



## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการขยายผลการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์และพลาสติกเอทิลีน  
จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม  
Scaling up the GO/Plaster adsorbent for Chromium adsorption

โดย ดร. ดวงกมล พิสุทธิ์ และคณะ  
สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิงหาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0058

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการขยายผลการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์และพลาสติกห่อใช้  
จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม  
Scaling up the GO/Plaster adsorbent for Chromium adsorption

| คณะผู้วิจัย |               |                           | สังกัด                                                      |
|-------------|---------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1.          | ดร. ดวงกมล    | พิhusูตร                  | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                                       |
| 2.          | ดร. อาทิตย์   | เพ็ชรรัักษ์               | มหาวิทยาลัยมหิดล                                            |
| 3.          | ดร. มลฤดี     | จันทร์ตัน                 | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์                                 |
| 4.          | ผศ.ดร.สุทธิดา | เปลี่ยนคารมย์ ชนทรัพย์สิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี<br>(ที่ปรึกษาโครงการ) |

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2560  
สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)  
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)  
(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทสรุปผู้บริหาร

**ชื่อเรื่อง** โครงการวิจัยการขยายผลการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์และพลาสติกอร์เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม

Scaling up the GO/Plaster adsorbent for Chromium adsorption

### คณะผู้วิจัย

|                |               |                           |                                       |
|----------------|---------------|---------------------------|---------------------------------------|
| หัวหน้าโครงการ | ดร. ดวงกมล    | พิhusุต                   | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                 |
| นักวิจัย       | ดร. อาทิตย์   | เพชรรัช                   | มหาวิทยาลัยมหิดล                      |
| นักวิจัย       | ดร. มลฤดี     | จันทร์ตัน                 | สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์           |
| ที่ปรึกษา      | ผศ.ดร. สุจิตา | เปลี่ยนคารมย์ ธนทรัพย์สิน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

## 1. บทนำ

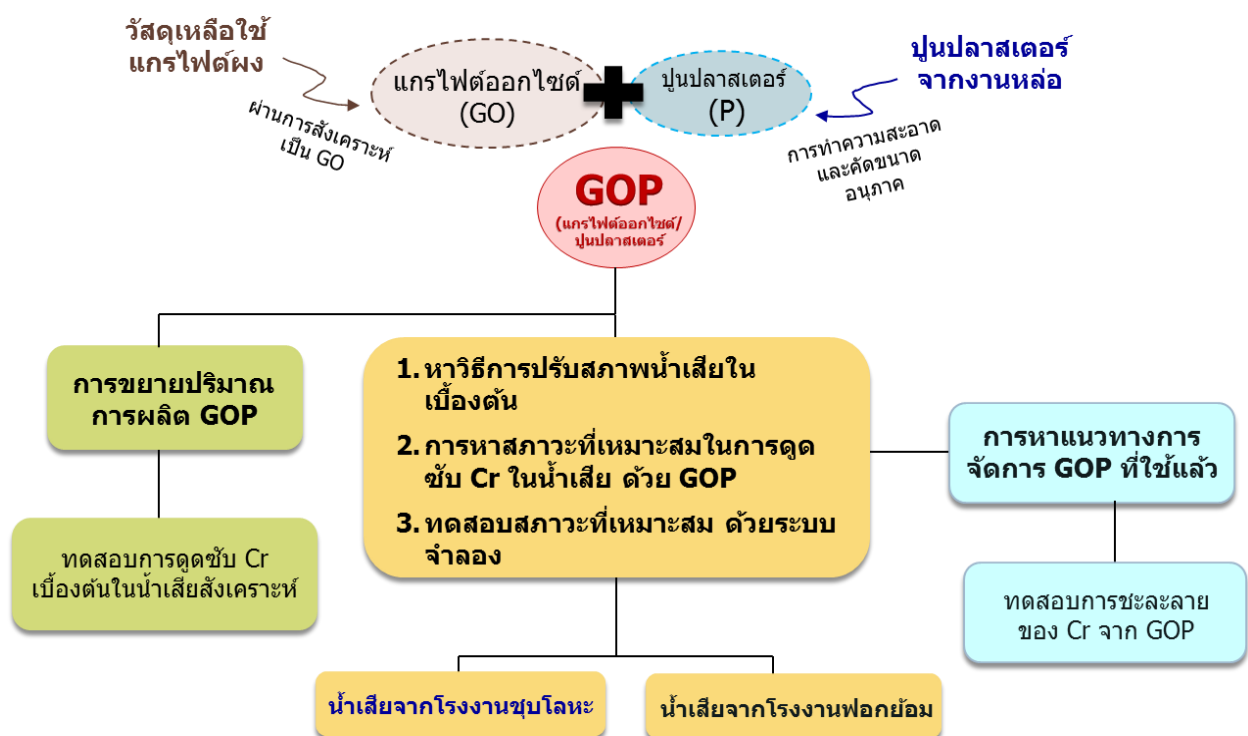


## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. รวบรวมและศึกษาคุณสมบัติน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ (อย่างน้อย 2 แหล่ง)
2. เพื่อหาวิธีการปรับเสถียร (Stabilization) น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบในเบื้องต้น

3. เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วด้วยวัสดุผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกอร์
4. พัฒนาวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติกอร์
5. เพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการนำไปใช้และเพื่อต่อยอดทางการค้า
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของวัสดุดูดซับที่อยู่ในรูปแบบที่ถูกพัฒนาแล้วในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว

### 3. วิธีดำเนินงานวิจัย



### 4. ผลการวิจัย

| เดือนที่ | กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ผลที่ได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-2      | <ol style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทดสอบวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติกอร์</li> <li>ติดต่อประสานงานและขอรวบรวมน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกากสุดท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะ</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>วิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์</li> <li>น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง</li> <li>คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ</li> <li>รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1</li> </ol> |

| เดือนที่ | กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | ผลที่ได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | <p>หรือผู้สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง</p> <p>3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH, Conductivity และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์)</p> <p>4. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3-6      | <p>5. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH, Conductivity และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์) (ต่อ)</p> <p>6. ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH, Turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการ ดูดซับด้วยตัวดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก</p> <p>7. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน</p> <p>8. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2</p> | <p>5. คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ (ต่อ)</p> <p>6. วิธีการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรม</p> <p>7. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว</p> <p>8. รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2</p> |

| เดือนที่ | กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ผลที่ได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7-13     | 9. ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งานและสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้<br>10. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช่วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม<br>11. การทดสอบวัสดุดูดซับผสมในการบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียจริง ในสถานะจำลองที่ใกล้เคียงระบบบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรม<br>12. การทดสอบการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับที่ใช้งานแล้ว<br>13. ดำเนินการขอจดอนุสิทธิบัตรการผลิตวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก | 9. ประสิทธิภาพการใช่วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว (ต่อ)<br>10. วิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้<br>11. ประสิทธิภาพการใช่วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการพัฒนาดังกล่าวด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม<br>12. ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับผสมในการบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงในสถานะจำลองที่ใกล้เคียงระบบบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรม<br>13. ผลการทดสอบการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับที่ใช้งานแล้ว<br>14. อยู่ระหว่างการขอแจ้งจดอนุสิทธิบัตรการผลิตวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก |
| 14-15    | 14. จัดทำบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร วิชาการนานาชาติ<br>15. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 15. ร่างบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร วิชาการนานาชาติ<br>16. รายงานฉบับสมบูรณ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

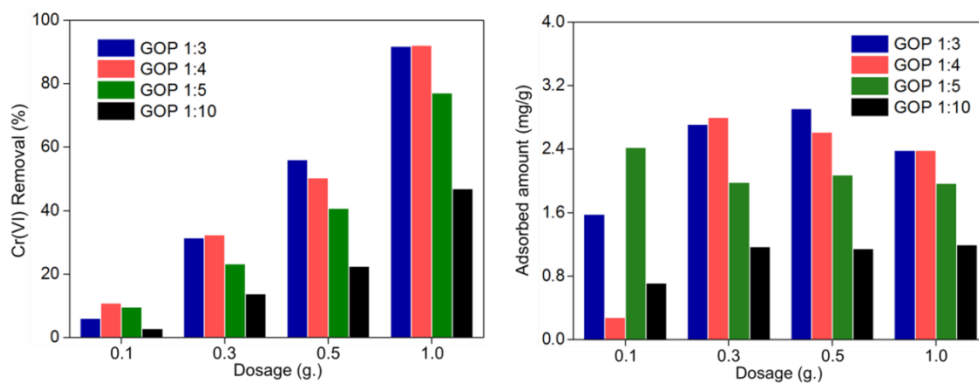
## 5. รายละเอียดผลการวิจัย

### 5.1 การพัฒนาวัสดุดูดซับผสม GOP เพื่อการขยายผลการผลิต

วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกเป็นผลผลิตจากผลการทำวิจัยของโครงการ การวิจัยการดัดแปลงวัสดุดูดซับโลหะหนักจากสารผสมแกรไฟต์และซีเมนต์เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับที่ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปี 2559 ซึ่งผลการศึกษาทำให้ผู้วิจัยสามารถผลิตวัสดุดูดซับผสมจากแกรไฟต์ออกไซด์และปูนพลาสติกได้สำเร็จ และวัสดุดูดซับดังกล่าวได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในการนำมาใช้กำจัดโครเมียมในน้ำเสีย

สังเคราะห์ ซึ่งจากผลงานวิจัยดังกล่าวได้กลายเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับงานวิจัยต่อยอดเพื่อการขยายการผลิตวัสดุดูดซับและการนำวัสดุดูดซับผสมดังกล่าวมาทดสอบการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภทโดยเรียกวัสดุดูดซับดังกล่าวในรูปแบบของชื่อย่อว่า วัสดุดูดซับ GOP ทั้งนี้ ในเบื้องต้นของการขยายการผลิตวัสดุดูดซับ GOP ผู้วิจัยต้องทำการทบทวนวิธีการผลิตในทุกขั้นตอนอย่างละเอียดเพื่อหาข้อบกพร่องของการผลิตซึ่งพบว่า ขั้นตอนการผลิตที่จำเป็นต้องได้รับการปรับได้แก่ 1) ขั้นตอนการผลิตวัสดุดูดซับผสม และ 2) อัตราส่วนระหว่างแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์

ในการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมวัสดุดูดซับ GOP ผู้วิจัยได้เลือกน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาใช้ในการศึกษาเนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวมีความขุ่นน้อยและไม่ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ยุ่งยากเพื่อให้ GOP สัดส่วนต่าง ๆ ได้ถูกนำไปใช้ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียจริง และทำการสังเกตผลที่ได้จากการทดลอง การทดลองนี้ได้เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียให้สูงขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมความเข้มข้นในช่วงกว้าง โดยใช้ความเข้มข้นที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร



**รูปที่ 5.1.1** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ GOP ที่ต่างกันกับปริมาณตัวดูดซับที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (ขาว) และปริมาณมลสารที่ดูดซับ (ซ้าย)

จากกราฟรูปที่ 5.1.1 เมื่อใช้ตัวดูดซับ GOP ที่มีสัดส่วนและปริมาณต่างกันในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อสัดส่วนของ GOP มีปริมาณเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้น โดย GOP ที่สัดส่วน 1:3 และ 1:4 มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ใกล้เคียงกันแม้เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคือ 92.03 % และ 91.70 % ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GOP ที่สัดส่วน 1:4 มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียง หรือสูงกว่า GOP 1:3 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้น เพื่อเป็นการลดปริมาณต้นทุนการใช้วัสดุดูดซับ ในการทดลองต่อจากนี้ GOP ในอัตราส่วน 1:4 จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่อไป ซึ่งลักษณะของ GOP อัตราส่วน 1:4 หลังจากผ่านการปรับเปลี่ยนวิธีการผลิตและผสมแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ทำให้มีลักษณะดังแสดงในรูปภาพที่ 5.1.2



**รูปที่ 5.1.2** ภาพถ่ายแสดงลักษณะผงวัสดุชุดขับผสม GOP

## 5.2 โรงงานฟอกย้อม (บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทยจำกัด (มหาชน))

บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) เริ่มต้นก่อตั้งในปี พ.ศ. 2513 ดำเนินธุรกิจด้านฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จผ้าผืน ปัจจุบันบริษัทดำเนินการมากกว่า 47 ปี โดยมีผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสิ่งทอทุกประเภท ในการเข้าพบผู้ประกอบการของโรงงานคณะผู้วิจัยได้มีโอกาสเยี่ยมชมกระบวนการผลิตภายในโรงงานและได้รับอนุญาตให้นำรูปภาพมาประกอบในรายงาน ดังแสดงในรูปภาพที่ 5.2.1



**รูปที่ 5.2.1** รูปภาพแสดงความร่วมมือในการวิจัยกับหน่วยงานภายนอก และแผนกควบคุมคุณภาพของโรงงาน

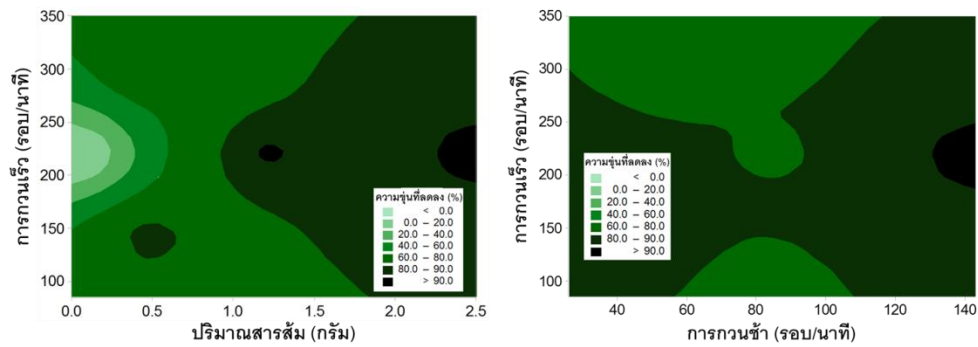
เมื่อทำการสำรวจระบบบำบัดของโรงงานพบว่า โรงงานฟอกย้อมใช้ระบบบ่อเติมอากาศเป็นระบบบำบัดหลักในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการซักล้างและสารอินทรีย์จากสีย้อมบางชนิดก่อนทำการปล่อยน้ำเสียสู่พื้นที่รองรับน้ำธรรมชาติภายนอกโรงงาน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการขอเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดของโรงงานก่อนปล่อยสู่ธรรมชาติและในบ่อที่สนใจเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำ เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกตัวอย่างน้ำที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดลองในการทดลองต่อ ๆ ไป โดยลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าพารามิเตอร์บางส่วนที่น่าสนใจ ดังแสดงในตารางที่ 5.2.1

ตารางที่ 5.2.1 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อต่าง ๆ ของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

| รายการวิเคราะห์ | หน่วย | ผลการวิเคราะห์   |                |                        |
|-----------------|-------|------------------|----------------|------------------------|
|                 |       | บ่อเติม<br>อากาศ | บ่อ<br>ตกตะกอน | น้ำเสียที่จุด<br>ปล่อย |
| pH              | -     | 7.5              | 7.9            | 8.1                    |
| TSS             | mg/L  | 2,660            | 92.0           | 62.4                   |
| TDS             | mg/L  | 1,744            | 4,383          | 4,713                  |
| COD             | mg/L  | 129              | 139            | 132                    |
| Arsenic (As)    | mg/L  | 0.03             | 0.016          | 0.016                  |
| Mercury (Hg)    | mg/L  | 0.003            | 0.007          | 0.006                  |
| Cadmium (Cd)    | mg/L  | <0.001           | <0.001         | <0.001                 |
| Lead (Pb)       | mg/L  | <0.01            | <0.01          | <0.01                  |
| Chromium (Cr)   | mg/L  | 0.05             | <0.01          | <0.01                  |

จากการพิจารณาลักษณะของน้ำเสียจากระบบบำบัดในส่วนที่น้ำจะมีความสอดคล้องกับการนำวัสดุ  
ดูดซับผสม GOP ไปทดลองใช้ในการกำจัดโครเมียมได้นั้นคือ บ่อเติมอากาศ บ่อตกตะกอน และน้ำเสียในลำ  
รางก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปข้างต้น พบว่าบ่อ  
เติมอากาศและบ่อตกตะกอนมีค่าความขุ่นจากตะกอนแขวนลอย (Total Suspended Solid, TSS) ที่ค่อนข้าง  
สูง (2,660 และ 92 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้น ในระหว่างการพิจารณาเพื่อเลือกวัสดุดูดซับนี้ควรถูกนำไปใช้ได้  
อย่างเหมาะสมที่จุดใดของระบบบำบัดคณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาความขุ่น  
อันอาจเป็นสาเหตุในการลดประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุดูดซับโดยเฉพาะการลดการกระจายตัวของวัสดุ  
ดูดซับและการตกจับกับตะกอนแขวนลอย ซึ่งไม่ใช่เป้าหมายของการดูดซับ เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้สร้างการศึกษาเพื่อการปรับสภาพน้ำเสียในขั้นต้นให้มีลักษณะที่เหมาะสมก่อนที่  
จะนำวัสดุดูดซับผสม GOP ไปใช้งานโดยอาศัย พื้นฐานการสร้างตะกอนเพื่อลดความขุ่นร่วมกับลักษณะการ  
กวนที่แตกต่างและใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงสถิติ Statistical Software Minitab (Version 18)  
มาช่วยในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการปรับ  
สภาพน้ำเสียที่มีความขุ่นมาในเบื้องต้น โดยในการทดลองนี้มีปัจจัย 3 อย่าง (ที่มีความเป็นไปได้ต่อการนำไปใช้  
ในการปรับปรุงระบบจริง) ที่นำมาใช้ในการพิจารณา นั่นคือ ปริมาณสารสร้างตะกอน และลักษณะการกวน  
โดยพิจารณาจากการลดลงของความขุ่นของน้ำเสียตัวอย่าง โดยการทดลองดังกล่าวจะถูกทดลองใน  
ห้องปฏิบัติการและผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.2.2



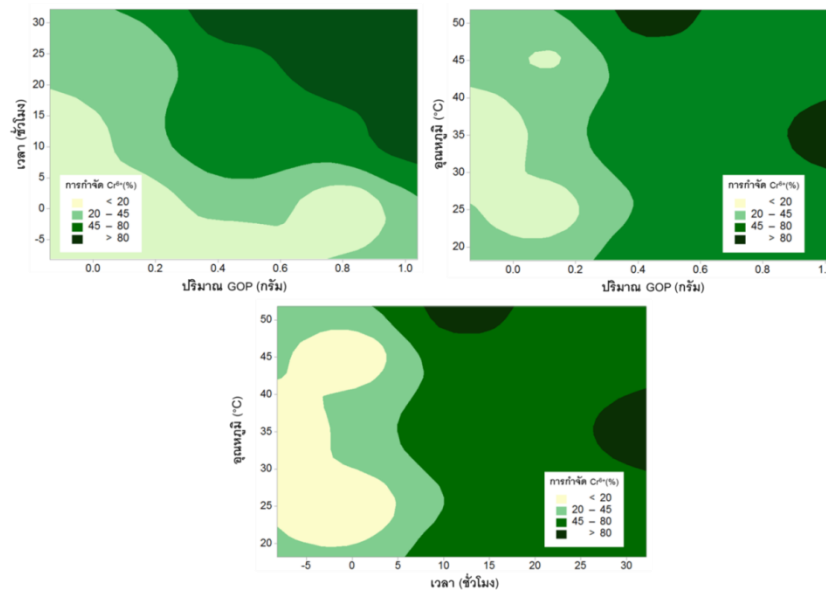
รูปที่ 5.2.2 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการลดลงของความขุ่น เมื่อปริมาณสารส้อมเปลี่ยนแปลงไป (ซ้าย) กับ ความเร็วในการกวนเร็วเปลี่ยนแปลงไป (ขวา)

จากการศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นผลการทดลอง แสดงด้วยแผนภาพคอนทัวร์ ดังรูปที่ 5.2.2 (ซ้าย) ปริมาณสารส้อมและความเร็วในการกวนเร็ว มีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความขุ่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสารส้อมมีปริมาณน้อยกว่า 25 กรัมต่อลิตร ค่าความขุ่นลดลงเพียงเล็กน้อย (0-40 %) เมื่อเพิ่มปริมาณสารส้อมให้อยู่ในช่วง 25-50 กรัมต่อลิตร พบว่าความขุ่นลดลงอย่างชัดเจน (60-80 %) และเมื่อเพิ่มปริมาณสารส้อม ให้มากกว่า 50 กรัมต่อลิตร สามารถลดความขุ่นได้มากกว่า 80 % โดยความเร็วที่ระดับ 200 รอบต่อนาที เป็นช่วงที่มีผลต่อการลดความขุ่นได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกวนเร็วและการกวนช้าต่อการลดความขุ่นในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยแสดงด้วยแผนภาพคอนทัวร์ ดังรูปที่ 5.2.2 (ขวา) ความเร็วในการกวนแสดงความสัมพันธ์กับการลดค่าความขุ่นได้ เมื่อกำหนดเวลาการกวนเร็วที่ 1 นาทีและการกวนช้าที่ 10 นาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบในการกวนเร็วในช่วง 100-250 รอบต่อนาที ความเร็วในการกวนช้าควรอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 40-60 รอบต่อ นาที เพื่อให้มีผลต่อการลดความขุ่นประมาณ 80 % แต่หากเพิ่มช่วงความเร็วของการกวนเร็วให้กว้างขึ้น คือ ตั้งแต่ 100-350 รอบต่อนาที พบว่าจะต้องทำการเพิ่มความเร็วของการกวนช้าขึ้นด้วย เพื่อให้สามารถลดความขุ่นได้มากกว่า 80 % ดังนั้นจากการทดลองนี้หากจำเป็นต้องใช้วัสดุดูดซับ GOP ในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศ หรือบ่อดักตะกอนที่ 1 ซึ่งมีความขุ่นสูง การใช้กระบวนการสร้างตะกอนตามการทดลองดังกล่าวจะสามารถลดความขุ่นได้ แต่จะยังไม่สามารถลดประมาณโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียลงได้

ในการศึกษาขั้นตอนถัดมาผู้วิจัยจึงต้องนำวัสดุดูดซับ GOP มาทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจริง ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียมีระบบบำบัดที่สามารถบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียได้เป็นอย่างดีจึงทำให้ค่าโครเมียมปนเปื้อนตามจริงมีค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องปรับวิธีการดำเนินการศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมกับลักษณะน้ำเสียที่สามารถพบได้จากโรงงานฟอกย้อมที่มีได้มีระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพดีเช่นโรงงานนี้ โดยการเติมโครเมียมให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับการปนเปื้อนที่พบได้ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม (จากข้อมูลในการทบทวนวรรณกรรม) โดยค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่พบได้ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสามารถมีค่าการปนเปื้อนอยู่ที่ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ในการทดลองผู้วิจัยยังคงใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงสถิติ Statistical Software Minitab (Version 18) มาช่วยใน

การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้ผลการทดลองและการแปรผลที่สร้างนัยสำคัญต่อการนำไปต่อยอดในเชิงปฏิบัติได้มากที่สุด ซึ่งผลการทดลองแสดงด้วยแผนภาพคอนทัวร์ ดังรูปที่ 5.2.3



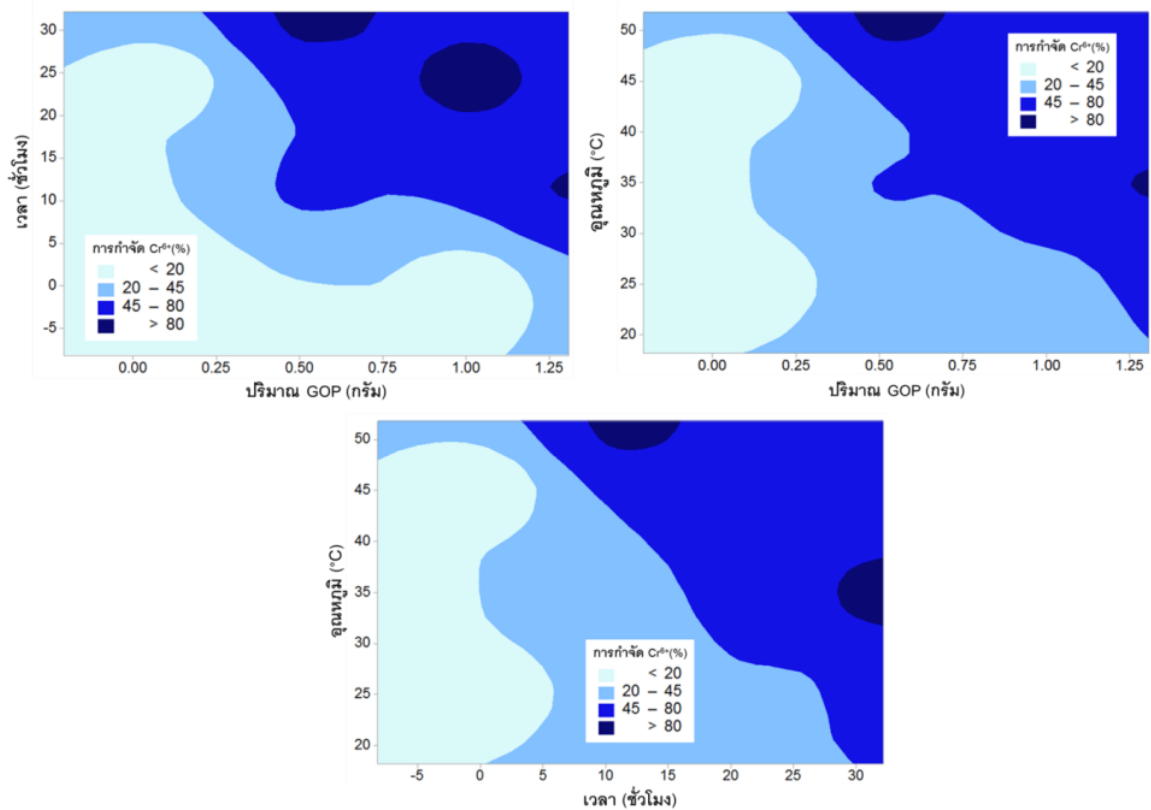
**รูปที่ 5.2.3** แผนภาพคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียของวัสดุดูดซับ GOP โดย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GOP และเวลาการดูดซับ (บนซ้าย) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (บนขวา) และอุณหภูมิการดูดซับและเวลา (ล่าง)

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียที่ความเข้มข้นประมาณ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร นั่นคือเมื่อเพิ่มวัสดุดูดซับ GOP ให้มีปริมาณมากกว่า 8 กรัมต่อลิตร ดูดซับโครเมียมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลามากกว่า 10 ชั่วโมง ผลของการดูดซับจะสูงกว่าร้อยละ 45 ในขณะที่อุณหภูมินั้นมีผลต่อการดูดซับน้อยกว่าปริมาณวัสดุดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับในการทดลองนี้

ทั้งนี้เมื่อทดลองเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียให้สูงขึ้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ GOP ไปใช้งานในกรณีที่น้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีค่าสูงกว่า 13 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีเดียวกันด้วย Statistical Software Minitab (Version 18) ผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ดังแสดงในแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 5.2.4 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นสามารถเห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้ชัดเจนขึ้น นั่นคือเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับมากกว่า 6 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการดูดซับควรจะนานกว่า 5 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซับที่มากกว่าร้อยละ 45 โดยเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมสูงขึ้น สามารถเห็นอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับได้ โดยที่อุณหภูมิมากกว่า 25 องศาเซลเซียสขึ้นไป ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำสภาวะของระบบบำบัดที่มีอยู่แล้วในโรงงานฟอกย้อมมาจำลองในห้องปฏิบัติการโดยเน้นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับโครเมียมได้แก่ อุณหภูมิ แสงแดด ลักษณะน้ำเสีย เป็นต้น สำหรับโรงงานฟอกย้อม ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจในการนำน้ำจากบ่อดักตะกอนมาจำลองสภาวะเลียนแบบ เนื่องจากบ่อดักตะกอนเป็น บ่อที่น้ำมีความขุ่นน้อย การไหลเข้าและออกของน้ำเป็นไปอย่างช้าๆ มีระบบที่สามารถเก็บกวาดตะกอนวัสดุ ดูดซับออกได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนหรือติดตั้งเพิ่มเติมเครื่องมือในบ่อ ทั้งนี้ ลักษณะของการทดลองดัง แสดงในไดอะแกรมรูปที่ 5.2.5

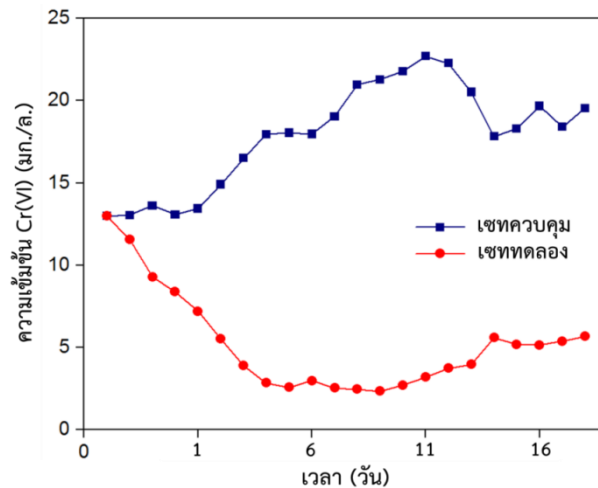
จากการทดลองข้างต้นผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.2.6 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ โครเมียมในชุดทดลองและชุดควบคุมโดยในชุดควบคุมนั้นน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนเข้มข้น 13 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ถูกเติมเข้าสู่ระบบทุกครั้งที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างด้วยปริมาตรที่เท่ากัน จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น ของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่แสดงในกราฟในชุดควบคุม พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมในระบบจะคงที่ใน ช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงที่สุดคือ 22.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ชุดทดลองซึ่งเป็นชุดที่มีวัสดุดูดซับ GOP น้ำเสียมีโครเมียมปนเปื้อน 13 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกเติมเข้าสู่ระบบเมื่อมีการเก็บตัวอย่างออกเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่า ความ เข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้ทำการใส่ GOP ลงไป โดย ช่วงเวลาที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ลดลงต่ำสุดคือหลังจากผ่านไป 4 วันโดยมีค่าความเข้มข้น ของโครเมียมเหลืออยู่เพียง 2.84 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับที่ 84.18 % ในขณะที่ GOP ยังคงมีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในช่วง 84.18 - 89.04 % ต่อเนื่องไปอีก 9 วัน จนถึง วันที่ 13 ของการเก็บตัวอย่างประสิทธิภาพการทำงานของ GOP จึงลดลงทำให้การดูดซับโครเมียม เฮกซะวาเลนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ในช่วง 68 - 70 % หลังจากเวลาผ่านไป 18 วัน จากการสังเกต ร่วมกับการวิเคราะห์จากผลการทดลองที่ผ่านมา อุณหภูมิน่าจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการทำงานในการ ดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GOP และอาจมีความเป็นไปได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ กราฟีนซึ่งมีการรายงานความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันด้วยแสงยูวี (Photocatalysis) อาจเป็น ตัวช่วยหนึ่งที่ทำให้โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียลดลงได้อย่างต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยการเร่งของ กราฟีนออกไซด์และรังสียูวีจากธรรมชาติ



รูปที่ 5.2.4 แผนภาพคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียของวัสดุดูดซับ GOP โดย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GOP และเวลาการดูดซับ (บนซ้าย) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (บนขวา) และอุณหภูมิการดูดซับและเวลา (ล่าง)



รูปที่ 5.2.5 ไดอะแกรมแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่อดักตะกอนของโรงงานฟอกย้อมโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา)



รูปที่ 5.2.6 กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียของบ่อดักตะกอนในโรงงานฟอกย้อมของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)

### 5.3 โรงงานชุบโลหะ (บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด)

บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง ตั้งอยู่ที่ ต.ท่าตูม อ.ศรีมหาโพธิ จ.ปราจีนบุรี ในนิคมอุตสาหกรรม 304 ประกอบอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ โดยมีกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยสังกะสี นิกเกิล และโครเมียม ซึ่งในการเข้าเยี่ยมโรงงานนี้ผู้วิจัยไม่ได้รับอนุญาตให้บันทึกภาพภายใน จึงมีเพียงลักษณะภายนอกโรงงานแสดงไว้ดังรูปที่ 5.3.1



รูปที่ 5.3.1 ลักษณะภายนอกของโรงงาน ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง

จากการเข้าชมสำรวจและจากการสัมภาษณ์ระบบบำบัดของโรงงานชุบโลหะ จึงได้ทราบว่าโรงงานชุบโลหะแห่งนี้พบว่าโรงงานประเภทชุบโลหะขนาดใหญ่ส่วนมากจะมีการใช้ระบบบำบัดน้ำทางเคมีเป็นอันดับแรก ก่อนที่จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ก่อนปล่อยสู่ระบบบำบัดรวมของนิคมอุตสาหกรรม หรือก่อนที่จะถูกปล่อยสู่ระบบบำบัดรวมของโรงงานอุตสาหกรรม (ในกรณีที่โรงงานมีกระบวนการผลิตอื่นๆ ร่วมนอกเหนือจากการชุบโลหะ) โดยหลังจากการเข้าสำรวจในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ขอเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดส่วนต่างๆ

ของโรงงานเพื่อนำมาใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการรวมถึงการนัดหมายเข้าเก็บตัวอย่างในครั้งถัดไป ทั้งนี้ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าพารามิเตอร์บางส่วนที่น่าสนใจ ดังแสดงในตารางที่ 5.3.1

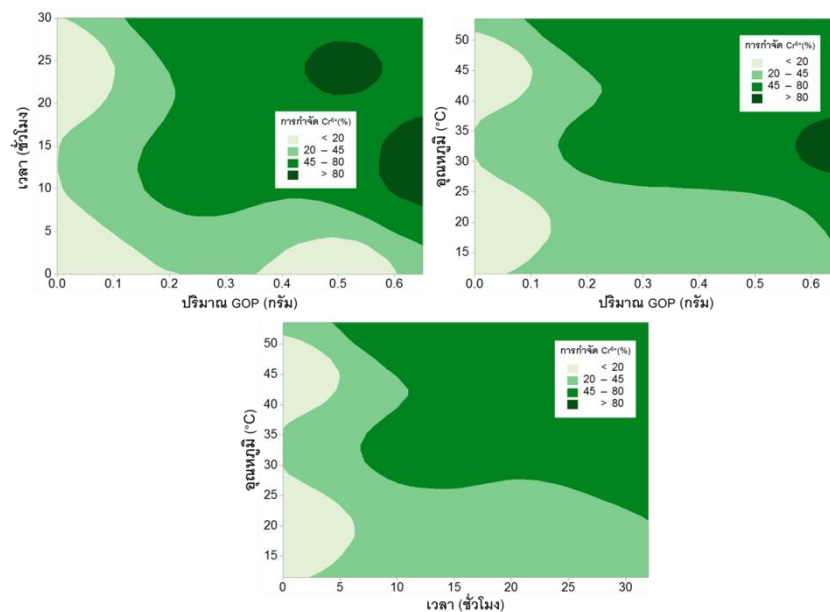
จากการพิจารณาลักษณะของน้ำเสียจากระบบบำบัดในแต่ละส่วนที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างมาจากโรงงานซุบโลหะพบว่า บ่อตกตะกอนน่าจะมีประสิทธิภาพสูงต่อการนำวัสดุตกตะกอนไปใช้มากที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าการปนเปื้อนของโครเมียม รวมทั้งค่าตะกอนแขวนลอยที่น้อยกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และลักษณะการไหลเข้าของน้ำเสียที่มีอัตราคงที่และมีระดับน้ำคงที่สม่ำเสมอ ทั้งนี้ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่พบสามารถแก้ไขได้โดยง่ายเพียงการกรองผ่านตะแกรงละเอียด หรือผ่านชั้นผ้า ซึ่งจะทำให้ระดับตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียลดลงมากกว่า 90 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความขุ่นจากสารแขวนลอยของน้ำเสียในบ่อตกตะกอนของโรงงานซุบโลหะสามารถถูกกำจัดได้ด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องมีการเติมสารสร้างตะกอนแต่อย่างใด ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการกรองในเบื้องต้นจนมีระดับความขุ่นน้อยกว่า 1.50 NTU จะถูกนำไปทดสอบการดูดซับโครเมียมด้วย GOP โดยใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงสถิติ Statistical Software Minitab (Version 18) มาช่วยในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำ GOP มาใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานซุบโลหะ

**ตารางที่ 5.3.1** ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อต่าง ๆ ของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานซุบโลหะ

| รายการวิเคราะห์ | หน่วย | ผลวิเคราะห์          |                     |
|-----------------|-------|----------------------|---------------------|
|                 |       | บ่อหลังบำบัดโครเมียม | บ่อตกตะกอนก่อนปล่อย |
| pH              | -     | 11.6                 | 4.2                 |
| TSS             | mg/L  | 170                  | 130                 |
| TDS             | mg/L  | 712                  | 612                 |
| COD             | mg/L  | 112                  | 16                  |
| Arsenic (As)    | mg/L  | 0.001                | < 0.001             |
| Mercury (Hg)    | mg/L  | 0.002                | 0.002               |
| Cadmium (Cd)    | mg/L  | < 0.001              | < 0.001             |
| Lead (Pb)       | mg/L  | < 0.01               | < 0.01              |
| Chromium (Cr)   | mg/L  | 0.32                 | 7.04                |

เพื่อศึกษาความสามารถการดูดซับของวัสดุดูดซับ GOP ในการบำบัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากบ่อตกตะกอนของโรงงานซุบโลหะผู้วิจัยได้ใช้ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเป็นพื้นฐานในการทดลองเนื่องจากลักษณะน้ำเสียของโรงงานซุบโลหะ แม้จะผ่านการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีแล้วแต่การปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียยังคงมีอยู่โดยเฉพาะในบ่อตกตะกอน ซึ่งมีค่าสูงประมาณ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทุกครั้งของ

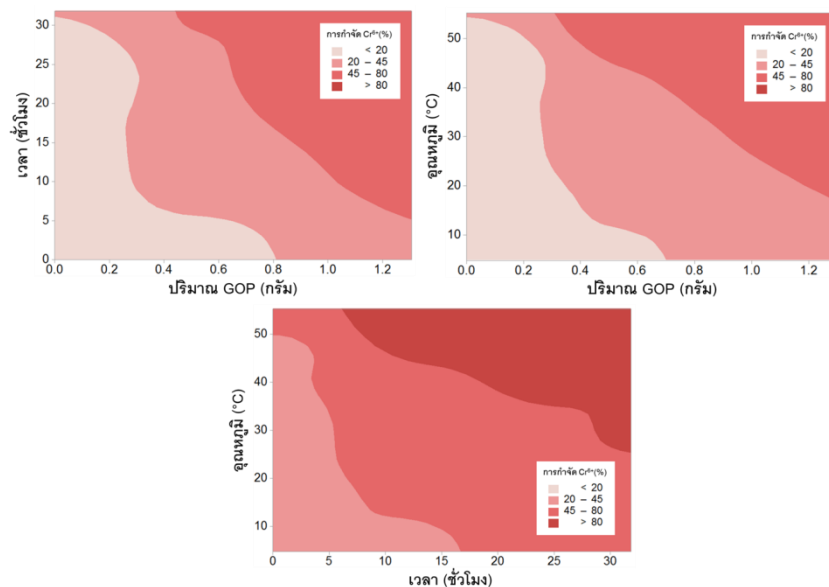
การทดลองผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์การปนเปื้อนของโครเมียมที่พบก่อน แล้วจึงทำการทดลองตามการทดลองที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบการวิจัยเชิงสถิติที่กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยให้ความสนใจปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ GOP เวลาการดูดซับ และอุณหภูมิการดูดซับ เช่นเดียวกับการศึกษาในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมซึ่งผลการทดลองจะถูกแสดงในรูปแบบของแผนภาพคอนทัวร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.3.2 เมื่อปริมาณวัสดุดูดซับมากกว่า 8 กรัมต่อลิตร และเวลาที่ใช้ในการดูดซับและเวลาการดูดซับมากกว่า 10 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงกว่าร้อยละ 45 ในขณะที่อุณหภูมิการดูดซับแสดงความเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับเช่นกัน คือเมื่ออุณหภูมิการดูดซับสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงกว่าร้อยละ 45



**รูปที่ 5.3.2** แผนภาพคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียของวัสดุดูดซับ GOP โดย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GOP และเวลาการดูดซับ (บนซ้าย) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (บนขวา) และอุณหภูมิการดูดซับและเวลา (ล่าง)

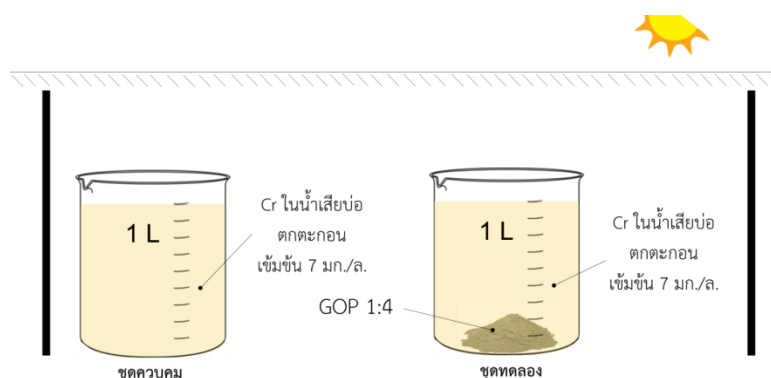
ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้เพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมให้สูงขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุดูดซับ GOP ในกรณีที่การปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียสูง โดยผู้วิจัยได้เพิ่มค่าความเข้มข้นของโครเมียมลงในน้ำเสียจากบ่อดักตะกอนจาก 7 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอาศัยข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม ค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่พบได้ในระบบบำบัดของโรงงานชุบโลหะ โดยผลการทดลองสามารถแสดงเป็นแผนภาพคอนทัวร์ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.3.3 การเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยได้ชัดเจนขึ้นได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิการดูดซับ เป็นต้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับมากกว่า 14 กรัมต่อลิตร โดยให้มีระยะเวลาการดูดซับ 10 ชั่วโมงขึ้นไปในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ประสิทธิภาพ

การดูดซับเพิ่มสูงขึ้น และยังพบว่าหากเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับให้สูงขึ้น 25-50 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้อย่างชัดเจน

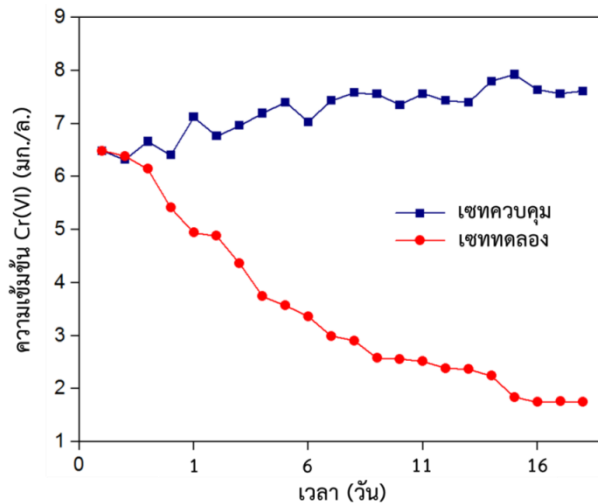


**รูปที่ 5.3.3** แผนภาพคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียของวัสดุดูดซับ GOP โดย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ GOP และเวลาการดูดซับ (บนซ้าย) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (บนขวา) และอุณหภูมิการดูดซับและเวลา (ล่าง)

ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง ผู้วิจัยได้นำสถานะของระบบบำบัดที่มีอยู่แล้วในโรงงานซูโหละมาจำลองในห้องปฏิบัติการโดยบ่อดกตะกอนเป็นส่วนที่มีความน่าสนใจและมีความน่าจะเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้โดยเน้นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับโครเมียมดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ทั้งนี้ลักษณะของบ่อดกตะกอนของโรงงานซูโหละนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะของบ่อดกตะกอนในโรงงานฟอกย้อมเนื่องจากมีความขุ่นน้อย การไหลเข้าและออกของน้ำคงที่ มีระบบที่สามารถเก็บกวาดตะกอนวัสดุดูดซับออกได้ ลักษณะของการทดลองดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 5.3.4



**รูปที่ 5.3.4** ไดอะแกรมแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่อดกตะกอนของโรงงานซูโหละโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา)



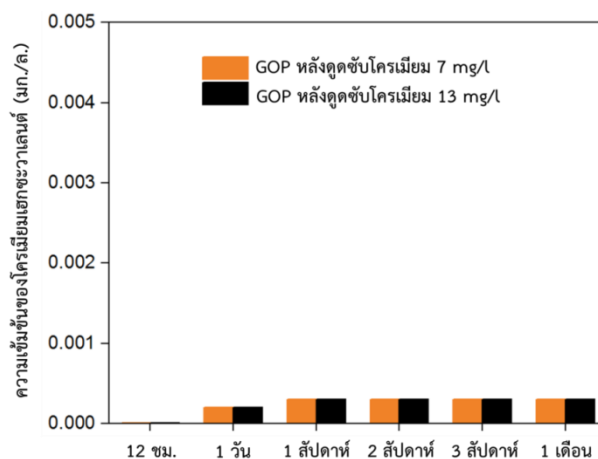
รูปที่ 5.3.5 กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียของบ่อตกตะกอนโรงงานซูบโลหะของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)

จากผลการทดสอบความสามารถการดูดซับโครเมียมของ GOP (รูปที่ 5.3.5) ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมปนเปื้อน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมในชุดทดลองและชุดควบคุม ความเข้มข้นของโครเมียมในชุดควบคุมมีลักษณะความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเติมน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าสู่ระบบทุกครั้งที่ทำให้การเก็บตัวอย่างน้ำออกจากระบบ ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยความเข้มข้นสูงที่สุดของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่สะสมในระบบสามารถมีค่าสูงถึง 7.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ชุดทดลองซึ่งเป็นชุดที่มีวัสดุดูดซับ GOP พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในระบบจำลองลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงหลังจากใส่ GOP ลงไป โดยช่วงเวลาที่ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ลดลงต่ำสุดยังไม่ปรากฏแม้จะผ่านช่วงเวลาของการดูดซับไปมากกว่า 16 วัน โดยประสิทธิภาพการดูดซับในวันที่ 18 วัสดุดูดซับ GOP ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้สูงถึงร้อยละ 76.91 ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าปริมาณ GOP ที่ใช้ในการทดสอบ (10 กรัมต่อลิตร) เป็นปริมาณที่มากพอที่จะใช้ในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียในบ่อตกตะกอนของโรงงานซูบโลหะที่มีการปนเปื้อน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้นานกว่า 18 วัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของบ่อตกตะกอนของโรงงานซูบโลหะตั้งอยู่ในที่ร่ม แตกต่างจากบ่อตกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมซึ่งคาดว่าจะการลดลงของโครเมียมอันเนื่องมาจากปฏิกิริยารีดักชันด้วยแสงยูวีน่าจะไม่มีผลต่อการลดลงของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์อย่างมีนัยสำคัญ การลดลงของโครเมียมดังกล่าวน่าจะมาจากการทำงานผ่านกระบวนการดูดซับของ GOP เป็นหลัก

#### 5.4 การศึกษาการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เพิ่มหัวข้อการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการจัดการ GOP ที่ผ่านการใช้งานในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยทำการทดสอบความสามารถในการชะ

ละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งาน ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่าง GOP ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม (ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร) และโรงงานชุบโลหะ (ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร) มาใช้ในการทดลอง โดยการทดลองนี้ได้นำ GOP ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมมาแล้วเป็นเวลา 18 วัน มาทำการทดลองโดยใช้น้ำเป็นตัวชะละลาย ซึ่งจะทำการเก็บตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 12 และ 24 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกชะละลายออกมาจากตัวอย่าง GOP ที่ใช้ดูดซับโครเมียมแล้ว ผลการศึกษาแสดงดังกราฟรูปที่ 5.4.1



รูปที่ 5.4.1 กราฟแสดงการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำ

จากผลการศึกษาการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จาก GOP ที่ใช้ดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ โดยใช้น้ำเป็นตัวชะละลายและวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกชะออกมาได้เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง 1 วัน 1-3 สัปดาห์ และ 1 เดือน ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ในช่วง 0-0.0003 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโครเมียมที่สามารถพบได้ในน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นของโครเมียมต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งนับเป็นปริมาณการชะละลายที่ต่ำมาก จึงรายงานเป็นค่าที่ไม่สามารถตรวจพบได้

## 5.5 การศึกษาต้นทุนการผลิต GO และ GOP

ต้นทุนการผลิตวัสดุดูดซับเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่ผู้วิจัยให้ความสำคัญเนื่องจากต้นทุนการผลิตจะมีผลต่อการพิจารณาใช้วัสดุดูดซับดังกล่าวในการลดการปนเปื้อนของโครเมียมในระบบจริง สำหรับการผลิตวัสดุดูดซับ GOP เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตแล้ว สามารถจำแนกลักษณะของต้นทุนการผลิตได้เป็นประเภทต่าง ๆ (ตารางที่ 5.5.1) ดังนี้

1. ต้นทุนคงที่ (Total fixed cost) หมายถึง ต้นทุนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับกิจการในระยะสั้น ซึ่งจากการพิจารณากระบวนการผลิตแล้ว ส่วนใหญ่ต้นทุนนี้จะมาจากการลงทุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการผลิต

2. ต้นทุนแปรผัน (Total variable cost) หมายถึง ต้นทุนที่มีการแปรผันไปตามระดับของกิจกรรม ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นต้นทุนที่มีการเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนหรือกำลังการผลิตซึ่งจะเป็นต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบเป็นส่วนใหญ่

#### ตารางที่ 5.5.1 ตารางแสดงต้นทุนการผลิตประเภทต่าง ๆ แยกตามกระบวนการผลิต

| ประเภทต้นทุน                     | กระบวนการผลิต      | มูลค่า (บาท) |
|----------------------------------|--------------------|--------------|
| ต้นทุนคงที่ (เครื่องมือ/อุปกรณ์) | การผลิต GOP        | 308,050.00   |
| ต้นทุนค่าวัตถุดิบ                | การผลิต GOP 1 กรัม | 7            |
| ต้นทุนค่าน้ำและค่าไฟฟ้า          | การผลิต GOP 1 กรัม | 4            |

ดังนั้นต้นทุนที่ใช้ในการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ออกไซด์ผสมพลาสติก โดยคำนวณจากผลรวมของค่าต้นทุนผันแปร และค่าพลังงานที่ใช้เป็นหลักโดยไม่คิดต้นทุนคงที่ การสังเคราะห์ต่อ 1 กรัมวัสดุ ซึ่งจะได้ต้นทุนการสังเคราะห์วัสดุประมาณ 11 บาทต่อกรัม

### 5.6 สรุปผล อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

5.6.1. การศึกษาวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุชุดขับ GOP มาทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม 2 ประเภท ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้คัดเลือกโรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ เป็นอุตสาหกรรมต้นแบบ ซึ่งอุตสาหกรรมทั้ง 2 ประเภทนี้มีการใช้สารเคมีที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้การขอความร่วมมือโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 2 ประเภทนั้นค่อนข้างพบอุปสรรคเนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีการควบคุมการปล่อยตามกฎหมาย ดังนั้นโรงงานขนาดเล็กจึงมีความไม่สะดวกใจในการเข้าร่วมโครงการ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกเฉพาะโรงงานที่ยินดีให้ความร่วมมือในการศึกษาครั้งนี้

5.6.2 การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ทางคณะผู้วิจัยได้การปรับเปลี่ยนวิธีการศึกษา โดยนำโปรแกรมทางสถิติมาใช้ในการสร้างแผนการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Method) ประเภท Central Composite Design มาช่วย เพื่อให้สามารถทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมและเป็นไปได้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้จริงได้มากที่สุด

5.6.3 การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานชุบโลหะ ผู้วิจัยได้ทำการเติมโครเมียมลงในน้ำเสียจริงที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงงาน เพื่อให้ได้ลักษณะน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนในปริมาณที่สูงขึ้นและสามารถเป็นตัวแทนการปนเปื้อนของโครเมียมจริงได้ เนื่องจากค่าการปนเปื้อนจริงของโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อให้

การทดลองนี้สามารถเป็นตัวแทนการบำบัดการปนเปื้อนโครเมียมได้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปปรับใช้งานจริงต่อไป

5.6.4 จากผลการทดลองพบว่า อุดมภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับด้วย GOP โดยเฉพาะอุดมภูมิสูง ดังนั้น จึงอาจเป็นผลดีในการออกแบบระบบดูดซับโดยไม่ต้องจำกัดหรือควบคุมอุดมภูมิให้ต่ำ แต่สามารถใช้การดูดซับที่อุดมภูมิห้องหรือสูงกว่าอุดมภูมิห้องขึ้นไปหรืออุดมภูมิกลางแจ้งได้ ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการนำไปปรับใช้จริงต่อไป

5.6.5 จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวัสดุดูดซับ GOP ผลการศึกษาผ่านการทดลองการขึ้นรูปและการเคลือบบนพื้นผิวต่าง ๆ (รูปที่ 5.6.1) พบว่า GOP ให้ประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุดเมื่ออยู่ในรูปแบบผง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาวิธีการที่เป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำ GOP มาใช้ ซึ่งจากการปรึกษาผลการทดลองนี้ต่อคณะผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินโครงการวิจัยจึงได้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการนำ GOP ไปใช้งานในรูปแบบผง โดยให้เพิ่มเติมวิธีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ GOP ไปใช้ในระบบบำบัด และการเก็บรวบรวม GOP ออกจากระบบบำบัด ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะเสนอในข้อถัดไป



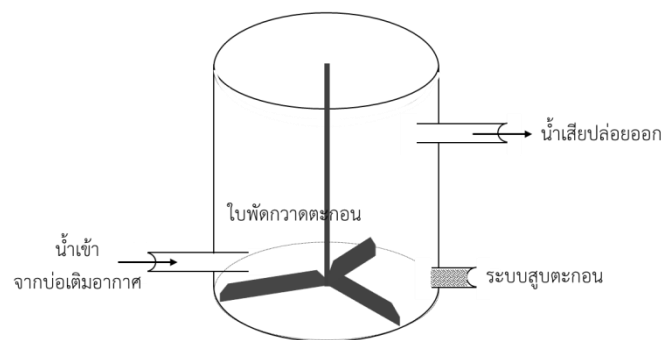
รูปที่ 5.6.1 ภาพแสดงการทดลองขึ้นรูปและวิธีการนำ GOP ไปใช้ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งเป็นหนึ่งในการศึกษาเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมที่สุดในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งาน

5.6.6 จากการพิจารณาเพื่อหาแนวทางการนำ GOP ไปใช้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นหนึ่งในคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิที่ช่วยหาวิธีการนำ GOP ไปใช้ในระบบบำบัดในรูปแบบผง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบบบำบัดของโรงงานทั้ง 2 ประเภทอีกครั้งเพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำ GOP ไปใช้ ทั้งนี้ในการศึกษาและปรึกษาผู้ดูแลระบบในเบื้องต้น บ่อตกตะกอนเป็นส่วนที่น่าจะมีความเป็นไปได้มากที่สุด เนื่องจากเป็นบ่อตกตะกอน จึงมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำนานกว่า 5 ชั่วโมง หรือสามารถควบคุมระยะเวลาการเก็บกักน้ำในบ่อ

ได้ ซึ่งหากจะแนะนำการนำ GOP ไปใช้ในบ่อดกตะกอน ผู้วิจัยจึงมีคำแนะนำต่อการนำไปใช้แยกตามลักษณะของบ่อดกตะกอนในโรงงานทั้ง 2 แห่ง ดังนี้

#### การนำวัสดุดูดซับไปใช้ในบ่อดกตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

เป็นบ่อดกตะกอนที่ใช้ในระบบบำบัดแบบเติมอากาศซึ่งเป็นระบบขนาดใหญ่ มีการบำบัดหลักคือระบบเติมอากาศซึ่งมีการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ อาศัยการล้นของน้ำจากบ่อดกตะกอนออกสู่รางเพื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงทำให้การไหลเข้าของน้ำจากบ่อเติมอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำบางส่วนไหลออกจากระบบ ซึ่งลักษณะการไหลเข้าระบบของน้ำเสียลักษณะนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้บ่อดกตะกอนดังกล่าวจะมีระบบกวาดตะกอนอยู่กันบ่ออยู่แล้ว ดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 5.6.2



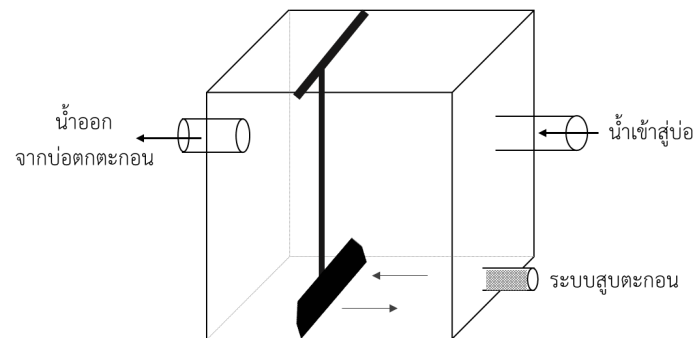
**รูปที่ 5.6.2** ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับบ่อดกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมเพื่อให้เหมาะกับการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งานในการกำจัดคาร์บอนของโครเมียม

เมื่อพิจารณาการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้สำหรับการบำบัดโครเมียมในบ่อดกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อม คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบลักษณะน้ำและประสิทธิภาพการทำงานที่เป็นไปได้ของวัสดุดูดซับ GOP ในการกำจัดโครเมียมที่มีความเข้มข้น 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 13 วันเพื่อให้ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมลดลงต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหลังจากทำการใส่ GOP ลงในบ่อดกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ความเข้มข้นของโครเมียมจะลดลงอยู่ที่ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำเสียในบ่อสามารถถูกปล่อยสู่รางรองรับน้ำได้ ทั้งนี้หากความเข้มข้นของโครเมียมในระบบต่ำกว่า 13 มิลลิกรัมต่อลิตร วัสดุดูดซับจะสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้นโดยเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง สามารถทำการปล่อยน้ำเสียจากบ่อดกตะกอนได้ ทั้งนี้การทำงานของวัสดุดูดซับจะสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง 13 วัน แม้มีความเข้มข้นในบ่อดกตะกอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน ผู้ดูแลระบบจะสามารถเก็บกวาดตะกอน GOP ออกจากระบบได้ด้วยวิธีการเดียวกันกับการกวาดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยใบพัดแล้วทำการสูบลมออกจากบ่อ ลักษณะของบ่อดกตะกอนและใบพัดกวาดตะกอน รวมทั้งเส้นทางการสูบลมออกจากระบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.6.2

#### การนำวัสดุดูดซับไปใช้ในบ่อดกตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ

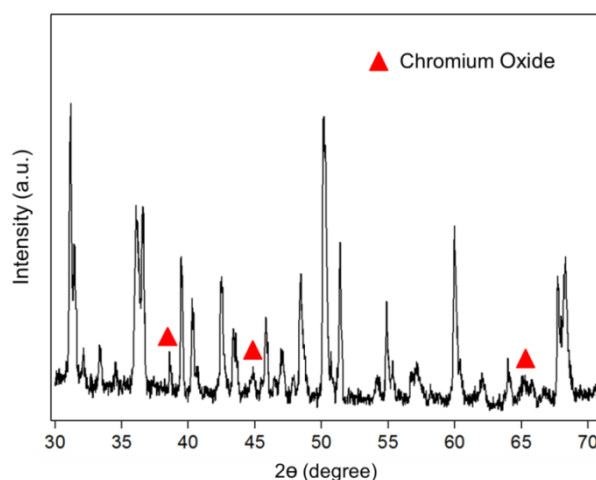
บ่อดกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานชุบโลหะ มีด้วยกัน 2 บ่อ เป็นบ่อดกตะกอนน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดทางเคมีในการบำบัดขั้นต้นมาก่อนจึงทำให้ลักษณะของน้ำในบ่อมีความขุ่นน้อย ปริมาณน้ำเสียมีปริมาณน้อยกว่าบ่อดกตะกอนจากระบบบำบัดแบบเติมอากาศ

สำหรับการนำวัสดุชุบ GOP ไปใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย นั้น จากการสัมภาษณ์ผู้ดูแลระบบบำบัดและจากการพิจารณาผลการทดลองในระบบจำลองพบว่า ปอตตะกอนในโรงงานชุบโลหะอาจจะต้องมีการปรับเวลาในการเก็บกักน้ำในปอตตะกอนให้เหมาะกับระบบการดูดซับด้วยตัวดูดซับ GOP และต้องเพิ่มระบบการเก็บกวาดตะกอนรวมทั้งท่อสูบน้ำออกจากระบบ โดยระยะเวลาการเก็บกักน้ำที่เหมาะสมต้องมากกว่า 10 ชั่วโมง และต้องเพิ่มระบบเก็บกวาดตะกอนซึ่งอาจมีลักษณะดังรูปที่ 5.6.3



**รูปที่ 5.6.3** ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับปอตตะกอนของโรงงานชุบโลหะเพื่อให้เหมาะกับการนำวัสดุชุบ GOP ไปใช้งานในการกำจัดการปนเปื้อนของโครเมียม

5.6.7 การหาวิธีการกำจัดวัสดุชุบ GOP ที่ใช้งานแล้วให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยมากที่สุด ผู้วิจัยได้เพิ่มการศึกษาส่วนนี้เพื่อทดสอบความปลอดภัยของ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้วิธีการทดสอบการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัสดุชุบในน้ำที่มีค่าความเป็นกลาง โดยใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลา 1 เดือน ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในบทที่ 4 (หัวข้อ 4.3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไม่ถูกชะละลายออกจากวัสดุชุบ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทั้งนี้ผู้วิจัยได้มีการยืนยันการพบโครเมียมออกไซด์ (CrO) ในตัวอย่าง GOP ที่ผ่านการใช้งานด้วยการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5.6.4



**รูปที่ 5.6.4** กราฟ XRD แสดงองค์ประกอบเชิงผลึกของโครเมียมออกไซด์ในตัวอย่างวัสดุชุบ GOP ที่ใช้งานแล้ว

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยืนยันได้ว่าโครเมียมที่ถูกดูดซับจากน้ำเสียอาจอยู่ในฟอร์มของโครเมียมออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกอยู่กับวัสดุดูดซับ GOP จึงเป็นไปได้ว่าโครเมียมในฟอร์مدังกล่าวไม่สามารถถูกชะละลายออกจากวัสดุดูดซับ GOP ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าโครเมียมในฟอร์มไดโครเมตไอออน ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) ที่อยู่ในน้ำเสียเมื่อถูกดูดซับโดย GOP ทำให้เกิดการจับตัวกับฟังก์ชันบนพื้นผิวของ GOP เกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในรูปเชิงผลึก ซึ่งคาดว่าวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วนี้มีแนวโน้มที่เป็นไปได้ในการนำไปกำจัดด้วยวิธีการจัดการวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปฝังกลบ หรือการนำไปใช้งานต่อ

5.6.8 ผู้วิจัยมีความสนใจในการนำวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ในรูปแบบของการกำจัดกิ่งใช้ซ้ำ หลังจากทำการศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมพบว่า การนำ GOP ซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุประเภทคาร์บอน (แกรไฟต์ออกไซด์) และซีเมนต์ (ปูนปลาสเตอร์) โดยพิจารณาจากการทำคอนกรีตผสมเสร็จที่เผยแพร่โดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทย การนำ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นส่วนผสมของการเทโครงสร้างหรือพื้นคอนกรีตภายใต้โครงสร้างอาคารน่าจะมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของการผสมคอนกรีตเพื่องานโครงสร้าง จากลักษณะส่วนผสมและการนำไปใช้งานที่ได้ทำการศึกษา หากวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้แล้ว จะถูกนำไปใช้ผสมในสัดส่วนเล็กน้อยของงานโครงสร้างที่ไม่ได้ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น การผสมคอนกรีตสูตร 1 : 3 : 5 น่าจะเป็นการนำไปใช้ประโยชน์ที่มีความเป็นไปได้ ทั้งนี้อาจจะต้องมีการศึกษาการนำไปใช้ในเบื้องต้นก่อน

## บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ (GOP) ที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับโดยการพัฒนาระบวนการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์จากวิธีการของทัวร์ส (Tours' method) และการดัดแปลงอัตราส่วนระหว่างแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ตลอดจนวิธีการผสมวัสดุทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับ GOP ที่ได้จากการขยายผลการผลิตในการศึกษานี้พบว่า วิธีการสร้างวัสดุดูดซับสามารถลดต้นทุนการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์จากเดิมได้ 36.76 % โดยประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุดูดซับ GOP ถูกนำมาศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำเสียจากระบบบำบัดของโรงงาน 2 ประเภท ได้แก่ โรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ ด้วยอาศัยการออกแบบการทดลองเชิงสถิติช่วยในการออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการและการแปรผลการทดลอง ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการนำ GOP ไปใช้ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียดังกล่าว สภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของ GOP น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 13-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ GOP 6-8 กรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการดูดซับ 5-10 ชั่วโมงขึ้นไป และในอุณหภูมิที่มากกว่า 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่การดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ สภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของ GOP สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นโครเมียมตั้งแต่ 7-40 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ GOP 8-14 กรัมต่อลิตร ด้วยเวลาการดูดซับมากกว่า 10 ชั่วโมงขึ้นไป และในอุณหภูมิที่มากกว่า 30 องศาเซลเซียส เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาทดสอบการทำงานของ GOP ในน้ำเสียจากระบบบำบัดจำลองของบ่อตกตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม (ความเข้มข้นของโครเมียม 13 มิลลิกรัมต่อลิตร) และโรงงานชุบโลหะ (ความเข้มข้นของโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการทำงานของ GOP ในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 18 วัน การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม GOP มีประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุดในวันที่ 5 (85.76 %) และการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ GOP มีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (76.91 %) ทั้งนี้การทดสอบการชะละลายของโครเมียมจาก GOP ที่ถูกใช้งานแล้วแสดงให้เห็นว่า GOP ไม่ถูกชะละลายออกจากวัสดุดูดซับ GOP ภายหลังการใช้งาน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการหาวิธีการในการจัดการวัสดุดังกล่าว หรือใช้ประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุผสมในการก่อสร้าง หรือการกำจัดด้วยการฝังกลบได้

## Abstract

This research aimed to study for enhancing adsorption ability of composite material graphite oxide and plaster (GOP) from jewelry industry waste. From the modification of graphite waste to obtain graphite oxide compositing with plaster through compositing technique that GOP was produced. The potential of GOP for hexavalent chromium removal was investigated in the previous of our study. However, this study the GOP adsorbent was improved to up-scaling the production of GOP which could reduce 36.7 % from the previous cost. With the up-scaled GOP adsorbent, the adsorption efficiency in order to optimize GOP for Cr removal from textile and electroplating wastewater was re-investigated using Central Composite design, response surface method (RSM). The optimizing condition for using GOP towards Cr removal from textile wastewater (13-50 mg/L) could be efficient by 6-8 g/L of GOP dosage within 5-10 hour retention time at  $> 25^{\circ}\text{C}$ . Likewise, for electroplating wastewater that contaminated 7-40 mg/L Cr, the optimum condition was proactive at the dosage of 8-14 g/L for 10 hour and under the temperature of  $25-40^{\circ}\text{C}$ . In addition, imitations of sedimentation pond of wastewater treatment system from both industries were examined in order to observe GOP adsorption capacity. After 18 days of Cr adsorption, the adsorbent showed the highest capacity on Cr adsorption on the 5<sup>th</sup> day (85.76 %) for textile wastewater treatment, while the electroplating wastewater (7 mg/L Cr) GOP could continuously decreased Cr contamination in wastewater in which the highest capacity of GOP appeared to be at the 18<sup>th</sup> day (76.91 %). The Cr leaching test from used GOP at the last section resulted un-leachable Cr that possibly formed crystalline with GOP. The result indicated potentials of used GOP towards further applications and ability for safety disposal.

## สารบัญ

| บทที่          | หัวข้อ                                                         | หน้า      |
|----------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>บทที่ 1</b> | <b>บทนำ</b>                                                    | <b>1</b>  |
|                | 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา                                 | 2         |
|                | 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย                                    | 3         |
|                | 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                                          | 3         |
|                | 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ                        | 4         |
|                | 1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม        | 4         |
|                | 1.6 แผนงานโครงการ                                              | 5         |
| <b>บทที่ 2</b> | <b>การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง</b>                  | <b>8</b>  |
|                | 2.1 แกรไฟต์ออกไซด์และวิธีการสังเคราะห์                         | 9         |
|                | 2.2 ปูนพลาสติก                                                 | 12        |
|                | 2.3 โครเมียม                                                   | 13        |
|                | 2.3.1 คุณสมบัติของโครเมียม                                     | 13        |
|                | 2.3.2 การปนเปื้อนของโครเมียมในอากาศ                            | 13        |
|                | 2.3.3 การปนเปื้อนของโครเมียมจากกระบวนการชุบโครเมียม            | 13        |
|                | 2.3.4 การปนเปื้อนของโครเมียมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม               | 16        |
|                | 2.4 วัสดุดูดซับโลหะ (Heavy metal absorbent)                    | 22        |
|                | 2.5 วัสดุดูดซับแกรไฟต์-ซีเมนต์                                 | 25        |
|                | 2.6 พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)              | 27        |
|                | 2.7 การใช้วิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) กับงานด้านการดูดซับ | 29        |
| <b>บทที่ 3</b> | <b>วิธีการดำเนินการวิจัย</b>                                   | <b>35</b> |
|                | 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง                                   | 36        |
|                | 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแกรไฟต์                                  | 36        |
|                | 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมพลาสติก                                  | 36        |
|                | 3.2 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide synthesis)     | 37        |
|                | 3.3 การเตรียมวัสดุผสมแกรไฟต์ออกไซด์-พลาสติก                    | 37        |
|                | 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ                                  | 37        |
|                | 3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม                  | 38        |
|                | 3.6 การศึกษากระบวนการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้น                  | 38        |
|                | 3.6.1 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม              | 38        |
|                | 3.6.2 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ              | 39        |
|                | 3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม                 | 40        |
|                | 3.7.1 การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม                        | 40        |

| บทที่             | หัวข้อ                                                                                                     | หน้า      |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                   | 3.7.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมชุบโลหะ               | 40        |
| 3.8               | ทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมในสภาวะ<br>จำลองระบบจริง                     | 41        |
|                   | 3.8.1 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมฟอกย้อม                         | 41        |
|                   | 3.8.2 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมชุบโลหะ                         | 41        |
| 3.9               | การทดสอบการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้ว                                              | 42        |
| <b>บทที่ 4</b>    | <b>ผลการทดลอง</b>                                                                                          | <b>43</b> |
| 4.1               | โรงงานฟอกย้อมบริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทยจำกัด (มหาชน).                                                    | 44        |
|                   | 4.1.1 การเข้าพบผู้ประกอบการ                                                                                | 44        |
|                   | 4.1.2 ลักษณะน้ำเสียจากบริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด                                                   | 46        |
|                   | 4.1.3 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานฟอกย้อม                                                 | 49        |
|                   | 4.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงาน<br>ฟอกย้อม                         | 53        |
|                   | 4.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอก<br>ย้อมจากระบบจำลอง                   | 58        |
| 4.2               | โรงงานชุบโลหะ บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด                                                | 62        |
|                   | 4.2.1 การเข้าพบผู้ประกอบการ                                                                                | 62        |
|                   | 4.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด                                     | 64        |
|                   | 4.2.3 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ                                                          | 66        |
|                   | 4.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงาน<br>ชุบโลหะ                         | 68        |
|                   | 4.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบ<br>โลหะจากระบบจำลอง                   | 75        |
| 4.3               | การศึกษาการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับ                                                                | 78        |
| 4.4               | การศึกษาต้นทุนการผลิต GO และ GOP                                                                           | 79        |
|                   | 4.4.1 ต้นทุนคงที่การสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP                                                              | 80        |
|                   | 4.4.2 ต้นทุนผันแปรที่ใช้สังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP                                                          | 81        |
| <b>บทที่ 5</b>    | <b>สรุปผล อุปสรรคและข้อเสนอแนะ</b>                                                                         | <b>83</b> |
| <b>บรรณานุกรม</b> |                                                                                                            | <b>91</b> |
| <b>ภาคผนวก</b>    |                                                                                                            |           |
|                   | ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผล<br>ที่ได้รับตลอดโครงการ | 99        |

| บทที่ | หัวข้อ                                                                                            | หน้า |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|       | ข ตารางเปรียบเทียบผลผลิต (Output) ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริง<br>ในรอบ 15 เดือน | 103  |
|       | ค ตารางวิเคราะห์คุณภาพน้ำ                                                                         | 106  |
|       | ง เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงาน                                                    | 110  |
|       | จ คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร                                                                   | 113  |
|       | ฉ รายละเอียดการประดิษฐ์                                                                           | 117  |

## สารบัญตาราง

| บทที่          | หัวข้อ                                                                                                                     | หน้า |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>บทที่ 1</b> | <b>บทนำ</b>                                                                                                                |      |
| ตารางที่       | 1.1 แผนงานโครงการ                                                                                                          | 5    |
| <b>บทที่ 2</b> | <b>การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง</b>                                                                              |      |
| ตารางที่       | 2.1 คุณลักษณะน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ                                                                                   | 16   |
| ตารางที่       | 2.2 ลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ                                                                | 21   |
| ตารางที่       | 2.3 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ                                                                          | 22   |
| ตารางที่       | 2.4 วิธีการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีทางเคมี                                                            | 23   |
| ตารางที่       | 2.5 ตารางสรุปผลการใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุอื่นกับคอมโพสิตอื่นมีความสามารถในการดูดซับโลหะโครเมียม                                | 26   |
| ตารางที่       | 2.6 ตารางรวบรวมการศึกษาระบบการดูดซับด้วยการใช้วิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) กับงานด้านการดูดซับ                         | 30   |
| <b>บทที่ 3</b> | <b>วิธีการดำเนินการวิจัย</b>                                                                                               |      |
| ตารางที่       | 3.1 ตารางแสดงปัจจัยที่นำมาใช้ในการกำหนดสภาวะการทดลอง                                                                       | 39   |
| <b>บทที่ 4</b> | <b>ผลการทดลอง</b>                                                                                                          |      |
| ตารางที่       | 4.1 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อเดิมอากาศ บ. โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด                                                   | 48   |
| ตารางที่       | 4.2 ตารางรวบรวมการศึกษากการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานฟอกย้อม                                                        | 50   |
| ตารางที่       | 4.3 ตารางแสดงความเข้มข้นของโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดต่าง ๆ ของ บ. โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด                    | 54   |
| ตารางที่       | 4.4 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อตกตะกอน บ. โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด                                                     | 59   |
| ตารางที่       | 4.5 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อกำจัดไออนของเหล็ก บ. ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด                                | 65   |
| ตารางที่       | 4.6 ตารางจัดกลุ่มช่วงความเข้มข้นของโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะและความเหมาะสมต่อการใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดโครเมียม | 68   |
| ตารางที่       | 4.7 ตารางแสดงต้นทุนคงที่                                                                                                   | 80   |
| ตารางที่       | 4.8 ตารางแสดงต้นทุนผันแปรในการสังเคราะห์วัสดุ GO                                                                           | 81   |
| ตารางที่       | 4.9 ตารางแสดงต้นทุนผันแปรค่าสาธารณูปโภคในการสังเคราะห์วัสดุ GO                                                             | 82   |
| <b>บทที่ 5</b> | <b>ข้อเสนอแนะและอุปสรรค</b>                                                                                                |      |
| ตารางที่       | 5.1 ตารางแสดงสูตรผสมคอนกรีตและการใช้งาน                                                                                    | 89   |

## สารบัญรูปภาพ

| บทที่          | หัวข้อ                                                                                                                                                                                                         | หน้า |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>บทที่ 2</b> | <b>การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง</b>                                                                                                                                                                  |      |
| รูปที่ 2.1     | โครงสร้างของแกรไฟต์ออกไซด์ และช่วงของระยะห่างของโครงสร้างโมเลกุลแนวระนาบ และระยะห่างระหว่างพันธะ C — C                                                                                                         | 9    |
| รูปที่ 2.2     | แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ ด้วยวิธีการของ Tour                                                                                                                                                     | 11   |
| รูปที่ 2.3     | ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของปูนปลาสเตอร์ (ก) ก่อนให้ความร้อนจนแห้ง และ (ข) หลังให้ความร้อนจนแห้ง (M. Ganesapillai และคณะ. 2008)                                                                                   | 12   |
| รูปที่ 2.4     | กระบวนการผลิตของโรงงานประกอบกิจการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง นิกเกิล และโครเมียม (ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. 2550)                                                                       | 14   |
| รูปที่ 2.5     | กระบวนการผลิตของโรงงานประกอบกิจการชุบโครเมียมบนเหล็ก (ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. 2550)                                                                                               | 15   |
| รูปที่ 2.6     | กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า (ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า. 2551)                                                                                                          | 18   |
| รูปที่ 2.7     | ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว                                                                                                                                                                      | 28   |
| รูปที่ 2.8     | ภาพ contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว                                                                                                                                                               | 28   |
| รูปที่ 2.9     | ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว [ดัดแปลงจาก: กัลยาณี เต็งพงศธร (2554)]                                                                                                                         | 29   |
| <b>บทที่ 4</b> | <b>ผลการทดลอง</b>                                                                                                                                                                                              |      |
| รูปที่ 4.1     | รูปภาพแสดงการเข้าพบผู้ประกอบการโรงงานฟอกย้อมผ้า จ.สมุทรสาคร                                                                                                                                                    | 45   |
| รูปที่ 4.2     | รูปภาพแสดงความร่วมมือในการวิจัยกับหน่วยงานภายนอก และแผนกควบคุมคุณภาพของโรงงาน                                                                                                                                  | 45   |
| รูปที่ 4.3     | รูปภาพแสดงการเข้าเยี่ยมชมกระบวนการผลิตส่วนต่าง ๆ ของโรงงาน                                                                                                                                                     | 46   |
| รูปที่ 4.4     | รูปภาพแสดงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม                                                                                                                                                                     | 47   |
| รูปที่ 4.5     | รูปภาพแสดงไดอะแกรมของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม                                                                                                                                                          | 48   |
| รูปที่ 4.6     | แสดงการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยสารส้มด้วยสภาวะที่ได้จากการศึกษาด้วยแผนภาพพื้นที่ผิว (Response Surface Method)                                                                                        | 52   |
| รูปที่ 4.7     | แผนภาพคอนทัวร์แสดงการลดลงของความขุ่น เมื่อปริมาณสารส้มเปลี่ยนแปลงไป (บน) กับความเร็วในการกวนเร็วเปลี่ยนแปลงไป (ล่าง)                                                                                           | 53   |
| รูปที่ 4.8     | กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ และ(ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับในการดูดซับโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสีย 13 มิลลิกรัมต่อลิตร | 56   |
| รูปที่ 4.9     | กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ และ(ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับในการดูดซับโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสีย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร | 57   |

| บทที่       | หัวข้อ                                                                                                                                                                         | หน้า |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 4.10 | ไดอะแกรมแสดงลักษณะบ่อตกตะกอนที่ของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อม บ. พิมพีย้อมผ้าไทย                                                                                                  | 59   |
| รูปที่ 4.11 | ภาพแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่อตกตะกอนของ โรงงานฟอกย้อมโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา) โดย ก) ไดอะแกรมแสดงการทดลอง และ ข) รูปภาพการทดลอง | 60   |
| รูปที่ 4.12 | กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียของบ่อตกตะกอนในโรงงานฟอกย้อม ของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)                                        | 62   |
| รูปที่ 4.13 | ลักษณะภายนอกของโรงงาน ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง                                                                                                                                     | 63   |
| รูปที่ 4.14 | รูปภาพแสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ที่มา: <a href="http://www.trix.co.th/2015/product.html">http://www.trix.co.th/2015/product.html</a> )      | 63   |
| รูปที่ 4.15 | รูปภาพแสดงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานซูปโละ                                                                                                                                      | 64   |
| รูปที่ 4.16 | รูปภาพแสดงไดอะแกรมของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานซูปโละ                                                                                                                           | 65   |
| รูปที่ 4.17 | กราฟแสดงระยะเวลาการตกตะกอนของน้ำเสียจากโรงงานซูปโละ                                                                                                                            | 66   |
| รูปที่ 4.18 | แสดงขั้นตอนการลดตะกอนและตะกอนแขวนลอยจากน้ำเสียโรงงานซูปโละ                                                                                                                     | 67   |
| รูปที่ 4.19 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ GOP ที่ต่างกับกับปริมาณตัวดูดซับ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (บน) และปริมาณมล สารที่ดูดซับ (ล่าง)             | 69   |
| รูปที่ 4.20 | กราฟผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและ ความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GO:P เมื่อมีอัตราส่วน GO:P ต่างกัน                          | 70   |
| รูปที่ 4.21 | กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการ ดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ และ(ล่าง) อุณหภูมิและเวลา การดูดซับ                       | 72   |
| รูปที่ 4.22 | กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการ ดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ และ(ล่าง) อุณหภูมิและเวลา การดูดซับ                       | 74   |
| รูปที่ 4.23 | ไดอะแกรมแสดงลักษณะบ่อตกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานซูปโละ                                                                                                                         | 76   |
| รูปที่ 4.24 | ภาพแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่อตกตะกอนของ โรงงานซูปโละโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา) โดย ก) ไดอะแกรมแสดงการทดลอง และ ข) รูปภาพการทดลอง  | 77   |
| รูปที่ 4.25 | กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียของบ่อตกตะกอน โรงงานซูปโละของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)                               | 78   |
| รูปที่ 4.26 | กราฟแสดงการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำ                                                                                                                                 | 79   |
| บทที่ 5     | ข้อเสนอแนะและอุปสรรค                                                                                                                                                           |      |

| บทที่      | หัวข้อ                                                                                                                                         | หน้า |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 5.1 | ภาพแสดงการทดลองขึ้นรูปและวิธีการนำ GOP ไปใช้ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งเป็นหนึ่งในการศึกษาเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมที่สุดในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งาน | 85   |
| รูปที่ 5.2 | ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับปัดกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมเพื่อให้เหมาะกับการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งานในการกำจัดคาร์บอนของโครเมียม                    | 86   |
| รูปที่ 5.3 | ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับปัดกตะกอนของโรงงานซูบลูโหะเพื่อให้เหมาะกับการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งานในการกำจัดคาร์บอนของโครเมียม                   | 87   |
| รูปที่ 5.4 | กราฟ XRD แสดงองค์ประกอบเชิงผลึกของโครเมียมออกไซด์ในตัวอย่างวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้ว                                                       | 88   |

บทที่ 1

---

บทนำ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมนับเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่มีปริมาณมากและมีคุณสมบัติทางเคมีที่ชัดเจน เช่น มีความเป็นกรดสูง หรือมีความเป็นด่างสูง หรือมีการปนเปื้อนของโลหะและโลหะหนักจากกระบวนการผลิต เป็นต้น ปัจจุบันกระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยทั่วไปใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมี (Physio-Chemical) ตามด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ (Biological) (S. Wang., et al. 2005) ซึ่งระบบมักเกิดปัญหาเมื่อลักษณะของน้ำเสียมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบบำบัดชีวภาพ นอกจากนี้โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนั้นถือเป็นมลพิษสำคัญที่มีความเป็นพิษไม่เพียงต่อมนุษย์แต่ยังเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดชีวภาพด้วย (S. Wang., et al. 2005) ดังนั้นการพัฒนาระบบบำบัดเพื่อลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมจึงได้รับความสนใจและถูกศึกษาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถนำไปสู่การใช้งานได้จริง ซึ่งวิธีการที่มีความเป็นไปได้และได้ถูกศึกษาอย่างต่อเนื่องว่า เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ใช้พลังงานน้อยและมีต้นทุนต่ำคือวิธีการดูดซับ (Liquid-phase adsorption) ซึ่งวิธีการนี้ไม่เพียงแต่จะสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้เท่านั้นแต่ยังสามารถลดปริมาณสีที่ปนเปื้อนและสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อีกด้วย

ปัจจุบันนี้การศึกษาวิธีการดูดซับมุ่งเน้นการนำวัสดุที่มีราคาถูก หรือวัสดุเหลือใช้ประเภทต่าง ๆ มาดัดแปลงเป็นสารดูดซับ (Absorbent) แกรไฟต์ จากการศึกษาของ Ji-Tai Li และคณะ (2006) พบว่าการดัดแปลงแกรไฟต์ด้วยวิธีการแยกชั้น (Exfoliated graphite) คาร์บอนด้วยเทคนิคโซนิเคชัน (Sonication technique) สามารถเพิ่มความเป็นรูพรุนให้แก่แกรไฟต์ ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นสารดูดซับสารโมเลกุลใหญ่ เช่น สีย้อมหรือโลหะหนัก มีประสิทธิภาพการกำจัดได้ (Removal efficiency) สูงสุด 94.05 % เมื่อมีค่าพีเอชต่ำ และในการศึกษาลักษณะเดียวกัน ซีเมนต์ (Cement) ได้ถูกศึกษาความสามารถในการตรึง (Immobilization) โลหะหนัก Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุส่วนผสม (Additives) ซีเมนต์ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมซิลิเกตหรืออะลูมิเนต (Calcium silicate, Calcium aluminate) สามารถยึดจับกับไอออนซึ่งมีวาเลนซ์เป็น 1 (Monovalent ion) หรือไอออนซึ่งมีวาเลนซ์เป็น 2 (Bivalent ions) จึงทำให้เกิดการตรึงระหว่างไอออนของโลหะหนักกับอนุภาคของซีเมนต์ได้ (Z. Giergiczny., et al. 2008) ซึ่งในการศึกษาก่อนหน้าวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับถูกนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโครเมียมให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงถึง 52.48 % โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ได้กว่า 20,000 บาทต่อกิโลกรัม นอกจากนี้จะทำให้เกิดการใช้วัสดุอย่างคุ้มค่าแล้วยังสามารถลดต้นทุนการผลิตนาโนวัสดุเช่นแกรไฟต์ออกไซด์ลงได้

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษายาผลการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์ และพลาสติกเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับในหน่วยบำบัดระดับอุตสาหกรรม โดยใช้วัตถุดิบทั้งหมด คือ แกรไฟต์และพลาสติก ที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท โอลด์มูน จำกัด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. รวบรวมและศึกษาคุณสมบัติน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ (อย่างน้อย 2 แหล่ง)
2. เพื่อหาวิธีการปรับเสถียร (Stabilization) น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบในเบื้องต้น
3. เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว ด้วยวัสดุผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก
4. พัฒนาวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก
5. เพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการนำไปใช้และเพื่อต่อยอดทางการการค้า
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของวัสดุดูดซับที่อยู่ในรูปแบบที่ถูกพัฒนาแล้ว ในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. รวบรวมน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกักสุดท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะหรือสู่สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์)
3. ศึกษาการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH, Turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก
4. ทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน
5. ศึกษาและทดสอบวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก

6. ทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งานและสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

7. ทดสอบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการพัฒนาในรูปแบบต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. สร้างองค์ความรู้ที่ได้จากการทดลองทางห้องปฏิบัติการมาศึกษาเพิ่มเติมให้กลายเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประโยชน์ในการบำบัดมลสารที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

2. ลดมลพิษทางดิน น้ำ และอากาศ ที่อาจเกิดจากเก็บและกำจัดของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

3. ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากภาคอุตสาหกรรมและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย

4. สร้างความตระหนักในการนำวัสดุที่เหลือใช้มาเตรียมเป็นวัสดุดูดซับมลสาร เป็นการประหยัดต้นทุนในการหาวัตถุดิบและลดปริมาณของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

5. พัฒนาศักยภาพของนักวิจัยรุ่นใหม่ต่อการทำงานวิจัยด้านการพัฒนาวัสดุขั้นสูงสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีให้หน่วยงาน องค์กรหรือบริษัทเอกชนที่สนใจเพื่อนำไปขยายสเกลประยุกต์ใช้งานและต่อยอดทางธุรกิจ

#### 1.5 กรอบแนวคิดของการวิจัยและขั้นตอนในการวิจัยในภาพรวม

1. ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทดสอบวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก

2. ติดต่อประสานงานและขอรวบรวมน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกักสุดท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะหรือสู่สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง

3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH, Conductivity และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์)

4. ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH, Turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก

5. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน

6. ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ ออกไซด์และพลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งานและสามารถ นำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

7. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการพัฒนาด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย อุตสาหกรรม

## 1.6 แผนงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานโครงการ

| เดือนที่ | กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ผลที่ได้รับ                                                                                                                                                                                                                                  |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-2      | 1. ศึกษา ทบทวนวรรณกรรมและทดสอบ วิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก<br>2. ติดต่อประสานงานและขอรวบรวมน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกัก สุกท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะหรือ สู่สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง<br>3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็น องค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH และความเข้มข้นของโครเมียม เฮกซะวาเลนต์)<br>4. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1 | 1. วิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ ออกไซด์<br>2. น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็น องค์ประกอบจากโรงงานอุตสาหกรรม อย่างน้อย 2 แห่ง<br>3. คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็น องค์ประกอบ<br>4. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 |
| 3-6      | 5. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH และ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5. คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็น องค์ประกอบ (ต่อ)                                                                                                                                                                   |

| เดือนที่ | กิจกรรม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ผลที่ได้รับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | <p>ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์)<br/>(ต่อ)</p> <p>6. ศึกษา ทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH, Turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการ ดูดซับด้วยตัวดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก</p> <p>7. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน</p> <p>8. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2</p> | <p>6. วิธีการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรม</p> <p>7. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว</p> <p>8. รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2</p>                                                                                                                                                             |
| 7-12     | <p>9. ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งานและสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้</p> <p>10. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม</p> <p>11. จัดทำบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร วิชาการนานาชาติ</p>                                                                                                                                                  | <p>9. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว (ต่อ)</p> <p>10. วิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการนำไปใช้</p> <p>11. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการพัฒนาด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม</p> |

| เดือนที่ | กิจกรรม                    | ผลที่ได้รับ                                                                        |
|----------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|          | 12. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ | 12. ร่างบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร วิชาการนานาชาติ<br>13. รายงานฉบับสมบูรณ์ |

## บทที่ 2

---

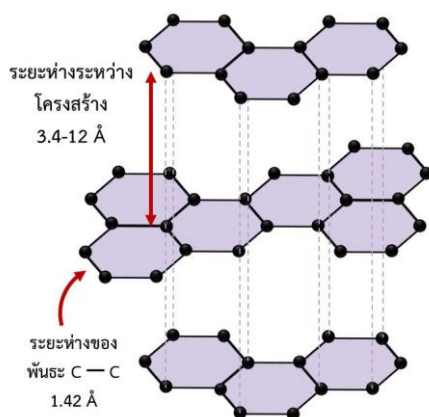
# การทบทวนวรรณกรรม/ สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แกรไฟต์ออกไซด์และวิธีการสังเคราะห์

แกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) เรียกอีกชื่อหนึ่งคือ แกรฟิติกออกไซด์ (Graphitic oxide) หรือ แกรฟิติกแอซิด (Graphitic acid) เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนที่ได้จากการออกซิไดซ์แกรไฟต์ด้วยออกซิไดซ์เชิงเอเจนที่รุนแรง (Strong oxidizer) ซึ่งสารประกอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองถึงน้ำตาลอ่อน โดยมีสัดส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจนอยู่ระหว่าง 2.1–2.9 ซึ่งเป็นช่วงที่ชั้นแกรไฟต์นั้นเกิดมีระยะห่าง (รูปที่ 2.1) ซึ่งระยะห่างของโครงสร้างโมเลกุลในแนวราบนี้จะอยู่ในช่วง 3.4 ถึง 12 Å ทั้งนี้การทำให้แกรไฟต์หลุดลอกเป็นชั้นหรือ Exfoliation คือขั้นตอนที่ใช้ในการขยายชั้นของแกรไฟต์ในระนาบแนวตั้งให้เพิ่มขึ้นเป็นหลายร้อยเท่า ทำให้เกิดเป็นวัสดุที่มีความฟู ความหนาแน่นต่ำ และสามารถทนความร้อนได้ (Chung. 1987) แกรไฟต์ออกไซด์เป็นที่รู้จัก และถูกนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 และได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกรไฟต์ออกไซด์ และช่วงของระยะห่างของโครงสร้างโมเลกุลแนวระนาบ และระยะห่างระหว่างพันธะ C — C

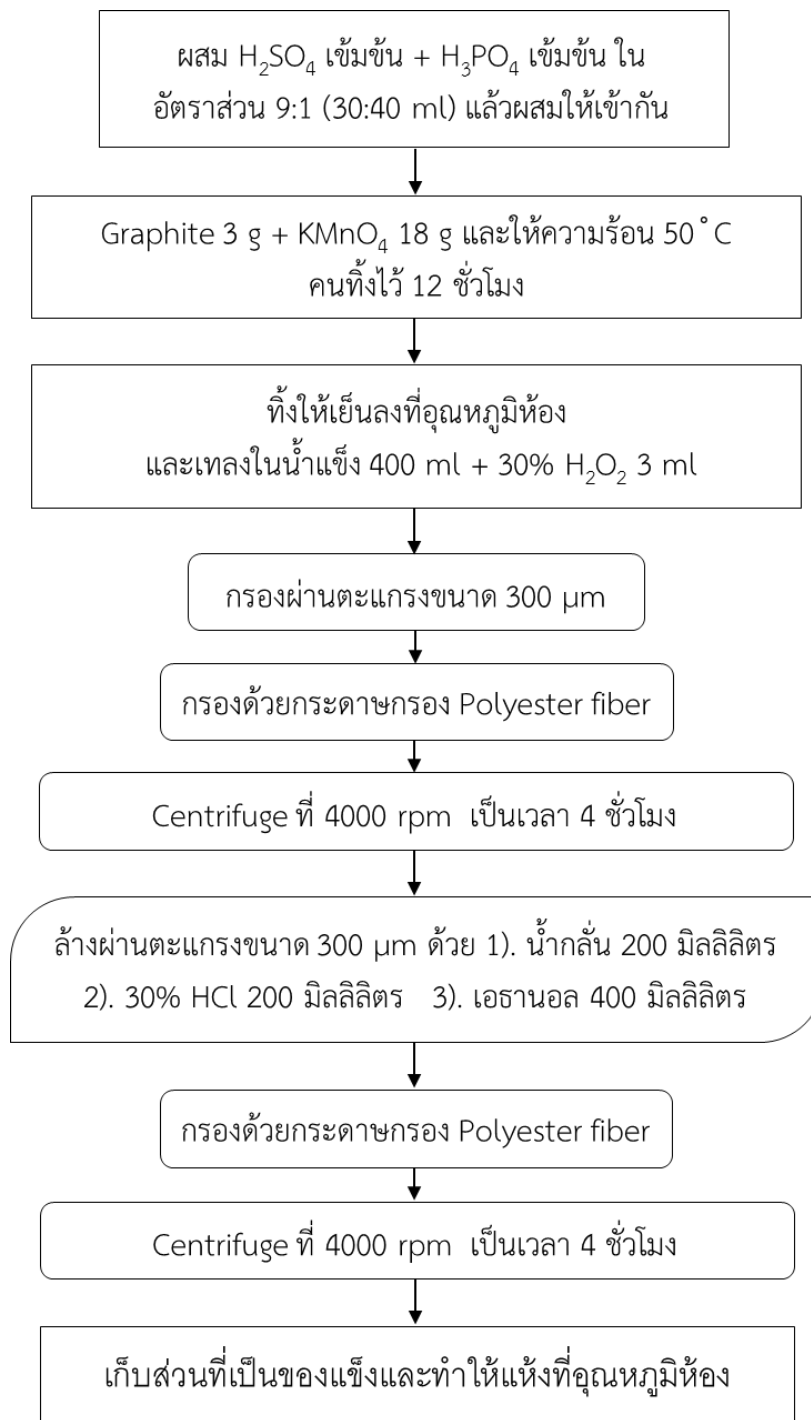
แกรไฟต์ออกไซด์จัดอยู่ในประเภทสารประกอบ Nonstoichiometric ที่มีสัดส่วนของ C : O : H ต่ำสุดคือ 6 : 2.33 : 1.2 และสัดส่วนมากที่สุดคือ 6 : 3.7 : 2.83 (Scholz and Boehm. 1969) ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวจะไม่ตายตัวขึ้นอยู่กับวิธีการสภาวะขณะที่ทำการออกซิไดซ์ จึงทำให้แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้มีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างแตกต่างกัน ซึ่งการเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์แต่ละวิธีก็จะให้ผลที่แตกต่างกันไปอีก อันเนื่องมาจากขนาดของอนุภาคแกรไฟต์ตั้งต้น ระยะเวลาที่ปล่อยให้สารเกิดปฏิกิริยาต่อกัน และรายละเอียดอื่น ๆ ในระหว่างขั้นตอนของการเตรียม (Buchsteiner., et al. 2006) โดยสรุปแล้วแกรไฟต์ออกไซด์คือ วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ

ประกอบด้วยชั้นของแกรไฟน์ที่ถูกออกซิไดซ์ (Bannov.,et al. 2014) ทำให้แกรไฟต์ออกไซด์มีคุณสมบัติเด่น คือ มีความชอบน้ำ สามารถละลายน้ำได้สมบูรณ์ อันเนื่องมาจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันจำนวนมาก (Functional groups) กับน้ำ เกิดเป็นประจุลบอยู่บนพื้นผิวของแกรไฟต์ออกไซด์แต่ละชั้น ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างชั้นของแกรไฟต์เกิดเป็นระยะห่างระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของชั้นแกรไฟต์ในแนวระนาบ ซึ่งเรียกระยะห่างนี้ว่า Interplanar spacing โดยสามารถวัดระยะห่างนี้ได้ในหน่วยอังสตรอม (°A) จึงทำให้ได้สารละลายแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำในรูปของคอลลอยด์ที่มีความเป็นอิเล็กโทรไลต์ต่ำมีสถานะเป็นต่างเล็กน้อย (Buchsteiner.,et al. 2006; Wang.,et al. 2008)

หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดระยะห่างระหว่างโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นชั้น ๆ ของแกรไฟต์ออกไซด์ อันเนื่องมาจากการผลักกันของประจุลบที่ติดอยู่บนผิวของแผ่นแกรไฟต์ (Electrostatic) โดยเป็นขั้นตอนสำคัญของการได้มาซึ่งแกรไฟน์ออกไซด์ และนับเป็นคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุชนิดนี้คือการเป็น “สารตั้งต้น” หรือ “Precursor” ของการผลิตแกรไฟน์ออกไซด์นั่นเอง เพราะเมื่อทำให้แกรไฟต์ออกไซด์กระจายตัวในน้ำพร้อมกับการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonication) ด้วยระยะเวลาที่นานพอจะทำให้ได้แกรไฟน์ออกไซด์หลุดลอกออกมา (Bannov.,et al. 2014) นอกจากนี้แกรไฟต์ออกไซด์ยังมีคุณสมบัติเด่น ๆ อีกหลายประการ เช่น สามารถรับแรงดัดได้ (Compressibility) มีความยืดหยุ่น (Resilience) ทนความร้อน (Thermal stability) และ ทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) (Kang.,et al. 2002) แกรไฟต์ออกไซด์ยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น นำมาใช้ทำปะเก็น เบ้าหลอมโลหะ (Ishiguro.,et al. 1981) ฉนวนกันความร้อน วัสดุคอมโพสิตกันไฟ วัสดุคอมโพสิตเรซิน และขั้วไฟฟ้า (Sykam.,et al. 2014) เป็นต้น

สำหรับการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ในการศึกษานี้ ได้เลือกใช้การดัดแปลงแกรไฟต์ให้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการของ Tours โดยเริ่มต้นจากการเตรียมกรดผสมเข้มข้น  $H_2SO_4 / H_3PO_4$  ในอัตราส่วน 9 : 1 (360 : 40 มิลลิลิตร) ตั้งสารละลายที่เตรียมไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งผงแกรไฟต์หนัก 3 กรัม ผสมกับผง  $KMnO_4$  หนัก 18 กรัม ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องปั่นสารละลายด้วยความเร็วประมาณ 300 รอบต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง และนำสารผสมที่ได้เติมลงในน้ำแข็งประมาณ 400 มิลลิลิตร และเติม 30 %  $H_2O_2$  ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จากนั้นทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร แล้วกรองสารผสมด้วยกระดาษกรอง Whatman NO. 2 ด้วยปั๊มสุญญากาศ จากนั้นทำการล้างตะกอนที่กรองได้ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตร ตามด้วย 30 % HCl ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และเอทานอลปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยทำการล้างด้วยเอทานอลจำนวน 2 รอบ จากนั้นนำไปตากให้แห้งในสภาพทั่ว ที่อุณหภูมิห้อง และทำการเก็บแกรไฟต์ออกไซด์ไว้ในขวดก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะต่อไป ทำการเปลี่ยนแปลงผงแกรไฟต์ตั้งต้น ดังนี้ 3.5, 4, 5, 6 และ 10 กรัม โดยสัดส่วนของสารที่ใช้

ในการสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ คงเดิมเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของแกรไฟต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (รูปที่ 2.2)

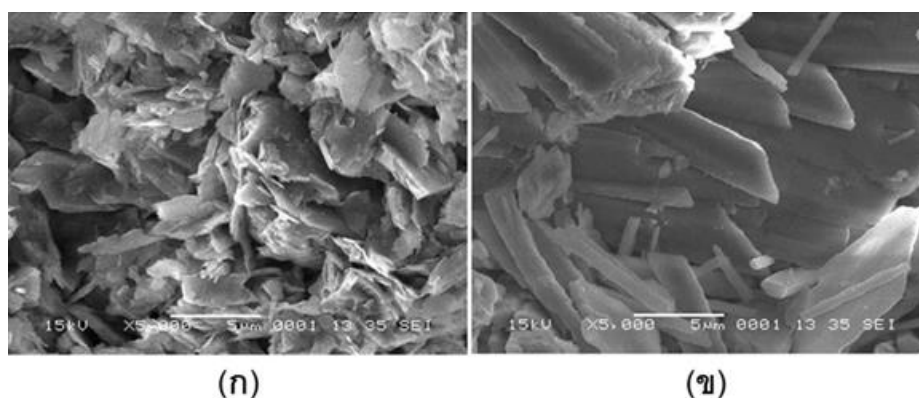


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ ด้วยวิธีการของ Tours

## 2.2 ปูนปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์เป็นยิปซัมชนิดหนึ่ง เรียกว่า Calcium sulfate hemihydrate ( $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งมีความอ่อนตัวและสามารถขึ้นรูปได้เมื่อมีความชื้น และจะมีความแข็งตัวเมื่อความชื้นหมดไป (Encyclopaedia Britannica, 2015) ในทางโครงสร้างทางเคมีปูนปลาสเตอร์มีความแตกต่างจากซีเมนต์เนื่องจากมีหมู่ซัลเฟตไอออนจับอยู่กับแคลเซียมไอออนด้วยพันธะไฮโดรเจน ในขณะที่ซีเมนต์มีโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของยิปซัม ในทางอุตสาหกรรมปูนปลาสเตอร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น การก่อสร้าง เซรามิก สุขภัณฑ์ เครื่องประดับ วงการทันตกรรม การทำเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น

ปูนปลาสเตอร์มีคุณสมบัติเป็นปูนปลาสเตอร์สามารถแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้ 2 ชนิด คือ Beta ( $\beta$ ) plaster และ Alpha ( $\alpha$ ) plaster โดยทั่วไปแล้วแม่พิมพ์ที่ผลิตจากปูนปลาสเตอร์นั้นมักจะผลิตจากปูนปลาสเตอร์ชนิด  $\beta$  เพราะจะมีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าปูนปลาสเตอร์ชนิด  $\alpha$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการของแม่พิมพ์ซึ่งเป็นแม่พิมพ์ที่มีความต้องการในการดูดซึมน้ำสูง (ภัทรวรรณ เฉยเจริญ. 2558)



รูปที่ 2.3 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของปูนปลาสเตอร์ (ก) ก่อนให้ความร้อนจนแห้ง และ (ข) หลังให้ความร้อนจนแห้ง (M. Ganesapillai และคณะ. 2008)

M. Ganesapillai และคณะ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนปลาสเตอร์ที่มีความชื้นโดยทำให้แห้งด้วยกระบวนการไมโครเวฟ พบว่าในสภาวะไร้ความชื้นปูนปลาสเตอร์มีความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น และสามารถมีลักษณะเป็นผลึกคริสตัลเมื่อให้ความร้อนจนมีความคงสภาพ (รูปที่ 2.3) ปูนปลาสเตอร์มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับซีเมนต์ในแง่ของการนำมาใช้เป็นวัสดุยึดเกาะ (Binder) ซึ่งคุณสมบัตินี้มีการค้นพบและใช้มานานกว่า 5000 ปี (Wikipedia. 2015) คุณสมบัติดังกล่าวไม่เพียงทำให้ทั้งซีเมนต์และปูนปลาสเตอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรมเท่านั้น ในทางทฤษฎียังอาศัยคุณสมบัติดังกล่าวในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุเหลือใช้หรือของเสียให้กลับมามี

คุณค่าได้ด้วย เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต (M. Singh และคณะ. 2002) ปรับปรุงวัสดุเคลือบให้กลายเป็นวัตถุติบในอุตสาหกรรมซีเมนต์ (Bdour, A.N. และคณะ. 2013) เป็นต้น

## 2.3 โครเมียม

### 2.3.1 คุณสมบัติของโครเมียม

โครเมียมเป็นโลหะธาตุที่มีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation) ตั้งแต่ 0 ถึง +6 สำหรับโครเมียมที่มีสถานะออกซิเดชัน 0 จะปรากฏอยู่ในรูปธาตุสารประกอบ ในขณะที่โครเมียมที่พบได้ในธรรมชาติ มักปรากฏอยู่ในรูปที่มีออกซิเดชัน +3 และ +6 คือ ไตรวาเลนต์โครเมียม ( $\text{Cr}^{+3}$ ) และ เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ( $\text{Cr}^{+6}$ ) ตามลำดับ โดยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสารประกอบเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ( $\text{Cr}^{+6}$ ) จะถูกรีดิวซ์เป็นสารประกอบไตรวาเลนต์โครเมียม ( $\text{Cr}^{+3}$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพมากกว่า (อริชัย. 2539)

### 2.3.2 การปนเปื้อนของโครเมียมในอากาศ

การปนเปื้อนของโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อมมักเกิดขึ้นจากการใช้โครเมียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งโครเมียมสามารถรั่วไหลออกจากกระบวนการผลิตโดยปนเปื้อนสู่อากาศ หรือน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานชุบโลหะ และโรงงานชุบโครเมียม โรงงานฟอกหนัง และโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น ทั้งนี้โครเมียมในบรรยากาศสามารถเกิดได้ทั้งจากธรรมชาติ โดยการพังทลายของดินหิน และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ต่าง ๆ ไฟป่า ซึ่งก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของโครเมียมได้ เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์โครเมียมให้เป็นโครเมียมที่มีวาเลนต์ 6 ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อลอยอยู่ในบรรยากาศจะค่อนข้างเสถียร แต่เมื่อรวมตัวกับสารอินทรีย์ต่าง ๆ จะกลายเป็นโครเมียมที่มีวาเลนต์ 3 สะสมในร่างกายสัตว์และพืชได้ เพื่อให้เข้าใจการปนเปื้อนของโครเมียมสู่สิ่งแวดล้อม

### 2.3.3 การปนเปื้อนของโครเมียมจากกระบวนการชุบโครเมียม

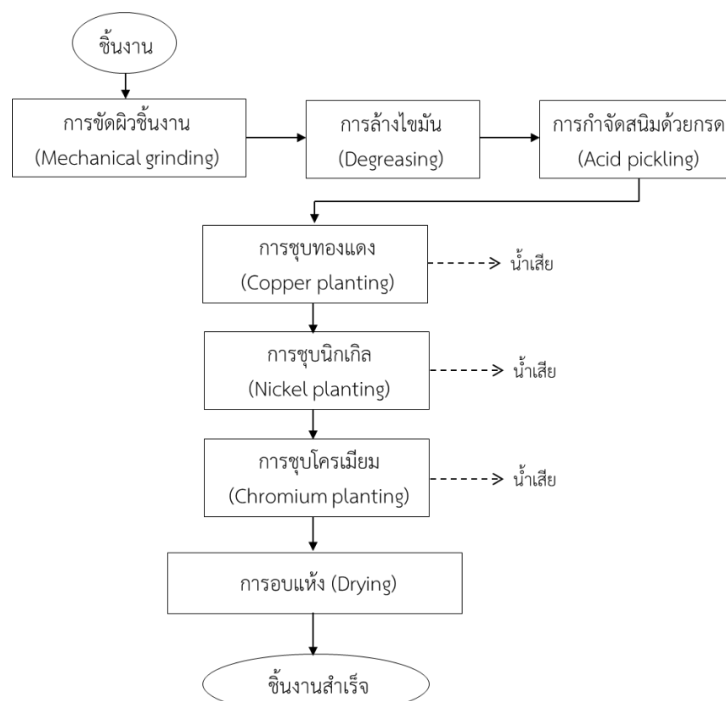
โครเมียมเป็นโลหะที่มีสีขาววาว สุกใส ไม่ขุ่นมัว ไม่ต้องขัดถูบ่อยๆ มีความผิวดำ แข็งและเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและไม่เป็นสนิม ทำให้นิยมนำโครเมียมมาใช้ชุบเคลือบบนผิวโลหะอื่น เพื่อป้องกันไม่ให้โลหะนั้นๆ เกิดสนิม นอกจากนี้ยังใช้ชุบเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน (ขวัญชีวัน วิริยะเจริญมงคล. 2549) การชุบโครเมียมนั้นสามารถทำได้ 2 ประเภท คือ

1. การชุบโครเมียมชนิดบางหรือเพื่อความสวยงาม (Decorative chromium) การชุบชนิดนี้มีจุดหมายเพื่อให้โลหะที่ถูกชุบเคลือบไม่เป็นสนิม และให้ความสวยงามกับชิ้นงานที่ชุบ รวมทั้งทนทานต่อการเสียดสีและการถูกร่อน การชุบเคลือบลักษณะนี้มักจะเป็นการชุบให้โครเมียมมีความหนาประมาณ 0.00001 ถึง 0.00003 นิ้ว หรือ 0.25 ไมครอน ถึง 0.8 ไมครอน เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งมาก ดังนั้น จึงมีความเปราะ ซึ่งในระหว่างการชุบสามารถทำให้ผิวโครเมียมที่ได้มีการแตกร้าว หรือมีรูพรุนและจากการที่มีรูพรุนนี้ เมื่อเวลาชุบโครเมียมแบบบางจึงเป็นเหตุให้

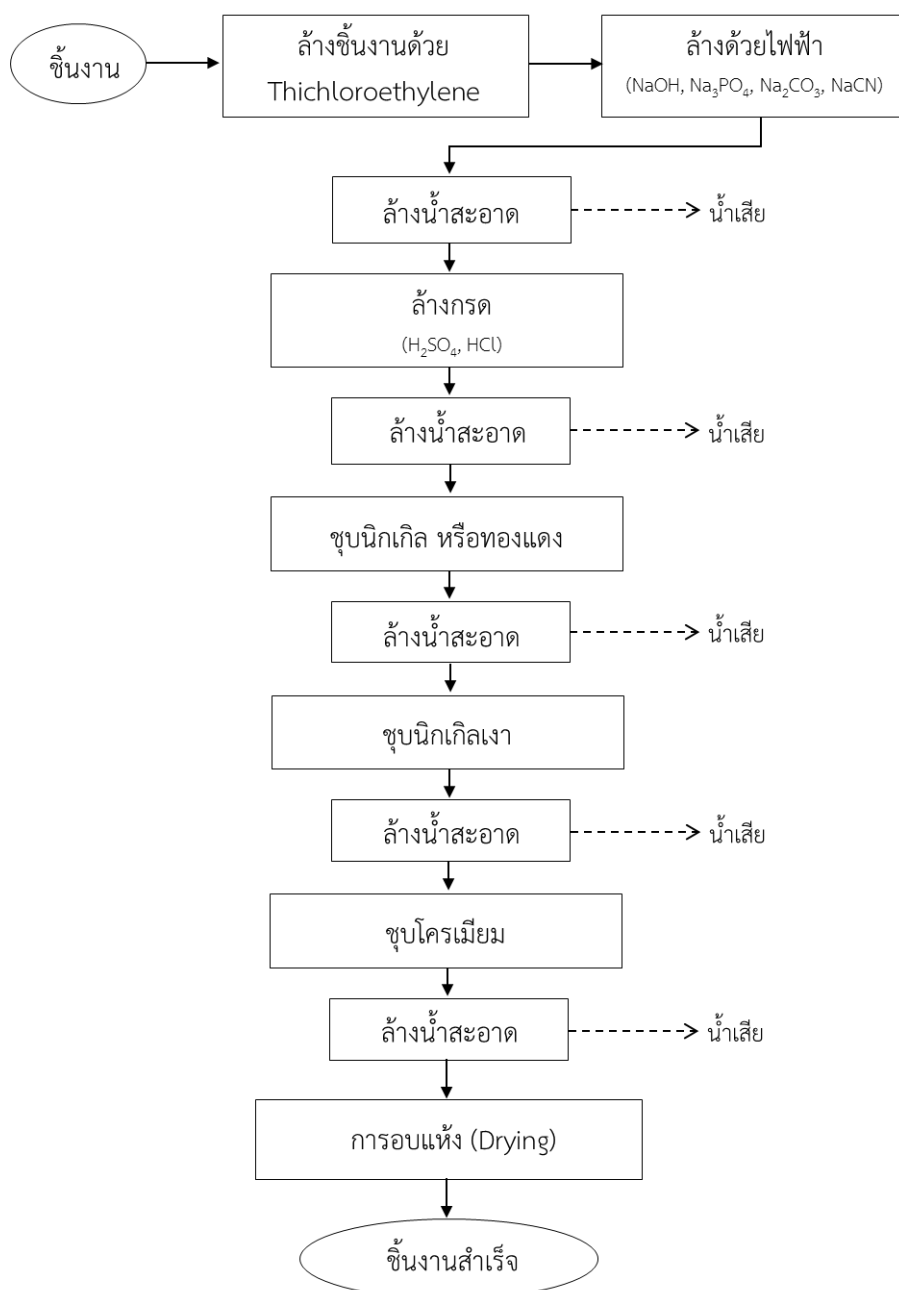
โครเมียมป้องกันสนิมไม่ได้เต็มที่ เนื่องจากสนิมจะเกิดภายในรูพรุนก่อนและแผ่ขยายออกไปได้ผิวโครเมียมทำให้โครเมียมไม่สามารถป้องกันสนิมให้โลหะที่ชุบเคลือบได้ ดังนั้น ในการชุบโครเมียมบางจึงมักจะรองพื้นด้วยทองแดงและนิกเกิลเสียก่อน

2. การชุบโครเมียมชนิดหนา (Hard Chromium หรือ Hard Chrome) การชุบชนิดนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาในผิวของโลหะนั้นๆ เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องมือเครื่องจักรที่สึกหรอไปเพราะการใช้งาน ถ้านำมาชุบโครเมียมให้หนาขึ้นแล้วนำไปเจียรระไนก็สามารถนำไปใช้งานได้ดีเหมือนเดิม หรือมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผิวโลหะนั้นมีความแข็งแรงทนต่อความร้อน ทนต่อการเสียดสี มีความผิวดำ เช่น แก้วไฮดรอลิค เป็นต้น การชุบเคลือบในลักษณะนี้ต้องใช้เวลามาก จึงได้โลหะโครเมียมที่หนาและแข็งแรง ปรกติแล้วมักจะชุบกันที่ความหนาตั้งแต่ 0.001 นิ้วขึ้นไป และโดยมากมักจะเป็นการชุบโครเมียมโดยตรงบนเหล็ก ซึ่งการชุบโครเมียมหนานบนโลหะอื่นที่ไม่ใช่เหล็กมักไม่นิยมทำ ทั้งนี้ ในขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน จะต้องมีการกัดผิวชิ้นงานโดยให้ชิ้นงานเป็นขั้วบวกซึ่งเป็นขั้นตอนที่เพิ่มมาจากขั้นตอนในการชุบผิวโครเมียมแบบบาง

ทั้งนี้ ระหว่างกระบวนการชุบโลหะด้วยโครเมียม จะมีการใช้น้ำในการล้างทำความสะอาดชิ้นงานตลอดกระบวนการ ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้จะเป็นน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนเปื้อนอยู่ เพื่อให้เห็นขั้นตอนของกระบวนการชุบและการเกิดน้ำเสียจากกระบวนการชุบ จึงได้แสดงแผนภาพกระบวนการชุบโลหะด้วยโครเมียมที่พบทั่วไปดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตของโรงงานประกอบกิจการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง นิกเกิล และโครเมียม (ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. 2550)



**รูปที่ 2.5** กระบวนการผลิตของโรงงานประกอบกิจการชุบโครเมียมบนเหล็ก  
(ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. 2550)

เพื่อให้ทราบถึงลักษณะและคุณภาพน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบโลหะจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาใช้ในการประเมินกระบวนการและความสามารถของตัวดูดซับที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งลักษณะและคุณภาพของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะเมื่อทำการวิเคราะห์น้ำที่จุดเก็บตัวอย่างต่าง ๆ กัน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ

| จุดเก็บตัวอย่าง                                         | คุณภาพน้ำเสีย    |                                | การศึกษา                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| จุดปล่อยน้ำจากระบบบำบัด (Effluent from treatment plant) | pH               | 7.18                           | Sofia A. Cavaco., et al. (2007)                                                                                                                 |
|                                                         | Cr               | 1.3 ppm                        |                                                                                                                                                 |
| จุดปล่อยน้ำจากกระบวนการผลิต (Effluent)                  | pH               | 1.3-7.8                        | จินตนา สายวรรณ (2541), เฉลิมราช วันทวิน และคณะ (2542); Jackson K., et al. (2004), Chang-Gu Lee., et al. (2016), Sofia A. Cavaco., et al. (2007) |
|                                                         | COD              | 176-864 mg/L                   |                                                                                                                                                 |
|                                                         | TDS              | 450-16,853 mg/L                |                                                                                                                                                 |
|                                                         | Cr               | 2.51-729 ppm                   |                                                                                                                                                 |
|                                                         | Cr <sup>6+</sup> | 12-19 ppm                      |                                                                                                                                                 |
|                                                         | ปริมาตรน้ำ       | 0.28-12.49 m <sup>3</sup> /day |                                                                                                                                                 |
| ถังชุบโครเมียม (Plating tank)                           | pH               | 0.50                           | M.A. Martín-Lara., et al. (2014)                                                                                                                |
|                                                         | Conductivity     | 142.000 mS/cm                  |                                                                                                                                                 |
|                                                         | TDS              | 90,400 g/L                     |                                                                                                                                                 |
|                                                         | Cr               | 42,000 ppm                     |                                                                                                                                                 |
| ถังล้างโครเมียม (Chromium rinsing)                      | pH               | 1.66-2.13                      | Chang-Gu Lee., et al. (2016), M.A. Martín-Lara., et al. (2014)                                                                                  |
|                                                         | Conductivity     | 30.00 mS/cm                    |                                                                                                                                                 |
|                                                         | TDS              | 6,118 mg/L                     |                                                                                                                                                 |
|                                                         | Cr               | 231-2136 ppm                   |                                                                                                                                                 |
| ถังล้างกรด-ด่าง (Acid and alkaline rinsing)             | pH               | 1.93                           | Chang-Gu Lee., et al. (2016), M.A. Martín-Lara., et al. (2014)                                                                                  |
|                                                         | Cr               | 2 ppm                          |                                                                                                                                                 |

#### 2.3.4 การปนเปื้อนของโครเมียมจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจไทยจากการส่งออกผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องนุ่งห่มและสิ่งทอมากกว่า 2.5 แสนล้านบาท โดยมีการส่งออกไปยังประเทศอเมริกาสูงเป็นอันดับที่ 1 รองลงมาได้แก่ ฮองกง จีน เวียดนาม ญี่ปุ่น คิดเป็นร้อยละ 3.4 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ โดยในปี 2554 ได้มีการสำรวจพบว่า เฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการจ้างงานสูงถึง 1 ล้านคน จากจำนวนโรงงานทั้งหมด 4,385 โรงงาน

ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าอุตสาหกรรมสิ่งทอจะยังคงมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องในอนาคต (กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556)

อุตสาหกรรมสิ่งทอของไทยมีโครงสร้างอุตสาหกรรมที่ความครอบคลุมตั้งแต่อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์และแต่งสำเร็จ และอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ซึ่งอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้าและตกแต่งสิ่งทอจัดเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางของอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งหมด ซึ่งจากฐานข้อมูลของกรมโรงงานมีการรายงานว่าอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ผ้า และตกแต่งสิ่งทอนั้นส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอขนาดกลางและขนาดเล็ก อุตสาหกรรมประเภทนี้ใช้น้ำปริมาณมากและเป็นอุตสาหกรรมที่อาจสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งนี้ อุตสาหกรรมดังกล่าวได้ถูกจัดให้เป็นอุตสาหกรรมตามพระตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ด้วย ได้แก่

- โรงงานลำดับที่ 22 ได้แก่ โรงงานลำดับที่ 22(1) การฟอกเส้นใย การฟอกสีเส้นใย 22(2) การฟอกสีเส้นด้าย 22(3) การฟอกย้อมสีหรือแต่งสำเร็จด้านหรือสิ่งทอ และ 22(4) การพิมพ์สิ่งทอ
- โรงงานลำดับที่ 24 โรงงานที่มีการฟอกย้อมสี ผ้าลูกไม้ หรือเครื่องนุ่งห่มที่ถักด้วยด้าย หรือเส้นใย

- โรงงานลำดับที่ 98 โรงงานซักฟอกหรือย้อมผ้าเครื่องนุ่งห่ม พรหม หรือขนสัตว์

ทั้งนี้ กรรมวิธีหรือกระบวนการผลิตหลักของอุตสาหกรรมดังกล่าว ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ (รูปที่ 2.6) มีรายละเอียด ดังนี้

#### 1) การฟอกย้อมสีเส้นใย หรือเส้นด้าย

เป็นกระบวนการทำให้สีซึมเข้าไปติดเส้นด้ายอย่างสม่ำเสมอ โดยจะเริ่มตั้งแต่การกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใย การฟอกขาว การล้าง จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการย้อม แล้วจึงผ่านการล้างด้วยน้ำสบู่ ตกแต่ง และอบแห้ง ก่อนที่จะทำการกรอด้วยลูกสูทพลาสติกเช่นเดิม ดังนั้น น้ำเสียสามารถเกิดได้จากกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว การย้อม และการล้างด้วยสบู่

#### 2) การฟอกย้อมสีสิ่งทอ

เป็นกระบวนการย้อมสีลงบนผ้าทั้งผืน โดยมีขั้นตอนการย้อมได้แก่ การเตรียมผ้าก่อนย้อม การย้อมสี และการอบแห้งและตกแต่งสำเร็จ ซึ่งในทุกขั้นตอนเกิดน้ำเสียซึ่งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการล้างและทำความสะอาด

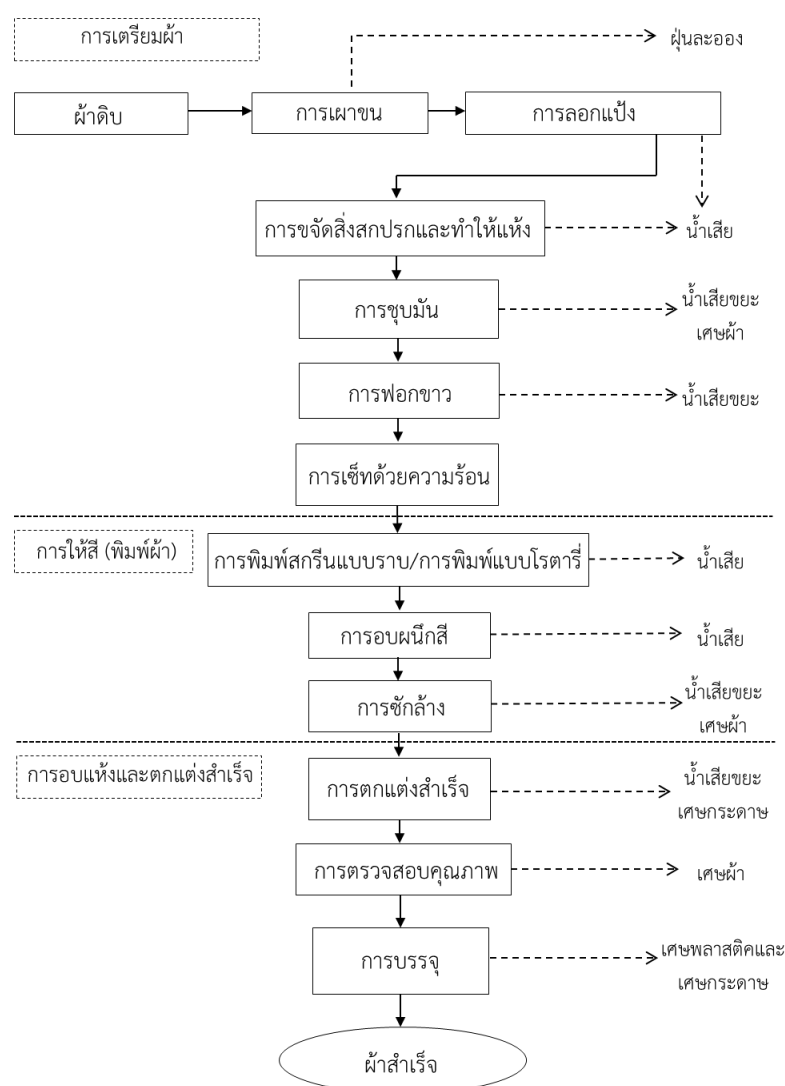
#### 3) การพิมพ์สิ่งทอ

เป็นกรรมวิธีทำให้เกิดสีเฉพาะที่โดยใช้แม่พิมพ์และสีพิมพ์ ซึ่งปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์โดยตรง หรือ Direct printing ซึ่งมีขั้นตอนประกอบด้วย การออกแบบลายผ้าพิมพ์และการกำหนดวิธีพิมพ์ การเตรียมสีพิมพ์ การเตรียมผ้าพิมพ์ การพิมพ์สีลงบนผ้า และการชักล้างและการแต่งสำเร็จ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมผ้าพิมพ์เป็นขั้นตอนที่เกิดน้ำเสียจาก

กระบวนการมากที่สุด ทั้งยังมีสารเคมีที่ใช้ในการทำสะอาดผ้า การฟอก และการล้างผ้าเจือปนในปริมาณมาก

#### 4) การซักฟอกเครื่องนุ่งห่ม

การซักฟอกเครื่องนุ่งห่มมักพบกระบวนการนี้ในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มประเภทยีนส์ ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ การทำผ้านิ่ม การฟอกสีด และ การทำให้แห้ง ทั้งนี้ ทุกกระบวนการของการฟอกนั้นสามารถก่อให้เกิดน้ำเสียได้ทั้งสิ้น โดยน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากการทำความสะอาด และน้ำยาที่มีสารคลอรีน ทั้งยังมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากใช้ความร้อนช่วยในการฟอกด้วย



**รูปที่ 2.6** กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า  
(ดัดแปลงจากคู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า. 2551)

จากการศึกษากระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า น้ำเสียจากกระบวนการต่าง ๆ นั้นมักเป็นน้ำเสียที่มีสารเคมีหลายประเภทเป็นองค์ประกอบ และหนึ่งสารเคมีปนเปื้อนที่สามารถพบได้มากที่สุดนั้น ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ในการย้อมหรือ สีย้อม และ สารเคมีที่ใช้ในการฟอกย้อม เป็นต้น

สีย้อม สามารถเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของน้ำเสียได้มากที่สุด และเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ใช้ในการเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เนื่องจากประเภทของสีย้อมเป็นปัจจัยหลักที่ใช้กำหนดกระบวนการในการย้อม เช่น ลักษณะประจุประจําตัวของสี ความสามารถในการละลายน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการย้อม และสภาพความเป็นกรดต่าง ทั้งนี้ ประเภทของสีย้อมที่ได้รับความนิยมใช้โดยทั่วไป มีดังต่อไปนี้

#### 1) สีไดเรกต์ (Direct dye)

เป็นสารประกอบกลุ่มอะโซ (Azo dye) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่ซัลโฟนิคที่ทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ดีมีประจุเป็นลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยจะยึดจับกับเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่จะไม่ทนต่อการซักน้ำ

#### 2) สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ดี มีประจุลบ เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งสีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มย้อมติดที่อุณหภูมิสูง ( $70-75^\circ\text{C}$ ) และกลุ่มย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ

#### 3) สีดีสเพอร์ส (Disperse dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท โพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคลิลิกได้ดี โดยการย้อมจะอาศัยสารพา (Carrier) เพื่อช่วยในการดูดซึมสีเข้าสู่เส้นใย หรือใช้การย้อมที่อุณหภูมิและความดันสูง สีชนิดนี้ทนการซักฟอกได้ดี แต่จะซีดเมื่อถูกสารประกอบ เช่น แก๊สไนโตรออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีของสี ได้แก่ กลุ่มอะโซ (Azo dye) และ แอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกันคือ เอทานอลามีน ( $\text{Ethanolamine}$ ,  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ )

#### 4) สีเอซิด (Acid dye)

เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีคุณสมบัติเป็นกรดเจือจาง

#### 5) สีแว๊ต (Vat dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมจึงต้องละลายในสารละลายที่เป็นรีดิวเซอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสีแว๊ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือก่อนจึงจะสามารถซึมเข้าสู่เส้นใยได้

จนกระทั่งนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีสำคัญคือ สีอินดิโก (Indigoid) และแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

#### 6) สีเบสิก (Basic or cationic dye)

สีชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและอะคริลิกได้ดี โดยโมเลกุลที่เป็นประจุลบของสีจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย

#### 7) สีซัลเฟอร์ (Sulfer dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นเมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์เพื่อให้โมเลกุลของสีอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ (แต่มีสีซัลเฟอร์บางชนิดที่ถูกรีดิวซ์แล้วเช่นกันทำให้สามารถละลายน้ำได้) เป็นสีที่นิยมใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย

#### 8) สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant หรือ Chrome dye)

เป็นสีย้อมที่ต้องอาศัยสารช่วยติด เพื่อให้สีติดอยู่บนเส้นใย สารช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีโมเลกุลใหญ่ที่เกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับตัวกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมง่ายเหมาะกับเส้นใยโปรตีนและพอลิเมอร์

#### 9) สีอะโซอิก (Azoic dye)

เป็นสีย้อมชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการย้อมต้องทำละลายด้วยสารประกอบฟีนอลก่อนจึงจะละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารละลายไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้

สารเคมีที่ใช้ในการฟอกย้อม เป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและคุณภาพน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอ ซึ่งสามารถเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

#### 1) สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรก

1.1) โซดาไฟ (Sodium hydroxide: NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันเป็นสบู่ที่ละลายน้ำ ทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกถูกขจัดออกได้ ร่วมกับการให้ความร้อน ซึ่งจะทำให้สารอื่น ๆ ถูกกำจัด เช่น โปรตีน เพกทิน แป้งที่ตกค้าง เกลือต่าง ๆ

1.2) น้ำสบู่ (Detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมันและสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออกจากวัสดุ และป้องกันไม่ให้น้ำมันกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกที่มีทั้งประจุบวกและลบ ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป เช่น ความสามารถในการแทรกซึม ซักล้าง และการเกิดอิมัลชัน

1.3) สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์หรือคีเลต สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะได้ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{Fe}^{3+}$   $\text{Cu}^{2+}$   $\text{Mn}^{2+}$  เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ในสภาวะต่างปกติ

## 2) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว

2.1) สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) โซเดียมเปอร์ออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{NaClO}$ ) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ) สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ ( $\text{NaClO}_2$ )

2.2) เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$ ) โซเดียมฟอร์มัลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ( $\text{HCHOHSO}_2\text{Na} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

ปัจจุบันลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทฟอกย้อมและสิ่งทอจากการรวบรวมไว้ในการศึกษาของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อมูลลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานลำดับที่ 22, 24 และ 98 ซึ่งเป็นข้อมูลน้ำเสียก่อนผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดมีคุณสมบัติดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

**ตาราง 2.2** ลักษณะน้ำเสียและน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

| โรงงานลำดับที่ | น้ำเสียก่อนเข้าระบบ | น้ำเสียออกจากระบบ |       |           |
|----------------|---------------------|-------------------|-------|-----------|
|                | สี (ADMI)           | pH                | TDS   | สี (ADMI) |
| 22             | 738                 | 7.31              | 51.98 | 190       |
| 22 (1)         | 902                 | 7.96              | 47.10 | 99        |
| 22 (2)         | 786                 | 7.02              | 56.70 | 194       |
| 22 (3)         | 642                 | 7.10              | 55.36 | 150       |
| 22 (4)         | 621                 | 7.16              | 48.75 | 317       |
| 24             | 125                 | 7.29              | 27.67 | 199       |
| 98             | 162                 | 7.69              | 59.60 | 65        |

นอกจากนี้ ยังได้ทำการรวบรวมลักษณะน้ำเสียจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อศึกษาคุณภาพน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต และน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว โดยลักษณะน้ำเสียดังกล่าวได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

| จุดเก็บตัวอย่าง                                               | คุณภาพน้ำเสีย    |                                      | การศึกษา                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| จุดปล่อยน้ำจากระบบบำบัด<br>(Effluent from<br>treatment plant) | pH               | 7-8                                  | Brigden K., et al. (2553)                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                               | Cr               | 142-634 ppm                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | Cr <sup>6+</sup> | 0-50 ppm                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| จุดปล่อยน้ำจาก<br>กระบวนการผลิต<br>(Effluent)                 | pH               | 6.2-12.40                            | สิรินันท์ กันศิริ (2550),<br>ประนิตดา เจริญราช และคณะ<br>(2549), กาญจนา ธนิกกุล<br>(2552), รัตนา มหาชัย และ<br>คณะ (2551), R.O. Yusuff<br>and J.A. Sonibre (2005),<br>P. Chantaraporn P., et al.<br>(2009), H. Normala and<br>G.S.Y. Rachel (2010),<br>S. Meena, et al. (2013), et<br>al. (2013) |
|                                                               | BOD              | 40.95-645 mg/L                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | COD              | 116.84-2,430<br>mg/L                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | TSS              | 21.9-3,535 mg/L                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | TDS              | 250-5,875 mg/L                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | Cr               | 0-12.24 mg/L                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                                               | ปริมาตรน้ำ       | 10,900-17,800<br>m <sup>3</sup> /day |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

## 2.4 วัสดุดูดซับโลหะ (Heavy metal absorbent)

มลพิษจากโลหะหนัก เกิดจากการไม่สามารถแยกองค์ประกอบของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียออกได้สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอันเนื่องมาจากคุณสมบัติอันเป็นพิษของโลหะหนักที่เจือปนอยู่ ดังนั้นการกำจัดหรือการแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยจากแหล่งกำเนิดสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็น วิธีการโดยทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง ได้แก่ การตกตะกอน การใช้เมมเบรน การใช้ตัวดูดซับ และการแลกเปลี่ยนไอออน (M.M. Matlock และคณะ. 2002) (S.B. Yang และคณะ. 2011) แต่จากวิธีการทั้งหมด วิธีการใช้ตัวดูดซับจะมีการใช้อย่างแพร่หลายและเป็นวิธีการที่ง่าย ราคาและต้นทุนไม่สูง ขึ้นอยู่กับตัวดูดซับที่ใช้

การศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุดูดซับมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดลักษณะตัวดูดซับที่มีความหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาของ B. Fonseca และคณะ (2011) พบว่าแร่ดินเหนียวมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักหลายชนิด เช่น Cd, Zn, Pb และ Cr แต่จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเมื่อมีโลหะหนักหลายชนิดรวมกัน การใช้ Zeolites จากธรรมชาติในการดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ (E. Erdem และคณะ. 2004) การใช้วัสดุคาร์บอน เช่น Activated carbon ในการกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม (M. Kobya และ

คณะ. 2005) เป็นต้น ต่อมาได้มีการพยายามลดต้นทุนการผลิตวัสดุดูดซับจากการใช้วัสดุที่มีการจำหน่ายทั่วไป มาเป็นการพัฒนาวัสดุดูดซับด้วยกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต เช่น การนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรชนิดต่าง ๆ มาปรับปรุงให้เป็นวัสดุดูดซับ (D. Sud และคณะ. 2008) การพัฒนาวัสดุดูดซับจากวัตถุดิบราคาถูกหรือวัสดุเหลือใช้ขึ้นในเวลาต่อมา เช่น ถั่วลันเตา (H. Cho และคณะ. 2005) และการใช้เถ้าจากถ่านหิน (S. Wang และคณะ. 2006) โดยการปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนก่อนที่จะนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ เป็นต้น ซึ่งแม้จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ได้อาจยังมีข้อจำกัด (D. Sud และคณะ. 2008) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและเน้นความสามารถในการดูดซับระดับไอออน แนวทางการศึกษาการใช้วัสดุดูดซับจำพวกนาโนคาร์บอนจึงมีความนิยมมากขึ้นเนื่องจากวัสดุนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้มาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาการใช้วัสดุนาโนคาร์บอนชนิดต่าง ๆ มาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เช่น Carbon nanotubes (X.L. Tan และคณะ. 2008) Carbon aerogel (A.K. Meena และคณะ. 2005) และกราฟีน (S. Wang และคณะ. 2013) เป็นต้น ซึ่งพบว่าวัสดุนาโนคาร์บอนนี้ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่า และยังมีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักหลายชนิด เช่น Hg, Pb, Ag, Cu, Cd, Cr, Zn, Ni, Co และ Mn (S. Wang และคณะ. 2013) แต่การใช้วัสดุนาโนคาร์บอนนั้นยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา คือต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการจัดหาวัตถุดิบ ซึ่งทำให้ยากต่อการนำมาใช้กำจัดโลหะหนักจากน้ำทิ้งที่มีปริมาณมาก จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้ทำการศึกษาและรวบรวมแสดงดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** วิธีในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงชุบโลหะด้วยวิธีทางเคมี

| วิธีการ                                                                      | สารเคมี/วัสดุ                                                 | ประสิทธิภาพ | การศึกษา                    |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------|
| การใช้พอลิเอเล็กโตรไลต์เพื่อช่วยการเพิ่มการกรองโครเมตด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน | พอลิเอเล็กโตรไลต์ (Poly Dimethyl Ammonium Chloride : PDMDAAC) | ร้อยละ 99   | จินตนา สายวรรณ. (2541)      |
| การตกตะกอนทางเคมีด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์                                      | แคลเซียมไฮดรอกไซด์                                            | ร้อยละ 99.2 | ประวราดา โภชนจันทร์. (2554) |

| วิธีการ                                | สารเคมี/วัสดุ                                                                                                                            | ประสิทธิภาพ                                                                                                                        | การศึกษา                                        |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| โบโรไฮไดรไรต์กักขัง                    | โซเดียมโบโรไฮไดร                                                                                                                         | ร้อยละ 99.8                                                                                                                        | *ดัดแปลงมาจาก Ongwandee (1999)                  |
| การตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ | โซเดียมไฮดรอกไซด์                                                                                                                        | ร้อยละ 99.3                                                                                                                        |                                                 |
| Adsorption with modified carbon foam   | การเตรียม Carbon foam และ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> carbon foam (Phenol, Formaldehyde, Base catalyst, Sulfuric acid, Foaming agent) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Carbon foam มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะมากกว่า Carbon foam Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> carbon foam | Chang-Gu Lee., et al. (2016)                    |
| Ion exchange resins                    | Resin Diaion CR11 (Polystyrenic & iminodiacetic acid) and Resin Amberlite IRC86 (Carboxylic acid & Polyacrylic copolymer)                | สามารถกำจัด Cr(III) ได้                                                                                                            | Sofia A. Cavaco., et al. (2007).                |
| Adsorption by olive stone              | Olive species is <i>Olea europaea</i>                                                                                                    | ผลคือลดความเข้มข้นค่าสุดท้ายของโลหะหนักได้ดังนี้ (Cr = 2.04 mg/L, Cu = 1.48 mg/L, Ni = 0.93 mg/L)                                  | M.A. Martín-Lara., et al. (2014)                |
| การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ Membrane        | ใช้ Membrane 2 ชนิดคือ Cellulose acetate membrane และ Polysulfone membrane                                                               | ผลปรากฏว่าสามารถกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าน้ำเสียจากโรงงาน                                                                    | Galaya Srisuwan and Poonpetch Thongchai. (2002) |

| วิธีการ                                                                                 | สารเคมี/วัสดุ                                                                                                       | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | การศึกษา                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| - ใช้ทั้งหมด 3 วิธี<br>1. ตกตะกอนด้วยสารเคมี(CP)<br>2. Electro dialysis(ED)<br>3. CP+ED | - วิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี ( $\text{Na}_2\text{S}$ , $\text{FeCl}_2$ , $\text{NaOH}$ )<br>- วิธี ED (electrode Rinse) | จากการทดลองพบว่า วิธี CP+ED ให้ผลดีที่สุด<br>(Conductivity = 93.3 %, $\text{SO}_4^{2-}$ = 95.5 %, $\text{PO}_4^{3-}$ = 100 %, $\text{Cl}$ = 73.3 %, $\text{F}$ = 100 %, $\text{Cr}$ = 99.0 %, $\text{Na}$ = 68.3 %, $\text{Mn}$ = 100 %, $\text{Zn}$ = 100 %, $\text{Mg}$ = 94.7 %, $\text{Cu}$ = 100 %, $\text{Ca}$ = 96.4 %) | Changsheng Peng., et al. (2004) |

## 2.5 วัสดุดูดซับแกรไฟต์-ซีเมนต์

การศึกษาวัดคุณสมบัติระหว่างแกรไฟต์และซีเมนต์มีการศึกษามานานกว่าทศวรรษ เริ่มต้นจากการเริ่มนำเอาวัสดุสองชนิดมาผสมกันเพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง แต่การศึกษาวัดคุณสมบัติทั้งสองชนิดนี้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นที่การนำไปใช้ในเชิงวิศวกรรม เช่น การใช้แกรไฟต์และนาโนคาร์บอนผสมในซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ซีเมนต์ (Y. Ohama. 1989) การใช้นาโนคาร์บอนประเภทแกรไฟต์ออกไซด์เพิ่มการยึดเกาะของซีเมนต์ในระดับนาโน (G. Goncalves และคณะ. 2012) การศึกษาการใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุผสมในซีเมนต์เพื่อปรับโครงสร้างและพื้นผิวให้มีความสามารถในการยึดเกาะและเพิ่มการนำไฟฟ้า (H. Alkhateb และคณะ. 2013) เป็นต้น ซึ่งจากรายงานผลศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความสามารถในการยึดเกาะของซีเมนต์เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเติมคาร์บอนลงไป โดยคุณสมบัติของคาร์บอน นาโนคาร์บอนและแกรไฟต์ มีความสามารถในการเหนี่ยวนำประจุ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ มีความเสถียรไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีได้โดยง่าย และสามารถเติมหมู่ออกซิเจนฟังก์ชันได้ (A.P. Singh และคณะ. 2011) แต่แกรไฟต์และคาร์บอนอื่น ๆ มีความเบาและไม่มีขั้ว ทำให้การใช้ประโยชน์มีจำกัด ซึ่งการนำซีเมนต์มาเป็นวัสดุผสมนั้น ซีเมนต์จะช่วยทำให้คาร์บอนสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงและเป็นเนื้อเดียวกัน (Y. Ohama. 1989) การนำวัสดุแกรไฟต์-ซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุผสมเพื่อการดูดซับโลหะหนักนั้นยังมีการศึกษาที่ค่อนข้างจำกัด แต่จากการศึกษาความสามารถของวัสดุแต่ละชนิดพบว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำไปใช้เป็นวัสดุ

ดูดซับโลหะหนัก ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาของ G. Zhao และคณะ ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแกรไฟต์ที่ผ่านการออกซิไดซ์เป็นนาโนแกรไฟต์ที่เรียกว่า แกรไฟต์ออกไซด์ มาใช้ในการดูดซับ Cd ละ Co ได้ เนื่องจากหมู่ออกซิเจนฟังก์ชันที่เติมลงไป เช่น  $-COOH$ ,  $-C=O$  และ  $-OH$  สามารถเกิดพันธะไอออนิกกับไอออนของโลหะหนักได้ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Cd 106.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการลดการเคลื่อนที่และปรับเสถียรของเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน โดยใช้คุณสมบัติการมีโครงสร้าง C-S-H ของซีเมนต์ที่สามารถจับกับไอออนของโลหะหนักได้อย่างแข็งแรงในการป้องกันการเคลื่อนที่ของของโลหะหนักดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่าเกลือของโลหะหนัก Pb, Cu, Zn, Mn และ Cd สามารถถูกตรึงไว้ได้ด้วยซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพสูงถึง 99 % ในขณะที่ Cr สามารถถูกตรึงได้น้อยที่สุดที่ 89% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ Contact time และชนิดของโลหะหนัก (Z. Giergiczny และคณะ. 2008)

**ตารางที่ 2.5** ตารางสรุปผลการใช้แกรไฟต์เป็นวัสดุอื่นกับคอมโพสิตอื่นมีความสามารถในการดูดซับโลหะโครเมียม

| สารเคมี/วัสดุ                                                                                                   | โลหะที่ทำการดูดซับ | ประสิทธิภาพ                                                                                                                              | การศึกษา                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Magnetite<br>graphene oxide<br>encapsulated in<br>alginate beads                                                | Cr(VI) and As(V)   | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับโลหะได้มากกว่าร้อยละ 80                                                                                      | Huong Chi Vu., et al. (2016) |
| Graphene oxide<br>foam/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub><br>nanocomposite<br>(GOF/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) | Cr(VI)             | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับ Cr(VI) สูงสุด 258.6 มิลลิกรัมต่อกรัม                                                                        | Yinlin Lei., et al. (2014)   |
| Magnetic<br>cyclodextrin-<br>chitosan/graphen<br>e oxide<br>(CCGO)                                              | Cr(VI)             | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับ Cr(VI)ภายในสภาวะห้องปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาในการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม | Leilei Li., et al. (2013)    |
| Graphene oxide<br>(GO) with 3-<br>aminopropyltrieth<br>oxysilane (AS).                                          | Cr(VI)             | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับ Cr(VI) สูงสุด 215.2 มิลลิกรัมต่อกรัม                                                                        | Chong He., et al. (2017)     |

| สารเคมี/วัสดุ                                             | โลหะที่ทำการดูดซับ                                       | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                  | การศึกษา                                |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Polyethyleneimine (PEI) and Graphene oxide (GO) composite | Cr(VI)                                                   | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับ Cr(VI) ได้มากถึงร้อยละ 71                                                                                       | Jian Hua Chen., et al. (2014)           |
| Chitosan/Graphene oxide composite                         | Cu <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> และ Cr <sup>6+</sup> | จากการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับ Cu <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> และ Cr <sup>6+</sup> สูงสุด 461.3, 423.8 และ 310.4 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ | Hossein Hadi Najafabadi., et al. (2015) |

## 2.6 พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวหรือ RSM เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการสร้างแบบหุ่นและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น เช่น การศึกษาเพื่อหาระดับอุณหภูมิ (x1) และความดัน (x2) เพื่อให้กระบวนการผลิตมีปริมาณผลผลิตมากที่สุด ดังนั้น ผลผลิตที่ได้เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิและความดันดังนี้

$$Y = f(x_1, x_2) + \epsilon$$

$\epsilon$  = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในค่าสังเกต Y และหากแสดงค่าคาดหวังของการตอบสนองเป็น  $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$  แล้วพื้นผิวสามารถแสดงได้ดังนี้

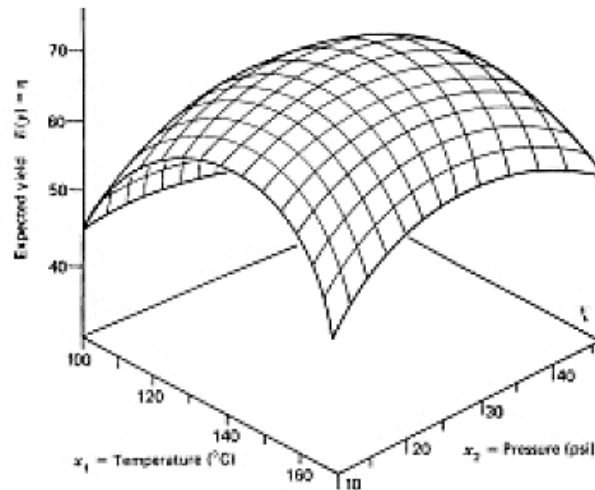
$$\eta = f(x_1, x_2)$$

ซึ่งเรียกว่าผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (response surface) การนำค่า  $\eta$  มาพล็อตกับระดับของตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว รูปที่ 2.7-2.8 ทั้งนี้ ในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้น จำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตาม หรือหาค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่าง ๆ เป็นลำดับแรก เช่น กำลังหนึ่ง (first order) กำลังสอง (second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่ง มีแบบหุ่นดังนี้

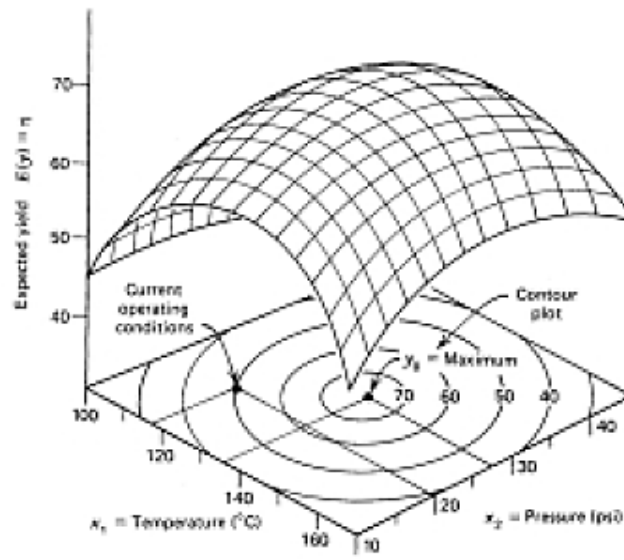
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้พหุนามที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น กำลังสอง ซึ่งมีแบบหุ้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_{j \neq i}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon$$

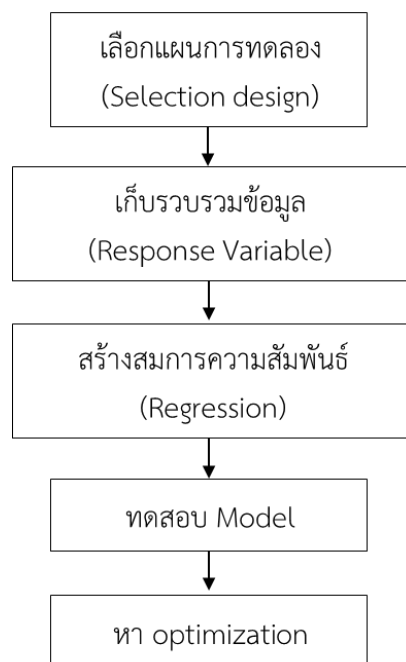


รูปที่ 2.7 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว



รูปที่ 2.8 ภาพ contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว

ทั้งนี้ ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (RSM) มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว  
[ดัดแปลงจาก: กัลยาณี เต็งพงศธร (2554)]

## 2.7 การใช้วิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) กับงานด้านการดูดซับ

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการดูดซับที่ผ่านมา ส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาปัจจัยเดี่ยวที่มีผลต่อการดูดซับด้วยการทดลองแบบกะโดยควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ไว้ ซึ่งการศึกษาลักษณะนี้จะไม่สามารถแสดงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับทั้งหมดได้ นอกจากนี้ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแบบทีละปัจจัยเป็นวิธีการที่ใช้เวลานานและต้องใช้เวลาทดลองหลายครั้งกว่าจะได้สภาวะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ได้จริง และอาจจะเป็นสภาวะที่ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถใช้วิธีการวางแผนการทดลองด้วยวิธีการทางสถิติมาใช้ในการสร้างแผนภาพพื้นผิว (Response Surface Method, RSM) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับร่วมกันมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งปัจจัยและวิธีการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการรวบรวมแสดงดังตารางที่ 2.6

**ตารางที่ 2.6** ตารางรวบรวมการศึกษาระบบการดูดซับด้วยการใช้วิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) กับงานด้านการดูดซับ

| วิธีการ                                                                                                                                                          | ปัจจัย                                                                                                                                         | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                                  | การศึกษา                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| การกำจัดโครเมียมโดยใช้ Nanocrystalline zirconia ที่สังเคราะห์ได้จากการวิธีการตกตะกอน                                                                             | Concentration (ppm), pH, Dose (g/L) และ Temperature (K) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของโครเมียม                                     | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Concentration = 20 ppm, pH = 3, adsorbent dose = 4 g/L และ Temperature 313 K จะให้ % removal ของโครเมียมสูงที่สุด                                      | Deepak Gusain., et al. (2014)                    |
| การกำจัดคอปเปอร์โดยใช้ Activated carbon ที่เตรียมได้จากไม้ทับทิมที่ผ่านการ Treat ด้วย 1-(2-fluorobenzoyl)-3-{3-[3-(2-fluorobenzoyl)-thioureido]-phenyl}-thiourea | Ion concentration (mg/L), pH, Contact time (min), Adsorbent dosage (g) และ Temperature (°C) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของคอปเปอร์ | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Concentration = 28.6 mg/L, pH = 5.6, Contact time = 70 min, Adsorbent dosage = 1.6 g, and Temperature = 36.1 °C จะให้ประสิทธิภาพสูงในการดูดซับคอปเปอร์ | A.M. Ghaedi., et al. 2015                        |
| การกำจัดยูเรเนียมโดยใช้ Amidoximated Chitosan-Grafted Polyacrylonitrile (CTS-g-PAO)                                                                              | Concentration (mg/L), pH และ Solid-liquid ratio (mg/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของยูเรเนียม                                     | ผลจากงานวิจัย พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรเนียมมากถึงร้อยละ 80                                                                                                          | Chao Xu., et al. (2014)                          |
| การกำจัด Trivalent chromium (Cr(III)) และ Hexavalent chromium (Cr(VI)) โดยใช้ Commercial                                                                         | Metal concentration (mg/L), pH, Adsorbent dose (g/L), Adsorbent type (ACI & ACII)                                                              | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Metal concentration = 6.85 mg/L, pH = 2.0, Adsorbent dose = 0.5 g/L และ Contact                                                                        | Gottipati Ramakrishna and Mishra Susmita. (2012) |

| วิธีการ                                                                                 | ปัจจัย                                                                                                     | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                  | การศึกษา                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| activated carbons (CACs) ที่มีความแตกต่างของ Iodine numbers (950 (ACI) and 1050 (ACII)) | และ Contact time (h) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อ คำนวณหา % Removal ของโครเมียม                                   | time = 1 h จะให้ ประสิทธิภาพสูงในการดูดซับ Cr(III) มากถึงร้อยละ 89.62 และ Cr(VI) มากถึงร้อยละ 71.33                                                          |                              |
| การกำจัดแคดเมียมโดยใช้ Carbon Aerogel                                                   | pH, Adsorbent concentration (g) และ Temperature (°C) เป็น ปัจจัยที่ใช้เพื่อ คำนวณหา % Removal ของ แคดเมียม | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Metal concentration = 6.85 mg/L, pH = 2.0, Adsorbent dose = 0.5 g/L และ Contact time = 1 h จะให้ ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม        | Jyotsna Goel., et al. (2006) |
| การกำจัดโครเมียมโดยใช้ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากการเก็บเกี่ยวดอกทานตะวัน       | pH, Adsorbent dose (g/100 mL) และ Cr(VI) conc. (mg/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อ คำนวณหา % Removal ของโครเมียม  | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Adsorbent dose = 5.0 g/L, Initial Cr(VI) = 40 mg/L และ pH = 2.0 พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมได้ถึง ร้อยละ 90.8                | Monika Jain., et al. (2010)  |
| การดูดซับตะกั่วโดยใช้ ตัวอย่างของหินภูเขาไฟ                                             | pH, Temperature (°C) และ Pb(II) conc. (mg/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของตะกั่ว              | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Initial Pb(II) Concentration = 84.30 mg/L, pH = 5.75 และ Temperature = 41.11 °C พบว่ามี ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้ถึงร้อยละ 88.49 | Tekin S., et al. (2013)      |

| วิธีการ                                                                                                                                                      | ปัจจัย                                                                                                                    | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                     | การศึกษา                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| การดูดซับคอปเปอร์โดยใช้ Magnetic Calcium Alginate Hydrogel Beads (m-CAHBs, 3.4 mm average diameter) composed of maghemite nanoparticles และ Calcium alginate | pH, Adsorbent dosage (g/L) และ Initial Cu(II) ion concentration (mg/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของคอปเปอร์ | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ pH = 2.0, Adsorbent dosage = 2.0 g/L และ Initial Cu(II) ion concentration = 250 mg/L พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับคอปเปอร์ได้ถึงร้อยละ 73 | Huayue Zhu., et al. 2014      |
| การดูดซับโครเมียมโดยใช้กากน้ำตาลที่เตรียมด้วย Succinic acid                                                                                                  | Adsorbent dose (g/L), pH และ Stirring speed (rpm) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Adsorption ของโครเมียม                   | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Adsorbent dose = 20 g/L, pH = 2.0 และ Stirring speed 250 rpm พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมออกจากสารละลายถึง 50 mg/L               | Umesh K. Garg., et al. (2009) |
| การดูดซับตะกั่วโดยใช้ Carbon aerogel (CA)                                                                                                                    | Adsorbent concentration (g), pH และ Temperature (°C) เป็นปัจจัยใช้เพื่อคำนวณหา % Removal ของตะกั่ว                        | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Adsorbent concentration = 0.1 g, pH ในช่วงระยะ 4-7 และ Temperature = 70 °C พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุด                   | Jyotsna Goel., et al. (2005)  |
| การดูดซับนิกเกิลโดยใช้ของเหลือทิ้งทางการเกษตร Sugarcane bagasse (SCB)                                                                                        | Adsorbent dose (g/L), pH และ Stirring speed(rpm) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา %                                           | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ Adsorbent dose = 1500 mg/L, pH = 7.52 และ Stirring speed = 150 rpm พบว่ามี                                                                | Umesh K. Garg., et al. (2007) |

| วิธีการ                                                                                                                                     | ปัจจัย                                                                                                                                                            | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                                                                                                    | การศึกษา                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                                                                                                                                             | Adsorption ของ<br>นิกเกิล                                                                                                                                         | ประสิทธิภาพในการดูด<br>ซับนิกเกิลออกจาก<br>สารละลายถึง 50 mg/L                                                                                                                                                                                 |                                        |
| การดูดซับแคดเมียม<br>โดยใช้ Shoes waste<br>(polyurethane<br>ethylene-shoe<br>material type-I and<br>vinyl acetate-shoe<br>material type-II) | Initial metal<br>concentration<br>(mg/L), pH, Contact<br>time (min) และ<br>Sorbent amount (g)<br>เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อ<br>คำนวณหา %<br>Adsorption ของ<br>แคดเมียม | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้<br>Shoe material type-I<br>และ type-II พบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการ ดูด<br>ซับแคดเมียมถึงร้อยละ<br>66.66 และ 94.66<br>ตามลำดับ                                                                                            | Munawar<br>Iqbal.,et al.<br>(2016)     |
| การดูดซับโครเมียมโดย<br>ใช้ Activated carbon<br>ที่เตรียมได้จากไม้<br>มะขาม                                                                 | Initial metal<br>concentration<br>(mg/L), pH,<br>Temperature (°C)<br>และ Adsorbent dose<br>(g/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อ<br>คำนวณหา %<br>Adsorption ของ<br>โครเมียม | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้<br>Adsorbent dose = 4.3<br>g/L, Temperature =<br>32 °C, Initial<br>concentration of<br>Cr(VI) = 20.15 mg/L<br>และ Initial pH of the<br>Cr(VI) = 5.1 พบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการดูด<br>ซับโครเมียมได้มากกว่า<br>ร้อยละ 89 | J.N. Sahu., et<br>al. (2009)           |
| การดูดซับตะกั่วโดยใช้<br>เปลือกถั่วพิดาซีโอ                                                                                                 | pH, Initial<br>concentration of<br>Pb(II) ions (ppm) และ<br>Contact time (min)<br>เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อ<br>คำนวณหา %<br>Adsorption ของตะกั่ว                      | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ pH<br>= 3.97, Initial<br>concentration of Pb(II)<br>ions = 43.4 ppm และ<br>Contact time = 68.7<br>min พบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการดูด                                                                                     | Kaan<br>Yetilmezsoy.,<br>et al. (2009) |

| วิธีการ                                                                                                          | ปัจจัย                                                                                                                            | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                                             | การศึกษา                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                                                                                                                  |                                                                                                                                   | ซับตะกั่วได้ถึงร้อยละ 100                                                                                                                                               |                                  |
| การดูดซับนิกเกิลโดยใช้ลำต้นของพืชตระกูล <i>Pinus sylvestris</i> นำมาบดเพื่อนำมาใช้ในการดูดซับ nickel โดยเมื่อใช้ | โดย pH, Biomass concentration (g/L) และ Initial Ni(II) concentration (mg/L) เป็นปัจจัยที่ใช้เพื่อคำนวณหา % Adsorption ของ นิกเกิล | ผลจากงานวิจัยเมื่อใช้ pH = 6.17, Biomass concentration = 18.8 g/L และ Initial Ni(II) concentration = 11.175 mg/L พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลได้ถึงร้อยละ 99.91 | Mevra Yalvac Can., et al. (2005) |

## บทที่ 3

---

### วิธีดำเนินการวิจัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

##### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแกรไฟต์

ทำการเก็บผงแกรไฟต์จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับมาจากระบวนการหลังจากการกลึงเข้าหลอมโลหะ โดยแกรไฟต์จะมีลักษณะแห้ง เป็นผง อยู่ในเครื่องจักรที่มีถังรองรับผงจากการกลึงไม้ มีเศษวัสดุอื่นปะปน ในการเก็บตัวอย่างแกรไฟต์จะถูกบรรจุลงในถุง Polyethylene แล้วนำกลับมาที่ห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ก่อนนำไปทำการ Pre-treatment ด้วยการบดด้วย Crucible mortar และร่อนด้วยตะแกรง (SAM รุ่น SM20916) ที่มีขนาดของตะแกรงขนาด 40 mesh (420  $\mu\text{m}$ ) เพื่อแยกผงแกรไฟต์ที่มีขนาดใหญ่ออก จากนั้นทำการเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อป้องกันความชื้น จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงแล้วไปวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ และใช้ในการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ต่อไป

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุจะต้องมีการเปรียบเทียบวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองกับวัสดุอ้างอิง ในที่นี้แกรไฟต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุอ้างอิง (Reference material) ได้แก่ Graphite powder (< 20  $\mu\text{m}$ ) Synthetic ของ Sigma-Aldrich

##### 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมพลาสติก

พลาสติกที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโรงงานอัญมณีจะถูกรวบรวมจากรางดักพลาสติกเพื่อให้ตกตะกอนซึ่งอยู่บริเวณภายนอกตัวอาคารของโรงงาน โดยพลาสติกที่เก็บรวบรวมมาถูกบรรจุลงในถุง Polyethylene เพื่อนำกลับมายังห้องปฏิบัติการเพื่อทำการตากด้วยวิธีการ Air dry จนแห้ง จากนั้นนำพลาสติกที่ยังคงมีความชื้นอยู่ทำการอบที่อุณหภูมิ 80  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำออกมาผึ่งให้คลายความร้อนที่อุณหภูมิห้องแล้วทำการบดด้วย Crucible mortar และร่อนด้วยตะแกรง (SAM รุ่น SM20916) ขนาด 40 mesh เพื่อแยกวัสดุเจือปน หิน และทรายออกจากนั้นนำส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเก็บไว้ในถุงซิปล็อคก่อนที่จะนำไปใช้และทำการวิเคราะห์ด้วย SEM, XRD, Moisture content และ BET ต่อไป

ทั้งนี้พลาสติกที่นำมาใช้เป็นวัสดุอ้างอิง (Reference material) ได้แก่พลาสติกประเภทที่นำมาใช้ในงานหล่ออัญมณีและเครื่องประดับซึ่งมีจำหน่ายทั่วไป ยี่ห้อ Chang Jewelry Powder Premium Brass (100 powder: 38 - 40 water ratio)

#### 3.2 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide synthesis)

วิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ดัดแปลงจากวิธีการของ Tour โดยเริ่มจากการเตรียม  $\text{H}_2\text{SO}_4$  /  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ในอัตราส่วน 9 : 1 (360 : 40 มิลลิลิตร) ชั่งผงแกรไฟต์ 3 กรัม และชั่งผง  $\text{KMnO}_4$

18 กรัม ผสมลงในผงแกรไฟต์ ค่อย ๆ เทกรดผสมเข้มข้นแล้วให้ความร้อนกับสารผสมจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ 50-60 °C ทำการกวนด้วยเครื่อง Overhead mixer ที่ 300 rpm เป็นเวลาประมาณ 9 ชั่วโมง นำสารผสมที่ได้ใส่ลงในน้ำแข็งประมาณ 400 มิลลิลิตร และเติม 30 %  $H_2O_2$  จำนวน 3 มิลลิลิตร จากนั้นทำการร่อนด้วยตะแกรง ขนาด 300 ไมโครเมตรก่อนที่จะทำการกรองด้วยกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman NO. 2 ด้วยปั๊มสุญญากาศ จากนั้นทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตร 30 % HCl ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และล้างต่อด้วยเอทานอล 200 มิลลิลิตร ตามลำดับโดยทำซ้ำ 2 รอบ แยกแกรไฟต์ออกไซด์ที่กรองได้ออกจากกระดาษกรอง นำไปตากไว้ในสภาพแห้งโดยใช้อุณหภูมิ 50 °C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชุบแกรไฟต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาพแห้งและนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วทำการเก็บแกรไฟต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ใส่ขวดเพื่อไม่ให้เกิดความชื้น

### 3.3 การเตรียมวัสดุผสมแกรไฟต์ออกไซด์-พลาสติก (GOP)

แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการดัดแปลงแกรไฟต์เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับด้วยวิธีการของ Tours และพลาสติกที่ผ่านการลดความชื้น จะผ่านการคัดเลือกขนาดด้วยการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 40 mesh แล้วทำการผสมกันโดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite Oxide) และปูนพลาสติก (Plaster) โดยอ้างอิงปริมาณที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับได้ดี และสามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่ายที่สุดเป็นเกณฑ์ ซึ่งจากผลการศึกษาของโครงการวิจัยการดัดแปลงวัสดุดูดซับโลหะหนักจากสารผสมแกรไฟต์และซีเมนต์เหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ปริมาณแกรไฟต์ออกไซด์ต่อพลาสติก (GOP) ที่สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ GOP เท่ากับ 1:4

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ทำการปรับวิธีการเตรียมวัสดุดูดซับ GOP โดยใช้วิธีการเตรียมแบบเปียก โดยทำการชั่ง GOP ด้วยอัตราส่วน 1:3 1:4 1:5 และ 1:10 โดยทำการผสมวัสดุทั้ง 2 ชนิดในสภาวะแห้งด้วยการเขย่า จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในวัสดุผสม แล้วทำการผสมด้วย Sonication bath เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C จากนั้นทำการผสมสารให้เข้ากันอีกครั้งด้วยการเหยียดพร้อมกับเม็ดยกลาสปีท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เป็นเวลา 30 นาทีจนสารผสมละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.4 การทดสอบคุณลักษณะของวัสดุ

การทดสอบคุณลักษณะของวัสดุเพื่อศึกษาทางสัณฐานวิทยาของวัสดุใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) (JEOL, ISM-6400, JAPAN) และทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของโลหะหนักบนพื้นผิวของวัสดุด้วย Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) การวิเคราะห์ที่มีความจำเพาะกับคุณลักษณะของแกรไฟต์ออกไซด์ใช้

วิธีการส่องตัวอย่างที่มีความบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM) และหมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์ออกไซด์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) นอกจากนี้ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุและความเป็นรูพรุนสามารถทำได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Brunauer Emmett and Teller (BET) (Quantachrome/Autosorb-1, Thermo-Finnigan/Sorptomatic 1990)

### 3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานที่ถูกเลือกศึกษา ได้แก่ โรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ โดยสำหรับโรงงานฟอกย้อม จะทำการเก็บตัวอย่าง 5 จุดได้แก่ 1) น้ำทิ้งปลายท่อที่ออกจากระบวนการผลิต 2) น้ำทิ้งจากบ่อพักน้ำ 3) น้ำทิ้งก่อนเข้าสู่บ่อเติมอากาศ 4) น้ำทิ้งภายในบ่อเติมอากาศ และ 5) บ่อตกตะกอน ในขณะที่โรงงานชุบโลหะ ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งหมด 2 จุด ได้แก่ 1) น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโครเมียมด้วยวิธีการทางเคมี และ 2) น้ำทิ้งที่เข้าสู่กระบวนการกำจัดไอออนของเหล็กด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในบ่อตกตะกอน โดยขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างได้ผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เพื่อกำจัดโลหะที่ตกค้างอยู่ในภาชนะ หลังการเก็บตัวอย่างน้ำจะถูกเก็บรักษาไว้ใน Ice box และนำกลับมาที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยสถานะแวดล้อม เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (BOD, COD, TDS, SS, Oil and Grease และปริมาณโลหะหนัก) ต่อไป

### 3.6 การศึกษากระบวนการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้น

น้ำทิ้งจากโรงงานที่ถูกเลือกศึกษา ได้แก่ โรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างมาถูกนำมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะของน้ำด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียในเบื้องต้น ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่สามารถเป็นตัวแทนในการบ่งชี้คุณลักษณะน้ำเสียและการปนเปื้อนอันสามารถขัดขวางการทำงานของวัสดุดูดซับได้นั้นคือ ความขุ่น ซึ่งใช้บ่งบอกสารที่ไม่ละลายน้ำทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ รวมทั้งอนุภาคฝุ่น นอกจากนี้ยังเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายโดยใช้เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) (รุ่น 2100P Portable Turbidimeter, Hach) ซึ่งขั้นตอนการศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 2 ประเภทมีรายละเอียดดังข้อที่ 3.6.1 และ 3.6.2

#### 3.6.1 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมถูกนำมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะของน้ำในเบื้องต้นก่อนนำไปศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสีย โดยในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกใช้น้ำเสียจากบ่อเติมอากาศและบ่อตกตะกอนเป็นตัวแทนของน้ำเสียในการศึกษาการปรับสภาพน้ำ โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงสถิติ Statistical Software Minitab (Version 18) เมื่อใช้

แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) และการใช้แผนภาพแบบพื้นผิว (Surface Response Method) เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดจาก 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณสารสร้างตะกอน (Coagulant dosage) ความเร็วในการกวนไว และความเร็วในการกวนช้า โดยใช้การศึกษาจากการ ทบทวนวรรณกรรมและการทดลองเบื้องต้นเป็นเกณฑ์ในการกำหนดช่วงของปริมาณสารสร้าง ตะกอน และความเร็วในการกวนให้แคบลง ทั้งนี้ปัจจัยคงที่ที่กำหนดไว้เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะ ของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงฟอกย้อมก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดด้วยการดูดซับคือระยะเวลาของการ กวนทั้ง 2 แบบ โดยทำการเปรียบเทียบสภาวะที่ตะกอนลดลงมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการวิเคราะห์ค่า ความขุ่นของน้ำเสียสุดท้าย รายละเอียดของสภาวะที่กำหนดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวถูกนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพ Contour plot เพื่อหาจุดหรือช่วงที่เหมาะสม

**ตารางที่ 3.1** ตารางแสดงปัจจัยที่นำมาใช้ในการกำหนดสภาวะการทดลอง

| พารามิเตอร์                        | ช่วงของค่า         |
|------------------------------------|--------------------|
| ความเร็วของการกวนไว (Rapid mixing) | 140-300 รอบต่อนาที |
| ระยะเวลาในการกวนไว                 | 1 นาที             |
| ความเร็วของการกวนช้า (Slow mixing) | 50-120 รอบต่อนาที  |
| ระยะเวลาในการกวนช้า                | 10 นาที            |
| เวลาดกตะกอน                        | 30 นาที            |

### 3.6.2 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

น้ำเสียจากโรงชุบโลหะถูกนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ก่อน โดยการทดลองนี้ได้เลือกน้ำเสียจากบ่อกำจัดไออนของเหล็ก (บ่อตกตะกอน) เป็นตัวแทนน้ำเสียที่จะนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยการศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียจะใช้ความขุ่นเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนในการในการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.6.1 โดยวิธีการที่นำมาใช้ในการลดความขุ่นของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ได้แก่ การกรอง โดยใช้การทดลองเปรียบเทียบตัวกรองพื้นฐาน 3 ชนิด ได้แก่ กระดาษกรอง ไยแก้ว (Glass wool) และสำลี โดยวัสดุที่มีความเหมาะสมในการลดความขุ่นและสามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมจะถูกคัดเลือกนำมาใช้ต่อไป

### 3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม

#### 3.7.1 การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ใช้การทดลองแบบกะ (Batch experiment) โดยใช้น้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยมีปริมาณตัวดูดซับ GOP เท่ากับ 0.1 0.3 0.5 และ 1.0 กรัม ตามลำดับ (ตัวดูดซับแต่ละปริมาณจะทำการทดลองปริมาณละ 3 ซ้ำ) โดยทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวดูดซับผสม GOP เท่ากับ 1:3 1:4 1:5 และ 1:10 จากนั้นเขย่าตัวดูดซับ GOP และน้ำเสียด้วยเครื่อง Shaking incubator (FTSH-501, Sci Finetech) ในอัตราความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (คาดว่าปฏิกิริยาการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล) จากนั้นทำการแยกสารละลายและตัวดูดซับออกจากกันด้วยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และกรองสารละลายส่วนบนผ่าน Nylon syringe filter 0.45 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร นำสารละลายส่วนที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการสร้างสีเพื่อวัดความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่เหลือด้วยเครื่อง UV-vis spectrometer (Shimadzu, UV 1201) ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

#### 3.7.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะสามารถทำได้ด้วยการทดลองแบบกะโดยนำน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วและความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในช่วงความเข้มข้นสูง (40.596 ppm) และความเข้มข้นต่ำ (7 ppm) และมีความขุ่น < 10 NTU ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วใช้การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมออกแบบการทดลองเชิงสถิติ Statistical Software Minitab (Version 18) เมื่อใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) และการใช้แผนภาพแบบพื้นผิว (Surface Response Method) เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดจาก 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) เวลาในการดูดซับ (นาที) และอุณหภูมิ ดังแสดงในแผนการทดลอง 1.2 ภาคผนวก โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่อง Shaking incubator (FTSH-501, Sci Finetech) ในอัตราความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เมื่อครบกำหนดเวลา จากนั้นแยกสารละลายและตัวดูดซับออกจากกันด้วยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองสารละลายส่วนบนผ่าน Nylon syringe filter 0.45 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร และนำสารละลายส่วนที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวัดความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่เหลือด้วย UV-vis spectrometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เพอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะถูกนำมาสร้างแผนภาพพื้นผิว (Surface plot) และแผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ต่อไป

### 3.8 ทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียโรงงานในสถานะจำลองระบบจริง

#### 3.8.1 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

การศึกษาประสิทธิภาพวัสดุดูดซับ GOP ได้นำผลจากการทดลองในข้อ 3.7 มาเป็นพื้นฐานและนำลักษณะของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อมมาพิจารณา โดยสำหรับโรงงานฟอกย้อมนั้นระบบบำบัดหลักของโรงงานคือการใช้บ่อเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิต ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งขนาด และลักษณะน้ำเสียของที่อยู่ในบ่อบำบัดแต่ละส่วนแล้ว พบว่าบ่อตกตะกอนเป็นบ่อที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดในการนำ GOP ไปใช้ในการดูดซับความเข้มข้นของโครเมียมในบ่อ ก่อนปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำผิวดินในขั้นตอนต่อไป ซึ่งลักษณะน้ำเสียที่อยู่ในบ่อตกตะกอนนี้มีความขุ่นน้อย แต่ยังคงมีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่บ้างซึ่งเป็นส่วนที่อาจถูกกำจัดได้ไม่หมดในบ่อเติมอากาศ แต่เนื่องจากน้ำเสียในบ่อนี้มีความเข้มข้นของโครเมียมค่อนข้างต่ำ น้ำเสียตัวอย่างจากบ่อตกตะกอนนี้จึงต้องถูกนำมาเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมให้สูงขึ้นเป็น 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับโครเมียมทางห้องปฏิบัติการ โดยระบบจำลองที่ใช้จะมีขนาด 1 ลิตร โดยทำการทดลองควบคู่กัน 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม (Control set) และชุดทดลอง (Experimental set) โดยน้ำเสียจะถูกเติมลงในภาชนะที่มีลักษณะปากกว้าง และมีระดับน้ำสูงจากพื้นขึ้นมาบนภาชนะ โดยเป็นภาชนะที่มีขนาด 1 ลิตร ตั้งอยู่บริเวณเปิดโล่งมีแสงแดดส่องถึง ชุดควบคุม (Control set) จะไม่มีการเติมวัสดุดูดซับ ในขณะที่ชุดทดลอง (Experimental set) วัสดุดูดซับผสม GOP จะถูกเติมลงไปปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร แล้วปล่อยให้ค่อย ๆ ตกตะกอนสู่ก้นภาชนะตามธรรมชาติ โดยไม่มีการกวน การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจะเกิดขึ้นหลังเวลาผ่านไป 2, 6 และ 10 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างต่อเนื่องไปทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนครบ 18 วัน แต่ละครั้งของการเก็บตัวอย่างจะเก็บตัวอย่าง 100 มิลลิกรัม และทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียออกจากกระบอกจำลอง น้ำเสียใหม่ที่มีความเข้มข้นเดียวกันจะถูกเติมกลับเข้าสู่ระบบในปริมาณ 100 มิลลิกรัมเช่นกัน

#### 3.8.2 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP เพื่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

การทดสอบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับ GOP ในระบบจำลองที่มีสถานะใกล้เคียงกับระบบบำบัดพื้นฐานของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสำหรับระบบบำบัดของโรงงานชุบโลหะผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกบ่อตกตะกอนที่ 2 ซึ่งเป็นบ่อตกตะกอนหลังปรับ pH ของน้ำก่อนปล่อยสู่ระบบรองรับน้ำเสียรวมของนิคมอุตสาหกรรม โดยบ่อตกตะกอนนี้เป็นบ่อที่มีลักษณะคล้ายบ่อตกตะกอนของโรงงานฟอกย้อม คือมีน้ำไหลเข้าสู่บ่อด้วยอัตราคงที่ช้า ๆ ต่อเนื่อง ทั้งนี้สภาพแวดล้อมโดยทั่วไปของบ่อตกตะกอนตั้งอยู่บนพื้นที่เปิดโล่งที่มีหลังคา แสงแดดไม่สามารถส่องถึง ลักษณะน้ำเสียในบ่อมีความขุ่นน้อย แต่ยังคงมีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่บ้างซึ่งเป็นส่วนที่อาจถูกกำจัดได้ไม่หมดในบ่อตกตะกอนทางเคมี แต่จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำ น้ำเสียในบ่อนี้มีความเข้มข้นของ

โครเมียมค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อนำน้ำเสียจากบ่อดักตะกอนนี้มาทำการทดลองจึงต้องถูกนำมาเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมให้สูงขึ้นเป็น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบการดูดซับโครเมียมทางห้องปฏิบัติการและเป็นความเข้มข้นที่พบได้จริงเมื่อเปิดกิจการงานผิดปกติ โดยระบบจำลองที่ใช้จะมีขนาด 1 ลิตร โดยทำการทดลองควบคู่กัน 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม (Control set) และชุดทดลอง (Experimental set) น้ำเสียจะถูกเติมลงในภาชนะที่มีลักษณะปากกว้างและมีระดับน้ำสูงจากพื้นขึ้นมาบนภาชนะ และจัดพื้นที่สำหรับตั้งชุดทดลองและชุดควบคุมไว้ในบริเวณเปิดโล่งที่มีหลังคาแสงแดดไม่สามารถส่องถึง ชุดควบคุม (Control set) จะไม่มีการเติมวัสดุดูดซับ ในขณะที่ชุดทดลอง (Experimental set) วัสดุดูดซับผสม GOP จะถูกเติมลงไป ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร แล้วปล่อยให้ค่อย ๆ ตกตะกอนสู่ก้นภาชนะตามธรรมชาติ โดยไม่มีการกวน การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจะเกิดขึ้นหลังเวลาผ่านไป 2 6 และ 10 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างต่อเนื่องไปทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนครบ 18 วัน แต่ครั้งของการเก็บตัวอย่างจะเก็บตัวอย่าง 100 มิลลิกรัม และทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียออกจากระบบจำลอง น้ำเสียใหม่ที่มีความเข้มข้นเดียวกันจะถูกเติมกลับเข้าสู่ระบบในปริมาณ 100 มิลลิกรัมเช่นกัน

### 3.9 การทดสอบการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้ว

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบวัสดุดูดซับผสม GOP หลังผ่านการใช้งานเพื่อดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 13.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และโรงงานชุบโลหะที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการทดลองทำได้โดยเก็บตัวอย่าง GOP หลังจากผ่านการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมาเป็นเวลา 18 วัน ทำให้แห้งโดยการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท จากนั้นชั่งตัวอย่าง GOP ที่แห้งแล้ว 1 กรัม ลงในปิกรเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วเก็บตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 12 และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์โครเมียมทั้งหมดและโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

## บทที่ 4

---

### ผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในเบื้องต้นของการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาอุตสาหกรรมที่มักพบการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียจากกระบวนการผลิต โดยเบื้องต้นได้ให้ความสนใจอุตสาหกรรม 2 ประเภทคือ

1) อุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียสูง เช่น อุตสาหกรรมชุบ/เคลือบโครเมียม อุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น

2) อุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียต่ำ เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อม

ดังนั้น งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้เลือกอุตสาหกรรมตัวอย่างเพื่อศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่มีโครเมียมปนเปื้อน ร่วมกับการปนเปื้อนของสารเคมีและโลหะหนักชนิดอื่น เพื่อทดสอบความสามารถของวัสดุดูดซับแกรไฟต์ออกไซด์-ปูนปลาสเตอร์ในการกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานฟอกย้อมผ้า และน้ำเสียจากโรงชุบโครเมียม เป็นตัวอย่างน้ำเสียที่ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ รายละเอียดของการเข้าพบผู้ประกอบการ และการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 โรงงานฟอกย้อม บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทยจำกัด (มหาชน)

##### 4.1.1 การเข้าพบผู้ประกอบการ

บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด (มหาชน) เริ่มต้นก่อตั้งในปี พ.ศ. 2513 ดำเนินธุรกิจด้านฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จผ้าผืน ปัจจุบันบริษัทดำเนินกิจการมากกว่า 47 ปี โดยมีผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสิ่งทอทุกประเภท และมีการร่วมพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยการร่วมมือกับภาคการศึกษาและสถาบันการวิจัย เพื่อการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนรอบข้างน้อยที่สุด ปัจจุบันโรงงานที่ตั้งอยู่ที่ อ.เมืองสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ ซึ่งกระบวนการผลิตในโรงงานประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ ดังนี้

- 1) กระบวนการย้อมต่อเนื่อง
- 2) กระบวนการฟอกขาว
- 3) กระบวนการพิมพ์ผ้า
- 4) กระบวนการ Yarn Dye



รูปที่ 4.1 รูปภาพแสดงการเข้าพบผู้ประกอบการโรงงานฟอกย้อมผ้า จ.สมุทรสาคร



รูปที่ 4.2 รูปภาพแสดงความร่วมมือในการวิจัยกับหน่วยงานภายนอก และแผนควบคุมคุณภาพของโรงงาน



รูปที่ 4.3 รูปภาพแสดงการเข้าเยี่ยมชมกระบวนการผลิตส่วนต่าง ๆ ของโรงงาน

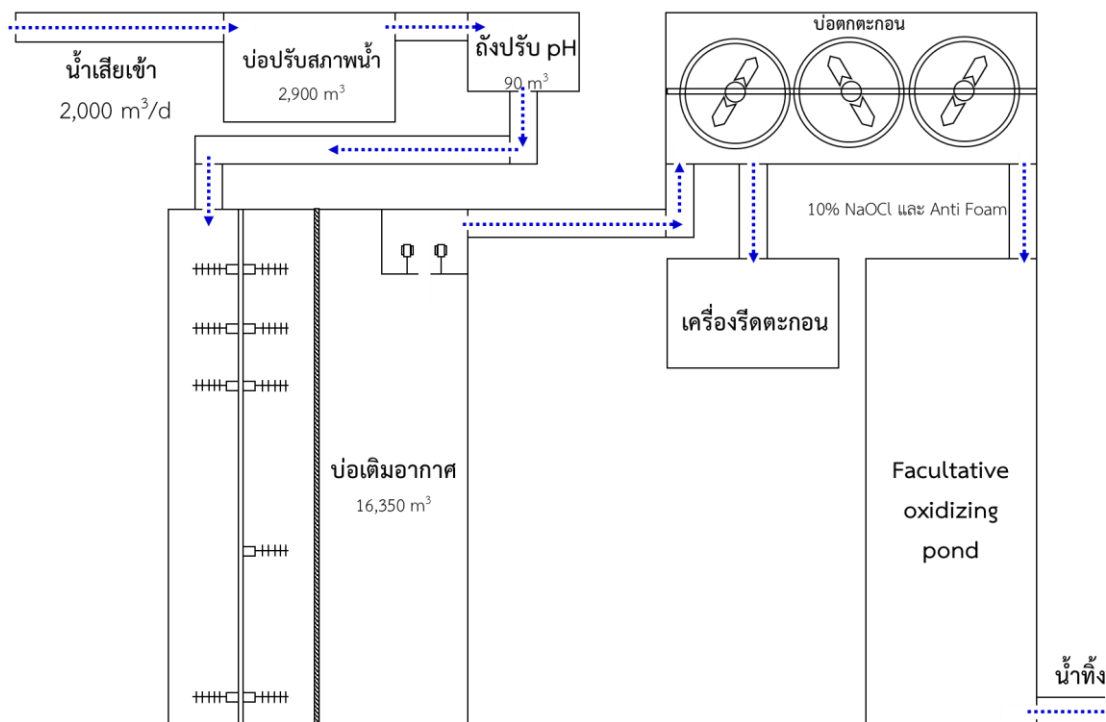
#### 4.1.2 ลักษณะของน้ำเสียจากบริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด

จากการเข้าพบผู้ประกอบการโรงงานในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำความเข้าใจและอธิบายวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อให้ผู้ประกอบการได้เป็นส่วนหนึ่งของการทำงานวิจัย ด้วยการร่วมศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียของโรงงานด้วยวัสดุดูดซับแกรไฟต์-ปูนปลาสเตอร์ จึงได้ขอเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดของโรงงานเพื่อนำมาทดลองที่ห้องปฏิบัติการจากบ่อตกตะกอน (รูปที่ 4.4 และ 4.5) โดยเน้นการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทั้งนี้ในขั้นตอนแรกของการศึกษาได้มีความสนใจที่จะนำวัสดุดูดซับมาใช้น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว เนื่องจากน้ำเสียส่วนนี้ สามารถเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานที่มีระบบบำบัดอยู่แล้วได้ จึงได้ทำการเลือกมาใช้ศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแล้วของโรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย มีลักษณะดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 รูปภาพแสดงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานพอกย้อม

โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทยมีระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยใช้ระบบบ่อเติมอากาศ (Activated Sludge) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตจะถูกปล่อยลงสู่บ่อปรับสภาพน้ำก่อนที่จะทำการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6-9 จากนั้น น้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่บ่อเติมอากาศซึ่งจะมีเครื่องเติมอากาศบนผิวน้ำ น้ำเสียจะถูกเติมอากาศ 12 ชั่วโมง - 5 วัน ก่อนที่จะเข้าสู่บ่อดกตะกอน ซึ่งในบ่อจะมีเครื่องกวาดตะกอนอยู่ด้านล่างโดยตะกอนที่ถูกรวบรวมจะถูกส่งไปยังเครื่องรีดตะกอนเพื่อรอกำจัดต่อไป ในขณะที่น้ำเสียส่วนที่ถูกบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกจากบ่อดกตะกอนที่ 3 เพื่อเติม NaOCl เพื่อกำจัดสีและสาร Anti-foaming ก่อนจะปล่อยสู่บ่อฟัก (Facultative oxidizing pond) ซึ่งมีระยะทางยาวกว่า 300 เมตรและปล่อยสู่น้ำผิวดินในที่สุด



รูปที่ 4.5 รูปภาพแสดงไดอะแกรมของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

เมื่อนำน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานฟอกย้อมดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของน้ำตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียพบว่า ปริมาณโครเมียมที่พบมากที่สุด พบในบ่อเติมอากาศของโรงงานแต่ยังคงมีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐาน แม้พารามิเตอร์อื่น ๆ จะมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ก็ตาม คุณลักษณะของน้ำเสียจากบ่อดักตะกอนดังกล่าว และเป็นบ่อที่เลือกมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อเติมอากาศ บ. โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด

| พารามิเตอร์   | ค่าที่ตรวจวัดได้ | ค่ามาตรฐาน   |
|---------------|------------------|--------------|
| COD           | 129 mg/L         | < 120 mg/L   |
| SS            | 2,660 mg/L       | < 50 mg/L    |
| TDS           | 1,744 mg/L       | < 3,000 mg/L |
| Iron (Fe)     | 3.02 mg/L        | -            |
| Nickel (Ni)   | < 0.01 mg/L      | -            |
| Chromium (Cr) | 0.05 mg/L        | < 0.25 mg/L  |
| Cadmium (Cd)  | < 0.01 mg/L      | < 0.03 mg/L  |

#### 4.1.3 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานฟอกย้อมที่ได้นำมาเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รับความร่วมมือจาก บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบำบัดต่าง ๆ เพื่อหาส่วนของการบำบัดที่สามารถเป็นตัวแทนการสะสมของโครเมียมจากกระบวนการผลิตเพื่อนำไปสู่การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับก่อนทำการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งจากตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดทั้ง 4 ส่วน ผู้วิจัยพบว่าน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศเป็นน้ำเสียที่พบการปนเปื้อนของโครเมียมได้สูงที่สุดคือ 0.05 ไมโครกรัมต่อลิตร จึงเป็นส่วนที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวแทนในการพัฒนาระบบเพื่อการเชื่อมต่อกระบวนการบำบัดให้ใกล้เคียงกับระบบบำบัดที่สามารถทำได้จริง เพื่อพัฒนาวิธีการในการกำจัดโครเมียมก่อนทำการปล่อยน้ำเสียจากระบบสู่สิ่งแวดล้อมและลงสู่ทะเลต่อไป

เพื่อเป็นการศึกษาแนวทางในการหาวิธีปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการดูดซับด้วยวัสดุ GOP น้ำเสียจากบ่อเติมอากาศที่มีคุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.1 มีคุณลักษณะเด่นคือความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความขุ่นพบว่ามีความขุ่นเริ่มต้นมากกว่า 280 NTU แสดงให้เห็นการปนเปื้อนสารแขวนลอยในปริมาณสูง ซึ่งความขุ่นสามารถแทรกแซงและกีดขวางการทำงานของวัสดุดูดซับได้ จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงเป็นสำคัญ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ผนวกการศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นไว้ด้วย เพื่อให้ครอบคลุมวิธีการที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมด้วยวิธีการดูดซับมากที่สุด ในที่นี้น้ำเสียส่วนที่นำมาทำการศึกษได้แก่น้ำเสียจากบ่อปรับสภาพน้ำ ซึ่งเป็นบ่อเก็บกักและรวบรวมน้ำเสียจากกระบวนการผลิตก่อนส่งเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งเป็นบ่อที่มีความขุ่นสูงที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกมาใช้เป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเพื่อศึกษาการปรับสภาพน้ำเสียขั้นต้น

จากการศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานฟอกย้อมผ่านการทบทวนวรรณกรรม พบว่าวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นมีทั้งการใช้วิธีการทางเคมีและการใช้วัสดุดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นการใช้สารสร้างตะกอน เช่น สารส้ม (W. Chu, 2000, F.B. Direk and S. Bese. 2001) poly-aluminum chloride (PAC) (S. Ghafari., et al. 2007) Zirconium salts (S. Hussain., et al. 2014) หรือใช้วิธีการสร้างตะกอนแบบผสมผสานด้วยสารส้มและ PACl (A.L. Ahmad., et al. 2007) โดยศึกษาวิธีการสร้างตะกอน และตกตะกอนโดยใช้วิธีการผสมเชิงกล (Mechanical mixing) เป็นตัวแปรในการศึกษา ทั้งนี้วิธีการและปริมาณสารสร้างตะกอน รวมทั้งประสิทธิภาพการสร้างตะกอนในการศึกษาเทียบกับความขุ่นที่ลดลงหลังจากผ่านการสร้างตะกอนแล้ว โดยรายละเอียดของการศึกษาที่เกี่ยวข้องได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางรวบรวมการศึกษาการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานฟอกย้อม

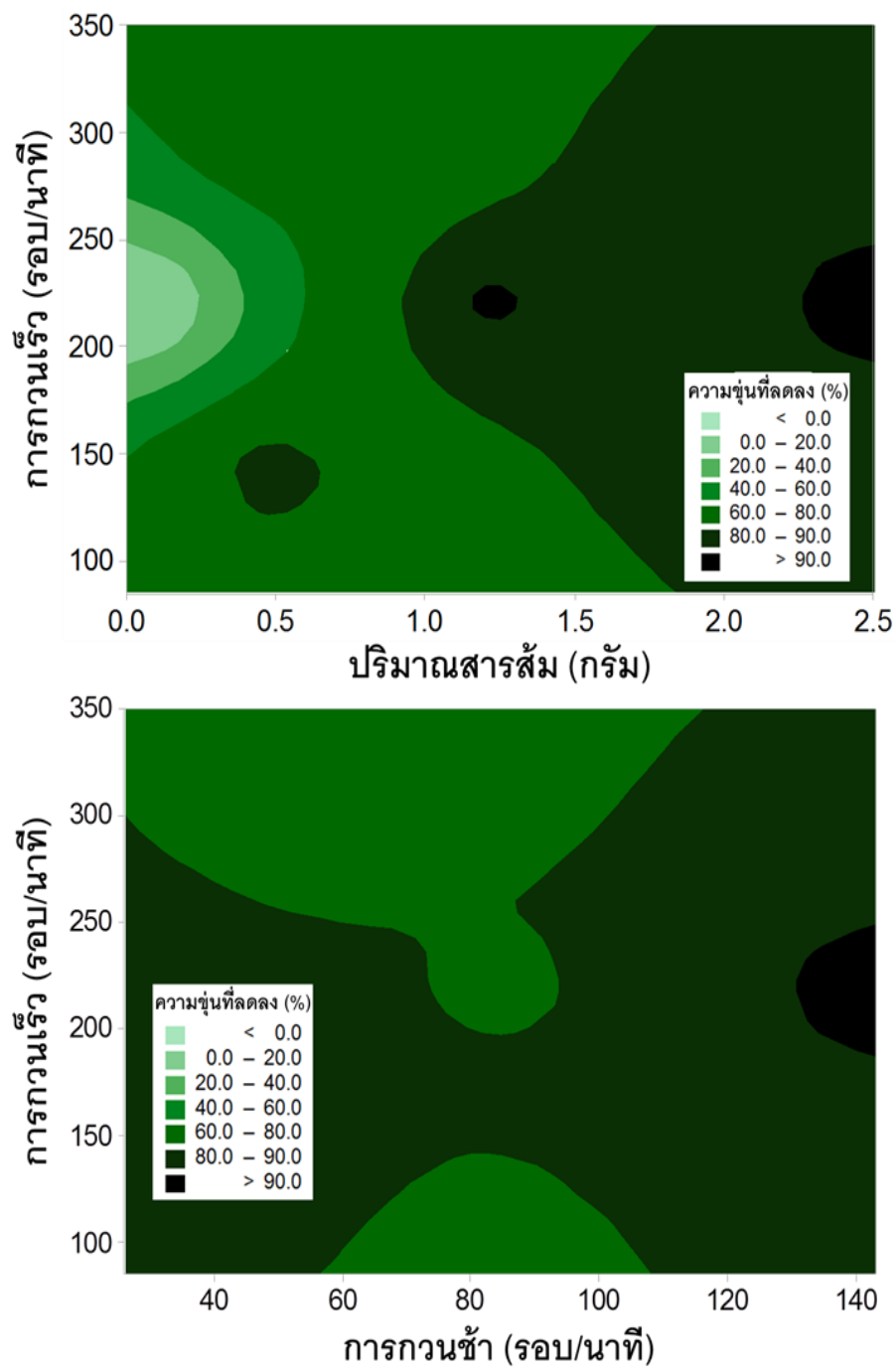
| วิธีการ                                                                    | สารเคมี/วัสดุ                                                                                       | ประสิทธิภาพ                                                                                                                                       | การศึกษา                                               |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| การบำบัดน้ำเสีย<br>โดยการใช้ซีโอไลต์<br>ที่สังเคราะห์จาก<br>เถ้าลอยถ่านหิน | ซีโอไลต์                                                                                            | ผลจากงานวิจัยพบว่าที่ ซีโอไลต์<br>20 กรัม มีประสิทธิภาพในการ<br>กำจัดซีโอดีและสีของน้ำเสีย<br>*รายงานดังกล่าวไม่เกี่ยวข้องกับ<br>การกำจัดโลหะหนัก | สิรินันท์ กันศิริ<br>(2550)                            |
| การบำบัดน้ำเสีย<br>โดยการใช้วิธีการ<br>การตกตะกอนทาง<br>เคมี               | Alum, PACl,<br>FeCl <sub>3</sub> , Anion<br>polymer,<br>Cation<br>polymer                           | ผลจากงานวิจัยพบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น<br>และสีน้ำย้อมในการทดลองบำบัด<br>ได้ร้อยละ 70.28 และ 57.35<br>ตามลำดับ                     | กาญจนา ธนิกกุล<br>(2552)                               |
| การบำบัดน้ำเสีย<br>เคมีแบบไม่ใช้<br>พลังงาน                                | ถังปูน, ท่อ<br>พลาสติก,<br>ตะแกรงตาข่าย,<br>แกลบ, ทราย<br>หยาบ, หินก้อน<br>เล็กๆ, ตะกร้อ<br>พลาสติก | ผลจากงานวิจัยพบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณสี<br>, COD, BOD, TDS และTSS ลดลง<br>ร้อยละ 65-99, 68-85, 69-96,<br>81-97 และ 76-83 ตามลำดับ   | รัตนา มหาชัย และ<br>คณะ (2551)                         |
| การบำบัดน้ำเสีย<br>โดยการใช้วิธีการ<br>Electrocoagulation                  | Electrochemic<br>al reactor, HCl                                                                    | -                                                                                                                                                 | Chantaraporn<br>Phalakornkule.,<br>et al. (2009)       |
| การบำบัดน้ำเสีย<br>โดยการใช้วิธีการ<br>การดูดซับด้วย<br>Zeolite            | Zeolite                                                                                             | มากกว่าร้อยละ 50                                                                                                                                  | Normala<br>Halimoon &<br>Rachel Goh Soo<br>Yin. (2010) |
| การบำบัดน้ำเสีย<br>โดยการใช้วิธีการ<br>Coagulation                         | Poly<br>Aluminum<br>Chloride<br>(AlCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O)                              | ผลจากงานวิจัยพบว่ามี<br>ประสิทธิภาพในการกำจัด BOD,<br>COD และTDS 83.34, 64.04 และ<br>62.97 ตามลำดับ                                               | Meena Solanki.,<br>et al. (2013)                       |

ซึ่งจากการพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นด้วยวิธีต่าง ๆ ตามที่ได้ศึกษาผ่านการทบทวนวรรณกรรม พบว่าวิธีการใช้สารสร้างตะกอนประเภทสารส้มร่วมกับการกวนเป็นวิธีการที่นิยมใช้ และไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนจึงน่าจะมีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาครั้งนี้ โดยเน้นการศึกษาเพื่อหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ร่วมกับการหาความเร็วการกวนที่สามารถทำให้เกิดการสร้างตะกอนจนลดความขุ่นได้มากที่สุด ในเวลาที่เหมาะสม ซึ่งการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการสร้างแผนการทดลองเพื่อสร้างการประมวลผลด้วยแผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ซึ่งใช้วิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ โดยได้เลือกศึกษาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับการสร้างตะกอนเพื่อลดความขุ่นของสารแขวนลอยในน้ำเสีย โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารส้ม ความเร็วในการกวนเร็ว ความเร็วในการกวนช้า โดยเวลาของกระบวนการสร้างตะกอนและตกตะกอนจะถูกกำหนดให้แล้วเสร็จภายในเวลา 40 นาที รายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ของบทที่ 3

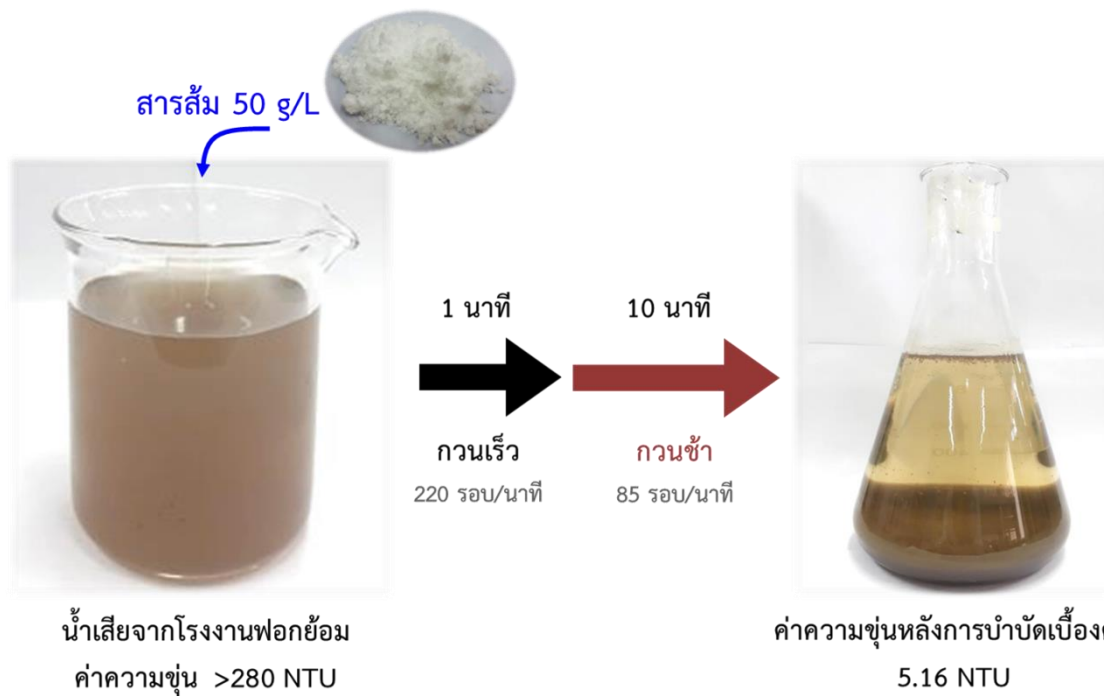
ผลจากการศึกษาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณสารส้ม ความเร็วในการกวนเร็ว และกวนช้า เพื่อหาสภาวะที่สามารถลดปริมาณสารแขวนลอยได้มากที่สุด จากผลการทดลองที่แสดงด้วยแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ 4.6 (บน) ปริมาณสารส้มและความเร็วในการกวนเร็ว มีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความขุ่น โดยเมื่อปริมาณสารส้มมีปริมาณน้อย ( $< 10$  กรัมต่อลิตร) ค่าความขุ่นลดลงเพียงเล็กน้อย (0-40 %) จนเมื่อเพิ่มปริมาณสารส้มให้อยู่ในช่วงที่มากกว่า 10-20 กรัมต่อลิตร พบว่าความขุ่นลดลงอย่างชัดเจนถึง 60-80 % และเมื่อเพิ่มปริมาณสารส้ม ให้มากกว่า 1.0 กรัม สามารถลดความขุ่นได้มากกว่า 80 % โดยความเร็วที่ระดับ 200 รอบต่อนาที เป็นช่วงที่มีผลต่อการลดความขุ่นได้ดีที่สุด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกวนเร็วและการกวนช้าต่อการลดความขุ่นในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมโดยการสร้างแผนภาพคอนทัวร์ดังรูปที่ 4.6 (ล่าง) ความเร็วในการกวนแสดงความสัมพันธ์กับการลดค่าความขุ่นได้ เมื่อกำหนดเวลาการกวนเร็วที่ 1 นาทีและการกวนช้าที่ 10 นาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบในการกวนเร็วในช่วง 100-250 รอบต่อนาที ความเร็วในการกวนช้าควรอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า 40-60 รอบต่อนาที เพื่อให้มีผลต่อการลดความขุ่นประมาณ 80 % แต่หากเพิ่มช่วงความเร็วของการกวนเร็วให้กว้างขึ้น คือตั้งแต่ 100-350 รอบต่อนาที พบว่าจะต้องทำการเพิ่มความเร็วของการกวนช้าขึ้นด้วย เพื่อให้สามารถลดความขุ่นได้มากกว่า 80 %

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณสารส้มและความเร็วการกวน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตได้ จากผลการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณสารส้มมากกว่า 20 กรัมต่อลิตร และให้การกวนเร็วมากกว่า 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที ตามด้วยการกวนช้าที่มากกว่า 85 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จะใช้เวลาตกตะกอนสั้นเพียง 30 นาทีและสามารถลดความขุ่นได้มากกว่า 80 % ซึ่งการทดสอบเพื่อยืนยันสภาวะดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการลดลงของความชุ่มชื้น เมื่อปริมาณสารสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป (บน)  
กับความเร็วในการกวาดเร็วเปลี่ยนแปลงไป (ล่าง)



รูปที่ 4.7 แสดงการตกตะกอนน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยสารส้มด้วยสภาวะที่ได้จากการศึกษาด้วยแผนภาพพื้นที่ผิว (Response Surface Method)

#### 4.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการซักล้าง การเคลือบแป้ง การผสมสี การฟอกสีผ้า การย้อมสีผ้า การพิมพ์ลาย การซักล้างสี รวมไปถึงการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ และพื้นโรงงานอุตสาหกรรม (ในบางที่น้ำจากการการชะล้างพื้นของโรงงานจะถูกแยกบำบัด เนื่องจากมีความเข้มข้นของการปนเปื้อนน้อยกว่า) ซึ่งน้ำเสียที่กล่าวมานี้ถูกเรียกโดยรวมว่าเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งโครเมียมที่พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นเนื่องจากเป็นหนึ่งในส่วนประกอบของสีย้อมประเภทต่าง ๆ ซึ่งเมื่อมีการใช้สีย้อมก็มักจะมีการปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียด้วยเช่นกัน แต่จากการสำรวจและสอบถามลักษณะการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม ทำให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมว่าลักษณะความเข้มข้นของการปนเปื้อนของน้ำเสียจะมีความแตกต่างกันไปเป็นช่วง ๆ ตามลักษณะการผลิต ซึ่งหมายถึงการขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ได้รับจากผู้ซื้อ เช่น ในบางครั้งต้องมีการผลิตผ้าที่มีสีสนิมมาก หรือผ้าสีเข้มมาก ลักษณะน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดก็就会有ความเข้มข้นของการปนเปื้อนสูงด้วย ในขณะที่บางครั้งจะมีการสั่งผลิตผ้าขาวหรือผ้าดิบมาก ก็จะเป็นช่วงที่น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีความเข้มข้นของการปนเปื้อนต่ำลง

ดังนั้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมด้วยวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ คณะผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานฟอกย้อมมาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของโครเมียมปนเปื้อนในน้ำทิ้งซึ่งตัวอย่างน้ำทิ้งจากจุดเก็บตัวอย่างที่แตกต่างกันและความเข้มข้นของโครเมียมปนเปื้อนแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

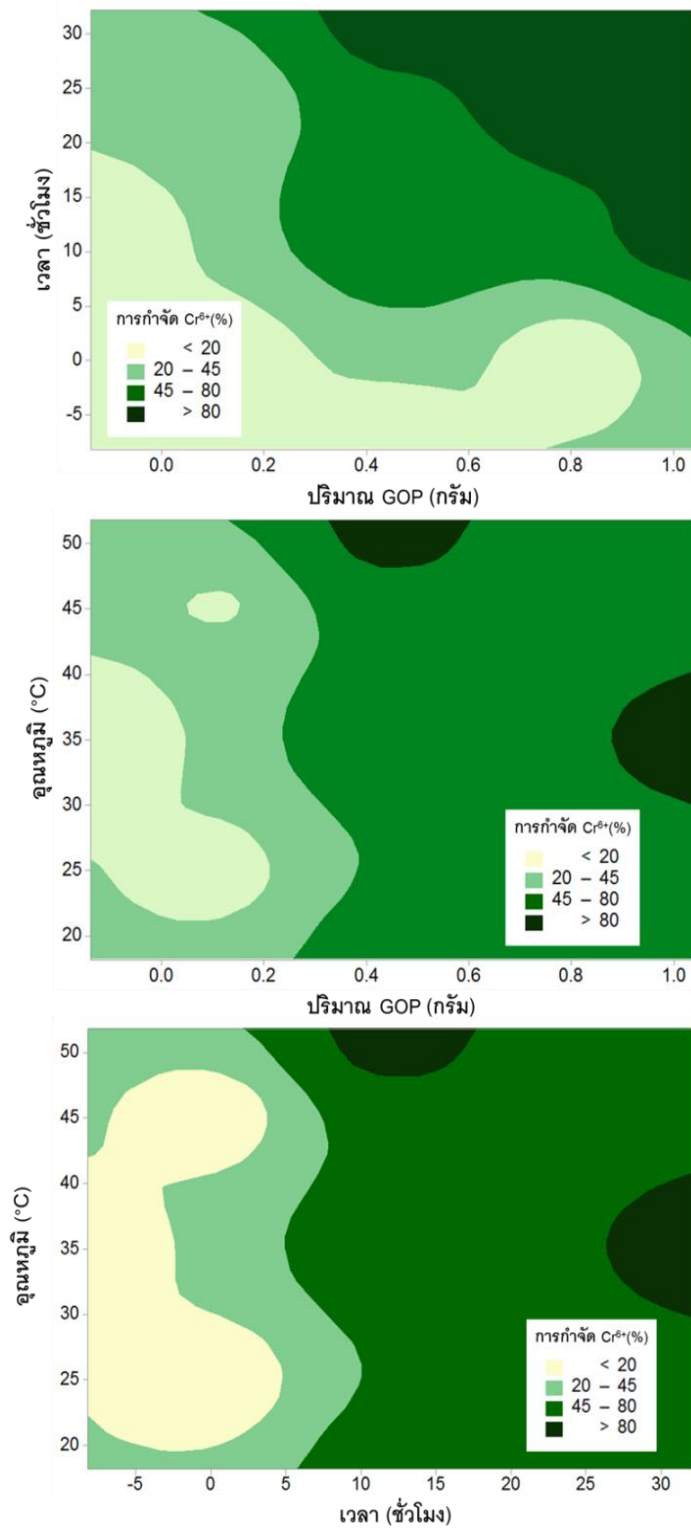
**ตารางที่ 4.3** ตารางแสดงความเข้มข้นของโลหะชนิดต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดต่าง ๆ ของบริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด

| รายการวิเคราะห์ | หน่วย | ผลวิเคราะห์    |               |              |            | วิธีวิเคราะห์ |
|-----------------|-------|----------------|---------------|--------------|------------|---------------|
|                 |       | บ่อรับน้ำที่ 1 | บ่อปรับเสถียร | บ่อเติมอากาศ | บ่อตกตะกอน |               |
| Iron (Fe)       | mg/L  | 0.24           | 0.65          | 1.69         | 0.22       | Inductivel    |
| Copper (Cu)     | mg/L  | 0.02           | 0.06          | 0.19         | 0.02       | y Coupled     |
| Zinc (Zn)       | mg/L  | 0.05           | 0.17          | 0.10         | 0.04       | Plasma        |
| Arsenic (As)    | mg/L  | 0.02           | 0.02          | 0.02         | 0.02       | Method        |
| Mercury (Hg)    | mg/L  | 0.001          | 0.003         | 0.005        | 0.001      |               |
| Chromium (Cr)   | mg/L  | 0.03           | <0.01         | 0.05         | 0.03       |               |

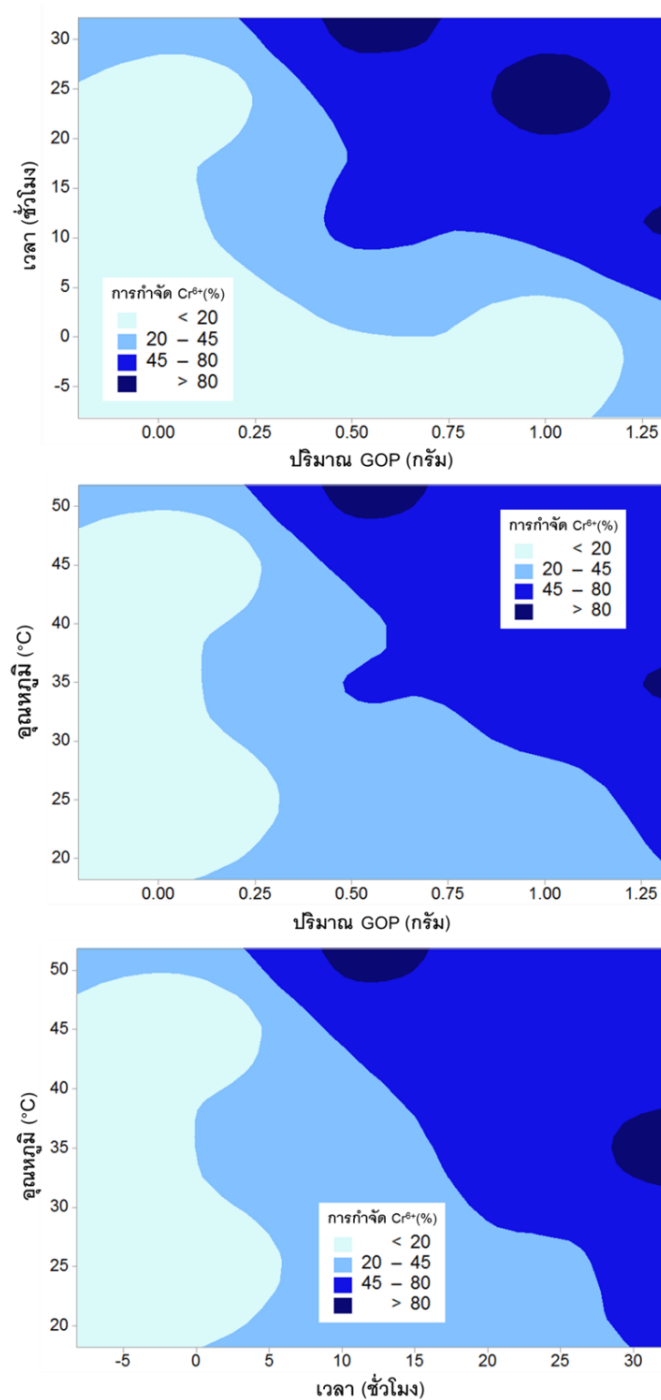
จากตารางแสดงค่าความเข้มข้นของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่พบในบ่อของระบบบำบัดในโรงงาน ค่าความเข้มข้นของโลหะมีค่าที่ต่ำมาก โดยเฉพาะโครเมียมที่มีค่าความเข้มข้นที่พบสูงที่สุดในบ่อเติมอากาศ มีค่าเพียง 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่สามารถเป็นตัวแทนลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยทั่วไปได้ เนื่องจากปริมาณโครเมียมที่สามารถพบได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อมนั้นสามารถมีค่าสูงสุดได้ถึง 12.24 มิลลิกรัมต่อลิตร [สิรินันท์ กันศิริ (2550), ประนัตดา เจริญราช และคณะ (2549), กาญจนา ธนิกกุล(2552), รัตนา มหาชัย และคณะ (2551), R.O. Yusuff and J.A. Sonibre (2005), P. Chantaraporn P., et al. (2009), H. Normala and G.S.Y. Rachel (2010), S. Meena, et al. (2013)] ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาโดยใช้วิธีการเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมลงในน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว เพื่อให้มีปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมเทียบเท่ากับค่าความเข้มข้นสูงสุดของโครเมียมที่สามารถพบได้ในระบบบำบัด โดยให้มีความเข้มข้นเป็น 2 ช่วง คือความเข้มข้นต่ำใกล้เคียงความเข้มข้นที่พบได้จริง ได้แก่ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมความเข้มข้นสูง คือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมได้ อย่างน้อย 3 ปัจจัยร่วมกัน เพื่อสร้างแผนภาพคอนทัวร์ด้วยวิธีการทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ช่วง ได้แก่ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปัจจัยที่สนใจนำมาศึกษาได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ และอุณหภูมิการดูดซับ มาทำการศึกษาร่วมกัน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.8 จากกราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 โดยการจับคู่ปัจจัยเพื่อแสดงแผนภาพคอนทัวร์ออกมาเป็นคู่ ๆ เพื่อให้เห็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นโครเมียมในระดับต่ำ (13 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถึงระดับกลาง (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อพิจารณาอิทธิพลระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับ GOP และเวลา ในรูปที่ 4.8 (บน) ที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อการดูดซับในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นมากกว่า 8 กรัมต่อลิตร จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้นมากกว่า 45 % เช่นเดียวกับเมื่อเวลาของการดูดซับนานขึ้น มากกว่า 10 ชั่วโมง จะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพคอนทัวร์รูปที่ 4.8 (กลาง) เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณของ GOP และอุณหภูมิของการดูดซับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการดูดซับแสดงอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับไม่ชัดเจน ในขณะที่ปริมาณวัสดุดูดซับแสดงอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ชัดเจนกว่า คือ เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับมากกว่า 6 กรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นสูงกว่า 45 % และเพื่อเป็นการยืนยันผลของเวลาการดูดซับที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ในรูปที่ 4.8 (ล่าง) แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการดูดซับกับเวลาการดูดซับร่วมกัน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการดูดซับนานขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน >45-80 % ชัดเจนกว่าอิทธิพลจากอุณหภูมิการดูดซับ

เมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์กันของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมสูงขึ้น (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยทำสร้างแผนภาพคอนทัวร์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทีละคู่ เช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้นเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าความเข้มข้นต่ำ (13 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับในการดูดซับ โครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสีย 13 มิลลิกรัมต่อลิตร



**รูปที่ 4.9** กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับในการดูดซับโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสีย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากกราฟรูปที่ 4.9 (บน) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ในการทดลอง และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ จากแผนภาพคอนทัวร์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับ GOP

เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับก็สูงขึ้นมากกว่า 45 % เมื่อใช้ GOP ในปริมาณที่สูงกว่า 6 กรัมต่อลิตร ในขณะที่เวลาน้ำเสียของการดูดซับที่เพิ่มขึ้นก็มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียเช่นเดียวกัน โดยเมื่อให้เวลาของการดูดซับดำเนินไปนานกว่า 5 ชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับที่เหลือ จึงได้ทำการจับคู่เพื่อแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของปัจจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิ โดยคงปัจจัยปริมาณของวัสดุดูดซับไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (กลาง) จากแผนภาพจะเห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไปในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับยังเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นได้แก่ อุณหภูมิที่สูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป เพื่อเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม แผนภาพในรูปที่ 4.9 (ล่าง) เป็นการจับคู่แบบข้ามเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เหลือ นั่นคือเวลาการดูดซับและอุณหภูมิของการดูดซับ จากแผนภาพพบว่า ปัจจัยทั้ง 2 มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองดังกล่าว ดังนั้น จากความสัมพันธ์ที่ได้แสดงเป็นแผนภาพคอนทัวร์ดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่า การกำจัดโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นสูง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ 3 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ GOP ต้องมากกว่า 6 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับควรจะนานกว่า 5 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียสเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมด้วย GOP

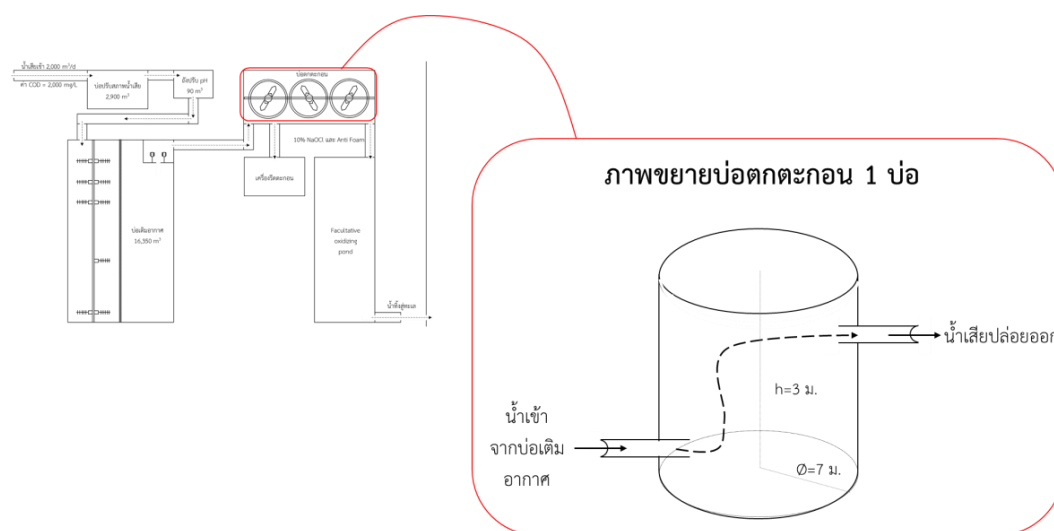
#### 4.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจากระบบจำลอง

เพื่อให้การทดสอบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับผสม GOP ได้ถูกทดสอบในสภาวะที่ใกล้เคียงการนำไปใช้งานจริงมากที่สุด ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการจำลองสภาพแวดล้อมของระบบให้มีความใกล้เคียงกับระบบบำบัดน้ำเสียจริงที่ได้นำตัวอย่างน้ำมาใช้ในการทดสอบ โดยในโรงงานฟอกย้อมนั้น น้ำเสียจริงได้ทำการเก็บตัวอย่างมาจากบ่อตกตะกอนที่มีความเข้มข้นของโครเมียมปนเปื้อน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งบ่อตกตะกอนนี้เป็นบ่อที่คาดว่าหากนำวัสดุดูดซับผสม GOP ไปใช้ในการลดความเข้มข้นของโครเมียมปนเปื้อน น่าจะเป็นบ่อที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากบ่อตกตะกอนดังกล่าวมีลักษณะของน้ำเสียที่มีความขุ่นน้อย เป็นบ่อที่มีการไหลเข้าของน้ำจากด้านล่างและมีท่อปล่อยน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วล้นออกด้านบนของบ่อ ซึ่งลักษณะของบ่อตกตะกอนดังกล่าวจะมีปริมาณน้ำไหลเข้าอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราไหลเข้า

โดยประมาณ 1.99 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยมีระยะเวลาการเก็บกักน้ำอย่างน้อยที่สุด 1.6 ชั่วโมง โดยลักษณะของบ่อดกตะกอนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.10

**ตารางที่ 4.4** ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อดกตะกอน บ. โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทย จำกัด

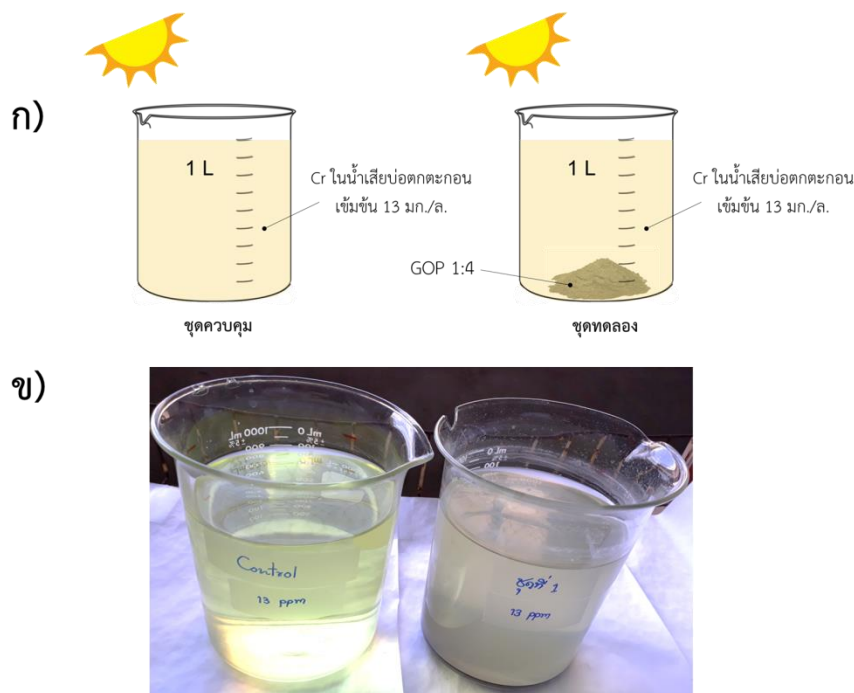
| พารามิเตอร์   | ค่าที่ตรวจวัดได้ | ค่ามาตรฐาน   |
|---------------|------------------|--------------|
| COD           | 119 mg/L         | < 120 mg/L   |
| SS            | 1,107 mg/L       | < 50 mg/L    |
| TDS           | 2,836 mg/L       | < 3,000 mg/L |
| Iron (Fe)     | 1.31 mg/L        | -            |
| Nickel (Ni)   | < 0.01 mg/L      | -            |
| Chromium (Cr) | 0.01 mg/L        | < 0.25 mg/L  |
| Cadmium (Cd)  | < 0.001 mg/L     | < 0.03 mg/L  |



**รูปที่ 4.10** ไดอะแกรมแสดงลักษณะบ่อดกตะกอนที่ของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อม บ. พิมพ์ย้อมผ้าไทย

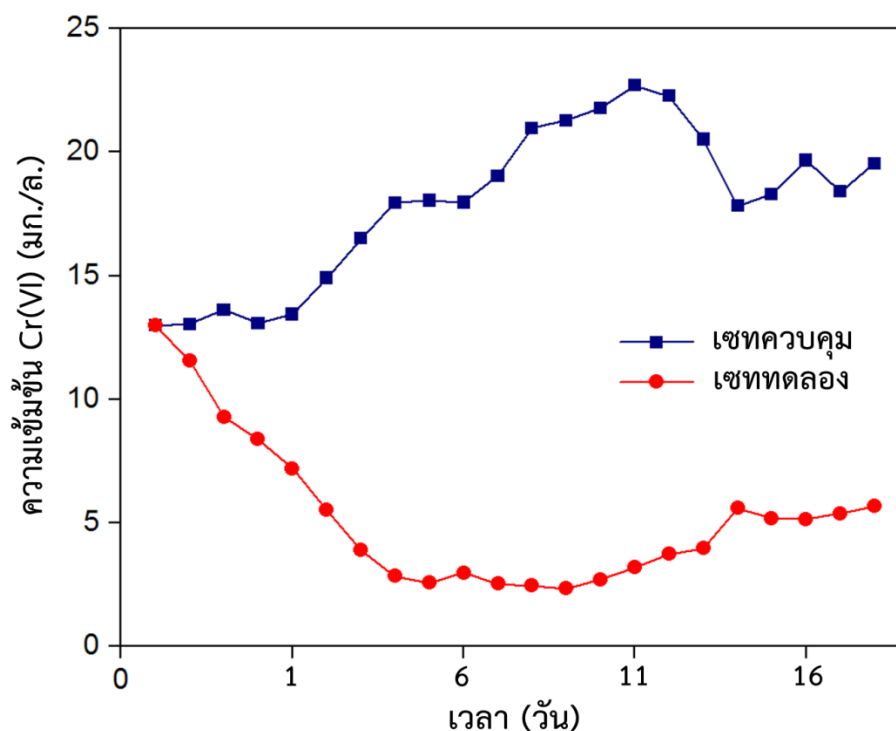
ในการทดลองเพื่อสร้างสภาวะที่ใกล้เคียงระบบจำลอง ผู้วิจัยได้ปรับความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียเดิมให้เพิ่มขึ้นเป็น 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ทำมาแล้วในการทดลองก่อนหน้านี้และ เป็นความเข้มข้นที่ใช้เป็นตัวแทนการทดลองตั้งแต่เริ่มต้น ดังที่ได้ผลการทดลองมาแล้วในการหา สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำวัสดุดูดซับผสม GOP มาใช้ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียจาก โรงฟอกย้อม (ผลการทดลอง 4.1.4) โดยการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจากบ่อดกตะกอนจากโรงฟอกย้อมซึ่ง มีลักษณะของน้ำในบ่อใกล้เคียงกับลักษณะน้ำจากบ่อเติมอากาศแต่มีความขุ่นต่ำกว่า โดยความ

เข้มข้นของโครเมียมหลังทำการปรับความเข้มข้นมีค่าประมาณ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนการทดสอบการดูดซับโครเมียมด้วยตัวดูดซับผสม GOP (1:4) มีลักษณะของการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 จากภาพเป็นการจำลองสภาวะของบ่อดักตะกอนระบบทดลองโดยเลียนแบบลักษณะบ่อดักตะกอนของโรงงานฟอกย้อมซึ่งเป็นบ่อสูงจากพื้นดิน ตั้งอยู่บนพื้นที่เปิดโล่งกลางแจ้งที่มีแสงแดดส่องถึง ส่วนการรับน้ำจากบ่อเดิมอากาศนั้นจะเป็นการรับน้ำแบบต่อเนื่องโดยอัตราไหลของน้ำที่เข้าสู่บ่อเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยมีปริมาณน้ำเต็มบ่อตลอดเวลาใช้ระบบตัดน้ำไม่ให้ไหลเข้าจนล้นบ่อด้วยระบบเซนเซอร์ การไหลเข้าของน้ำจากบ่อเดิมอากาศสู่บ่อดักตะกอนจะไหลเข้าจากด้านล่างโดยน้ำในบ่อจะค่อนข้างนิ่งและไม่มีการกวนนอกจากการกวาดตะกอนด้วยใบพัดอย่างช้า ๆ ในอัตรา 3 รอบต่อชั่วโมง ดังนั้น ระบบจำลองของการทดสอบนี้จึงได้ทำการจัดสถานที่ตั้งระบบให้ตั้งอยู่นอกตัวอาคาร และเป็นพื้นที่ที่มีแสงแดดส่องถึง โดยน้ำในระบบจะนิ่งอยู่ตลอดเวลาโดยไม่มีการกวน โดยหลังจากทำการใส่ GOP ลงบนผิวน้ำแล้วจะปล่อยให้ GOP ตกลงสู่ด้านล่างของภาชนะซึ่งเป็นไปตามแรงโน้มถ่วงของโลก แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำออกจากภาชนะตามช่วงเวลาที่กำหนด แล้วทำการเติมน้ำเสียลงไปในปริมาณเท่ากับที่เก็บตัวอย่างออก ทั้งนี้การทดลองดังกล่าวต้องแบ่งออกเป็น 2 ชุดคือชุดควบคุม และชุดทดลองซึ่งทั้ง 2 ชุดตั้งอยู่ในพื้นที่เดียวกันและในสภาวะเดียวกันและทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาเดียวกันตลอดการทดลอง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.11** ภาพแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่อดักตะกอนของโรงงานฟอกย้อมโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา)  
โดย ก) ไดอะแกรมแสดงการทดลอง และ ข) รูปภาพการทดลอง

ผลการทดลองจากการทดสอบการดูดซับของ GOP ที่สภาวะเลียนแบบบ่อดักตะกอนของ โรงงานฟอกย้อมโดยใช้ปริมาณ GOP 10 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร โดยทำการเก็บตัวอย่างหลังใส่ผง GOP ลงในน้ำเสียเป็นเวลา 2 6 และ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บต่อเนื่องทุกวันจนครบ 18 วัน ซึ่ง การเก็บตัวอย่างของกลุ่มควบคุมละกลุ่มทดลองได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 4.12 จากผลการวัด ความเข้มข้นของโครเมียมในชุดควบคุม เมื่อน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนเข้มข้น 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกเติมเข้าสู่ระบบทุกครั้งที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างด้วยปริมาตรที่เท่ากัน จากผลการวิเคราะห์ความ เข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่แสดงในกราฟในเซตควบคุม พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมใน ระบบจะคงที่ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงที่สุดคือ 22.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มสูงขึ้นนี้อาจเกิดจาก การระเหยของน้ำเสียในวันที่อากาศแห้งหรือมีอุณหภูมิสูง ทำให้น้ำเสียมีความเข้มข้นสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อ วิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับด้วย GOP (1:4) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างหลังจากใส่ ตัวดูดซับลงไปในบ่อดักตะกอนเพียงครั้งเดียวผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียม เฮกซะวาเลนต์เมื่อได้ทำการเก็บตัวอย่างและเติมน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนใหม่ลงไปเมื่อเวลาผ่าน ไปครบ 18 วัน ผลการทดลองดังแสดงในกราฟของเซตทดลอง ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของโครเมียม เฮกซะวาเลนต์ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้ทำการใส่ GOP ลงไป โดยช่วงเวลาที่ความ เข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ลดลงต่ำสุดคือหลังจากผ่านไป 4 วันโดยมีค่าความเข้มข้นของ โครเมียมเหลืออยู่เพียง 2.84 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับที่ 84.18 % ในขณะที่ GOP ยังคงมีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในช่วง 84.18 - 89.04 % ต่อเนื่องไปอีก 9 วัน จนถึงวันที่ 13 ของการเก็บตัวอย่างประสิทธิภาพการทำงานของ GOP จึงลดลงทำให้การดูดซับ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับอยู่ในช่วง 68 - 70 % หลังจากเวลาผ่านไป 18 วัน ทั้งนี้ แนวโน้มของการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GOP น่าจะยังคงมีประสิทธิภาพ ลดลงเรื่อยๆ หลังจากวันที่ 13 เป็นต้นไป ซึ่งปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการทำงานของ GOP จากการ สังเกตร่วมกับการวิเคราะห์จากผลการทดลองที่ผ่านมา อุณหภูมิน่าจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ การทำงานในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GOP นอกจากนี้ ยังมีการรายงานผลการวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับการเกิดรีดักชันของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยแสงยูวีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิด ร่วมด้วย (Khalil et al., 1998; Ku and Jung, 1999; Wang et al., 2008) ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ ว่า แกรไฟต์ออกไซด์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกราฟีนซึ่งมีการรายงานความสามารถในการเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยารีดักชันด้วยแสงยูวี (Photocatalysis) (Liu et al., 2012) ซึ่งอาจเป็นตัวช่วยหนึ่งที่ทำให้ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียลดลงได้อย่างต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยการเร่งของ กราฟีนออกไซด์และรังสียูวี



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียของบ่อดักตะกอนในโรงงานฟอกย้อมของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)

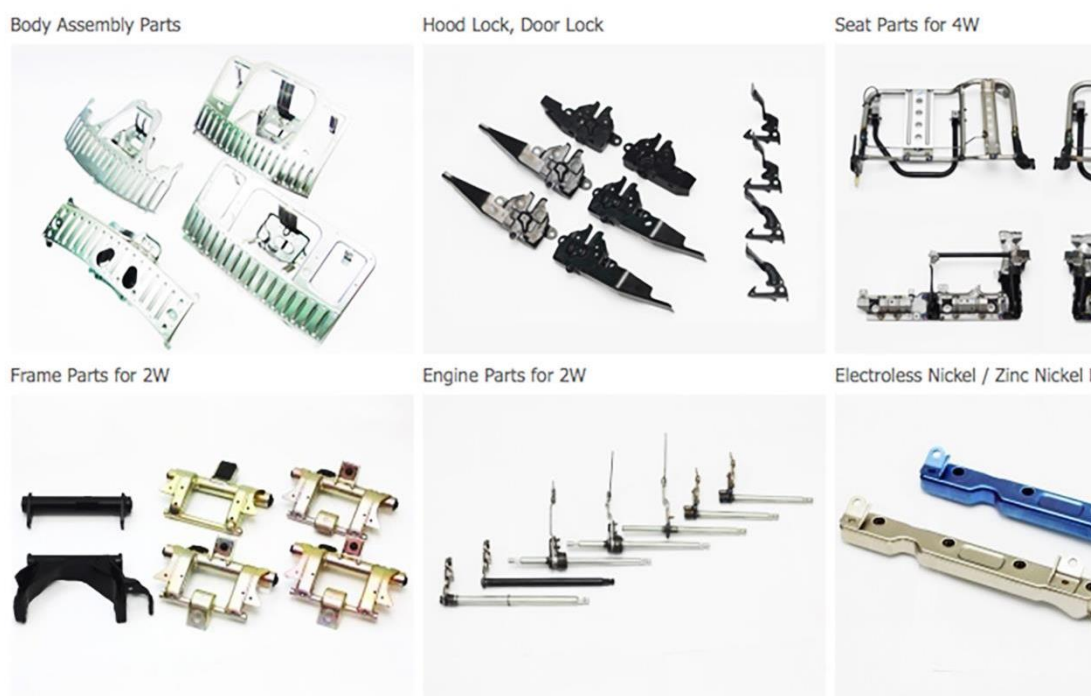
## 4.2 โรงงานซูโหละ บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด

### 4.2.1 การเข้าพบผู้ประกอบการ

บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง ตั้งอยู่ที่ ต.ท่าตูม อ.ศรีมหาโพธิ จ.ปราจีนบุรี ในนิคมอุตสาหกรรม 304 ลักษณะภายนอกโรงงานแสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 ประกอบอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ โดยมีกระบวนการชุบเคลือบผิวด้วยสังกะสี นิกเกิล และโครเมียม รวมทั้งมีกระบวนการกลึง การปั๊มขึ้นรูปชิ้นส่วน รวมทั้งรับงานขัดและชุบผิวตามการออกแบบของลูกค้าด้วย โดยกระบวนการส่วนใหญ่จะถูกควบคุมด้วยเครื่องจักรและคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ไม่ว่าจะเป็นส่วนการตัดและขึ้นรูป การปั๊ม การขัดเคลือบพื้นผิวชิ้นงาน ยกเว้นในส่วนของการประกอบชิ้นงานซึ่งเป็นส่วนที่มีพนักงานประจำเป็นผู้ประกอบชิ้นส่วน ลักษณะผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ลักษณะภายนอกของโรงงาน ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง



รูปที่ 4.14 รูปภาพแสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง  
(ที่มา: <http://www.trix.co.th/2015/product.html>)

#### 4.2.2 ลักษณะของน้ำเสียจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด

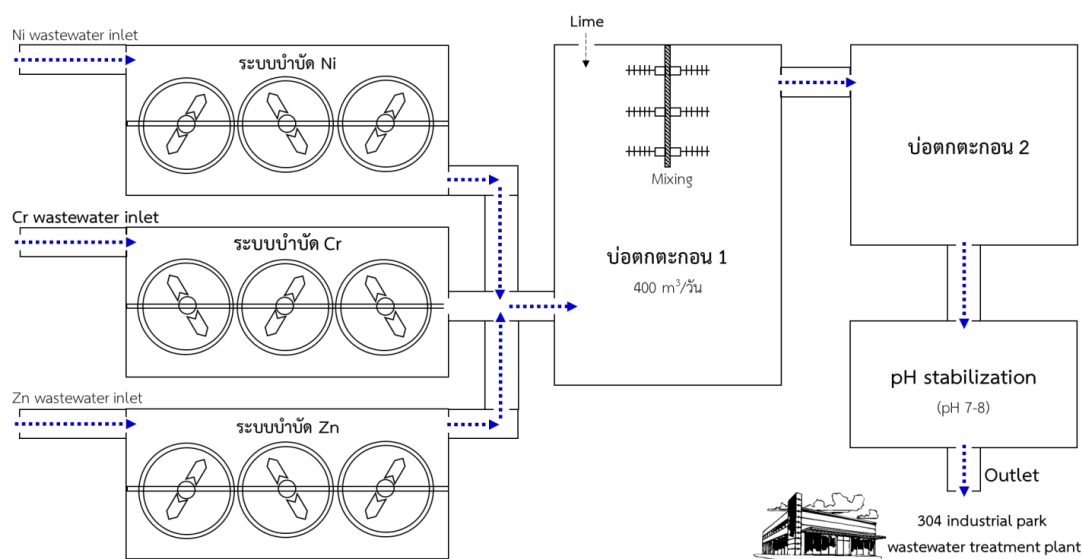
จากการเข้าพบผู้ประกอบการโรงงานชุบโลหะ ผู้วิจัยได้รับความร่วมมือจากอุตสาหกรรม จังหวัดปราจีนบุรี เป็นผู้ติดต่อประสานงานกับบริษัทดังกล่าว โดยผู้วิจัยได้ทำความเข้าใจและอธิบาย ให้แก่ผู้ที่มีส่วนรับผิดชอบในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัทดังกล่าวเพื่อขอทำการเก็บตัวอย่าง น้ำเสียมาใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ โดยลักษณะของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 รูปภาพแสดงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง เป็นบริษัทที่มีกิจกรรมหลักคือการชุบชิ้นส่วนยานยนต์และ โลหะด้วยโครเมียม นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งโรงงานจะต้องส่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเข้าสู่ระบบ บำบัดน้ำเสียรวมของนิคมอุตสาหกรรมเนื่องจากโรงงานตั้งอยู่ในเขตนิคมอุตสาหกรรม 304 ซึ่งระบบ บำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบบำบัดด้วยสารเคมีเป็นหลัก โดยน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตจะถูก แยกออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ น้ำเสียจากส่วนการชุบและล้างโครเมียม เป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ โครเมียมสูง เช่นเดียวกับน้ำเสียจากส่วนงานชุบนิกเกิลและสังกะสี ซึ่งน้ำเสียทั้ง 3 ส่วนจะถูกแยก บำบัดด้วยการตกตะกอนทางเคมีก่อน จากนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางเคมีทั้ง 3 ส่วนจะถูกส่งมา รวมกันที่บ่อปรับ pH เพื่อให้ pH มีค่าอยู่ในช่วง 7-9 หลังจากนั้นน้ำเสียจะถูกกักไว้ในบ่อตกตะกอน

ขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยสู่บ่อบำบัดรวมของนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งมีการกำหนดค่าต่าง ๆ อ้างอิงตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.16 รูปภาพแสดงไดอะแกรมของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ

เมื่อนำน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานชุบโลหะมาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของน้ำตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียโดยเฉพาะปริมาณโครเมียม พบว่ามีค่า 7.04 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดและพบในบ่อกำจัดไฮดรอนของเหล็กโดยมีคุณลักษณะของน้ำตามพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

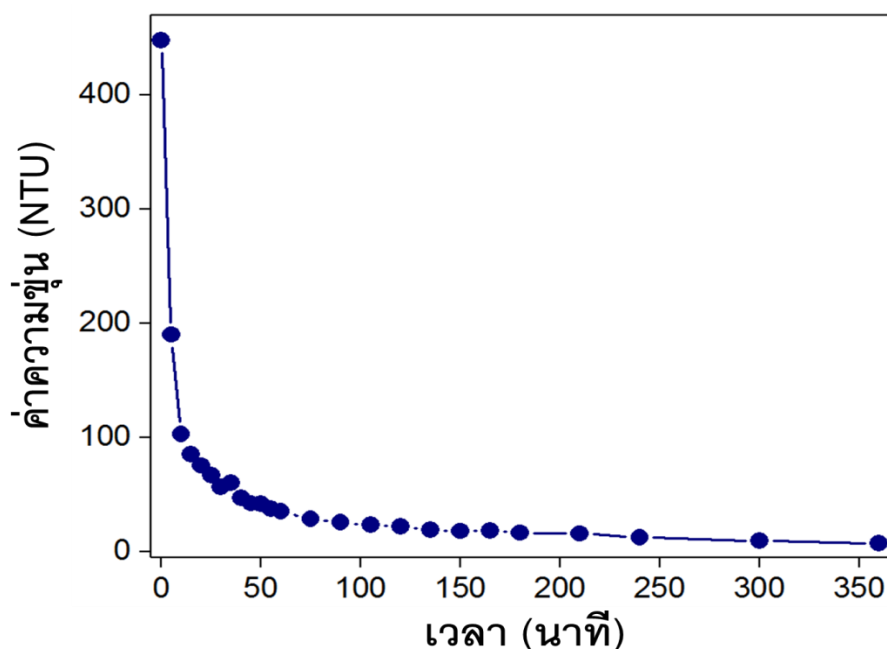
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงลักษณะน้ำทิ้งจากบ่อกำจัดไฮดรอนของเหล็ก บ. ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด

| พารามิเตอร์   | ค่าที่ตรวจวัดได้ | ค่ามาตรฐาน   |
|---------------|------------------|--------------|
| COD           | 16.0 mg/L        | < 120 mg/L   |
| SS            | 130 mg/L         | < 50 mg/L    |
| TDS           | 612 mg/L         | < 3,000 mg/L |
| Iron (Fe)     | 83.7 mg/L        | -            |
| Nickel (Ni)   | 0.02 mg/L        | -            |
| Chromium (Cr) | 7.04 mg/L        | < 0.25 mg/L  |
| Cadmium (Cd)  | < 0.001 mg/L     | < 0.03 mg/L  |

#### 4.2.3 การศึกษาวิธีปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานซูบโลหะ

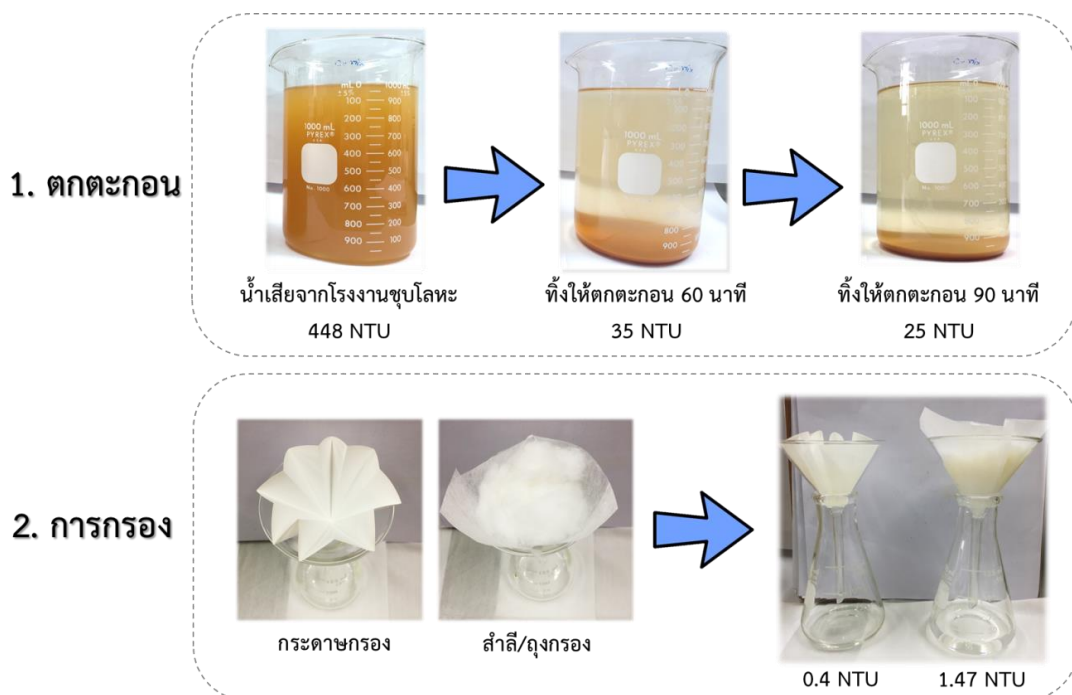
น้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานซูบโลหะที่ได้นำมาเป็นตัวแทนน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้เพื่อใช้ในการศึกษานี้ได้รับความร่วมมือจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบำบัด 2 ส่วนคือน้ำ 1) ที่หลังบำบัดโครเมียมด้วยสารเคมี และ 2) น้ำทิ้งจากบ่อปรับ pH ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากทั้ง 2 จุด พบว่าน้ำทิ้งที่อยู่ในบ่อปรับ pH เป็นน้ำเสียที่มีปริมาณโครเมียมปนเปื้อนอยู่ประมาณ 7.02 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม จึงเป็นส่วนที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวแทนในการพัฒนาระบบบำบัดเพื่อเชื่อมต่อกับระบบการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยวัสดุดูดซับ GOP

เพื่อศึกษาแนวทางในการหาวิธีปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการดูดซับด้วยวัสดุ GOP น้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานซูบโลหะได้ถูกนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณลักษณะด้านความขุ่นซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ปริมาณสารแขวนลอยอันมีผลต่อการแทรกแซงและขัดขวางการทำงานของวัสดุดูดซับได้ พบว่าความขุ่นเริ่มต้นของน้ำเสียจากโรงงานซูบโลหะมีค่าอยู่ที่ 448 NTU แต่ตะกอนของน้ำเสียจากโรงงานซูบโลหะนั้นมีความแตกต่างจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเนื่องจากสามารถตกตะกอนได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยสร้างตะกอน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาระยะเวลาของการตกตะกอนเพื่อเป็นข้อมูลใช้ในการพิจารณาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียเบื้องต้นต่อไป ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงระยะเวลาการตกตะกอนของน้ำเสียจากโรงงานซูบโลหะ

จากกราฟน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะสามารถตกตะกอนได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยสร้างตะกอน ระยะเวลาของการตกตะกอนจนทำให้ความขุ่นลดลง > 80 % ใช้เวลาเพียง 15 นาที โดยค่าความขุ่นลดลงจาก 448 NTU เหลือ 85 NTU แต่จากการทดลอง พบว่าเมื่อปล่อยให้เวลาดตกตะกอนนานขึ้น ค่าความขุ่นจะลดลงได้มากกว่า 90 % ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้กำหนดระยะเวลาของการตกตะกอนไว้ที่ 1 ชั่วโมง และ 1.30 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบความขุ่นที่ลดลง ก่อนจะนำไปกรองด้วยวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ สำลี/ถุงชา และ เส้นใยแก้ว (Glass wool) เพื่อเปรียบเทียบความขุ่นสุดท้าย รูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงขั้นตอนการลดตะกอนและตะกอนแขวนลอยจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

จากการทดลองเพื่อหาวิธีการปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเบื้องต้น พบว่าการทิ้งให้น้ำเสียเกิดการตกตะกอนเองเป็นเวลา 60-90 นาที สามารถลดปริมาณตะกอนและสารแขวนลอยได้มากถึง 92-94 % ซึ่งเมื่อทำการกรองอีกขั้นตอนหนึ่งด้วยวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายทั่วไป เช่น สำลี และถุงกรองสามารถลดปริมาณตะกอนและสารแขวนลอยในน้ำเสียได้ถึง 99 % ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีตะกอนและอนุภาคแขวนลอยน้อยมาก เหมาะแก่การนำไปบำบัดโครเมียมด้วยกระบวนการดูดซับ

#### 4.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

##### โลหะ

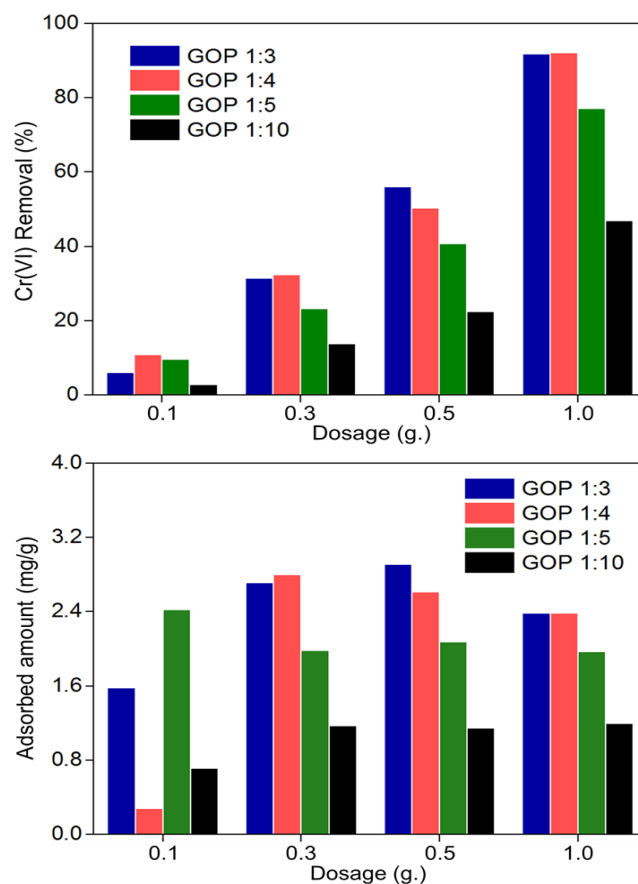
ในเบื้องต้นวัสดุดูดซับ GOP ได้ถูกทำการศึกษาในเบื้องต้นเกี่ยวกับความสามารถการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์และโครเมียมไตรวาเลนต์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมาโดยแกรไฟต์ออกไซด์ (GO) เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ในขณะที่พลาสติกสามารถกำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์ได้ แต่เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเบื้องต้นที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งไม่มีสารปนเปื้อน โลหะหนักและตะกอนแขวนลอยอื่น ๆ เป็นตัวกีดขวางการทำงานของวัสดุดูดซับ ซึ่งลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมักเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของมลสารที่เป็นโลหะหนักหลายชนิด จึงทำให้การทดสอบการดูดซับด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ไม่เป็นตัวแทนลักษณะน้ำเสียที่แท้จริงของโรงงานชุบโลหะได้

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างน้ำเสียจากบริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ผ่านการกำจัดโครเมียมในเบื้องต้นแล้วมา 2 ตัวอย่าง ซึ่งมาจากบ่อตกตะกอนพบว่า ทั้ง 2 บ่อเป็นน้ำเสียที่มีคุณลักษณะคล้ายกัน แต่มีปริมาณโครเมียมต่างกัน คือ 0.32 และ 7.04 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยทั่วไปแล้วค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียค่อนข้างสูงและมีช่วงความต่างของค่าความเข้มข้นกว้าง ตั้งแต่ 1 – 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจำเป็นต้องทำการจัดกลุ่มค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่มีความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการดูดซับช่วยในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ โดยค่าความเข้มข้นดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** ตารางจัดกลุ่มช่วงความเข้มข้นของโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะและความเหมาะสมต่อการใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดโครเมียม

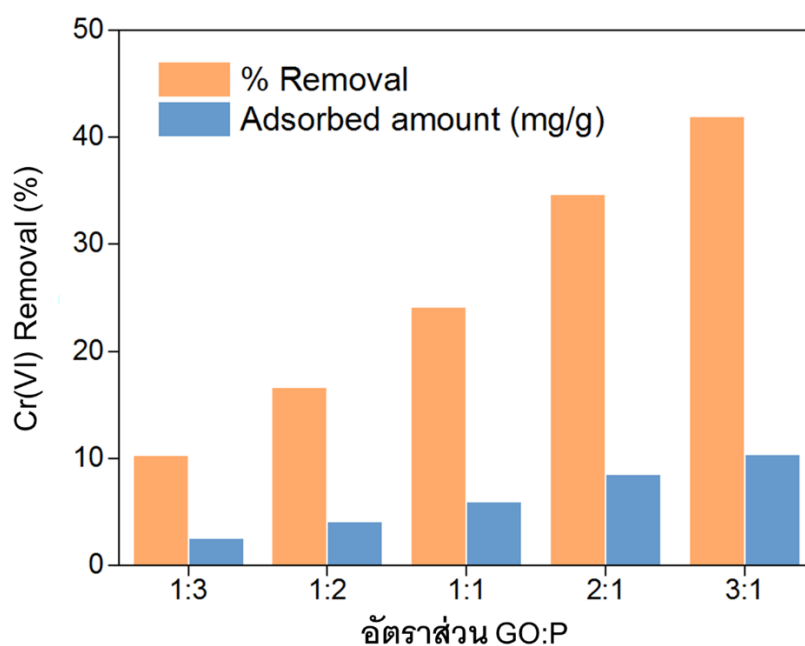
| ระดับความเข้มข้น          | ความเข้มข้น (mg/L) | การบำบัดขั้นต้น                                                                    | การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ |
|---------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| ความเข้มข้นสูงมาก         | > 10,00            | การตกตะกอนด้วย                                                                     | เมื่อความเข้มข้นลดลง        |
| ความเข้มข้นสูง            | 1,000-10,000       | NaOH, Ca(OH) <sub>2</sub> , MgO, และ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | เหลือ < 100 mg/L            |
| ความเข้มข้นกลาง           | 10-100             | -                                                                                  | เข้าสู่กระบวนการ            |
| ความเข้มข้นต่ำ            | 1-10               | -                                                                                  | ดูดซับได้โดยตรง             |
| ความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐาน | ≤ 0.25             | -                                                                                  | -                           |

เพื่อให้การทดสอบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับครอบคลุมความเข้มข้นของโครเมียมในช่วงที่กว้างขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาน้ำเสียจริงร่วมกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้การเติมโครเมียมลงในน้ำเสียตัวอย่างให้มีความเข้มข้นมากกว่าปริมาณโครเมียมที่มีอยู่จริง ทำให้ได้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียมด้วยกัน 2 ช่วง คือน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำเสียจริงที่ถูกเติมโครเมียม) และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร (น้ำเสียจริง) โดยในเบื้องต้นผู้วิจัยต้องทำการเลือกวัสดุดูดซับ GOP ที่มีสัดส่วนเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียก่อน โดยอ้างอิงจากข้อมูลจากการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่ง GOP ในสัดส่วน 1:4 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากผลการศึกษาที่ผ่านมา แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ปรับวิธีการเตรียม GOP ให้มีวิธีการเตรียมที่รวดเร็วขึ้นและสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันสัดส่วน GOP ที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่ง จึงได้ทำการทดสอบสัดส่วนของ GOP ที่ 1:3 1:4 1:5 และ 1:10 และเมื่อใช้ปริมาณ GOP ต่าง ๆ กัน (0.1 0.3 0.5 และ 1.0 กรัม) เพื่อดูดซับโครเมียมในน้ำเสียที่ถูกเติมโครเมียมให้มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ GOP ที่ต่างกันกับปริมาณตัวดูดซับที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (บน) และปริมาณมลสารที่ดูดซับ (ล่าง)

จากกราฟรูปที่ 4.19 (บน) เมื่อใช้ตัวดูดซับ GOP ที่มีสัดส่วนและปริมาณต่างกันในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อสัดส่วนของ GO:P มีปริมาณเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ GOP เมื่อปริมาณตัวดูดซับ GOP เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมดีขึ้นด้วย โดย GOP ที่สัดส่วน 1:3 และ 1:4 มีประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ใกล้เคียงกันแม้เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับในปริมาณที่แตกต่างกันไป โดยประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคือ 92.03 % และ 91.70 % เมื่อใช้วัสดุดูดซับ GOP ที่สัดส่วน 1:4 และ 1:3 ในปริมาณ 1.0 กรัม ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GOP ที่สัดส่วน 1:4 มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียง หรือสูงกว่า GOP 1:3 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น (6 และ 20 กรัมต่อลิตร) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณต้นทุนการใช้วัสดุดูดซับ ในการทดลองต่อจากนี้ GOP ในอัตราส่วน 1:4 จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะทั้ง 2 ความเข้มข้นต่อไป



**รูปที่ 4.20** กราฟผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ของ GO:P เมื่อมีอัตราส่วน GO:P ต่างกัน

เมื่อพิจารณาความสามารถการดูดซับโครเมียมของ GOP เมื่ออัตราส่วนและปริมาณวัสดุดูดซับต่างกันรูปที่ 4.19 (ล่าง) พบว่าวัสดุดูดซับ GOP ที่สามารถดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียได้สูงที่สุดคือ GOP ที่มีอัตราส่วน 1:3 และ 1:4 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับโครเมียม

เฮกซะวาเลนต์ได้สูงที่สุดโดยมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 2.91 และ 2.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณ GOP 10 กรัมต่อลิตรในการดูดซับโครเมียมที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ GOP ที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:10 มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้รองลงมา ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา (รูปที่ 4.20) คือเมื่อเพิ่มปริมาณ GO:P ความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จะเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อเทียบความสามารถในการดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ GOP 1 กรัมที่อัตราส่วนเดียวกันคือ 1:3 ระหว่างงานวิจัยก่อนหน้าและงานวิจัยนี้ พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในการศึกษานี้ (3.57 มิลลิกรัมต่อกรัม) สูงกว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในการศึกษาก่อนหน้า (2.53 มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการปรับวิธีการสร้างวัสดุดูดซับ GOP มีผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับชนิดนี้

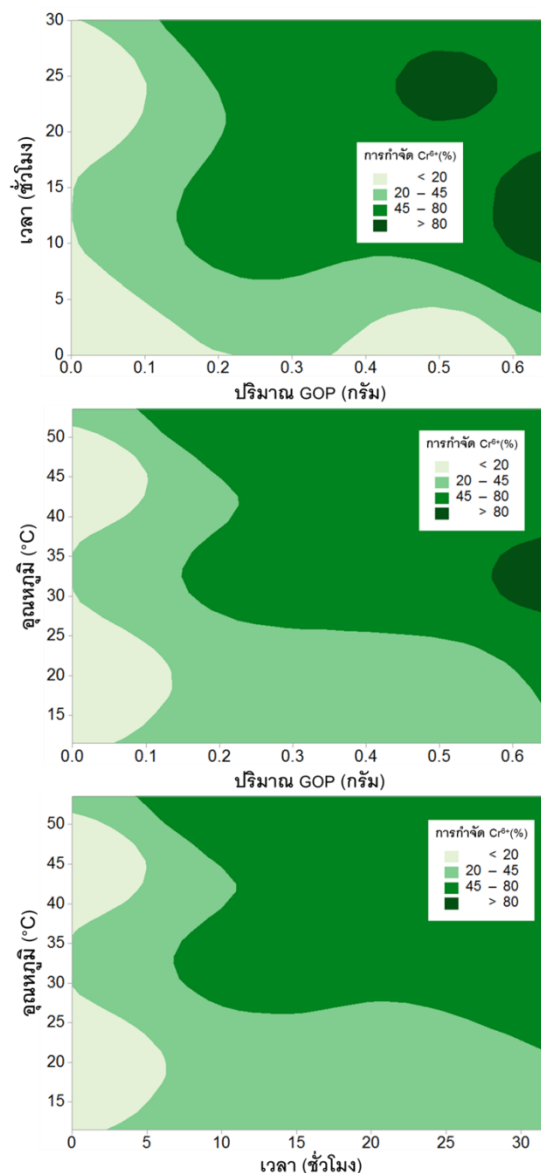
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในงานวิจัยนี้ได้้นำการออกแบบการทดลองเพื่อสร้างแผนภาพพื้นผิวที่ด้วยวิธีการทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 18.1 โดยทำการศึกษาปัจจัยที่สามารถมีผลต่อการกำจัดโครเมียมได้ 3 ปัจจัยร่วมกัน โดยในการศึกษานี้ได้เลือกทำการศึกษาปัจจัยของปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิมาทำการศึกษาร่วมกัน เพื่อสร้างแผนภาพคอนทัวร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม ผลการทดลองแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.21

จากกราฟรูปที่ 4.21 (บน) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับ กับเวลาในการดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจริงที่มีเดิมโครเมียมลงไปจนมีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณวัสดุดูดซับและเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาในการดูดซับมากกว่า 5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าร้อยละ 45 เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ GOP มากกว่า 12 กรัมต่อลิตรขึ้นไป นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ปริมาณตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีจะต้องมีปริมาณที่มากพอ ซึ่งในที่นี้ปริมาณตัวดูดซับที่สูงกว่า 14 กรัมต่อลิตร จึงจะมีผลต่อการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงร้อยละ 45-80 เมื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมระหว่างเวลาและปริมาณ GOP 1:4 ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้สูงที่สุดต้องมีปริมาณ GOP 1:4 มากกว่า 20 กรัมต่อลิตรและใช้เวลาในการดูดซับ 10 ชั่วโมงขึ้นไป

จากกราฟรูปที่ 4.21 (กลาง) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการดูดซับ และปริมาณวัสดุดูดซับ GOP พบว่าอุณหภูมิการดูดซับมีผลต่อการทำงานของวัสดุดูดซับอย่างชัดเจน เนื่องจากในปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของวัสดุดูดซับ GOP คืออุณหภูมิที่มากกว่า 20 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้วัสดุดูดซับ GOP 1:4 ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตรขึ้นไป ทำการดูดซับน้ำเสียที่ถูกเติมโครเมียมให้มีความเข้มข้น 40

มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ดีที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของการดูดซับในรูปที่ 4.16 (ล่าง)

เมื่อทำการสร้างกราฟคอนทัวร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการดูดซับ (รูปที่ 4.21(ล่าง)) สามารถบอกความสำคัญของอุณหภูมิการดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับว่าเป็น 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับอย่างชัดเจนคือกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำเมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำและเวลาในการดูดซับน้อย ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้มากคือช่วง 25-50 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการดูดซับต้องมากกว่า 10 ชั่วโมงเป็นต้นไป



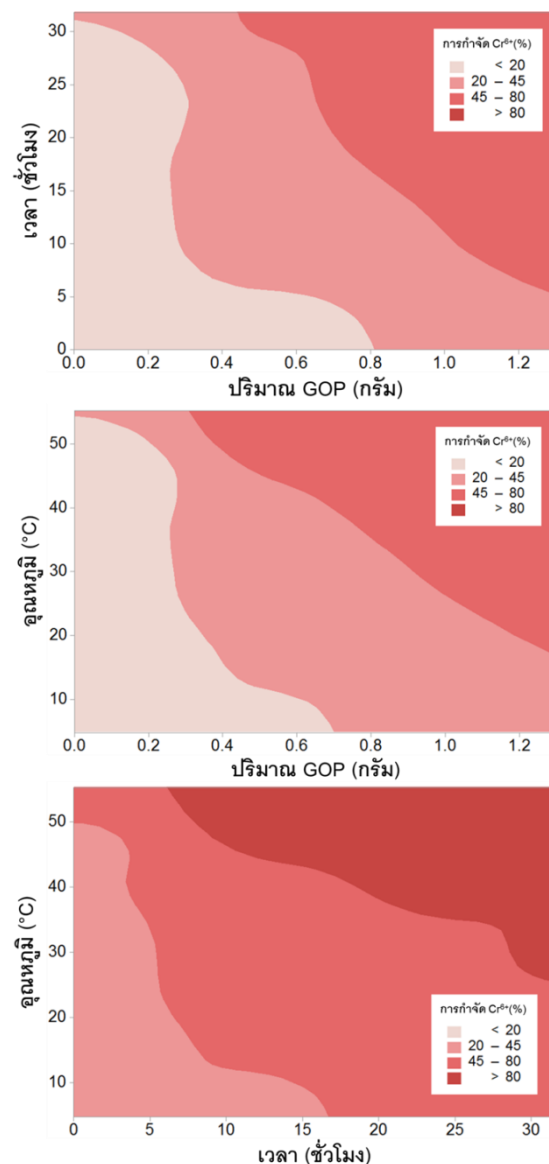
รูปที่ 4.21 กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับ

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการใช้วัสดุดูดซับ GOP 1:4 ทำการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจริงที่ถูกเติมโครเมียมให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้เป็นข้อมูลตัวแทนในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะเมื่อมีการปนเปื้อนโครเมียมในระดับกลาง (10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในขั้นตอนต่อไปนี้ คือการนำน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่ผ่านการปรับสภาพในเบื้องต้นตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.3.2 มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม โดยน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วนั้น เป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ประมาณ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจัดอยู่ในระดับการปนเปื้อนต่ำ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้แผนภาพพื้นผิวที่ด้วยวิธีการทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น โดยเลือกศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมได้ 3 ปัจจัยเช่นเดียวกันคือ ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิ และเนื่องจากการทดลองดังกล่าว ใช้น้ำเสียจริงซึ่งมีปริมาณการปนเปื้อนของโครเมียมในระดับต่ำ (1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผู้วิจัยจึงได้ลดปริมาณการใช้วัสดุดูดซับ GOP ลงเพื่อทดสอบความสามารถของวัสดุดูดซับเมื่อมีปริมาณน้อย ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.17

จากกราฟรูปที่ 4.22 (บน) ปริมาณวัสดุดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แสดงความสัมพันธ์กันชัดเจนคือเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับ และเพิ่มเวลาการดูดซับ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้น ซึ่งเวลาที่ใช้ในการดูดซับมีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมชัดเจนเมื่อใช้เวลาในกระบวนการดูดซับ 5 ชั่วโมงขึ้นไป โดยประสิทธิภาพการดูดซับจะอยู่ในช่วงร้อยละ 20-45 แต่จากกราฟคอนทัวร์ เมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ GOP เพิ่มขึ้นและเวลาในการดูดซับผ่านไป 10 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วงร้อยละ 45-70 ซึ่งความสัมพันธ์นี้ยังแสดงสภาวะที่เหมาะสมได้ไม่ชัดเจนนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกำหนดปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้น้อยลงทำให้ช่วงของการแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับด้วยแผนภาพคอนทัวร์ทำได้ไม่ครอบคลุม ดังนั้นจึงอาจจะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยปรับเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้ให้สูงขึ้น เพื่อให้ได้แผนภาพคอนทัวร์ที่แสดงสภาวะที่เหมาะสมได้และมีความใกล้เคียงกับการนำไปปรับใช้งานได้มากที่สุด

เช่นเดียวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัสดุดูดซับที่ใช้และอุณหภูมิการดูดซับ จากแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ 4.22 (กลาง) อุณหภูมิการดูดซับแสดงความเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับอย่างชัดเจน ซึ่งอุณหภูมิที่ส่งผลให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพคืออุณหภูมิที่สูงกว่า 22 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปริมาณวัสดุดูดซับที่มีปริมาณน้อยเช่น 0.05 กรัม ต้องอาศัยอุณหภูมิการดูดซับที่สูงถึง 50 องศาเซลเซียสเพื่อให้ประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 20-45 ซึ่งจากแผนภาพสามารถบ่งบอกได้ว่า อุณหภูมิที่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และปริมาณวัสดุดูดซับที่มากกว่า 0.1 กรัม สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้มีประสิทธิภาพร้อยละ 20-45

เมื่อทำการสร้างกราฟคอนทัวร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการดูดซับรูปที่ 4.22 (ล่าง) สามารถบ่งบอกความสำคัญของอุณหภูมิการดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับว่าเป็น 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับอย่างชัดเจนคือกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำและเวลาในการดูดซับน้อย ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้มากคือช่วง 25-50 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการดูดซับต้องมากกว่า 10 ชั่วโมงเป็นต้นไป

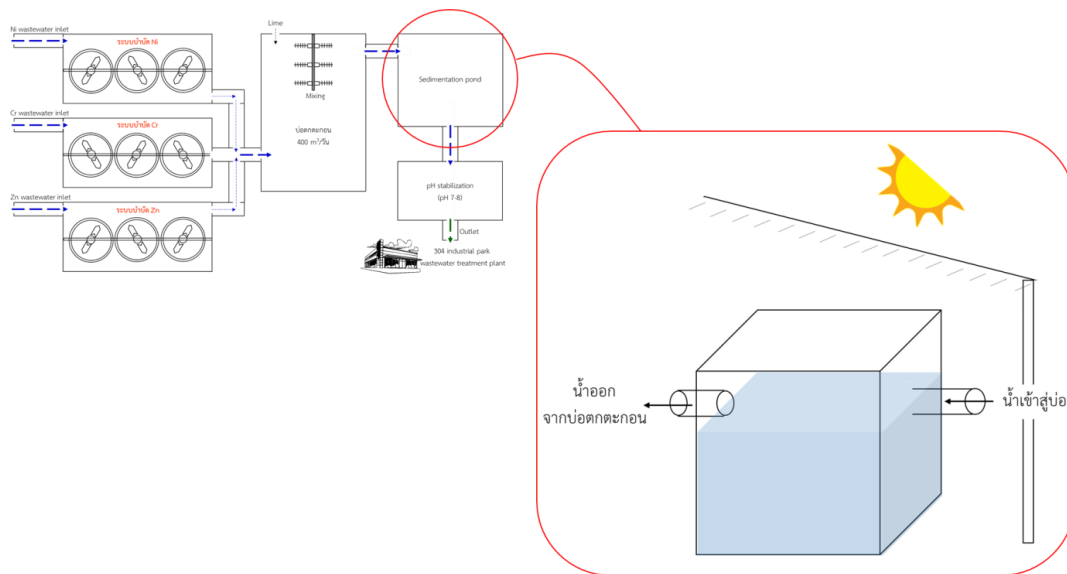


รูปที่ 4.22 กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (บน) ปริมาณ GOP และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (กลาง) ปริมาณ GOP และอุณหภูมิการดูดซับ (ล่าง) อุณหภูมิและเวลาการดูดซับ

#### 4.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพ GOP ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานซูโหละจากระบบจำลอง

ในการทดสอบประสิทธิภาพวัสดุดูดซับ GOP เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อการดูดซับโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่อาจมีสารประกอบอื่นปนเปื้อนร่วมด้วย จึงต้องมีการจำลองสภาพแวดล้อมให้มีความใกล้เคียงกับลักษณะการนำไปใช้มากที่สุด โดยในการศึกษาจะคำนึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ผ่านการศึกษาในเบื้องต้นทางห้องปฏิบัติการมาแล้วมีอิทธิพลต่อการกำจัดโครเมียมด้วยวัสดุดูดซับ GOP ได้ เช่น อุณหภูมิ แสง ลักษณะการกวน เป็นต้น ดังนั้นในการทดสอบ GOP ในสถานะที่ใกล้เคียงการนำไปใช้งานจริง ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกบ่อตกตะกอนบ่อที่ 2 ซึ่งเป็นบ่อตกตะกอนและปรับ pH ของน้ำเสียด้วยปูนขาวซึ่งบ่อตกตะกอนดังกล่าวเป็นบ่อขนาด 200 ลูกบาศก์เมตร 2 บ่อติดกัน ตั้งอยู่ในพื้นที่ร่มมีหลังคาแต่ไม่มีผนังกัน ดังนั้นสภาพโดยทั่วไปของน้ำในบ่อจึงไม่ถูกแสงแดด แต่พื้นที่ดังกล่าวอยู่นอกตัวอาคารจึงทำให้มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ลักษณะของบ่อดังแสดงในรูปที่ 4.23 น้ำเสียจากกระบวนการต่าง ๆ จะเข้าสู่ระบบบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีโดยแยกบำบัดตามการปนเปื้อนหลัก เช่น การบำบัดนิเกิล การบำบัดโครเมียม และการบำบัดสังกะสี จากนั้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางเคมีแล้วจะถูกส่งไปยังบ่อตกตะกอนซึ่งเป็นบ่อ 2 บ่อติดกัน โดยบ่อตกตะกอนที่ 1 มีลักษณะเป็นบ่อพักน้ำ เนื่องจากน้ำในบ่อไม่นิ่งสนิท ที่ผิวน้ำมีน้ำไหลเข้าบ่อต่อเนื่อง น้ำเสียจากบ่อตกตะกอนที่ 1 นี้จะไหลสู่บ่อตกตะกอนบ่อที่ 2 เพื่อทำการปรับค่า pH ด้วยปูนขาวให้มีค่าใกล้เคียง 7 ก่อนปล่อย จากการพิจารณาลักษณะของบ่อตกตะกอนทั้ง 2 บ่อ บ่อตกตะกอนบ่อที่ 2 มีลักษณะเป็นบ่อที่ถูกเชื่อมต่อจากบ่อตกตะกอนที่ 1 โดยมีน้ำไหลเข้าผ่านท่อเชื่อมต่อ ลักษณะน้ำค่อนข้างนิ่ง จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นบ่อสร้างสถานะจำลองในการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในการดูดซับโครเมียม

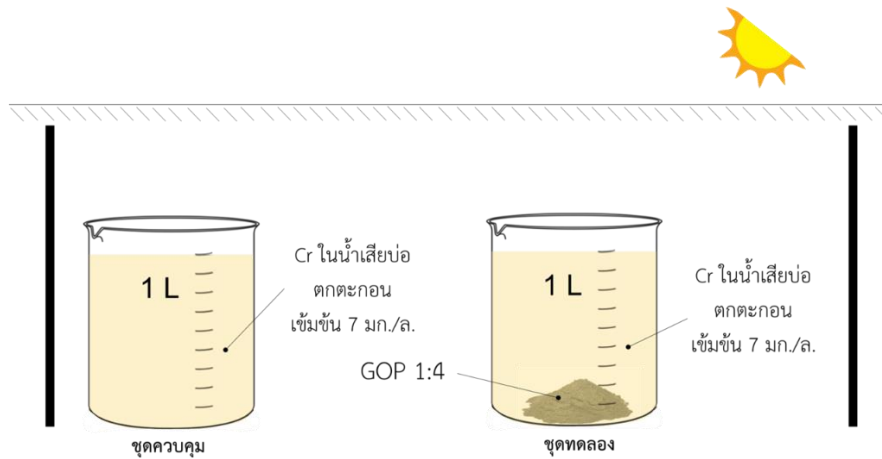
เช่นเดียวกับการทดสอบการดูดซับโครเมียมของวัสดุดูดซับ GOP ในสถานะจำลองของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากลักษณะน้ำตัวอย่างที่เก็บจากบ่อตกตะกอนมีระดับการปนเปื้อนของโครเมียมต่ำหลังจากผ่านการบำบัดทางเคมีแล้ว ดังนั้นในการศึกษานี้จึงต้องเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับลักษณะน้ำเสียจากโรงซูโหละที่อาจมีการปนเปื้อนของโครเมียมในความเข้มข้นเฉลี่ย 7 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการตั้งชุดทดลองและชุดควบคุมภายใต้สภาวะเดียวกันคือ บริเวณเปิดโล่งที่มีหลังคา มีอุณหภูมิเฉลี่ย 27-30 องศาเซลเซียส ชุดการทดลองทั้ง 2 ชุดจะถูกเก็บตัวอย่างพร้อมกันหลังทำการเติมวัสดุดูดซับ GOP ลงไปในปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร และทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียออกจากกระบอก น้ำเสียใหม่จะถูกเติมลงไปในปริมาณที่เท่ากัน แล้วนำตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่ ลักษณะของชุดควบคุม และชุดทดลองดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.24



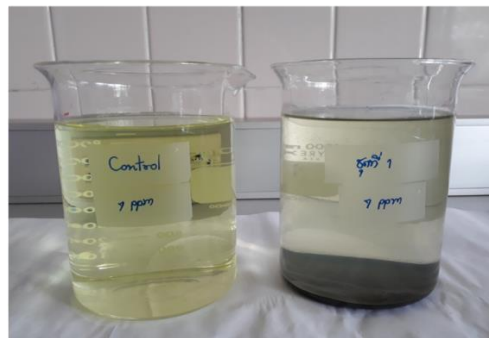
รูปที่ 4.23 ไดอะแกรมแสดงลักษณะบ่อตกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานชุบโลหะ

ผลการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของ GOP ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับบ่อตกตะกอนของโรงงานชุบโลหะดังที่กล่าวไปแล้วในขั้นต้นว่าการทดลองดังกล่าวประกอบด้วยชุดการทดลอง 2 ชุดได้แก่ ชุดควบคุม และชุดทดลอง โดยชุดควบคุมผู้วิจัยจะใช้ในการติดตามความเข้มข้นของโครเมียมที่เปลี่ยนไปเมื่อดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและเติมตัวอย่างน้ำเสียใหม่ลงไปในแต่ละครั้ง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลอง ซึ่งเป็นชุดที่ทำการเติมวัสดุดูดซับ GOP ลงไปในปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียจากชุดทดลองเป็นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาเพื่อติดตามความสามารถในการดูดซับโครเมียมของวัสดุดูดซับผสม GOP เมื่อผ่านการใช้งานในน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนเริ่มต้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 18 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนวัสดุดูดซับ จากผลการทดลองที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากชุดทดลองและชุดควบคุมที่ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อเวลาของการดูดซับผ่านไป 2 6 และ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บต่อเนื่องทุกวันจนครบ 18 วัน การลดลงของโครเมียมในน้ำเสียในบ่อตกตะกอนมีแนวโน้ม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.25

ก)



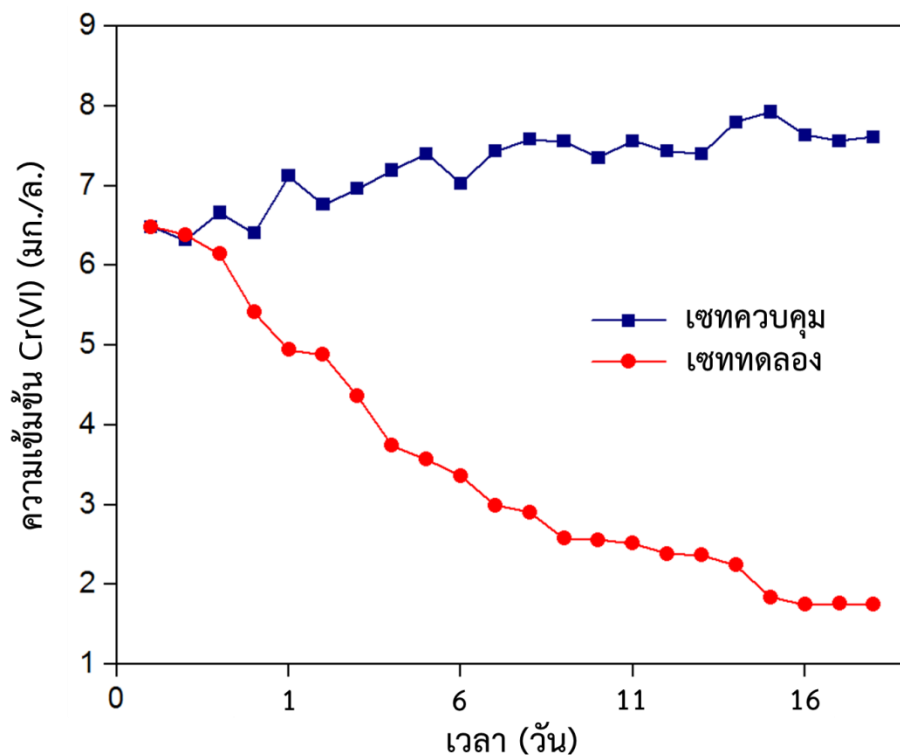
ข)



**รูปที่ 4.24** ภาพแสดงการทดลองเพื่อเลียนแบบการใช้วัสดุดูดซับ GOP ในบ่ตกตะกอนของโรงงาน  
ชุบโลหะโดยแบ่งเป็นชุดควบคุม (ซ้าย) และชุดทดลอง (ขวา)  
โดย ก) ไดอะแกรมแสดงการทดลอง และ ข) รูปภาพการทดลอง

จากกราฟในรูป 4.25 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโครเมียมจากชุดควบคุม ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่มีการเติมวัสดุดูดซับ GOP ลงไปแต่มีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาทำการวัดความเข้มข้นของโครเมียมที่ปนเปื้อนและเติมตัวอย่างน้ำเสียกลับลงสู่ระบบเพื่อคงปริมาณน้ำเสียในระบบไว้ เช่นเดียวกับบ่ตกตะกอนที่มีการไหลของน้ำออกจากระบบและมีน้ำใหม่ไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในชุดควบคุม พบว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์มีความเข้มข้นสูงขึ้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 6.59 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากมีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบ 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป โดยความเข้มข้นสูงสุดของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ที่ 7.92 หลังจากการทดลองผ่านไป 14 วัน และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่เหลือนอยู่ในชุดทดลอง คือชุดที่มีการเติมตัวดูดซับผสม GOP ลงไปในน้ำเสียในปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง

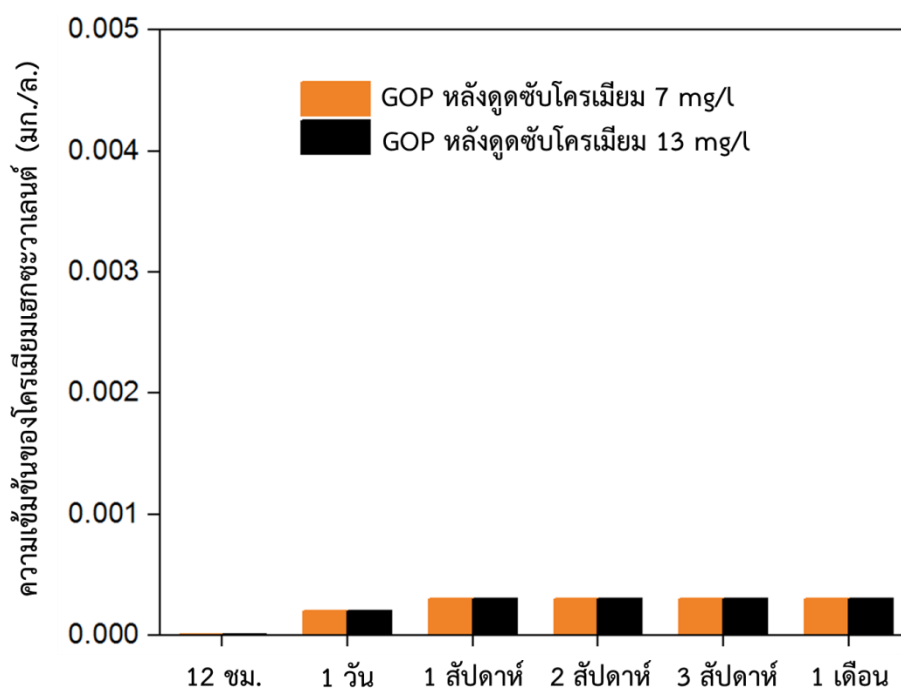
โดยความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ที่ 1.75 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 18 ของการทดลอง



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียของบ่อดักตะกอน โรงงานชุบโลหะของชุดควบคุม (สีน้ำเงิน) และชุดทดลองที่มี GOP เป็นตัวดูดซับ (สีแดง)

#### 4.3 การศึกษาการการชะละลายของโครเมียมจากวัสดุดูดซับ

ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เพิ่มหัวข้อการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการจัดการ GOP ที่ผ่านการใช้งานในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียโรงงานแล้วโดยทำการทดสอบความสามารถในการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งาน โดยได้ทำการเก็บตัวอย่าง GOP ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานพอกย้อม (ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร) และโรงงานชุบโลหะ (ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร) มาใช้ในการทดลอง โดยการทดลองนี้ได้นำ GOP ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมมาแล้วเป็นเวลา 18 วันมาทำการทดลองโดยใช้น้ำเป็นตัวชะละลาย โดยทำการเก็บตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป 12 และ 24 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกชะออกมาจากตัวอย่าง GOP ที่ใช้ดูดซับโครเมียมแล้ว ผลการศึกษาดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำ

จากผลการศึกษาการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จาก GOP ที่ใช้ดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ โดยใช้น้ำเป็นตัวชะละลายและวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ถูกขอกออกมาได้เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง 1 วัน 1-3 สัปดาห์ และ 1 เดือน ค่าความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ในช่วง 0-0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโครเมียมที่สามารถพบได้ในน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นของโครเมียมต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งนับเป็นปริมาณการชะละลายที่ต่ำมาก จนสามารถรายงานเป็นค่าที่ตรวจไม่พบได้

#### 4.4 การศึกษาต้นทุนการผลิตวัสดุดูดซับ GOP

ต้นทุนการผลิตวัสดุดูดซับเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่ผู้วิจัยให้ความสำคัญเนื่องจากต้นทุนการผลิตจะมีผลต่อการพิจารณาใช้วัสดุดูดซับดังกล่าวในการลดการปนเปื้อนของโครเมียมในระบบจริงสำหรับการผลิตวัสดุดูดซับ GOP เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตแล้ว สามารถจำแนกลักษณะของต้นทุนการผลิตได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. ต้นทุนคงที่ (Total Fixed cost) หมายถึง ต้นทุนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับกิจกรรมในระยะสั้น ซึ่งจากการพิจารณากระบวนการผลิตแล้ว ส่วนใหญ่ต้นทุนนี้จะมาจากการลงทุนเครื่องมือและอุปกรณ์การผลิต

2. ต้นทุนผันแปร (Total variable cost) หมายถึง ต้นทุนที่มีการแปรผันไปตามระดับของกิจกรรม ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นต้นทุนที่มีการเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนหรือกำลังการผลิตซึ่งจะเป็นต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบเป็นส่วนใหญ่

ทั้งนี้จากการพิจารณาต้นทุนการผลิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตวัสดุชุดขับ GOP ต้นทุนส่วนใหญ่จะเป็นการลงทุนที่ต้นทุนคงที่ซึ่งหมายถึงความพร้อมของอุปกรณ์ในการผลิต ซึ่งอาจทำให้ลักษณะของต้นทุนที่เกิดขึ้นในการคำนวณนี้มีมูลค่าสูง ซึ่งการคำนวณดังกล่าวเป็นเพียงองค์ประกอบเบื้องต้นที่จะแสดงให้เห็นภาพการลงทุนในกรณีที่เป็นกรณีเริ่มต้นการผลิตในระยะแรก ซึ่งมูลค่าดังกล่าวย่อมแตกต่างออกไปในกรณีที่วัสดุและอุปกรณ์เหล่านี้มีพร้อมอยู่แล้วในสถานประกอบการ

#### 4.4.1 ต้นทุนคงที่การสังเคราะห์วัสดุชุดขับ GOP

ในการศึกษาต้นทุนคงที่ของการผลิตวัสดุชุดขับ GOP ผู้วิจัยได้ทำการแจกแจงต้นทุนตามวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการทุกส่วนโดยอาศัยการคำนวณจากราคากลางของการจำหน่ายเป็นหลัก รายละเอียดการคำนวณต้นทุนคงที่ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงต้นทุนคงที่การสังเคราะห์วัสดุชุดขับ GOP

| ขั้นตอน              | เครื่องมือ                             | จำนวน     | ราคาต่อหน่วย            | มูลค่า (บาท) |
|----------------------|----------------------------------------|-----------|-------------------------|--------------|
| กระบวนการผลิต<br>GOP | เตาให้ความร้อนพร้อมระบบ<br>กวนสารละลาย | 1 เครื่อง | 7,900 บาท/เครื่อง       | 7,900        |
|                      | ปั๊มดูดสุญญากาศ                        | 1 เครื่อง | 10,500 บาท/เครื่อง      | 10,500       |
|                      | ตู้อบลมร้อน                            | 1 เครื่อง | 30,000 บาท/เครื่อง      | 30,000       |
|                      | เครื่องปั่นตกตะกอน                     | 1 เครื่อง | 38,000 บาท/เครื่อง      | 38,000       |
|                      | เครื่องกลั่นน้ำ                        | 1 เครื่อง | 47,000 บาท/เครื่อง      | 47,000       |
|                      | อ่างควบคุมอุณหภูมิ                     | 1 เครื่อง | 32,900 บาท/เครื่อง      | 32,900       |
|                      | เครื่องเขย่าแบบควบคุม<br>อุณหภูมิ      | 1 เครื่อง | 139,900 บาท/<br>เครื่อง | 139,900      |
| ต้นทุนคงที่รวม       |                                        |           |                         | 306,200      |

จากการคำนวณข้างต้น ค่าต้นทุนคงที่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นต้นทุนราคาเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งมีราคาการผลิตรวม โดยคำนวณเป็นเงิน 306,200 บาท ซึ่งต้นทุนส่วนนี้อาจมีความแตกต่างไปตามลักษณะความพร้อมของสถานประกอบการ

#### 4.4.2 ต้นทุนผันแปรที่ใช้สังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP

ในการจำแนกต้นทุนผันแปรของการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP ผู้วิจัยได้พิจารณาลักษณะของต้นทุนที่เกิดขึ้น และแยกประเภทของต้นทุนผันแปรออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าวัตถุดิบและค่าน้ำและไฟฟ้า ซึ่งต้นทุนค่าวัตถุดิบที่เกิดขึ้นจะเป็นสารเคมีที่ใช้ในการการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ (GO) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งต้นทุนค่าวัตถุดิบสามารถจำแนกรายละเอียดการคำนวณได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP

| ประเภทวัสดุ | ต้นทุนผันแปร           | จำนวน         | ราคาต่อหน่วย        | มูลค่า (บาท) |
|-------------|------------------------|---------------|---------------------|--------------|
| GO          | Graphite               | 3 กรัม        | -                   | -            |
|             | Sulfuric Acid          | 360 มิลลิลิตร | 640 บาท/ลิตร        | 92           |
|             | Phosphoric             | 40 มิลลิลิตร  | 1,350 บาท/ลิตร      | 22           |
|             | Potassium Permanganate | 18 กรัม       | 500 บาท/กรัม        | 23           |
|             | Hydrogen Peroxide      | 3 มิลลิลิตร   | 1,300 บาท/มิลลิลิตร | 4            |
|             | Hydrogen Chloride      | 360 มิลลิลิตร | 250 บาท/ลิตร        | 36           |
| GOP         | ปูนปลาสเตอร์           | 20 กรัม       | -                   | -            |
| รวม         |                        |               |                     | 177          |

จากการคำนวณต้นทุนแปรผันของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตวัสดุดูดซับ GOP มูลค่าของต้นทุนผันแปรที่เป็นวัตถุดิบนั้น คิดเป็นมูลค่าประมาณ 177 บาทต่อการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP 25 กรัม

สำหรับต้นทุนผันแปรส่วนที่ 2 ได้แก่ ต้นทุนที่เป็นค่าน้ำและค่าไฟฟ้า ได้ทำการแสดงรายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าน้ำและค่าไฟฟ้าจากราคาให้บริการที่ตั้งไว้ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 โดย

- ค่าน้ำประปา คำนวณในอัตราค่าใช้น้ำเฉลี่ย 9.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
- ค่าพลังงาน คำนวณในอัตราค่าใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 1.7034 บาทต่อหน่วย หรือ 1.7034 บาทต่อkW-hr

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงต้นทุนค่าน้ำและค่าไฟฟ้าในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP

| ประเภทวัสดุ | รายการ                                     | กำลังไฟฟ้า<br>(kW) | เวลา<br>(hr.) | พลังงาน<br>(kW-hr) | ค่าไฟฟ้า<br>(บาท/วัน) |
|-------------|--------------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|-----------------------|
| GOP         | เตาให้ความร้อน<br>พร้อมระบบกวน<br>สารละลาย | 1.035              | 7             | 7.245              | 12.34                 |
|             | ปั๊มดูดสุญญากาศ                            | 0.17               | 1.3           | 0.221              | 0.38                  |
|             | เครื่องปั่นตกตะกอน                         | 0.16               | 1.4           | 0.224              | 0.38                  |
|             | ตู้อบลมร้อน                                | 1.914              | 24            | 45.936             | 78.25                 |
|             | เครื่องกลั่นน้ำ                            | 0.048              | 0.175         | 0.0084             | 0.01                  |
|             | เครื่องเขย่า                               | 0.09               | 0.5           | 0.045              | 0.08                  |
|             | ตู้อบลมร้อน                                | 1.914              | 3             | 5.742              | 9.78                  |
|             | เครื่องกลั่นน้ำ                            | 0.048              | 0.05          | 0.0024             | 0.004                 |
| รวม         |                                            |                    |               |                    | 102                   |

ดังนั้น ต้นทุนที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP โดยคำนวณจากผลรวมของค่าต้นทุนผันแปรที่เป็นวัตถุดิบรวมกับค่าน้ำและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP 25 กรัม ต้นทุนการสังเคราะห์จะมีมูลค่าที่ต้องพิจารณาโดยคำนวณได้จาก

$$\text{ต้นทุนผันแปรในการสังเคราะห์ GOP 1 กรัม} = \frac{(\text{ต้นทุนวัตถุดิบ}) + (\text{ค่าน้ำและค่าไฟฟ้า})}{25 \text{ กรัม}}$$

ดังนั้น ต้นทุนสำหรับการสังเคราะห์วัสดุดูดซับ GOP 1 กรัมมีราคาประมาณ 11-12 บาท

## บทที่ 5

---

# สรุปผล อุปสรรคและ ข้อเสนอแนะ

## บทที่ 5

### ข้อเสนอแนะและอุปสรรค

จากการดำเนินโครงการวิจัยมาเป็นระยะเวลา 2 เดือน คณะผู้วิจัยได้พบอุปสรรคและพิจารณาที่จะปรับแผนการศึกษาเพื่อขอคำชี้แนะจาก สกว. ดังนี้

1. การศึกษานี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาการนำวัสดุดูดซับผสม GOP เพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม 2 ประเภท ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้คัดเลือกโรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ เป็นอุตสาหกรรมต้นแบบ ซึ่งอุตสาหกรรมทั้ง 2 ประเภทนี้ใช้สารเคมีที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ จึงมักมีโครเมียมปะปนในน้ำทิ้งจากโรงงานได้ ทั้งนี้ การขอความร่วมมือโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 2 ประเภทนั้น ค่อนข้างพบอุปสรรคเนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะหนักที่มีการควบคุมการปล่อยตามกฎหมาย ดังนั้นโรงงานขนาดเล็กจึงมีความไม่สะดวกใจในการเข้าร่วมโครงการ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกเฉพาะโรงงานที่ยินดีให้ความร่วมมือในการศึกษานี้

2. ในการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมทางคณะผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนวิธีการในการศึกษา โดยนำโปรแกรมทางสถิติมาใช้ในการสร้างแผนการทดลอง และวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Method) ประเภท Central Composite design มาช่วย เพื่อให้สามารถทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมและเป็นไปได้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้จริง

3. การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานชุบโลหะ ผู้วิจัยได้ทำการการเติมโครเมียมลงในน้ำเสียจริงที่ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงงาน เพื่อให้ได้ลักษณะน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนในปริมาณที่สูงขึ้นและสามารถเป็นตัวแทนการปนเปื้อนของโครเมียมจริงได้ เนื่องจากค่าการปนเปื้อนจริงของโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อให้การทดลองนี้สามารถเป็นตัวแทนการบำบัดการปนเปื้อนโครเมียมได้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปปรับใช้งานจริงต่อไป

4. จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับด้วย GOP โดยเฉพาะอุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงอาจเป็นผลดีในการออกแบบระบบดูดซับโดยไม่ต้องจำกัดหรือควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำ แต่สามารถใช้การดูดซับที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้องขึ้นไปหรืออุณหภูมิกลางแจ้งได้ ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการนำไปปรับใช้จริงต่อไป

5. จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมด้วยวัสดุดูดซับ GOP ผลการศึกษาผ่านการทดลองการขึ้นรูปและการเคลือบบนพื้นผิวต่าง ๆ (รูปที่ 5.1) พบว่า GOP ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดเมื่ออยู่ในรูปแบบผง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาวิธีการที่เป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำ GOP มาใช้ ทั้งนี้ หลังจากผ่านการทดลองและทดสอบวัสดุที่ขึ้นรูป และการนำไปใช้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า GOP ทำงานได้ดีที่สุดในรูปแบบผง ซึ่งจากการ

ปรึกษาผลการทดลองนี้ต่อคณะผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินโครงการวิจัยจึงได้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการนำ GOP ไปใช้งานในรูปแบบผง โดยให้เพิ่มเติมวิธีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ GOP ไปใช้ในระบบบำบัด และการเก็บรวบรวม GOP ออกจากระบบบำบัด ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะเสนอในข้อถัดไป

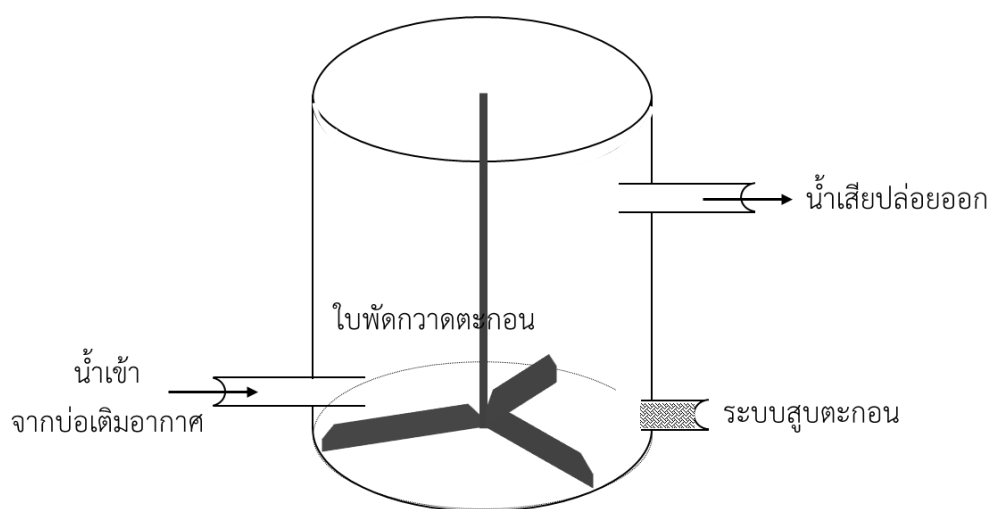


รูปที่ 5.1 ภาพแสดงการทดลองขึ้นรูปและวิธีการนำ GOP ไปใช้ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งเป็นหนึ่งในการศึกษาเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมที่สุดในการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งาน

6. จากการพิจารณาเพื่อหาแนวทางการนำ GOP ไปใช้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นหนึ่งในคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิที่ช่วยหาวิธีการนำ GOP ไปใช้ในระบบบำบัดในรูปแบบผง ซึ่งเป็นรูปแบบที่วัสดุดูดซับมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระบบบำบัดของโรงงานทั้ง 2 ประเภทอีกครั้งเพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำ GOP ไปใช้ ทั้งนี้ในการศึกษาและปรึกษาผู้ดูแลระบบในเบื้องต้น บ่อตกตะกอนเป็นส่วนที่น่าจะมีความเป็นไปได้มากที่สุดในการนำ GOP ไปใช้เนื่องจากลักษณะของน้ำที่มีความขุ่นน้อย และอัตราไหลเข้าของน้ำเป็นไปอย่างช้าๆ โดยมีปริมาณน้ำคงที่ตลอดเวลา และเนื่องจากเป็นบ่อตกตะกอน จึงมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำนานกว่า 5 ชั่วโมง หรือสามารถควบคุมระยะเวลาการเก็บกักน้ำในบ่อได้ ซึ่งหากจะแนะนำการนำ GOP ไปใช้ในบ่อตกตะกอน ผู้วิจัยจึงมีคำแนะนำต่อการนำไปใช้แยกตามลักษณะของบ่อตกตะกอนในโรงงานทั้ง 2 แห่ง ดังนี้

## 6.1 การนำวัสดุดูดซับไปใช้ในบ่อตกตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

บ่อตกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมเป็นบ่อตกตะกอนที่ใช้ในระบบบำบัดแบบเติมอากาศซึ่งเป็นระบบขนาดใหญ่ มีการบำบัดหลักคือระบบเติมอากาศซึ่งมีการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ โดยตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการเติมอากาศ 5 วันจะถูกส่งมายังบ่อตกตะกอนด้วยอัตราไหลเข้าต่ำกว่า 5 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที่ ทั้งนี้เนื่องจากระบบบำบัดทั้งสองมีการเชื่อมต่อกันและอาศัยการล้นของน้ำจากบ่อตกตะกอนออกสู่รางเพื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงทำให้การไหลเข้าของน้ำจากบ่อเติมอากาศจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำบางส่วนไหลออกจากระบบ ซึ่งลักษณะการไหลเข้าของน้ำเสียลักษณะนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ บ่อตกตะกอนดังกล่าวจะมีระบบกวาดตะกอนอยู่ก้นบ่อ



**รูปที่ 5.2** ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับบ่อตกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมเพื่อให้เหมาะกับการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งานในการกำจัดคาร์บอนของโครเมียม

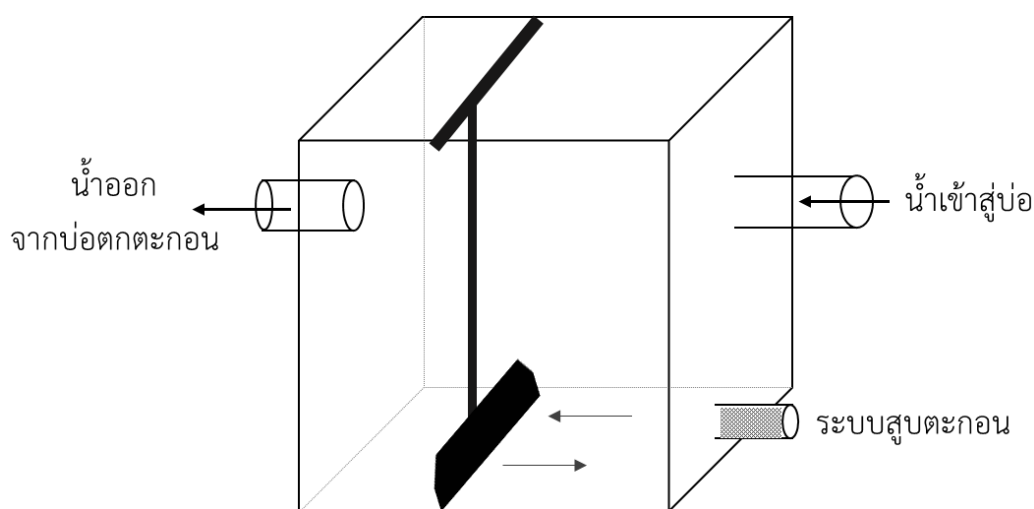
เมื่อพิจารณาการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้สำหรับการบำบัดโครเมียมในบ่อตกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานฟอกย้อม คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบลักษณะน้ำและประสิทธิภาพการทำงานที่เป็นไปได้ของวัสดุดูดซับ GOP ในการกำจัดโครเมียมที่มีความเข้มข้น 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 13 วันเพื่อให้ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมลดลงต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหลังจากทำการใส่ผง GOP ลงในบ่อตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ความเข้มข้นของโครเมียมจะลดลงอยู่ที่ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำเสียในบ่อสามารถถูกปล่อยสู่รางรองรับน้ำได้ ทั้งนี้หากความเข้มข้นของโครเมียมในระบบต่ำกว่า 13 มิลลิกรัม วัสดุดูดซับจะสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้นโดยเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงสามารถทำการปล่อยน้ำเสียจากบ่อตกตะกอนได้ ทั้งนี้การทำงานของวัสดุดูดซับจะสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง 13 วันแม้มีความเข้มข้นในบ่อตกตะกอนเพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 10 วันผู้ดูแลระบบจะสามารถเก็บกวาดตะกอน GOP ออกจากระบบได้ด้วย

วิธีการเดียวกันกับการกวาดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยใบพัดแล้วทำการสูบออกจากบ่อ ลักษณะของ บ่อตกตะกอนและใบพัดกวาดตะกอน รวมทั้งเส้นทางการสูบตะกอนออกจากระบบ แสดงไว้ในรูปที่ 5.2

## 6.2 การนำวัสดุดูดซับไปใช้ในบ่อตกตะกอนของโรงงานซูบโลหะ

สำหรับบ่อตกตะกอนของระบบบำบัดในโรงงานซูบโลหะ มีด้วยกัน 2 บ่อ เป็นบ่อตกตะกอน น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดทางเคมีในการบำบัดขั้นต้นมาก่อนจึงทำให้ลักษณะของน้ำในบ่อมีความขุ่น น้อย ปริมาณน้ำเสียนี้น้อยกว่าบ่อตกตะกอนจากระบบบำบัดแบบเดิมอากาศ ระยะเวลาการ ตกตะกอนมีระยะเวลาสั้นกว่า โดยระยะเวลาการตกตะกอน 5 ชั่วโมงโดยน้ำเสียจากบ่อตกตะกอน ที่ 1 จะไหลต่อไปยังบ่อตกตะกอนที่ 2 เพื่อปรับค่าพีเอชให้เป็นเบสก่อนปล่อยลงสู่ระบบรวบรวม น้ำเสียของนิคมอุตสาหกรรม

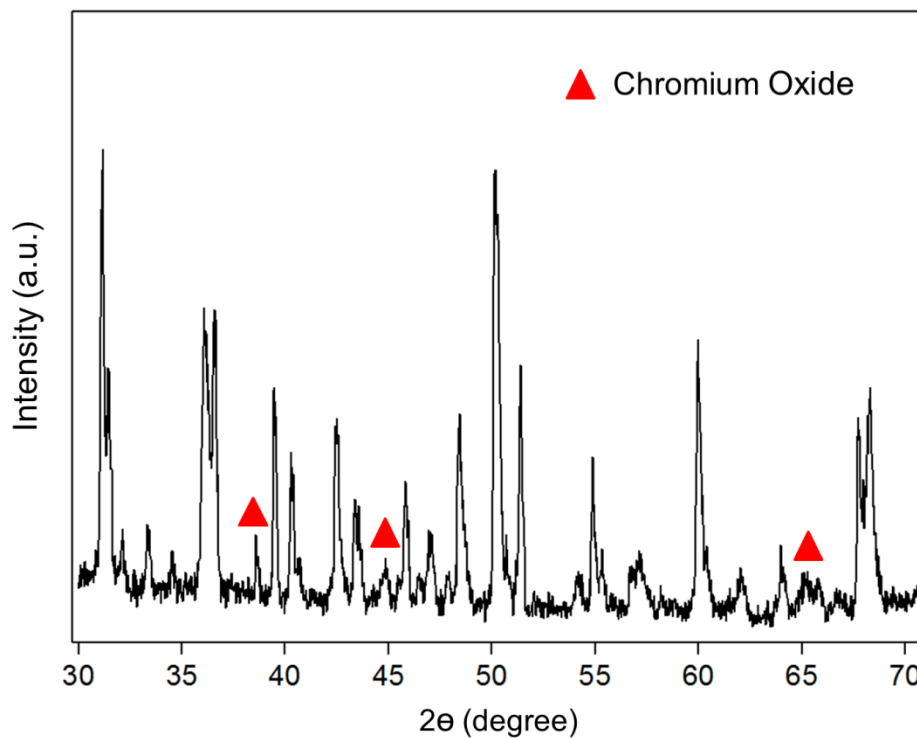
สำหรับการนำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียนั้น จากการสัมภาษณ์ ผู้ดูแลระบบบำบัดและจากการพิจารณาผลการทดลองในระบบจำลองพบว่า บ่อตกตะกอนในโรงงาน ซูบโลหะอาจจะต้องมีการปรับเวลาในการเก็บกักน้ำในบ่อตกตะกอนให้เหมาะกับระบบการดูดซับ ด้วยตัวดูดซับ GOP และต้องเพิ่มระบบการเก็บกวาดตะกอนรวมทั้งท่อสูบตะกอนออกจากระบบ โดยระยะเวลาการเก็บกักน้ำที่เหมาะสมต้องมากกว่า 10 ชั่วโมง และต้องเพิ่มระบบเก็บกวาดตะกอน ซึ่งอาจมีลักษณะดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมแสดงลักษณะการปรับบ่อตกตะกอนของโรงงานซูบโลหะเพื่อให้เหมาะกับการ นำวัสดุดูดซับ GOP ไปใช้งานในการกำจัดคาร์บอนของโครเมียม

7. ในการหาวิธีการกำจัดวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้วให้มีความเหมาะสมและปลอดภัยมากที่สุด ผู้วิจัยได้เพิ่มการศึกษาส่วนนี้เพื่อทดสอบความปลอดภัยของ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้ วิธีการทดสอบการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัสดุดูดซับในน้ำที่มีค่าความเป็นกลาง โดยใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในบทที่ 4 (หัวข้อ 4.3)

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไม่ถูกชะละลายออกจากวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้มีการยืนยันการพบโครเมียมออกไซด์ (CrO) ในตัวอย่าง GOP ที่ผ่านการใช้งานด้วยการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟ XRD แสดงองค์ประกอบเชิงผลึกของโครเมียมออกไซด์ในตัวอย่างวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้ว

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยืนยันได้ว่าโครเมียมที่ถูกดูดซับจากน้ำเสียอาจอยู่ในฟอร์มของโครเมียมออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกอยู่กับวัสดุดูดซับ GOP ซึ่งจากผลการศึกษาการชะละลายของโครเมียมในบทที่ 4 ไม่พบการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ในตัวทำละลาย จึงเป็นไปได้ว่าโครเมียมในฟอร์مدังกล่าวไม่สามารถถูกชะละลายออกจากวัสดุดูดซับ GOP ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าโครเมียมในฟอร์มไดโครเมตไอออน ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) ที่อยู่ในน้ำเสียเมื่อถูกดูดซับโดย GOP ทำให้เกิดการจับตัวกับฟังก์ชันบนพื้นผิวของ GOP เกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ในรูปเชิงผลึก ซึ่งคาดว่าวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วนี้มีศักยภาพในการนำไปกำจัดด้วยวิธีการจัดการวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปฝังกลบ หรือการนำไปใช้งานต่อ

8. ต่อเนื่องจากการศึกษาในข้อที่ 7. ผู้วิจัยมีความสนใจในการนำวัสดุดูดซับ GOP ที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ในรูปแบบของการกำจัดก๊องใช้ซ้ำ หลังจากทำการศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมพบว่า การนำ GOP ซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุประเภทคาร์บอน (แกรไฟต์ออกไซด์)

และซีเมนต์ (ปูนปลาสเตอร์) โดยพิจารณาจากการทำคอนกรีตผสมเสร็จที่เผยแพร่โดยบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด(มหาชน), 2551) การนำ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นส่วนผสมของการเทโครงสร้างหรือพื้นคอนกรีตภายใต้โครงสร้างอาคารน่าจะมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของการผสมคอนกรีตเพื่องานโครงสร้าง (ตาราง 5.1)

**ตารางที่ 5.1** ตารางแสดงสูตรผสมคอนกรีตและการใช้งาน

| ส่วนผสมคอนกรีตโดยปริมาตร<br>(ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน) | การใช้งานก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็กโดยทั่วไป |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| สูตร 1 : 3 : 5                                        | คอนกรีตหยาบ, ใช้เทพื้นระดับ, รับกำลังได้ต่ำ         |
| สูตร 1 : 2 : 4                                        | โครงสร้างคอนกรีตทั่วไป เช่น พื้น คาน เสา สาน ตอม่อ  |
| สูตร 1 : 1.5 : 3                                      | ถนน และโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงมากขึ้น        |
| สูตร 1 : 1.5 : 2                                      | โครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานมากขึ้น   |

ทั้งนี้จากลักษณะส่วนผสมและการนำไปใช้งานดังที่แสดงในตาราง หากวัสดุชุด GOP ที่ใช้แล้ว จะนำไปใช้ผสมในสัดส่วนเล็กน้อยของงานโครงสร้างที่ไม่ได้ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น สูตร 1 : 3 : 5 น่าจะเป็นการนำไปใช้ประโยชน์ที่มีความเป็นไปได้ ทั้งนี้อาจจะต้องมีการศึกษาการนำไปใช้ในเบื้องต้นก่อน

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอื่น ๆ ต่อ สกว.

ได้ทำการนำเสนอไว้แล้วในส่วนของบทที่ 5

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....

## บรรณานุกรม

- กาญจนา ธนิกกุล. 2552. การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติ - กรณีตัวอย่างโรงงานในจังหวัดราชบุรี. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
- จินตนา สายวรรณ. 2541. การศึกษาการกำจัดสารโครเมียมออกจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้พอลิอิเล็กโตรไลต์: รายงานฉบับสมบูรณ์ [ออนไลน์]  
<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/223> [6 กรกฎาคม 2560]
- เฉลิมราช วันทวิน และคณะ. 2542. โครงการพัฒนาต้นแบบระบบจัดการน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะขนาดเล็ก. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน). 2551 ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: บริษัทเอสซีซีซีเมนต์
- ประนัตดา เจริญราช, กิตติ เอกอำพน และสุธา ภูสิทธิศักดิ์. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมไหมโดยใช้บึงประดิษฐ์. วารสารวิจัย มข. 6(2): 68 – 78.
- ประวรดา โภชนจันทร์. 2554. การศึกษาคุณลักษณะ การใช้ประโยชน์ และการบำบัดน้ำทิ้งอย่างยั่งยืนในโรงงานอุตสาหกรรมต้นแบบ: กรณีศึกษาโรงงานปัสพาฟ พัตตังอินตัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร. วารสารวิจัย มดส 4(1): 1 – 15.
- รัตนา มหาชัย, ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง, ชุติมา คูคุ้มสมุทร, นาถ ภูวงศ์ผา และชาญเชาว์ พรหมราษฎร์. 2551. การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมสีสังเคราะห์เคมี. ว.วิทยา มข. 36(3): 188 – 196
- สิรินันท์ กันศรีริ. 2550. การกำจัดซีโอทีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม(สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- A.K. Meena, G.K. Mishra, P.K. Rai, C. Rajagopai, P.N. Nagar, Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. J Hazard Mater 122: 161 - 170.
- A.M. Ghaedi, M. Ghaedi, A. Vafaei, N. Iravani, M. Keshavarz, M. Rad, Inderjeet Tyagi, Shilpi Agarwal, Vinod Kumar Gupta. 2015. Adsorption of copper (II) using modified activated carbon prepared from Pomegranate wood: Optimization by bee algorithm and response surface methodology. Journal of Molecular Liquids 206: 195 – 206
- Anthony, John W.; Bideaux, Richard A; Bladh, Kenneth W. and Nichols, Monte C.,ed. (1990) "Graphite". HandBook of Mineralogy, Chantilly, VA, US: Mineralogical Society of America.

- A.P. Singh, M. Mishra, M. Chandra, S.K. Dhawan, Graphene oxide/ferrofluid/cement composites for electromagnetic interference shielding application. Nanotechnology 22: 465701 - 465709.
- Bdour, A.N., Al-Juhani, M.S., 2013. Utilisation of waste marble powder in cement industry. Int. J. Environment and Waste Management 11: 399.
- B. Fonseca, H. Figueiredo, J. Rodrigues, A. Queiroz, T. Tavares, Mobility of Cr, Pb, Cd, Cu and Zn in a loamy sand soil: A comparative study. Geoderma 164: 232 – 237.
- Chang-Gu Lee, Soonjae Lee, Jeong-Ann Park, Chanhyuk Park, Sang Jeong Lee, Song-Bae Kim, Byungryul An, Seong-Taek Yun, Sang-Hyup Lee, Jae-Woo Choi. 2016. Removal of copper, nickel and chromium mixtures from metal plating wastewater by adsorption with modified carbon foam. Chemosphere 166: 203 – 211
- Changsheng Peng, Hong Meng, Shaoxian Song, Shouci Lu and Alejandro Lopez-Valdivieso. 2004. Elimination of Cr (VI) from Electroplating Wastewater by Electrodialysis Following Chemical Precipitation. Separation Science and Technology Vol. 39: 1501 – 1517
- Chantaraporn Phalakornkule, Suprangpak Polgumhang, Warangkana Tongdaung, Benjawan Karakat & Thanawin Nuyut. 2009. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. Journal of Environmental Management 91: 918 – 926
- Chao Xu, Jingjing Wang, Tilong Yang, Xia Chen, Xunyue Liu, Xingcheng Ding. 2014. Adsorption of uranium by amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile, using response surface methodology. Carbohydrate Polymers 121: 79 – 85
- Cheremisinoff, N.P., 2002. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Butterworth-Heinemann, Boston.
- Chong He, Zhiquan Yang, Jie Ding, Yuancai Chen, Xiaowen Tong and Ying Li. 2017. Effective removal of Cr (VI) from aqueous solution by 3-aminopropyltriethoxysilane - functionalized graphene oxide. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 520: 448 – 458.

- Deepak Gusain, Faizal Bux, Yogesh Chandra Sharma. 2014. Abatement of chromium by adsorption on nanocrystalline zirconia using response surface methodology. Journal of Molecular Liquids 197: 131 – 141
- Delhaes, P. (2001) Graphite and Precursors. CRS Press.
- D. Mohan, K.P. Singh, G. Singh, K. Kumar, Removal of dyes from wastewater using flyash, a low-cost adsorbent. Ind. Eng. Chem. Res 41: 3688 - 3695.
- D. Sud, G. Mahajan, M.P. Kaur, Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions - A review. Bioresour Technol 99: 6017 - 6027.
- Galaya Srisuwan and Poonpetch Thongchai. 2002. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by membrane. Membrane Sci. &Tech 24: 965–976
- Ganesapillai, M., Regupathi, I., Murugesan T., 2008. Characterization and process optimization of microwave drying of plaster of Paris 26: 1484 - 1496.
- G. Annadurai, R.S. Juang, D.J. Lee, Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. J. Hazard Mater 92: 263 - 274.
- G. Goncalves, S.M.A. Cruz, A. Ramalho, J. Gracio, P.A.A.P. Marques, Graphene oxide versus functionalized carbon nanotubes as a reinforcing agent in a PMMA/HA bone cement. Nanoscale 4: 2937 - 2945.
- Gottipati Ramakrishna and Mishra Susmita. 2012. Application of response surface methodology for optimization of Cr (III) and Cr (VI) adsorption on commercial activated carbons. Research Journal of Chemical Sciences 2(2): 40 – 48
- Graphite. Encyclopaedia Britannica online.
- G. Zhao, J. Li, X. Ren, C. Chen, X. Wang, Few-layered grapheme oxide nanosheets As superior sorbents for heavy metal ion pollution management. Environ Sci Technol 45: 1.454 - 1.462.
- H. Alkhateb, A. Al-Ostaz, A. Cheng, X. Li, Materials for Graphene-Cement Nanocomposites. 3: 67 - 77.
- Hossein Hadi Najafabadi, Mohammad Irani, Leila Roshanfekar Rad, Amirsalar Heydari Haratameh and Ismaeil Haririan. 2015. Removal of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cr}^{6+}$  from aqueous solutions using a chitosan/graphene oxide composite nanofibrous adsorbent. The Royal Society of Chemistry 5: 16532 – 16539.

- Huayue Zhu, Yongqian Fu, Ru Jiang, Jun Yao, Ling Xiao, and Guangming Zeng. 2014. Optimization of Copper (II) Adsorption onto Novel Magnetic Calcium Alginate/Maghemite Hydrogel Beads Using Response Surface Methodology. Ind. Eng. Chem. Res. 53 4059 – 4066
- Huong Chi Vu, Amarendra Dhar Dwivedi, Thao Thanh Le, Sung-Hee Seo, Eun-Ji Kim and Yoon-Seok Chang. 2016. Magnetite graphene oxide encapsulated in alginate beads for enhanced adsorption of Cr (VI) and As (V) from aqueous solutions: Role of crosslinking metal cations in pH control. Chemical Engineering Journal 307: 220 – 229
- Jackson K. Kiptoo, J. Catherine Ngila, Gerald M. Sawula. 2004. Speciation studies of nickel and chromium in wastewater from an electroplating plant. Talanta 64: 54–59
- Jian Hua Chen, Hai Tao Xing, Hong Xu Guo, Wen Weng, Shi Rong Hu, Shun Xing Li, Yi Hong Huang, Xue Sun and Zhen Bo Su. 2014. Investigation on the adsorption properties of Cr (VI) ions on a novel graphene oxide (GO) based composite adsorbent. J. Mater. Chem. A 2: 12561 – 12570.
- J.N. Sahu, Jyotikusum Acharya, B.C. Meikap. 2009. Response surface modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solution using Tamarind wood activated carbon in batch process. Journal of Hazardous Materials 172: 818 – 825
- J.T. Li, M. Li, J.-H. Li, H.-W. Sun, Decolorization of azo dye direct scarlet 4BS solution using exfoliated graphite under ultrasonic irradiation. Ultrason Sonochem 14: 241 - 245.
- Jyotsna Goel, K. Kadirvelu, C. Rajagopal and V. K. Garg. 2005. Removal of Lead (II) from Aqueous Solution by Adsorption on Carbon Aerogel Using a Response Surface Methodological Approach. Ind. Eng. Chem. Res. 44: 1987 – 1994
- Jyotsna Goel, K. Kadirvelu, C. Rajagopal and V. K. Garg. 2006. Cadmium (II) Uptake from Aqueous Solution by Adsorption onto Carbon Aerogel Using a Response Surface Methodological Approach. Ind. Eng. Chem. Res. 45: 6531 – 6537
- Kaan Yetilmezsoy, Sevgi Demirel, Robert J. Vanderbei. 2009. Response surface modeling of Pb(II) removal from aqueous solution by *Pistacia vera* L.: Box–Behnken experimental design. Journal of Hazardous Materials 171: 551 – 562

- Kevin Brigden, Iryna Labunska และ David Santillo. 2553. การตรวจสอบสารเคมีอันตรายในน้ำที่ส่งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสองแห่ง และการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณใกล้เคียงซึ่งเชื่อมต่อกับ แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553. Greenpeace Research Laboratories Technical
- Kunwar P. Singh, Shikha Gupta, Arun K. Singh, Sarita Sinha. 2010. Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach. Journal of Hazardous Materials 186: 1462 – 1473
- Leilei Li, Lulu Fan, Min Sun, Huamin Qiu, Xiangjun Li, Huimin Duan and Chuannan Luo. 2013. Adsorbent for chromium removal based on graphene oxide functionalized with magnetic cyclodextrin–chitosan. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 107: 76 – 83.
- M.A. Martín-Lara, G. Blázquez, M.C. Trujillo, A. Pérez, M. Calero. 2014. New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone. Journal of Cleaner Production 81: 120 – 129
- Mantell, C.L., 1951, Adsorption, second ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. Weber Jr., W.J. Hopkins, C.B., Bloom Jr., R., 1970. Physicochemical treatment of wastewater. J. Water Pollut. Control Fed 42: 83 - 89.
- Marcano D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W. and Tour, J. M. 2010. Improved synthesis of graphene oxide. Acs Nano 4: 4806 - 4814.
- M. Arulkumar, P. Sathishkumar, T. Palvannan. 2010. Optimization of Orange G dye adsorption by activated carbon of *Thespesia populnea* pods using response surface methodology. Journal of Hazardous Materials 186: 827 – 834
- Meena Solanki, S. Suresh, Shakti Nath Das, Kanchan Shukla. 2013. Treatment of Real Textile Wastewater Using Coagulation Technology. ChemTech 5: 610 – 615
- Mevra Yalvac Can, Yusuf Kaya, O. Faruk Algur. 2005. Response surface optimization of the removal of nickel from aqueous solution by cone biomass of *Pinus sylvestris*. Bioresour Technol 97: 1761 – 1765
- M. Koby, E. Demirbas, E. Senturk, M. Ince, Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone. Bioresour Technol 96: 1518 - 1521.

- M.M. Matlock, B.S. Howerton, D.A. Atwood, Chemical precipitation of lead from lead battery recycling plant wastewater. Ind., Eng. Chem. Res 4: 1579 – 1582.
- Monika Jain, V.K. Garg, K. Kadirvelu. 2010. Investigation of Cr (VI) adsorption onto chemically treated *Helianthus annuus*: Optimization using Response Surface Methodology. Bioresource Technology 102: 600 – 605
- M. Roosta, M. Ghaedi, A. Daneshfar, R. Sahraei. 2013. Experimental design based response surface methodology optimization of ultrasonic assisted adsorption of safranin O by tin sulfide nanoparticle loaded on activated carbon. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 122: 223 – 231
- Munawar Iqbal, Nida Iqbal, Ijaz Ahmad Bhatti, Naseer Ahmad, Muhammad Zahid. 2016. Response surface methodology application in optimization of cadmium adsorption by shoe waste: A good option of waste mitigation by waste. Ecological Engineering 88: 265 – 275
- Normala Halimoon & Rachel Goh Soo Yin. 2010. Removal of Heavy Metals from Textile Wastewater using Zeolite. EnvironmentAsia 3: 124 – 130
- P. Janos, H. Buchtova, M. Ryznarova, Sorption of dyes from aqueous solutions onto fly ash. Water Res 37: 4938 - 4944.
- Plaster of paris, Encyclopaedia Britannica online, 2015, Enciclopaedia Britannica Inc., Web 07 May 2015. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/463673/plaster-of-paris>.
- Prasad Sudamalla, Pichiah Saravanan and Manickam Matheswaran. 2012. Optimization of operating parameters using response surface methodology for adsorption of crystal violet by activated carbon prepared from mango kernel. Sustain. Environ. Res. 22(1): 1 – 7
- R.O. YUSUFF & J.A. SONIBARE. 2005. Characterization of textile industries' effluents in Kaduna, Nigeria and pollution implication. Global Nest 6(3): 212 – 221
- S. Babel, T.A. Kuniawan, Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. J. Hazard Mater 97: 219 - 243.
- S.B. Yang, J. Hu, C.L. Chen, D.D. Shao, X.K. Wang, Mutual effect of Pb(II) and humic acid adsorption onto multiwalled carbon nanotubes/poly (acrylamide) composites from aqueous solution., Environ. Sci. Technol 45: 3621 – 3627.

- Senthil Kumar Ponnusamy and Ramalingam Subramaniam. 2013. Process optimization studies of Congo red dye adsorption onto cashew nut shell using response surface methodology. International Journal of Industrial Chemistry 4:17
- Singh, M., Garg, M., 2002. Calcium sulfate hemihydrate activated low heat sulfate resistant cement. Construction and Building Materials 16: 181 - 186.
- Sofia A. Cavaco, Sandra Fernandes, Margarida M. Quina, Lici' nio M. Ferreira. 2007. Removal of chromium from electroplating industry effluents by ion exchange resins. Journal of Hazardous Materials 144: 634 – 638
- Sutphin, David M.; James D. Bliss (August 1990). "Disseminated flake graphite and amorphous graphite deposit types; an analysis using grade and tonnage models". CIM Bullentin 83 (940): 85- 89.
- S. Wang, M. Soudi, L. Li, Z.H. Zhu, Coal ash conversion into effective adsorbents for removal of heavy metals and dyes from wastewater. J. Hazard Mater B133: 243 - 251.
- S. Wang, Y. Boyjoo, A. Choueib, J. Zhu, Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. Water Res 39: 129 - 138.
- Tekin S, ahan and Dilara O" ztu"rk. 2013. Investigation of Pb(II) adsorption onto pumice samples: application of optimization method based on fractional factorial design and response surface methodology. Clean TechnEnviron Policy 16: 819 – 831
- Umesh K. Garg, M.P. Kaur, V.K. Garg, Dhiraj Sud. 2007. Removal of Nickel (II) from aqueous solution by adsorption on agricultural waste biomass using a response surface methodological approach. Bioresource Technology 99: 1325–1331
- V.K. Gupta, D. Mohan, S. Sharma, M. Sharma, Removal of basic dyes (rhodamine B and methylene blue) from aqueous solutions using bagasse fly ash. Sep. Sci. Technol 35: 2097 - 2113.
- X.L. Tan, M. Fang, C.L. Chen, S.M. Yu, X.K. Wang, Counterion effects of Ni<sup>2+</sup> and sodium dodecylbenzene sulfonate adsorption to multiwalled carbon nanotubes in aqueous solution. Carbon 46: 1741 – 1750.
- Yi Liu, Jintao Wang, Yian Zheng, Aiqin Wang. 2012. Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology. Chemical Engineering Journal 184: 248 – 255

- Yi Liu, Yian Zheng and Aiqin Wang. 2011. Response Surface Methodology for Optimizing Adsorption Process Parameters for Methylene Blue Removal by a Hydrogel Composite. Adsorption Science & Technology 28(10): 13 – 922
- Yinlin Lei, Fei Chen, Yunjie Luo and Long Zhang. 2013. Three-dimensional magnetic graphene oxide foam/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite as an efficient absorbent for Cr (VI) removal. J Mater Sci 49: 4236 – 4245.
- Y. Ohama, Carbon-cement compositesll. Carbon 27: 729 - 737.
- Y.S. Ho, G. McKay, Sorption of dye from aqueous solution by peat. Chem. Eng. J 70: 115 - 124.
- Z. Al-Qodah, Adsorption of dyes using shale oil ash. Water Res 34: 4295 - 4303.
- Z. Giergiczny, A. Krol, Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. J. Hazard Mater 160: 247 - 253

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

| วัตถุประสงค์โครงการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | กิจกรรมที่วางแผน                                                                                                                                                                                                 | กิจกรรมที่ดำเนินการ                                                                                                                                                                                                       | ผลที่ได้รับตลอดโครงการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1. รวบรวมและศึกษาคุณสมบัติน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ (อย่างน้อย 2 แหล่ง)</p> <p>2. เพื่อหาวิธีการปรับเสถียร (stabilization) น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบในเบื้องต้น</p> <p>3. เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วด้วยวัสดุผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก</p> | <p>1. ติดต่อประสานงานและขอรวบรวมน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกักสุดท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะหรือสู่สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง</p> | <p>1. ติดต่อประสานงานโรงงานฟอกย้อม (บริษัท โรงงานพิมพ์ย้อมผ้าไทยจำกัด (มหาชน)) และ โรงงานชุบโลหะ (บริษัท ทริค แมนูแฟคเจอร์ริง (ประเทศไทย) จำกัด) ขอเข้าเยี่ยมชม และรวบรวมน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ</p> | <p>1. วิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์.</p> <p>2. น้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย 2 แห่ง</p> <p>3. คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ</p> <p>4. วิธีการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรม</p> <p>5. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว</p> <p>6. วิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกให้อยู่ในรูปแบบที่</p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH, conductivity, และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์)</p>                                             | <p>2. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของน้ำเสียที่ทำการเก็บรวบรวมมาจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานชุบโลหะ</p>                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

| วัตถุประสงค์โครงการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | กิจกรรมที่วางแผน                                                                                                                                                                                                                                                            | กิจกรรมที่ดำเนินการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ผลที่ได้รับตลอดโครงการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4. พัฒนาวิธีการขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก</p> <p>5. เพื่อพัฒนาวัสดุดูดซับให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการนำไปใช้และเพื่อต่อยอดทางการการค้า</p> <p>6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของวัสดุดูดซับที่อยู่ในรูปแบบที่ถูกพัฒนาแล้วในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว</p> | <p>3. ศึกษา ทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการ ดูดซับด้วยตัวดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติก</p> | <p>3. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน เช่น ความขุ่น และตะกอนอินทรีย์ แล้วทำการทดลองหาวิธีการลดค่าความขุ่นด้วยสารสร้างตะกอน โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ ด้วย Response Surface Method ก่อนนำมาทดสอบการบำบัดด้วยวิธีการ ดูดซับด้วยตัวดูดซับผสม GOP</p> | <p>สะดวกต่อการนำไปใช้ ซึ่งหลังการศึกษาพบว่า วัสดุดูดซับ GOP ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียได้ดีที่สุดในรูปแบบผง</p> <p>7. วัสดุดูดซับ GOP ในรูปแบบผงเป็นรูปแบบที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งการพัฒนาวิธีการผสมให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีศักยภาพในการขยายกำลังการผลิตได้เป็นวิธีการที่คิดและพัฒนาขึ้นมาจากงานวิจัยนี้เป็นหลัก</p> <p>8. ขอจดอนุสิทธิบัตรวิธีการประดิษฐ์วัสดุดูดซับ GOP ซึ่งขณะนี้อยู่ในระหว่างขั้นตอนการแจ้งจดฯ</p> <p>9. ประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับ GOP แบบผงในการกำจัดโครเมียมจากบ่อตกตะกอนที่จำลองสถานะจากโรงงานฟอกย้อมและ</p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <p>4. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน</p>                                                             | <p>4. ออกแบบการทดลองด้วย Response Surface Method เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำวัสดุดูดซับผสม GOP มาใช้โดยศึกษาปัจจัยที่มีผล</p>                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| วัตถุประสงค์โครงการ | กิจกรรมที่วางแผน                                                                                                                                                                                            | กิจกรรมที่ดำเนินการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ผลที่ได้รับตลอดโครงการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | 5. ทำการศึกษาและทบทวน<br>วรรณกรรมเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุ<br>ดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และ<br>พลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ใน<br>รูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งาน<br>และสามารถนำไปต่อยอดในเชิง<br>พาณิชย์ได้ | ต่อการดูดซับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่<br>ปริมาณ GOP เวลาในการดูดซับ และ<br>อุณหภูมิการดูดซับ                                                                                                                                                                                                                                                   | โรงงานซุบโลหะ GOP มีประสิทธิภาพในการ<br>ดูดซับโครเมียมได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 10 วัน<br>ในบ่อตกตะกอนของโรงงานฟอกย้อมและ<br>มากกว่า 18 วันจากบ่อตกตะกอนของ<br>โรงงานซุบโลหะ<br>10. วัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการใช้งานแล้ว<br>ไม่พบการชะละลายของโครเมียม ซึ่งได้ใช้<br>เป็นแนวทางในการศึกษาต่อยอดการนำวัสดุ<br>ดูดซับ GOP ไปใช้งานต่อไป<br>11. ร่างบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร<br>วิชาการนานาชาติ |
|                     | 6. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการ<br>เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุ<br>ดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และ<br>พลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการ<br>ต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรม                | 5. ทำการศึกษากการพัฒนาวัสดุดูดซับ<br>GOP ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้มีความ<br>เหมาะสมและสะดวกต่อการนำไปใช้<br>งาน ทั้งนี้ เมื่อรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด<br>ในการนำ GOP ไปใช้งานคือรูปแบบผง<br>จึงเน้นการพัฒนา GOP ในรูปแบบผง<br>ให้เป็นวัสดุผสมที่มีความเป็นเนื้อ<br>เดียวกันมากที่สุด และเป็นวิธีการที่<br>สามารถทำได้ในกำลังการผลิตที่สูงขึ้น |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                     | 7. ศึกษาการชะละลายของโครเมียมเฮ<br>กซะวาเลนต์จาก GOP ที่ผ่านการใช้<br>งานแล้ว                                                                                                                               | 6. ศึกษาการทำงานของวัสดุดูดซับ<br>GOP ภายใต้การจำลองบ่อตกตะกอน<br>ของโรงงานฟอกย้อม และโรงงานซุบ<br>โลหะ ต่อเนื่องเป็นเวลา 18 วัน                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                     |                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

| วัตถุประสงค์โครงการ | กิจกรรมที่วางแผน                                          | กิจกรรมที่ดำเนินการ                                                                                                                                             | ผลที่ได้รับตลอดโครงการ |
|---------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
|                     | 8. จัดทำบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสาร วิชาการนานาชาติ | 7. ทำการทดลองการชะละลายของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากวัสดุดูดซับ GOP ที่ผ่านการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อน โดยทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 1 เดือน |                        |

ภาคผนวก ข

สัญญาเลขที่

RDG60T0058

โครงการวิจัยการขยายผลการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์และพลาสติกเหลือใช้  
จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม  
สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

ตารางเปรียบเทียบผลผลิต (Output) ที่เสนอในข้อเสนอโครงการและที่ดำเนินการได้จริงในรอบ  
15 เดือน

| ผลผลิต (Output)                                                                                                                                                                                                             |                   | ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100 %)<br>ให้ท่านระบุสาเหตุและการแก้ไข<br>ที่ท่านดำเนินการ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจากการ<br>ปรับเปลี่ยน                                                                                                                                                                           | ผลสำเร็จ<br>( % ) |                                                                                         |
| 1. ศึกษา ทบทวนวรรณกรรมและทดสอบวิธีการ<br>ขยายกำลังการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์เพื่อใช้<br>เป็นวัสดุดูดซับผสมร่วมกับพลาสติก                                                                                                         | 100 %             |                                                                                         |
| 2. ติดต่อประสานงานและขอรวบรวมน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ<br>โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อเก็บกัก<br>สุดท้ายก่อนทำการปล่อยสู่ท่อสาธารณะหรือสู่<br>สิ่งแวดล้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างน้อย<br>2 แห่ง | 100 %             |                                                                                         |
| 3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ<br>ที่ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH,<br>conductivity และความเข้มข้นของ<br>โครเมียมเฮกซะวาเลนต์)                                                 | 100 %             |                                                                                         |
| 4. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1                                                                                                                                                                                       | 100 %             |                                                                                         |
| 5. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบที่                                                                                                                                              | 100 %             |                                                                                         |

|                                                                                                                                                                                                                |       |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--|
| ทำการเก็บรวบรวมมาได้ (เช่น pH, conductivity, และความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์) (ต่อ)                                                                                                                      |       |  |
| 6. ศึกษา ทบทวนวรรณกรรมและทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติทางเคมีบางประการสูงเกิน (เช่น pH turbidity หรือปริมาณโครเมียม) เพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาทดสอบการบำบัดด้วย | 100 % |  |
| 7. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว โดยใช้วัสดุดูดซับผสมที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน       | 100 % |  |
| 8. จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2                                                                                                                                                                          | 100 % |  |
| 9. ทำการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเพื่อหาวิธีการพัฒนาวัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสะดวกต่อการใช้งานและสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้                            | 100 % |  |
| 10. ทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้วัสดุดูดซับผสมแกรไฟต์ออกไซด์และพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ในการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียอุตสาหกรรม                                      | 100 % |  |
| 11. การทดสอบวัสดุดูดซับผสมในการบำบัดโครเมียมจากน้ำเสียจริง ในสภาวะจำลองที่ใกล้เคียงระบบบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรม                                                                                                | 100 % |  |

|                                                                                    |       |                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12. การทดสอบการชะละลายของโครเมียม<br>จากวัสดุอุดชั้นที่ใช้งานแล้ว                  | 100 % |                                                                                                                                                                                                        |
| 13. ดำเนินการขอจดอนุสิทธิบัตรการผลิตัวสด<br>อุดชั้นผสมแกรไฟต์ออกไซด์และ<br>พลาสติก | 90 %  | อยู่ระหว่างการรอเลขที่จดแจ้ง                                                                                                                                                                           |
| 14. จัดทำบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ใน<br>วารสาร วิชาการนานาชาติ                     | 80 %  | นำเสนอในงานประชุมวิชาการ “ 3rd<br>Environment and Natural<br>Resources International<br>Conference (ENRIC 2018): Global<br>Development with<br>Environmental Sustainability” ใน<br>เดือนพฤศจิกายน 2561 |
| 15. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์                                                         | 100 % |                                                                                                                                                                                                        |

ลงนาม.....

(หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

วันที่.....

ภาคผนวก ค

1. ตารางวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

1.1 ตารางวิเคราะห์คุณภาพน้ำโรงงานชุบโลหะ

| รายการวิเคราะห์ | หน่วย | ผลวิเคราะห์ |           | วิธีวิเคราะห์                                     |
|-----------------|-------|-------------|-----------|---------------------------------------------------|
|                 |       | บ่อที่1*    | บ่อที่2** |                                                   |
| pH              | -     | 11.6        | 4.2       | Electrometric Method 4500-H <sup>+</sup> B.       |
| TSS             | mg/L  | 170         | 130       | Total Suspended Solids Dried at 103-105°C 2540 C. |
| TDS             | mg/L  | 712         | 612       | Total Dissolved Solids Dried at 180°C 2540 C.     |
| COD             | mg/L  | 112         | 16.0      | Open Reflux Method 5220 B.                        |
| Iron (Fe)       | mg/L  | 19.9        | 83.7      | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Copper (Cu)     | mg/L  | 0.16        | <0.001    | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Zinc (Zn)       | mg/L  | 7.47        | 10.8      | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Manganese (Mn)  | mg/L  | 0.27        | 0.53      | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Nickel (Ni)     | mg/L  | 0.98        | 0.02      | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Silver (Ag)     | mg/L  | <0.10       | <0.10     | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Arsenic (As)    | mg/L  | 0.001       | <0.001    | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Selenium (Se)   | mg/L  | 0.003       | 0.004     | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Mercury (Hg)    | mg/L  | 0.002       | 0.002     | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Cadmium (Cd)    | mg/L  | <0.001      | <0.001    | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Lead (Pb)       | mg/L  | <0.01       | <0.01     | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Chromium (Cr)   | mg/L  | 0.32        | 7.04      | Inductively Coupled Plasma Method                 |

\*บ่อที่1 บ่อระบบกำจัดโครเมียม

\*\*บ่อที่2 บ่อเติมปูนขาวกำจัดไฮดรอกไซด์ของเหล็ก

## 1.2 ตารางวิเคราะห์คุณภาพน้ำโรงฟอกย้อม

| รายการวิเคราะห์ | หน่วย | ผลวิเคราะห์ |        |        |        | วิธีวิเคราะห์                                     |
|-----------------|-------|-------------|--------|--------|--------|---------------------------------------------------|
|                 |       | บ่อ 1       | บ่อ 2  | บ่อ 3  | บ่อ 4  |                                                   |
| pH              | -     | 8.9         | 9.7    | 7.7    | 7.5    | Electrometric Method 4500-H <sup>+</sup> B.       |
| TSS             | mg/L  | 116         | 120    | 1,107  | 2,660  | Total Suspended Solids Dried at 103-105°C 2540 C. |
| TDS             | mg/L  | 7,212       | 3,072  | 2,836  | 1,744  | Total Dissolved Solids Dried at 180°C 2540 C.     |
| COD             | mg/L  | 796         | 2,766  | 119    | 129    | Open Reflux Method 5220 B.                        |
| Iron (Fe)       | mg/L  | 0.46        | 0.65   | 1.31   | 3.02   | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Copper (Cu)     | mg/L  | 0.002       | 0.06   | 0.01   | 0.34   | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Zinc (Zn)       | mg/L  | 0.11        | 0.17   | 0.14   | 0.30   | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Manganese (Mn)  | mg/L  | <0.01       | <0.01  | 0.01   | 0.21   | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Nickel (Ni)     | mg/L  | <0.01       | <0.01  | <0.01  | <0.01  | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Silver (Ag)     | mg/L  | <0.01       | <0.01  | <0.01  | <0.01  | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Arsenic (As)    | mg/L  | 0.005       | 0.02   | 0.02   | 0.03   | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Selenium (Se)   | mg/L  | 0.002       | 0.002  | 0.002  | 0.003  | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Mercury (Hg)    | mg/L  | 0.003       | 0.003  | 0.003  | 0.003  | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Cadmium (Cd)    | mg/L  | <0.001      | <0.001 | <0.001 | <0.001 | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Lead (Pb)       | mg/L  | <0.01       | <0.01  | <0.01  | <0.01  | Inductively Coupled Plasma Method                 |
| Chromium (Cr)   | mg/L  | <0.01       | <0.01  | 0.01   | 0.05   | Inductively Coupled Plasma Method                 |

บ่อ 1 คือ ออกจาก production line

บ่อ 3 คือ เข้าบ่อเติมอากาศ

บ่อ 2 คือ stabilization pond

บ่อ 4 คือ บ่อเติมอากาศ 2

## 2. แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

### 2.1 การศึกษาการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

| Runs     |          |        |        | Factors  |                |                |
|----------|----------|--------|--------|----------|----------------|----------------|
| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Dose (g) | Fast mix (rpm) | Slow mix (rpm) |
| 14       | 1        | -1     | 1      | 1.25     | 85             | 85             |
| 9        | 2        | -1     | 1      | 0.5      | 140            | 50             |
| 12       | 3        | -1     | 1      | 2        | 140            | 50             |
| 15       | 4        | 0      | 1      | 0.5      | 140            | 120            |
| 4        | 5        | 1      | 1      | 2        | 140            | 120            |
| 10       | 6        | -1     | 1      | 0        | 220            | 85             |
| 2        | 7        | 1      | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 6        | 8        | 1      | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 3        | 9        | 1      | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 19       | 10       | 0      | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 20       | 11       | 0      | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 11       | 12       | -1     | 1      | 1.25     | 220            | 85             |
| 8        | 13       | 1      | 1      | 2.5      | 220            | 85             |
| 1        | 14       | 1      | 1      | 1.25     | 220            | 26             |
| 16       | 15       | 0      | 1      | 1.25     | 220            | 143            |
| 5        | 16       | 1      | 1      | 0.5      | 300            | 50             |
| 7        | 17       | 1      | 1      | 2        | 300            | 50             |
| 17       | 18       | 0      | 1      | 0.5      | 300            | 120            |
| 18       | 19       | 0      | 1      | 2        | 300            | 120            |
| 13       | 20       | -1     | 1      | 1.25     | 350            | 85             |

2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมชุบโลหะ

| Runs     |          |        |        | Factors  |          |          |
|----------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|
| StdOrder | RunOrder | PtType | Blocks | Dose     | Temp     | Time     |
| 2        | 1        | 1      | 1      | 1        | 15       | 1        |
| 12       | 2        | -1     | 1      | 0.55     | 55.22689 | 12.5     |
| 6        | 3        | 1      | 1      | 1        | 15       | 24       |
| 3        | 4        | 1      | 1      | 0.1      | 45       | 1        |
| 8        | 5        | 1      | 1      | 1        | 45       | 24       |
| 1        | 6        | 1      | 1      | 0.1      | 15       | 1        |
| 20       | 7        | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 5        | 8        | 1      | 1      | 0.1      | 15       | 24       |
| 11       | 9        | -1     | 1      | 0.55     | 4.773108 | 12.5     |
| 13       | 10       | -1     | 1      | 0.55     | 30       | -6.84062 |
| 15       | 11       | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 18       | 12       | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 17       | 13       | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 10       | 14       | -1     | 1      | 1.306807 | 30       | 12.5     |
| 9        | 15       | -1     | 1      | -0.20681 | 30       | 12.5     |
| 7        | 16       | 1      | 1      | 0.1      | 45       | 24       |
| 4        | 17       | 1      | 1      | 1        | 45       | 1        |
| 19       | 18       | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 16       | 19       | 0      | 1      | 0.55     | 30       | 12.5     |
| 14       | 20       | -1     | 1      | 0.55     | 30       | 31.84062 |

## ภาคผนวก ง

เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงาน



(ก) เครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง



(ข) เครื่องมือวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์



(ค) เครื่องมือวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสารและการวิเคราะห์เชิงคุณภาพอินฟราเรด



(ง) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน



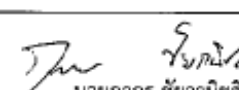
(จ) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด



ภาคผนวก จ

แบบ สป/พ/อสป/001-ก  
หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <br><b>คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</b><br><input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์<br><input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์<br><input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร<br>ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้<br>ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522<br>แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535<br>และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  | <b>สำหรับเจ้าหน้าที่</b><br>วันรับคำขอ <b>24 ส.ค. 2561</b><br>วันยื่นคำขอ <b>24 ส.ค. 2561</b><br>สัญลักณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ<br>ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์<br>ประเภทผลิตภัณฑ์<br>วันประกาศโฆษณา<br>เลขที่ประกาศโฆษณา<br>วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร<br>เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร<br>ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่ |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  | เลขที่คำขอ <b>1801005038</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| 1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ วัสดุคอมพิวเตอร์ของแม่พิมพ์ถอดไอซ์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเอ็กสวาเลนทีโครเมียมและกรรมวิธีในการผลิต                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ <b>1</b> งาน<br>คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> บุคคลธรรมดา <input type="checkbox"/> นิติบุคคล <input checked="" type="checkbox"/> หน่วยงานรัฐ <input type="checkbox"/> มูลนิธิ <input type="checkbox"/> อื่นๆ<br>ชื่อ <b>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย</b><br>ที่อยู่ <b>254 ถนนพญาไท</b><br>ตำบล/แขวง <b>วังใหม่</b> อำเภอ/เขต <b>ปทุมวัน</b> จังหวัด <b>กรุงเทพฯ</b> รหัสไปรษณีย์ <b>10330</b> ประเทศ <b>ไทย</b><br>อีเมล <b>pakorn.cvn@gmail.com</b><br><input type="checkbox"/> เลขประจำตัวประชาชน <input type="checkbox"/> เลขทะเบียนนิติบุคคล <input checked="" type="checkbox"/> เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร <b>0 9 9 1 0 0 0 1 5 9 0 7 2</b> <input type="checkbox"/> เพิ่มเติม (ดังแนบ)<br>ในกรณีที่มีการ ชื่อตรงกับท่าน ท่านสะดวกให้ทาง <input type="checkbox"/> อีเมลผู้ขอ <input checked="" type="checkbox"/> อีเมลท่านแทน |  | 3.1 สัญชาติไทย<br>3.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7<br>3.3 โทรสาร 02-218-4198                                                                                                                                                                                                                                          |  |
| <b>ยกเว้นค่าธรรมเนียม</b><br>4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร<br><input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น<br>ตามกฎกระทรวง พ.ศ. ๒๕๔๔ ว่าด้วยอัตราค่าธรรมเนียมและการยกเว้นค่าธรรมเนียม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 5. ตัวแทน (ถ้ามี)<br>ชื่อ <b>นายภากร ชัยวานิชศิริ</b><br>ที่อยู่ <b>สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (อาคารจามจุรี 10) ชั้น 2 ถนนพญาไท</b><br>ตำบล/แขวง <b>วังใหม่</b> อำเภอ/เขต <b>ปทุมวัน</b> จังหวัด <b>กรุงเทพฯ</b> รหัสไปรษณีย์ <b>10330</b> ประเทศ <b>ไทย</b><br>อีเมล <b>pakorn.cvn@gmail.com</b><br>เลขประจำตัวประชาชน <b>1 1 0 0 7 0 1 4 4 3 8 8 7</b> <input checked="" type="checkbox"/> เพิ่มเติม (ดังแนบ)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  | 5.1 ตัวแทนเลขที่ 2544<br>5.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7<br>5.3 โทรสาร 02-218-4198                                                                                                                                                                                                                                   |  |
| 6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> ชื่อและที่อยู่เดียวกันกับผู้ขอ<br>ชื่อ <b>อ.ดร. ดวงกมล พิทยสุตร</b><br>ที่อยู่ <b>อาคารสถาบัน 2 ชั้น 3 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท</b><br>ตำบล/แขวง <b>วังใหม่</b> อำเภอ/เขต <b>ปทุมวัน</b> จังหวัด <b>กรุงเทพฯ</b> รหัสไปรษณีย์ <b>10330</b> ประเทศ <b>ไทย</b><br>อีเมล <b>doungkamon.p@chula.ac.th</b><br>เลขประจำตัวประชาชน <b>3 2 5 0 7 0 0 0 6 7 2 8 3</b> <input checked="" type="checkbox"/> เพิ่มเติม (ดังแนบ)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| 7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม<br>ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบายว่าได้อื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกันกับคำขอรับสิทธิบัตร<br>เลขที่ <b>1</b> วันยื่น <b>24 ส.ค. 2561</b> เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากกันเพื่อเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ<br><input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| <b>หมายเหตุ</b> ในกรณีที่ไม่มีเอกสารรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบฉบับนี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและตัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
| <b>สำหรับเจ้าหน้าที่</b><br>จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร<br><input type="checkbox"/> กลุ่มวิศวกรรม <input type="checkbox"/> กลุ่มเคมี <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร<br>สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมี/เทคโนโลยี) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1) <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม)<br>สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ชีววิทยา) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2) <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (เคมี)<br>สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัช/เคมีชีวภาพ) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)                                                                          |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                           |                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------|
| 8. การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า <input type="checkbox"/> PCT <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> เพิ่มติม (ดังแนบ)</span>                                                                                                                                                                                                                                 |                    |                           |                                         |           |
| วันยื่นคำขอ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | เลขที่คำขอ         | ประเทศ                    | สัญลักษณ์จำแนกการประสิทธิ์ระหว่างประเทศ | สถานะคำขอ |
| 8.1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |                           |                                         |           |
| 8.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |                           |                                         |           |
| 8.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                    |                           |                                         |           |
| 8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ผู้อื่นได้ยื่นคำขอเป็นวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานหรือคำขอ <input type="checkbox"/> ขอเป็นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอ                                                                                 |                    |                           |                                         |           |
| 9. การแสดงการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ของผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประสิทธิ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด                                                                                                                                                                                                                                            |                    |                           |                                         |           |
| วันแสดง                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | วันเปิดงานแสดง     | ผู้จัด                    |                                         |           |
| 10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                    |                           |                                         |           |
| 10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10.2 วันที่ฝากเก็บ | 10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ |                                         |           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                           |                                         |           |
| 11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอเป็นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดทำคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำเป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอเป็นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่นๆ |                    |                           |                                         |           |
| 12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข ในการประกาศโฆษณา                                                                                                                                |                    |                           |                                         |           |
| 13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                    |                           |                                         |           |
| ก. แบบพิมพ์คำขอ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 4                  | หน้า                      |                                         |           |
| ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 4                  | หน้า                      |                                         |           |
| ค. ข้อสิทธิ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2                  | หน้า                      |                                         |           |
| ง. รูปเขียน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | รูป                | หน้า                      |                                         |           |
| จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    |                           |                                         |           |
| <input checked="" type="checkbox"/> รูปเขียน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1                  | รูป                       | 1                                       | หน้า      |
| <input type="checkbox"/> ภาพถ่าย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                    | รูป                       |                                         | หน้า      |
| ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                    |                           | 1                                       | หน้า      |
| 14. เอกสารประกอบคำขอ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> เอกสารการขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่นคำขอในประเทศไทย                                                                                                                                                                                                                                                                              |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> เอกสารอื่นๆ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                    |                           |                                         |           |
| 15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                    |                           |                                         |           |
| <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน                                                                                                                                                                                                                                                                         |                    |                           |                                         |           |
| <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                    |                           |                                         |           |
| 16. <input type="checkbox"/> ไม่มีชื่อ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน                                                                                                                                                                                                                  |                    |                           |                                         |           |
| (  นายภากร ชัยวานิชศิริ )                                                                                                                                                                                                                                                          |                    |                           |                                         |           |

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้สิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษ จำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

## ใบต่อแบบท้ายแบบ สป/สผ/อสป/001-ก

## 3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

อยู่ที่ 979/17-21 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์ ชั้น 14 ถนนพหลโยธิน

ตำบล/แขวง สามเสนใน อำเภอ/เขต พญาไท จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10400 ประเทศ ไทย

3.1 สัญชาติ ไทย 3.2 โทรศัพท์ 02-278-8200 3.3 โทรสาร 02-298-0476

เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 0994000165692

## 5. ตัวแทน(ถ้ามี)

ชื่อ นายมงคล แก้วมหา

อยู่ที่ สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ชั้น 2 ถนนพญาไท

ตำบล/แขวง วังใหม่ อำเภอ/เขต ปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10330 ประเทศ ไทย

อีเมล mongkol.k@chula.ac.th

เลขประจำตัวประชาชน 3840100084785

5.1 ตัวแทนเลขที่ 1453

5.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7

5.3 โทรสาร 02-218-4198

ชื่อ นายวีรพงษ์เทียนกุล

อยู่ที่ สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ชั้น 2 ถนนพญาไท

ตำบล/แขวง วังใหม่ อำเภอ/เขต ปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10330 ประเทศ ไทย

อีเมล veepayupong.w@chula.ac.th

เลขประจำตัวประชาชน 3191100071711

5.1 ตัวแทนเลขที่ 2520

5.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7

5.3 โทรสาร 02-218-4198

## 6. วิชา/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

ชื่อ นาย กิตติภพ อุติลา

อยู่ที่ 39 หมู่

ตำบล/แขวง เรณูใต้ อำเภอ/เขต เรณูนคร จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 48170 ประเทศ ไทย

อีเมล

เลขประจำตัวประชาชน 1480600108397

ชื่อ อ.ดร. อาทิตย์ เพ็ชรวิรัช

อยู่ที่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สังคมและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล 240/6 ถนนราชวิถี

ตำบล/แขวง พญาไท อำเภอ/เขต ราชเทวี จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10400 ประเทศ ไทย

อีเมลathit.phetrak@gmail.com

เลขประจำตัวประชาชน 117050003685

ใบต่อแบบท้าย แบบ สป/สผ/อสป/001-ก

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

ชื่อ อ.ดร. มลฤดี จันทรรัตน์

อยู่ที่ นวัตกรรมจัดการเกษตร สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ 85/1 หมู่ที่ 2 ถนนแจ้งวัฒนะ  
ตำบล/แขวง บางตลาด อำเภอ/เขต ปากเกร็ด จังหวัด นนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11120 ประเทศไทย  
อีเมล monruedeecha@pim.ac.th  
เลขประจำตัวประชาชน 3939900149811

ชื่อ นางสาว พัทธพันธ์ รัตนพันธ์

อยู่ที่ 660/3 ถนนหน้าเมือง

ตำบล/แขวง ตลาด อำเภอ/เขต เมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัด สุราษฎร์ธานี รหัสไปรษณีย์ 84000 ประเทศไทย  
อีเมล patchapun.2386@gmail.com  
เลขประจำตัวประชาชน 1103701273585

## ภาคผนวก จ

หน้า 1 ของจำนวน 4 หน้า

### รายละเอียดการประดิษฐ์

#### ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

วัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเอกซวาเลนส์โครเมียมและกรรมวิธีในการผลิต

#### 5 สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้านเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์และการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต

#### ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- แกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกมีความเสถียรสามารถคงคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและ
- 10 ความร้อนได้ในสภาวะปกติและในสภาวะที่มีความร้อนสูงหรือเย็นจัด จึงมักถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทนทานต่อความร้อนและนำไฟฟ้าในอุตสาหกรรมหลายประเภท ตั้งแต่อุตสาหกรรมที่ผลิตวัสดุและเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนจนไปถึงขั้นพื้นฐานทั่วไป แต่เนื่องจากแกรไฟต์ที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมทุกวันนี้เป็นสารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติอยู่ในชั้นหินโดยอาศัยความร้อนและความดันสูง ซึ่งพื้นที่ที่พบการฟอรมตัวของแกรไฟต์มีอยู่เพียงร้อยละ 12 ของพื้นที่
- 15 เปลือกโลกทั้งหมด ทำให้แกรไฟต์จัดอยู่ในประเภทของทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป จึงทำให้การใช้แกรไฟต์อย่างคุ้มค่าที่สุดเป็นสิ่งที่ต้องถูกนำมาพิจารณาให้มาก จากการสำรวจอุตสาหกรรมที่ใช้แกรไฟต์เป็นวัตถุดิบ หนึ่งในอุตสาหกรรมใกล้ตัวที่พบว่ามีการใช้แกรไฟต์แล้วเกิดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องถูกส่งไปกำจัดด้วยการฝังกลบนั้นได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องประดับที่มีกระบวนการกลึงแกรไฟต์แท่งเพื่อนำไปใช้เป็นเบ้าหลอมโลหะ ในกระบวนการกลึงเบ้าหลอมโลหะนั้น ก่อนแกรไฟต์ที่มี
- 20 จำหน่ายในลักษณะก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ จะถูกนำมาเข้าเครื่องกลึงเพื่อทำการเหลาเกลึงให้มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ โดยในขั้นตอนการกลึงจะมีผงแกรไฟต์ที่กลายเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการ ซึ่งจะถูกส่งไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบมากกว่า 800 กิโลกรัมต่อเดือน ซึ่งแกรไฟต์ผงที่เป็นเศษวัสดุดังกล่าวยังคงสภาพและคุณสมบัติของความเป็นแกรไฟต์อยู่ซึ่งและยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ต่อได้เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้ทรัพยากรมากที่สุด ดังนั้นเพื่อเพิ่มมูลค่าและลด
- 25 การทิ้งแกรไฟต์จึงได้นำแกรไฟต์ผงที่เป็นเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตดังกล่าวมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์นาโนวัสดุ เช่น แกรฟีน ที่มีคุณสมบัติอันเป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีหลายสาขา รวมไปถึงเทคโนโลยีการดูดซับ แต่เนื่องจากการผลิตแกรฟีนต้องอาศัยสารเคมี ปฏิกริยาเคมี และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการหลายรายการ เพื่อให้สามารถยืนยันคุณภาพของแกรฟีนที่ผลิตได้ ซึ่งต้องใช้พลังงานและสารเคมีจำนวนมากกว่าจะได้วัสดุแกรฟีนที่มีชั้นคาร์บอนเดียว ดังนั้น เพื่อทดแทนการผลิต
- 30 แกรฟีนนักวิจัยจึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอนุพันธ์ของแกรฟีนมาใช้ในการดูดซับมลสารชนิด

ต่างๆ ซึ่งอนุพันธ์ดังกล่าวได้แก่ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรไฟีนออกไซด์ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารได้เป็นอย่างดี

- ดังนั้น การศึกษานี้จึงนำแกรไฟต์ผงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการกลึงเข้าหลอมโลหะในอุตสาหกรรมเครื่องประดับมาใช้ในการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ ก่อนที่จะนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับปูนปลาสเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเครื่องประดับเช่นกัน เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

#### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ได้แก่ แกรไฟต์และปูนปลาสเตอร์อย่างคุ้มค่าที่สุด เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือใช้และลดการทิ้งวัสดุจากกระบวนการผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องประดับให้มากที่สุด ซึ่งผงแกรไฟต์จะถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ก่อนที่จะนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับปูนปลาสเตอร์ซึ่งได้จากการล้างทิ้งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหล่อ โดยวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนสูง แต่มีปริมาณน้ำจากระบบน้อย

- จุดมุ่งหมายของการผลิตเพื่อให้สามารถผลิตตัวดูดซับคอมโพสิตแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ที่มีความง่าย มีปริมาณมากและใช้เทคโนโลยีขั้นสูงน้อยที่สุด เพื่อให้ได้วัสดุดูดซับคอมโพสิตที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพ อยู่ในรูปลักษณะที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้มากที่สุด

#### การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

- วัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ซึ่งประกอบรวมด้วย

แกรไฟต์ออกไซด์ขนาด 4 - 500 ไมโครเมตร และ

ปูนปลาสเตอร์ที่มีขนาดอนุภาค 4 - 500 ไมโครเมตร ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนัก

กรรมวิธีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับ

- เฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ซึ่งประกอบรวมด้วย

1. การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ โดยอาจเลือกได้จากแกรไฟต์ออกไซด์ทั่วไป หรือแกรไฟต์ออกไซด์ ที่ได้รับการปรับปรุงสภาพโดยการนำแกรไฟต์ผงที่ได้จากกระบวนการกลึงเข้าหลอมโลหะ มาทำการบดด้วยครกเพื่อทำให้ผงละเอียดมาก และนำไปร่อนด้วยตะแกรง

2. การเตรียมปูนปลาสเตอร์ โดยเตรียมได้จากการนำปูนปลาสเตอร์ทั่วไป หรือปูนปลาสเตอร์ที่ได้จากการล้างออกหลังกระบวนการหล่อโลหะและถูกรวบรวมไว้จะเป็นปูนปลาสเตอร์ที่ยังเปียก โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 ต้องนำมารองเพื่อแยกสิ่งปนเปื้อน ได้แก่ เศษโลหะ และ ดิน ออกก่อน ทำการผึ่งให้สะเด็ดน้ำ ให้ปริมาณความชื้นน้อยกว่า ร้อยละ 40 ก่อนจะ

น้ำไปอบแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 80 – 100 องศาเซลเซียส ความชื้นที่ยอมรับได้ คือ น้อยกว่าร้อยละ 10 ทั้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรง

### 3. ทำการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์

3.1 ผสมกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกเข้มข้นเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 9 ต่อ 1 โดยปริมาตร และทำให้เย็นลงจนอุณหภูมิของสารละลายกรดดังกล่าว ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส

3.2 ผสมสารละลายกรดเข้มข้นจากข้อ 3.1 กับผงแกรไฟต์ที่ผสมกับผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 โดยค่อยๆ ตักผงแกรไฟต์ผสมผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเติมลงในสารละลายกรดเข้มข้นที่ละ 0.2 - 0.3 กรัมจนหมด ขณะผสมเปิดเครื่องกวนสารและให้ความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส กวนสารผสมต่อที่อุณหภูมิ 40 - 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 - 8 ชั่วโมง

3.3 เมื่อครบเวลาทั้งสารให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เทสารละลายลงในน้ำกลั่นที่แช่เย็นจนแข็ง กวนต่อน้ำแข็งละลายหมด แล้วเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 30 คนสารให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นใช้ตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร กรองสารละลายและนำส่วนที่ผ่านการกรองไปกรองซ้ำด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2

3.4 รวบรวมตะกอนส่วนที่ติดบนกระดาษกรองซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาลคือแกรไฟต์ที่ชั้นคาร์บอนมีระยะห่างเพิ่มขึ้น เรียกว่า แกรไฟต์ออกไซด์ ตะกอนนี้จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น 1 รอบ กรดไฮโดรคลอริก ที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 30 1 รอบ และเอทานอล 2 รอบด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนน้ำด้านบนทิ้ง ด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที

3.5 ทำการเก็บส่วนตะกอนลงในภาตแก้ว ส่วนตะกอนที่เก็บรวบรวมจะถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 – 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวอย่างร้อนจากภาต แสดงว่าแห้งดีแล้ว จะได้มาซึ่งแกรไฟต์ออกไซด์

### 4. ขั้นตอนการผลิตวัสดุคอมโพสิตแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์

4.1 แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการผลิตในขั้นตอนที่ 3.1-3.5 ถูกนำมาละลายในน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 หรือมากกว่า เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายของแกรไฟต์ออกไซด์

4.2 เติมปูนปลาสเตอร์ ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงแล้วในข้อ 2 ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายแกรไฟต์ออกไซด์อยู่ ให้น้ำหนักเริ่มต้นของปูนปลาสเตอร์มากกว่าน้ำหนักของแกรไฟต์ออกไซด์ผงก่อนละลายน้ำ 4 เท่า (ดังนั้น อัตราส่วนแกรไฟต์ออกไซด์ต่อปูนปลาสเตอร์ 1 ต่อ 4) เติมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 มิลลิลิตร ต่อ สารผสม 1 กรัม

4.3 นำไปเขย่าให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้แห้งโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

4.4 เพื่อให้วัสดุคอมโพสิตกลายเป็นผงที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ต้องทำการบดวัสดุคอมโพสิตที่แห้งแล้วในข้อ 4.3 ด้วยเม็คบิทแก้ว โดยเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลการทดลองดังจะกล่าวต่อไปนี้เป็นเพียงการแสดงถึงผลที่ได้รับจากการนำการประดิษฐ์ที่ได้จากห้องปฏิบัติการไปทดสอบ ซึ่งมีได้เป็นจำกัดขอบเขตของการประดิษฐ์แต่อย่างใด

จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับคอมโพสิตในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน พบว่า วัสดุคอมโพสิตแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ใกล้เคียงกันมากที่ความ

เข้มข้นสูง 50 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ภายในเวลา 24 ชั่วโมง และสามารถทำการดูดซับได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับมากขึ้น ซึ่งวัสดุดูดซับสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องทำการเขย่าหรือผสมวัสดุดูดซับให้เข้ากัน

- ทั้งนี้ กระบวนการทดลองดังกล่าวเป็นการทดลองบนพื้นฐานของการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการดูดซับโครเมียมด้วยวัสดุคอมโพสิตแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมีแนวโน้มที่เป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอดให้วัสดุดูดซับสามารถถูกนำมาใช้ในบ่อบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยกักน้ำเสียให้สัมผัสกับวัสดุดูดซับเป็นระยะเวลาที่นานพอ ก่อนทำการปล่อยน้ำส่วนบนออกจากบ่อเก็บกับ โดยวัสดุดูดซับจะตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำเสีย

#### วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

- 10 เหมือนที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

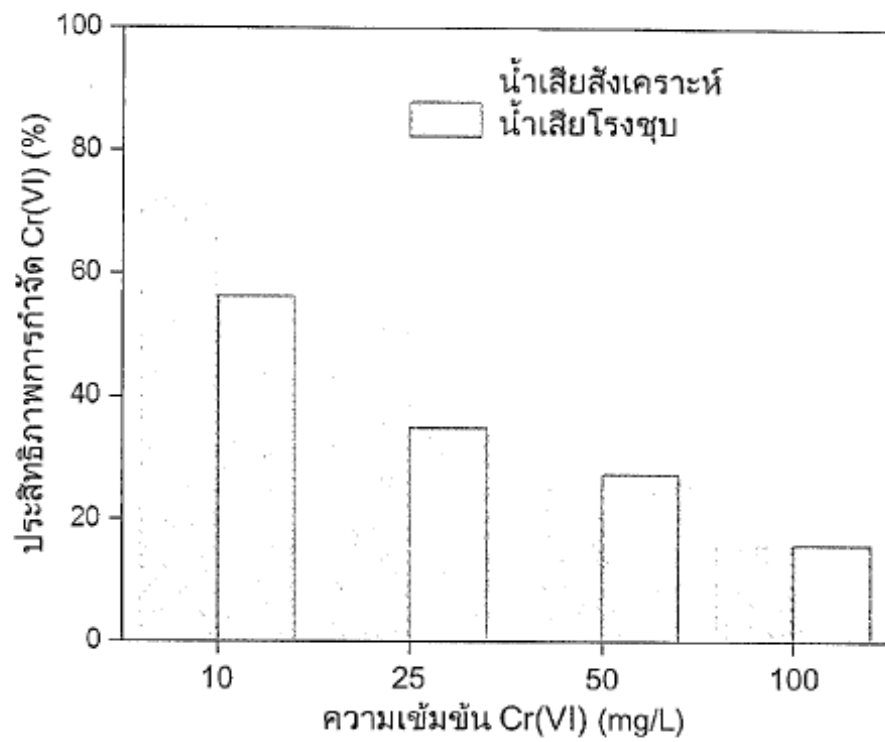
**ข้อก๊อสิทริ**

1. วัสดุคอมโพสิทของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ซึ่งประกอบไปด้วย แกรไฟต์ออกไซด์ขนาด 4 - 500 ไมโครเมตร และปูนปลาสเตอร์ที่มีขนาดอนุภาค 4 - 500 ไมโครเมตร ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนัก
- 5 2. กรรมวิธีการผลิตวัสดุคอมโพสิทของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ที่ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังต่อไปนี้
  - ก. นำแกรไฟต์ออกไซด์หรือแกรไฟต์ออกไซด์ที่ปรับสภาพ โดยนำมาละลายในน้ำกลั่น โดยอัตราส่วนของแกรไฟต์ออกไซด์ต่อน้ำกลั่น คือ 1 กรัม ต่อ 1 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายแกรไฟต์ออกไซด์
  - 10 ข. เติมน้ำปูนปลาสเตอร์หรือปูนปลาสเตอร์ที่ได้รับการปรับสภาพ ลงในสารละลายแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอน ก. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกรไฟต์ออกไซด์ก่อนละลายน้ำต่อน้ำปูนปลาสเตอร์ คือ 1 ต่อ 4
  - ค. นำวัสดุคอมโพสิทที่ได้จากขั้นตอน ข. ไปเขย่า เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 - 5 ชั่วโมง
  - 15 ง. นำวัสดุคอมโพสิทที่ได้จากขั้นตอน ค. ไปบดด้วยเม็คบีดแก้ว โดยการเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที - 1 ชั่วโมง
3. กรรมวิธีการผลิตวัสดุคอมโพสิทของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม ตามข้อก๊อสิทริที่ 2 ที่ซึ่งแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้รับการปรับสภาพ ได้มาด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้
  - 20 ก. นำแกรไฟต์ออกไซด์ ไปบดให้เป็นผงละเอียด และร่อนด้วยตะแกรง
  - ข. นำกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกผสมเข้าด้วยกัน ในอัตราส่วน 9 ต่อ 1 โดยปริมาตรตามลำดับ และทำให้เย็นลงจนอุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส
  - ค. ผสมแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอน ก. กับผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 เติมน้ำลงในกรดผสมเข้มข้นที่ได้จากขั้นตอน ข. ที่อุณหภูมิ 40 - 50 องศาเซลเซียส
  - 25 ง. ผสมสารละลายที่ได้จากขั้นตอน ค. ลงในน้ำกลั่นที่แช่เย็นจนแข็งจนน้ำแข็งละลายจนหมด แล้วเติมน้ำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 คนสารให้เข้ากัน โดยใช้ระยะเวลา 5 - 10 นาที
  - จ. กรองสารละลายที่ได้จากขั้นตอน ง. ด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร และกรองต่อ
  - 30 ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 นำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการกรองไปล้างด้วยน้ำกลั่น 1 รอบ กรดไฮโดรคลอริก ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 1 รอบ และ เอทานอล 2 รอบ ตามลำดับ ด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที
  - ข. นำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอน จ. ไปทำให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 50 - 60 องศาเซลเซียส

4. กรรมวิธีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 2 ที่ซึ่งปูนปลาสเตอร์ที่ได้รับการปรับสภาพ ได้มาด้วยการนำปูนปลาสเตอร์ ที่มีความชื้นน้อยกว่า ร้อยละ 40 ไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 80 – 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ปูนปลาสเตอร์ที่มีความชื้นน้อยกว่า ร้อยละ 10 ทั้งไว้ให้เย็นและนำไปร่อนด้วยตะแกรง
5. วัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งวัสดุคอมโพสิตดังกล่าว ใช้สำหรับดูดซับเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม

**บทสรุปการประดิษฐ์**

- วัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์สำหรับการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมและกรรมวิธีการผลิต ที่ประกอบด้วย แกรไฟต์ออกไซด์ขนาด 4 - 500 ไมโครเมตร และปูนปลาสเตอร์ที่มีขนาดอนุภาค 4 - 500 ไมโครเมตร และกรรมวิธีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนในการเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ ขั้นตอนในการเตรียมปูนปลาสเตอร์ และขั้นตอนในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแกรไฟต์ออกไซด์และปูนปลาสเตอร์
- 5



รูปที่ 1