ



รูปที่ 3.9 เครื่องผสม



รูปที่ 3.10 เครื่องปั่นเหวี่ยง (rotary agitation device)

รูปที่ 3.11 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา  
(Ordinary Portland Cement ; OPC)

รูปที่ 3.12 แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.



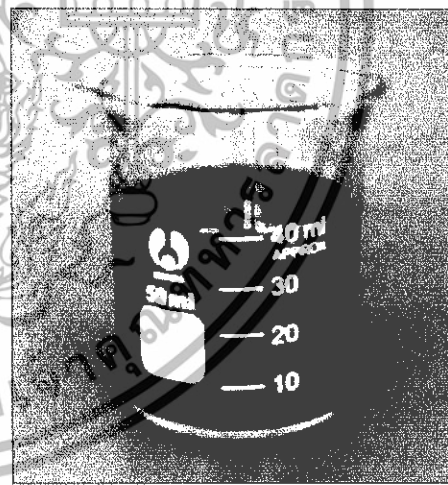
รูปที่ 3.13 ก้อนซีเมนต์หลังจากถอดแบบหล่อ



รูปที่ 3.14 การป่มก้อนมอร์ตาร์ซีเมนต์



รูปที่ 3.15 การทดสอบการกดตัวโดยเข็มไวแคต



รูปที่ 3.16 น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 รูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

การวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งรูปโครเมียมที่ศึกษา ได้แก่ โครเมต  $[\text{CrO}_4^{2-}]$ , โครเมียม(III)  $[\text{Cr}^{3+}]$  และโครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$  โดยแปรค่าสัดส่วนโมลของโครเมียมต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ( $\text{molCr/kgOPC}$ ) เป็น 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 จากนั้นนำซีเมนต์เพสต์ที่มีโครเมียมมาทดสอบการก่อตัวโดยเพิ่มไวนิล และหาความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลาย (excess water) ระหว่างการก่อตัว

##### 4.1.1 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เพิ่มไวนิล

จากการทดลองหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เพิ่มไวนิล ที่สัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  เป็น 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น แสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของรูปโครเมียมต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์

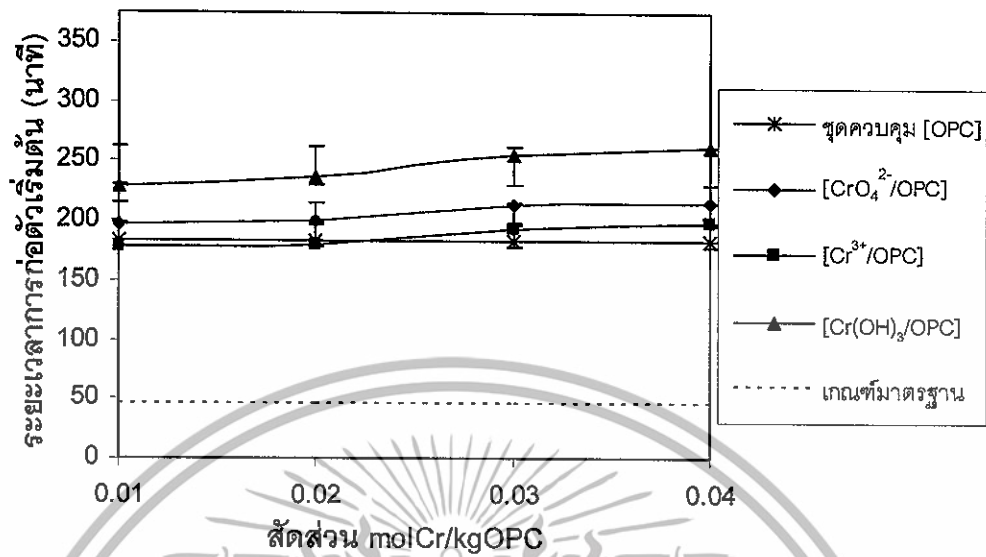
| รูปของโครเมียม<br>ในซีเมนต์เพสต์                | สัดส่วน<br>$\text{molCr/kgOPC}$ | ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที) |      |
|---|---------------------------------|----------------------------------|------|
|   |                                 | เฉลี่ย                           | SD   |
| ชุดควบคุม (OPC)                                 | -                               | 184                              | 1.53 |
| โครเมต<br>$[\text{CrO}_4^{2-}/\text{OPC}]$      | 0.01                            | 196                              | 1.00 |
|   | 0.02                            | 200                              | 0.00 |
|   | 0.03                            | 214                              | 1.15 |
|   | 0.04                            | 215                              | 1.15 |
| โครเมียม (III)<br>$[\text{Cr}^{3+}/\text{OPC}]$ | 0.01                            | 179                              | 0.00 |
|   | 0.02                            | 180                              | 2.52 |
|   | 0.03                            | 194                              | 2.65 |
|   | 0.04                            | 199                              | 0.58 |

| รูปของโครเมียม<br>ในซีเมนต์เฟส                   | สัดส่วน<br>molCr/kgOPC | ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น(นาที) |      |
|--|------------------------|---------------------------------|------|
|  |                        | เฉลี่ย                          | SD   |
| โครเมียมไฮดรอกไซด์<br>[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/OPC | 0.01                   | 228                             | 2.65 |
|  | 0.02                   | 237                             | 0.58 |
|  | 0.03                   | 256                             | 1.15 |
|  | 0.04                   | 262                             | 0.00 |
| เกณฑ์มาตรฐาน                                     | ไม่น้อยกว่า 45 นาที    |                                 |      |

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่าซีเมนต์เฟสที่มีโครเมียมทุกรูปมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วน molCr/kgOPC เพิ่มขึ้น และซีเมนต์เฟสที่มีโครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ Cr(OH)<sub>3</sub> มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นสูงสุด ดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 พบว่าซีเมนต์เฟสที่มีโครเมียมทุกรูป มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่าชุดควบคุม ยกเว้นโครเมียมในรูปของโครเมียม(III) [Cr<sup>3+</sup>] ที่สัดส่วน 0.01 และ 0.02 molCr[Cr<sup>3+</sup>]/kgOPC ที่มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นต่ำกว่าชุดควบคุม เนื่องมาจากโครเมียม(III) ในปริมาณน้อยอาจมีส่วนทำให้ซีเมนต์เฟสก่อตัวเร็วขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนของโครเมียม(III) เพิ่มขึ้น จะมีระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับซีเมนต์เฟสที่มีโครเมียมรูปอื่น ๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟสที่มีโครเมียมในรูปต่าง ๆ ในทุกสัดส่วน molCr/kgOPC กับเกณฑ์มาตรฐานตามวิธีมาตรฐาน ASTM C191 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เฟส มีค่าสูงกว่า 45 นาที



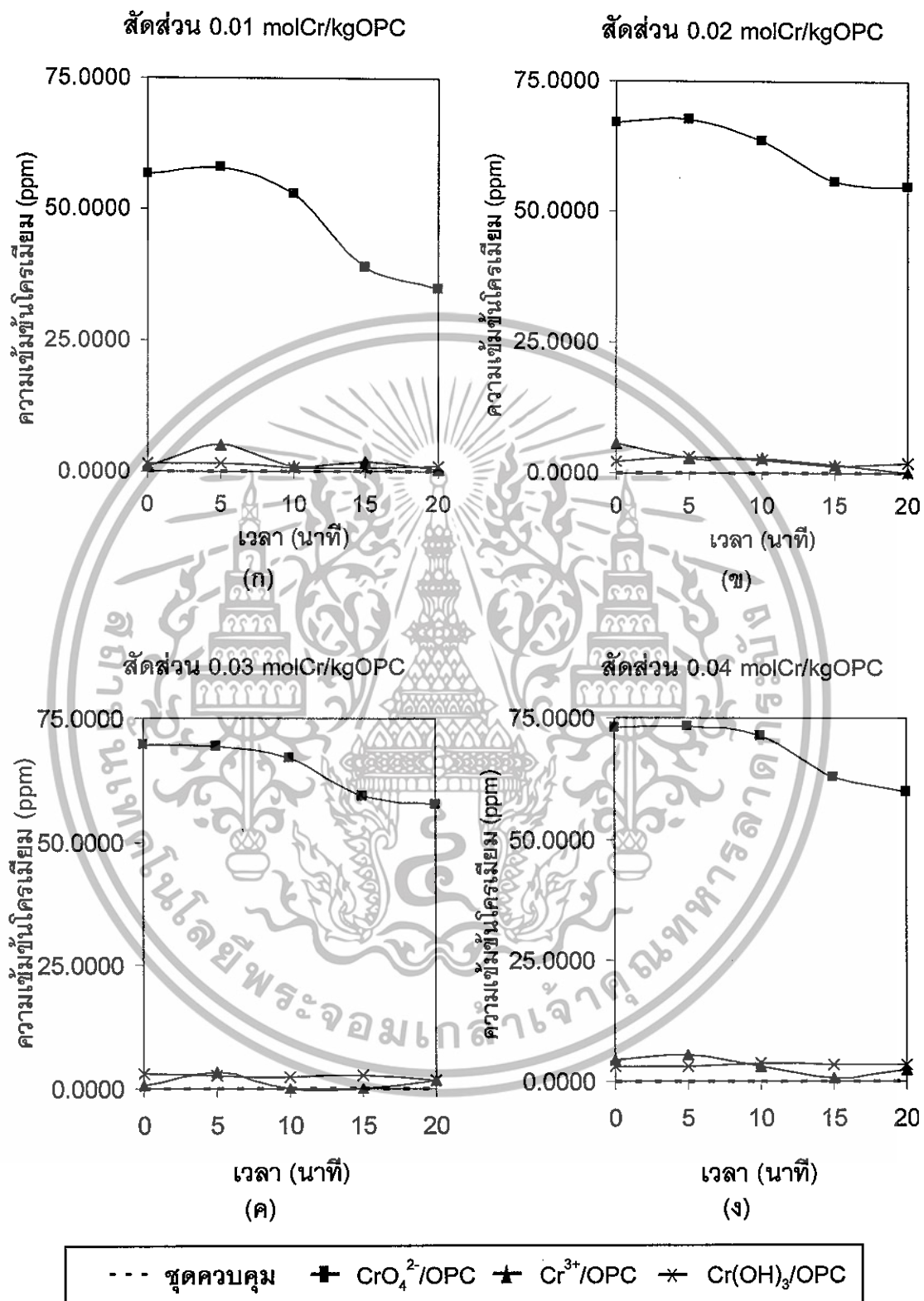
รูปที่ 4.1 ผลของสัดส่วน molCr/kgOPC กับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์

#### 4.1.2 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

จากการทดลองหาความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ที่สัดส่วน molCr/kgOPC เป็น 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โดยทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20 นาที (เป็นเวลาที่น่าหลังจากการกวนผสมเสร็จ) ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic absorption spectroscopy ; AAS) แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

| รูปของโครเมียมในซีเมนต์เพสต์                     | สัดส่วน molCr/kgOPC | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm) |         |         |         |         |
|--|---------------------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|  |                     | ระยะเวลาก่อตัว (นาท)         |         |         |         |         |
|  |                     | 0                            | 5       | 10      | 15      | 20      |
| ชุดควบคุม [OPC]                                  | -                   | 0.0000                       | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  |
| โครเมต<br>[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /OPC]  | 0.01                | 56.7505                      | 57.8758 | 52.6950 | 38.9455 | 34.9608 |
|  | 0.02                | 67.1187                      | 67.7026 | 63.5806 | 55.7386 | 54.7756 |
|  | 0.03                | 69.7342                      | 69.3638 | 67.0730 | 59.2190 | 57.6068 |
|  | 0.04                | 72.9368                      | 73.2386 | 71.3017 | 62.7625 | 59.6808 |
| โครเมียม (III)<br>[Cr <sup>3+</sup> /OPC]        | 0.01                | 1.0828                       | 4.9368  | 0.8508  | 1.7723  | 0.4717  |
|  | 0.02                | 5.5817                       | 2.8377  | 2.9314  | 1.4477  | 0.0643  |
|  | 0.03                | 0.6765                       | 3.4532  | 0.0577  | 0.0000  | 1.8115  |
|  | 0.04                | 4.4259                       | 5.4706  | 3.1601  | 0.8017  | 2.4695  |
| โครเมียมไฮดรอกไซด์<br>[Cr(OH) <sub>3</sub> /OPC] | 0.01                | 1.4346                       | 1.6166  | 0.4804  | 0.6264  | 1.0621  |
|  | 0.02                | 2.2800                       | 3.0349  | 2.4292  | 1.2462  | 1.7702  |
|  | 0.03                | 3.1111                       | 2.5871  | 2.3638  | 2.7277  | 1.5142  |
|  | 0.04                | 3.0120                       | 2.9510  | 3.8181  | 3.3301  | 3.4532  |



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่สัดส่วน molCr/kgOPC ต่าง ๆ

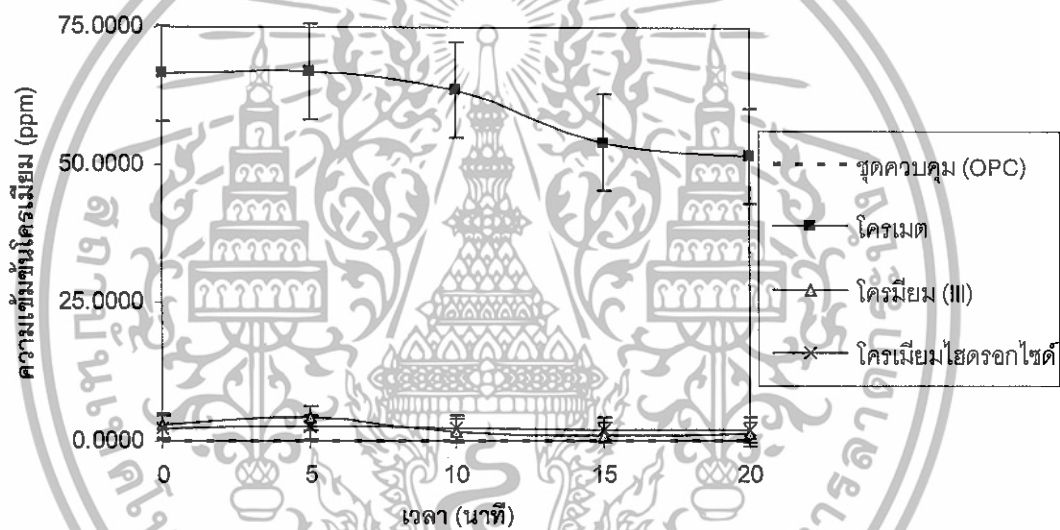
จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อระยะเวลาการก่อดัวเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมตจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากในระหว่างการก่อดัวโครเมตจะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์ได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มสัดส่วน molCr[CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/kgOPC จะทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อดัวของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเกลือ CaCrO<sub>4</sub> มีค่า K<sub>sp</sub> สูง เท่ากับ 5.1 × 10<sup>-6</sup> จึงทำให้โครเมตสามารถละลายออกมาได้มาก

จากรูปที่ 4.2 (ก - ง) พบว่าแนวโน้มความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียม(III) [Cr<sup>3+</sup>] ที่ทุกสัดส่วนอยู่ในช่วง 0 - 5.5817 พีพีเอ็ม เนื่องจากเมื่อผสมน้ำกับปูนซีเมนต์จะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ทันที ทำให้สารละลายมีสภาพเป็นเบส โดยโครเมียม(III)อิสระ [Cr<sup>3+</sup>] จะไปจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยที่มีความหนาแน่นมากจมตัวอยู่ที่ส่วนล่างของสารละลาย ส่วนโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ [Cr(OH)<sub>3</sub>] ที่ทุกสัดส่วนมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 - 3.8181 พีพีเอ็ม โดยแต่ละสัดส่วนไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากโครเมียมไฮดรอกไซด์ [Cr(OH)<sub>3</sub>] มีลักษณะเป็นตะกอนจึงถูกยึดจับได้ดีในซีเมนต์แม้จะมีสัดส่วนต่างกัน

**ตารางที่ 4.3** ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อดัวของซีเมนต์เพสต์เฉลี่ย ที่สัดส่วน 0.01-0.04 molCr/kgOPC

| ระยะเวลาการก่อดัว (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm) |      |                                     |       |                       |      |                          |      |
|--------------------------|------------------------------|------|-------------------------------------|-------|-----------------------|------|--------------------------|------|
|                          | ชุดควบคุม (OPC)              |      | CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /OPC |       | Cr <sup>3+</sup> /OPC |      | Cr(OH) <sub>3</sub> /OPC |      |
|                          | เฉลี่ย                       | SD   | เฉลี่ย                              | SD    | เฉลี่ย                | SD   | เฉลี่ย                   | SD   |
| 0                        | 0.0000                       | 0.00 | 66.6351                             | 7.01  | 2.9417                | 2.43 | 2.4594                   | 0.78 |
| 5                        | 0.0000                       | 0.00 | 67.0452                             | 6.54  | 4.1746                | 1.23 | 2.5474                   | 0.65 |
| 10                       | 0.0000                       | 0.00 | 63.6626                             | 7.96  | 1.7500                | 1.53 | 2.2729                   | 1.37 |
| 15                       | 0.0000                       | 0.00 | 54.1664                             | 10.54 | 1.0054                | 0.78 | 1.9826                   | 1.26 |
| 20                       | 0.0000                       | 0.00 | 51.7560                             | 11.38 | 1.2043                | 1.13 | 1.9499                   | 1.04 |

จากตารางที่ 4.3 เมื่อนำค่าความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์ ที่ทุกสัดส่วน molCr/kgOPC มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้เปรียบเทียบโครเมียมในแต่ละรูป พบว่า โครเมียมในรูปโครเมต มีความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์สูงที่สุด คือ อยู่ในช่วง 51.7560 – 67.0452 พีพีเอ็ม และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวให้มากขึ้น ส่วนโครเมียมในรูปโครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  และโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  จะมีความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์ต่ำ และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 1.0054 – 4.1746 พีพีเอ็ม และ 1.9499 – 2.5474 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3



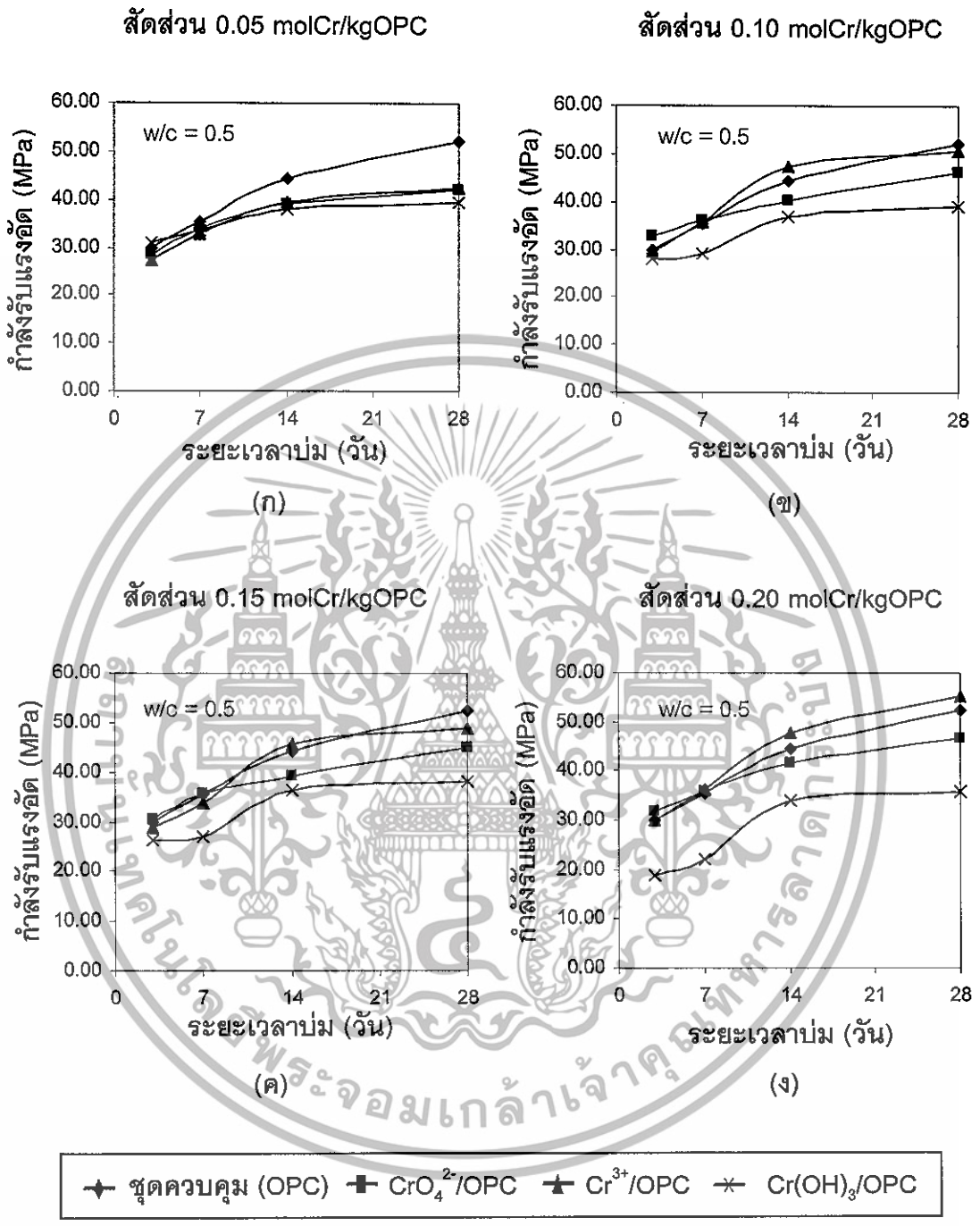
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เฟสท์เฉลี่ย ที่สัดส่วน 0.01-0.04 molCr/kgOPC

#### 4.2 ผลของระยะเวลาป้อนต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

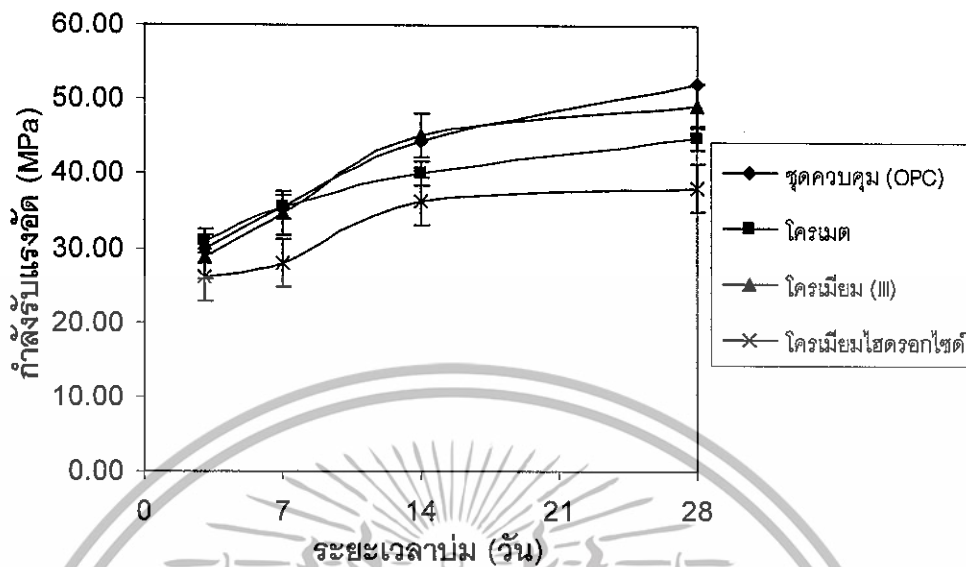
จากการทดลองศึกษาผลของระยะเวลาป้อนต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีรูปโครเมียมต่าง ๆ ซึ่งรูปโครเมียมที่ศึกษา ได้แก่ โครเมต  $[CrO_4^{2-}]$ , โครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  และตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  โดยแปรค่าสัดส่วน molCr/kgOPC เป็น 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 จากนั้นนำมอร์ตาร์ซีเมนต์มาทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดงผลดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของระยะเวลาบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของโครเมียมรูปต่าง ๆ

| รูปของโครเมียมใน<br>มอร์ตาร์ซีเมนต์              | สัดส่วน<br>molCr/kgOPC | กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (MPa) |       |       |       |
|--|------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|
|  |                        | ระยะเวลาบ่ม (วัน)          |       |       |       |
|  |                        | 3                          | 7     | 14    | 21    |
| ชุดควบคุม (OPC)                                  | -                      | 29.83                      | 35.55 | 44.35 | 52.32 |
| โครเมต<br>[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /OPC]  | 0.05                   | 28.14                      | 33.81 | 39.34 | 41.97 |
|  | 0.10                   | 32.72                      | 36.23 | 40.40 | 46.34 |
|  | 0.15                   | 30.66                      | 35.70 | 39.11 | 44.94 |
|  | 0.20                   | 31.78                      | 35.88 | 41.73 | 46.74 |
| โครเมียม (III)<br>[Cr <sup>3+</sup> /OPC]        | 0.05                   | 27.33                      | 32.64 | 39.56 | 42.60 |
|  | 0.10                   | 29.57                      | 35.68 | 47.42 | 50.50 |
|  | 0.15                   | 28.63                      | 33.81 | 45.72 | 48.95 |
|  | 0.20                   | 29.87                      | 36.25 | 47.83 | 55.25 |
| โครเมียมไฮดรอกไซด์<br>[Cr(OH) <sub>3</sub> /OPC] | 0.05                   | 30.81                      | 32.52 | 38.10 | 39.40 |
|  | 0.10                   | 27.86                      | 28.94 | 36.73 | 39.04 |
|  | 0.15                   | 26.28                      | 27.12 | 36.23 | 38.00 |
|  | 0.20                   | 18.95                      | 22.21 | 34.15 | 35.95 |
| เกณฑ์มาตรฐาน                                     |                        | 12.0                       | 19.0  | -     | 28.00 |



รูปที่ 4.4 ระยะเวลาบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่ใส่ส่วนผสม molCr/kg OPC ต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ระยะเวลาป่มต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฉลี่ยที่สัดส่วน 0.05-0.20 molCr/kgOPC

จากรูปที่ 4.4 (ก - ง) เมื่อเปรียบเทียบรูปโครเมียมกับชุดควบคุม พบว่าซีเมนต์ที่มีโครเมียมที่สัดส่วน 0.05 molCr/kgOPC มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าชุดควบคุมทั้งสามรูป ส่วนที่สัดส่วนมากขึ้น คือ 0.10 – 0.20 molCr/kgOPC การพัฒนากำลังรับแรงอัดของโครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  และโครเมต  $[CrO_4^{2-}]$  ใกล้เคียงกับชุดควบคุม ส่วนตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  จะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าโครเมียมรูปอื่น ๆ และชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยการพัฒนากำลังรับแรงอัดของโครเมียมทุกรูปและชุดควบคุมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาป่ม 7 – 14 วัน และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ระยะเวลาป่ม 14 – 28 วัน

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์เฉลี่ยที่สัดส่วน 0.05 – 0.20 molCr/kgOPC พบว่าโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากตะกอนไฮดรอกไซด์จะลดสัดส่วนปูนซีเมนต์ลง ทำให้ความแข็งแรงในการยึดประสานของซีเมนต์ลดลง ส่วนในรูปสารละลายจะเห็นได้ว่า โครเมตมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าโครเมียม(III) เนื่องจากโครเมียม(III) อาจเข้าไปในโครงสร้างผลึกของไตรแคลเซียมออกซิมิเนต ( $C_3A$ ) ส่วนโครเมตอาจเกิดปฏิกิริยาร่วมกับ  $Ca^{2+}$  เป็น  $CaCrO_4$  ส่งผลให้เหลือปริมาณ  $Ca^{2+}$  ที่จะไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่าง ๆ เพื่อเป็นองค์ประกอบของซีเมนต์ลดลง

#### 4.3 ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

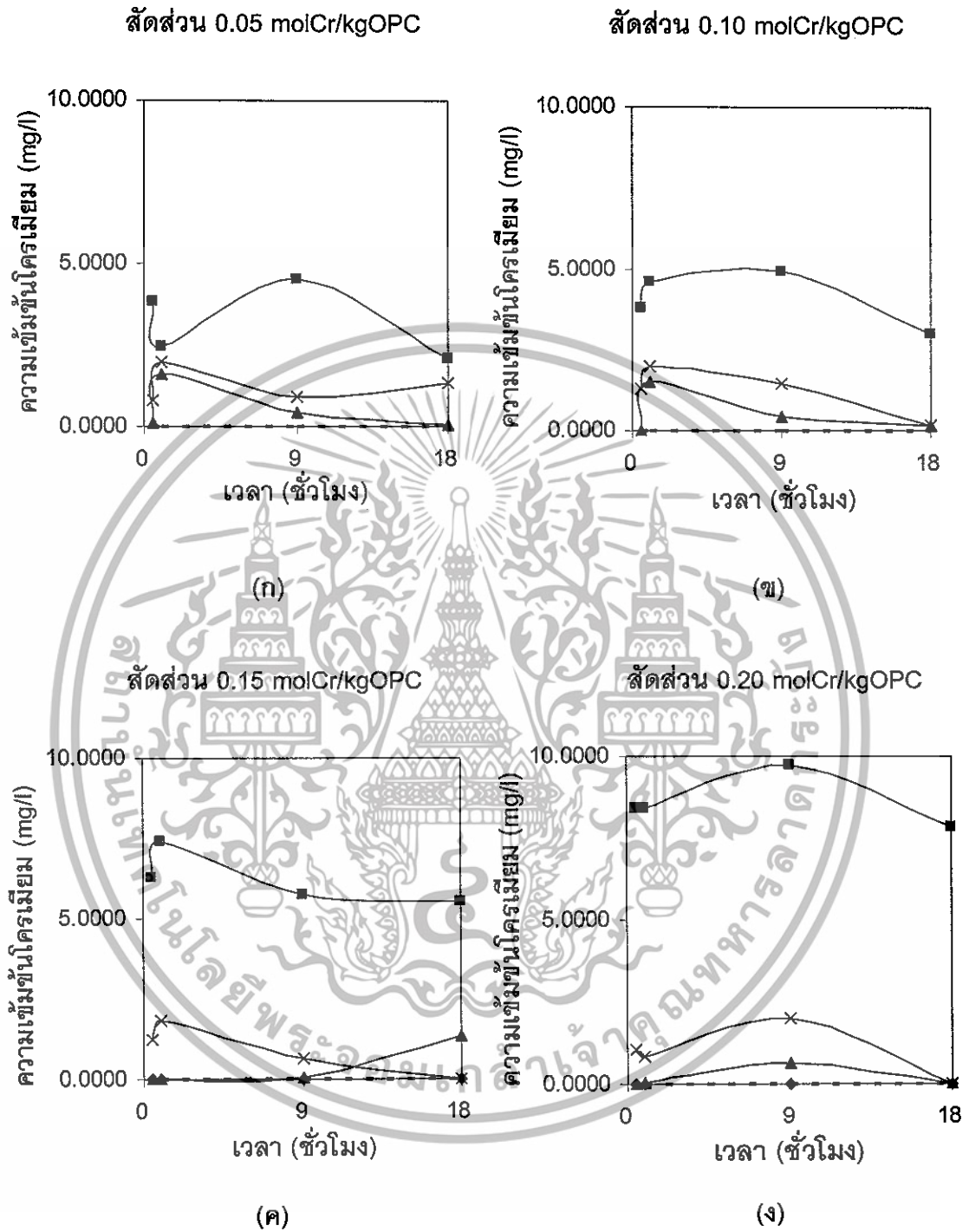
จากการศึกษาการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปของโครเมต [ $\text{CrO}_4^{2-}$ ], โครเมียม(III) [ $\text{Cr}^{3+}$ ] และรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ [ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ] ในก้อนซีเมนต์ ทำการชะละลายตามวิธีมาตรฐาน TCLP test (US.EPA. Method 1311) โดยนำก้อนซีเมนต์ที่มีสัดส่วน molCr/kgOPC เป็น 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 ที่ระยะเวลาปรม 3 วัน มาชะละลายเป็นระยะเวลา 0.5, 1, 9 และ 18 ชั่วโมง นำสารละลายที่ผ่านการชะละลายไปหาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic absorption spectroscopy ; AAS) แสดงผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์ของโครเมียมรูปต่าง ๆ

| รูปโครเมียม                               | สัดส่วน<br>molCr/kgOPC | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/l) |        |        |        |
|---|------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|   |                        | เวลาการชะละลาย (ชั่วโมง)      |        |        |        |
|   |                        | 0.5                           | 1      | 9      | 18     |
| ชุดควบคุม (OPC)                           | -                      | 0.0000                        | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| โครเมต<br>[ $\text{CrO}_4^{2-}$ /OPC]     | 0.05                   | 3.8072                        | 2.4564 | 4.5033 | 2.0686 |
|   | 0.10                   | 3.8105                        | 4.6089 | 4.9444 | 3.0142 |
|   | 0.15                   | 6.3105                        | 7.4216 | 5.7386 | 5.5392 |
|   | 0.20                   | 8.4281                        | 8.4390 | 9.7200 | 7.8181 |
| โครเมียม(III)<br>[ $\text{Cr}^{3+}$ /OPC] | 0.05                   | 0.1144                        | 1.5784 | 0.4041 | 0.0283 |
|   | 0.10                   | 0.0000                        | 1.5044 | 0.4052 | 0.1351 |
|   | 0.15                   | 0.0000                        | 0.0000 | 0.0566 | 1.3682 |
|   | 0.20                   | 0.0000                        | 0.0675 | 0.6318 | 0.0000 |

| รูปโครเมียม                                      | สัดส่วน<br>molCr/kgOPC | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/l) |        |        |        |
|--|------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|
|  |                        | เวลาการชะละลาย (ชั่วโมง)      |        |        |        |
|  |                        | 0.5                           | 1      | 9      | 18     |
| โครเมียมไฮดรอกไซด์<br>[Cr(OH) <sub>3</sub> /OPC] | 0.05                   | 0.7832                        | 1.9455 | 0.8943 | 1.3235 |
|  | 0.10                   | 1.2658                        | 1.9662 | 1.4281 | 0.1514 |
|  | 0.15                   | 1.2255                        | 1.8159 | 0.6634 | 0.0000 |
|  | 0.20                   | 1.0566                        | 0.8170 | 2.0098 | 0.0000 |
| เกณฑ์มาตรฐาน                                     |                        | -                             | -      | -      | 5.0    |





--- ชุดควบคุม     $\blacksquare$   $\text{CrO}_4^{2-}/\text{OPC}$      $\blacktriangle$   $\text{Cr}^{3+}/\text{OPC}$      $\times$   $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{OPC}$

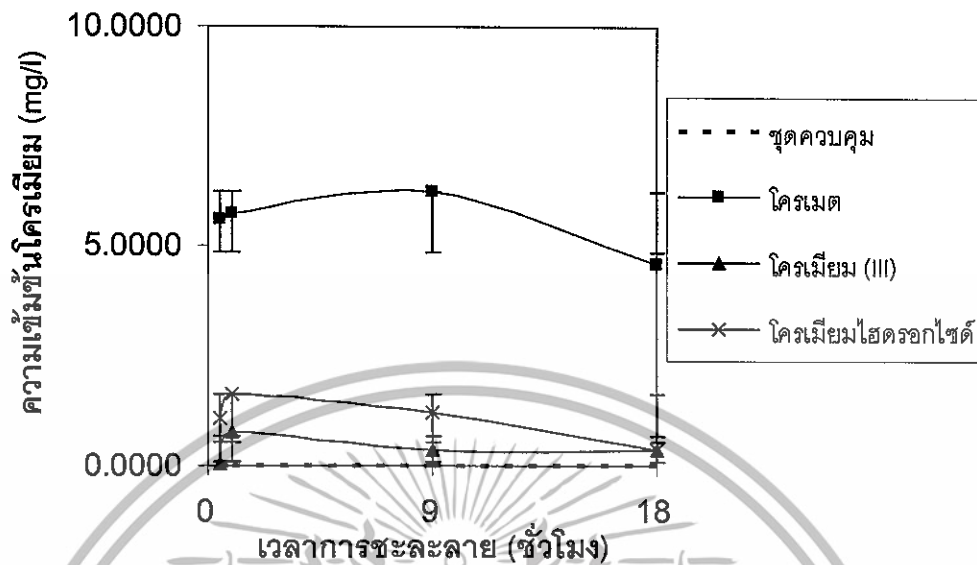
รูปที่ 4.6 ระยะเวลาในการชะละลายกับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะ  
ที่สัดส่วน  $\text{molCr/kgOPC}$  ต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมถูกชะละลายออกมามากขึ้นเมื่อสัดส่วน molCr/kgOPC เพิ่มขึ้น โดยโครเมียมในรูปโครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  ถูกชะละลายน้อยที่สุดอยู่ในช่วง 0 – 1.5784 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนโครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  อยู่ในช่วง 0 – 2.0098 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมต  $[CrO_4^{2-}]$  ถูกชะออกมามากที่สุดอยู่ในช่วง 2.0686 – 9.7200 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับผลของเวลาในการชะละลายพบว่ามีความผันแปร เนื่องจากในขั้นตอนการทดลองหลังจากผ่านการชะละลายไม่สามารถกรองได้ทันที ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ในสารละลาย หรือการละลายกลับของตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์เฉลี่ยที่สัดส่วน 0.05-0.20 molCr/kgOPC

| เวลาการชะละลาย (ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/l) |      |                  |      |               |      |                |      |
|--------------------------|-------------------------------|------|------------------|------|---------------|------|----------------|------|
|                          | ชุดควบคุม (OPC)               |      | $CrO_4^{2-}/OPC$ |      | $Cr^{3+}/OPC$ |      | $Cr(OH)_3/OPC$ |      |
|                          | เฉลี่ย                        | SD   | เฉลี่ย           | SD   | เฉลี่ย        | SD   | เฉลี่ย         | SD   |
| 0.5                      | 0.0000                        | 0.00 | 5.5891           | 2.23 | 0.0286        | 0.06 | 1.0828         | 0.22 |
| 1                        | 0.0000                        | 0.00 | 5.7315           | 2.72 | 0.7876        | 0.87 | 1.6362         | 0.55 |
| 9                        | 0.0000                        | 0.00 | 6.2266           | 2.38 | 0.3744        | 0.24 | 1.2489         | 0.60 |
| 18                       | 0.0000                        | 0.00 | 4.6100           | 2.59 | 0.3829        | 0.66 | 0.3687         | 0.64 |



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาการชะละลายต่อความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์เฉลี่ย  
ที่สัดส่วน 0.05 - 0.20 molCr/kgOPC

จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.6 พบว่าระยะเวลาการชะละลายในช่วง 0.5 - 1 ชั่วโมงแรก มีค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฉลี่ยทุกสัดส่วน molCr/kgOPC จะออกมาในสารละลาย ปริมาณมาก เนื่องจากโครเมียมถูกจับไว้อย่างหลวม ๆ หลังจากนั้นระยะเวลาการชะละลายในช่วง 9 - 18 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโครเมียมที่ถูกชะออกมามีปริมาณลดลง โดยโครเมียมจะถูกชะละลายออกมามากที่สุด เมื่ออยู่ในรูปโครเมต  $[\text{CrO}_4^{2-}]$  เนื่องจากโครเมตไม่ได้เข้าไปเกิดปฏิกิริยาใน โครงสร้างผลึกเพียงแต่ถูกจับไว้อย่างหลวม ๆ เท่านั้น และโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์  $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$  จะถูกชะออกมาได้มากกว่ารูปของโครเมียม(III)  $[\text{Cr}^{3+}]$  เนื่องจากโครเมียม(III) อาจจะ เข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึกโดยที่ไอออนโครเมียม(III) เข้าไปแทนที่  $\text{Al}^{3+}$  ของไตรแคลเซียม- อลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ในปูนซีเมนต์ ส่วนตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์จะยึดกับโครเมียมเพียงแค่ โครงสร้างภายนอกเท่านั้น

#### 4.4 ผลของการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการด้วยปูนซีเมนต์

การศึกษามลของการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งของของเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาจากผลการทดลองข้อ 4.1-4.3 พบว่าโครเมียมในรูปโครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  และโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  เป็นรูปที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยโครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  เป็นรูปที่ดีที่สุด แต่เพื่อเป็นการลดปริมาณของของเสียจากห้องปฏิบัติการและปูนซีเมนต์ที่ใช้ ดังนั้น การศึกษานี้จึงเลือกวิธีการปรับเสถียรของเสียโครเมียมด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะในก้อนซีเมนต์ที่ระยะเวลาการชะละลาย 18 ชั่วโมง

##### 4.4.1 ลักษณะของเสีย

นำของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีทั้งโลหะหนักโครเมียมและตะกั่ว มาทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น นำมาผ่านการกรอง และนำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นโลหะหนักโครเมียมและตะกั่วทั้งหมด โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แสดงผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทั่วไปของของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

| ลักษณะทางกายภาพ |              | ค่าพีเอช | ความเข้มข้นของโลหะหนัก (ppm) |        |
|-----------------|--------------|----------|------------------------------|--------|
| สี              | กลิ่น        |          | โครเมียม                     | ตะกั่ว |
| สีเขียวอมดำ     | มีกลิ่นเหม็น | 1.16     | 1081                         | 253    |
| มีตะกอนนอนก้น   | เล็กน้อย     |          |                              |        |

##### 4.4.2 การบำบัดของเสีย

การบำบัดของเสียทำได้โดยนำของเสียจากห้องปฏิบัติการมาทำลายฤทธิ์ด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากปริมาณน้ำเสีย 5.4 ลิตร นำมาตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้ปริมาณตะกอนเท่ากับ 36.82 กรัม ดังตารางที่ 4.8

#### ตารางที่ 4.8 การบำบัดของเสียโดยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

| ปริมาณของเสีย<br>(ลิตร) | ปริมาณ NaOH ที่ใช้<br>(กรัม) | น้ำหนักตะกอนแห้ง<br>(กรัม) |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 5.4                     | 24                           | 36.82                      |

จากตารางที่ 4.8 พบว่าในการบำบัดของเสียจากห้องปฏิบัติการโดยการตกตะกอน ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.44 กรัมต่อปริมาณของเสีย 1 ลิตร และเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ของของเสีย 6.82 กรัมต่อปริมาณของเสีย 1 ลิตร

#### 4.4.3 การทำเป็นก้อนแข็งของตะกอนของเสีย

นำตะกอนของเสียมาผ่านกระบวนการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาป่ม 7 วัน จากนั้นนำก้อนซีเมนต์มาทดสอบกำลังรับแรงอัด และทดสอบการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะจากก้อนซีเมนต์ โดยการชะละลายตามเกณฑ์วิธีมาตรฐาน TCLP test (US.EPA. Method 1311) ทำการชะละลายเป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการชะละลายไปหาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมด้วยวิธีอะตอม – มิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Atomic absorption spectroscopy ; AAS) แสดงผลดังตารางที่ 4.9

#### ตารางที่ 4.9 ผลการทำเป็นก้อนแข็งของตะกอนของเสีย

| นน.ตะกอน<br>(กรัม) | นน.ปูนซีเมนต์<br>ที่ใช้ (กรัม) | สัดส่วน<br>นน.ตะกอน/kgOPC | ระยะ<br>เวลาป่ม<br>(วัน) | กำลังรับ<br>แรงอัด (MPa) | ความเข้มข้น<br>ของโครเมียม<br>ในน้ำชะ (mg/l) |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 36.00              | 90.0                           | 0.4                       | 7                        | 29.21                    | 0.7081                                       |

จากตารางที่ 4.9 พบว่าการปรับเสถียรในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ จากปริมาตรของเสีย 1 ลิตร จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 17.05 กรัมต่อน้ำหนักตะกอน 6.82 กรัม

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ของของเสีย มีค่าเท่ากับ 29.21 เมกะพาสคัล ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าชุดควบคุม ที่มีค่าเท่ากับ 35.55 เมกะพาสคัล แต่ถึงอย่างไรกำลังรับแรงของก้อนซีเมนต์ของเสียยังคงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C150 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน กำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่า 19.0 เมกะพาสคัล

ใน ส่วนปริมาณการชะละลายของโครเมียมมีค่าเท่ากับ 0.7081 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามวิธี TCLP test (US.EPA Method 1311) ที่ระยะเวลา 18 ชั่วโมง คือไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการศึกษารูปของโครเมียม ได้แก่ โครเมต  $[CrO_4^{2-}]$ , โครเมียม(III)  $[Cr^{3+}]$  และตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[Cr(OH)_3]$  โดยนำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมไปใช้พิจารณาการบำบัดของเสียจากห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ศึกษาผลของรูปโครเมียมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ พบว่าโครเมียมทุกรูปจะไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนานกว่าชุดควบคุม โดยโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ จะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นนานที่สุด รองลงมาคือ โครเมตและโครเมียม(III) ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์พลสต์ พบว่า โครเมียม (III) จะมีความเข้มข้นในสารละลายใกล้เคียงกับโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ ส่วนโครเมต จะมีความเข้มข้นในสารละลายมากที่สุด

2. ศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ พบว่า โครเมียมในรูปโครเมียม(III) มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับชุดควบคุมและมากกว่าโครเมียมอีก 2 รูป โดยโครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด

3. ศึกษาผลการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะ พบว่า โครเมียมในรูปโครเมียม (III) มีความเข้มข้นที่ถูกชะละลายออกมา น้อยที่สุด รองลงมาคือโครเมียมในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และโครเมต ตามลำดับ

4. จากผลการศึกษาพบว่าโครเมียมในรูปโครเมียม(III) และโครเมียมไฮดรอกไซด์ เป็นรูปที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ แต่โครเมียม(III) ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายจะต้องใช้ปูนซีเมนต์มาก และ เป็นการเพิ่มปริมาตรของของเสีย

5. วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการปรับเสถียรของเสียโครเมียมจากห้องปฏิบัติการ คือ วิธีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนตะกอนของเสียต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 29.21 เมกะพาสคัล และมีปริมาณการชะละลายของโครเมียมเท่ากับ 0.7081 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาโลหะหนักโครเมียมในรูปไดโครเมต  $[\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}]$  เพิ่มเติม เพื่อศึกษารูปต่าง ๆ ของโครเมียมได้อย่างครบถ้วน
2. ควรทำการทดลองการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะของซีเมนต์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพิ่มเติม
3. ควรศึกษาวิธีการชะละลายตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เป็นต้น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลอง
4. ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับโลหะหนัก เช่น อุณหภูมิ, ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น
5. ควรทำการศึกษาถึงปริมาณสูงสุดในการนำของเสียมากำจัดโดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ที่ยังสามารถรับกำลังรับแรงอัด และมีการปลดปล่อยโครเมียมในน้ำชะได้ตามมาตรฐาน เพื่อการนำไปใช้ในการลดปริมาณของของเสีย และการนำไปฝังกลบให้เกิดประโยชน์สูงสุด
6. ควรทำการศึกษาของเสียโลหะหนักโครเมียมจากแหล่งอื่น ๆ เพื่อให้เปรียบเทียบกับผลในการนำสภาวะของการทดลองที่ได้มาอธิบายและศึกษาในสภาวะจริงเพิ่มมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- กุสุมา เอกสารโຈณั, พัฒนธิดา ทองขาว และ สิรินุช วรชัชวรินทร์. 2545. **การตกตะกอน  
ปรอทซัลไฟด์จากน้ำเสียสังเคราะห์และสมบัติของก้อนซีเมนต์ที่มีปรอทซัลไฟด์  
เจือปน.** ปรินญาณิพนธวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทพร สุนทรเลิศวนิช, สายสุนีย์ จำรัส และสิรินันท์ กันศิริ. 2546. **การกำจัดโครเมียมและ  
ตะกั่วจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยวิธีตกชั้น-พรีซิพิเตชัน และกระบวนการ  
เฟอไรไรท์.** ปรินญาณิพนธวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชมพูนุท ไชยรักษ์. 2548. **การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง.** เอกสารประกอบ  
การเรียน วิชา การกำจัดมูลฝอยและของเสียอันตราย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิธิพร อารีย์กุล และ อีร์พัฒน์ ทิพย์รัตน์. 2548. **ปฏิบัติการที่ 2 การหาระยะเวลาการก่อตัว  
ของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยเพิ่มไวแคต.** สื่อการสอนอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน.
- บัญญัติ จันทร์สุวรรณ และ ไพบุลย์ มานพจนทโຈณั. 2546. **การศึกษาระดับปฏิกิริยา  
ไฮดรชั่นของซีเมนต์พิเศษโดยวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน.** ปรินญาณิพนธ  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปรินญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. **ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และ  
คอนกรีต.** กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.
- ยุพา ตันทวี. 2548. **การควบคุมมลพิษทางน้ำ.** กรุงเทพฯ : โครงการตำรา ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัชพร สิงขโรทัย, ลักษณา โຈณัพิบูลสถิต และ สมศักดิ์ ทองสัมฤทธิ์. 2543. **การศึกษาการ  
ทำลายฤทธิ์โลหะหนักโดยกระบวนการทำเป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์.** ปรินญาณิพนธ  
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2532. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ.** พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 4, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2539.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2518. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 9 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยให้เข็มแบบไวแคต,** กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2518.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2532. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก.** พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2540.

สมิง เก่าเจริญ, วินัย วนานุกูล และ จินตนา ศิริวรราชย์. 2541. **การศึกษาระดับแคดเมียม และโครเมียมในเลือดและปัสสาวะของกลุ่มคนสุขภาพแข็งแรงที่ไม่ได้ทำงาน สัมผัสกับโลหะหนัก.** กองเงินทุนทดแทน สำนักงานประกันสังคม กระทรวงแรงงาน และสวัสดิการสังคม.

American Society for testing and Materials.2000, ASTM C 109/C 109M - 99: **Stand Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement Motars(Using 2-in. or [50-mm] cube Specimens).** Annual Book of ASTM Standards. Section 4. Vol.04.01. page 84-89.

American Society for Testing and Materials.2000, ASTM C 191 - 99: **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,** Annual Book of ASTM Standards, Section 4. Vol.04.01, page 179-181.

Brett Cohen and Jame G. Petrie, 2005. **The application of batch extraction tests for the characterization of solidified ferro alloy waste products.** p.222-224.

Chong Yoon Rha , Seong Keun Kang and Chang Eun Kim. 2000. **Investigation of the stability of hardened slag pastefor the stabilizationrsolidification of wastes containing heavy metal ions.**p.255-267.

Choon-Keun Park, 2000. **Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials.**p.429-435.

F.P. Glasser, 1997. **Fundamental aspects of cement solidification and stabilization.** p.151-170.

Rajan K. VempatL. M. Yousuf A. Mollah, Anil K. Chinthala and David L. Cocke. 1995.

**Solidification/Stabilization of toxic metal wastes using coke and coal combustion by-products.**p.433-440.

Shively,W.,Bishop,P.D. and Brown,T.1986. **Leaching Tests of Heavy Metals Stabilized with Portland Cement Journal WPCE 58.**p.234-241.

S.Wang and C.Vipulanandan, 2000. **Solidification/stabilization of Cr(VI) with cement Leachability and XRD analyses.**p.385-389.

U.S. Environment Protection Agency.1992, TCLP test Method 1311: **Toxicity**

**Characteristic Leaching Procedures.** Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods (SW-846). p. 33.





## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์ทางเคมี

#### 1. การวิเคราะห์น้ำเสียตัวอย่าง

##### สารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น
2. สติ๊กตะกั่ว
3. สติ๊กโครเมียม

##### อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 150 มล.
2. ขวดวัดปริมาตรพลาสติก ขนาด 100 มล.
3. กระจกตวง ขนาด 100 มล.
4. กระจกนาฬิกา
5. Hot plate
6. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ ประเทศออสเตรเลีย

##### วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงน้ำเสียด้วยกระจกตวง ขนาด 100 มล. มาปริมาณ 100 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มล. และเติมกรดไนตริกปริมาณ 5 มล.
2. นำไปให้ความร้อนโดยใช้ hot plate จนปริมาตรทั้งหมดลดลงเหลือ 40 มล.
3. เติมกรดไนตริกอีก 5 มล. และปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา นำไปให้ความร้อนต่อจนได้สารละลายใสไม่มีสี (ถ้าสารละลายยังไม่ใสให้เติมกรดไนตริกลงไปอีกจนกว่าสารละลายใส)
4. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปกรองใส่ขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มล. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง
5. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 357 นาโนเมตร

## 2. การทดสอบโครเมียมในน้ำเสียด้วยโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) และน้ำแป้ง

### สารเคมี

1. กรดไนตริกเข้มข้น
2. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์
3. น้ำแป้ง

### อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์ ขนาด 250 มล.
2. กระจกนาฬิกา
3. หลอดหยดสาร

### วิธีการวิเคราะห์

1. ทดสอบน้ำเสียตัวอย่างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์และน้ำแป้ง โดยหยดสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่มีความเข้มข้น 100 mg/L ลงไป 2-3 หยด และเติมน้ำแป้งลงไปอีก 1 หยด สังเกตสีของสารละลายและบันทึกผล
2. ในการทดสอบน้ำเสียตัวอย่างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และน้ำแป้ง ถ้าสารละลายมีโครเมียม(VI) จะออกซิไดซ์ไอโอไดด์ให้เป็นไอโอดีน และเมื่อเติมน้ำแป้งลงไปแล้วถ้าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินแสดงว่ายังมีโครเมียม(VI) เหลืออยู่

## 3. การรีดิวซ์โครเมียม(VI) ให้เป็นโครเมียม(III)

### สารเคมี

1. โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์

### อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์ ขนาด 250 มล.
2. กระจกนาฬิกา
3. แท่งแก้วคนสาร
4. ช้อนตักสาร

### วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำเสียตัวอย่างใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 250 มล. เติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ประมาณปลายช้อนตักสารเล็ก (0.03 กรัม) คนสารละลายให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว จนได้สารละลายสีฟ้าใส
2. ถ้าสารละลายยังไม่เป็นสีฟ้าใสให้เติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ลงไปอีก

#### 4. การตกตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์

##### สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N
2. โครเมียมไนเตรต

##### อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1000 มล.
2. แท่งแก้วคนสาร
3. ช้อนตักสาร
4. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. ตู้อบ ความคุมอุณหภูมิได้ที่  $103 - 105^{\circ}\text{C}$

##### วิธีการทำ

1. นำโครเมียมไนเตรตใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มล. และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปรับพีเอชเป็น 9 ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชม.
2. นำสารที่ได้ไปกรองแบบสุญญากาศ ด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร และเก็บตะกอนที่ได้ นำไปอบที่อุณหภูมิ  $105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม.
3. นำตะกอนที่ผ่านการอบแล้วมาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักของตะกอนที่ได้

#### 5. การตกตะกอนน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

##### สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์

##### อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1000 มล.
2. แท่งแก้วคนสาร
3. ช้อนตักสาร
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. ตู้อบ ความคุมอุณหภูมิได้ที่  $103 - 105^{\circ}\text{C}$
6. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ ประเทศออสเตรเลีย

### วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำเสียปริมาณ 5.4 ลิตร มาเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ประมาณปลายช้อนตักสารเล็ก (0.03 กรัม) คนสารละลายให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว จนได้สารละลายสีฟ้าใส
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปรับพีเอชเป็น 9 ตั้งทิ้งไว้ 1 ชม. และทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชม.
3. นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ส่วนตะกอนนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชม. แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนัก

### 6. การสร้างกราฟมาตรฐานโครเมียม

#### สารเคมี

1. สติ๊กโครเมียม

#### อุปกรณ์

1. บีเปต ขนาด 5, 10 มล.
2. บีกเกอร์ ขนาด 150, 250 มล.
2. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 25, 100 มล.
3. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ยี่ห้อ GBC AvantaΣ ประเทศออสเตรเลีย

#### วิธีการวิเคราะห์

1. บีเปตสติ๊กโครเมียมเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม มา 10 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายโครเมียมเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม
2. บีเปตสารละลายโครเมียมจากข้อ 1. มา 10 มล. ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายโครเมียมเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม
3. บีเปตสารละลายโครเมียมจากข้อ 2. มา 0, 5, 10, 15 และ 20 มล. ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มล. แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายโครเมียมเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 พีพีเอ็ม ตามลำดับ
4. นำสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เตรียมได้ มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 357 นาโนเมตร

**6. การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer)**

นำสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เตรียมได้ และสารตัวอย่างทั้งหมดที่ผ่านการกรองและย่อยเพื่อทำลายสารอินทรีย์ มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 357 นาโนเมตร



## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลผลการทดลอง

#### 1. ผลการหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เข็มไวแคต

ตารางที่ ข.1 ผลการหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เข็มไวแคต

| รูปของ<br>โครเมียม  | สัดส่วน<br>molCr/kgOPC | ระยะเวลาการก่อตัวต้น (นาที) |            |            |        |      |
|---------------------|------------------------|-----------------------------|------------|------------|--------|------|
|                     |                        | ครั้งที่ 1                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย | SD   |
| ชุดควบคุม           | -                      | 184                         | 182        | 185        | 184    | 1.53 |
| $\text{CrO}_4^{2-}$ | 0.01                   | 180                         | 178        | 179        | 179    | 1.00 |
|                     | 0.02                   | 180                         | 180        | 180        | 180    | 0.00 |
|                     | 0.03                   | 195                         | 195        | 193        | 194    | 1.15 |
|                     | 0.04                   | 198                         | 198        | 200        | 199    | 1.15 |
| $\text{Cr}^{3+}$    | 0.01                   | 196                         | 196        | 196        | 196    | 0.00 |
|                     | 0.02                   | 200                         | 203        | 198        | 200    | 2.52 |
|                     | 0.03                   | 211                         | 215        | 216        | 214    | 2.65 |
|                     | 0.04                   | 215                         | 215        | 216        | 215    | 0.58 |
| $\text{Cr(OH)}_3$   | 0.01                   | 229                         | 225        | 230        | 228    | 2.65 |
|                     | 0.02                   | 237                         | 238        | 237        | 237    | 0.58 |
|                     | 0.03                   | 255                         | 255        | 257        | 256    | 1.15 |
|                     | 0.04                   | 262                         | 262        | 262        | 262    | 0.00 |

## 2. ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายระหว่างการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

### 2.1 โครเมียมในรูปโครเมต $[CrO_4^{2-}]$

ตารางที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมตในสารละลายระหว่างการก่อตัว

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮเดรชันหลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)      |         |         |         |         |
|---|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|   | สัดส่วน $molCr[CrO_4^{2-}]/kgOPC$ |         |         |         |         |
|   | ชุดควบคุม                         | 0.01    | 0.02    | 0.03    | 0.04    |
| 0   | -0.1209                           | 56.8366 | 67.5882 | 69.5850 | 72.1340 |
|   | -1.2157                           | 56.0719 | 66.7451 | 69.8627 | 73.4477 |
|   | -1.8562                           | 57.3431 | 67.0229 | 69.7549 | 73.2288 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                            | 56.7505 | 67.1187 | 69.7342 | 72.9368 |
| SD  | 0.88                              | 0.64    | 0.43    | 0.14    | 0.70    |
| 5   | -0.2026                           | 58.5948 | 67.6438 | 69.5392 | 73.3856 |
|   | -0.8889                           | 58.3203 | 67.5294 | 67.9281 | 72.8333 |
|   | -1.7516                           | 56.7124 | 67.9346 | 70.6242 | 73.4967 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                            | 57.8758 | 67.7026 | 69.3638 | 73.2386 |
| SD  | 0.78                              | 1.02    | 0.21    | 1.36    | 0.36    |
| 10  | -0.2810                           | 52.5033 | 62.8039 | 67.1307 | 70.1242 |
|   | -0.5327                           | 53.0196 | 63.3072 | 67.0163 | 71.1307 |
|   | -0.5523                           | 52.5621 | 64.6307 | 67.0719 | 72.6503 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                            | 52.6950 | 63.5806 | 67.0730 | 71.3017 |
| SD  | 0.15                              | 0.28    | 0.94    | 0.06    | 1.27    |
| 15  | -0.9771                           | 38.9739 | 55.7810 | 58.7712 | 62.8529 |
|   | -0.7745                           | 38.9444 | 55.7059 | 59.5294 | 62.7908 |
|   | -0.8693                           | 38.9183 | 55.7288 | 59.3562 | 62.6438 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                            | 38.9455 | 55.7386 | 59.2190 | 62.7625 |
| SD  | 0.10                              | 0.03    | 0.04    | 0.40    | 0.11    |

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮดรชั่นหลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)                         |         |         |         |         |
|---|--|---------|---------|---------|---------|
|   | สัดส่วน molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC |         |         |         |         |
|   | ชุดควบคุม  | 0.01    | 0.02    | 0.03    | 0.04    |
| 20  | -1.1340  | 35.1732 | 54.5556 | 58.0719 | 59.8758 |
|   | -0.6209  | 35.0065 | 54.4510 | 57.1863 | 59.6307 |
|   | -0.7190  | 34.7026 | 55.3203 | 57.5621 | 59.5359 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000   | 34.9608 | 54.7756 | 57.6068 | 59.6808 |
| SD  | 0.27   | 0.24    | 0.47    | 0.44    | 0.18    |

## 2.2 โครเมียมในรูปโครเมียม(III) [Cr<sup>3+</sup>]

ตารางที่ ข.3 ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียม(III) ในสารละลายระหว่างการก่อตัว

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮดรชั่นหลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)           |        |        |        |        |
|---|--|--------|--------|--------|--------|
|   | สัดส่วน molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC |        |        |        |        |
|   | ชุดควบคุม                              | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.04   |
| 0   | -0.1209                                | 0.9444 | 5.5621 | 0.6765 | 4.7614 |
|   | -1.2157                                | 1.0915 | 5.5980 | 0.6895 | 4.4118 |
|   | -1.8562                                | 1.2124 | 5.5850 | 0.6634 | 4.1046 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                 | 1.0828 | 5.5817 | 0.6765 | 4.4259 |
| SD  | 0.88                                   | 0.13   | 0.02   | 0.01   | 0.33   |
| 5   | -0.2026                                | 4.8922 | 2.8333 | 3.7745 | 5.4575 |
|   | -0.8889                                | 4.9771 | 2.8693 | 3.4216 | 5.7418 |
|   | -1.7516                                | 4.9412 | 2.8105 | 3.1634 | 5.2124 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                 | 4.9368 | 2.8377 | 3.4532 | 5.4706 |
| SD  | 0.78                                   | 0.04   | 0.03   | 0.31   | 0.26   |

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮเดรชันหลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)            |        |        |         |        |
|---|---|--------|--------|---------|--------|
|   | สัดส่วน mol Cr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC |        |        |         |        |
|   | ชุดควบคุม                               | 0.01   | 0.02   | 0.03    | 0.04   |
| 10  | -0.2810                                 | 0.9641 | 2.7712 | 0.0523  | 3.2941 |
|   | -0.5327                                 | 0.7092 | 2.9902 | 0.0621  | 3.1634 |
|   | -0.5523                                 | 0.8791 | 3.0327 | 0.0588  | 3.0229 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                  | 0.8508 | 2.9314 | 0.0577  | 3.1601 |
| SD  | 0.15                                    | 0.13   | 0.14   | 0.00    | 0.14   |
| 15  | -0.9771                                 | 1.6536 | 1.4216 | -0.7778 | 0.8235 |
|   | -0.7745                                 | 1.7941 | 1.4477 | -0.5294 | 0.8007 |
|   | -0.8693                                 | 1.8693 | 1.4739 | -0.7680 | 0.7810 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                  | 1.7723 | 1.4477 | 0.0000  | 0.8017 |
| SD  | 0.10                                    | 0.11   | 0.03   | 0.14    | 0.02   |
| 20  | -1.1340                                 | 0.4542 | 0.0686 | 1.7941  | 2.4706 |
|   | -0.6209                                 | 0.4673 | 0.0654 | 1.8333  | 2.4967 |
|   | -0.7190                                 | 0.4935 | 0.0588 | 1.8072  | 2.4412 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                  | 0.4717 | 0.0643 | 1.8115  | 2.4695 |
| SD  | 0.27                                    | 0.02   | 0.00   | 0.02    | 0.03   |

## 2.3 โครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ [Cr(OH)<sub>3</sub>]

**ตารางที่ ข.4** ผลของความเข้มข้นของโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ในสารละลาย  
ระหว่างการก่อตัว

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮดรอกไซด์หลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)              |        |        |        |        |
|---|---|--------|--------|--------|--------|
|   | สัดส่วน molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC |        |        |        |        |
|   | ชุดควบคุม                                 | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.04   |
| 0   | -0.1209                                   | 1.7582 | 2.3039 | 3.1275 | 3.0719 |
|   | -1.2157                                   | 1.1863 | 2.2549 | 2.9542 | 2.9641 |
|   | -1.8562                                   | 1.3595 | 2.2810 | 3.2516 | 3.0000 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                    | 1.4346 | 2.2800 | 3.1111 | 3.0120 |
| SD  | 0.88                                      | 0.29   | 0.02   | 0.15   | 0.05   |
| 5   | -0.2026                                   | 1.6438 | 3.2810 | 2.8007 | 2.9542 |
|   | -0.8889                                   | 1.6176 | 2.8203 | 2.3464 | 3.0065 |
|   | -1.7516                                   | 1.5882 | 3.0033 | 2.6144 | 2.8922 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                    | 1.6166 | 3.0349 | 2.5871 | 2.9510 |
| SD  | 0.78                                      | 0.03   | 0.23   | 0.23   | 0.06   |
| 10  | -0.2810                                   | 0.4967 | 2.2876 | 2.3791 | 3.8562 |
|   | -0.5327                                   | 0.4804 | 2.4739 | 2.3497 | 3.8170 |
|   | -0.5523                                   | 0.4641 | 2.5261 | 2.3627 | 3.7810 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                    | 0.4804 | 2.4292 | 2.3638 | 3.8181 |
| SD  | 0.15                                      | 0.02   | 0.13   | 0.01   | 0.04   |
| 15  | -0.9771                                   | 0.6176 | 1.2288 | 2.7353 | 3.3105 |
|   | -0.7745                                   | 0.6340 | 1.3333 | 2.6601 | 3.3007 |
|   | -0.8693                                   | 0.6275 | 1.1765 | 2.7876 | 3.3791 |
| ค่าเฉลี่ย   | 0.0000                                    | 0.6264 | 1.2462 | 2.7277 | 3.3301 |
| SD  | 0.10                                      | 0.01   | 0.08   | 0.06   | 0.04   |

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา<br>ไฮดรเจนหลังกวนผสม (นาที) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)              |        |        |        |        |
|--|---|--------|--------|--------|--------|
|  | สัดส่วน molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC |        |        |        |        |
|  | ชุดควบคุม                                 | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.04   |
| 20   | -1.1340                                   | 1.0392 | 1.7876 | 1.5033 | 3.4575 |
|  | -0.6209                                   | 1.0915 | 1.7549 | 1.5098 | 3.4314 |
|  | -0.7190                                   | 1.0556 | 1.7680 | 1.5294 | 3.4706 |
| ค่าเฉลี่ย  | 0.0000                                    | 1.0621 | 1.7702 | 1.5142 | 3.4532 |

### 3. ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

#### 3.1 ชุดควบคุม

ตารางที่ ข.5 ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของชุดควบคุม

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.01           | 5.00         | 5.09         | 280.70            | 73.70                 | 29.42                    | 29.83         | 0.37 |
|                  | 5.05           | 5.06         | 5.04         | 278.18            | 76.40                 | 29.90                    |               |      |
|                  | 5.03           | 5.01         | 5.05         | 279.52            | 76.00                 | 30.16                    |               |      |
| 7                | 5.00           | 5.16         | 5.00         | 285.12            | 92.40                 | 35.81                    | 35.55         | 0.28 |
|                  | 5.09           | 5.07         | 5.00         | 282.12            | 91.00                 | 35.26                    |               |      |
|                  | 5.23           | 4.93         | 5.00         | 285.08            | 91.70                 | 35.56                    |               |      |
| 14               | 5.03           | 5.06         | 5.06         | 284.01            | 114.50                | 44.99                    | 44.35         | 2.71 |
|                  | 4.96           | 5.04         | 5.04         | 282.55            | 116.70                | 46.68                    |               |      |
|                  | 4.93           | 5.07         | 5.05         | 279.15            | 103.40                | 41.37                    |               |      |
| 28               | 5.05           | 5.05         | 5.04         | 289.57            | 134.60                | 52.78                    | 35.55         | 0.28 |
|                  | 5.02           | 5.05         | 5.02         | 287.90            | 132.30                | 52.19                    |               |      |
|                  | 5.06           | 5.04         | 5.03         | 287.08            | 132.60                | 52.00                    |               |      |

3.2 โครเมียมในรูปโครเมต  $[\text{CrO}_4^{2-}]$  ที่สัดส่วน 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20  
 $\text{molCr}[\text{CrO}_4^{2-}]/\text{kgOPC}$

ตารางที่ ข.6 ผลของระยะเวลาป่นต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมต  
 สัดส่วน 0.05  $\text{molCr}[\text{CrO}_4^{2-}]/\text{kgOPC}$

| อายุป่น<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.03           | 5.06         | 5.07         | 280.02            | 72.70                 | 28.56                    | 28.14         | 1.19 |
|                  | 5.05           | 5.12         | 5.06         | 282.39            | 69.30                 | 26.80                    |               |      |
|                  | 5.09           | 5.09         | 5.06         | 284.40            | 75.30                 | 29.06                    |               |      |
| 7                | 5.17           | 4.95         | 5.07         | 287.56            | 85.40                 | 33.37                    | 33.81         | 0.85 |
|                  | 4.92           | 5.02         | 5.18         | 283.40            | 85.90                 | 34.78                    |               |      |
|                  | 4.90           | 5.00         | 5.18         | 281.91            | 81.50                 | 33.27                    |               |      |
| 14               | 5.10           | 4.95         | 5.06         | 283.23            | 88.50                 | 35.06                    | 39.34         | 4.23 |
|                  | 5.10           | 4.94         | 5.18         | 293.84            | 99.40                 | 39.45                    |               |      |
|                  | 5.11           | 4.96         | 5.10         | 289.38            | 110.30                | 43.52                    |               |      |
| 28               | 5.15           | 5.00         | 4.95         | 287.85            | 105.20                | 40.85                    | 41.97         | 1.56 |
|                  | 5.00           | 5.08         | 5.18         | 287.67            | 104.90                | 41.30                    |               |      |
|                  | 5.04           | 5.16         | 5.16         | 283.30            | 113.80                | 43.76                    |               |      |

**ตารางที่ ข.7** ผลของระยะเวลาป่นต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปแบบโครเมต

สัดส่วน 0.10 molCr[CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/kgOPC

| อายุป่น<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่าเฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|------|
| 3                | 5.00           | 4.92         | 5.10         | 278.41            | 83.80                 | 34.07                    | 32.72     | 2.06 |
|                  | 4.91           | 5.12         | 5.01         | 278.53            | 76.30                 | 30.35                    |           |      |
|                  | 4.90           | 5.11         | 5.02         | 275.88            | 84.50                 | 33.75                    |           |      |
| 7                | 4.95           | 5.00         | 5.09         | 275.44            | 92.00                 | 37.17                    | 36.23     | 0.87 |
|                  | 4.95           | 5.00         | 5.15         | 276.77            | 89.20                 | 36.04                    |           |      |
|                  | 4.96           | 5.07         | 5.03         | 277.78            | 89.20                 | 35.47                    |           |      |
| 14               | 5.00           | 5.05         | 5.04         | 279.27            | 101.70                | 40.28                    | 40.40     | 0.17 |
|                  | 5.04           | 4.96         | 5.06         | 280.89            | 100.80                | 40.32                    |           |      |
|                  | 4.99           | 5.03         | 5.06         | 280.44            | 101.90                | 40.60                    |           |      |
| 28               | 4.94           | 5.00         | 5.20         | 286.81            | 113.40                | 45.91                    | 46.34     | 1.25 |
|                  | 4.97           | 5.04         | 5.10         | 281.76            | 119.60                | 47.75                    |           |      |
|                  | 4.98           | 5.11         | 5.04         | 281.51            | 115.40                | 45.35                    |           |      |

**ตารางที่ ข.8** ผลของระยะเวลาป่นต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปแบบโครเมต

สัดส่วน 0.15 molCr[CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/kgOPC

| อายุป่น<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่าเฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|------|
| 3                | 4.90           | 5.10         | 5.03         | 277.80            | 77.10                 | 30.85                    | 30.66     | 0.19 |
|                  | 4.90           | 5.04         | 5.14         | 274.60            | 75.70                 | 30.65                    |           |      |
|                  | 5.11           | 4.90         | 5.06         | 278.12            | 76.30                 | 30.47                    |           |      |

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่าเฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|------|
| 7                | 5.00           | 5.08         | 5.06         | 280.62            | 92.00                 | 36.22                    | 35.70     | 0.50 |
|                  | 4.98           | 5.01         | 5.12         | 280.49            | 89.00                 | 35.67                    |           |      |
|                  | 5.10           | 5.00         | 5.06         | 279.40            | 89.80                 | 35.22                    |           |      |
| 14               | 5.06           | 5.00         | 5.03         | 284.56            | 105.30                | 41.62                    | 39.11     | 2.18 |
|                  | 5.03           | 5.04         | 5.05         | 283.60            | 96.40                 | 38.03                    |           |      |
|                  | 5.00           | 5.04         | 5.04         | 279.96            | 95.00                 | 37.70                    |           |      |
| 28               | 4.91           | 5.10         | 5.03         | 283.20            | 111.70                | 44.61                    | 44.94     | 0.51 |
|                  | 4.97           | 5.06         | 5.05         | 283.85            | 114.50                | 45.53                    |           |      |
|                  | 4.92           | 5.04         | 5.05         | 285.14            | 110.80                | 44.68                    |           |      |

ตารางที่ ๗.9 ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปแบบโครเมต  
สัดส่วน 0.20 molCr[CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>]/kgOPC

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่าเฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|------|
| 3                | 4.92           | 5.07         | 5.01         | 276.84            | 78.80                 | 31.59                    | 31.78     | 0.66 |
|                  | 4.98           | 5.02         | 5.10         | 274.11            | 78.10                 | 31.24                    |           |      |
|                  | 5.12           | 4.98         | 5.07         | 278.56            | 82.90                 | 32.51                    |           |      |
| 7                | 4.96           | 5.05         | 5.05         | 280.37            | 88.80                 | 35.45                    | 35.88     | 1.17 |
|                  | 5.02           | 5.05         | 5.06         | 278.61            | 88.70                 | 34.99                    |           |      |
|                  | 4.91           | 5.03         | 5.05         | 275.27            | 91.90                 | 37.21                    |           |      |
| 14               | 5.00           | 5.02         | 5.04         | 282.32            | 103.60                | 41.27                    | 41.73     | 1.77 |
|                  | 5.00           | 5.06         | 5.04         | 282.76            | 101.80                | 40.24                    |           |      |
|                  | 5.04           | 5.05         | 5.07         | 284.63            | 111.20                | 43.69                    |           |      |

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 28               | 4.98           | 5.01         | 5.08         | 282.49            | 119.70                | 47.98                    | 46.74         | 1.08 |
|                  | 5.02           | 5.03         | 5.05         | 281.92            | 116.80                | 46.26                    |               |      |
|                  | 5.01           | 5.03         | 5.03         | 285.47            | 115.90                | 45.99                    |               |      |

3.3 โครเมียมในรูปโครเมียม(III) [ $Cr^{3+}$ ] ที่สัดส่วน 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 molCr[ $Cr^{3+}$ ]/kgOPC

ตารางที่ ข.10 ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.05 molCr[ $Cr^{3+}$ ]/kgOPC

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.00           | 5.20         | 5.03         | 282.81            | 68.30                 | 26.27                    | 27.33         | 1.52 |
|                  | 5.00           | 5.23         | 5.02         | 285.48            | 69.70                 | 26.65                    |               |      |
|                  | 5.02           | 5.16         | 5.10         | 284.40            | 75.30                 | 29.07                    |               |      |
| 7                | 5.04           | 5.00         | 5.14         | 284.73            | 76.90                 | 30.52                    | 32.64         | 3.66 |
|                  | 5.05           | 5.07         | 5.08         | 284.96            | 78.20                 | 30.54                    |               |      |
|                  | 5.01           | 5.04         | 5.06         | 286.41            | 93.10                 | 36.87                    |               |      |
| 14               | 5.06           | 5.06         | 5.04         | 283.09            | 105.80                | 41.32                    | 39.56         | 2.44 |
|                  | 5.05           | 5.04         | 5.04         | 279.90            | 93.60                 | 36.78                    |               |      |
|                  | 5.06           | 5.00         | 5.04         | 278.22            | 102.70                | 40.59                    |               |      |
| 28               | 4.99           | 5.04         | 5.10         | 289.80            | 108.50                | 43.14                    | 42.60         | 3.23 |
|                  | 5.00           | 5.03         | 5.18         | 287.30            | 114.50                | 45.53                    |               |      |
|                  | 5.09           | 5.04         | 5.00         | 285.80            | 100.40                | 39.14                    |               |      |

**ตารางที่ ข.11** ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูป

โครเมียม(III) สัดส่วน 0.10 molCr[Cr<sup>3+</sup>]/kgOPC

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.10           | 4.91         | 5.06         | 278.71            | 71.30                 | 28.47                    | 29.57         | 0.96 |
|                  | 5.05           | 5.08         | 5.05         | 276.17            | 77.40                 | 30.17                    |               |      |
|                  | 5.08           | 4.98         | 5.14         | 281.88            | 76.10                 | 30.08                    |               |      |
| 7                | 5.09           | 5.20         | 5.10         | 287.52            | 93.00                 | 35.14                    | 35.68         | 0.55 |
|                  | 5.00           | 5.04         | 5.12         | 283.26            | 91.30                 | 36.23                    |               |      |
|                  | 5.00           | 5.10         | 5.06         | 277.39            | 91.00                 | 35.69                    |               |      |
| 14               | 5.00           | 5.00         | 5.10         | 281.40            | 124.30                | 49.72                    | 47.42         | 2.14 |
|                  | 5.00           | 5.00         | 5.20         | 279.16            | 117.60                | 47.04                    |               |      |
|                  | 5.00           | 5.03         | 5.20         | 286.24            | 114.40                | 45.49                    |               |      |
| 28               | 5.03           | 4.99         | 5.04         | 280.10            | 129.10                | 51.43                    | 50.50         | 0.94 |
|                  | 5.07           | 5.05         | 5.04         | 284.90            | 126.90                | 49.56                    |               |      |
|                  | 5.05           | 5.00         | 5.04         | 279.20            | 127.50                | 50.50                    |               |      |

**ตารางที่ ข.12** ผลของระยะเวลาบ่มต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูป

โครเมียม(III) สัดส่วน 0.15 molCr[Cr<sup>3+</sup>]/kgOPC

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.05           | 5.03         | 5.08         | 280.50            | 75.80                 | 29.84                    | 28.63         | 1.43 |
|                  | 5.06           | 5.15         | 5.08         | 284.19            | 70.50                 | 27.05                    |               |      |
|                  | 5.04           | 5.05         | 5.04         | 280.80            | 73.80                 | 29.00                    |               |      |

| อายุปม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 7               | 5.00           | 5.02         | 5.09         | 270.07            | 81.50                 | 32.47                    | 33.81         | 1.46 |
|                 | 5.04           | 5.04         | 5.09         | 274.89            | 85.30                 | 33.58                    |               |      |
|                 | 4.98           | 5.03         | 5.09         | 268.08            | 88.60                 | 35.37                    |               |      |
| 14              | 5.06           | 5.10         | 5.10         | 283.19            | 114.40                | 44.33                    | 45.72         | 1.84 |
|                 | 5.05           | 5.00         | 5.19         | 284.96            | 120.70                | 47.80                    |               |      |
|                 | 5.04           | 5.09         | 5.05         | 280.98            | 115.50                | 45.02                    |               |      |
| 28              | 5.08           | 5.06         | 5.19         | 290.80            | 115.50                | 44.93                    | 48.95         | 3.48 |
|                 | 5.07           | 5.08         | 5.20         | 291.70            | 130.90                | 50.82                    |               |      |
|                 | 5.05           | 5.07         | 5.20         | 287.20            | 130.80                | 51.09                    |               |      |

**ตารางที่ ข.13** ผลของระยะเวลาปมต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมียม(III) สัดส่วน 0.20 molCr[Cr<sup>3+</sup>]/kgOPC

| อายุปม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3               | 5.08           | 5.10         | 5.15         | 283.57            | 77.30                 | 29.84                    | 29.87         | 0.04 |
|                 | 5.05           | 5.06         | 5.15         | 283.39            | 76.10                 | 29.78                    |               |      |
|                 | 5.05           | 5.04         | 5.15         | 284.64            | 76.30                 | 29.98                    |               |      |
| 7               | 5.04           | 5.04         | 5.06         | 277.86            | 93.70                 | 36.89                    | 36.25         | 0.64 |
|                 | 5.06           | 5.10         | 5.04         | 282.21            | 91.90                 | 35.61                    |               |      |
|                 | 5.06           | 5.01         | 5.08         | 283.07            | 91.90                 | 36.25                    |               |      |
| 14              | 5.05           | 5.00         | 5.06         | 281.20            | 122.60                | 48.55                    | 47.83         | 1.55 |
|                 | 5.08           | 5.07         | 5.04         | 282.86            | 125.90                | 48.88                    |               |      |
|                 | 5.00           | 5.06         | 5.03         | 278.93            | 116.50                | 46.05                    |               |      |

| อายุปม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 28              | 5.08           | 5.04         | 5.06         | 288.40            | 140.40                | 54.84                    | 55.25         | 0.38 |
|                 | 5.03           | 5.06         | 5.09         | 287.30            | 141.50                | 55.60                    |               |      |
|                 | 5.06           | 5.06         | 5.08         | 289.00            | 141.60                | 55.30                    |               |      |

3.4 โครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์  $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$  ที่สัดส่วน 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 molCr $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$ /kgOPC

ตารางที่ ข.14 ผลของระยะเวลาปมต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.05 molCr $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$ /kgOPC

| อายุปม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-----------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3               | 5.05           | 5.00         | 5.10         | 289.66            | 82.30                 | 32.59                    | 30.81         | 1.61 |
|                 | 5.05           | 5.00         | 5.16         | 289.54            | 74.40                 | 29.47                    |               |      |
|                 | 5.20           | 4.83         | 5.05         | 279.35            | 76.30                 | 30.38                    |               |      |
| 7               | 5.06           | 5.03         | 5.04         | 279.69            | 82.80                 | 32.53                    | 32.52         | 0.47 |
|                 | 5.04           | 4.99         | 5.07         | 277.25            | 80.60                 | 32.05                    |               |      |
|                 | 5.04           | 5.04         | 5.06         | 279.28            | 83.80                 | 32.99                    |               |      |
| 14              | 5.05           | 4.97         | 5.04         | 275.86            | 97.80                 | 38.97                    | 38.10         | 0.91 |
|                 | 5.05           | 5.04         | 5.08         | 273.01            | 97.20                 | 38.19                    |               |      |
|                 | 5.03           | 5.04         | 5.04         | 273.76            | 94.20                 | 37.16                    |               |      |
| 28              | 5.10           | 5.10         | 5.36         | 294.06            | 99.00                 | 38.06                    | 39.40         | 2.24 |
|                 | 5.05           | 5.20         | 5.02         | 278.47            | 100.20                | 38.16                    |               |      |
|                 | 5.05           | 5.00         | 5.20         | 279.71            | 106.00                | 41.98                    |               |      |

**ตารางที่ ข.15** ผลของระยะเวลาป่นต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปแบบ  
โครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน  $0.10 \text{ molCr[Cr(OH)}_3\text{]/kgOPC}$

| อายุป่น<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 5.16           | 4.90         | 5.00         | 277.20            | 70.30                 | 27.80                    | 27.86         | 0.31 |
|                  | 5.08           | 4.96         | 5.10         | 283.93            | 69.50                 | 27.58                    |               |      |
|                  | 5.08           | 5.00         | 5.30         | 292.80            | 71.60                 | 28.19                    |               |      |
| 7                | 5.00           | 5.02         | 5.03         | 272.57            | 70.80                 | 28.21                    | 28.94         | 0.72 |
|                  | 4.98           | 4.98         | 5.13         | 275.50            | 73.50                 | 29.64                    |               |      |
|                  | 5.00           | 4.97         | 5.03         | 272.76            | 72.00                 | 28.97                    |               |      |
| 14               | 5.05           | 5.02         | 5.28         | 284.86            | 90.10                 | 35.54                    | 36.73         | 1.28 |
|                  | 5.05           | 5.05         | 5.03         | 278.44            | 93.20                 | 36.55                    |               |      |
|                  | 5.04           | 4.98         | 5.04         | 274.55            | 95.60                 | 38.09                    |               |      |
| 28               | 5.11           | 5.00         | 5.08         | 284.08            | 92.70                 | 36.28                    | 39.04         | 3.17 |
|                  | 5.14           | 5.04         | 5.06         | 283.96            | 99.30                 | 38.33                    |               |      |
|                  | 5.06           | 5.06         | 5.04         | 284.74            | 108.80                | 42.49                    |               |      |

**ตารางที่ ข.16** ผลของระยะเวลาป่นต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูปแบบ  
โครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน  $0.15 \text{ molCr[Cr(OH)}_3\text{]/kgOPC}$

| อายุป่น<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                | 4.95           | 5.06         | 5.03         | 278.69            | 65.20                 | 26.03                    | 26.28         | 0.41 |
|                  | 5.05           | 5.04         | 5.00         | 281.68            | 66.30                 | 26.05                    |               |      |
|                  | 5.00           | 4.95         | 5.06         | 280.95            | 66.20                 | 26.75                    |               |      |

| อายุป้อม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 7                 | 5.06           | 5.01         | 5.03         | 274.68            | 68.20                 | 26.90                    | 27.12         | 0.76 |
|                   | 5.07           | 5.04         | 5.05         | 273.55            | 67.70                 | 26.49                    |               |      |
|                   | 5.03           | 5.06         | 5.04         | 273.46            | 71.20                 | 27.97                    |               |      |
| 14                | 5.05           | 5.04         | 5.11         | 282.05            | 88.10                 | 34.61                    | 36.23         | 1.58 |
|                   | 5.03           | 5.07         | 5.10         | 283.65            | 96.30                 | 37.76                    |               |      |
|                   | 5.05           | 5.01         | 5.05         | 281.17            | 91.90                 | 36.32                    |               |      |
| 28                | 5.05           | 5.05         | 5.05         | 278.23            | 96.40                 | 37.80                    | 38.00         | 1.63 |
|                   | 5.04           | 5.14         | 5.06         | 280.51            | 94.50                 | 36.48                    |               |      |
|                   | 5.04           | 5.08         | 5.09         | 283.48            | 101.70                | 39.72                    |               |      |

ตารางที่ ข.17 ผลของระยะเวลาป้อมต่อสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของโครเมียมในรูป  
โครเมียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วน 0.20 mol Cr[Cr(OH)<sub>3</sub>]/kg OPC

| อายุป้อม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 3                 | 5.04           | 5.06         | 5.06         | 273.50            | 52.80                 | 20.70                    | 18.95         | 1.63 |
|                   | 5.04           | 5.06         | 5.00         | 271.70            | 47.60                 | 18.66                    |               |      |
|                   | 5.05           | 5.03         | 5.09         | 271.10            | 44.40                 | 17.48                    |               |      |
| 7                 | 5.04           | 5.03         | 5.14         | 280.17            | 53.70                 | 21.18                    | 22.21         | 0.99 |
|                   | 5.05           | 5.01         | 5.06         | 269.14            | 58.60                 | 23.16                    |               |      |
|                   | 5.00           | 5.06         | 5.05         | 273.44            | 56.40                 | 22.29                    |               |      |
| 14                | 5.06           | 4.98         | 5.14         | 292.31            | 88.70                 | 35.20                    | 34.15         | 0.92 |
|                   | 5.06           | 5.00         | 5.13         | 279.66            | 85.30                 | 33.72                    |               |      |
|                   | 5.10           | 5.00         | 5.20         | 279.21            | 85.50                 | 33.53                    |               |      |

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) | ค่า<br>เฉลี่ย | SD   |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|------|
| 28               | 5.07           | 5.04         | 5.05         | 280.17            | 92.40                 | 36.16                    | 35.95         | 0.53 |
|                  | 5.02           | 5.05         | 5.08         | 276.66            | 89.60                 | 35.34                    |               |      |
|                  | 5.04           | 5.06         | 5.06         | 279.47            | 92.70                 | 36.35                    |               |      |

### 3.5 ของเสียจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.18 ผลของสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ของของเสียจากห้องปฏิบัติการ

| อายุบ่ม<br>(วัน) | กว้าง<br>(ซม.) | ยาว<br>(ซม.) | สูง<br>(ซม.) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | แรงกด<br>(กิโลนิวตัน) | กำลังอัด<br>(เมกะพาสคัล) |
|------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| 7                | 5.05           | 5.07         | 5.20         | 268.22            | 74.80                 | 29.21                    |

## 4. ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

### 4.1 โครเมียมในรูปโครเมต $[CrO_4^{2-}]$

ตารางที่ ข.19 ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมตในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)      |        |        |        |        |
|-----------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                             | สัดส่วน $molCr[CrO_4^{2-}]/kgOPC$ |        |        |        |        |
|                             | ชุดควบคุม                         | 0.05   | 0.10   | 0.15   | 0.20   |
| 0.5                         | -0.6405                           | 3.2680 | 3.8170 | 6.0131 | 8.6307 |
|                             | -1.8007                           | 3.9837 | 4.0327 | 6.7908 | 8.3725 |
|                             | -1.4085                           | 4.1699 | 3.5817 | 6.1275 | 8.2810 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                            | 3.8072 | 3.8105 | 6.3105 | 8.4281 |
| SD                          | 0.59                              | 0.48   | 0.23   | 0.42   | 0.18   |

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)                         |        |        |        |        |
|-----------------------------|--|--------|--------|--------|--------|
|                             | สัดส่วน molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC |        |        |        |        |
|                             | ชุดควบคุม  | 0.05   | 0.10   | 0.15   | 0.20   |
| 1                           | -3.5817  | 2.9542 | 4.8301 | 7.4248 | 8.1667 |
|                             | -2.2549  | 2.1503 | 4.3235 | 7.2484 | 8.7680 |
|                             | -1.5425  | 2.2647 | 4.6732 | 7.5915 | 8.3824 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000   | 2.4564 | 4.6089 | 7.4216 | 8.4390 |
| SD                          | 1.03   | 0.43   | 0.26   | 0.17   | 0.30   |
| 9                           | -0.5915  | 4.4542 | 4.8399 | 5.7451 | 9.6144 |
|                             | -1.9935  | 4.0000 | 5.0752 | 5.5359 | 9.8203 |
|                             | -0.4379  | 5.0556 | 4.9183 | 5.9346 | 9.7255 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000   | 4.5033 | 4.9444 | 5.7386 | 9.7200 |
| SD                          | 0.86   | 0.53   | 0.12   | 0.20   | 0.10   |
| 18                          | -0.8954  | 2.2157 | 2.9314 | 5.1797 | 8.0261 |
|                             | -1.1503  | 1.9510 | 3.0327 | 5.5980 | 6.9477 |
|                             | -1.6961  | 2.0392 | 3.0784 | 5.8399 | 8.4804 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000   | 2.0686 | 3.0142 | 5.5392 | 7.8181 |
| SD                          | 0.41   | 0.13   | 0.08   | 0.33   | 0.79   |

#### 4.2 โครเมียมในรูปโครเมียม(III) [Cr<sup>3+</sup>]

ตารางที่ ข.20 ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมียม(III) ในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)           |        |         |         |         |
|-----------------------------|--|--------|---------|---------|---------|
|                             | สัดส่วน molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC |        |         |         |         |
|                             | ชุดควบคุม                              | 0.05   | 0.10    | 0.15    | 0.20    |
| 0.5                         | -0.6405                                | 0.1144 | -0.6275 | -0.6078 | -1.1013 |
|                             | -1.8007                                | 0.1176 | -1.0915 | -0.7712 | -1.1895 |
|                             | -1.4085                                | 0.1111 | -1.7222 | -0.4935 | -0.4477 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                 | 0.1144 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0000  |
| SD                          | 0.59                                   | 0.00   | 0.55    | 0.14    | 0.41    |
| 1                           | -3.5817                                | 1.5752 | 1.4967  | -2.1667 | 0.0621  |
|                             | -2.2549                                | 1.5654 | 1.2941  | -0.4216 | 0.0686  |
|                             | -1.5425                                | 1.5948 | 1.7222  | -0.7484 | 0.0719  |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                 | 1.5784 | 1.5044  | 0.0000  | 0.0675  |
| SD                          | 1.03                                   | 0.01   | 0.21    | 0.93    | 0.00    |
| 9                           | -0.5915                                | 0.4118 | 0.4020  | 0.0686  | 0.4935  |
|                             | -1.9935                                | 0.3954 | 0.3725  | 0.0458  | 0.6209  |
|                             | -0.4379                                | 0.4052 | 0.4412  | 0.0556  | 0.7810  |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                 | 0.4041 | 0.4052  | 0.0566  | 0.6318  |
| SD                          | 0.86                                   | 0.01   | 0.03    | 0.01    | 0.14    |
| 18                          | -0.8954                                | 0.0392 | 0.1340  | 1.3464  | -0.5654 |
|                             | -1.1503                                | 0.0163 | 0.1144  | 1.3758  | -0.7647 |
|                             | -1.6961                                | 0.0294 | 0.1569  | 1.3824  | -1.5098 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                 | 0.0283 | 0.1351  | 1.3682  | 0.0000  |
| SD                          | 0.41                                   | 0.01   | 0.02    | 0.02    | 0.50    |

### 4.3 โครเมียมในรูปตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ [Cr(OH)<sub>3</sub>]

ตารางที่ ข.21 ผลของการปลดปล่อยไอออนโครเมียมในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ในน้ำชะ  
ของก้อนซีเมนต์

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm)              |        |        |         |         |
|-----------------------------|---|--------|--------|---------|---------|
|                             | สัดส่วน molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC |        |        |         |         |
|                             | ชุดควบคุม                                 | 0.05   | 0.10   | 0.15    | 0.20    |
| 0.5                         | -0.6405                                   | 0.7582 | 1.0556 | 1.1536  | 1.0784  |
|                             | -1.8007                                   | 0.7843 | 1.2745 | 1.1275  | 1.0556  |
|                             | -1.4085                                   | 0.8072 | 1.4673 | 1.3954  | 1.0359  |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                    | 0.7832 | 1.2658 | 1.2255  | 1.0566  |
| SD                          | 0.59                                      | 0.02   | 0.21   | 0.15    | 0.02    |
| 1                           | -3.5817                                   | 2.1634 | 2.2026 | 1.8170  | 0.8007  |
|                             | -2.2549                                   | 1.9379 | 1.7222 | 1.9216  | 0.8366  |
|                             | -1.5425                                   | 1.7353 | 1.9739 | 1.7092  | 0.8137  |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                    | 1.9455 | 1.9662 | 1.8159  | 0.8170  |
| SD                          | 1.03                                      | 0.21   | 0.24   | 0.11    | 0.02    |
| 9                           | -0.5915                                   | 0.9052 | 1.4052 | 0.7484  | 1.8791  |
|                             | -1.9935                                   | 0.9150 | 1.4248 | 0.5458  | 1.4510  |
|                             | -0.4379                                   | 0.8627 | 1.4542 | 0.6961  | 2.6993  |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                    | 0.8943 | 1.4281 | 0.6634  | 2.0098  |
| SD                          | 0.86                                      | 0.03   | 0.02   | 0.11    | 0.63    |
| 18                          | -0.8954                                   | 1.2712 | 0.1503 | -2.3889 | -1.0196 |
|                             | -1.1503                                   | 1.1340 | 0.1242 | -1.2876 | -0.4673 |
|                             | -1.6961                                   | 1.5654 | 0.1797 | -2.2418 | -0.6928 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                                    | 1.3235 | 0.1514 | 0.0000  | 0.0000  |
| SD                          | 0.41                                      | 0.22   | 0.03   | 0.60    | 0.28    |

#### 4.4 ค่าของพีเอช

ตารางที่ ข.22 ผลของค่าพีเอชในน้ำชะของก้อนซีเมนต์

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | pH   |       |       |       |       |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
|                             | สัดส่วน molCr[CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/kgOPC |       |       |       |       |
|                             | ชุดควบคุม  | 0.05  | 0.10  | 0.15  | 0.20  |
| 0.5                         | 12.19  | 11.53 | 12.18 | 12.02 | 12.11 |
|                             | 11.55  | 11.43 | 11.69 | 11.82 | 12.36 |
|                             | 12.39  | 11.85 | 12.21 | 11.41 | 11.82 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.04  | 11.60 | 12.03 | 11.75 | 12.10 |
| SD                          | 0.44   | 0.22  | 0.29  | 0.31  | 0.27  |
| 1                           | 11.84  | 10.83 | 11.97 | 11.63 | 11.75 |
|                             | 11.99  | 10.15 | 11.05 | 11.25 | 11.25 |
|                             | 11.64  | 11.91 | 11.76 | 11.20 | 12.10 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 11.82  | 10.96 | 11.59 | 11.36 | 11.70 |
| SD                          | 0.18   | 0.89  | 0.48  | 0.24  | 0.43  |
| 9                           | 11.90  | 13.19 | 12.05 | 13.04 | 13.13 |
|                             | 11.96  | 12.50 | 13.70 | 12.62 | 13.93 |
|                             | 12.96  | 12.49 | 13.54 | 12.99 | 12.47 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.27  | 12.73 | 13.10 | 12.88 | 13.18 |
| SD                          | 0.60   | 0.40  | 0.91  | 0.23  | 0.73  |
| 18                          | 12.73  | 12.29 | 9.75  | 12.31 | 12.74 |
|                             | 12.76  | 11.62 | 10.52 | 11.48 | 12.57 |
|                             | 12.74  | 10.95 | 10.92 | 11.29 | 11.77 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.74  | 11.62 | 10.40 | 11.69 | 12.36 |
| SD                          | 0.02   | 0.67  | 0.59  | 0.54  | 0.52  |

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | pH                                     |       |       |       |       |
|-----------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
|                             | สัดส่วน molCr[Cr <sup>3+</sup> ]/kgOPC |       |       |       |       |
|                             | ชุดควบคุม                              | 0.05  | 0.10  | 0.15  | 0.20  |
| 0.5                         | 12.19                                  | 11.73 | 11.52 | 11.36 | 11.84 |
|                             | 11.55                                  | 11.68 | 12.42 | 12.19 | 12.06 |
|                             | 12.39                                  | 12.15 | 12.16 | 12.16 | 12.14 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.04                                  | 11.85 | 12.03 | 11.90 | 12.01 |
| SD                          | 0.44                                   | 0.26  | 0.46  | 0.47  | 0.16  |
| 1                           | 11.84                                  | 11.83 | 11.72 | 11.86 | 11.32 |
|                             | 11.99                                  | 11.88 | 11.65 | 11.59 | 11.39 |
|                             | 11.64                                  | 11.75 | 11.72 | 11.48 | 11.73 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 11.82                                  | 11.82 | 11.70 | 11.64 | 11.48 |
| SD                          | 0.18                                   | 0.07  | 0.04  | 0.20  | 0.22  |
| 9                           | 11.90                                  | 12.23 | 13.38 | 13.06 | 12.91 |
|                             | 11.96                                  | 12.49 | 12.54 | 12.18 | 12.83 |
|                             | 12.96                                  | 12.91 | 12.67 | 12.82 | 12.87 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.27                                  | 12.54 | 12.86 | 12.69 | 12.87 |
| SD                          | 0.60                                   | 0.34  | 0.45  | 0.45  | 0.04  |
| 18                          | 12.73                                  | 12.50 | 12.62 | 12.62 | 12.95 |
|                             | 12.76                                  | 12.48 | 12.55 | 12.64 | 12.69 |
|                             | 12.74                                  | 12.72 | 12.42 | 12.37 | 12.62 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.74                                  | 12.57 | 12.53 | 12.54 | 12.75 |
| SD                          | 0.02                                   | 0.13  | 0.10  | 0.15  | 0.17  |

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | pH  |       |       |       |       |
|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
|                             | สัดส่วน molCr[Cr(OH) <sub>3</sub> ]/kgOPC |       |       |       |       |
|                             | ชุดควบคุม                                 | 0.05  | 0.10  | 0.15  | 0.20  |
| 0.5                         | 12.19                                     | 12.30 | 12.04 | 12.42 | 11.93 |
|                             | 11.55                                     | 11.91 | 12.15 | 11.62 | 11.81 |
|                             | 12.39                                     | 12.12 | 11.60 | 12.13 | 11.78 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.04                                     | 12.11 | 11.93 | 12.06 | 11.84 |
| SD                          | 0.44                                      | 0.20  | 0.29  | 0.41  | 0.08  |
| 1                           | 11.84                                     | 11.89 | 11.74 | 12.42 | 11.36 |
|                             | 11.99                                     | 11.82 | 11.75 | 11.88 | 11.97 |
|                             | 11.64                                     | 11.60 | 11.55 | 11.47 | 11.81 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 11.82                                     | 11.77 | 11.68 | 11.92 | 11.71 |
| SD                          | 0.18                                      | 0.15  | 0.11  | 0.48  | 0.32  |
| 9                           | 11.90                                     | 11.78 | 11.85 | 11.90 | 11.83 |
|                             | 11.96                                     | 11.85 | 11.92 | 11.85 | 11.91 |
|                             | 12.96                                     | 11.92 | 11.92 | 11.82 | 11.89 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.27                                     | 11.85 | 11.90 | 11.86 | 11.88 |
| SD                          | 0.60                                      | 0.07  | 0.04  | 0.04  | 0.04  |
| 18                          | 12.73                                     | 12.36 | 12.65 | 12.62 | 12.16 |
|                             | 12.76                                     | 12.24 | 12.37 | 12.56 | 12.32 |
|                             | 12.74                                     | 12.44 | 12.45 | 12.37 | 12.26 |
| ค่าเฉลี่ย                   | 12.74                                     | 12.35 | 12.49 | 12.52 | 12.25 |
| SD                          | 0.02                                      | 0.10  | 0.14  | 0.13  | 0.08  |

#### 4.5 ผลของการชะละลายของซีเมนต์ที่มีตะกอนของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.23 ผลของการชะละลายของซีเมนต์ที่มีตะกอนของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

| เวลาการชะละลาย<br>(ชั่วโมง) | ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm) |          |
|-----------------------------|------------------------------|----------|
|                             | ชุดควบคุม                    | ชุดทดลอง |
| 18                          | -0.8954                      | 0.6634   |
|                             | -1.1503                      | 0.7386   |
|                             | -1.6961                      | 0.7222   |
| ค่าเฉลี่ย                   | 0.0000                       | 0.7081   |
| SD                          | 0.41                         | 0.04     |

## ภาคผนวก ค

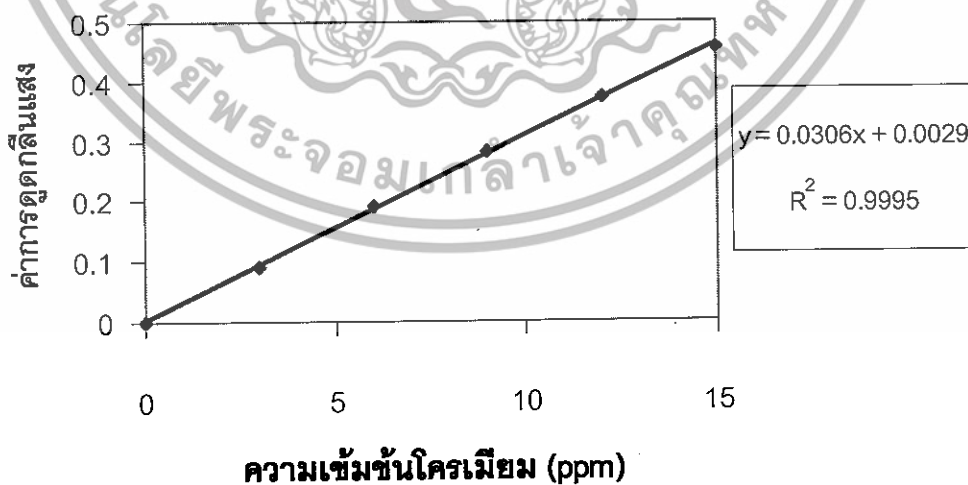
### วิธีการคำนวณ

#### 1. การสร้างกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของโครเมียม

| ความเข้มข้นของโครเมียม (ppm) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|------------------------------|------------------|
| 0.00                         | 0.0000           |
| 3.00                         | 0.0922           |
| 6.00                         | 0.1916           |
| 9.00                         | 0.2813           |
| 12.00                        | 0.3717           |
| 15.00                        | 0.4566           |

กราฟมาตรฐานโครเมียม



รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมกับค่าการดูดกลืนแสง

## 2. วิธีคำนวณหาความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน

จากสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน :  $y = 0.0306x + 0.0029$

โดยกำหนดให้  $x$  คือ ความเข้มข้นของโครเมียม หน่วยพีพีเอ็ม

$y$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

คำนวณความเข้มข้นของโครเมียมโดยแทนค่าการดูดกลืนแสงในสมการ

$$x = (y - 0.0029)/0.0306$$

## 3. วิธีคำนวณปริมาณสาร

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณ  $K_2CrO_4$

จาก  $K_2CrO_4$  1 โมล จะมี Cr อยู่ 1 โมล  
 ดังนั้น  $K_2CrO_4$  194 กรัม จะมี Cr เท่ากับ 52 กรัม

**สมมติ** สัดส่วนเท่ากับ 0.20 molCr/kgOPC

จะต้องใช้  $K_2CrO_4$  เท่ากับ  $0.20 \text{ molCr/kgOPC} \times 194 \text{ g} \cdot K_2CrO_4/\text{molCr}$   
 เท่ากับ 38.8 g/kgOPC

แสดงว่า ถ้าใช้น้ำซีเมนต์ธรรมดา (OPC) 1 กิโลกรัม จะต้องใช้  $K_2CrO_4$  เท่ากับ 38.8 กรัม

ส่วน  $Cr(NO_3)_3$  และ  $Cr(OH)_3$  สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ  $K_2CrO_4$

## ภาคผนวก ง

### เกณฑ์มาตรฐาน

#### 1. เกณฑ์มาตรฐานระยะเวลาก่อตัว (Time of setting)

ตามมาตรฐาน ASTM C150 (standard Specification for Portland Cement)

การทดสอบแบบไวแคต (Vicat test)

**ตารางที่ ง.1** เกณฑ์มาตรฐานระยะเวลาก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C150

| คุณลักษณะ                            | เกณฑ์ที่กำหนด |          |          |          |          |
|--------------------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
|                                      | ประเภท 1      | ประเภท 2 | ประเภท 3 | ประเภท 4 | ประเภท 5 |
| การก่อตัวระยะต้น (นาทิจ) ไม่น้อยกว่า | 45            | 45       | 45       | 45       | 45       |
| การก่อตัวระยะปลาย (นาทิจ) ไม่เกิน    | 375           | 375      | 375      | 375      | 375      |

หมายเหตุ: ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM C191 (Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, Annual Book of ASTM Standard, Vol 04.01.)

#### 2. เกณฑ์มาตรฐานกำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ตามมาตรฐาน ASTM C150 (standard Specification for Portland Cement)

**ตารางที่ ง.2** เกณฑ์มาตรฐานกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 150

| คุณลักษณะ                  | เกณฑ์ที่กำหนด |          |          |          |          |
|----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
|                            | ประเภท 1      | ประเภท 2 | ประเภท 3 | ประเภท 4 | ประเภท 5 |
| กำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า |               |          |          |          |          |
| ระยะเวลาบ่ม อายุ 1 วัน     | -             | -        | 12.0     | -        | -        |
| อายุ 3 วัน                 | 12.0          | 10.0     | 24.0     | -        | 8.0      |
| อายุ 7 วัน                 | 19.0          | 17.0     | -        | 7.0      | 15.0     |
| อายุ 28 วัน                | 28.0          | 28.0     | -        | 17.0     | 21.0     |
| หน่วย เมกะพาสคัล (MPa)     |               |          |          |          |          |

หมายเหตุ : ตามวิธีทดสอบของมาตรฐาน ASTM C 109 (Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 50-mm. Cube Specimens, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.)

### 3. เกณฑ์มาตรฐาน Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)

ตามมาตรฐานของ US.EPA. Method 1311

ตารางที่ ง.3 เกณฑ์มาตรฐานการชะละลายตามมาตรฐานของ US.EPA. Method 1311

| Contaminant                    | Regulatory Level (ppm) |
|--------------------------------|------------------------|
| Arsenic                        | 5.0                    |
| Barium                         | 100.0                  |
| Benzene                        | 0.5                    |
| Cadmium                        | 1.0                    |
| Carbon tetrachloride           | 0.5                    |
| Chlordane                      | 0.03                   |
| Chlorobenzene                  | 100.0                  |
| Chloroform                     | 6.0                    |
| Chromium                       | 5.0                    |
| o-Cresol                       | 200.0 <sup>1</sup>     |
| m-Cresol                       | 200.0 <sup>1</sup>     |
| p-Cresol                       | 200.0 <sup>1</sup>     |
| Cresol                         | 200.0 <sup>1</sup>     |
| 2,4-D                          | 10.0                   |
| 1,4-Dichlorobenzene            | 7.5                    |
| 1,2-Dichloroethane             | 0.5                    |
| 1,1-Dichloroethylene           | 0.7                    |
| 2,4-Dinitrotoluene             | 0.13 <sup>2</sup>      |
| Endrin                         | 0.02                   |
| Heptachlor (and its hydroxide) | 0.008                  |

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| Hexachlorobenzene        | 0.13 <sup>2</sup> |
| Hexachloro-1,3-butadiene | 0.5               |
| Hexachloroethane         | 3.0               |
| Lead                     | 5.0               |
| Lindane                  | 0.4               |
| Mercury                  | 0.2               |
| Methoxychlor             | 10.0              |
| Methyl ethyl ketone      | 200.0             |
| Nitrobenzene             | 2.0               |
| Pentachlorophenol        | 100.0             |
| Pyridine                 | 5.0 <sup>2</sup>  |
| Selenium                 | 1.0               |
| Silver                   | 5.0               |
| Tetrachloroethylene      | 0.7               |
| Toxaphene                | 0.5               |
| Trichloroethylene        | 0.5               |
| 2,4,5-Trichlorophenol    | 400.0             |
| 2,4,6-Trichlorophenol    | 2.0               |
| 2,4,5-TP (Silvex)        | 1.0               |
| Vinyl chloride           | 0.2               |

<sup>1</sup>If o-, m-, and p-cresol concentrations cannot be differentiated, the total cresol (D026) concentration is used. The regulatory level of total cresol is 200 mg/L.

<sup>2</sup>Quantitation limit is greater than the calculated regulatory level. The quantitation limit therefore becomes the regulatory level.