



รายงานการวิจัย

เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม
(Technology of Industrial Waste Treatment)
(กลุ่มเรื่อง เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม)

โดย

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

นายพรคพงษ์ ศรีประเสริฐ และคณะ

กันยายน 2555

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
และผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้วิจัยแต่ผู้เดียว
ปีงบประมาณ 2553

รายงานการวิจัย

1. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเพนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อม
ในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน (Coagulation Combine with Fenton Oxidation
Process for Dyed Removal from Silkscreen Printed Wastewater)
โดย นายพรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ และคณะ

2. การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมี
ร่วมกับเทคนิคซีเมนเตชัน (Copper Recovery of Printed Circuit Board by
Iron Powder: Chemical Hydrometallurgy combined with
Cementation Technique)
โดย นางนันทน์ ศรีประเสริฐ และคณะ

เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม (Technology of Industrial Waste Treatment) (กลุ่มเรื่อง เทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม)

โดย
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
นายพรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ และคณะ

กันยายน 2555

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
และผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้วิจัยแต่ผู้เดียว
ปีงบประมาณ 2553

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม (Technology of Industrial Waste Treatment) ประกอบด้วยสองโครงการย่อยได้แก่ การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน และการนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน ได้รับการสนับสนุนข้อมูลส่วนหนึ่งจากปัญหาพิเศษของนิสิตในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม การจัดทำโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้จัดสรรงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2553 เพื่อเป็นทุนสนับสนุนตลอดโครงการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัยที่ได้ประสานงานและอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย และนิสิตผู้ช่วยวิจัยที่มีความกระตือรือร้น ขยันและทุ่มเททั้งแรงกายแรงใจในการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรในคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุน พร้อมทั้งให้ความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ให้คำปรึกษา และให้ข้อเสนอแนะแก่คณะผู้วิจัย จนทำให้งานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถานที่ในการทำการวิจัย สุดท้ายขอขอบพระคุณ บริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรู๊ป จำกัด จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้า และ บริษัท วีเอเอส การ์เมนท์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดมหาสารคาม สำหรับน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน ตลอดจนข้อมูลการผลิตเพื่อใช้ในการทำโครงการวิจัย

พรรคพงษ์ ศรีประเสริฐ และคณะ

กันยายน 2555

ส่วนที่ 1 รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย).....เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม

(ภาษาอังกฤษ)Technology of Industrial Waste Treatment

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี.....งบประมาณ 2553.....จำนวนเงิน 770,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย...1 ปี 10 เดือน เริ่มทำการวิจัยเมื่อ .กรกฎาคม 2553 ถึง พฤษภาคม 2555

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัยพร้อมหน่วยงานที่สังกัดและหมายเลขโทรศัพท์

ชื่อผู้วิจัย (นายพรคพงษ์ ศรีประเสริฐ)¹ วศ.ม.(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะสิ่งแวดล้อมและ
ทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทรศัพท์/โทรสาร 0-4374-2135,08-
1307-9668 E-mail neo14nio@yahoo.com

(นางนันทน์ ศรีประเสริฐ)² วศ.ม.(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะสิ่งแวดล้อมและ
ทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โทรศัพท์/โทรสาร 0-4374-2135, 08-
4036-3287 E-mail sensory_nun@yahoo.com

ส่วนที่ 2 บทคัดย่อ

ภาษาไทย งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีเพื่อการบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรมสองประเภทคือ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการพิมพ์ซิลค์สกรีนและเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าจากของเสียอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีผลการศึกษาดังนี้

การศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันโดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการพิมพ์ซิลค์สกรีนมีลักษณะเบื้องต้น คือ มีกลิ่นฉุนของตัวทำละลาย มีความขุ่นและปนเปื้อนสีย้อม ค่าของ COD ทั้งหมด 3776 mg/L การดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่น 526 nm คือ 1.012 และค่าความขุ่น 1000 NTU (เจือจาง 5 เท่า ด้วยน้ำกลั่น) จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนทางเคมี คือการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอนด้วยความเข้มข้น 0.4 g/L มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD สี และความขุ่นคิดเป็นร้อยละ 90.70 78.66 และ 90.20 ตามลำดับ จากนั้นน้ำเสียจะถูกบำบัดต่อด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันตามสภาวะที่เหมาะสม คือ การเติมสารเฟนตันในอัตราส่วน H_2O_2 / Fe^{2+} 1.5 mol/mol โดยใช้ Fe^{2+} เข้มข้น 4.0 mmol/L และใช้ H_2O_2 6.0 mmol/L ค่า pH เริ่มต้น 5 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยานาน 90 นาที และใช้โพลิเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 1 mg/L เพื่อกำจัดอนุภาคเฟนตัน กระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน มีประสิทธิภาพการบำบัด COD สีและความขุ่น คิดเป็นร้อยละ 89.17 99.54 และ 98.98 ตามลำดับ การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน สามารถบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความขุ่นและของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดด้วยกลไกการสร้างและการรวมตะกอน สารอินทรีย์ละลายและสีที่ถูกกำจัดด้วยกลไกการเกิดออกซิเดชัน โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวม ของการบำบัด COD สี และความขุ่น คิดเป็นร้อยละ 98.99 99.90 และ 99.90 ตามลำดับ ราคาต้นทุนค่าสารเคมีทั้งหมดคิดเป็นเงิน 2116.15 บาท ต่อการบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน 1 ลบ.ม.

การศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็กโดยใช้วิธีการชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชันมีวัตถุประสงค์เพื่อการนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าจากของเสีย

อิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าทางเคมี ตามสภาวะที่เหมาะสมคือการใช้กรดไนตริกเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร สกัดส่วนแผ่นวงจรไฟฟ้า 20 กรัมต่อกรดไนตริก 50 มิลลิลิตร สามารถชะทองแดงได้ความเข้มข้น 386,820 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 96.71 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงทำการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก พบว่า ควรปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าให้เท่ากับ 3 ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก ความเร็วในการกวนเพื่อเกิดปฏิกิริยา 750 รอบ/นาที อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 53 - 125 ไมโครเมตร และใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเตชันที่สมบูรณ์อย่างน้อย 20 นาที สภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงถึงร้อยละ 94.65 และมีปริมาณทองแดงในตะกอนคิดเป็นร้อยละ 95.80 โดยน้ำหนัก พบสารประกอบทองแดงในรูป Cu^0 และ Cu_2O ความเร็วในการตกตะกอนของผงทองแดงเท่ากับ 0.00638 เมตร/นาที และอัตราน้ำล้างผิวเท่ากับ 9.187 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วัน

คำสำคัญ: น้ำเสียสีย้อม/การพิมพ์ซิลค์สกรีน/โคแอกกูเลชัน/เฟนตัน/ออกซิเดชันทองแดง/ แผ่นวงจรไฟฟ้า/ ผงเหล็ก/ การชะละลายทางเคมี/ ซีเมนเตชัน

Abstract

ภาษาอังกฤษ The aim of this research is to study of using technology for 2 types of industrial waste treatment e.g. dyed wastewater from silkscreen printed industry and copper recovery from scrap printed circuit boards (PCBs) from electronics waste. The results were as follow :

Study of efficiency and optimum condition for treatment of dyed silkscreen printed wastewater by coagulation and fenton oxidation process was found that the initial characteristic of dyed silkscreen printed wastewater were contaminated by solvent, dyed and suspended particles, COD 3,776 mg/L, 526 nm absorbance 1.012 and turbidity 1,000 NTU (5- fold DI water dilution). From the result of coagulation treatment process, the optimum condition was using alum concentration 0.4 g/L as coagulant which gave the efficiency of COD, colour and turbidity treatment 90.70%, 78.66% and 90.20% respectively. After that silkscreen printed wastewater was treated by fenton oxidation process which optimum conditions were using fenton reagent H_2O_2 / Fe^{2+} ratio 1.5 mol/mol by Fe^{2+} 4.0 mmol/L and H_2O_2 6.0 mmol/L, initial pH 5, reaction time 90 minutes and precipitated fenton particle by anionic polyelectrolyte 1 mg/L. The efficiency of fenton oxidation process for COD, colour and turbidity treatment were 89.71%, 99.54% and 98.98% respectively. Turbidity and suspended particles were removed by coagulation mechanism while soluble organic substance and true colour were removed by oxidation mechanism. Using coagulation combined with fenton oxidation process for silkscreen printed wastewater gave overall efficiency of COD,

colour and turbidity removal 98.99%, 99.90% and 99.90% respectively and the cost of chemical reagents was 2,116.15 Baht/1 m³ wastewater.

The study of copper recovery from printed circuit boards (PCBs) by iron powder using chemical hydrometallurgy combined with cementation technique have the main objective about the recovery of copper from electronics waste. PCBs were leached by chemical hydrometallurgy stage under suitable condition of nitric acid concentration at 4 mol/L, PCB/nitric acid ratio was 20 g/50 mL, which reached high copper concentration of 386,820 mg/L or 96.71% by weight of dry sludge. The next step is the copper recovery from leaching solution by cementation technique stage. The result found that the optimum conditions were initial pH of PCB leaching solution at 3, iron powder quantity was 1-fold stoichiometric, mixing velocity was 750 rpm, reaction temperature was 70 °C, average iron powder particle size was 53-125 µm and the reaction time at least 20 minutes. The recovery efficiency was 94.65% and the copper in dry sludge was 95.80%. There were metallic copper and copper (I) oxide form in composition, which settling velocity at 0.00638 m/min and overflow rate at 9.187 m³/m².day.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย	3
1.3 รายละเอียดความเชื่อมโยงระหว่างโครงการย่อย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
บทที่ 2 การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อม ในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สก๊린	3
2.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	3
2.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
2.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
2.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	6
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	7
2.6 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	9
1. ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สก๊린	10
2. ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด น้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สก๊린	10
3. ศึกษาผลของปริมาณการใช้สารเฟนตัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพ การบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สก๊린	10
4. ศึกษาผลของค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียในการใช้สารเฟนตัน(Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สก๊린	11
5. ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สก๊린	12
6. ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตัน	12
7. ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สก๊รินภายหลัง การบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน	13

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
8. สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	13
9. ศึกษาราคาต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	13
2.7 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	13
2.7.1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	13
2.7.2 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	15
2.7.3 ศึกษาปริมาณการใช้สารฟenton (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	19
2.7.4 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นในการใช้สารฟenton ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน	24
2.7.5 ศึกษาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน	26
2.7.6 ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคฟenton	28
2.7.7 ศึกษาลักษณะของน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสถานะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน	29
2.7.8 สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	33
2.7.9 ราคาต้นทุนการใช้สารเคมีเพื่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	35
บทที่ 3 การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน	37
3.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	37
3.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	38
3.3 ขอบเขตของการวิจัย	39
3.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย	40
3.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	41
3.6 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย	44
1. การเตรียมสารชะละลายกรด	44
2. ทำกราฟมาตรฐานของโลหะ 4 ชนิด	44
3. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า	44
4. การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี	44
5. การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทนชันด้วยผงเหล็ก	45

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
6. การตกตะกอนของตะกอนทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนเทนซ์ โดยใช้ผงเหล็กในสภาวะที่ดีที่สุด	45
7. องค์ประกอบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของตะกอนภายหลังจากการนำกลับทองแดง	45
3.7 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	46
3.7.1 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของแผ่นวงจรไฟฟ้า	46
3.7.2 องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า	47
3.7.3 การกระจายตัวอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)	48
3.7.4 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า ด้วย SEM-EDX Technique	49
3.7.5 การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy)	49
3.7.6 องค์ประกอบในแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะ	53
3.7.7 การชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	55
3.7.8 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	56
3.7.9 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก (iron powder)	56
3.7.10 ลักษณะทางกายภาพสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุของอนุภาคผงเหล็ก	57
3.7.11 ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์	58
3.7.11.1 ผลของพีเอชเริ่มต้นและปริมาณผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง	58
3.7.11.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยาต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า	70
3.7.11.3 ผลของขนาดอนุภาคผงเหล็กที่มีผลต่อการนำกลับทองแดง	78
3.7.12 การตกตะกอนทองแดงที่ได้จากการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์ในสภาวะที่ดีที่สุด	95
3.7.13 องค์ประกอบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของตะกอนที่ได้ภายหลังจากการนำกลับทองแดง	97
3.7.13.1 องค์ประกอบเชิงปริมาณของตะกอนภายหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) และ Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)	97
3.7.13.2 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนภายหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	98
บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	100

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.1 การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อม ในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน	100
4.1.1 สรุปผล	100
4.1.2 ข้อเสนอแนะ	100
4.2 การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมี ร่วมกับเทคนิคซีเมนเทชัน	101
4.2.1 สรุปผล	101
4.2.2 ข้อเสนอแนะ	103
ภาคผนวก	104
1. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อม ในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน	104
2. การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมีร่วมกับ เทคนิคซีเมนเทชัน	114
บรรณานุกรม	149
ประวัติคณะผู้วิจัย	153

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2-1	ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	14
2-2	ลักษณะของน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน	30
3-1	องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า	47
3-2	การกระจายตัวของอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)	48
3-3	องค์ประกอบธาตุที่พบในแผ่นวงจรไฟฟ้า	49
3-4	สภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า	53
3-5	ลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	56
3-6	องค์ประกอบธาตุที่พบในผงเหล็ก	57
3-7	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงโดยใช้ผงเหล็ก	62
3-8	ปริมาณทองแดงในตะกอน	64
3-9	องค์ประกอบเชิงปริมาณจากเทคนิค Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) และ Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)	97
ตารางผนวกที่	หน้า	
1-1	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	104
1-2	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	105
1-3	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น	106
1-4	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการสร้างตะกอน	107
1-5	อัตราส่วนระหว่าง H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม	108
1-6	ปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วน H_2O_2 / Fe^{2+} เท่ากับ 1.5 mmol/mmol	109
1-7	ค่าพีเอชเริ่มต้นในการใช้สารเพนตันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน	109
1-8	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน	110
1-9	ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเพนตัน	110
1-10	ปริมาณโพลลิเอเลคโตรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเพนตัน	110
1-11	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน	111
2-1	ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะตะกั่ว	114
2-2	ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะนิกเกิล	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
2-3	ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะเหล็ก	116
2-4	ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะทองแดง	117
2-5	การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร	119
2-6	การชะละลายนิกเกิลจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร	120
2-7	การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร	121
2-8	การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร	122
2-9	การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร	123
2-10	การชะละลายนิกเกิลจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร	124
2-11	การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร	125
2-12	การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร	126
2-13	การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร	127
2-14	การชะละลายนิกเกิลจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร	128
2-15	การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร	129
2-16	การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร	130
2-17	สรุปผลการชะละลายตะกั่วและร้อยละโดยน้ำหนักของตะกั่วในแผ่นวงจรไฟฟ้า	131
2-18	สรุปผลการชะละลายนิกเกิลและร้อยละโดยน้ำหนักของตะกั่วในแผ่นวงจรไฟฟ้า	132
2-19	สรุปผลการชะละลายเหล็กและร้อยละโดยน้ำหนักของตะกั่วในแผ่นวงจรไฟฟ้า	133
2-20	สรุปผลการชะละลายทองแดงและร้อยละโดยน้ำหนักของตะกั่วในแผ่นวงจรไฟฟ้า	134
2-21	ข้อมูลกราฟมาตรฐานทองแดง	135
2-22	ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก	135
2-23	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 0.92)	136
2-24	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 2)	137
2-25	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3)	138
2-26	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 4)	139
2-27	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์ 3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และขนาดอนุภาคผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร)	140

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดง ละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และขนาดอนุภาคผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร)	141
2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดง ละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และขนาดอนุภาคผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร)	142
2-30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณตะกอนจมตัวและความสูงของชั้นตะกอน	143

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2-1	ลักษณะของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	14
2-2	ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนเริ่มต้น วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)	15
2-3	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	15
2-4	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	16
2-5	ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น	16
2-6	ผลของปริมาณสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี	17
2-7	ผลของปริมาณสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี	18
2-8	ผลของปริมาณสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น	18
2-9	ผลของอัตราส่วนของ Fe^{2+}/H_2O_2 (mol/mol) ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD	20
2-10	ผลของประสิทธิภาพการบำบัดสีต่ออัตราส่วนของ H_2O_2/Fe^{2+} (mol/mol)	20
2-11	ประสิทธิภาพการบำบัด COD เทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)	22
2-12	ประสิทธิภาพการบำบัดสีเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)	22
2-13	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)	22
2-14	ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพ การกำจัด COD	24
2-15	ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี	24
2-16	ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัด ความขุ่น	25
2-17	ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตันต่อค่า COD	26
2-18	ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตันต่อค่าพีเอช	26
2-19	ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตันต่อค่า ORP	27
2-20	ผลของความเข้มข้นของสารส้มต่อการบำบัดสีและความขุ่น	28
2-21	ผลของความเข้มข้นของโพลิอิเล็กโตรไลต์ต่อการบำบัดสีและความขุ่น	28
2-22	ประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนและประสิทธิภาพรวม	30
2-23	ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนเริ่มต้น ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)	31
2-24	ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยสารส้มด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
2-25	ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการ เพนตัน ออกซิเดชัน ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)	32
2-26	เปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงและประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแต่ละขั้นตอน	32
3-1	ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้า	46
3-2	ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะที่ผ่านการบัด	46
3-3	องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า	47
3-4	การกระจายตัวของอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)	48
3-5	องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วย SEM-EDX Technique	49
3-6	ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า	50
3-7	ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า	50
3-8	ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า	51
3-9	ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า	51
3-10	ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก	53
3-11	ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดไนตริก	54
3-12	ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก	54
3-13	ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรด Aqua regia	55
3-14	การกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก	57
3-15	ลักษณะทางกายภาพ สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคผงเหล็ก	58
3-16 ก)	ผลของพีเอชเริ่มต้น 0.92 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง	59
3-16 ข)	ผลของพีเอชเริ่มต้น 2 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง	59
3-16 ค)	ผลของพีเอชเริ่มต้น 3 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง	60
3-16 ง)	ผลของพีเอชเริ่มต้น 4 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง	60
3-17 (ก)-(ง)	ตะกอนทองแดงภายหลังกระบวนการนำกลับพีเอชเริ่มต้น 0.92, 2, 3 และ 4	63
3-18	ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทองแดงลำดับที่ 1-12 ตามตารางที่ 8	65
3-19	ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 0.92 (ก) (ข) และ (ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกตามลำดับ	66
3-20	ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 2 (ก) (ข) และ (ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกตามลำดับ	67
3-21	ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 3 (ก) (ข) และ (ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกตามลำดับ	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-22	ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 4 (ก) (ข) และ (ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกตามลำดับ	69
3-23	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ	70
3-24	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ	70
3-25	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ	71
3-26	องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอน (ก) (ข) และ (ค) อุณหภูมิ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส	71
3-27	ปริมาณธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส	72
3-28	ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตร)	73
3-29	ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 125-250 ไมโครเมตร)	74
3-30	ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 250-500 ไมโครเมตร)	75
3-31	ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยาต่อค่าพีเอชและไออาร์พี (ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็กขนาด 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ	78
3-32	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร	79
3-33	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร	79
3-34	ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร	79
3-35	องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ	80
3-36	องค์ประกอบธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส	81
3-37	ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส)	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-38 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส)	83
3-39 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร	84
3-40 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร	84
3-41 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร	84
3-42 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ	85
3-43 องค์ประกอบธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส	86
3-44 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส)	87
3-45 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส)	88
3-46 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร	89
3-47 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร	89
3-48 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร	89
3-49 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ	90
3-50 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนในสภาวะเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก	90
3-51 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส)	92
3-52 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส)	93
3-53 ปริมาณทองแดงละลายที่เหลือเทียบกับเวลา	94
3-54 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงเทียบกับเวลา	94
3-55 รูปแบบการตกตะกอนจากกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์	95
3-56 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา	96
3-57 การหาความเร็วในการตกตะกอน	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-58 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนในสภาวะเหล็ก 1 เท่าของสตอยซิโอเมตริกพีเอช 3 ที่อุณหภูมิห้อง	98
3-59 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนภายหลังการนำกลับที่สภาวะเหล็ก 1 เท่าของสตอยซิโอเมตริก พีเอช 3 ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตร	99
ภาพผนวกที่	หน้า
1-1 น้ำเสียเบื้องต้นจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน	111
1-2 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการ Coagulation ด้วยสารสร้างตะกอน	111
1-3 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนระหว่างการทำปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน	112
1-4 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน	112
1-5 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันและการกำจัดอนุภาคเฟนตันด้วยโพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ	113
2-1 กราฟมาตรฐานตะกั่ว	114
2-2 กราฟมาตรฐานนิกเกิล	115
2-3 กราฟมาตรฐานเหล็ก	116
2-4 กราฟมาตรฐานทองแดง	117
2-5 กราฟมาตรฐานทองแดง (Cu – calibration curve)	135
2-6 แผ่นวงจรไฟฟ้าบัด	143
2-7 (ก) – (ข) ลักษณะแผ่น PCB บดร่อนขนาดช่องว่างตะแกรง 1,000, 710, 500, 250, 125, 53, 45 และเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร	144
2-8 ผงเหล็ก	144
2-9 (ก) – (ณ) ลักษณะผงเหล็กร่อนขนาดช่องว่างตะแกรง 2,000, 1,000, 710, 500, 250, 125, 53, 45 และเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร	145
2-10 การชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	145
2-11 การกรองน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	146
2-12 น้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า	146
2-13 น้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เจือจางด้วยกรดไนตริก	146
2-14 น้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าภายหลังกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์	147
2-15 ตะกอนทองแดงขณะกรอง	147
2-16 การตกตะกอนน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าภายหลังกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์	147

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
2-17 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็ก ขนาด 53-125, 125-250, 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ	148
2-18 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็ก ขนาด 53-125, 125-250, 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ	148
2-19 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็ก ขนาด 53-125, 125-250, 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ	148

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนาได้มีการเจริญเติบโตและมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจเพื่อก่อให้เกิดการพัฒนาประเทศในทุกๆด้านอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และภาคชุมชน ซึ่งผลจากการพัฒนาดังกล่าวทำให้เกิดความต้องการใช้ทรัพยากรของประเทศในปริมาณมาก นำไปสู่ปัญหาการขาดแคลน การเสื่อมโทรม และปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ เช่นมลพิษทางน้ำ มลพิษดินเสื่อมโทรม มลพิษอากาศเสีย มลพิษขยะมูลฝอยและกากของเสียอันตรายเป็นต้น ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้เงินทุน และความรู้ด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพและการบำบัดฟื้นฟูมลพิษที่เกิดขึ้นดังกล่าว ให้ได้มาตรฐานผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกฎหมายซึ่งการพัฒนาในรูปแบบของการเร่งอัตราการบริโภคทรัพยากรธรรมชาติ แล้วมุ่งบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นแต่ด้านเดียวนั้น มิใช่รูปแบบของการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน การหาแนวทางใหม่ๆในการจัดการและควบคุมมลพิษต่างๆที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของเทคโนโลยีสะอาด (Cleaner Technology : CT) หรือ การพัฒนาด้วยกลไกที่สะอาด (Clean Development Mechanism : CDM) ย่อมเป็นเรื่องที่น่าสนใจและควรให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยหลักการพัฒนาดังกล่าวมิได้มุ่งเน้นการบำบัดมลพิษแต่เพียงอย่างเดียว หากแต่มุ่งเน้นการจัดการมลพิษแบบบูรณาการด้วยการลดของเสีย ณ แหล่งกำเนิด การนำกลับ และการใช้ซ้ำ (Reduce / Reuse / Recycle & Recovery : 3R_s) การเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์จากของเสีย (Value Added Waste and Waste Utilization) ก่อนการบำบัดของเสียที่เสียดังกล่าวแล้วปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Treatment of unavoidable residual) เพื่อการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรอย่างสูงสุด เพิ่มรายได้และลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย อันเป็นเป้าหมายสำคัญต่อการสร้างประโยชน์และภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และภาคชุมชน นอกจากนี้ยังเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอันเป็นทรัพยากรต้นทุนหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนสืบไป

ดังนั้นในแผนงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโครงการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย 2โครงการเดี่ยวภายใต้แผนงานวิจัยชื่อ “เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม” ซึ่งเป็นหัวข้อที่ครอบคลุม โครงการดังกล่าว โครงการที่ได้นำเสนอมานี้เป็นกรณีศึกษาสำหรับประเด็นต่างๆเกี่ยวกับการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม อันได้แก่น้ำเสียและของเสียอันตราย โดยมุ่งหวังให้เกิดการบำบัดของเสียเหล่านั้น อีกทั้งเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์จากของเสียเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆและสามารถนำผลการวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ในภาคส่วนต่างๆ ทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และภาคชุมชนได้ในลำดับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

เพื่อพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน

1.3 รายละเอียดความเชื่อมโยงระหว่างโครงการวิจัยย่อย

โครงการเทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วย โครงการการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน และโครงการการนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทชัน ความมุ่งหวังของชุดโครงการคือ มุ่งเน้นการบำบัด การใช้ประโยชน์ หรือความพยายามเพิ่มมูลค่าของเสียที่เกิดจากกิจกรรมการผลิตของอุตสาหกรรมในประเทศไทย เพื่อลดการก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากต้นกำเนิดในด้านมลพิษทางน้ำหรือของเสียอันตราย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

กระบวนการใหม่ ได้แนวทางการบำบัดของเสียอุตสาหกรรมที่แตกต่างกันด้วยเทคโนโลยีที่หลากหลาย ได้แก่ กระบวนการชะละลาย กระบวนการรีดักชัน กระบวนการซีเมนเทชัน กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

องค์ความรู้ ได้ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการบำบัดของเสียอุตสาหกรรมสู่ภาคอุตสาหกรรมในอนาคต และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อประยุกต์ใช้ในบำบัดจัดการมลพิษได้หลากหลายวิธีและหลากหลายอุตสาหกรรม

การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

1. สามารถลดความเป็นพิษของของเสียไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียหรือกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต
2. เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัดของเสีย
3. เป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ของเสีย
4. เป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและการดูแลระบบไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนอุปกรณ์กำจัดและต้นทุนการดำเนินการต่ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยการผลิตลดลง

การใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณะ

1. เป็นข้อมูลเผยแพร่ทางวิชาการ
2. สามารถใช้กับธุรกิจและกลุ่มธุรกิจที่มีลักษณะของของเสียคล้ายคลึงหรือมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน
3. นอกจากจะเป็นการบำบัดของเสียแล้วยังเกิดผลพลอยได้คือได้ใช้ประโยชน์ของเสีย (Waste Utilization) และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย (Value added Waste) ได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.5 หน่วยงานที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน

สถานประกอบการขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ได้แก่

1. ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมตัดเย็บ สิ่งทอและฟอกย้อม
2. กลุ่มธุรกิจร้านพิมพ์ซิลค์สกรีนขนาดเล็กเช่นร้านตัดเย็บชุดกีฬา
3. กลุ่มธุรกิจโรงพิมพ์
4. กลุ่มฟอกย้อมและสิ่งทอขนาดเล็ก เช่น กลุ่มทอผ้า OTOP

การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทชัน

สถานประกอบการขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ ได้แก่

1. กลุ่มธุรกิจรับกำจัดและบำบัดกากของเสียอันตราย
2. กลุ่มผู้รับซื้อและนำกลับโลหะมีค่าจากของเสีย
3. ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า (Printed Circuit Board Manufacturing)
4. ผู้ประกอบการรายย่อยที่ก่อให้เกิดของเสียประเภทแผ่นวงจรไฟฟ้า

บทที่ 2

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชัน เพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน (Coagulation Combine with Fenton Oxidation Process for Dyed Removal from Silkscreen Printed Wastewater)

2.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

อุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการเติบโตและมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องในประเทศไทยพบว่าอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อม เช่น เสื้อผ้าสำเร็จรูป ผ้าฝ้าย ผ้าขนสัตว์ และเส้นด้ายใยประดิษฐ์ ฯลฯ มีมูลค่าการส่งออกในช่วงไตรมาสที่ 1 ปี 2552 สูงถึง 1,504 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [1] จัดว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีโอกาสทางการตลาดสูงและมีแนวโน้มขยายตัวได้อย่างต่อเนื่องในอีก 1-2 ปีข้างหน้า [2] แม้จะเกิดภาวะถดถอยทางเศรษฐกิจโลกก็ตาม

อุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในหลายขั้นตอน เช่น น้ำเสียจากการเตรียมเส้นใย น้ำเสียจากสีย้อม น้ำเสียจากการล้างสีย้อมและแท่นพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียของแต่ละโรงงานจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะการทำงานและเทคโนโลยีการพิมพ์หรือการฟอกย้อมของแต่ละโรงงาน น้ำเสียจากการพิมพ์และการล้างแท่นพิมพ์แบบซิลค์สกรีนเป็นน้ำเสียอีกประเภทหนึ่งที่เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน เช่น มีความสกปรกในรูป COD หรือ BOD สูง [3-8] มีอัตราส่วน BOD/COD ต่ำ [4-10] ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ อาจมีไขมันและกลิ่นเหม็นของสารระเหยจากตัวทำละลาย (solvent) อาจมีโลหะหนักอันตรายบางประเภทจากแม่สี มีความขุ่นเนื่องจากของแข็งแขวนลอยสีจากแม่สี สีย้อมหรือหมึกพิมพ์ [11-14] นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอื่นๆ เช่น สารซักล้างและเกลือต่างๆ หากมลพิษเหล่านี้ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดปัญหามากมายเช่น ความเป็นพิษของน้ำเสียเอง ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงเนื่องจากภาวะอินทรีย์และทำให้แสงแดดไม่สามารถส่องผ่านผิวน้ำได้ ความขุ่นและสีในน้ำเป็นที่น่ารังเกียจและทำลายทัศนียภาพ [2-4, 13-16] ทางโรงงานจึงมีความจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียดังกล่าวให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมายก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป

การบำบัดน้ำเสียของสีย้อมและการพิมพ์ซิลค์สกรีนนั้นทำได้หลายวิธี ได้แก่ การสร้างและการรวมตะกอน (Coagulation & Flocculation) [11-12] การกรองหรือการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ [17] การใช้เทคโนโลยีเมมเบรน [18] การระเหย [19] การใช้กระบวนการทางชีวภาพเช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ anaerobic/aerobic ระบบ aerated lagoon [20] ระบบพีชบำบัด [21] และกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี เป็นต้น

การสร้างและการรวมตะกอนทางเคมีนั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากสามารถบำบัดความขุ่นและสีปรากฏ (apparent color) ในน้ำเสียได้ดี แต่มักหลงเหลือสีแท้ (true color) บางส่วนที่ยังคงละลายอยู่และยากต่อการบำบัด [22] การกรองและการดูดซับนั้นสามารถกำจัดสีและสีปรากฏในน้ำเสียได้ดี แต่มักมีปัญหาเรื่องการอุดตันและการเสื่อมสภาพของวัสดุกรองหรือวัสดุดูดซับซึ่งต้องทำการล้างย้อน รีเจนเนอเรท และกำจัดวัสดุกรองและวัสดุดูดซับนั้นต่อไป เทคโนโลยีเมมเบรนและการระเหยเป็น

วิธีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงและใช้พลังงานมาก [19] กระบวนการทางชีวภาพและการใช้พืชบำบัดนั้นไม่สามารถบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนได้ดีเท่าที่ควรเนื่องจากน้ำเสียมักมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางประเภท ที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ บางครั้งต้องใช้พื้นที่มากและค่าใช้จ่ายสูงในการก่อสร้างระบบ ปัจจุบันการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมคือ การออกซิเดชันทางเคมีโดยการใช้สารออกซิไดซ์บางประเภท เช่น คลอรีน โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต โอโซน การใช้รังสี UV และการใช้สารฟenton รวมถึงปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีแท้ในน้ำเสีย สามารถออกซิไดซ์หรือย่อยสลายโครงสร้างของสีย้อมให้มีขนาดและความเป็นพิษลดลง มีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความสนใจในการบำบัด COD ความขุ่น และสีย้อมในน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน โดยการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันของโรงงานตัดเย็บ บริษัท VAS การ์เมนต์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์สิ่งทอและเครื่องใช้สำหรับเครื่องหมายทางการค้าหลายยี่ห้อ เช่น adidas Nike Reebok เป็นต้น น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตที่สำคัญคือน้ำเสียจากการพิมพ์และการล้างแทนพิมพ์ซิลค์สกรีนซึ่งเกิดขึ้นในปริมาณ 35-40 ลิตร/วัน ลักษณะเบื้องต้นคือมีค่า COD สูง มีคราบไขมันและกลิ่นฉุนของตัวทำละลาย ค่าความขุ่นเนื่องจากสารแขวนลอยและสีจากการย้อมการพิมพ์ ซึ่งปัจจุบันทางโรงงานใช้วิธีการบำบัดโดยการผ่านวัสดุชนิดต่างๆ เช่น แกลบ เปลือกมังคุด เปลือกไข่ไก่ เป็นต้น แล้วปล่อยลงสู่บ่อรวบรวมน้ำเสียภายในโรงงาน

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะบำบัดน้ำเสียดังกล่าวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ทำได้ไม่ยาก ง่ายต่อการใช้งาน และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์หรือการก่อสร้างเพื่อใช้งานจริง วัสดุอุปกรณ์ราคาไม่แพงหาได้ง่ายทั่วไป กระบวนการโคแอกกูเลชันคือการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น สารส้ม เพอร์ริคโคลไรด์ เพอร์สัลเฟต รวมถึงโพลิอิเล็กโตรไลต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขนาดเล็กให้สามารถรวมกันเป็นตะกอนฟล็อก (floc) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ง่าย สารแขวนลอย ความขุ่น และสีปรากฏส่วนใหญ่จะถูกกำจัดได้ดีในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ยังมีสารออกซิไดซ์ที่เติมเพิ่ม คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารเฟนตัน (Fenton's reagent) คือเพอร์ริสไอออน (Fe^{2+}) ที่ได้จากเติมเพอร์ริสซัลเฟต จะได้อนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet OH$) หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงในสภาวะกรด สามารถทำลายโครงสร้างของสีแท้ที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียได้ดีดังสมการที่ (1)



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่อีกหลายปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2) - (6) [23]



และพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต้องมีเปอร์ออกไซด์ (peroxide) อยู่ในระบบตลอดเวลา สำหรับชนิดของเหล็กจะมีการวนเวียนเปลี่ยนรูปกันระหว่าง Fe^{3+} และ Fe^{2+} ขึ้นอยู่กับขั้นตอนของปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาถูกโซจะหยุดลงเมื่อ $\bullet\text{OH}$ ทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} จนหมดไป เมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการ เฟนตันออกซิเดชันจะสามารถลดค่า COD ความขุ่นและค่าสีในน้ำเสียได้ดี

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน เพื่อบำบัด COD ความขุ่น และสีย้อมในน้ำเสียดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษามีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นค่าออกแบบในการก่อสร้างปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดเพื่อพัฒนาไปสู่การนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์ อันจะส่งผลดีต่อทางโรงงาน ลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมาย และระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมตามมาตรฐานสากล ลดข้อร้องเรียนจากภาคประชาชน ซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางการค้าในระดับสากลและยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอันเป็นทรัพยากรต้นทุนหลักที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนสืบไป

2.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ต้องการทราบประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นในน้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน
2. ต้องการทราบปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต และ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย
3. ต้องการทราบราคาต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม ได้แก่ ค่าสารเคมีคือ สารสร้างตะกอน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เฟอร์รัสซัลเฟต และสารปรับพีเอช

2.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียสีย้อม โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH ORP COD ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด หรือ λ_{max} (เครื่อง UV spectrophotometer) ค่าการดูดกลืนแสง ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น
2. ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยทำการทดลองด้วยวิธี jar test สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารส้ม เพอร์คลอไรด์และเฟอร์รัสซัลเฟต โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นในช่วง 1-10 กรัม/ลิตร ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม พิจารณาเลือกจากประสิทธิภาพในการบำบัด COD สี และความขุ่นประกอบกัน
3. ศึกษาอัตราส่วนและปริมาณของ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยใช้ทำการทดลองด้วยวิธี jar test
4. ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อม โดยทดลองด้วยวิธี jar test
5. ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนตันต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัด COD pH และ ORP ประกอบกัน
6. ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตันด้วยวิธี jar test โดยใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิด คือ สารส้ม และโพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ
7. ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน

8. ศึกษาราคาค่าต้นทุนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเสียอม โดยคำนวณตามชนิดและปริมาณการใช้สารเคมีตามสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษา

2.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

สืบเนื่องจาก บริษัท VAS การ์เมนต์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์สิ่งทอและเครื่องใช้สำหรับเครื่องหมยทางการค้าหลายยี่ห้อ เช่น Adidas Nike Reebok เป็นต้น และมีศิษย์เก่าของหลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ได้ติดต่อมาทางคณะฯ เพื่อหาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียเสียอมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนของทางโรงงานเพื่อให้สามารถบำบัดน้ำเสียให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมายสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14001 ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มโอกาสและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางการค้าในระดับสากล เพื่อให้โครงการที่จะศึกษาตรงกับความต้องการแก้ปัญหาของทางโรงงานจึงจำเป็นต้องออกแบบโครงการเพื่อทำการศึกษารายละเอียดอย่างแม่นยำและถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียเสียอมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนของทางโรงงานคือน้ำเสียจากการพิมพ์และการล้างแทนพิมพ์ซิลค์สกรีนซึ่งเกิดขึ้นในปริมาณ 35-40 ลิตร/วัน ลักษณะเบื้องต้นคือมีค่า COD สูง มีคราบไขมันและกลิ่นของตัวทำละลาย ค่าความขุ่นเนื่องจากสารแขวนลอยและสีจากการย้อมการพิมพ์ ซึ่งปัจจุบันทางโรงงานใช้วิธีการบำบัดโดยการผ่านวัสดุชนิดต่างๆ เช่น แกลบเปลือกมุ้งคุด เปลือกไข่ไก่ เป็นต้น แล้วปล่อยลงสู่บ่อรวบรวมน้ำเสียภายในโรงงาน

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะบำบัดน้ำเสียดังกล่าวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ทำได้ไม่ยาก ง่ายต่อการใช้งาน และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์หรือการก่อสร้างเพื่อใช้งานจริง วัสดุอุปกรณ์ราคาไม่แพงหาได้ง่ายทั่วไป กระบวนการโคแอกกูเลชันคือการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น สารส้ม เพอร์ริคคลอไรด์ เพอร์สัลเฟต รวมถึงโพลีอิเล็กโตรไลต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขนาดเล็กให้สามารถรวมกันเป็นตะกอนฟลูค (floc) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนแยกออกจากน้ำใสได้ง่าย สารแขวนลอย ความขุ่น และสีปรากฏส่วนใหญ่จะถูกกำจัดได้ดีในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ยังมีสารออกซิไดซ์ที่เติมเพิ่ม คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารเฟ้นต้น (Fenton's reagent) คือเพอร์ริสไอออน (Fe^{2+}) ที่ได้จากเติมเพอร์ริสซัลเฟต จะได้อนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet OH$) หรือไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงในสภาวะกรด สามารถทำลายโครงสร้างของสีแท้ที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียได้ดีดังสมการที่ (1)



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่อีกหลายปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2) - (6) [23]



และพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต้องมีเปอร์ออกไซด์ (peroxide) อยู่ในระบบตลอดเวลา สำหรับชนิดของเหล็กจะมีการวนเวียนเปลี่ยนรูปกันระหว่าง Fe^{3+} และ Fe^{2+} ขึ้นอยู่กับขั้นตอนของปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาถูกโซ่จะหยุดลงเมื่อ $\bullet\text{OH}$ ทำปฏิกิริยากับ Fe^{2+} จนหมดไป เมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการ เฟนตันออกซิเดชันจะสามารถลดค่า COD ความขุ่นและค่าสีในน้ำเสียได้ดี

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน เพื่อบำบัด COD ความขุ่น และสีย้อมในน้ำเสียดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษามีแนวโน้มที่จะสามารถใช้เป็นค่าออกแบบในการก่อสร้างปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดเพื่อพัฒนาไปสู่การนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์ อันจะส่งผลดีต่อทางกลุ่ม ลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมาย ลดข้อร้องเรียนจากภาคประชาชน ซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางการค้าในระดับสากลและยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอันเป็นทรัพยากรต้นทุนหลักที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนสืบไป

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

S.Khansorhong และ M. Hunsom (2009) ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีและ COD ในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการ electrocoagulation ด้วยวิธีแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นเหล็กจำนวน 6 แผ่น ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดได้แก่ ชนิดของโพลีอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และอัตราการไหลเวียนของน้ำในถังปฏิกรณ์ ผลการศึกษาพบว่า โพลีอิเล็กโทรไลต์ไม่ส่งผลต่อการบำบัดมลสารในน้ำเสีย ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดพบว่า สามารถกำจัดสีและ COD ได้มากกว่า 97 % และ 77 % ตามลำดับ ราคาบำบัดน้ำเสียต่อหน่วยคือ 0.29 เหรียญสหรัฐ/ลบ.ม. จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งสามารถทำนายกลไกการกำจัดสีและ COD ได้เป็นอย่างดี สำหรับปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องจะเข้าสู่สภาวะคงตัวของการบำบัดภายหลัง 2.15 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดสีและ COD สูงกว่า 91% และ 77 % ตามลำดับ น้ำเสียภายหลังการบำบัดมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมายประเทศไทย

A. Dhaoudi, L. Monser และ N. Adhoynm (2009) ศึกษาการใช้กระบวนการ electro-Fenton และ Anodic Oxidation ในการบำบัดสารเป้าหมายคือ Rotenone ซึ่งเป็นสารประกอบในยาฆ่าแมลงที่มีความคงตัวและมีความเป็นพิษสูงในสิ่งแวดล้อม ทำการศึกษาที่ pH 3 พบว่า การย่อยสลายเกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet\text{OH}$) ที่เตรียมได้จากสารประกอบเพอร์สกับ H_2O_2 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด rotenone ด้วยกระบวนการ electro-Fenton (EF) เทียบกับกระบวนการ Anodic Oxidation (AO) ทั้งในกรณีที่มีการเติม H_2O_2 และไม่มีเติม H_2O_2 พบว่ากระบวนการ EF เพียงอย่างเดียวมีความสามารถเพียงพอต่อการกำจัดและย่อยสลาย rotenone และอนุพันธ์ของ rotenone สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือ การเตรียมสารเฟนตันในรูปสารละลายใน acetonitrile ด้วยอัตราส่วน 70:30 pH 3 ความเข้มข้นของเพอร์สไอออนที่เหมาะสมคือ 0.2 mmol/L ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคือ 100 mA ทำปฏิกิริยานาน 30 นาที เพียงพอต่อการบำบัดสารละลาย rotenone เข้มข้น 200 mg/L ปริมาณ 100 mL ได้ สามารถลดค่า COD ลงได้ประมาณ 96 % ภายหลังทำปฏิกิริยานาน 8 ชั่วโมง

J.B. Parsa, M. Rezaei และ A.R. Soleymani (2009) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อม direct blue71, azo dye(DB71) ทำการศึกษาโดยใช้ปฏิกรณ์สองแบบ แบบแรกคือปฏิกรณ์ขนาดเล็ก 450 มล.โดยใช้แผ่นแพลตทินัมขนาด 2 ซม.*2 ซม. ติดตั้งเป็นขั้วแอโนดไว้บริเวณกึ่งกลางขนาบข้างสอง

ด้านด้วยแผ่นเหล็กขนาด 2 ซม.*8 ซม. ติดตั้งห่างกัน 2 ซม.เป็นขั้วแคโทด อีกแบบหนึ่งคือปฏิกรณ์ขนาดนำร่อง 9 ล.ใช้แผ่นสแตนเลสสตีล ขนาด 3 ซม.* 23 ซม. จำนวน 2 แผ่น ติดตั้งเป็นขั้วแอโนดและแคโทดห่างกัน 3 ซม. ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆได้แก่ ชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ ค่าความต่างศักย์ ค่าพีเอชเริ่มต้น อัตราการกำจัดสี energy consumption และ current efficiency ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดพบว่า อิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมคือ น้ำเกลือเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร (NaCl) ความต่างศักย์ 15 โวลต์ สำหรับปฏิกรณ์ขนาดเล็กพบว่าอัตราการบำบัดสียอมเกิดขึ้นเร็วมากโดยสามารถกำจัดสียอมและย่อยทำลายโครงสร้างได้ภายใน 90 และ 120 นาทีตามลำดับ และให้ผลการศึกษาคลายคลึงกันสำหรับปฏิกรณ์ขนาดนำร่อง การทำนายปฏิกิริยาสำหรับการกำจัด COD โดยใช้ pseudo-first-order kinetic ให้ผลที่แม่นยำในทุกค่าความต่างศักย์ (ยกเว้น 20 โวลต์) ซึ่งให้เห็นว่ากลไกการบำบัดมีความเกี่ยวข้องกับ indirect oxidation pathway

Z.P.Xing และ D.Z.Sun (2009) ศึกษาการใช้กระบวนการ coagulation โดยใช้ polyferric sulfate (PFS) ร่วมกับสารเพนตัน ตามด้วยการตกตะกอน สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากเป็นน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตยาที่มีสารยับยั้งและสารปฏิชีวนะ พบว่าสามารถบำบัดสีและ COD ในน้ำเสียได้ถึง 66.6 % และ 72.4 % ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดคือ การใช้ PFS 200 mg/L เป็นสารสร้างตะกอน ณ pH 4.0 สำหรับกระบวนการเพนตัน ปริมาณ H₂O₂ และ FeSO₄ ที่เหมาะสมคือ 150 mg/L และ 120 mg/L ตามลำดับ โดยใช้เวลาการทำปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง และต้องควบคุมให้ pH ของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าประมาณ 7 จึงจะสามารถกำจัดตะกอนที่เหลืออกได้ด้วยวิธีการตกตะกอน ประสิทธิภาพทั้งหมดในการบำบัดสี COD และ SS คิดเป็น 97.3% 96.9 % และ 86.7 % ตามลำดับ

W.L.Chou, C.T.Wang และ S.Y.Chang (2009) ศึกษาการบำบัด COD และความขุ่นของน้ำเสีย real oxide chemical/mechanical polishing (oxide-CMP) ด้วยกระบวนการ electrocoagulation โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วแคโทดและแผ่นเหล็กเป็นขั้วแอโนด รวมถึงศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกระบวนการได้แก่ ประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด COD และความขุ่น zeta potential ของตะกอนซิลิกา และขนาดของอนุภาคของตะกอนซิลิกา รวมถึง specific energy consumption พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้เกลือเข้มข้น 200 mg/L NaCl เป็นอิเล็กโทรไลต์ ใช้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 12 นาที ภายใต้สภาวะดังกล่าว อนุภาคของซิลิกาจะถูกทำลายเสถียรภาพ และสามารถรวมตัวตกตะกอนได้ดีให้พลังงานในการทำปฏิกิริยาต่ำ สามารถบำบัด COD และความขุ่นได้ 90 % และ 98% ตามลำดับ และพบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการคือ ค่าความต่างศักย์ และความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์

B.Gozmen, B.Fayan และคณะ (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดสียอมกลุ่ม anthraquinone, reactive blue4 (RB4) ด้วยกระบวนการ AOP หลายประเภท ได้แก่ กระบวนการ Wetair oxidation (WAO), wet peroxide oxidation (WPO), photocatalytic oxidation และวิธี electro-fenton พบว่าทุกกระบวนการสามารถออกซิไดซ์ สียอม RB4 ได้โดยสามารถลดองค์ประกอบของ TOC และความเข้มข้นของสียอมลงได้ วิธีที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสียอม RB4 ได้ดีที่สุดคือ wet peroxide oxidation (WPO) อย่างไรก็ตามทุกกระบวนการที่กล่าวมาสามารถบำบัด TOC ได้มากกว่า 75 % ภายหลังจากการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที

นพดล คงศรีประเสริฐ และจรงค์ ผลประเสริฐ (2540) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical precipitation, ECP) ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีความเข้มข้นของโลหะหนัก (โครเมียม) และสี

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (Cr^{6+}) น้อยกว่า 0.5 มก./ล. โดยที่ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นอยู่ในช่วง 570-2100 มก./ล. และมีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ คือ การผ่านกระแสไฟฟ้า(DC) เท่ากับ 1.0-1.5 แอมแปร์ เวลาการกักเก็บมากกว่าหรือเท่ากับ 15 นาทีและอุณหภูมิประมาณ 24-25 องศาเซลเซียส และECP สามารถกำจัดสี (Color) และสารอินทรีย์ในรูปของ TCOD เริ่มต้น เท่ากับ 15200 ADMI และ 3500 มก./ล.ตามลำดับพบว่าระบบ ECP สามารถกำจัดสีได้ประมาณร้อยละ 90-96 และกำจัด TCOD เท่ากับร้อยละ 61 ที่มีสถานะเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม คือ การใช้กระแสไฟฟ้า (DC) เท่ากับ 15 แอมแปร์ เวลาการกักเก็บมากกว่า หรือเท่ากับ 45 นาที และอุณหภูมิประมาณ 24-45 องศาเซลเซียส และพบว่ากลไกที่สำคัญในการกักโลหะหนักและสีคือ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) และการเกิดปฏิกิริยา Reduction ของโลหะหนัก

2.6 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 9 ขั้นตอนดังนี้

- 1 ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน
- 2 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน
- 3 ศึกษาผลของปริมาณการใช้สารเพนตันต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน
- 4 ศึกษาผลของค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียในการใช้สารเพนตันต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน
- 5 ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเพนตันต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน
- 6 ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเพนตัน
- 7 ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสถานะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน
- 8 สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน
- 9 ศึกษาราคาต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียดี้อยู่จากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน

วิธีดำเนินการวิจัย ภายหลังจากค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูล เก็บข้อมูลภาคสนาม เตรียมสารเคมี และอุปกรณ์ เครื่องที่ใช้ในการทดลอง จัดเตรียมปฏิกรณ์ มีวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

1. **ศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน** โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH ORP COD ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด หรือ λ_{max} (เครื่อง UV spectrophotometer) ค่าการดูดกลืนแสง ของแข็งแขวนลอย และความขุ่น

2. **ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน** โดยทำการทดลองด้วยวิธี jar test ทดลองใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารส้ม เพอริกคลอไรด์และเพอร์ซัลเฟต โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นในช่วง 1-10 กรัม/ลิตร โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

2.1 ตวงน้ำเสียปริมาณ 250 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตรจำนวน 10 ใบ ตั้งบนเครื่อง Jar test

2.2 เติมสารละลายสารส้ม (10 % alum) ลงในบีกเกอร์แต่ละใบเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายสารส้มในน้ำเสีย คือ 1, 2 , 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 g/L ตามลำดับ

2.3 เปิดเครื่อง Jar test กวนเร็ว 120 รอบ/นาที นาน 3 นาที

2.4 กวนช้า 60 รอบ/นาที นาน 5 นาที

2.5 กวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 5 นาที

2.6 กวนช้า 15 รอบ/นาที นาน 5 นาที

2.7 ปิดเครื่อง Jar test ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 60 นาที

2.8 เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบนในแต่ละบีกเกอร์ (ที่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำประมาณ 1 ซม.) ปริมาณ 50 มล. นำไปวัดค่า COD ค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่น

2.9 ทำการทดลองจากข้อ 2.1-2.8 ซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนสารสร้างตะกอนในข้อ 2.2 จากสารส้มเป็นเพอร์ซัลเฟตและเพอริกคลอไรด์ตามลำดับ

2.10 พล็อตกราฟระหว่างค่า COD ค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่น เทียบกับปริมาณการเติมสารสร้างตะกอน แต่ละชนิด พร้อมทั้งระบุชนิดของสารสร้างตะกอนและปริมาณการใช้สารสร้างตะกอนที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัด COD สีและความขุ่นประกอบกัน

3. **ศึกษาผลของปริมาณการใช้สารเฟนตัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน** โดยศึกษา

3.1 ศึกษาอัตราส่วน (mol / mol) ที่เหมาะสมของการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ตวงน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ปริมาณ 250 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. จำนวน 6 ใบ ตั้งบนเครื่อง Jar test

3.1.2 เติมสารละลาย $FeSO_4$ ลงในบีกเกอร์แต่ละใบเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในน้ำเสียมีค่า 0.5 mmol/L

3.1.3 เติมสารละลาย H_2O_2 ลงในบีกเกอร์แต่ละใบเพื่อให้ได้อัตราส่วน $n(H_2O_2) / n(Fe^{2+})$ ในหน่วย mol / mol มีค่า 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, และ 2.0 ตามลำดับ

3.1.4 เปิดเครื่อง Jar test กวนเร็ว 75 รอบ/นาที นาน 2 ชั่วโมง

3.1.5 เติมสารละลาย NaOH เพื่อปรับ pH ในแต่ละบีกเกอร์มีค่าประมาณ 8

3.1.6 กวนเร็ว 75 รอบ/นาที ต่อเนื่องนาน 1 นาที

3.1.7 กวนช้า 15 รอบ/นาทีนาน 10 นาที

- 3.1.8 ปิดเครื่อง Jar test ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 60 นาที
- 3.1.9 เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบน (ที่ระดับต่ำกว่าผิวหน้าประมาณ 1 ซม.) ปริมาณ 50 มล. นำไปวัดค่า COD และค่าการดูดกลืนแสง
- 3.1.10 ทำการทดลองจากข้อ 3.1.1 - 3.1.9 อีกครั้งโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในข้อ 3.1.2 จาก 0.5 mmol/L เป็น 1 และ 3 mmol/L ตามลำดับ
- 3.1.11 พล็อตกราฟระหว่างค่า COD และค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับอัตราส่วน $n(H_2O_2) / n(Fe^{2+})$ พร้อมทั้งระบุอัตราส่วน (mol/mol) ของปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม
- 3.2 ศึกษาปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้
- 3.2.1 ตวงน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ปริมาณ 250 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. จำนวน 10 ใบ ตั้งบนเครื่อง Jar test
- 3.2.2 เติมสารละลาย $FeSO_4$ ลงในบีกเกอร์แต่ละใบเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในน้ำเสียมีค่า 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4, 7.2, และ 8.0 mmol/L ตามลำดับ
- 3.2.3 เติม H_2O_2 ตามอัตราส่วน (mol/mol) ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3.1 ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ
- 3.2.4 เปิดเครื่อง Jar test กวนเร็ว 75 รอบ/นาที นาน 2 ชั่วโมง
- 3.2.5 เติมสารละลาย NaOH ปรับ pH ในแต่ละบีกเกอร์ให้มีค่าประมาณ 8
- 3.2.6 กวนเร็ว 75 รอบ/นาที ต่อเนื่องนาน 1 นาที
- 3.2.7 กวนช้า 15 รอบ/นาที นาน 10 นาที
- 3.2.8 ปิดเครื่อง Jar test ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 60 นาที
- 3.2.9 เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบน (ที่ระดับต่ำกว่าผิวหน้าประมาณ 1 ซม.) ปริมาณ 50 มล. นำไปวัดค่า COD ค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่น
- 3.2.10 พล็อตกราฟระหว่างค่า COD ค่าการดูดกลืนแสงและความขุ่นเทียบกับการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} พร้อมทั้งระบุปริมาณการใช้ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นประกอบกัน
- 4. ศึกษาผลของค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียในการใช้สารเฟนตัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน โดยศึกษาค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียในช่วง 2-9 ขั้นตอนดังนี้**
- 4.1 ตวงน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ปริมาณ 250 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. จำนวน 8 ใบ ตั้งบนเครื่อง Jar test กวนเร็ว 75 รอบ/นาที
- 4.2 ปรับค่า pH ของน้ำเสียในบีกเกอร์แต่ละใบให้มีค่า 2 3 4 5 6 7 8 และ 9 ตามลำดับด้วย H_2SO_4 และ NaOH
- 4.3 เติม H_2O_2 และ Fe^{2+} ตามอัตราส่วนและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ
- 4.4 เปิดเครื่อง Jar test กวนเร็ว 75 รอบ/นาที นาน 2 ชั่วโมง
- 4.5 เติมสารละลาย NaOH ปรับ pH ในแต่ละบีกเกอร์ให้มีค่าประมาณ 8
- 4.6 กวนเร็ว 75 รอบ/นาที ต่อเนื่องนาน 1 นาที

4.7 กวนช้า 15 รอบ/นาที่นาน 10 นาที

4.8 ปิดเครื่อง Jar test ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 60 นาที

4.9 เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบน (ที่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำประมาณ 1 ซม.) ปริมาณ 50 มล. นำไปวัดค่า COD ค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่น

4.10 พล็อตกราฟระหว่างค่า COD ค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่นเทียบกับค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย พร้อมทั้งระบุค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นประกอบกัน

5. ศึกษาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเฟนต์ัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน ขั้นตอนดังนี้

5.1 ตวงน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ตั้งบนเครื่องกวนแม่เหล็กและเปิดเครื่องกวนแม่เหล็ก กวนเร็วต่อเนื่อง

5.2 ติดตั้ง pH meter และ ORP meter เพื่ออ่านค่า pH และ ORP ในน้ำเสีย

5.3 ปรับค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียให้ได้ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4

5.4 บันทึกค่า pH และ ORP เริ่มต้นของน้ำเสีย

5.5 เติม Fe^{2+} และ H_2O_2 ตามอัตราส่วนและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 ลงในน้ำเสีย

5.6 เปิดเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายหลังจากกวนทำปฏิกิริยานาน 5 , 10 , 15, 20, 30 ,45, 60, 90, และ 120 นาที ตามลำดับใส่ในหลอดทดลอง พร้อมทั้งบันทึกค่า pH และ ORP

5.7 ปรับ pH ในแต่ละหลอดให้มีค่าประมาณ pH 8 ด้วย NaOH เพื่อหยุดปฏิกิริยาเฟนต์ัน

5.8 นำหลอดทดลองไปปั่นเหวี่ยงที่ 3,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบนไปทดสอบหาค่า COD

5.9 พล็อตกราฟระหว่าง COD ค่า pH และ ORP เทียบกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา เพื่อระบุระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัด COD ค่า pH และ ORP ประกอบกัน

6. ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนต์ัน ด้วยวิธี jar test เนื่องจากภายหลังจากการบำบัดที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน อาจเกิดอนุภาคเฟนต์ันที่เป็นสารประกอบเหล็กส่งผลให้เกิดตะกอนหรือน้ำมีสีเหลืองจึงจำเป็นต้องกำจัดอนุภาคดังกล่าวออกโดย

6.1 ตวงน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 ปริมาณ 250 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. จำนวน 11 ใบ ตั้งบนเครื่อง Jar test

6.2 ปรับค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียให้ได้ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4

6.3 เติม Fe^{2+} และ H_2O_2 ตามอัตราส่วนและปริมาณการใช้ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ

6.4 เปิดเครื่อง Jar test กวนเร็ว 75 รอบ/นาที นานตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 5

6.5 เติมสารละลาย NaOH เพื่อปรับ pH ในแต่ละบีกเกอร์มีค่าประมาณ 8

6.6 เติมสารละลายสารส้มลงในบีกเกอร์แต่ละใบเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 mg/L

6.7 กวนเร็ว 75 รอบ/นาที ต่อเนื่องนาน 1 นาที

6.8 กวนช้า 15 รอบ/นาที นาน 10 นาที

6.9 ปิดเครื่อง Jar test ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนนาน 20 นาที

6.10 เก็บตัวอย่างน้ำใสส่วนบน (ที่ระดับต่ำกว่าผิวน้ำประมาณ 1 ซม.) ปริมาณ 50 มล. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและความขุ่น

6.11 ทำการทดลองจากข้อ 6.1-6.11 อีกครั้งโดยเปลี่ยนสารสร้างตะกอนในข้อ 6.7 จากสารส้มเป็นสารละลายโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบในน้ำเสียคือ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 mg/L ตามลำดับ

6.12 พล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความขุ่น เทียบกับปริมาณการเติมสารสร้างตะกอน แต่ละชนิด พร้อมทั้งระบุชนิดของสารสร้างตะกอนและปริมาณการใช้สารสร้างตะกอนที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นประกอบกัน

7. ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสถานะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH ORP COD ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด หรือ λ_{max} ค่าการดูดกลืนแสง ของแข็งแขวนลอย และความขุ่น ทำการเปรียบเทียบลักษณะของน้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสถานะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอนได้แก่ น้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน น้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟ้นตันออกซิเดชัน และประสิทธิภาพรวมการบำบัดของทั้งสองกระบวนการ

8. สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นตันออกซิเดชัน โดยสรุปขั้นตอนการปฏิบัติการในการบำบัดน้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นตันออกซิเดชันตามสถานะที่เหมาะสมจากผลการศึกษา

9. ศึกษาาราคาต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียี่ยมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นตันออกซิเดชัน โดยศึกษาราคาต้นทุนค่าสารเคมีได้แก่ สารสร้างตะกอนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เฟอร์รัสซัลเฟต และสารปรับพีเอช ตามสถานะที่เหมาะสมจากผลการศึกษาเพื่อระบุต้นทุนค่าสารเคมีต่อหน่วยการบำบัด

2.7 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

2.7.1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียี่ยมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน

ทำการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูล เก็บข้อมูลภาคสนาม เตรียมสารเคมี และอุปกรณ์ เครื่องที่ใช้ในการทดลอง จัดเตรียมปฏิกรณ์ และดำเนินการวิจัย และศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียี่ยมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH ORP COD ค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด หรือ λ_{max} (เครื่อง UV spectrophotometer) ค่าการ

ดูดกลืนแสง ของแข็งแขวนลอย และความขุ่น ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน

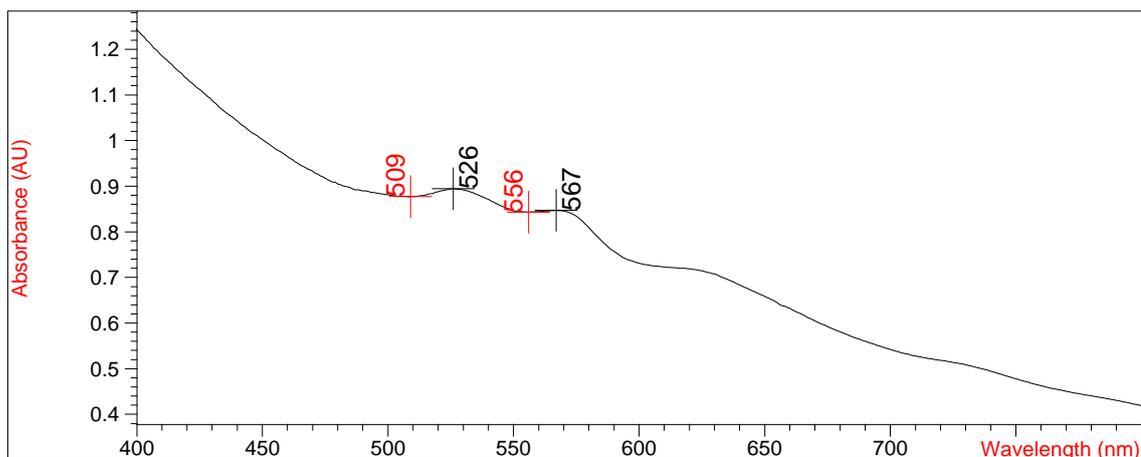
พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้
pH	8.0
ORP	-14.4 mV
COD	3,776 mg/L
ค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด	526 nm
ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ($\lambda_{\max} = 526 \text{ nm}$)	1.012*
ค่าของแข็งแขวนลอย	282 mg/L
ความขุ่น	1,000 NTU*

หมายเหตุ *เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า

จากตารางที่ 2-1 การศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนพบว่า น้ำเสียตัวอย่างมีลักษณะทางกายภาพคือเป็นของเหลวสีม่วงเข้ม ดังภาพที่ 2-1 มีตะกอนและความขุ่นของเศษผ้าและสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน มีกลิ่นฉุนของสารตัวทำละลายซึ่งจากการตรวจวัดพบว่า มีค่าซีโอดี (COD) เท่ากับ 3,776 mg/L ค่าความขุ่นเท่ากับ 1,000 NTU (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า) ค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด คือ λ_{\max} เท่ากับ 526 nm แสดงดังภาพที่ 2-2 และมีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 1.012 (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า) ค่าพีเอชมีความเป็นกลางถึงด่างอ่อน (pH 8) ค่าโออาร์พี (ORP) เท่ากับ -14.4 mV และค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าเท่ากับ 282 mg/L



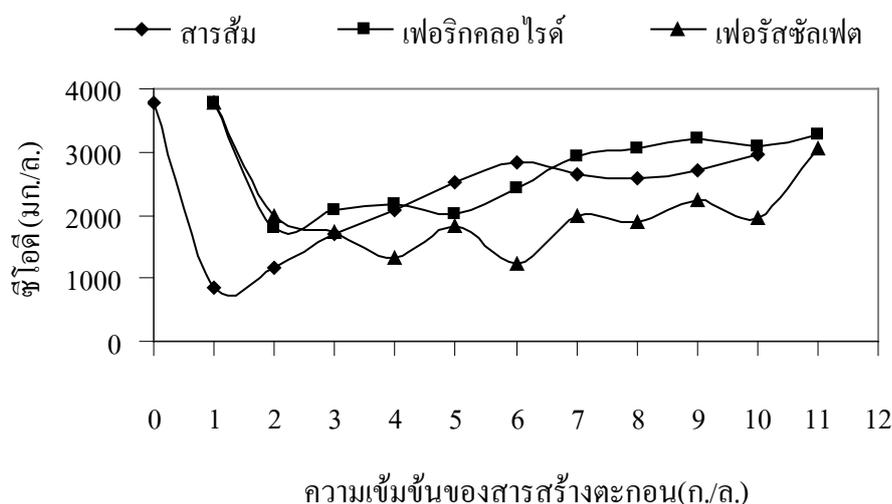
ภาพที่ 2-1 ลักษณะของน้ำเสียจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน



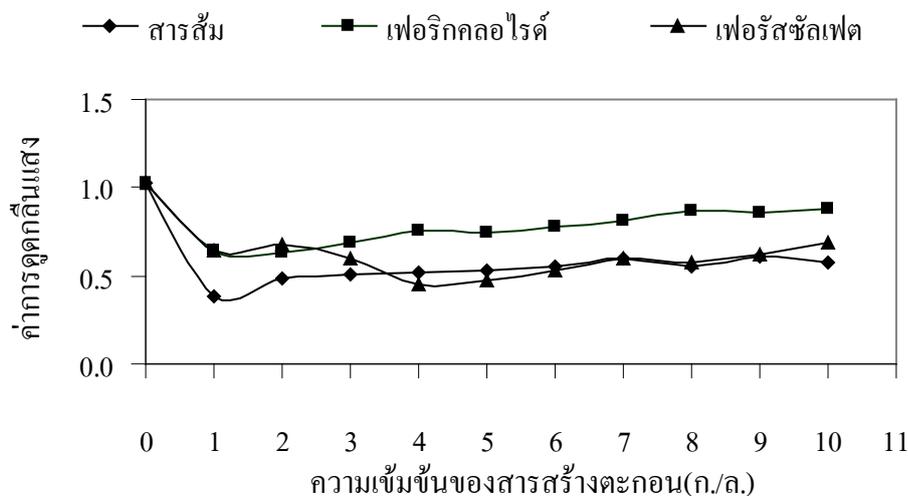
ภาพที่ 2-2 ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนเริ่มต้น
วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)

2.7.2 ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม จากการพิมพ์ซิลค์สกรีน

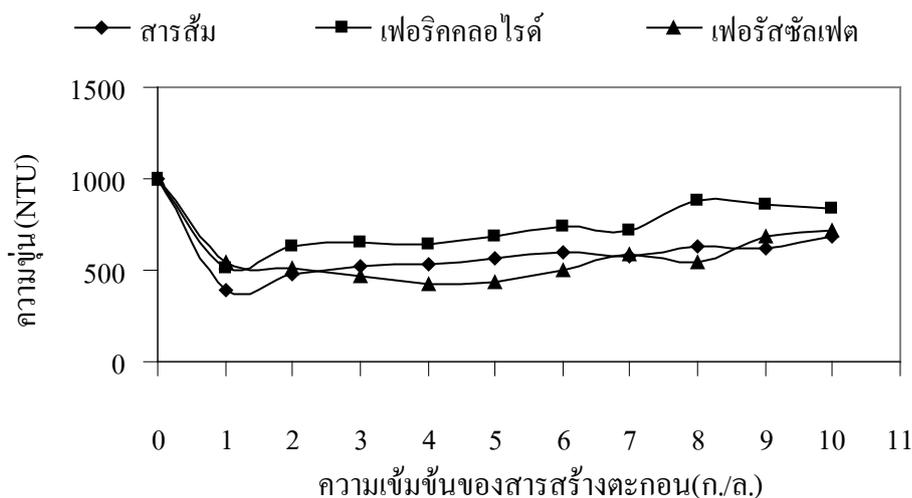
ศึกษาชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนโดยใช้สารสร้างตะกอน (coagulant) 3 ชนิดคือสารส้ม (เตรียมจาก $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เฟอริกคลอไรด์ (เตรียมจาก $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และเฟอรัสซัลเฟต (เตรียมจาก $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) สารสร้างตะกอนทั้งสามชนิดเตรียมเป็นสารละลายสต็อกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 % (100 g/L) ทำการทดลองด้วยวิธี jar test โดยใช้ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดในปริมาณ 1-10 g/L ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2-3 – 2-5



ภาพที่ 2-3 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



ภาพที่ 2-4 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี



ภาพที่ 2-5 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

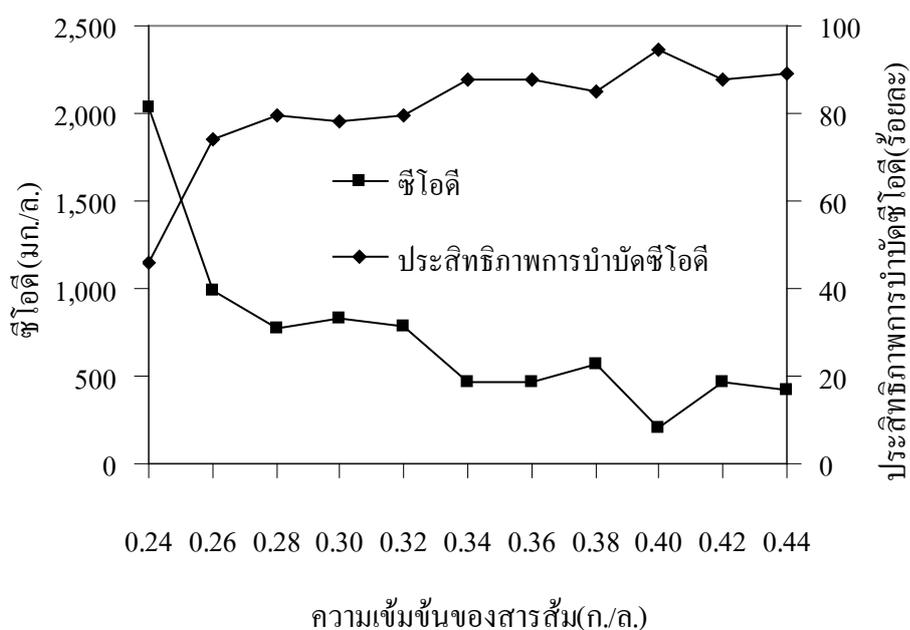
น้ำเสียที่ย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนมีลักษณะเบื้องต้นดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7.1 คือมีค่าซีโอดี 3,776 mg/L มีค่าการดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่น 526 nm (เจือจาง 5 เท่า) คือ 1.012 มีค่าความขุ่น (เจือจาง 5 เท่า) คือ 1,000 NTU เมื่อพิจารณาการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอนสามชนิดในช่วงความเข้มข้น 1-10 g/L พบว่า

การบำบัดซีโอดีจากภาพที่ 2-3 จะเห็นได้ว่าการใช้สารส้มปริมาณ 1 g/L สามารถลดค่าซีโอดีลงได้ต่ำสุดเหลือ 857 mg/L จากนั้นปริมาณการใช้สารส้มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับการใช้เพอริกคลอไรด์ปริมาณ 1 g/L สามารถลดค่าซีโอดีลงได้ต่ำสุดเหลือ 1,811 mg/L จากนั้นปริมาณการใช้เพอริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนการใช้เพอร์สซัลเฟตสามารถลดซีโอดีลงได้ต่ำสุดในปริมาณการใช้ 5 g/L โดยสามารถลดซีโอดีลงได้เหลือ 1,214 mg/L จากนั้นปริมาณการใช้เพอร์สซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

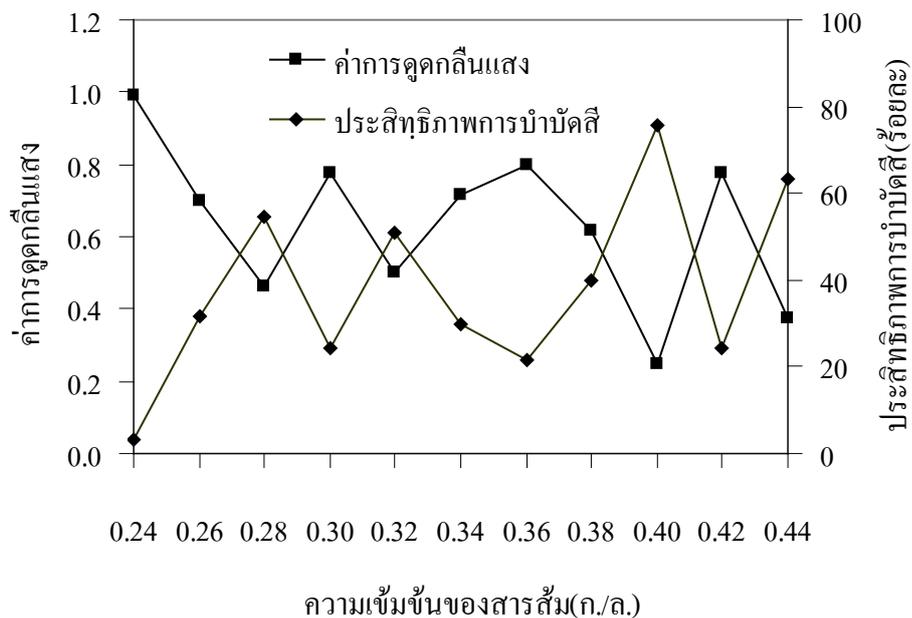
การบำบัดสีซึ่งพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงในภาพที่ 2-4 พบว่าการใช้สารส้มปริมาณ 1 g/L สามารถลดค่าการดูดกลืนแสงลงได้ต่ำสุดเหลือ 0.637 จากนั้นปริมาณการใช้สารส้มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ปริมาณ 2 g/L สามารถลดค่าการดูดกลืนแสงลงได้ต่ำสุดเหลือ 0.813 จากนั้นปริมาณการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตสามารถลดค่าการดูดกลืนแสงลงได้ต่ำสุดในปริมาณการใช้ 4 g/L โดยสามารถลดค่าการดูดกลืนแสงลงได้เหลือ 0.702 จากนั้นปริมาณการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

การบำบัดความขุ่นจากภาพที่ 2-5 พบว่าการใช้สารส้มปริมาณ 1 g/L สามารถลดค่าความขุ่นลงได้ต่ำสุดเหลือ 392 NTU จากนั้นปริมาณการใช้สารส้มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ปริมาณ 1 g/L สามารถลดค่าความขุ่นลงได้ต่ำสุดเหลือ 512 NTU จากนั้นปริมาณการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตสามารถลดค่าความขุ่นลงได้ต่ำสุดในปริมาณการใช้ 4 g/L โดยสามารถลดค่าความขุ่นลงได้เหลือ 421 NTU จากนั้นปริมาณการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

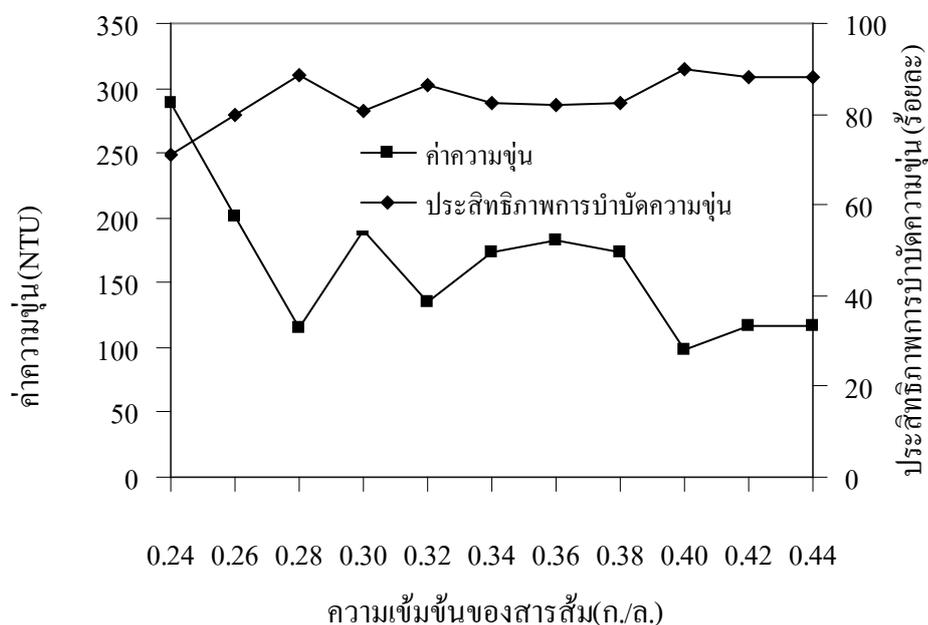
การบำบัดน้ำเสียสีขุ่นจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอนสามชนิด เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี สีและความขุ่นประกอบกันพบว่าการใช้สารส้มมีแนวโน้มในการให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าเฟอร์ริกคลอไรด์และเฟอร์รัสซัลเฟต ดังนั้นจากการทดลองในขั้นตอนนี้จะจึงพิจารณาเลือกชนิดของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมคือสารส้ม เพื่อทำการทดลองหาปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมโดยละเอียดในลำดับต่อไป โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนแรกแต่ใช้สารส้มในปริมาณไม่เกิน 1 g/L ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2-6 - 2-8



ภาพที่ 2-6 ผลของปริมาณสารส้มต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี



ภาพที่ 2-7 ผลของปริมาณสารสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี



ภาพที่ 2-8 ผลของปริมาณสารสีต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

จากผลการทดลองดังภาพที่ 2-6 – 2-8 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นในน้ำเสียมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นมากในช่วงแรกที่มีการเติมสารสีปริมาณ 0.24-0.28 g/L จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าแกว่งตัวเล็กน้อยในช่วงที่มีการเติมสารสีปริมาณ 0.28-0.44 g/L อาจกล่าวได้ว่า COD สี และความขุ่นในน้ำ

เสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารแขวนลอยที่มีลักษณะเป็นตะกอนความขุ่นและคอลลอยด์ขนาดเล็กซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเป็นลบ ตะกอนเหล่านี้จะถูกทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ด้วยไอออนของ Al^{3+} จากการเติมสารส้ม ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นตะกอน floc ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีตะกอนปริมาณมาก (Sweep floc) ที่เกิดจาก Al^{3+} รวมตัวกับ OH^- ในน้ำเสียกลายเป็น $Al(OH)_3 (s)$ ที่สามารถดูดติดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ COD สี และความขุ่น สามารถถูกกำจัดและตกตะกอนแยกออกจากน้ำใสได้ แต่ถ้าหากเติมสารส้มมากเกินไปจะส่งผลเสียต่อการบำบัดกล่าวคือนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีแล้ว ยังทำให้ตะกอนคอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพใหม่อีกครั้ง (Restabilization) โดยมีศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเป็นบวกทำให้ตะกอนคอลลอยด์ไม่สามารถรวมตะกอนเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ซึ่งยากต่อการตกตะกอนแยกออกจากน้ำส่วนใส

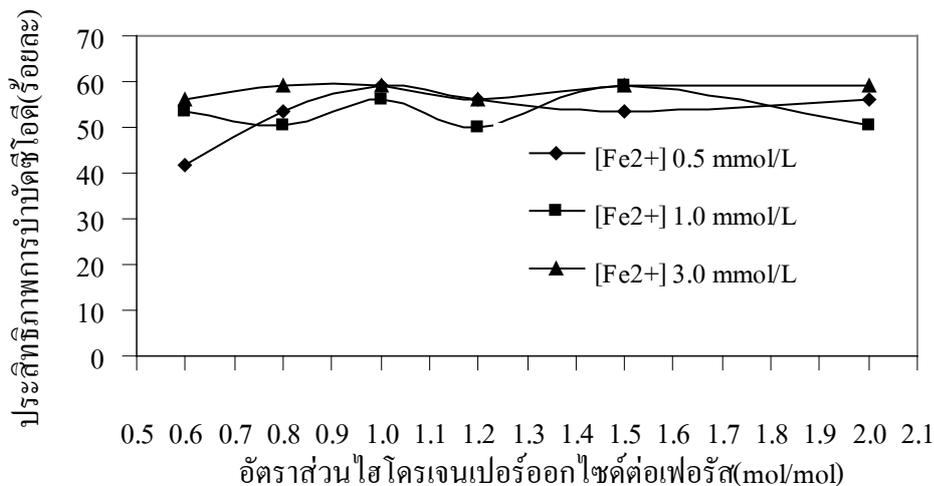
ดังนั้นจากการทดลองในขั้นตอนนี้จึงพิจารณาเลือกปริมาณสารส้มที่เหมาะสมคือ 0.4 g/L สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยสามารถบำบัด COD สี และความขุ่น คิดเป็นร้อยละ 94.49, 75.51 และ 90.1 ตามลำดับ โดยมี COD ลดลงเหลือ 208 mg/L ค่าการดูดกลืนแสง (เจือจาง 5 เท่า) ลดลงเหลือ 0.2 5 และความขุ่น (เจือจาง 5 เท่า) ลดลงเหลือ 99 NTU

จากนั้นทำการเตรียมน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม คือ 0.4 g/L ให้ได้ปริมาตรรวมประมาณ 50 ลิตร เพื่อเตรียมสำหรับการศึกษการบำบัดด้วยวิธีการเฟนต์ันออกซิเดชันในลำดับต่อไป โดยจากการศึกษาน้ำเสียรวมที่เตรียมไว้ พบว่ามีลักษณะเบื้องต้นคือ มีค่า pH 5.25 COD 351 mg/L ค่าการดูดกลืนแสง ณ $\lambda_{526 \text{ nm}}$ (เจือจาง 5 เท่า) คือ 0.216 และค่าความขุ่น (เจือจาง 5 เท่า) 98 NTU และจะใช้พารามิเตอร์ที่มีค่าดังกล่าว เป็นค่าเริ่มต้นในการคิดประสิทธิภาพการบำบัดสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป

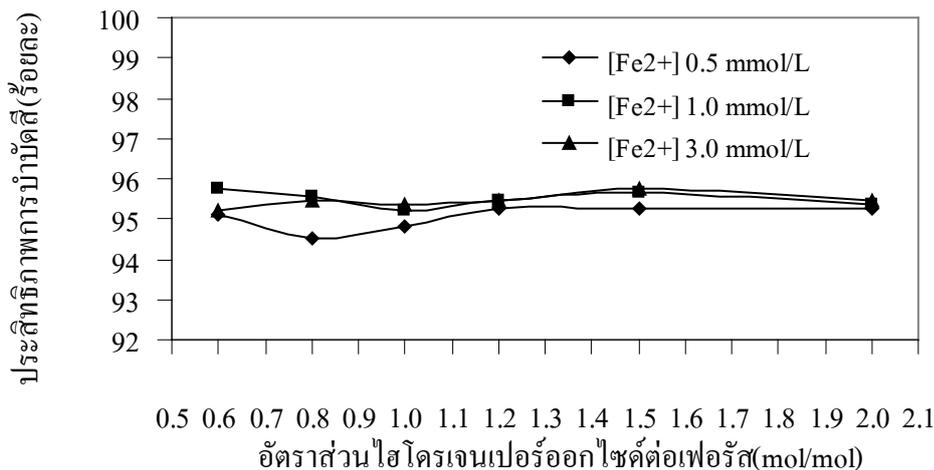
2.7.3 ศึกษาปริมาณการใช้สารเฟนต์ัน (Fenton reagent) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน โดยศึกษา

2.7.3.1 อัตราส่วน (mol / mol) ที่เหมาะสมของการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+}

นำตัวอย่างน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจาก หัวข้อ 2.7.2 คือ 0.4 g/L จากนั้นทำการทดลองหาอัตราส่วน (mol/mol) ที่เหมาะสมในการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2-9 – 2-10

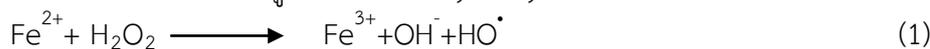


ภาพที่ 2-9 ผลของอัตราส่วนของ Fe²⁺/H₂O₂ (mol/mol) ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

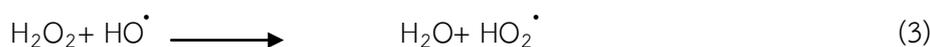
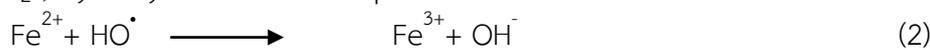


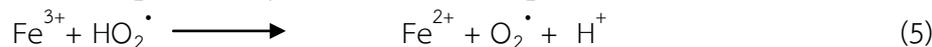
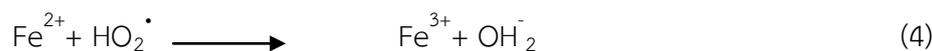
ภาพที่ 2-10 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดต่ออัตราส่วนของ H₂O₂ / Fe²⁺ (mol/mol)

จากผลการทดลองเติม Fe²⁺ ในช่วงความเข้มข้น 0.5 – 3.0 mmol/L และเติม H₂O₂ โดยให้มีอัตราส่วนของ H₂O₂ / Fe²⁺ ในช่วง 0.6 – 2.0 mol/mol พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และสี มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยในทางทฤษฎี Fe²⁺ 1 mol จะทำปฏิกิริยากับ H₂O₂ 1 mol เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมากเรียกว่า Hydroxyl radical (OH•) 1 mol ดังสมการ



และ Hydroxyl radical สามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ Fe²⁺ หรือ Fe³⁺ ได้อนุภาคที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารชนิดอื่นและสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ โดยมีความเกี่ยวข้องกับ Species ของ Fe²⁺, Fe³⁺, H₂O₂, Hydroxyl radical และ Superoxide ดังนี้





และหากในน้ำเสียมีสารอินทรีย์ (Organic Substance, RH) จะสามารถทำปฏิกิริยากับ Hydroxyl radical เกิดเป็นอนุภาค radical ชนิดใหม่ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน ดังนี้



แต่ในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนของ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ในช่วง 0.6 – 2.0 mol/mol (ในทางทฤษฎี คือ 1) ทั้งในกรณีที่มากกว่าและน้อยกว่าในทางทฤษฎี เนื่องจาก Fe^{2+} สามารถทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์ได้เช่นเดียวกับ Al^{3+} (FeSO_4 เป็น Coagulant ชนิดหนึ่ง) และ H_2O_2 เป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่สามารถแตกตัวให้อนุภาค Free reactive oxygen (O^\bullet) ที่มีความสามารถออกซิไดซ์สารต่างๆ ในน้ำเสียได้ดังสมการ

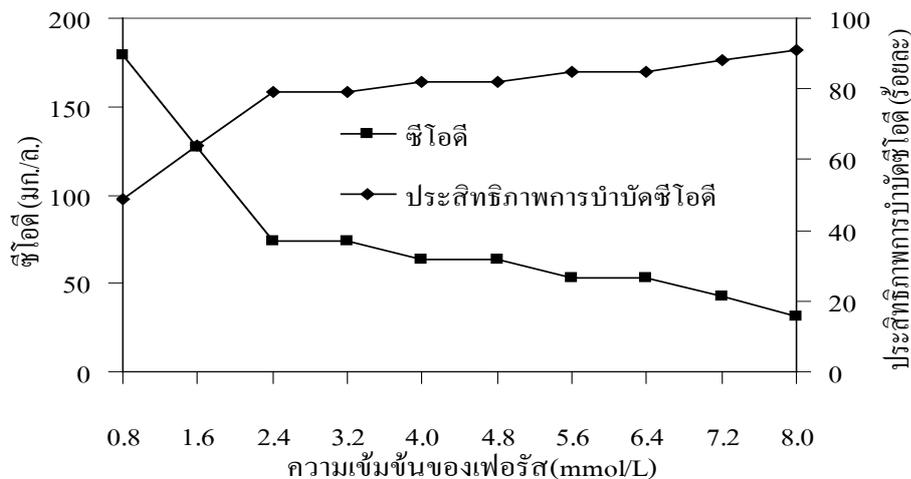


จะเห็นได้ว่าหากต้องการอนุภาค Hydroxyl radical ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก จำเป็นต้องใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด คือ Fe^{2+} และ H_2O_2 ที่เรียกว่าสารเฟนตัน (Fenton's Reagent) ดังนั้นการหาอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ที่เหมาะสมในทางปฏิบัติจึงเป็นเรื่องจำเป็น เนื่องจากทั้ง Fe^{2+} และ H_2O_2 จำเป็นต้องทำปฏิกิริยากับมลสารต่าง ๆ ในน้ำเสีย และต้องเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันเพื่อให้ได้อนุภาค Hydroxyl radical

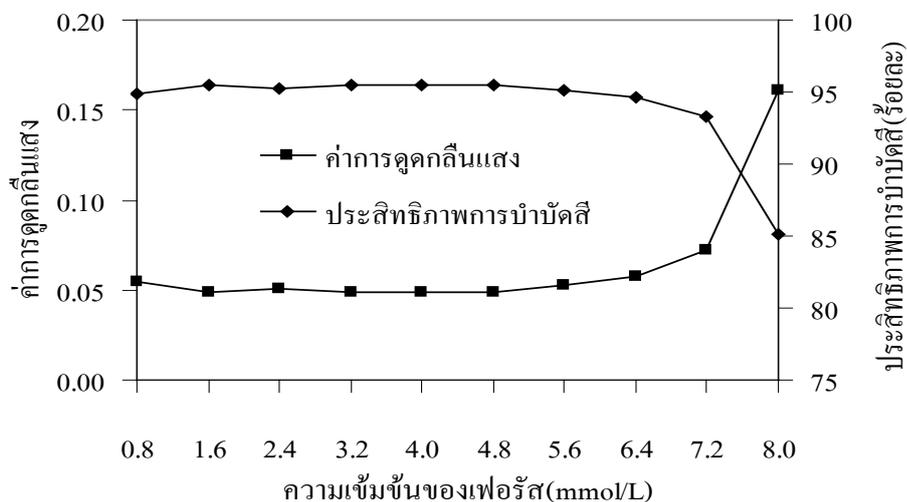
ดังนั้นจากแนวโน้มของผลการทดลองจากภาพที่ 2-9 และ 2-10 จึงพิจารณาเลือกอัตราส่วนการเติม $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ที่เหมาะสม คือ 1.5 mol/mol สำหรับผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัด COD และสีได้ดี เมื่อเติม Fe^{2+} เข้มข้น 0.5 mmol/L, 1.0 mmol/L และ 3.0 mmol/L พบว่ามีค่า COD ในน้ำส่วนใสเหลือเพียง 163.84, 143.36 mg/L และ 143.36 mg/L (จากเดิม COD ของน้ำเสียภายหลังผ่านกระบวนการสร้างตะกอนทางเคมี คือ 351 mg/L) คิดเป็นประสิทธิภาพ การกำจัด COD คือร้อยละ 53.52 , 59.16 และ 59.16 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการบำบัดสีคิดเป็นร้อยละ 95.28, 95.65 และ 95.74 ตามลำดับ

2.7.3.2 ปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม

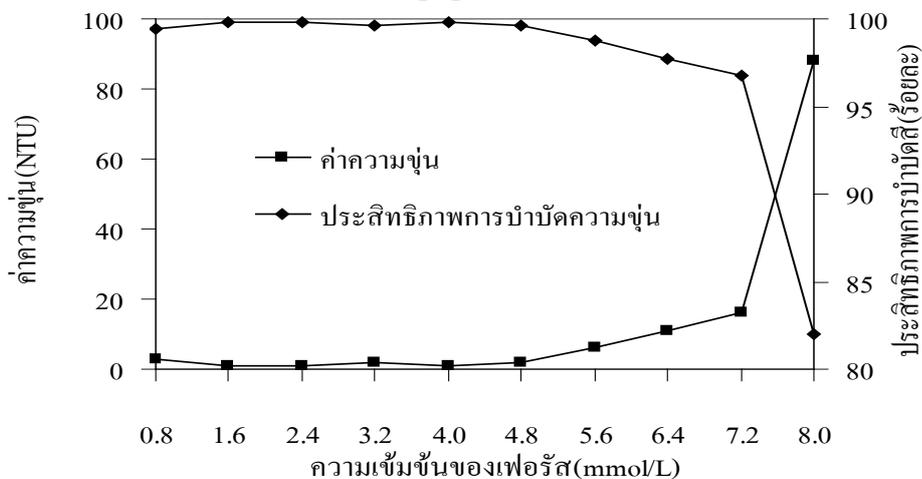
นำตัวอย่างน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 คือ 0.4 g/L และอัตราส่วน (mol / mol) ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 3 คือ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ เท่ากับ 1.5 mol/mol แล้วเพิ่มปริมาณการเติม H_2O_2 และ Fe^{2+} โดยใช้ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ในช่วง 0.8-8 mmol/L (ความเข้มข้นของ H_2O_2 ในช่วง 1.2-12 mmol/L) ได้ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2-11 – 2-13



ภาพที่ 2-11 ประสิทธิภาพการบำบัด COD เทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)



ภาพที่ 2-12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)



ภาพที่ 2-13 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นเทียบกับความเข้มข้นของ Fe^{2+} (อัตราการใช้ H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol)

ผลของปริมาณการใช้สารเฟนตันในอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ เท่ากับ 1.5 mol/mol โดยใช้ปริมาณ Fe^{2+} ความเข้มข้นในช่วง 0.8 – 8.0 mmol/L (H_2O_2 เข้มข้น 1.2-12 mmol/L) จากภาพที่ 2-11 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงตามปริมาณการเติมสารเฟนตัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเร็วในช่วงการเติม Fe^{2+} ความเข้มข้น 0.8 – 2.4 mmol/L ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัด COD คิดเป็นร้อยละ 48.85 ถึง 78.94 ตามลำดับ จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการเติม Fe^{2+} ความเข้มข้น 2.4 – 8.0 mmol/L โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด COD คิดเป็นร้อยละ 78.94 และ 90.97 ตามลำดับ

ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นจากภาพที่ 2-12 และ 2-13 นั้นจะมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่ ในการเติม Fe^{2+} เข้มข้น 0.8 – 6.4 mmol/L โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นคิดเป็นร้อยละ 94.63-95.46 และ 97.76-99.80 ตามลำดับ จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงการเติม Fe^{2+} เข้มข้น 6.4 – 8.0 mmol/L โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นคิดเป็นร้อยละ 85.09-94.63 และ 82.04-97.76 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นที่ลดลงในช่วงดังกล่าว อาจเป็นผลมาจากการเติมสารเฟนตันในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เกิดอนุภาคเฟนตัน และ/หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เป็นตะกอนความขุ่นส่งผลให้น้ำมีสีน้ำตาลแดง สีส้มหรือสีเหลืองชา หรืออาจเป็นผลมาจากตะกอนคอลลอยด์ และอนุภาคของสีถูกออกซิไดซ์กลายเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่ยากต่อการตกตะกอน ส่งผลให้น้ำเสียมีความขุ่น และสีเพิ่มขึ้นจากเดิม

เมื่อพิจารณากลไกการบำบัด COD สี และความขุ่นในน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันพบว่า มีแนวโน้มที่จะเกิดกลไก 4 ประเภท คือ

1. กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์และการรวมตะกอน (Destabilization and coagulation) โดย Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} จากการเติมสารละลาย FeSO_4 ทำหน้าที่ทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ขนาดเล็กที่มีศักย์ไฟฟ้าผิวเป็นลบทำให้สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้มากขึ้น

2. กลไกการเกิดออกซิเดชันจาก Oxidant หลายชนิด เช่น $\text{HO}\cdot$ (จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{2+} และ H_2O_2) $\text{O}\cdot$ (จากการเติม H_2O_2) รวมถึงอนุพันธ์ชนิดอื่นที่สามารถในการออกซิไดซ์สูงสามารถออกซิไดซ์ทำลายโครงสร้างขนาดใหญ่หรือโครงสร้างที่ซับซ้อนของอนุภาคคอลลอยด์ และสีให้มีขนาดเล็กหรือสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

3. กลไกการเกิด Sweep floc และการดูดติดผิว Sweep floc โดย Sweep floc ที่เกิดจาก $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ปริมาณมากจะสามารถดูดติดหรือกวาดความขุ่นและสีรวมถึงคอลลอยด์ขนาดเล็กให้รวมตัวเป็นตะกอนวุ้นขนาดใหญ่พาตกตะกอนแยกออกจากรน้ำใสได้

4. กลไกการตกตะกอน (Sedimentation) คอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพ sweep floc ความขุ่นและสี รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วตกตะกอนแยกออกจากรน้ำส่วนใส

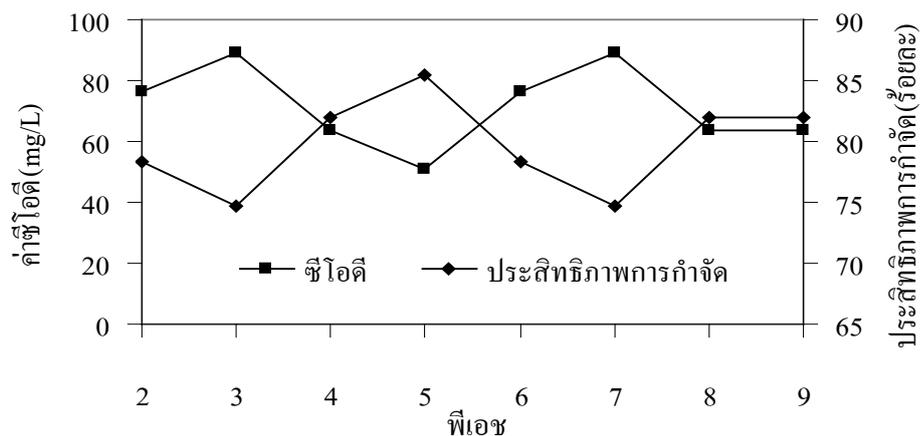
กลไกทั้ง 4 อาจเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ซึ่งล้วนจะมีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นให้ดียิ่งขึ้น จึงอาจเป็นการยากที่จะระบุว่ากลไกใดเป็นกลไกหลักที่โดดเด่นในการบำบัด

อย่างไรก็ตามการใช้สารเฟนตันน้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือหากใช้มากเกินไปก็ไม่เป็นผลดีเพราะนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีแล้วยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดต่ำลง (จากภาพที่ 12 ถึง 13 ในช่วงความเข้มข้นของเฟอร์รัส 5.6 – 8.0 mmol/L)

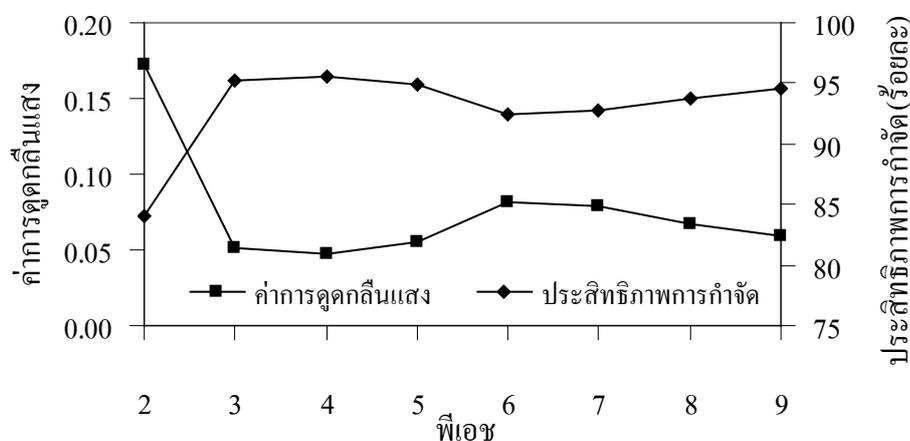
ดังนั้นจากการทดลองในขั้นตอนนี้จึงพิจารณาเลือกปริมาณการใช้สารเฟนตันที่เหมาะสมคือการใช้ Fe^{2+} เข้มข้น 4.0 mmol/L และ H_2O_2 6.0 mmol/L (อัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ คือ 1.5 mol/mol) สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้สารเคมี โดยพบว่า ณ สภาวะดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นคิดเป็นร้อยละ 81.95, 95.46 และ 99.80 ตามลำดับ

2.7.4 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นในการใช้สารเฟนตันที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน

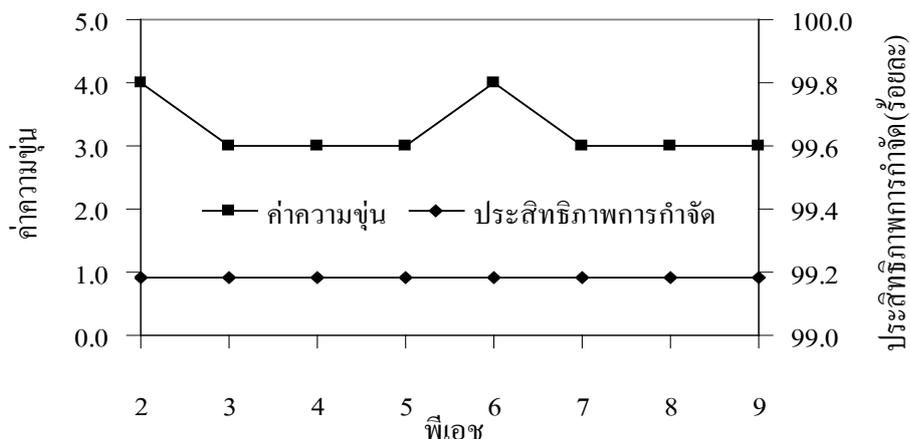
นำตัวอย่างน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจาก หัวข้อ 2.7.2 คือ 0.4 g/L ที่มีลักษณะเบื้องต้นคือ pH 5.25, COD 351 mg/L, ค่าการดูดกลืนแสง ณ $\lambda_{526 \text{ nm}}$ (เจือจาง 5 เท่า) คือ 0.216 และค่าความขุ่น (เจือจาง 5 เท่า) 98 NTU จากนั้นเติมสารเฟนตัน โดยใช้อัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 คือ 1.5 mol/mol ปริมาณการเติม Fe^{2+} ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 คือ 4 mmol/L (H_2O_2 6 mmol/L) กวนผสม ทำปฏิกิริยานาน 120 นาที แล้วทำการหา pH ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสารเฟนตัน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2-14 - 2-16



ภาพที่ 2-14 ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD



ภาพที่ 2-15 ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี



ภาพที่ 2-16 ผลของค่า pH เริ่มต้นต่างๆของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ผลของค่า pH เริ่มต้นในน้ำเสียเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัด COD ดังภาพที่ 2-14 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด COD มีค่าแกว่งตัวในช่วงร้อยละ 74.66 - 85.52 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงสุด ณ ค่า pH เริ่มต้นคือ pH 5 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 85.52

ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นจากภาพที่ 2-15 และ 2-16 นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นจะเพิ่มสูงขึ้นมากจากช่วง pH 2 ถึง 3 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นคิดเป็นร้อยละ 83.98 ถึง 95.28 และ 99.18 ถึง 99.18 ตามลำดับ จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นจะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในช่วง pH เริ่มต้น 3-9 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นในช่วง pH ดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 92.50 ถึง 95.56 และ 99.18 ถึง 99.18 ตามลำดับ

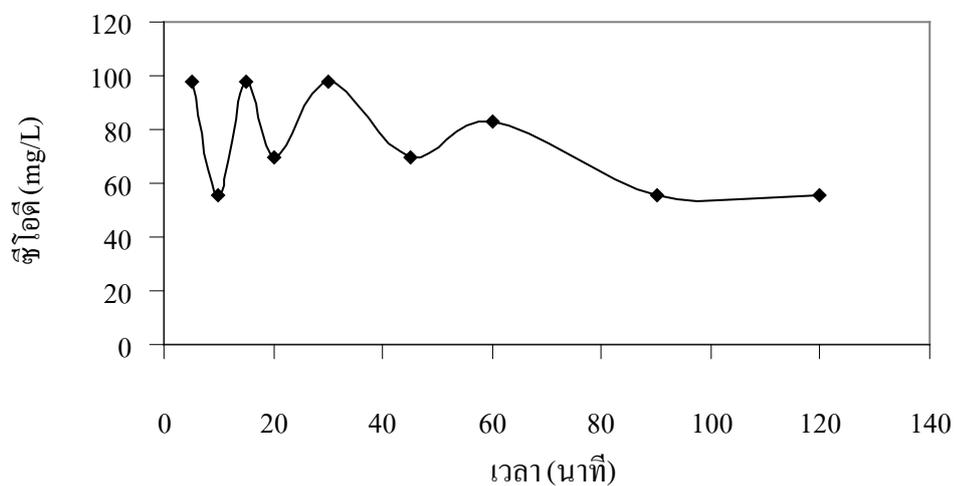
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นพบว่าจะมีประสิทธิภาพดีในช่วงค่า pH เริ่มต้น สองช่วงคือ pH เริ่มต้น 3 และ pH เริ่มต้น ช่วง 7-9 ในช่วงค่า pH เริ่มต้น 3 ซึ่งอยู่ในย่านกรด กลไกหลักในการบำบัด COD สี และความขุ่นคือการเกิดออกซิเดชัน การทำลายเสถียรภาพและการรวมตะกอน ตามด้วยการเกิด Sweep floc (ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันและการหยุดปฏิกิริยาเฟนตัน) โดยการตั้ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ออกจากระบบด้วยการปรับ pH สุดท้ายให้มีค่า 8-9 จะเกิด Sweep floc ของ $Fe(OH)_2$ หรือ $Fe(OH)_3$ ตกตะกอนแยกออกจากส่วนใส กลไกที่มีแนวโน้มจะเป็นกลไกหลักที่โดดเด่นคือกลไกการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจาก pH 3 อยู่ในช่วงที่เป็นกรดเหลือส่วนใหญ่ จะละลายอยู่ในรูป Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 ได้ $HO\cdot$ ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ทำลายโครงสร้างของ COD สี และความขุ่นได้สูงมาก ส่วน pH เริ่มต้นในช่วง 7-9 กลไกหลักที่มีแนวโน้มโดดเด่นในการบำบัดคือ กลไกการเกิด sweep floc และการดูดผิวผิวของ Sweep floc เนื่องจาก pH ในช่วงดังกล่าว เหล็กจะเกิดตะกอนในรูป $Fe(OH)_2$ หรือ $Fe(OH)_3$ ซึ่งเป็น Sweep floc ปริมาณมาก (เหล็กเริ่มตกตะกอน ณ pH ประมาณ 6)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัด COD สี และความขุ่นประกอบกัน จึงพิจารณาเลือกค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในขั้นต่อไปคือ pH 5 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีในการปรับ pH โดย ณ ค่า pH เริ่มต้นดังกล่าวจะมี ประสิทธิภาพ การบำบัด COD สี และ ความขุ่น คิดเป็นร้อยละ 85.52, 94.91 และ

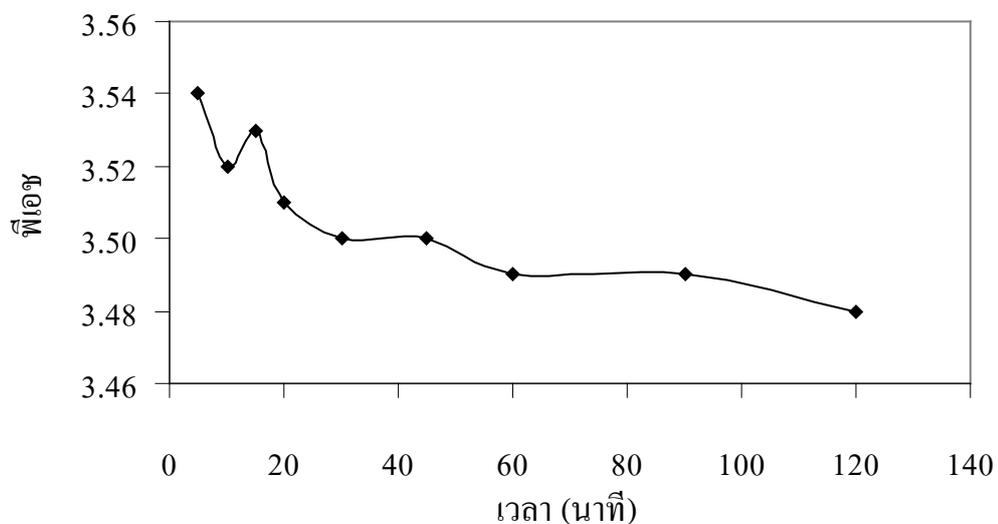
99.18 ตามลำดับ เนื่องจากค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีด้วยสารส้มมีค่า 5.25 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 5 อยู่แล้ว และเมื่อเติม H_2O_2 และ $FeSO_4$ ลงในน้ำเสียจะทำให้ pH มีค่าลดลงเหลือประมาณ 3-3.5 เนื่องจาก H_2O_2 และ $FeSO_4$ มีฤทธิ์เป็นกรด อันจะส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังได้กล่าวมา

2.7.5 ศึกษาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้อยการพิมพ์ซิลค์สกรีน

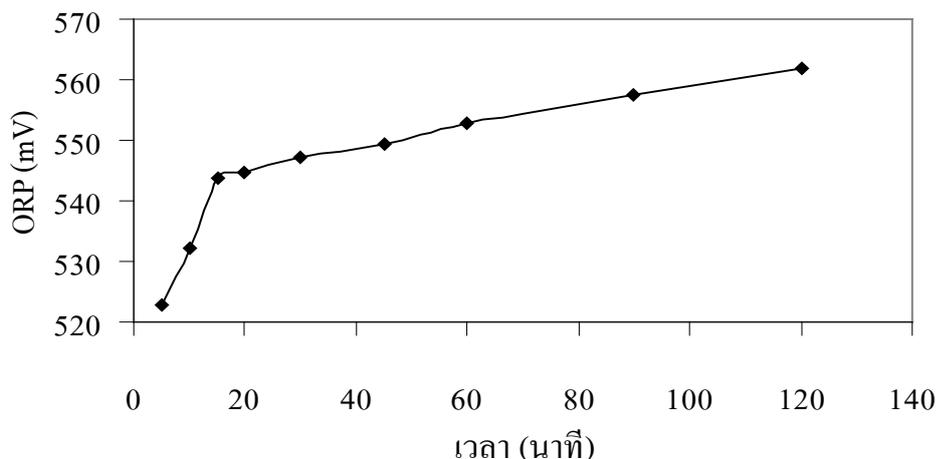
นำตัวอย่างน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการสร้างตะกอนทางเคมีตามปริมาณการใช้สารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 คือ 0.4 g/L ไม่ต้องมีการปรับค่า pH เริ่มต้นเนื่องจากน้ำเสียมีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 5 (จากการทดลองที่ 4) เติม H_2O_2/Fe^{2+} ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1 คือ 1.5 mol/mol ปริมาณการเติม Fe^{2+} ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2 คือ 4.0 mmol/L (H_2O_2 6.0 mmol/L) แล้วทำการกวนผสมเพื่อหาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสารเพนตัน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2-17 – 2-19



ภาพที่ 2-17 ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเพนตันต่อค่า COD



ภาพที่ 2-18 ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเพนตันต่อค่าพีเอช



ภาพที่ 2-19 ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของสารเพนตันต่อค่า ORP

ผลของประสิทธิภาพการบำบัด COD เทียบกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจากภาพที่ 2-17 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD มีค่าแกว่งตัวในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยานาน 5-90 นาที โดยประสิทธิภาพการบำบัด ณ ช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าแกว่งตัวในช่วงร้อยละ 72.24 – 84.14 ภายหลังจากการทำปฏิกิริยา 90-120 นาทีพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากันโดยการบำบัด COD ณ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยานาน 90-120 นาทีที่มีประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 84.14 และ 84.14 เท่ากัน ตามลำดับ

ผลของค่า pH เทียบกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจากภาพที่ 2-18 พบว่า ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยานาน 5-60 นาที pH มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 3.54 เป็น 3.49 และในช่วงการทำปฏิกิริยานาน 60-120 นาที pH มีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 3.49 เป็น 3.48 ค่า pH ที่ลดลง อาจเป็นผลมาจากความเป็นกรดจากการเติม H_2O_2 เนื่องจาก H_2O_2 ที่ใช้ในการทดลองเป็นสารละลาย H_2O_2 35% ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดมีค่า pH 2-3

ผลของค่า ORP เทียบกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจากภาพที่ 2-19 พบว่าช่วงเวลาการทำปฏิกิริยานาน 5-20 นาที ORP มีค่าเพิ่มอย่างรวดเร็วจาก 522.90 mV เป็น 544.70 mV จากนั้นในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยานาน 20-120 นาที ORP มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ช้าลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 544.70 mV เป็น 561.90 mV ตามลำดับ ค่า ORP ที่เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำเสียจากการเติม H_2O_2 และ Fe^{2+} โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเร็วในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มช้าลง

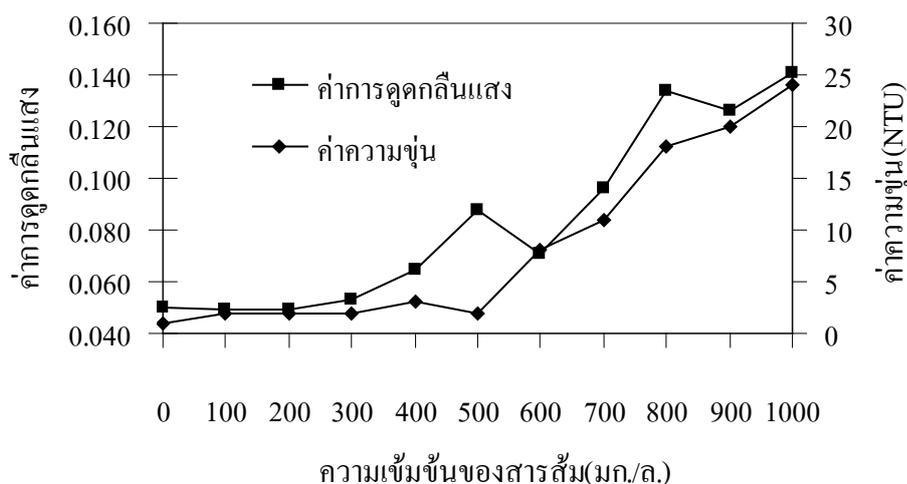
การใช้สารเพนตันในการบำบัดน้ำเสียควรจะต้องมีระยะเวลาเพียงพอให้ Fe^{2+} และ H_2O_2 ทำปฏิกิริยากับมลสารต่างๆในน้ำเสีย และต้องเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันเพื่อให้ได้ Hydroxyl radical ($HO\cdot$) รวมถึงต้องมากเพียงพอต่อการออกซิไดซ์มลสารต่างๆในน้ำเสียซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและความยากง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์อันเป็นลักษณะเฉพาะของน้ำเสียแต่ละประเภท

ดังนั้นจากผลการทดลองจึงพิจารณาเลือกระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในขั้นต่อไปคือ 90 นาทีเนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัด COD เริ่มคงที่และเป็นระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพียงพอ ครอบคลุม ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่า pH และ ORP ประกอบกับไม่ใช่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานเกินไปซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อารออกแบบขนาดของถังปฏิกรณ์และการสิ้นเปลืองพลังงานจากการกวนทำปฏิกิริยา

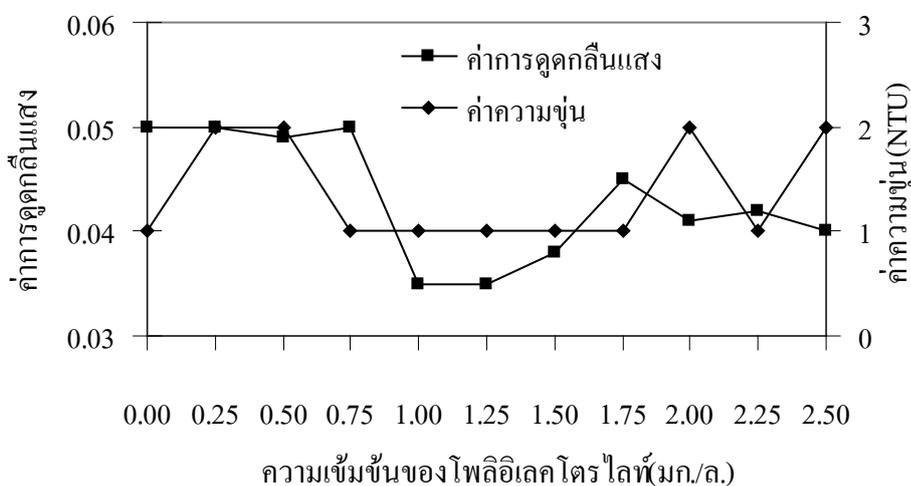
2.7.6 ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตัน

น้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันจะเกิดอนุภาคเฟนตันซึ่งเป็นสารประกอบเหล็ก ส่งผลให้มีตะกอนสีส้มขนาดเล็กหรือน้ำมีสีเหลืองส้ม จึงจำเป็นต้องใช้สารสร้างตะกอนเพื่อให้ตะกอนสามารถรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วยลดระยะเวลาในการตกตะกอนและสามารถแยกตะกอนออกจากน้ำส่วนใสได้โดยง่าย

การศึกษาในขั้นตอนนี้จึงศึกษาการใช้สารสร้างตะกอน 2 ชนิดคือสารส้มและโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุลบเพื่อระบุชนิดและปริมาณการใช้สารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2-20 – 2-21



ภาพที่ 2-20 ผลของความเข้มข้นของสารส้มต่อการบำบัดสีและความขุ่น



ภาพที่ 2-21 ผลของความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ต่อการบำบัดสีและความขุ่น

ผลของการบำบัดสีและความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคเฟนตันโดยใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน จากภาพที่ 2-20 พบว่าการใช้สารส้มในช่วงปริมาณ 100-1,000 มก./ล. มีได้มีส่วนช่วยในการรวมตะกอนแต่อย่างไร ในทางกลับกันการใช้สารส้มในปริมาณมากกว่า 200 มก./ล. กลับส่งผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงและความขุ่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม โดยในกรณีที่ไม่มีการเติมสารส้ม น้ำเสียมีค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น 0.05 และมีความขุ่นเริ่มต้น 1 NTU แต่ภายหลังจากการเติมสารส้มในปริมาณ 1,000 มก./ล.

พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.141 และ 24 NTU ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอนุภาคเฟนตันมีเสถียรภาพสูงและการใช้สารส้มในปริมาณมากเกินไปทำให้คอลลอยด์ความขุ่นขนาดเล็กกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง (restabilization) ตะกอนมีลักษณะไม่รวมตัวกันมีคอลลอยด์ความขุ่นขนาดเล็ก เบาและฟุ้งกระจายตัวได้ง่าย

ผลของการบำบัดสีและความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคเฟนตันโดยใช้โพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบเป็นสารสร้างตะกอน จากภาพที่ 2-21 พบว่าการใช้โพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบในช่วงปริมาณ 0.25-2.50 มก./ล. ไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้อย่างชัดเจน แต่มีแนวโน้มที่จะสามารถบำบัดสีได้ โดยสามารถลดค่าการดูดกลืนแสงลงได้ต่ำสุดเหลือ 0.035 ที่ปริมาณการใช้โพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ 1.0 และ 1.25 มก./ล.

ดังนั้นการกำจัดอนุภาคเฟนตันโดยการสร้างและรวมตะกอนด้วยสารสร้างตะกอนสองชนิด เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดสีและความขุ่นประกอบกันพบว่า โพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบมีแนวโน้มในการให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าสารส้ม แม้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมจะดูไม่เพิ่มขึ้นมากนัก แต่ลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่สังเกตได้จากการทดลองคือ มีการรวมตัวกันมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ไม่หลงเหลือตะกอนแขวนลอยขนาดเล็ก ช่วยลดระยะเวลาการตกตะกอนได้ ตะกอนมีลักษณะรวมตัวกันแน่นและตกตะกอนได้ดี มีแนวโน้มที่จะสามารถตกตะกอนหรือกรองแยกออกจากส่วนใสได้โดยง่าย ประกอบกับการใช้ในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสารส้ม (แต่โพลีอิเล็กโตรไลต์มีราคาสูงกว่าสารส้มมาก) และโพลีอิเล็กโตรไลต์สามารถใช้งานได้ดีในช่วงค่าพีเอชที่กว้างกว่าสารส้ม ดังนั้นจากการศึกษาในขั้นตอนนี้จึงพิจารณาเลือกสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมเพื่อการกำจัดอนุภาคเฟนตันคือการใช้โพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบในปริมาณ 1 มก./ล. สำหรับการศึกษาในลำดับต่อไป

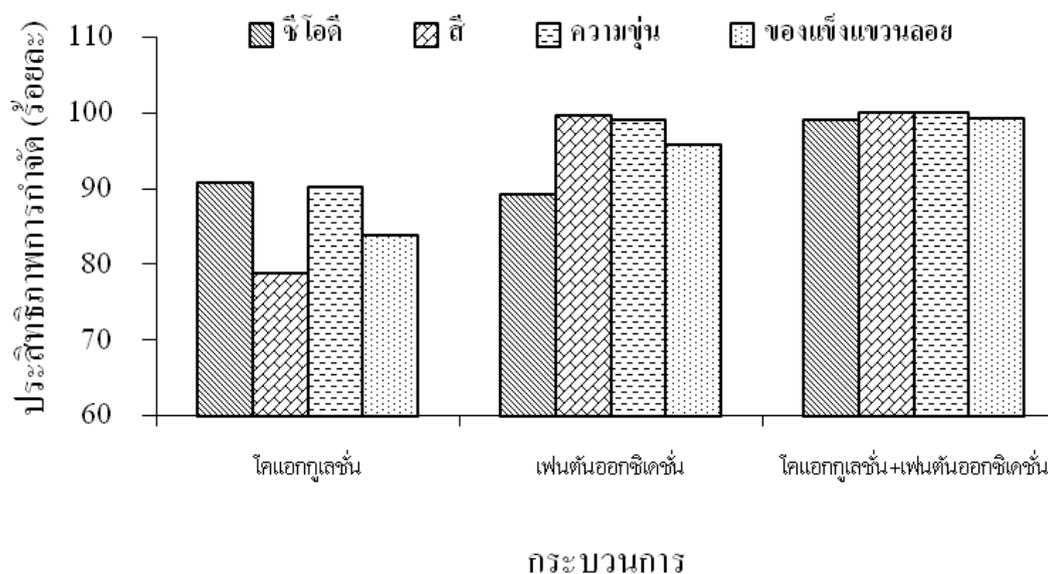
2.7.7 ศึกษาลักษณะของน้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน

ศึกษาลักษณะของน้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน ได้แก่ ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีน น้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มในปริมาณที่เหมาะสม 0.4 g/L (หัวข้อที่ 2.7.2) น้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันตามสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้สารเฟนตันในอัตราส่วนที่เหมาะสม อัตราส่วน H_2O_2/Fe^{2+} 1.5 mol/mol (หัวข้อที่ 2.7.3.1) ปริมาณการเติม Fe^{2+} ที่เหมาะสมคือ 4 mmol/L และ H_2O_2 6 mmol/L (หัวข้อที่ 2.7.3.2) ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 5 (หัวข้อที่ 2.7.4) ระยะเวลาการกวนทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 90 นาที (หัวข้อที่ 2.7.5) สารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตัน คือโพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบโดยใช้ในปริมาณที่เหมาะสมคือ 1 mg/L (หัวข้อที่ 2.7.6) โดยลักษณะน้ำเสียที่ย่อยการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 2-2 ประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนและประสิทธิภาพการบำบัดรวมแสดงดังภาพที่ 2-22

ตารางที่ 2-2 ลักษณะของน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดตามสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน

พารามิเตอร์	ลักษณะของน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน			ค่ามาตรฐานตามกฎหมาย
	น้ำเสียเริ่มต้น	ภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน	ภายหลังกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน	
pH	8.0	5.3	8.5	5.5-9.0
ORP	-14.4 mV	122.8 mV	557.5 mV	-
COD	3,776 mg/L	351 mg/L	38 mg/L	≤ 60-120 mg/L
ค่าการดูดกลืนแสง ณ $\lambda_{max} = 526 \text{ nm}$	1.021*	0.216*	< 0.001*	-
ความขุ่น	1,000 NTU*	98 NTU*	1 NTU*	≤ 20 NTU
ของแข็งแขวนลอย	282 mg/L	46 mg/L	2 mg/L	≤ 50 mg/L

หมายเหตุ * คือเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า



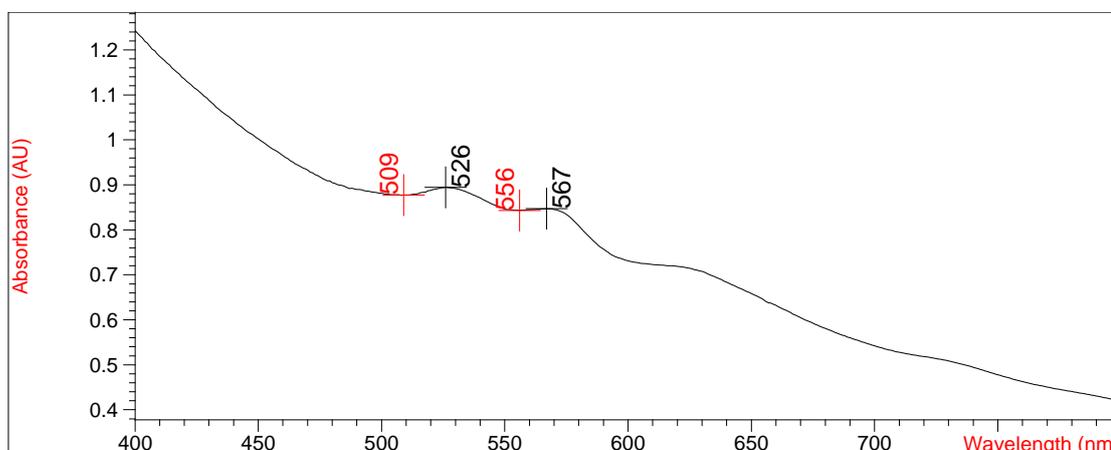
ภาพที่ 2-22 ประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนและประสิทธิภาพรวม

จากตารางที่ 2-2 เมื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียที่ย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอน พบว่า ค่า pH ภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชันมีค่าลดลงจาก 8 เป็น 5.25 เนื่องจากสารส้มที่ฤทธิ์เป็นกรดและไม่มีการปรับพีเอชอันจะส่งผลต่อกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7.4 และภายหลังกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันมีการปรับค่าพีเอชเพื่อหยุดปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน ส่งผลให้พีเอชมีค่า 8.45 อยู่ในช่วงค่าเกณฑ์มาตรฐานตามกฎหมายที่สามารถปล่อยระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ORP มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -14.4 mV เป็น 122.8 mV ภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน ORP ที่เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในระบบ และ ORP มีค่าเพิ่มขึ้นสูง

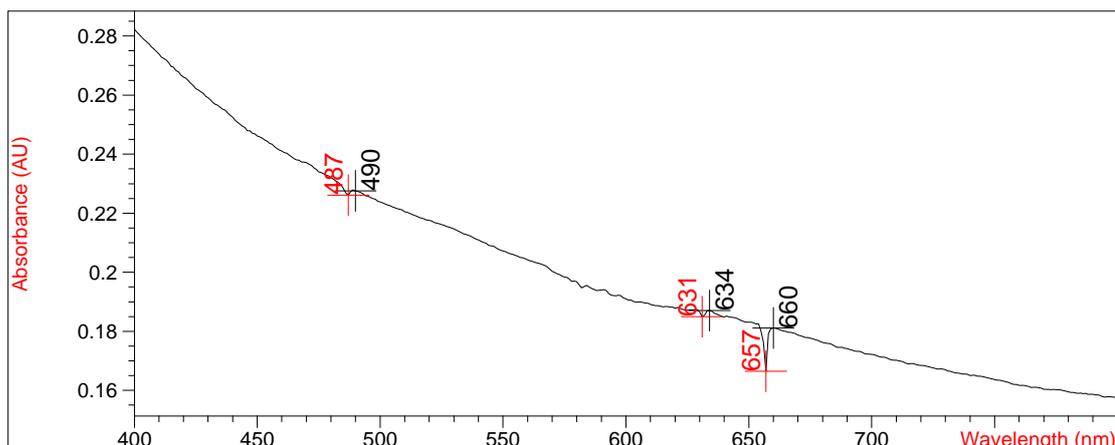
มาก เป็น 557.5 mV ภายหลังจากกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันชี้ให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงมากในขั้นตอนนี้ องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสีละลายมีแนวโน้มที่จะถูกออกซิไดซ์ทำลายโครงสร้างจากการบำบัดในขั้นตอนนี้ดังกล่าว โดยพิจารณาได้จากประสิทธิภาพการบำบัด COD สีและความขุ่น

เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพที่ 2-22 พบว่าความขุ่นมีความลดลงจาก 1,000 NTU เป็น 98 และ 1 NTU ภายหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและเฟนตันออกซิเดชันคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนคือ 90.20 % และ 98.98 % และคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวม 99.90 % ตามลำดับ ส่วนของแข็งแขวนลอยมีค่าลดลงจาก 282 mg/L เป็น 46 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนคือ 83.69 % และ 95.65 % และคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวมคือ 99.29 % ตามลำดับ ความขุ่นและของแข็งแขวนลอยเป็นมลสารที่อยู่ในรูปแขวนลอยที่ไม่ละลายในน้ำเสียส่วนใหญ่ จะถูกบำบัดจากการสร้างและการรวมตะกอน จากตะกอนของสารส้มและตะกอนของเหล็ก ($\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$) รวมถึงการใช้สารช่วยตกตะกอน (Coagulant Aid) คือโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ ทำให้มลสารสามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้โดยง่าย ด้วยการตกตะกอนหรือการกรองออกในลำดับต่อไป

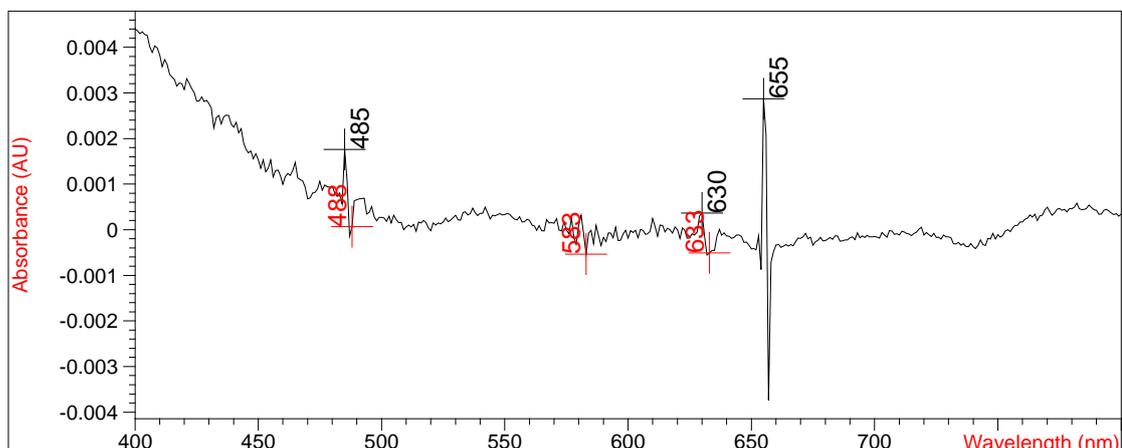
เมื่อพิจารณาค่า COD พบว่ามีค่าลดลงจาก 3,776 mg/L เป็น 351 และ 38 mg/L ภายหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและเฟนตันออกซิเดชันคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนคือ 90.70 % และ 89.17 % และคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวม 98.99 % ตามลำดับ ส่วนการบำบัดสีที่พิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงและ $\lambda_{526 \text{ nm}}$ พบว่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงจาก 1.012 เป็น 0.216 และ <0.001 ภายหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและเฟนตันออกซิเดชันคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละขั้นตอนคือ 78.66 % และ 99.54 % และคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวม 99.90 % ตามลำดับ COD และการดูดกลืนแสงซึ่งเป็นผลมาจากสารอินทรีย์และสีละลายมีแนวโน้มที่จะถูกทำลายโครงสร้างและถูกกำจัดจากกลไกการเกิดออกซิเดชันด้วยอนุภาคไฮดรอกซิลเรดิคัล และถูกกำจัดต่อการสร้างและการรวมตะกอนด้วยโพลีอิเล็กโทรไลต์ตามลำดับ โดยสามารถพิจารณาได้จากค่า ORP ที่เพิ่มสูงขึ้นมากในขั้นตอนนี้และพิจารณาจากลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียดังกล่าวที่เพิ่มสูงขึ้น น้ำเสียดังกล่าวที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และน้ำเสียดังกล่าวที่ผ่านกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน ดังภาพที่ 2-23 – 2-26



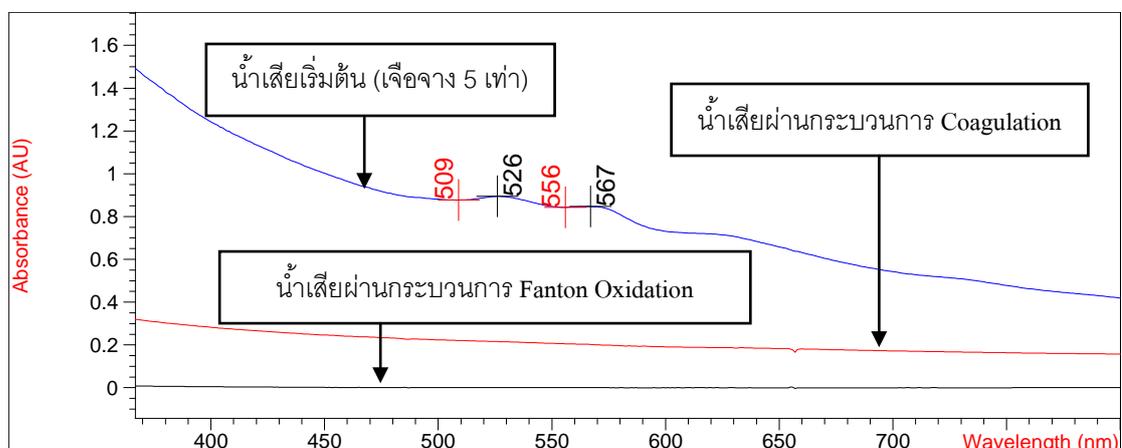
ภาพที่ 2-23 ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนเริ่มต้น ด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)



ภาพที่ 2-24 ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยสารส้มด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)



ภาพที่ 2-25 ลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการเฟนตัน ออกซิเดชันด้วยเครื่อง UV spectrophotometer (เจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า)



ภาพที่ 2-26 เปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงและประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสีย ที่ผ่านการบำบัดแต่ละขั้นตอน

จากภาพที่ 2-23 – 2-25 พบว่าค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนเริ่มต้น น้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและเฟนตันออกซิเดชันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก 526 nm เป็น 490 และ 655 nm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในแต่ละขั้นตอนการบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะการดูดกลืนแสงของน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดในแต่ละขั้นตอนดังภาพที่ 2-26 พบว่าลักษณะการดูดกลืนแสงที่พิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟของการดูดกลืนแสง มีค่าลดลงมากในขั้นตอนโคแอกกูเลชัน เนื่องจากความขุ่นและสีปรากฏส่วนใหญ่ซึ่งเป็นผลมาจากของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดออกในขั้นตอนนี้ และเมื่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนถูกบำบัดต่อด้วยกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันพบว่า มีลักษณะการดูดกลืนแสงที่ต่ำลงมาก (พื้นที่ใต้กราฟการดูดกลืนแสงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์) แสงสามารถส่องผ่านได้สูงมากในทุกช่วงความยาวคลื่นกล่าวได้ว่าน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นมีความใสสูงมาก ซึ่งเป็นผลจากสารอินทรีย์และสีแท้ (สีละลาย) ถูกออกซิไดซ์ทำลายโครงสร้างและตกตะกอนแยกออกจากน้ำใสด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนนี้ จากผลการศึกษาพบว่า การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้น แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีก็ตามแต่มีพารามิเตอร์บางค่าที่ยังไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมายและไม่สามารถปล่อยระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น สารอินทรีย์ในรูป COD ค่า pH ความขุ่นรูปของแข็งแขวนลอย และสีละลายอันเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้กระบวนการเฟนตันออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวต่อไป เพื่อให้มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้น เป็นไปตามข้อกำหนดทางกฎหมายสามารถระบายออกสู่แหล่งรองรับน้ำภายนอกสถานประกอบการ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติต่อไป

ดังนั้นสรุปได้ว่าการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันนั้นเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ผู้ประกอบการธุรกิจการพิมพ์หรือกิจการที่เกี่ยวข้องสามารถประยุกต์วิธีการดังกล่าวสำหรับอุตสาหกรรมของตนได้ในอนาคต

2.7.8 สรุปขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

จากการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการปฏิบัติงานดังนี้

2.7.8.1 การเตรียมสารละลายสต็อก สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาควรเตรียมเป็นสารละลายสต็อกที่มีความเข้มข้นดังนี้

1. สารละลายสารส้ม 10 % (10 g/L) เตรียมจากสารส้มชนิดผง
2. สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของ Fe^{2+} 0.5 mol/L เตรียมโดยการละลายผงเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ในอัตราส่วน 139 g/L ในน้ำกลั่น
3. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 35% (10 mol/L)
4. สารละลายโซดาไฟ (NaOH) 10% เตรียมจากการละลายโซดาไฟชนิดเม็ดในอัตราส่วน 100 g/L ในน้ำกลั่น

5. สารละลายโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ 0.01 % เตรียมจากการละลายโพลิอิเล็กโตรไลต์ชนิดผงในอัตราส่วน 0.1 g/L ในน้ำกลั่น

2.7.8.2 การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน มีขั้นตอนการปฏิบัติงานดังนี้

1. ตวงน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนใส่ในภาชนะ เตรียมสำหรับด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
2. เติมสารละลายสารส้มลงในสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารส้มในน้ำเสียตามอัตราส่วน 0.4 g/L โดยหากเติมในรูปสารละลายสารส้มสต็อก 10 % ให้เติมในอัตราส่วนของสารละลายสารส้มสต็อกต่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 0.004 L/L (4 mL/L)
3. กวนผสมเร็ววนาน 1 นาที กวนช้าเพื่อการรวมตะกอนนาน 15 นาที
4. หยุดการกวนตั้งทิ้งให้ตกตะกอนนาน 60 นาที
5. แยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยใช้ถุงกรองหรือผ้ากรองหยาบ นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองแยกตะกอนไปบำบัดต่อด้วยกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน
6. ตวงน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันใส่ในภาชนะโดยไม่ต้องมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น
7. เติมสารเฟ้นต้นคือ H_2O_2 และ Fe^{2+} ในอัตราส่วน H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol โดยมีวิธีการเติมดังนี้
 - 1) เติม H_2O_2 ลงในน้ำเสียเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของ H_2O_2 6.0 mmol/L โดยหากเติมในรูปสารละลายสต็อก H_2O_2 35 % ให้เติมในอัตราส่วนของสารละลายสต็อก H_2O_2 ต่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 0.0006 L/L (0.6 mL/L)
 - 2) เติม Fe^{2+} ลงในน้ำเสียเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของ Fe^{2+} 4.0 mmol/L โดยหากเติมในรูปสารละลายสต็อก Fe^{2+} 0.5 mol/L (จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 139 g/L) ให้เติมในอัตราส่วนของสารละลายสต็อก Fe^{2+} ต่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 0.008 L/L (8 mL/L)
8. กวนผสมเพื่อทำปฏิกิริยานาน 90 นาที
9. เติม NaOH ลงในน้ำเสียเพื่อหยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าประมาณ 8.0 (อัตราการเติม NaOH เพื่อปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 8.0 มีค่าประมาณ 1 g/L) โดยหากเติมในรูปสารละลายสต็อก NaOH 10% ให้เติมในอัตราส่วนของสารละลายสต็อก NaOH ต่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 0.01 L/L (10 mL/L)
10. กวนผสมเร็ววนาน 1 นาที
11. เติมโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบลงในน้ำเสียเพื่อรวมตะกอนอนุภาคเฟ้นต้น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ 1 mg/L โดยหากเติมในรูปสารละลายสต็อกโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ 0.01% (0.1 g/L) ให้เติมในอัตราส่วนของสารละลายสต็อกโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบต่อน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 0.01 L/L (10 mL/L)
12. กวนช้าเพื่อการรวมตะกอนนาน 15 นาที
13. หยุดการกวนตั้งทิ้งให้ตกตะกอนนาน 60 นาที
14. แยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยใช้ถุงกรองหรือผ้ากรองหยาบ
15. น้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันแล้วสามารถปล่อยระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.7.9 ราคาต้นทุนการใช้สารเคมีเพื่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน

ในหัวข้อจะขอกล่าวถึงราคาต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชันเฉพาะในส่วนของราคาสารเคมีเท่านั้น มิได้รวมมูลค่าราคาต้นทุนด้านอื่นๆ เช่น ค่าก่อสร้างปฏิกรณ์ ค่าไฟฟ้า พลังงาน ค่าจ้างแรงงานในการควบคุมระบบ ค่ากำจัดตะกอนเป็นต้น โดยคิดราคาสารเคมีหลักที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ 5 ชนิดคือ สารส้ม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เฟอร์รัสซัลเฟต โซดาไฟ โพสลีเอคโตรไลท์ประจุลบ ราคาสารเคมีเหล่านี้ คิดราคาจากสารเคมีระดับ Analytical Grade คิดราคา ณ เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2555 ได้แก่

สารส้มชนิดผง ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)	ราคา 10 บาท/กิโลกรัม (0.01 บาท/กรัม)
สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% (H_2O_2)	ราคา 1,000 บาท/ลิตร (1 บาท/มิลลิลิตร)
เฟอร์รัสซัลเฟตชนิดผง ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	ราคา 1,000 บาท/กิโลกรัม (1 บาท/กรัม)
โซดาไฟชนิดเม็ด (NaOH)	ราคา 400 บาท/กิโลกรัม (0.4 บาท/กรัม)
โพสลีเอคโตรไลท์ประจุลบ	ราคา 150 บาท/กิโลกรัม (0.15 บาท/กรัม)

การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตัน ออกซิเดชัน 1 ลิตรต้องใช้สารเคมีในปริมาณ ดังนี้

สารส้มชนิดผง ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)	0.4 กรัม/ลิตร
สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% (H_2O_2)	0.6 มิลลิลิตร/ลิตร
เฟอร์รัสซัลเฟตชนิดผง ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	1.112 กรัม/ลิตร
โซดาไฟชนิดเม็ด (NaOH)	1 กรัม/ลิตร
โพสลีเอคโตรไลท์ประจุลบ	0.001 กรัม/ลิตร

ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน 1 ลิตร จะมีราคาต้นทุนค่าสารเคมีดังนี้

สารส้มชนิดผง ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)	$0.01 \text{ บาท/กรัม} * 0.4 \text{ กรัม/ลิตร}$ $= 0.004 \text{ บาท/ลิตร}$
สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% (H_2O_2)	$1 \text{ บาท/มิลลิลิตร} * 0.6 \text{ มล./ลิตร}$ $= 0.6 \text{ บาท/ลิตร}$
เฟอร์รัสซัลเฟตชนิดผง ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	$1 \text{ บาท/กรัม} * 1.112 \text{ กรัม/ลิตร}$ $= 1.112 \text{ บาท/ลิตร}$
โซดาไฟชนิดเม็ด (NaOH)	$0.4 \text{ บาท/กรัม} * 1 \text{ กรัม/ลิตร}$ $= 0.4 \text{ บาท/ลิตร}$
โพสลีเอคโตรไลท์ประจุลบ	$0.15 \text{ บาท/กรัม} * 0.001 \text{ กรัม/ลิตร}$ $= 0.00015 \text{ บาท/ลิตร}$

รวมเป็นเงินค่าสารเคมีทั้งสิ้น = 2.11615 บาท/ลิตร หรือ 2,116.15 บาท

ซึ่งราคาดังกล่าวถือเป็นราคาที่สูงมาก เนื่องจากสารเคมีที่ใช้คิดราคาเป็นสารเคมีระดับ Analytical Grade ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธีนี้ในการบำบัดน้ำเสียสำหรับสถานประกอบการที่มีน้ำเสียในปริมาณมาก ในทางปฏิบัติสามารถลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีได้โดยการใช้สารเคมีระดับเกรด

การค้า (commercial grade) รวมถึงการเวียนตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ กลับมาใช้เป็นสารเพนตันแทนเฟอร์ริสซิลเฟต ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดภาระค่าการกำจัดตะกอนแล้ว ยังช่วยลดราคาต้นทุนค่าสารเคมีตั้งต้น(เฟอร์ริสซิลเฟต) อีกทางหนึ่ง

บทที่ 3

การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเตชัน (Copper Recovery of Printed Circuit Board by Iron Powder : Chemical Hydrometallurgy combined with Cementation Technique)

3.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันพบการทิ้งเศษส่วนคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ ที่มีการชำรุดเสียหายในจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเราพบว่าในชิ้นส่วนประกอบคอมพิวเตอร์ หรือ โทรทัศน์ เหล่านี้มีองค์ประกอบของวัสดุหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ (Hugo Marcelo Veit และคณะ, 2006) โดยเฉพาะส่วนประกอบที่เป็นโลหะและพบว่าในแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ มีโลหะพื้นฐานที่สำคัญ เช่น ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว ดีบุก เหล็ก อลูมิเนียม ซิลิกอน และโลหะมีค่าคือ พลาตินัม ทอง พัลลาเดียม เงิน และในชิ้นส่วนประกอบเหล่านี้ยังมีโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ตะกั่ว และแคดเมียม เศษแผ่นวงจรไฟฟ้าจึงถูกจำแนกเป็นของเสียอันตราย (Hazardous Waste) จำเป็นต้องมีวิธีการในการบำบัดจัดการของเสียเหล่านี้ได้อย่างเหมาะสม ได้แก่ การฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย (Secure Landfill) กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นวิธีหนึ่งในการจัดการกับของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์ของเสียอีกทางหนึ่งจึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นเรื่องที่มีโอกาสการตลาดสูง

การศึกษานำกลับโลหะได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้โดย Lee และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษานำกลับโลหะมีค่าออกจากแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้สารละลายกรดไนตริกเป็นตัวออกซิไดซ์ โลหะออกจากแผ่นวงจรไฟฟ้า พบว่าทองแดงจะถูกนำออกจากสารละลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส กรดไนตริกที่นำเอาทองแดงและไอออนของโลหะออกแล้วจะถูกนำมาออกซิไดซ์ แผ่นวงจรใหม่นอกจากนั้น Veglio และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษานำกลับโลหะมีค่าออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยเริ่มจากกระบวนการชะละลาย (Leaching) ด้วยกรดซัลฟิวริก และนำสารละลายที่ใช้ในการกัดกร่อนแล้วมาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพื่อทำการแยกโลหะออกจากสารละลายเพื่อทำให้ได้โลหะบริสุทธิ์ต่อไป และ Choi และคณะ (2003) พบว่าปริมาณของทองแดงที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส และได้ทำการศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแส (Current density) ความต่างศักย์ไฟฟ้า พื้นที่ผิวของขั้วแคโทด และได้มีการติดตามค่า pH ของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง

วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีหลายวิธีได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การดูดซับ (Adsorption) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) และการแทนที่ของโลหะหนักหรือซีเมนเตชัน (Cementation) เป็นต้น โดยในการเลือกใช้ระบบการบำบัดและนำกลับที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณและ ชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียตลอดจนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้นจะมีค่าใช้จ่ายและ

ประสิทธิภาพในการดำเนินการแตกต่างกันไป เช่นการตกตะกอนทางเคมี เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยการเติมสารกลุ่มไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ซัลไฟต์ เพื่อปรับพีเอชในน้ำเสียให้เหมาะสมต่อการตกตะกอนโลหะหนักในแต่ละชนิด แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวนี้จะใช้ระยะเวลาและสิ้นเปลืองสารเคมีในการตกตะกอนและไม่สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำทิ้งได้อย่างเด็ดขาด กล่าวคือ อาจมีตะกอนบางส่วนไหลไปกับน้ำ หรือละลายกลับไปในน้ำ ที่จะปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำและลักษณะของตะกอนโลหะที่ได้เป็นตะกอนที่ไม่บริสุทธิ์ ต้องผ่านกระบวนการทำตะกอนให้บริสุทธิ์ถึงจะสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และวิธีดูดซับค่อนข้างจะมีราคาแพงและจำเป็นต้องมีการฟื้นฟู (Regeneration) วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนหรือวัสดุดูดซับ ส่วนวิธีการทางไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในเรื่องของไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการแทนที่โลหะหนักหรือกระบวนการซีเมนเตชัน (Cementation) การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็กซึ่งเป็นการใช้กระบวนการชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเตชัน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถดำเนินการได้ง่าย ใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำ รวมถึงสามารถนำกลับโลหะที่มีค่า (Precious Metal) มาใช้ประโยชน์ได้อีกซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์จากของเสีย

ในส่วนของความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์/การใช้งาน คือ งานวิจัยได้รับความอนุเคราะห์เศษแผ่นวงจรไฟฟ้าบัด (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ) จากบริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรุป จำกัด ซึ่งประกอบกิจการคัดแยก รวบรวมสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ฯ เช่น การซื้อแผ่นวงจรไฟฟ้า มาทำการแยกองค์ประกอบในส่วนที่เป็นโลหะและอโลหะ (ได้แก่ เซรามิกซ์ พอลิเมอร์) ออกจากกันด้วยวิธีทางกล (Mechanical Process) จากนั้นได้ทำการบัดเฉพาะส่วนที่เป็นโลหะได้เป็นแผ่นวงจรไฟฟ้าบัด (ผงทองแดง) เพื่อส่งไปประเทศญี่ปุ่น เข้าสู่เทคโนโลยีการนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อไป การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายที่แน่นอนในการนำผลงานไปประยุกต์ใช้จริง และหากการดำเนินงานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ จะเป็นประโยชน์แก่บริษัทดังกล่าวโดยสามารถใช้เป็นข้อมูลหรือทางเลือกเพื่อการนำกลับทองแดงจากเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าได้เอง หรือแม้กระทั่งกลุ่มบริษัทที่ก่อให้เกิดของเสียดังกล่าวอาจนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้เพื่อการนำกลับทองแดงจากเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าหากพบว่ามิของเสียประเภทนี้เกิดขึ้นในปริมาณที่มากเพียงพอกับการลงทุนเพิ่มเติม ซึ่งจะสามารถช่วยลดปริมาณของเสียและค่าจ้างที่โรงงานผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าต้องรับภาระในการกำจัดลง (แผ่นวงจรไฟฟ้า : PCB (Printed circuit Board)) แต่ทางโรงงานจะต้องลงทุนเริ่มต้น (Initial cost) ในส่วนของการติดตั้งเครื่องแยกชิ้นส่วนทางกล เครื่องบัด และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบ (Operating cost) ในส่วนของการป้อนตัวอย่างเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ซีเมนเตชัน รวมถึงค่าสารเคมีซึ่งจากการประมาณการเบื้องต้นผู้วิจัยคาดว่าโครงการนี้น่าจะมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

3.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมและปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี (chemical hydrometallurgy)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก

3. เพื่อศึกษาองค์ประกอบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณในตะกอนทองแดงภายหลังจากการนำกลับจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทชันด้วยผงเหล็ก

4. เพื่อทราบข้อมูลในการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้แยกทองแดงออกจากน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก

3.3 ขอบเขตของการวิจัย

3.3.1 การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy) โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า ดังนี้คือ

- ชนิดของสารชะละลาย ได้แก่ กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และ กรดกัดทอง (aqua regia)

- ความเข้มข้นของสารชะละลายทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ 2 4 และ 6 โมล/ลิตร

- อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (แผ่นวงจรไฟฟ้า/สารชะละลาย) ได้แก่ 10 20 30 กรัม/50 มิลลิลิตร

เศษแผ่นวงจรไฟฟ้าบัด (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท นาโมยะชินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด ทำการชะละลายภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที และตรวจวัดปริมาณโลหะที่ถูกชะละลาย 4 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และ เหล็ก

3.3.2 การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทชันด้วยผงเหล็ก

3.3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าบัด ได้แก่ ค่าพีเอช โออาร์พี ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสีย (ทองแดงทั้งหมดและทองแดงละลาย) เครื่องมือที่ใช้คือ pH meter, ORP meter และ Atomic Adsorption Spectrophotometer ตามลำดับ

3.3.2.2 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผงเหล็ก (Iron Powder) ได้แก่ ลักษณะการกระจายตัวของผงเหล็ก เพื่อทราบขนาดอนุภาคของผงเหล็ก โดยใช้วิธีตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) และองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณด้วย SEM-EDS Technique

3.3.2.3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทชันโดยใช้ผงเหล็ก มีรายละเอียดปัจจัยและขอบเขตการศึกษาดังนี้

1) ศึกษาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเทชันที่สมบูรณ์ (0 5 10 20 40 60 90 120 นาที)

2) ศึกษาปริมาณการใช้ผงเหล็กในการนำกลับทองแดง (1 2 และ 3 เท่าของจำนวนสตอยชิโอเมตริก)

3) ศึกษาผลของพีเอชของน้ำชะต่อการนำกลับทองแดง (พีเอช 1 2 3 และ 4)

4) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการนำกลับทองแดง (30 50 และ 70 องศาเซลเซียส)

3.3.3 ขั้นตอนการศึกษาการตกตะกอนของตะกอนทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนเทชันโดยใช้ผงเหล็กในสถานะที่ดีที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.3.1 ศึกษารูปแบบการตกตะกอน (Sedimentation Pattern)

3.3.3.2 ศึกษาความเร็วในการตกตะกอน (Settling Velocity)

3.3.4 ขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของตะกอนที่ได้ภายหลังกการนำกลับทองแดง

3.3.4.1 ศึกษาชนิดของสารประกอบทองแดงในตะกอนโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer : XRD

3.3.4.2 ศึกษาปริมาณของทองแดงในตะกอนโดยรายงานผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงในตะกอน โดยการย่อย แล้ววิเคราะห์ด้วย Atomic Adsorption Spectrophotometer ; AAS เพื่อระบุความบริสุทธิ์ของตะกอนทองแดงที่ได้

3.3.4.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตะกอนทองแดงภายหลังกการนำกลับโดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.4.4 ศึกษาองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณด้วย SEM-EDS Technique

3.4 **ทฤษฎี สมมติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย**

สืบเนื่องจากนิสิตหลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ได้จัดทำหัวข้อสัมมนา คือ Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy จึงมีโอกาศได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าฟาบดจากบริษัท นาโมยะ ชินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด จึงมีความคิดร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ ชั้นปีที่ 4 ที่จะศึกษาหัวข้อวิจัยเรื่อง การชะละลายโลหะมีค่าจากเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดซึ่งอาศัยกระบวนการ chemical hydrometallurgy จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถชะละลายโลหะได้หลายชนิด ได้แก่ ทองแดง และตะกั่ว เป็นต้น โดยเฉพาะทองแดงซึ่งมีปริมาณมากและจัดเป็นโลหะที่มีค่าชนิดหนึ่ง ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชะละลายได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารชะละลาย อุณหภูมิและระยะเวลาในการชะละลาย และอัตราส่วนของแข็ง/ของเหลว (เศษแผ่นวงจรไฟฟ้า/สารชะละลาย) เป็นต้น ซึ่งด้วยคุณสมบัติของทองแดงเอง และความเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้างกล่าว อีกทั้งความเข้มข้นที่สูงมาก ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก โดยการใช้เทคนิคซีเมนเทชัน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง นอกจากนี้ทองแดงที่ได้จากการบำบัดยังสามารถนำกลับ (recovery/recycle) เพื่อนำไปขายได้และเป็นหนึ่งในทางเลือกเพื่อลดปริมาณการกำจัดของเสียอันตรายได้แก่ของเสียอิเล็กทรอนิกส์ (electronics waste) ไปในอีกทางหนึ่ง ได้ทำการออกแบบการวิจัยเพื่อทำการศึกษขั้นตอนต่างๆอย่างแม่นยำ โดยขอบเขตของการศึกษาจะศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี โดยการใช้สารชะละลายที่มีชนิดและความเข้มข้นต่างกัน อีกทั้งมีอัตราส่วนของแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อปริมาณสารชะละลายต่างกันไป เพื่อทราบสภาวะที่สามารถชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าได้สูงสุดโดยพิจารณาจากปริมาณทองแดงที่ตรวจวัดได้ในน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าภายหลังกการชะละลายด้วยเครื่อง AAS และศึกษาปริมาณการใช้ผงเหล็กที่เหมาะสมด้วยเครื่อง Jar Test ร่วมกับ Magnetic Stirrer เพื่อคำนวณหาปริมาณผงเหล็กที่ต้องใช้ในการนำกลับทองแดง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาซีเมนเทชันที่เหมาะสม โดยคำนวณจากปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เพื่อใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์และเครื่องกวน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาซีเมนเทชัน รวมถึงลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของทองแดงที่เกิดขึ้น ทำการศึกษาจากรูปแบบการตกตะกอนและ

ปริมาณตะกอนจมน้ำ ลักษณะองค์ประกอบและร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณทองแดงที่ได้จากตะกอนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และการย่อยตะกอนแล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตะกอนภายหลังการนำกลับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM งานวิจัยเป็นแนวทางที่ใช้ต้นทุนเหมาะสมต่อการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกรดและนำกลับทองแดงจากน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทนซ์โดยใช้ผงเหล็กเป็นวิธีที่ง่ายและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ตะกอนทองแดงที่ได้จากการนำกลับสามารถขายเป็นรายได้ในราคาสูง โดยต้นทุนส่วนใหญ่เป็นต้นทุนจากการซื้อสารเคมี คือ กรดในกระบวนการชะละลาย (Leaching process) ผงเหล็กและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (สารปรับพีเอช) ซึ่งมีราคาไม่แพงและหาซื้อได้ง่ายทั่วไปตามท้องตลาด เป็นวิธีที่ดำเนินการได้ง่าย ใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายต่ำ เครื่องมือและอุปกรณ์เฉพาะทางส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่มีพร้อมในห้องปฏิบัติการของคณะฯอยู่แล้ว เช่น เครื่อง Jar Test ,เครื่อง Magnetic Stirrer กรวย imhoff และ อุปกรณ์เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเครื่องมือชิ้นสูงต่างๆ ได้แก่ เครื่อง AAS XRD SEM และ particle size analyzer เป็นต้น ผลที่ได้จากการทำโครงการสามารถเป็นคำตอบและข้อมูลเบื้องต้นแก่กับทางบริษัทอันจะเป็นประโยชน์ต่อทางบริษัทเอง เพื่อนำไปเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์กับวิธีอื่นๆ และหากบริษัทต้องการออกแบบก่อสร้างระบบนำกลับทองแดงก็สามารถทำได้โดยใช้ต้นทุนไม่สูงนัก ได้แก่ ค่าตั้งปฏิกรณ์กวน และถังตกตะกอน ใบกวนและอุปกรณ์จ่ายสารเคมี

อีกทั้งเป็นการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาหรือเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าเพื่อนำกลับทองแดงด้วยเทคนิคซีเมนเทนซ์โดยใช้ผงเหล็กเป็นการใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์โดยอาศัยกลไกออกซิเดชัน - รีดักชัน หรือซีเมนเทนซ์โดยการเติมผงเหล็ก ซึ่งเป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ทำการรีดิวซ์ทองแดงที่ละลายอยู่ในสารละลายในรูป Cu^{2+} ให้กลายเป็นตะกอนทองแดงที่ไม่ละลายในรูป Cu^0 ที่มีความบริสุทธิ์และมีราคาแพง ผลจากการศึกษาเป็นการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่า (waste utilization) ให้กับเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าเพื่อเป็นการลดภาระในการกำจัดขยะในรูปของเสียอันตรายและรักษาสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยให้ยั่งยืนสืบไป

3.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

อัมพรและคณะ (2548) ศึกษาการนำโลหะมีค่าออกจากแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานไม่ได้ จากการศึกษาพบว่า การนำโลหะเหล่านี้ออกมาจากแผงวงจรทำได้ โดยการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการออกซิไดซ์การหาชนิดกรดที่ใช้ในการออกซิไดซ์การนำโลหะออกมาจากแผงวงจรนั้นทำได้โดยใช้สารที่มีสมบัติ เป็นตัวออกซิไดซ์ ทำการออกซิไดซ์โลหะให้หลุดออกจากแผงวงจร ซึ่งตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดมีความสามารถในการออกซิไดซ์โลหะได้ ต่างกัน การศึกษาชนิดของกรดที่ใช้ในการออกซิไดซ์แผงวงจร ทำการศึกษาโดยนำแผงวงจรไปแช่ในกรดที่มี ความเข้มข้น 50% โดยปริมาตรของกรด 3 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การนำเอาตัวออกซิไดซ์มาทำการออกซิไดซ์โลหะโดยทองหลุดออกจากแผงวงจรในรูปของของแข็งส่วนทองแดงหลุดออกมาในรูปของไอออน (Cu^{2+}) ทองแดงไอออนนี้สามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 แอมแปร์เป็นเวลา 20 นาที และหลังจากนั้นสารละลายที่ผ่านการแยกโลหะไอออนแล้วสามารถถูกนำกลับไปใช้ ในกระบวนการทำงานได้อีก

ศุภกันส์ และคณะ (2549) ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย โลหะจาก แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เสื่อมสภาพแล้ว 2 ชนิด (นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์และลิเทียมไอออน) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดของกรด (กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก) ความเข้มข้นของกรด (1-5 โมลต่อลิตร) อุณหภูมิ (30-80 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด (10-40 กรัมต่อลิตร) และเวลา (15-120 นาที) จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะในแบตเตอรี่แต่ละชนิด พบว่า แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์มีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ 54.20 และ 8.79 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ 6.68 และ 55.11 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อผสมแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์กับลิเทียมไอออนมีปริมาณนิกเกิลและโคบอลต์ 30.54 และ 31.33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากผลการทดลอง ทำให้ได้ภาวะที่ดีที่สุดของการชะละลาย คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างโลหะต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง สามารถละลายโลหะทั้งสองชนิดออกมาได้นิกเกิล 92.94 เปอร์เซ็นต์ และโคบอลต์ 58.85 เปอร์เซ็นต์

พลัง และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาคัดแยกอนุภาคโลหะออกจากของเสียจำพวกแผงวงจรคอมพิวเตอร์ โดยในเบื้องต้นพบว่าไซโคลนสามารถคัดแยกอนุภาคได้โดยมีประสิทธิภาพต่ำมาก แม้ว่าจะใช้ความเร็วลมหลายค่า ส่วนในการคัดแยกด้วยฟลูอิดเซชันได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยได้ทำการศึกษามูลของความเร็วลมและปริมาณอนุภาคในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพในการคัดแยกอนุภาค แผงวงจรคอมพิวเตอร์ที่ถูกคัดแยกเป็น 3 ช่วง ขนาดตั้งแต่ 180 ถึง 500 ไมครอน พบว่าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนมวลของอนุภาคโลหะเทียบกับอนุภาคทั้งหมดที่ด้านล่างคอลัมน์มีค่าเพิ่มขึ้น วิธีการนี้สามารถคัดแยกอนุภาคโลหะโดยทำให้ได้สัดส่วนมวลของโลหะเท่ากับ 93 เปอร์เซ็นต์ และได้ปริมาณโลหะที่น่ากลับคืน 83 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาด 250 – 355 ไมครอน ส่วนปริมาณอนุภาคในคอลัมน์ที่ใช้ในการคัดแยกนั้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการคัดแยก

Lee และ คณะ (2003) ศึกษาการนำโลหะมีค่าออกจากแผงวงจรไฟฟ้าโดยใช้สารละลายกรดไนตริกเป็นตัวออกซิไดซ์โลหะออกจากแผงวงจรไฟฟ้า พบว่าทองแดงจะถูกนำออกจากสารละลายด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส กรดไนตริกที่นำเอาทองแดงและไอออนของโลหะออกแล้วจะถูกนำมาออกซิไดซ์ แผงวงจรใหม่

Veglio และคณะ (2003) ศึกษาการนำโลหะมีค่าออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์โดยเริ่มจากกระบวนการชะละลาย (Leaching) ด้วยกรดซัลฟิวริก และนำสารละลายที่ใช้ในการกัดกร่อนแล้วมาเป็นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเพื่อทำการแยกโลหะออกจากสารละลาย เพื่อให้ได้โลหะบริสุทธิ์ต่อไป

Hugo Marcelo Veit และคณะ (2006) ศึกษาการนำกลับทองแดงจากเศษแผงวงจรพิมพ์โดยการ ใช้กระบวนการเชิงกลและการแยกด้วยไฟฟ้า สำหรับขั้นแรกของงานทดลองนี้ มีการใช้เครื่องจักรตัดชิ้นทดลองให้เล็กลง (Mechanical) แล้วแยกด้วยการใช้สนามแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิต ด้วยวิธีการนี้ทำให้โลหะส่วนใหญ่ เช่น ทองแดง ตะกั่ว และดีบุก ถูกแยกออกมาจากส่วนอื่นที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์และเซรามิก พบว่ามีปริมาณทองแดงสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักรวม สำหรับขั้นที่สองเป็นการแยกโลหะด้วยการละลายด้วยกรดและใช้กระบวนการแยกด้วยอิเล็กโทรเคมีคอล (Electrochemical) เพื่อให้โลหะถูกแยกออกมาโดยเฉพาะอย่างยิ่งทองแดง จากผลการทดลองพบว่าการแยกทองแดงด้วยการใช้เทคนิคของกระบวนการทาง Mechanical ตามด้วยเทคนิคทาง Electrometallurgy ใช้ได้ผล ปริมาณของทองแดงสลายตัวอย่างรวดเร็วในทุกการทดลองและจากวิธีการ Electrowinning ส่วนมากพบปริมาณทองแดงสูง

กว่า 98% มันสามารถมองเห็นว่าสิ่งนี้มันเป็นไปได้ที่จะทำให้แยกโลหะ นำกลับมาใช้ใหม่โดยเฉพาะทองแดง เพราะว่าทองแดงเหมาะสมในการแยกด้วย Electrowinning ที่เกาะบนขั้วลบมากกว่า 98%

Blowes และคณะ (1997) ศึกษาของแข็งที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Fe-Bearing) 4 ชนิด คือ Siderite (FeCO_3), Pyrite (FeS_2) เหล็กเม็ดหยาบ (Coarse- Grained Fe^0) เหล็กเม็ดละเอียด (Fine - Grained Fe^0) เพื่อหาความสามารถในการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมออกจากสารละลายผลจากการศึกษาแบบแบตช์ แสดงให้เห็นว่าอัตราของการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดมีค่ามากกว่า Pyrite และเหล็กเม็ดหยาบกลไกของการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมด้วยเหล็กเม็ดละเอียดและเหล็กเม็ดหยาบ คือการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของเหล็กศูนย์เป็นเหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเพอริก ไตรวาเลนทีโครเมียมที่เกิดขึ้นจะตกผลึกในรูปของแข็งโครเมียม (II) เหล็ก (III) ออกซิไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$) และผลจากการวิเคราะห์ทางแร่วิทยาว่าไตรวาเลนทีโครเมียมมักอยู่ร่วมกับ Goethite ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ไตรวาเลนทีโครเมียมสามารถกำจัดออกได้ทั้งในรูปของสารละลายของแข็งและการดูดติดบนผิวของ Goethite

Gu และคณะ (1988) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดยูเรเนียม (VI) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านหิน เหล็กออกไซด์ (FeOOH) และเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จากการทดลองพบว่าเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถกำจัดยูเรเนียมได้เกือบ 100 % ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรเนียมเท่ากับ 76 มิลลิโมลาร์ โดยได้เสนอกฎไกในการกำจัดยูเรเนียม 2 กลไก ดังนี้

1. เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) จะรีดิวซ์ยูเรเนียม (VI) กลายเป็นยูเรเนียม (IV) ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ และยูเรเนียม (IV) อาจจะสร้างพันธะอยู่ในโครงสร้างของเหล็กที่จัดเรียงตัวใหม่หลังจากถูกออกซิไดซ์โดยยูเรเนียม (VI)

2. เพอริกออกซิไฮดรอกไซด์ (FeOOH) ที่เกิดขึ้นในขณะที่เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ถูกออกซิไดซ์ จะทำให้เกิดการดูดติดผิวของยูเรเนียม (VI) บนพื้นผิวของเพอริกออกซิไฮดรอกไซด์

Lee และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาโดยใช้สารละลายกรดไนตริกเป็นตัวออกซิไดซ์โลหะออกจากแผงวงจรไฟฟ้า ทองแดงจะถูกนำออกจากสารละลายด้วยกระบวนการอิเล็กโตรไลซิส กรดไนตริกที่นำเอาทองแดงและไอออนของโลหะออกแล้วจะถูกนำมาออกซิไดซ์ แผงวงจรใหม่อีกครั้ง

Wang และคณะ (2007) นำกลับของทองจากสารประกอบเชิงซ้อนไทโอไซยาเนตจากน้ำเสียอุตสาหกรรมการชะทอง โดยใช้ผงเหล็กแทนที่ของสารประกอบในน้ำเสีย มีการทำการศึกษาลายพารามิเตอร์ ได้แก่ pH ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนต ความเข้มข้นของทอง อัตราส่วนระหว่างมวลของผงเหล็กต่อทอง อุณหภูมิ และความเร็วยก โดยที่ pH 2 เปอร์เซ็นต์ของการนำกลับได้สูงที่สุดของการเข้าไปแทนที่ของทอง โดยจะสูงกว่าที่ pH 1 และ pH 3 ความเข้มข้นของสารละลายไทโอไซยาเนตที่ 0.2 (MCN) เมื่อเทียบกับเวลาจะสามารถนำกลับได้สูงที่สุด ความเข้มข้นของทองที่ความเข้มข้น 20 mg/l มีความสามารถในการนำทองกลับโดยผงเหล็กเข้าไปแทนที่ได้สูงที่สุด อัตราส่วนระหว่างมวลของผงเหล็กต่อทองที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของการนำกลับจะสูงที่สุด ที่อุณหภูมิที่ 50 °C มีเปอร์เซ็นต์ของการนำกลับได้สูงที่สุด และความเร็วยกที่ความเร็วยกที่ 450 rpm เปอร์เซ็นต์ของการนำกลับสูงที่สุด ในการนำกลับของทอง สามารถสังเกตได้จากค่า Kinetic ที่เป็นดังสมการ First - Order (ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารทำปฏิกิริยาเดียว) ปริมาณของการตกตะกอนของทองที่มีปริมาณน้อย โดยจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการศึกษาการ

แทนที่ของทองโดยใช้ผงเหล็ก (Fe^{3+}) มีการเริ่มต้นที่จะศึกษาของการนำกลับของทอง โดยตัวที่ทำให้มีผลต่อการแทนที่ของทองนั้นขึ้นอยู่กับออกซิเจนในบรรยากาศด้วย

พันธุทธิ์ และสมัย (2551) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดและนำกลับทองแดงจากน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วซึ่งเป็นของเสียในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้ผงเหล็ก น้ำเสียมีความเป็นกรดสูงมากคือมีพีเอช 0.56 ทำให้ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปทองแดงประจุสองบวก ตรวจพบความเข้มข้นของทองแดงละลายเท่ากับ 17,258.02 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 99.86 ของทองแดงทั้งหมด จากผลการศึกษาพบว่า ภายหลังจากเติมผงเหล็กค่าไออาร์พีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และคงที่ในเวลาต่อมาโดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างสมบูรณ์เพียง 6 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเป็นโลหะที่สามารถให้อิเล็กตรอนกับไอออนทองแดงในน้ำเสียได้ง่าย ซึ่งกลไกในการกำจัดทองแดงคือ กระบวนการซีเมนเทนซ์หรือการแทนที่โลหะหนัก โดยภายหลังจากเติมผงเหล็กทองแดงได้ถูกเปลี่ยนรูปเป็นผงทองแดงเจริญบนพื้นผิวโดยรอบผงเหล็ก สภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงด้วยผงเหล็กคือ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 0.5 (ไม่ปรับพีเอช) ปริมาณผงเหล็ก 2 เท่าของจำนวนสตอยชิโอเมตริกให้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงละลายร้อยละ 98.63 ตะกอนทองแดงที่ได้ภายหลังจากบำบัดมีสีน้ำตาลแดงซึ่งประกอบด้วยทองแดงออกซิเดชันศูนย์ (Cu^0) และทองแดง (I) ออกไซด์ (Cu_2O) คิดเป็นร้อยละ 80.35 โดนน้ำหนักแห้ง และมีลักษณะอัดตัวแน่นทำให้สามารถตกตะกอนได้โดยใช้เวลาเพียง 1 นาที

3.6 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายกรด

ชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย

ใช้สารละลายคือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ Aqua regia (การผสม HCl เข้มข้น 3 ส่วน กับ HNO_3 เข้มข้น 1 ส่วน) ความเข้มข้น 2,4,6 โมลต่อลิตร

2. ทำกราฟมาตรฐานของโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิลและเหล็ก

3. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า

3.1 ศึกษาการกระจายตัวอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมี (ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้า)

3.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

3.4 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วย SEM-EDS Technique

4. การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy) โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า ดังนี้คือ

4.1 ชนิดของสารละลาย ได้แก่ กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และ กรดกัดทอง (aqua regia)

4.2 ความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ 2 4 และ 6 โมล/ลิตร

4.3 อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (แผ่นวงจรไฟฟ้า/สารละลาย) ได้แก่ 10 20 30 กรัม/50 มิลลิลิตร

เศษแผ่นวงจรไฟฟ้าบัด (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด ทำการชะละลายภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที และตรวจวัดปริมาณโลหะที่ถูกชะละลาย 4 ชนิดได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และ เหล็ก

5. การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทนซ์ด้วยผงเหล็ก

5.1 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าได้แก่ ค่าพีเอช โออาร์พี ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสีย (ทองแดงทั้งหมดและทองแดงละลาย) เครื่องมือที่ใช้คือ pH meter, ORP meter และ Atomic Adsorption Spectrophotometer ตามลำดับ

5.2 ขั้นตอนการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงเหล็ก (Iron Powder) ได้แก่

5.2.1 ลักษณะการกระจายตัวของผงเหล็กเพื่อทราบขนาดอนุภาคของผงเหล็ก โดยใช้วิธี ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis)

5.2.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงเหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

5.2.3 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณด้วย SEM-EDS Technique

5.3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทนซ์โดยใช้ผงเหล็ก มีรายละเอียดปัจจัยและขอบเขตการศึกษาดังนี้

5.3.1 ศึกษาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเทนซ์ที่สมบูรณ์ (0 5 10 20 40 60 90 120 นาที)

5.3.2 ศึกษาปริมาณการใช้ผงเหล็กในการนำกลับทองแดง (1 2 และ 3 เท่าของจำนวน สตอยชิโอเมตริก)

5.3.3 ศึกษาผลของพีเอชของน้ำชะต่อการนำกลับทองแดง (พีเอช 1 2 3 และ 4)

5.3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการนำกลับทองแดง (30 50 และ 70 องศาเซลเซียส)

6. การตกตะกอนของตะกอนทองแดงที่ได้จากกระบวนการซีเมนเทนซ์โดยใช้ผงเหล็กในสภาวะที่ดีที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1 ศึกษารูปแบบการตกตะกอน (Sedimentation Pattern)

6.2 ศึกษาความเร็วในการตกตะกอน (Settling Velocity : V_s)

7. องค์ประกอบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของตะกอนภายหลังการนำกลับทองแดง

7.1 ศึกษาชนิดของสารประกอบทองแดงในตะกอนโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer : XRD

7.2 ศึกษาปริมาณของทองแดงในตะกอนโดยรายงานผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงใน ตะกอน โดยการย่อย แล้ววิเคราะห์ด้วย Atomic Adsorption Spectrophotometer ; AAS เพื่อระบุ ความบริสุทธิ์ของตะกอนทองแดงที่ได้

7.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตะกอนทองแดงภายหลังการนำกลับโดยการวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

7.4 ศึกษาองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนทองแดงภายหลังการนำกลับด้วย SEM-EDS Technique

3.7 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.7.1 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของแผ่นวงจรไฟฟ้า

แผ่นวงจรไฟฟ้าที่ทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้า ที่ยังไม่แยกองค์ประกอบแสดงดังภาพที่ 3-1 และตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะที่ผ่านการบดแสดงดังภาพที่ 3-2 โดยแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด เป็นส่วนประกอบที่ผ่านกระบวนการแยกด้วยกระบวนการเชิงกล (Magnetic Separation Processing and Electrostatic Separation) เพื่อแยกโลหะกับอโลหะออกจากกัน โดยลักษณะทั่วไปในแผ่นวงจรไฟฟ้าพบองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ตัวเก็บประจุ ไอซี ตัวต้านทานต่างๆ แผ่นวงจรไฟฟ้าพลาสติกต่างๆ เช่น ปลอกสายไฟ ที่ครอบ วัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้า และยังมีองค์ประกอบที่เป็นโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว ดีบุก เหล็ก อลูมิเนียม ซิลิกอน และโลหะมีค่าคือ พลาตินัม ทอง พาลาเดียม เงิน (Hugo Marcelo Veit และคณะ, 2006)



ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ยังไม่แยกองค์ประกอบ

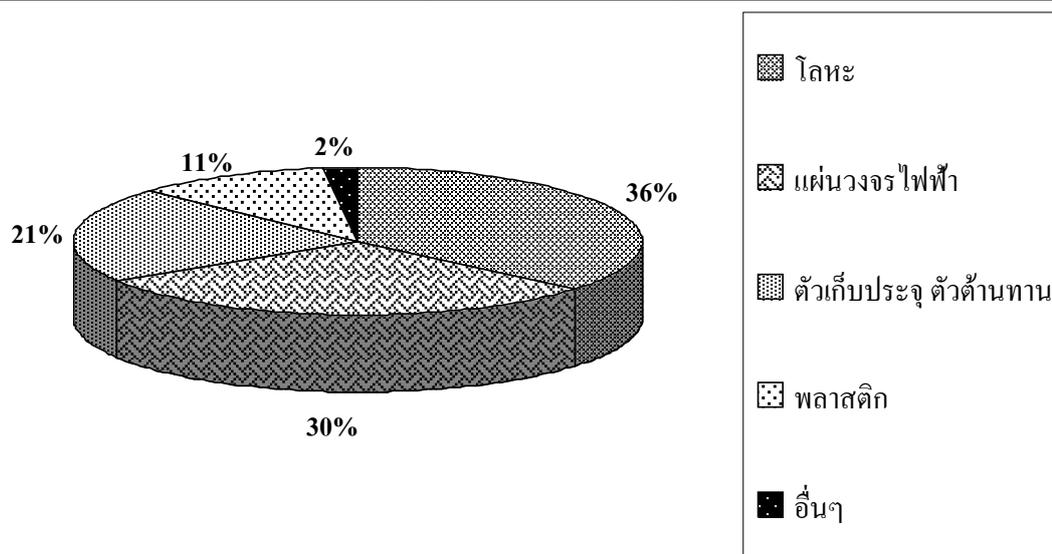


ภาพที่ 3-2 ตัวอย่างแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะที่ผ่านการบด

3.7.2 องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า (PCB)

องค์ประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้า (PCB)	น้ำหนักที่ชั่งได้ (กรัม)	ร้อยละโดยน้ำหนักของอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า
ตัวเก็บประจุ ไอซี ตัวต้านทานต่างๆ	210	21
โลหะ เช่น บล็อกเหล็ก ทองแดง แผ่นเหล็ก ตะกั่วทองเหลือง เส้นลวด แม่เหล็ก	360	36
พลาสติก เช่น บล็อกสายไฟ ที่คอบ	110	11
แผ่นวงจรพิมพ์	300	30
อื่นๆ	20	2
รวม	1,000 (กรัม)	100



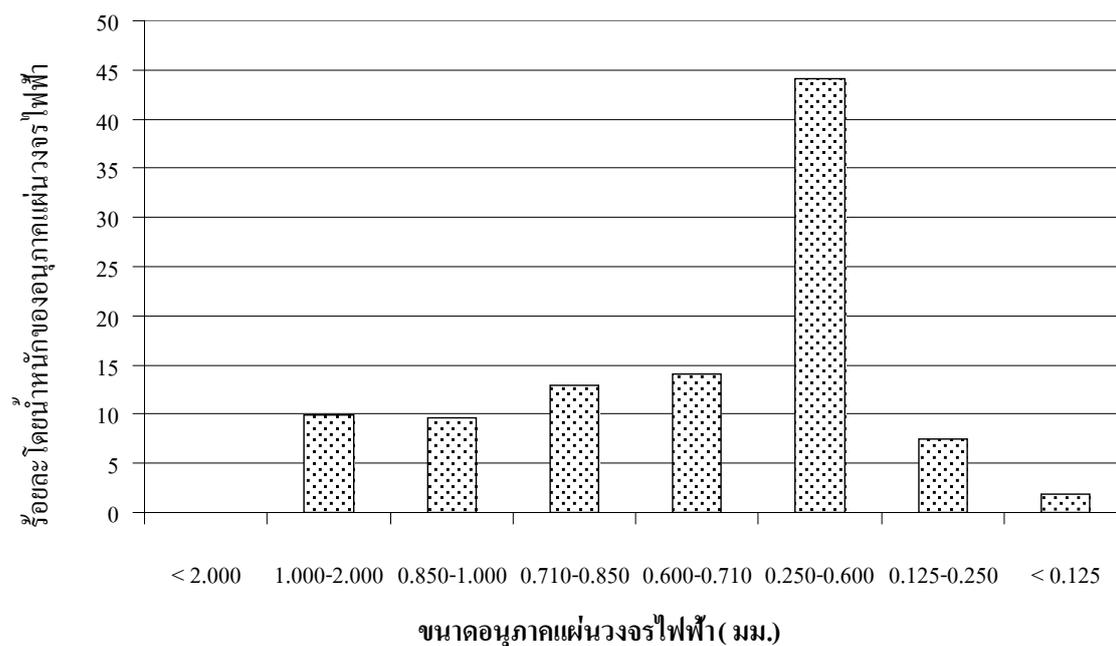
ภาพที่ 3-3 องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า

เมื่อนำแผ่นวงจรไฟฟ้ามาวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆโดยการแกะและแยกองค์ประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้าออกเป็นชิ้นส่วนต่างๆด้วยมือ แล้วทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งเราพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก เป็นโลหะ รองลงมาคือองค์ประกอบส่วนที่เป็นแผ่นวงจรไฟฟ้าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยทั้งสององค์ประกอบนี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยโลหะที่มีค่า เช่น ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว นิกเกิล (E.Y.L.Sum ,1991 และ M.Goosey และ R.Kellner, 2003) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก จึงได้มีการแยกและบดองค์ประกอบเหล่านี้มาทำการชะละลายด้วยสารละลายกรดเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะแต่ละชนิดต่อไป

3.7.3 การกระจายตัวอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)

ตารางที่ 3-2 การกระจายตัวอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)

เบอร์ ตะแกรง	ขนาดของ ช่องตะแกรง (มิลลิเมตร)	ขนาดอนุภาค แผ่นวงจรไฟฟ้า (มิลลิเมตร)	ปริมาณที่ ค้างตะแกรง (กรัม)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของอนุภาค PCB
10	2.000	> 2.000	0.00	0.00
18	1.000	2.000-1.000	99.40	9.94
20	0.850	1.000-0.850	96.09	9.61
25	0.710	0.850-0.710	128.65	12.86
30	0.600	0.710-0.600	141.47	14.15
60	0.250	0.600-0.250	441.71	44.17
120	0.125	0.250-0.125	74.23	7.42
270	น้อยกว่า 0.125	< 0.125	18.42	1.84

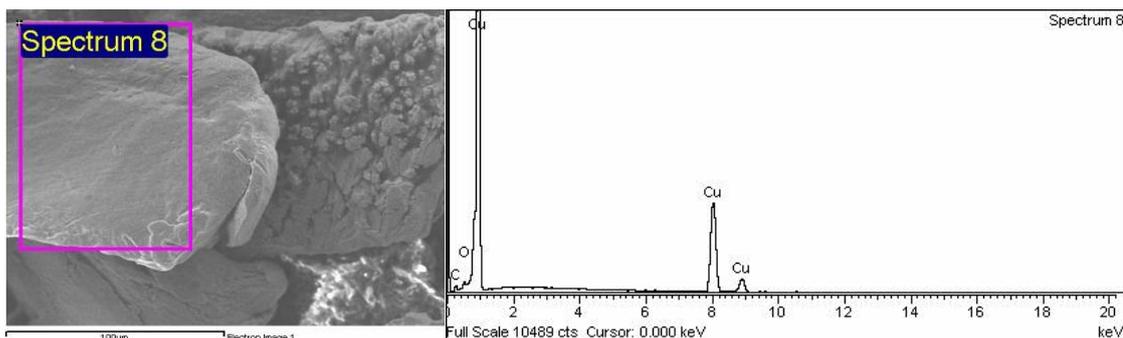


ภาพที่ 3-4 การกระจายตัวของอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้า (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ)

พบว่าขนาดอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้ามีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.125 – 1.000 มิลลิเมตร และพบว่าอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนใหญ่ร้อยละ 44.17 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.250-0.600 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นตัวแบ่งลำดับที่ส่งผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะ พบว่าแผ่นวงจรไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กย่อมมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาได้มากกว่าแผ่นวงจรไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่

3.7.4 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วย SEM-EDX Technique

เศษแผ่นวงจรไฟฟ้า เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะได้จากบริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด ซึ่งทำการตัดหรือบดให้มีขนาดเล็ก และได้ทำการศึกษากึ่งเชิงปริมาณโดยใช้ Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) แสดงดังภาพที่ 3-5 ส่วนใหญ่พบองค์ประกอบของธาตุทองแดงในปริมาณสูงที่สุด ถึงร้อยละ 90.33 นอกจากนั้นพบคาร์บอน, ออกซิเจน และอลูมิเนียม เป็นต้น แต่มีในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุทองแดง สอดคล้องกับ Hugo Marcelo Veit และคณะ (2006) ซึ่งพบว่าส่วนประกอบที่เป็นโลหะในแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ มีโลหะพื้นฐานที่สำคัญ เช่น ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว ดีบุก เหล็ก อลูมิเนียม ซิลิกอน และโลหะมีค่าคือ พลาตินัม ทอง พลาลาเดียม เงิน และในส่วนประกอบเหล่านี้ยังมีโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ตะกั่ว และแคดเมียม แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ อาจส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของตะกอนที่ได้ภายหลังกระบวนการนำกลับ เนื่องจากในขณะที่ทองแดงเริ่มทำปฏิกิริยาในการรับและให้อิเล็กตรอนร่วมกับเหล็ก อาจมีธาตุตัวอื่นสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เช่นกัน และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy :SEM) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวโครงสร้างภายนอกส่วนใหญ่มีลักษณะเรียบ



ภาพที่ 3-5 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วย SEM-EDS Technique

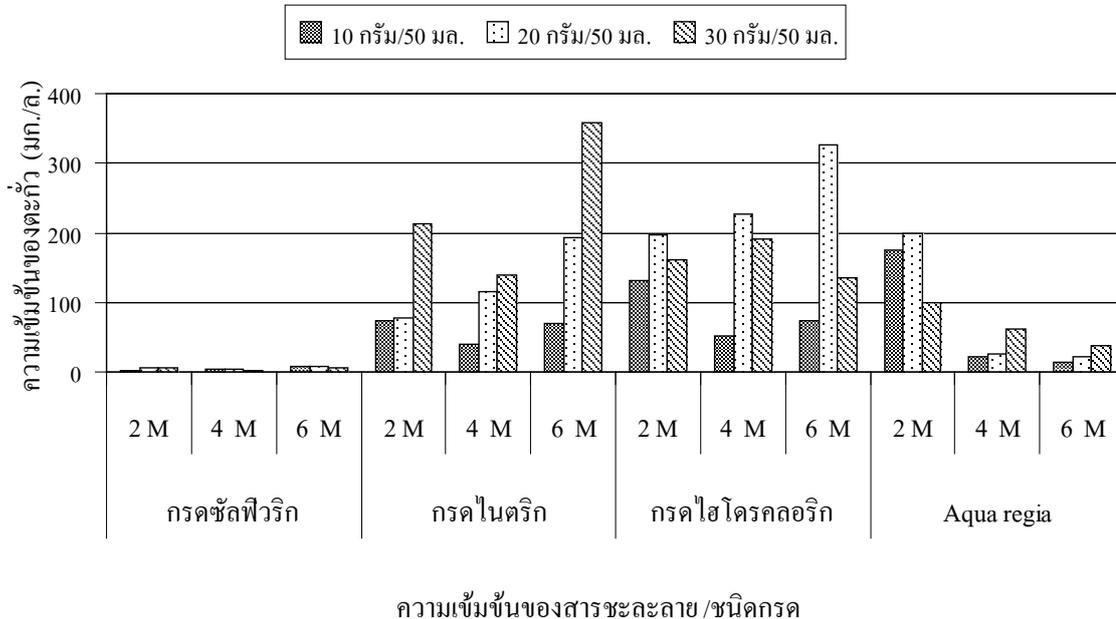
ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบธาตุที่พบในแผ่นวงจรไฟฟ้า

ธาตุที่พบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน	7.47
ออกซิเจน	2.20
ทองแดง	90.33

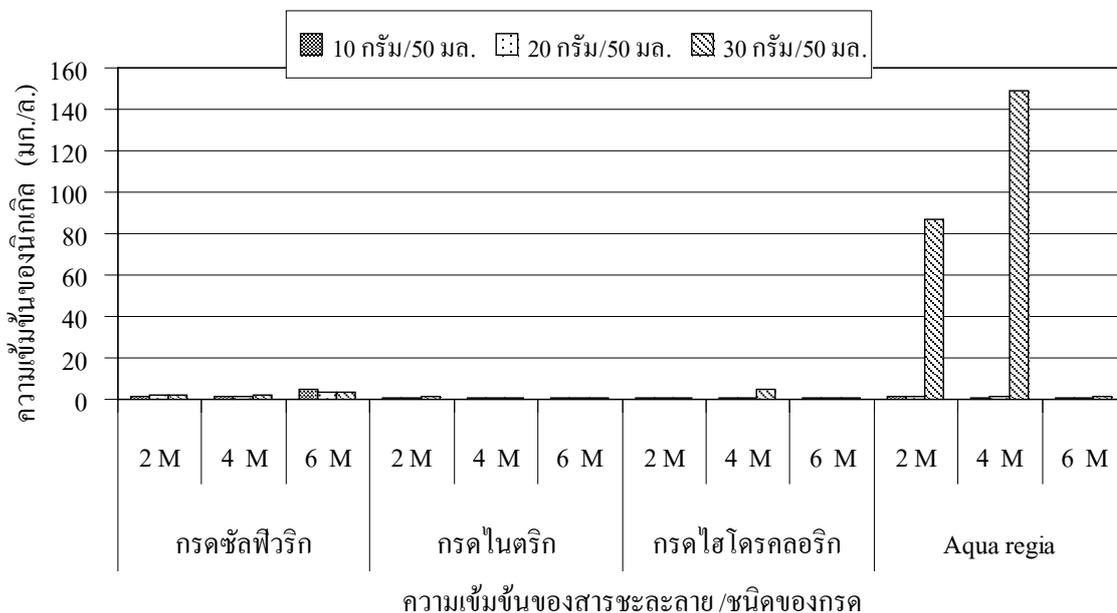
3.7.5 การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy) โดยพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า ดังนี้คือ

- ชนิดของสารชะละลาย ได้แก่ กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และ กรดกัดทอง
- ความเข้มข้นของสารชะละลายทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ 2 4 และ 6 โมล/ลิตร
- อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (แผ่นวงจรไฟฟ้า/สารชะละลาย) ได้แก่ 10 20 30 กรัม/50 มิลลิลิตร

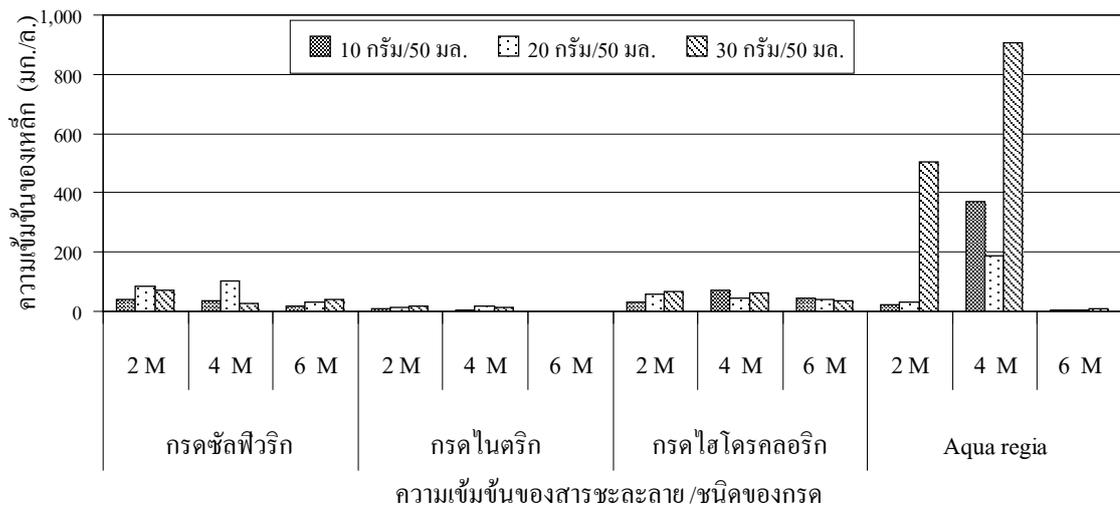
จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการชะละลาย ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารชะละลาย รวมถึงอัตราส่วนโลหะต่อสารชะละลาย (Solid/Liquid Ratio) ได้ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3-6 – 3-9 (รายละเอียดแสดงในตารางผนวกผลการทดลอง)



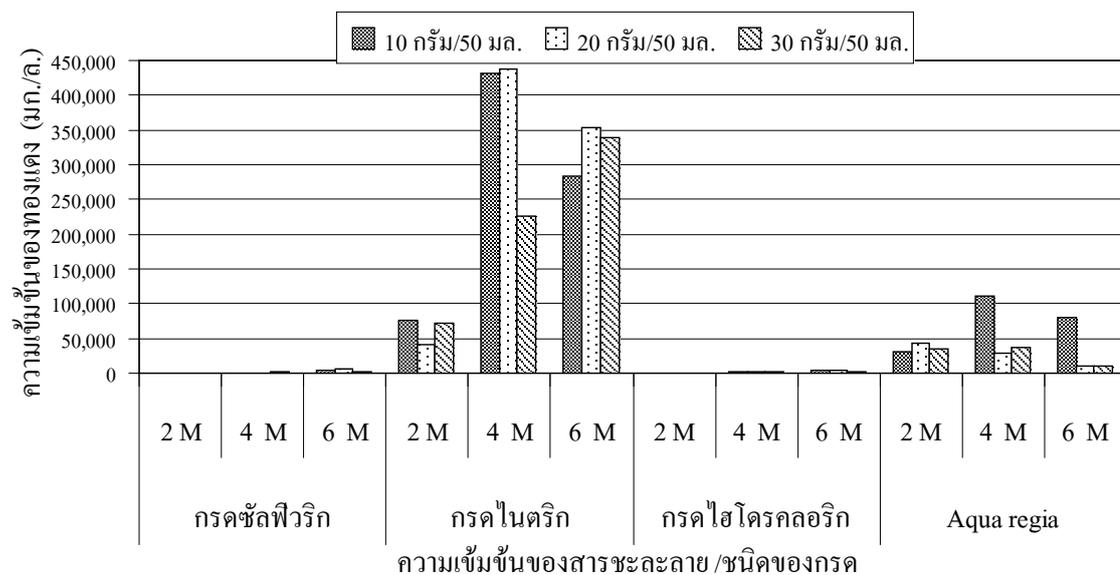
ภาพที่ 3-6 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 3-7 ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 3-8 ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 3-9 ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้า

จากการศึกษาปัจจัยในการชะละลายพบว่า มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย จากงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษปัจจัยในการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของกรดที่ใช้ในการชะละลาย คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และ Aqua regia ซึ่งเป็นกรดที่มีความสามารถในการชะละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นกรดแก่แตกตัวได้ร้อยละร้อย โดยพบว่าสารชะละลายที่มีความสามารถในการชะละลายตะกั่วได้ดีที่สุดคือ กรดไนตริก รองลงมาคือ กรดไฮโดรคลอริก Aqua regia และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ ส่วนสารชะละลายที่มีความสามารถในการชะละลายนิกเกิลได้ดีที่สุดคือ Aqua regia รองลงมาคือ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ตามลำดับ ส่วนสารชะละลายที่มีความสามารถในการชะละลายเหล็กได้ดีที่สุดคือ Aqua regia รองลงมาคือ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ตามลำดับ สารชะละลายที่มี

ความสามารถในการชะละลายทองแดงได้ดีที่สุดคือ กรดไนตริก รองลงมาคือ Aqua regia กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเลือกชนิดของตัวชะละลายต้องพิจารณาชนิดของโลหะเป็นสำคัญ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโลหะในการชะละลาย พบว่าโลหะที่ถูกชะละลายได้มากที่สุดคือ ทองแดง รองลงมาคือ เหล็ก ตะกั่ว และนิกเกิล สาเหตุที่โลหะทองแดงสามารถถูกชะละลายได้มากที่สุด เนื่องจากองค์ประกอบของแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะนั้นประกอบด้วยโลหะทองแดงในปริมาณที่มากกว่า เหล็ก ตะกั่ว และนิกเกิล (E.Y.L.Sum ,1991 และ M.Goosey และ R.Kellner, 2003) จึงทำให้ทองแดงสามารถชะละลายออกมาได้มาก และยังขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ โดยโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่าโลหะอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใด ซึ่งโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิกที่อยู่ในน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย ประกอบกับสารชะละลายเป็นกรดแก่ซึ่งมีพีเอชต่ำ ทำให้ความสามารถในการชะละลายของโลหะได้ไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าโลหะนิกเกิลมีความสามารถในการละลายได้ดีที่สุด รองลงมา คือ ตะกั่ว ทองแดง และเหล็ก

การเพิ่มความสามารถในการชะละลายโลหะที่ถูกชะละลายได้ยาก จึงอาจทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารชะละลายเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณโปรตอนให้กับสารชะละลาย หรือการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการชะละลายพบว่าปฏิกิริยาการชะละลายส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มขึ้น หรือการเปลี่ยนอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (S/L Ratio) ให้มีค่าลดลง เป็นต้น

จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายโลหะหนักจากแผ่นวงจรไฟฟ้า ต้องพิจารณารวมทั้ง ชนิดของสารชะละลาย ความเข้มข้นของสารชะละลาย รวมทั้งอัตราส่วนของแผ่นวงจรไฟฟ้ากับปริมาณสารชะละลาย (S/L Ratio) รวมถึงอุณหภูมิและเวลาในการชะละลาย

พบว่าประสิทธิภาพการชะละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารชะละลายสูง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของสารชะละลายที่จะไปชะละลายโลหะมีปริมาณมากขึ้น และเมื่อปริมาณโลหะที่จะละลายไม่สามารถละลายได้ในสภาวะนี้ ถึงแม้ปริมาณความเข้มข้นของสารชะละลายที่เพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อการชะละลายอีก ประสิทธิภาพการชะละลายจะลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างโลหะต่อสารชะละลายเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณโลหะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแย่งชิงกันในการละลาย ซึ่งสารชะละลายมีความสามารถในการชะละลายได้ค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าปริมาณโลหะเพิ่มขึ้นการชะละลายจะเริ่มลดลง (ศุภคັນส์และคณะ, 2549)

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการชะละลายโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารชะละลาย รวมถึงอัตราส่วนระหว่างโลหะต่อสารชะละลาย ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมต่อการชะละลายโลหะทองแดง เหล็ก ตะกั่ว นิกเกิล จากแผ่นวงจรไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 3-4 (รายละเอียดแสดงในตารางผนวผลการทดลอง)

จากตารางที่ 3-4 พบว่าโลหะที่สามารถถูกชะละลายออกมาได้มากที่สุดคือ ทองแดง คิดเป็นร้อยละ 96.71 โดยน้ำหนัก ส่วนโลหะ เหล็ก ตะกั่ว นิกเกิล สามารถชะละลายออกมาได้น้อย และนอกจากนี้ยังมีโลหะชนิดอื่นที่เป็นองค์ประกอบในแผ่นวงจรไฟฟ้า ได้แก่ เงิน ดีบุก พลาทินัม เป็นต้น การที่โลหะ เหล็ก ตะกั่ว นิกเกิล ถูกชะละลายออกมาได้น้อย ย่อมส่งผลต่อการนำกลับโลหะทองแดง เพราะจะทำให้การนำกลับทองแดงทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารละลายที่ได้จากการชะทองแดงมีความบริสุทธิ์ของทองแดงสูง จึงไม่มีปฏิกิริยารบกวนจากโลหะชนิดอื่น และทำให้ได้ปริมาณทองแดงที่สูงและบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น

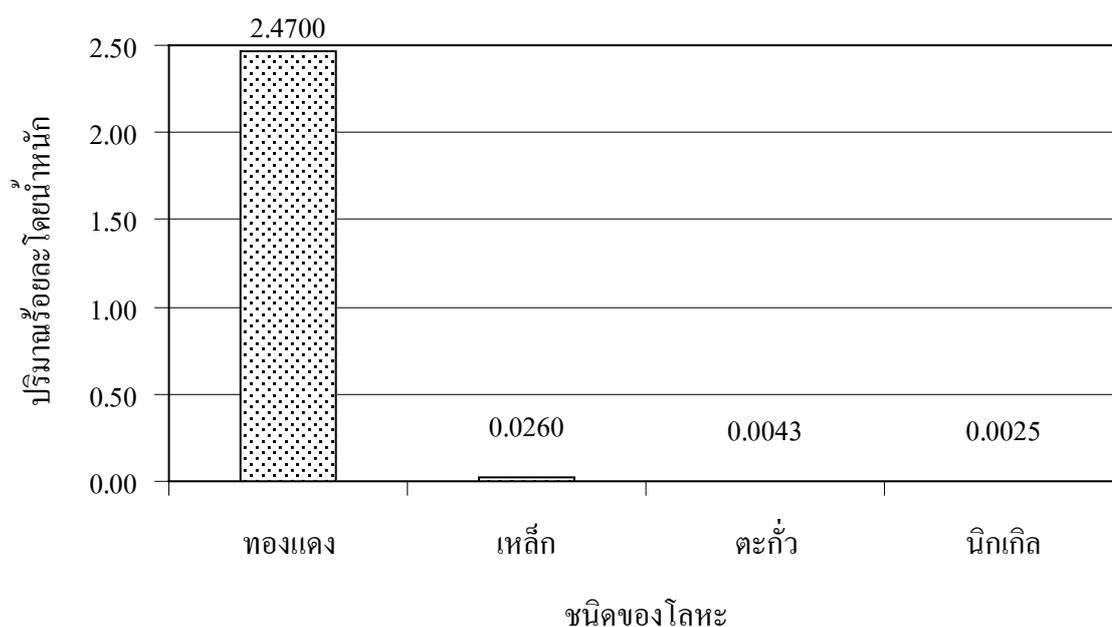
ตารางที่ 3-4 สภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า

ชนิดของโลหะ	ชนิดของสารชะละลาย	ความเข้มข้นสารชะละลาย (โมล/ลิตร)	อัตราส่วนโลหะต่อสารชะละลาย (กรัม/50 มล.)	ความเข้มข้นของโลหะในสารชะละลาย (มก./ล.)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (โลหะที่ใช้กรัม)
ทองแดง	ไนตริก	4	20	386,820	96.71 (20)
เหล็ก	Aqua regia	4	30	906.82	0.15 (30)
ตะกั่ว	ไนตริก	6	30	357.41	0.06 (30)
นิกเกิล	Aqua regia	4	30	148.95	0.02 (30)

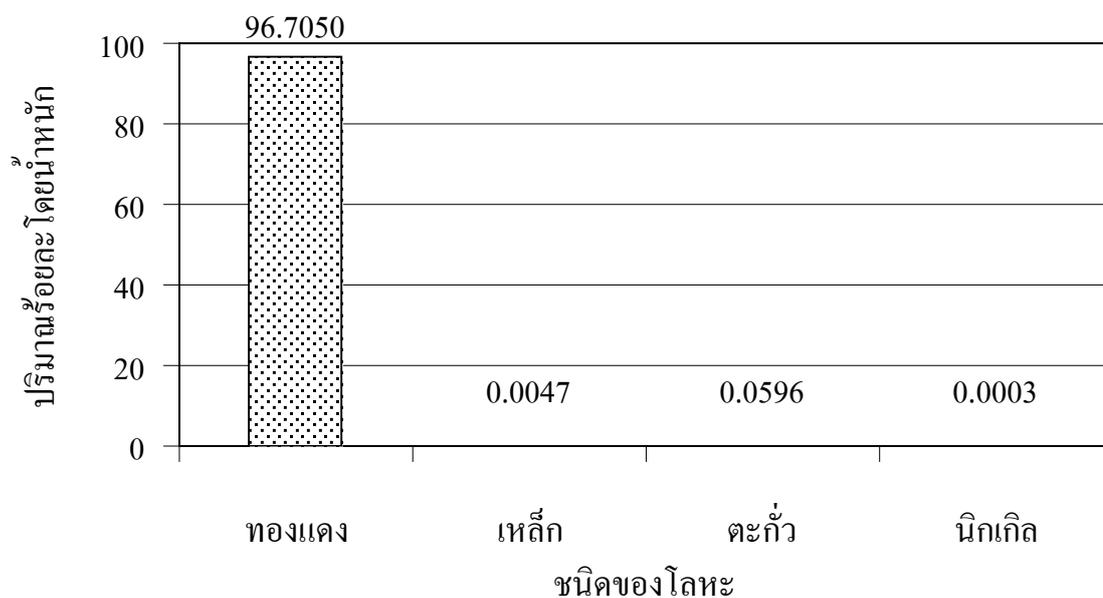
หมายเหตุ : จากน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้วในสภาวะที่เหมาะสมของโลหะแต่ละชนิด

3.7.6 องค์ประกอบในแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนที่เป็นโลหะ

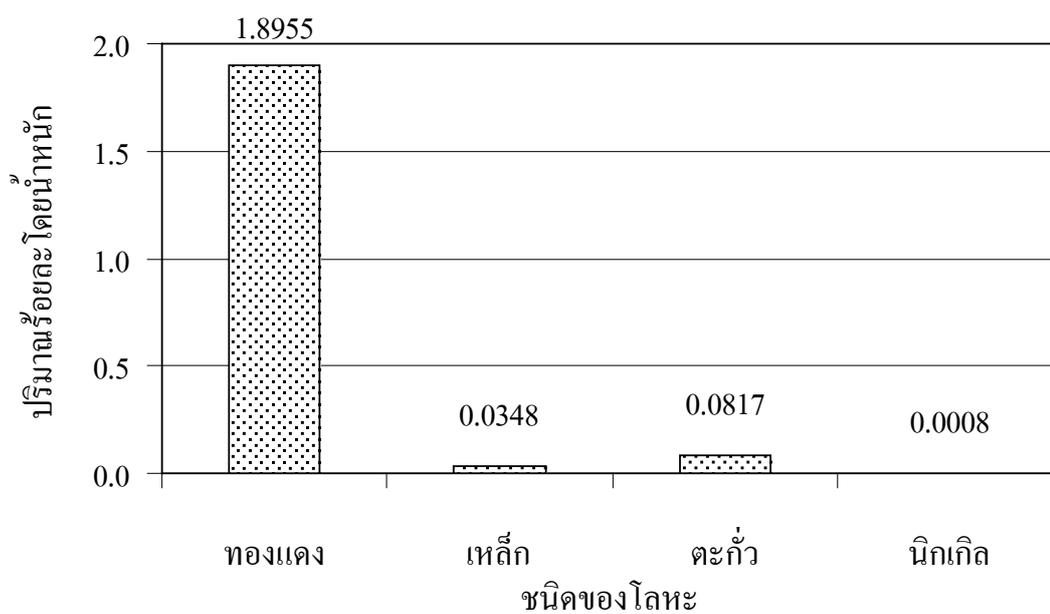
จากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้สารชะละลายต่างชนิดกัน ให้ค่าผลความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในการชะละลายมีค่าแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะทองแดง เหล็ก ตะกั่ว นิกเกิล แสดงดังภาพที่ 3-10 – 3-13



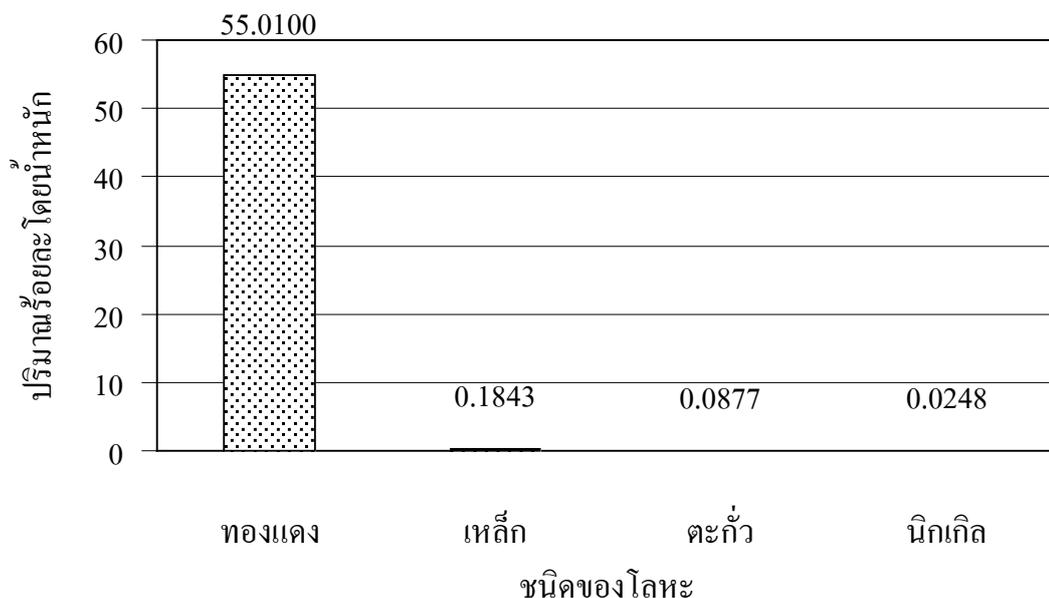
ภาพที่ 3-10 ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก



ภาพที่ 3-11 ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดไนตริก



ภาพที่ 3-12 ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก



ภาพที่ 3-13 ปริมาณโลหะที่ชะละลายด้วย Aqua regia

จากการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่าความเข้มข้นของโลหะทองแดงในสารชะละลายมากถึง 386,820 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 96.71 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไนตริก 4 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโลหะแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรดไนตริก 20 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของโลหะเหล็กในสารชะละลาย 906.82 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของ Aqua regia 4 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโลหะแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อ Aqua regia 30 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารชะละลาย 357.405 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไนตริก 6 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโลหะแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรดไนตริก 30 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของโลหะนิกเกิลในสารชะละลาย 148.95 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของ Aqua regia 4 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโลหะแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อ Aqua regia 30 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร

ดังนั้นหากพิจารณาแนวทางการนำกลับโลหะจากการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าควรเลือกนำกลับโลหะทองแดง เพราะคุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากการชะละลายจากแผ่นวงจรไฟฟ้าทำได้ง่าย ให้ความเข้มข้นในการชะละลายและให้ร้อยละโดยน้ำหนักสูงที่สุด อีกทั้งเป็นโลหะที่มีศักยภาพในการนำกลับด้วยกระบวนการรีดักชันได้ดีเนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่ง่ายต่อการรับอิเล็กตรอน เมื่อพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของทองแดง ซึ่งมีค่าเท่ากับ +0.34 โวลต์ (Metcalf และ Eddy, 1991)

3.7.7 การชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า

โดยทำการศึกษาการชะละลายโลหะทองแดงจากเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี (chemical hydrometallurgy) ภายใต้สภาวะที่สามารถชะโลหะทองแดงได้ความเข้มข้นสูงที่สุดดังต่อไปนี้

- 1.1 อุณหภูมิในการชะละลาย 80 องศาเซลเซียส
- 1.2 ระยะเวลาในการชะละลายเป็นเวลา 120 นาที

- 1.3 สารละลายที่ใช้คือกรดไนตริก
- 1.4 ความเข้มข้นของกรดไนตริก 4 โมลต่อลิตร
- 1.5 อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (แผ่นวงจรไฟฟ้าต่อสารละลาย) 20 กรัมต่อ 50 มิลลิลิตร หรือ 400 กรัมต่อลิตร

3.7.8 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ได้จากการชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกรดไนตริก โดยใช้เศษแผ่นวงจรไฟฟ้า (PCB) จากบริษัท นาโมยะ ซินโป เนชั่น กรุ๊ป จำกัด ซึ่งทำการตัดและบดให้มีขนาดเล็ก ใช้อัตราส่วนระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรดไนตริก คือ 20:50 กรัมต่อมิลลิลิตร (400 กรัม/ลิตร) จากการวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า ได้ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า

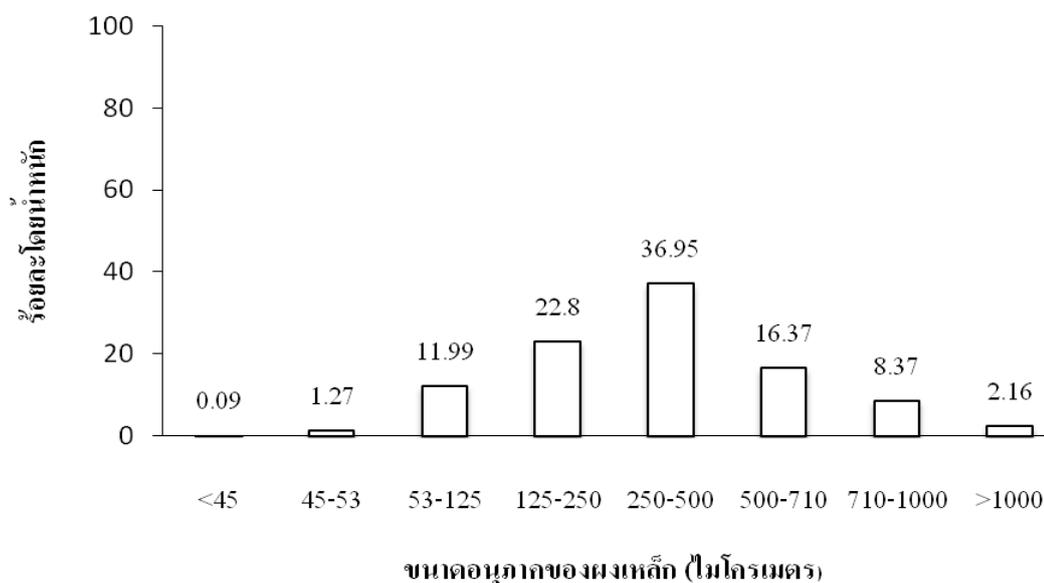
พารามิเตอร์เบื้องต้นที่ทำการตรวจวัด	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
พีเอช	-	0.92
ไออาร์พี	มิลลิโวลต์	343
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	24.1
ความเข้มข้นของทองแดงละลายทั้งหมด	มก./ล.	386,820

พีเอชของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.92 ซึ่งมีความเป็นกรดสูงมาก เนื่องจากขั้นตอนของการใช้กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นสูงถึง 4 โมลต่อลิตร ในการชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า ดังนั้นน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์จึงแสดงสถานะที่เป็นกรดความเข้มข้นสูง

น้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้ามีความเข้มข้นของทองแดงละลายทั้งหมด 386,820 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเติมผงเหล็ก ผลจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความรุนแรง เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก และควันที่เกิดขึ้นมีสีน้ำตาลแดง ดังนั้นก่อนการทดสอบในขั้นตอนของกระบวนการซีเมนเทนชัน จึงได้ทำการเจือจางน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าในอัตราส่วน 16 เท่า ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 10 % (พีเอชของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง) ทั้งนี้เพื่อลดความรุนแรงของปฏิกิริยาดังกล่าว อีกทั้งทำให้การวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงทำได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยความเข้มข้นของทองแดงก่อนทดสอบกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์มีค่า 24,064 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 0.92

3.7.9 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก (iron powder)

การกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก ทดสอบโดยใช้ตะแกรงร่อน (sieve analysis) ได้ผลแสดงดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 การกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก

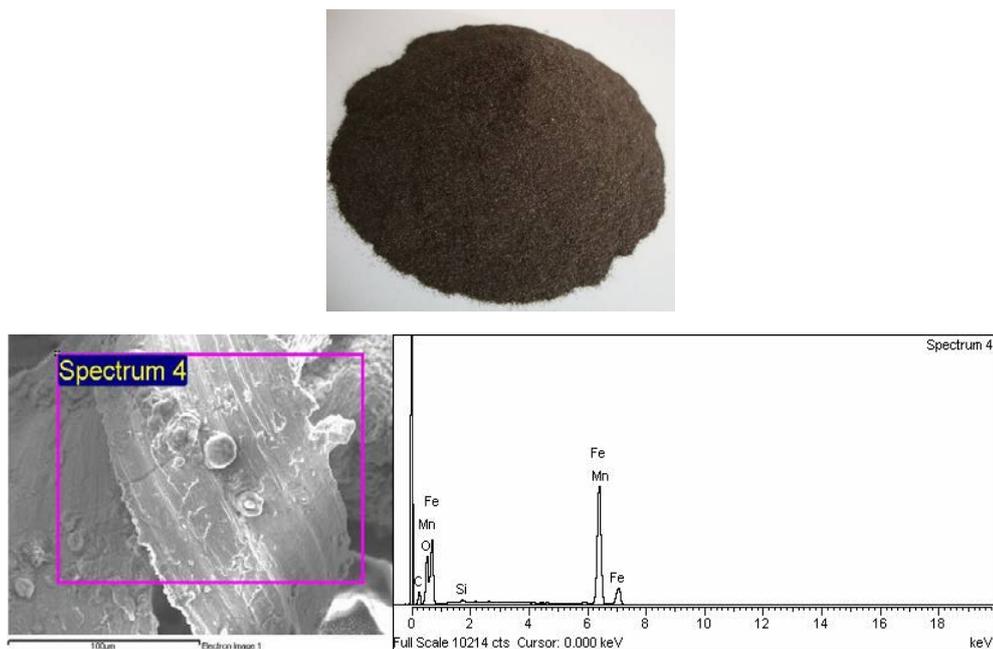
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก พบว่าขนาดอนุภาคผงเหล็กส่วนใหญ่อยู่ในช่วงใหญ่กว่า 45 - 1,000 ไมโครเมตร โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 36.95 มีขนาดอนุภาคของผงเหล็กอยู่ในช่วง 250 - 500 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคมีผลต่อความสามารถในการละลายของผงเหล็กในน้ำ ชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าและประสิทธิภาพของกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์

3.7.10 ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุของอนุภาคผงเหล็ก

ผงเหล็ก ได้มาจากกิจกรรมการตะไบเหล็กหรือการกลึง พบว่ามีขนาดเล็กละเอียด สีดำ และได้ทำการศึกษาองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณโดยใช้ Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) แสดงดังภาพที่ 15 พบว่านอกจากองค์ประกอบของธาตุเหล็กที่พบเป็นส่วนใหญ่มากถึงร้อยละ 87.13 แล้วยังพบธาตุอื่นๆ เช่น คาร์บอน, ออกซิเจน, อะลูมิเนียม, โครเมียม และแมงกานีส ดังตารางที่ 3-6 และจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy :SEM) แสดงให้เห็นว่าผงเหล็กมีลักษณะเป็นเกลียว และพื้นผิวโครงสร้างภายนอกเรียบและขรุขระสลับกัน

ตารางที่ 3-6 องค์ประกอบธาตุที่พบในผงเหล็ก

ธาตุที่พบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน	9.22
ออกซิเจน	2.41
อะลูมิเนียม	0.32
โครเมียม	0.29
แมงกานีส	0.62
เหล็ก	87.13

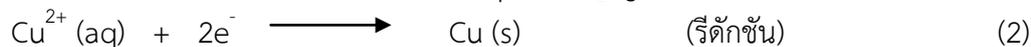
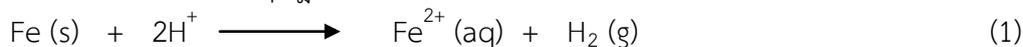


ภาพที่ 3-15 ลักษณะทางกายภาพ สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคผงเหล็ก

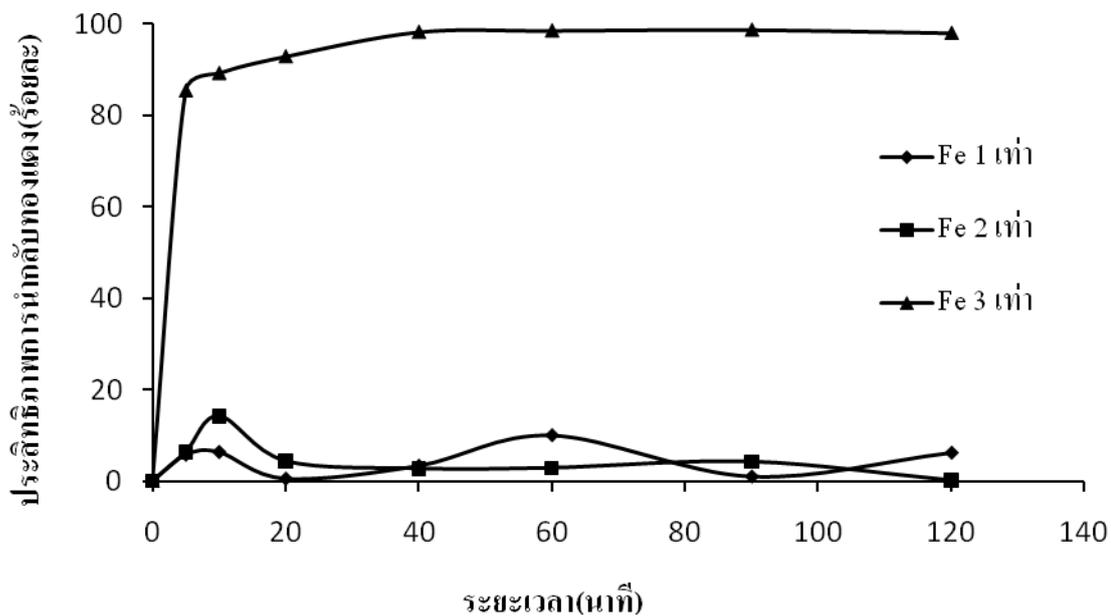
3.7.11 ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์

3.7.11.1 ผลของพีเอชเริ่มต้นและปริมาณผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง

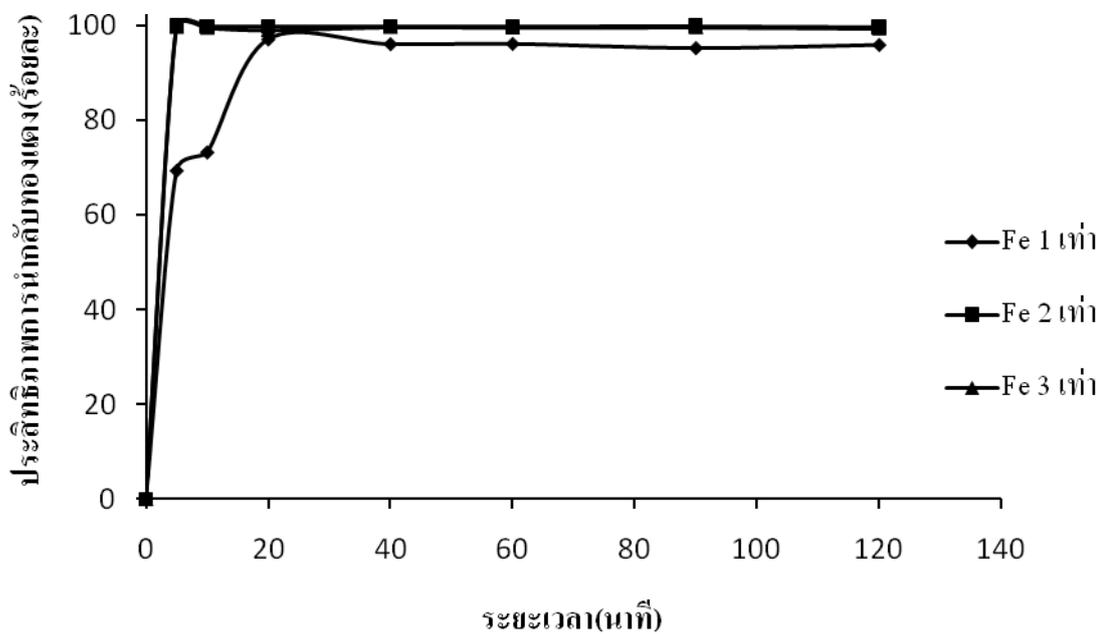
ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงพิจารณาจากความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับเป็นหลัก ผลการทดลองหาค่าพีเอชและปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงซึ่งมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 24,064 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าให้มากขึ้นจาก 0.92 เป็น 2, 3 และ 4 จากนั้นเติมผงเหล็กในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าตามจำนวนเท่าของสตอยชิโอเมตริก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเพิ่มสูงขึ้น โดยสังเกตจากการเติมผงเหล็กปริมาณ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกจะให้ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงที่สุด เหตุที่ต้องใช้ผงเหล็กมากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากในสมการที่ (1) - (4)



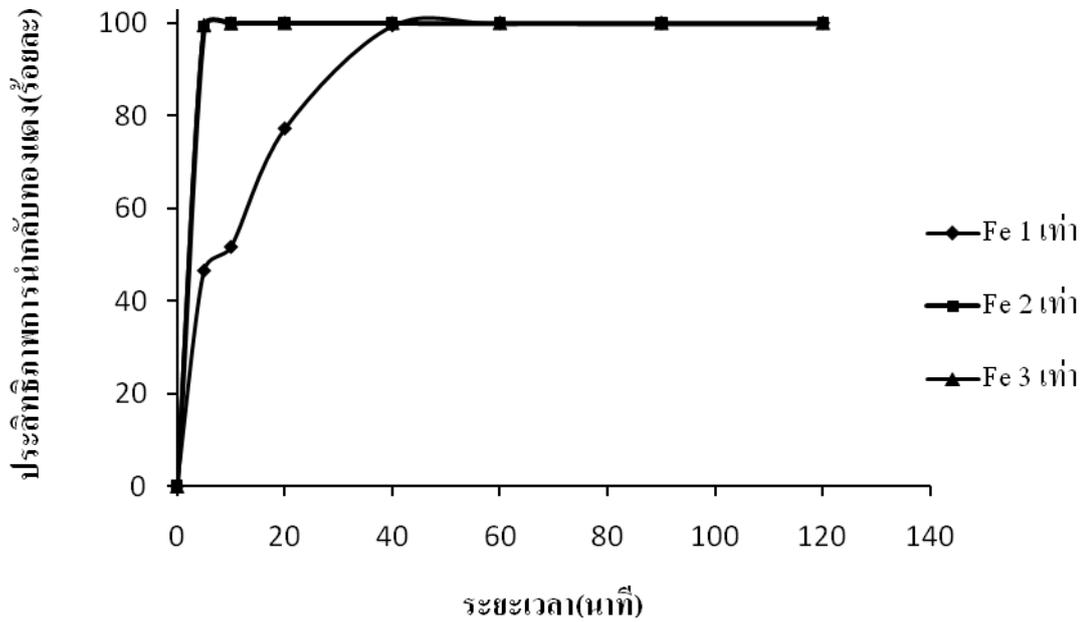
โดยเมื่อเติมผงเหล็กในสภาวะกรด ทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจากการเกิดก๊าซไฮโดเจน เป็นผลให้ต้องใช้ผงเหล็กเพื่อให้อิเล็กตรอนกับอ็อกไซด์ทองแดงในปริมาณที่มากขึ้นแสดงดังภาพที่ 3-16



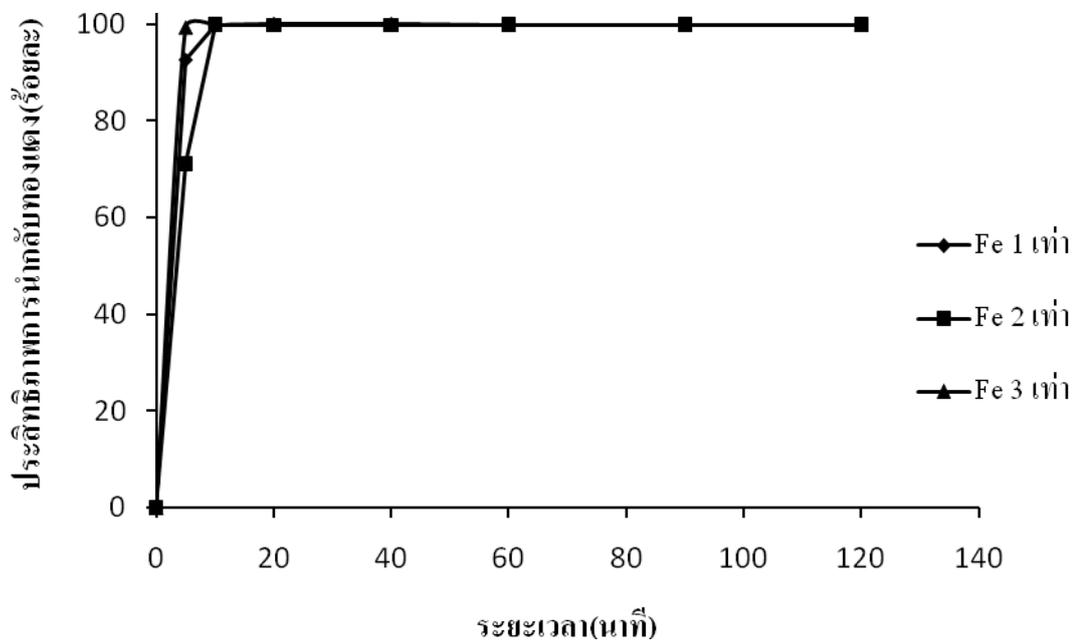
ภาพที่ 3-16ก ผลของพีเอชเริ่มต้น 0.92 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง



ภาพที่ 3-16ข ผลของพีเอชเริ่มต้น 2 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง



ภาพที่ 3-16ค ผลของพีเอชเริ่มต้น 3 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง

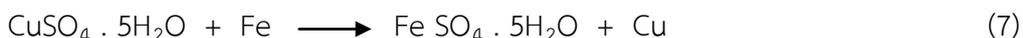


ภาพที่ 3-16ง ผลของพีเอชเริ่มต้น 4 และปริมาณการเติมผงเหล็กต่อการนำกลับทองแดง

ภาพที่ 3-16 ทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นและปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมต่อการนำกลับทองแดง ในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า พบว่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณผงเหล็กส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำกลับทองแดง ซึ่งพิจารณาจากความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับเป็นหลัก เมื่อเติมผงเหล็กในปริมาณ 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริก และวิเคราะห์ความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าพบว่า มีความเข้มข้นของทองแดงละลายเหลืออยู่ที่ 0 – 24,064 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงละลายร้อยละ 0 – 99.99 โดยการที่ความเข้มข้นของทองแดงละลายที่ลดลงนั้นเนื่องมาจาก การเติมผงเหล็กลงไป ในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า ซึ่งผงเหล็กจะทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนแก่ทองแดงในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า จึงทำให้เกิดกลไกการแทนที่ด้วยโลหะ (metallic replacement) หรือกระบวนการซีเมนเทนชัน (cementation process) Khudenko (1984) อธิบายได้ว่าซีเมนเทนชัน (cementation) เป็นกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง โดยธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นลบกว่า (เช่น เหล็ก สังกะสี เป็นต้น) เข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับธาตุที่มีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกกว่า (เช่น ไอออนทองแดง ไอออนเงิน ไอออนปรอท ไอออนตะกั่ว เป็นต้น) ทำให้ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นบวกกว่า เหล่านั้นถูกแยกออกจากสารละลาย ตกตะกอนลงมาได้ พบว่าปริมาณทองแดงละลายในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0) ทองแดงเป็นโลหะที่สามารถรับอิเล็กตรอน (ตัวออกซิไดซ์) ได้ดีกว่าเหล็ก จึงเกิดการแทนที่ของไอออนทองแดงด้วยไอออนของเหล็กขึ้นโดยค่า E^0 ของทองแดงเท่ากับ 0.34 โวลต์ และค่า E^0 ของเหล็กเท่ากับ -0.41 โวลต์ (ลัดดา, 2548) เหล็กจึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงและสามารถให้อิเล็กตรอนแก่ทองแดง ภายหลังจากทองแดงรับอิเล็กตรอนจึงเปลี่ยนสถานะเป็นทองแดงในสภาวะที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble) หรือทองแดงที่มีเลเซอร์ออกซิเดชันลดลง (บวกหนึ่ง) หรือเลเซอร์ออกซิเดชันศูนย์ การทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Ku และ Chen (1992) ซึ่งได้เติมผงเหล็ก (Fe^0) ในสารละลาย Cu-EDTA หลังจากเติมผงเหล็กขนาด 150 ไมโครเมตรจะทำให้ Cu-EDTA แยกออกและสามารถแยกทองแดงออกได้ด้วยการตกตะกอนโดยมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 99.99 แสดงดังสมการที่ 4-5 และ 4-6



และ Fouad และคณะ (2005) ศึกษาการนำกลับทองแดงจากสารละลายที่สกัดจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการแทนที่ด้วยโลหะ (cementation process) โดยใช้ผงเหล็ก เมื่อเติมผงเหล็กในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ 4-7



โดยพีเอชเริ่มต้น 2, 3 และ 4 ให้ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงสูงถึงร้อยละ 99.99 พีเอชเริ่มต้น 0.92 ปริมาณการเติมผงเหล็กส่งผลต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดง ซึ่งมีความจำเป็นต้องเติมผงเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้ามีองค์ประกอบของโลหะอื่นร่วมด้วย ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และเหล็ก เป็นต้น จากภาพที่ 3-16ก – 3-16ง พบว่าหากเติมผงเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การเกิดกระบวนการนำกลับทองแดงเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

ผลการทดลองเป็นไปตามการอธิบายสุทธาธิปไตย (2541) โดยทองแดง (Cu^{2+}) เป็นสารรับอิเล็กตรอน (ตัวออกซิไดซ์) ซึ่งใช้เหล็กเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (ตัวรีดิวซ์) และการเติมแผ่นอลูมิเนียมแอนโอดร่วมกับโซเดียมคลอไรด์ในน้ำยาคัดทองแดง พบว่าอลูมิเนียมสามารถให้อิเล็กตรอนกับไอออนทองแดงที่

ละลายในน้ำเสียได้ง่าย (ศรียุตา และศุภาวดี, 2550) รวมถึงการศึกษาการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์เพื่อรีดิวซ์ทองแดงจากน้ำยากัดทองแดง พบว่าเหล็กเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่ทองแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำกลับทองแดงได้สูงถึงร้อยละ 98.63 (พันฤทธิและสมัย, 2551)

และ Fang-Chin Chang (2007) ศึกษาการกำจัดสารละลายปนเปื้อนกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนทองแดงที่สกัดออกจากตะกอนที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า โดยวิธีการแทนที่โลหะหนักด้วยผงเหล็ก (cementation on powder iron) ประยุกต์กับการนำกลับทองแดงและการสกัดโลหะด้วยสารละลาย EDTA และ DTPA พร้อมกับการปรับสภาพสารละลายโดยการตกตะกอนโลหะหนักจากสารละลายที่สกัดออกจากกากตะกอนแผ่นวงจรไฟฟ้า ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมลาร์ของเหล็กต่อทองแดง

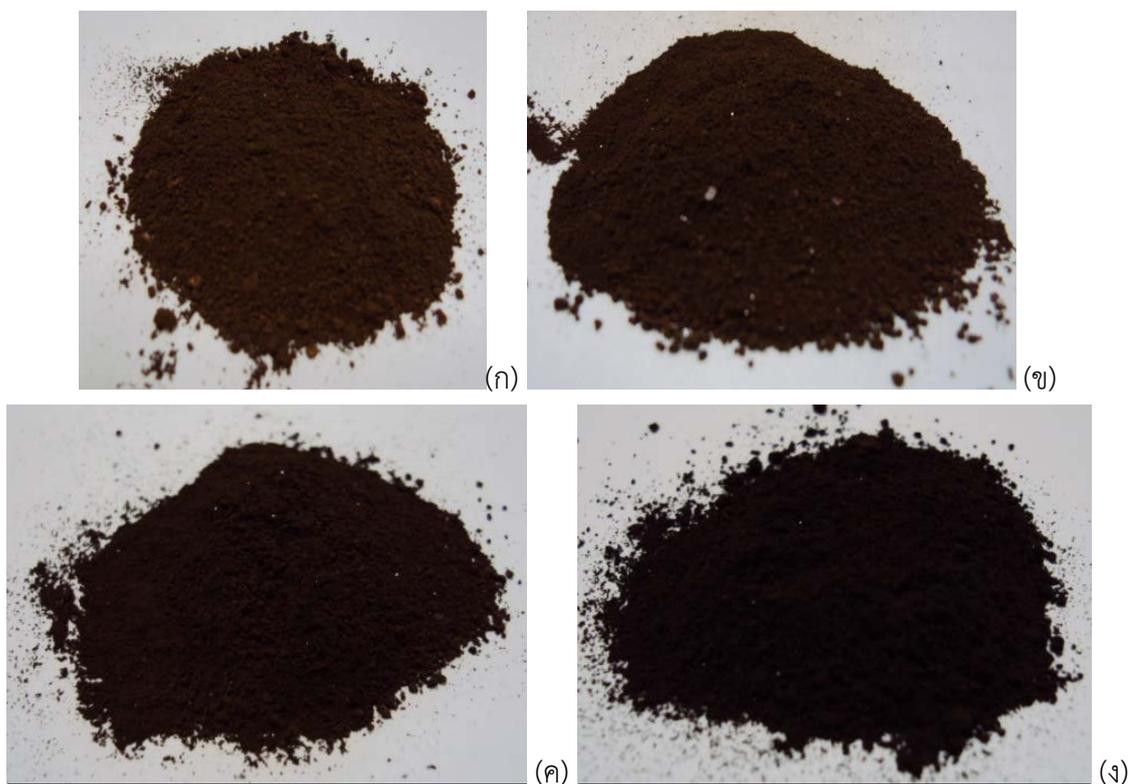
จากการทดลองสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงด้วยกระบวนการซีเมนเทนชันโดยใช้ผงเหล็ก แสดงดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงโดยใช้ผงเหล็ก

พีเอชเริ่มต้น น้ำชะเศษแผ่น วงจรไฟฟ้า	ปริมาณ ผงเหล็ก (จำนวนเท่า)	ความเข้มข้น ของทองแดง ละลายที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การนำกลับทองแดง ละลาย (ร้อยละ)	พีเอช สุดท้าย	โออาร์พี สุดท้าย (มิลลิโวลต์)
0.92	3	291.67	98.01	1.50	424
2	2	60.15	99.75	2.75	367
3	1	7.043	99.97	3.16	274
4	2	11.09	99.95	2.80	390

จากตารางที่ 3-7 พบว่า พีเอชสุดท้ายของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกสภาวะ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดฟองก๊าซในปริมาณมาก ซึ่งเป็นไฮโดรเจนก๊าซ ทำให้ระบบสูญเสียไฮโดรเจนอิออนไป พีเอชสุดท้ายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าโออาร์พีค่อนข้างมีค่าคงที่จากเริ่มต้น เนื่องจากกลไกของกระบวนการรีดักชันระหว่างทองแดงในน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้ากับผงเหล็กมีทั้งกลไกการให้และรับอิเล็กตรอน ในการทดลองขั้นต่อไปเลือกสภาวะพีเอชเริ่มต้นของน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าเท่ากับ 3 ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูง สอดคล้องกับพีเอชสุดท้ายที่สูงขึ้นและเป็นสภาวะที่ค่าโออาร์พีลดลงจากเริ่มต้นปฏิกิริยารีดักชันจึงโดดเด่น นั่นคืออ็อกซิเดชันทองแดงถูกรีดิวซ์ได้มากที่สุด อีกทั้งคาดว่าจะให้ความบริสุทธิ์ของตะกอนทองแดงได้ดีที่สุด และเนื่องจากเมื่อพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้นเป็น 4 มีแนวโน้มที่อ็อกซิเดชันเหล็กจะเกิดการรวมตัวกับไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของเฟอร์ริไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) ซึ่งส่งผลให้ค่าโออาร์พีของตะกอนทองแดงลดลง (เกรียงศักดิ์, 2542) เมื่อสังเกตได้จากสีของตะกอนทองแดงที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 3-16 เห็นได้ว่าตะกอนทองแดงภายหลังกระบวนการนำกลับทองแดง มีลักษณะและสีที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบ หรือสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับอ็อกซิเดชันอื่นๆในตะกอน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพีเอชเริ่มต้นและพีเอชสุดท้ายภายหลังกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับ

Demirkiran และคณะ(2006) ได้ทำการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการซีเมนเทนชั่นทองแดงในน้ำเสียด้วยผงสังกะสี พบว่าที่พีเอชของน้ำเสียเท่ากันเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการซีเมนเทนชั่น (cementation rate) สูงขึ้นโดยพีเอชเท่ากับ 1-4 อัตราการเกิดกระบวนการซีเมนเทนชั่นจะสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพีเอชเป็น 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3-17 (ก)-(ง) ตะกอนทองแดงภายหลังกระบวนการนำกลับพีเอชเริ่มต้น 0.92, 2, 3 และ 4

ปริมาณผงเหล็กและพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับทองแดง

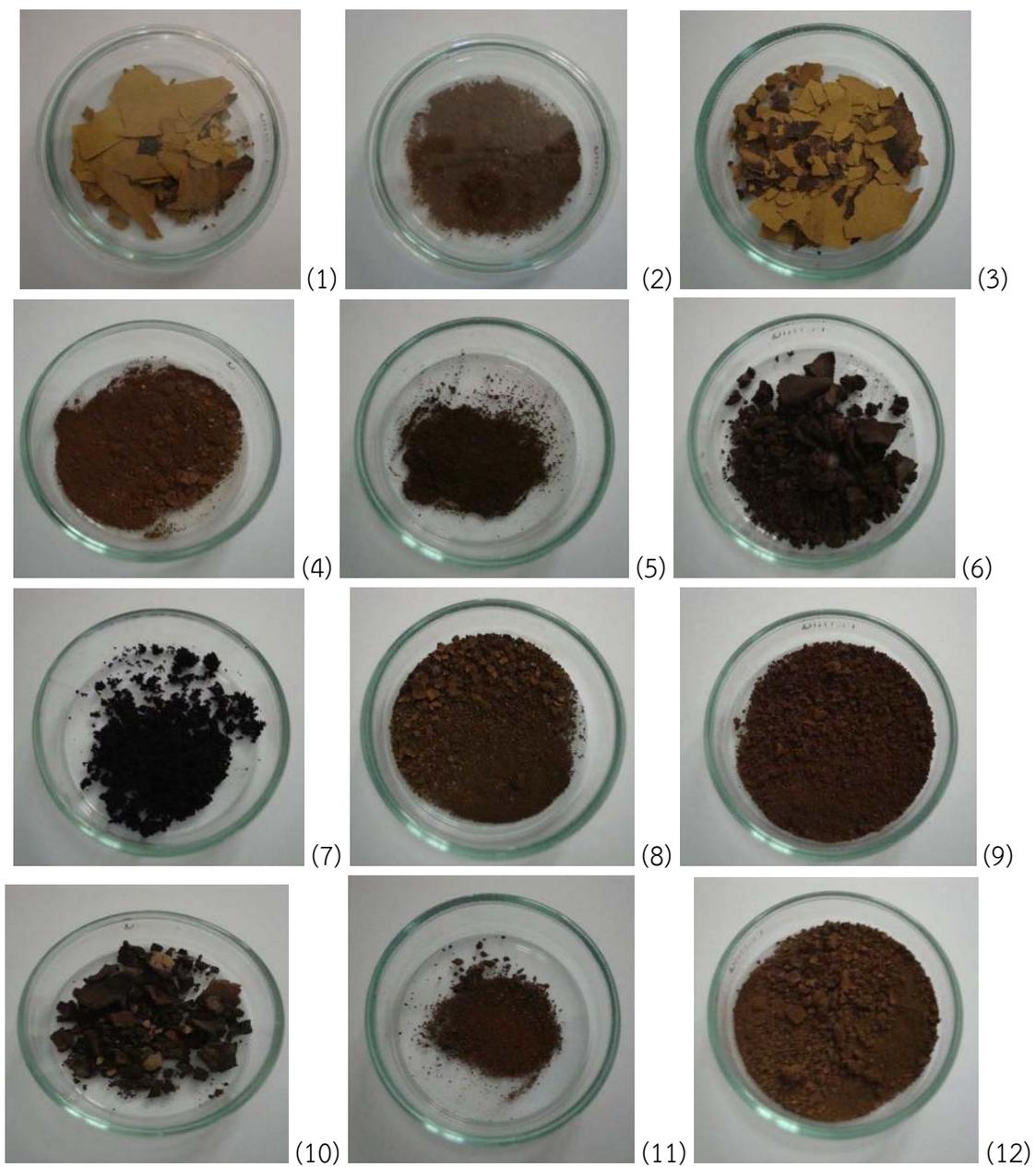
ทำการเลือกปริมาณผงเหล็กและพีเอชที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนทั้ง 12 สภาวะ ดังตารางที่ 3-8 และภาพที่ 3-18 เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกพีเอชและปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าซึ่งได้พิจารณาจากสภาวะที่ให้อ้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงสูงสุดทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) ได้ผลดังภาพที่ 3-19 – 3-22

จากตารางที่ 3-8 และภาพที่ 3-18 ถึง 3-22 ใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกพีเอชและปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณาจากร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงในตะกอนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDX ร่วมกับประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงอ้างอิงจากทรงศักดิ์และณัฐพงศ์ (2552) เป็นหลัก เติมผงเหล็กในอัตราส่วน 1, 2 และ 3 เท่าของสโตยชิโอเมตริกที่พีเอชเริ่มต้น 0.92, 2, 3 และ 4 พบว่าที่พีเอช 0.92 เมื่อเติมผงเหล็ก อัตราการเกิดปฏิกิริยารุนแรงและเกิดฟองแก๊สของ H_2 เกิดขึ้นเนื่องจากระบบสูญเสีย H^+ และต้องเติมผง

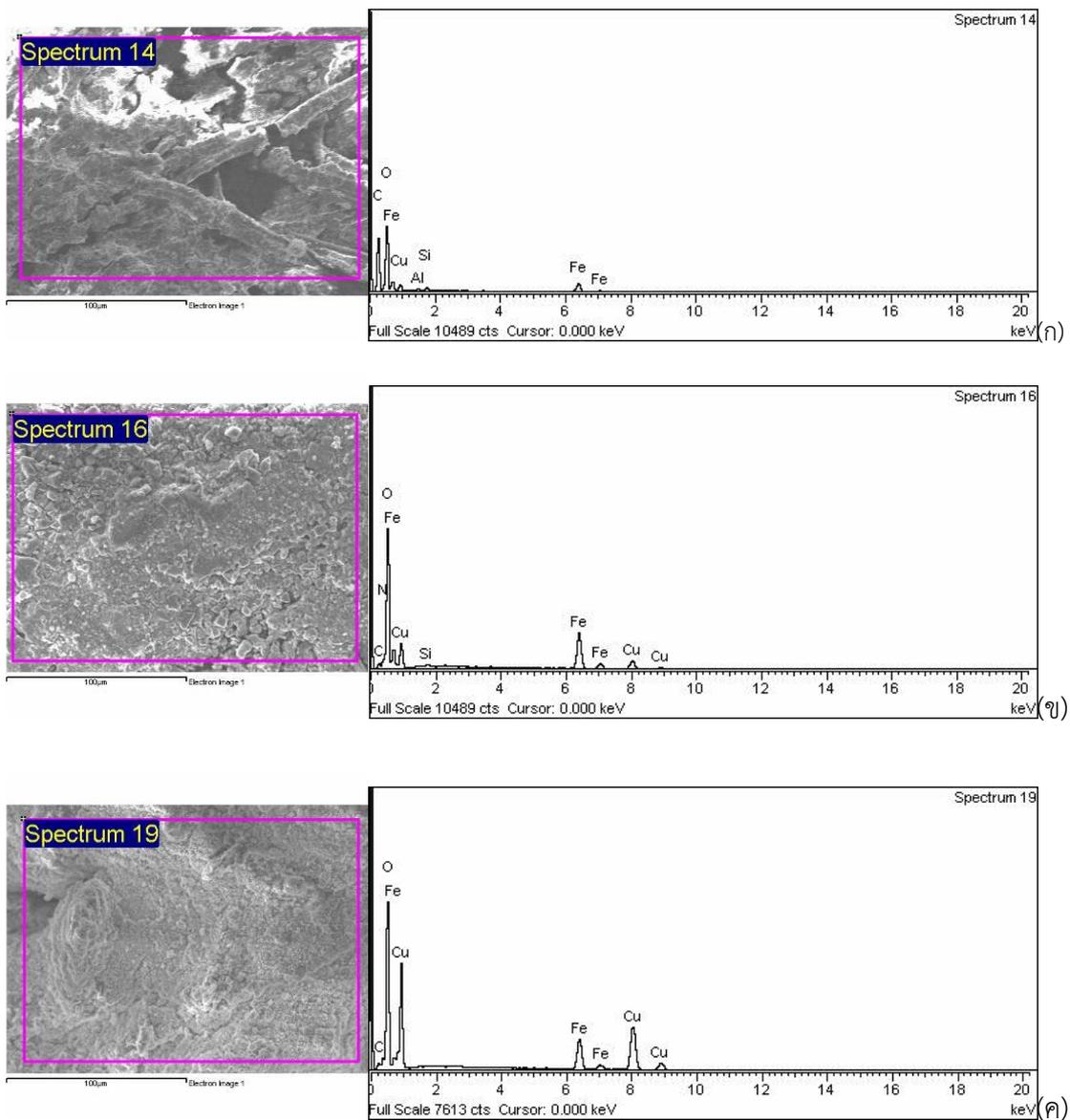
เหล็ก 3 เท่าของสตอยซิโอเมตริกค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันอาจทำให้สิ้นเปลืองเหล็กโดยใช้เหตุจึงไม่เหมาะสมต่อการนำกลับเมื่อพีเอชเริ่มต้น 2 ร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงต่ำมากอาจเนื่องมาจากเหล็กไม่สามารถละลายได้ทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักต่ำในขณะที่พีเอชเริ่มต้น 3 เหล็กสามารถละลายได้ดีค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงค่อนข้างสูงเมื่อเติมผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยซิโอเมตริกซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 3-21 พบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักทองแดงสูงสุดร้อยละ 25.70 จึงเป็นเหตุผลให้เลือกใช้พีเอชเริ่มต้น 3 ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยซิโอเมตริกเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการนำกลับทองแดงในน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดลองชุดต่อไป

ตารางที่ 3-8 ปริมาณทองแดงในตะกอน

ลำดับ	สภาวะ	ค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดง
1	เหล็ก 1 เท่า พีเอช 0.92	0.85
2	เหล็ก 2 เท่า พีเอช 0.92	8.23
3	เหล็ก 3 เท่า พีเอช 0.92	22.22
4	เหล็ก 1 เท่า พีเอช 2	24.56
5	เหล็ก 2 เท่า พีเอช 2	4.16
6	เหล็ก 3 เท่า พีเอช 2	4.88
7	เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3	25.70
8	เหล็ก 2 เท่า พีเอช 3	18.88
9	เหล็ก 3 เท่า พีเอช 3	8.42
10	เหล็ก 1 เท่า พีเอช 4	16.57
11	เหล็ก 2 เท่า พีเอช 4	15.65
12	เหล็ก 3 เท่า พีเอช 4	16.15

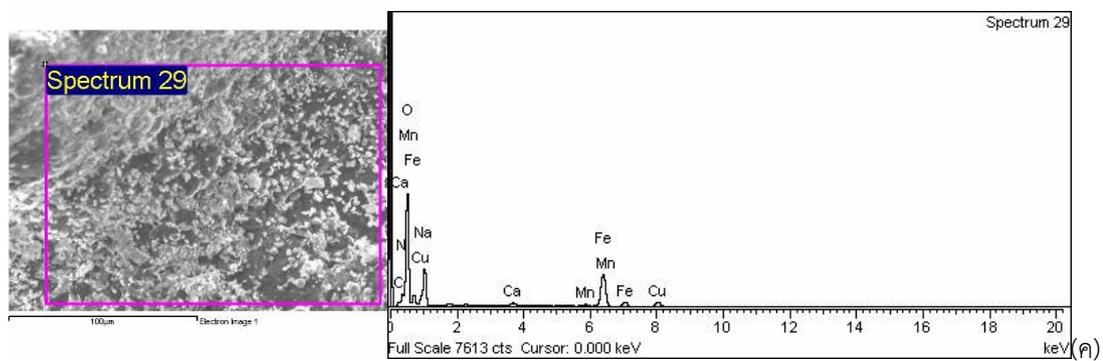
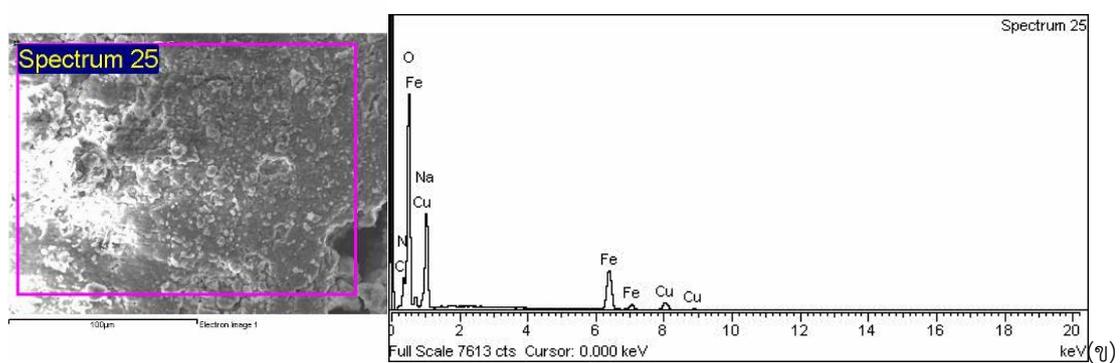
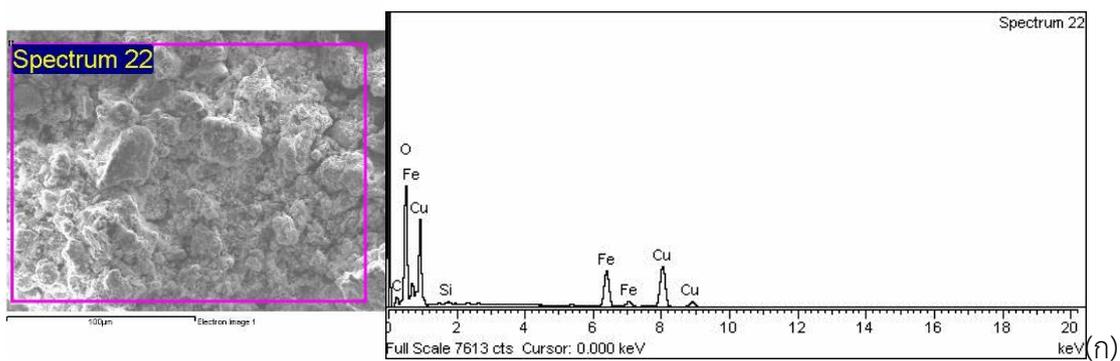


ภาพที่ 3-18 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนทองแดงลำดับที่ 1-12 ตามตารางที่ 3-8



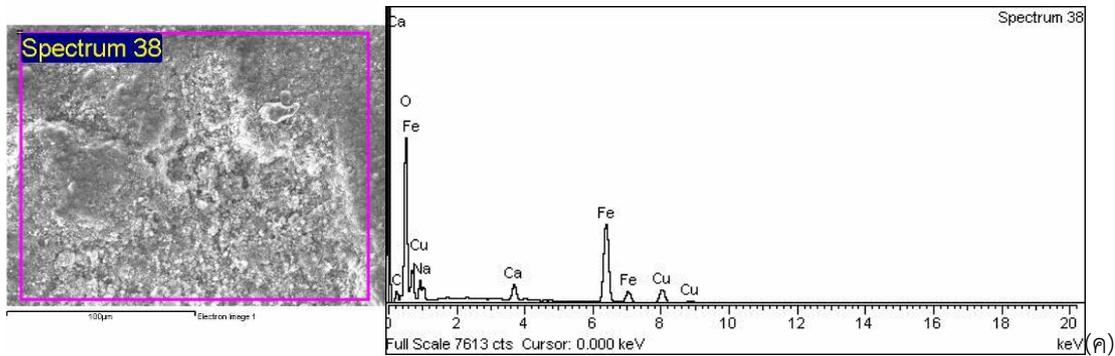
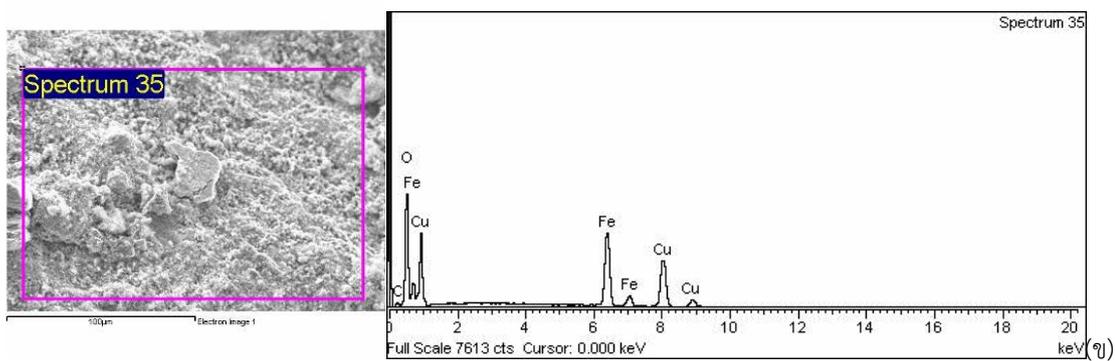
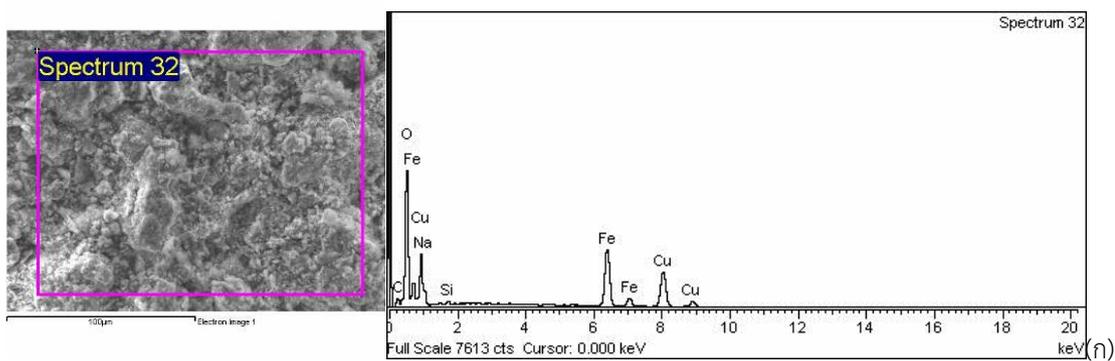
ภาพที่ 3-19 ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 0.92

(ก) (ข) และ (ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสโตยซีโอเมตริกตามลำดับ



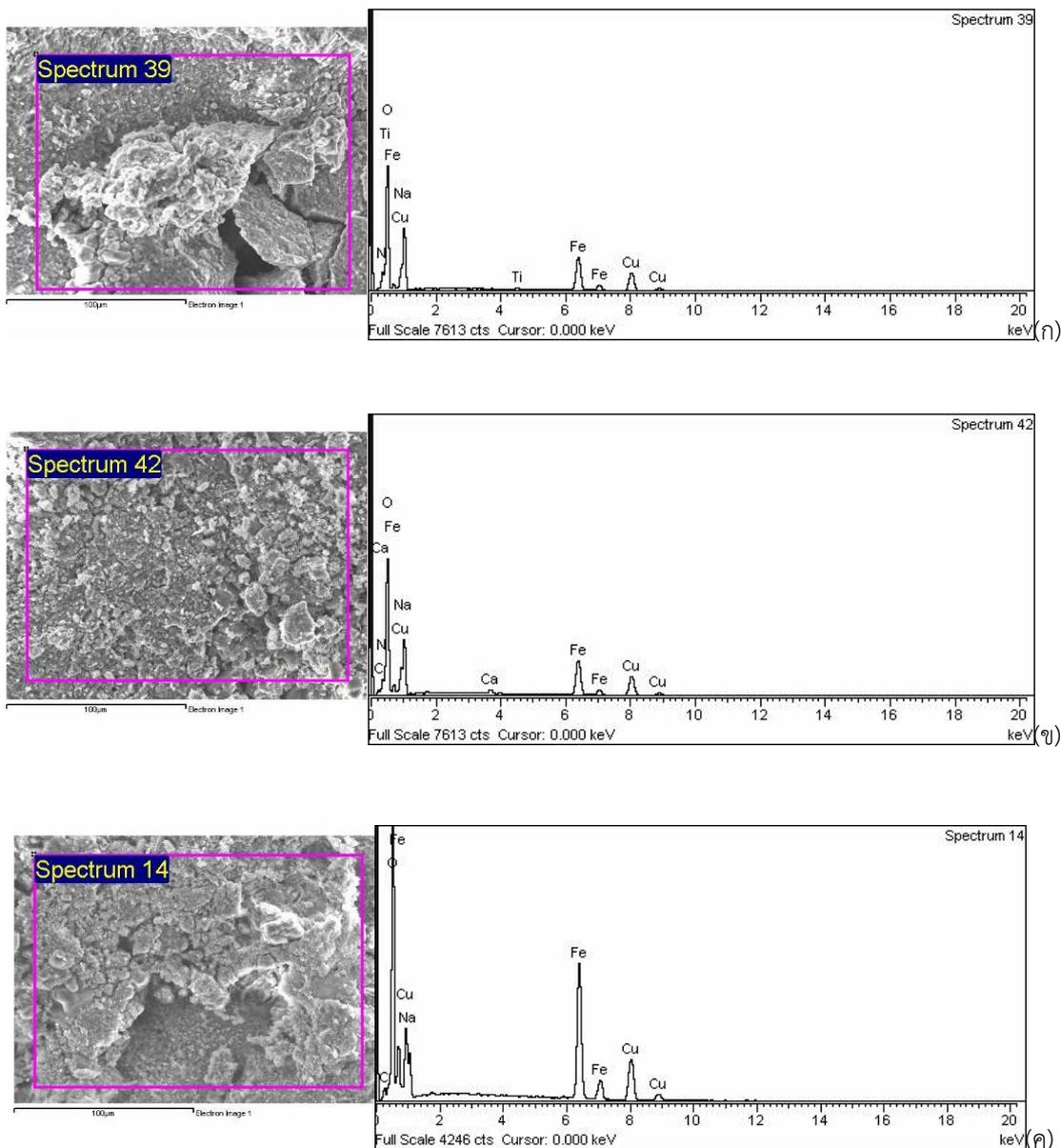
ภาพที่ 3-20 ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 2

(ก) (ข) และ(ค) จำนวนเหล็ก 1, 2 และ 3 เท่าของสตอยชิโอเมตริกตามลำดับ



ภาพที่ 3-21 ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 3

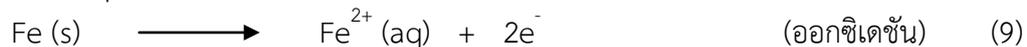
(ก) (ข) และ(ค) จำนวนหลัก 1, 2 และ 3 เท่าของสโตยซีโอเมตริกตามลำดับ

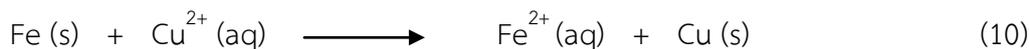


ภาพที่ 3-22 ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุในตะกอนที่พีเอชเริ่มต้น 4

(ก) (ข) และ(ค) จำนวนหลัก 1, 2 และ 3 เท่าของสโตยซีโอเมตริกตามลำดับ

จากภาพที่ 3-19 - 3-22 สามารถระบุองค์ประกอบของธาตุที่พบในตะกอนได้จากการวิเคราะห์ธาตุกึ่งเชิงปริมาณว่าส่วนใหญ่พบทองแดงและเหล็ก นอกจากนั้นแล้วยังพบธาตุบางชนิดเช่น คาร์บอน ออกซิเจน ไทเทเนียม ไนโตรเจน แคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และแมงกานีส เป็นต้น แต่มีเพียงในปริมาณที่เล็กน้อยเท่านั้น และจากภาพที่ 3-5 พบว่าองค์ประกอบในแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นทองแดง และเมื่อเริ่มเติมผงเหล็กลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเหล็กบางส่วนที่มีขนาดเล็กหรือพื้นผิวโดยรอบของผงเหล็กสามารถละลายในรูปเหล็กไอออนและทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงได้ดังสมการ

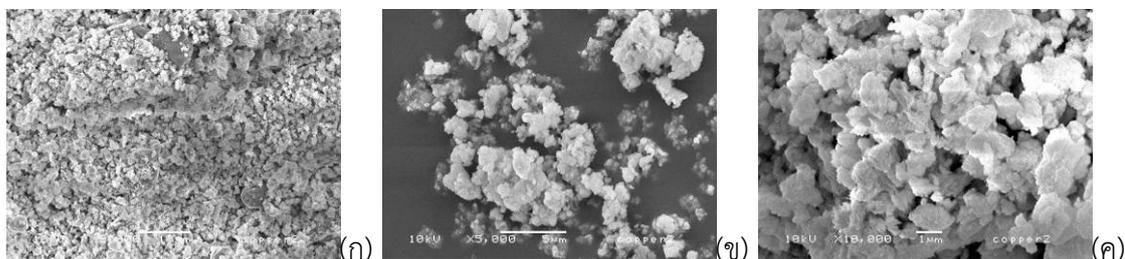




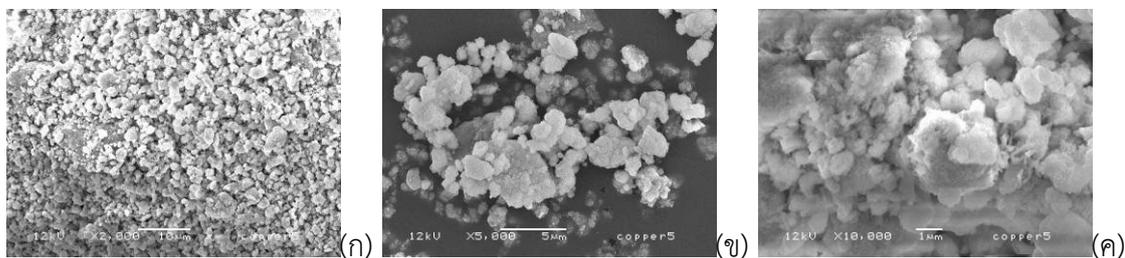
จากสมการ 9 พบว่าทองแดงไอออนได้รับอิเล็กตรอนจากเหล็กจึงเปลี่ยนรูปหรือสถานะเป็นผงทองแดงหรือสารประกอบต่างๆของทองแดง แต่เหล็กบางส่วนที่ยังไม่สามารถละลายหรือเข้าทำปฏิกิริยาการแทนที่หรือปฏิกิริยาซีเมนเทนชันได้ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จึงทำให้สามารถพบเหล็กบางส่วนเหลืออยู่และเมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายของเหล็กพบว่าสภาวะที่เหล็กสามารถละลายนั้นมีพีเอชที่ค่อนข้างต่ำคือในช่วงกรดแก่ โดยเฉพาะช่วงพีเอชที่ต่ำกว่า 4 (เกรียงศักดิ์, 2547) และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายของเหล็กเริ่มลดลง จึงเป็นเหตุผลให้การทดลองเลือกใช้สภาวะพีเอชที่อยู่ในช่วง 0 – 4 เพื่อการนำกลับทองแดงในน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า

3.7.11.2 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยาต่อการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า

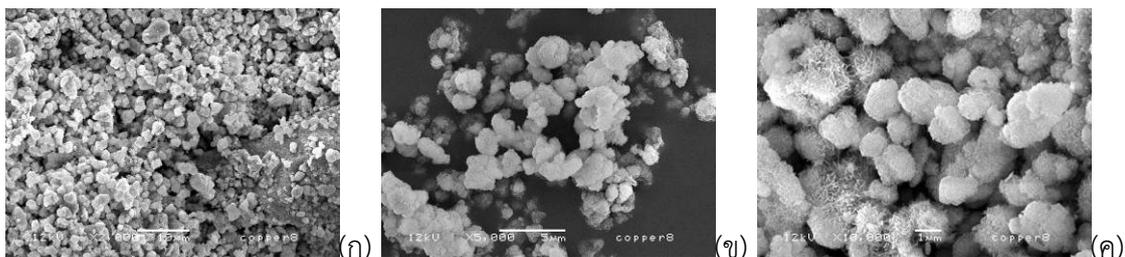
โดยพิจารณาเลือกสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงสูงสุดทำปฏิกิริยาโดยกำหนดพีเอชเริ่มต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็น 3 เติมผงเหล็กในปริมาณ 1 เท่าของสตรอยซิโอมเมตริก กำหนดความเร็วในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์ 3) และอุณหภูมิปฏิกิริยา 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างภายนอกของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) แสดงดังภาพที่ 3-23 – 3-25 และองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณจากเทคนิค Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) เพื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุในตะกอน แสดงดังภาพที่ 3-26 (ภาพที่ 3-23 ถึง 3-26 ผงเหล็กขนาด 125-250 ไมโครเมตร)



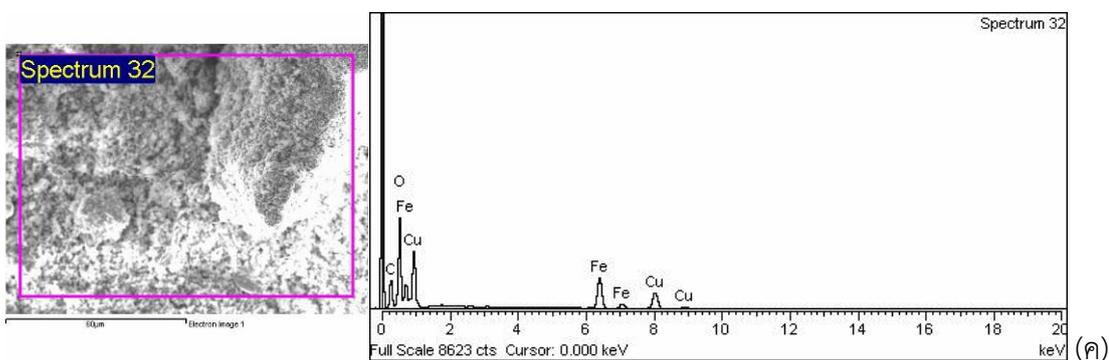
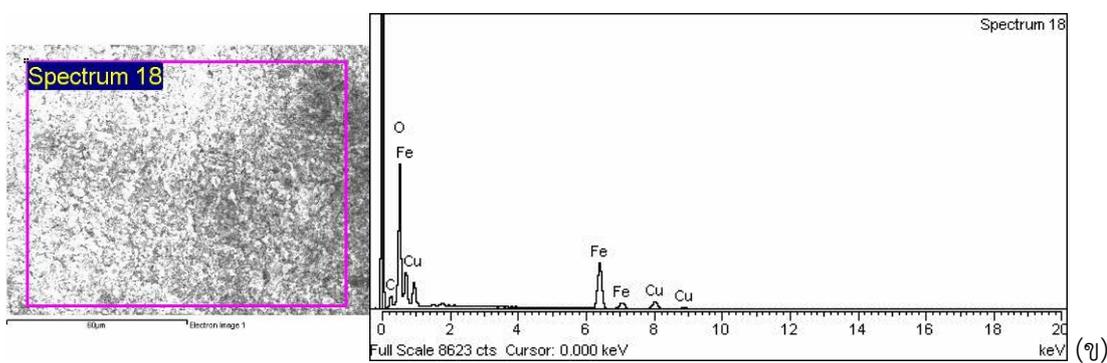
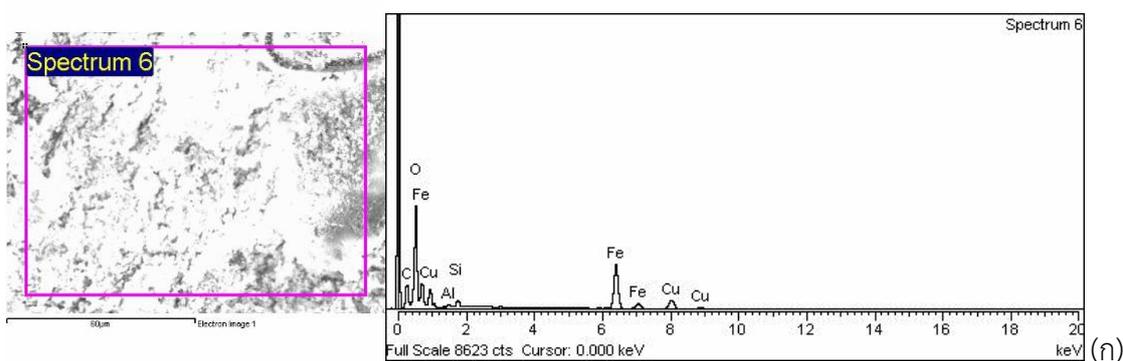
ภาพที่ 3-23 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ



ภาพที่ 3-24 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ

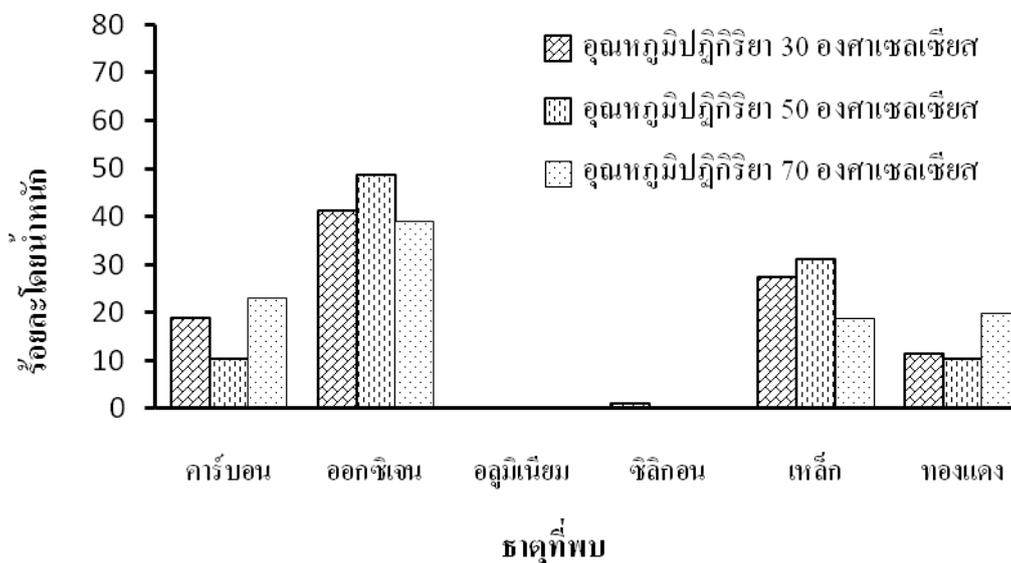


ภาพที่ 3-25 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส
(ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ



ภาพที่ 3-26 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอน
(ก) (ข) และ(ค) อุณหภูมิ 30 50 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ

จากภาพที่ 3-26 พบธาตุหลายชนิดในตะกอนภายหลังจากการนำกลับได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน อลูมิเนียม ซิลิกอน เหล็ก ทองแดงในปริมาณที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 3-27

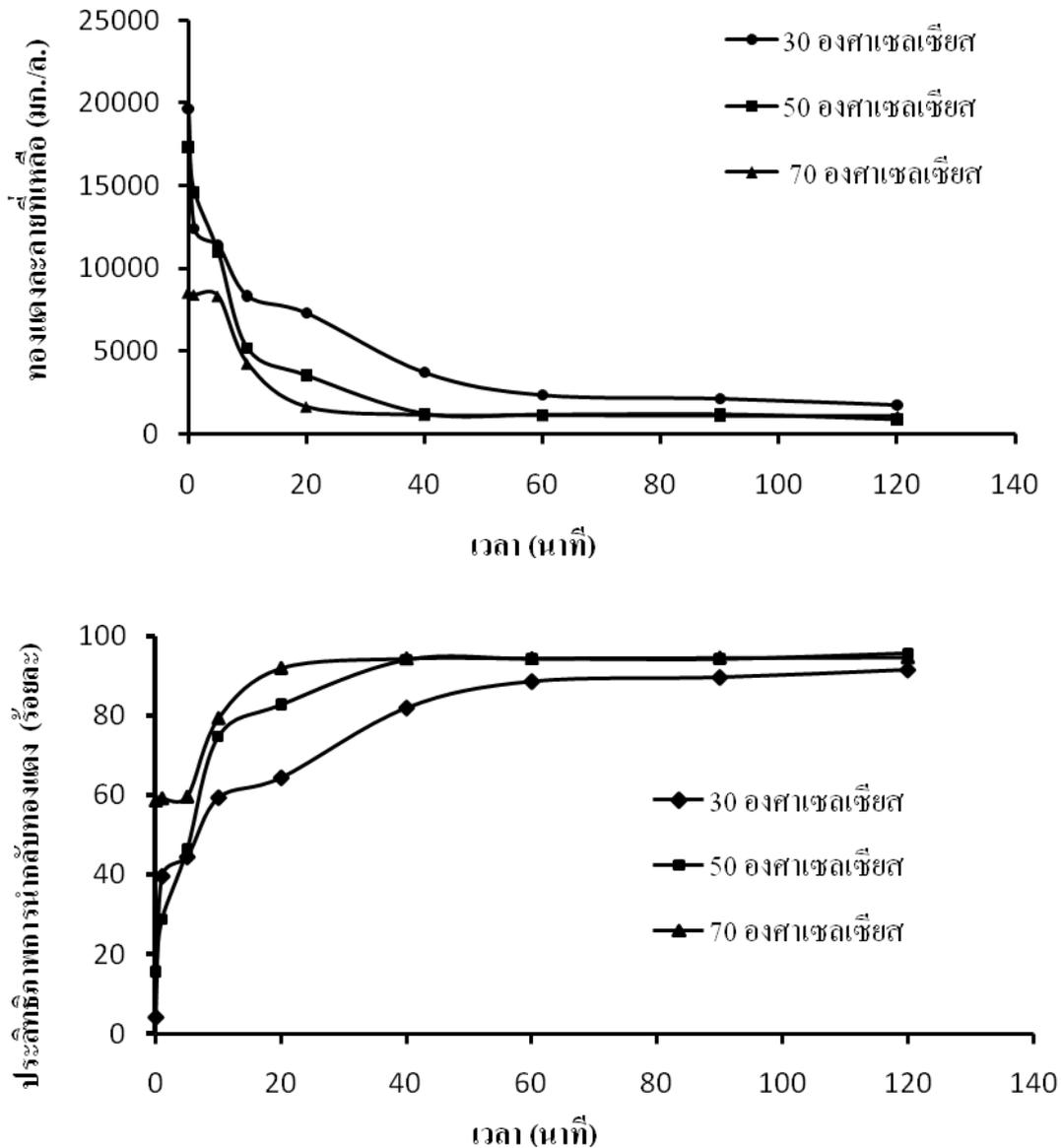


ภาพที่ 3-27 ปริมาณธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิปฏิบัติการ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 3-27 ธาตุที่พบในตะกอนนั้นเป็นธาตุที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้า เมื่อนำแผ่นวงจรไฟฟ้าดังกล่าวมาชะละลายจึงทำให้มีธาตุเหล่านั้นอยู่ในน้ำชะและทันทีที่เติมผงเหล็กลงไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า ไอออนของเหล็กจึงได้ทำปฏิกิริยากับไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำชะ จึงสามารถพบธาตุเหล่านั้นในตะกอนได้ เหตุที่พบทองแดงสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณมากที่สุดและค่าศักย์ไฟฟ้า (E^0) ของทองแดงยังมีความสามารถพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนมากกว่าธาตุอื่นที่พบในน้ำชะโดยมีค่า 0.34 มิลลิโวลต์ จึงส่งผลให้ผงเหล็กที่เติมทำปฏิกิริยากับทองแดงได้ดีกว่าธาตุอื่น จึงพบว่าภายหลังจากการนำกลับพบทองแดงและเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆ โดยออกซิเจนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตะกอนซึ่งผู้ทดลองไม่ได้เตรียมในสภาวะไร้ออกซิเจนจึงทำให้ตะกอนอาจถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจนในบรรยากาศ ส่วนคาร์บอนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) จะต้องมีการติดกระดาษคาร์บอนที่สลับเพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์และต้องเตรียมตัวอย่างให้เบาบางที่สุดจึงเป็นไปได้ว่าอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์พบคาร์บอนได้

พบว่าอุณหภูมิปฏิบัติการส่งผลต่อปริมาณธาตุต่างๆที่พบในตะกอนโดยจะเห็นว่าโดยส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิบัติการให้สูงขึ้นทำให้พบธาตุต่างๆในปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะทองแดงที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในทางที่กลับกันสัดส่วนของออกซิเจนที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยลดแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบและช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของผงเหล็กซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเป็นการเพิ่มโอกาสทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่าง ไอออนที่ทำหน้าที่ในการให้อิเล็กตรอน (เหล็ก) และไอออนที่ทำหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอน (ทองแดง) ส่งผลให้เกิดกลไกการแทนที่ด้วยโลหะหรือเกิดกระบวนการซีเมนเทนชันได้ดียิ่งขึ้น

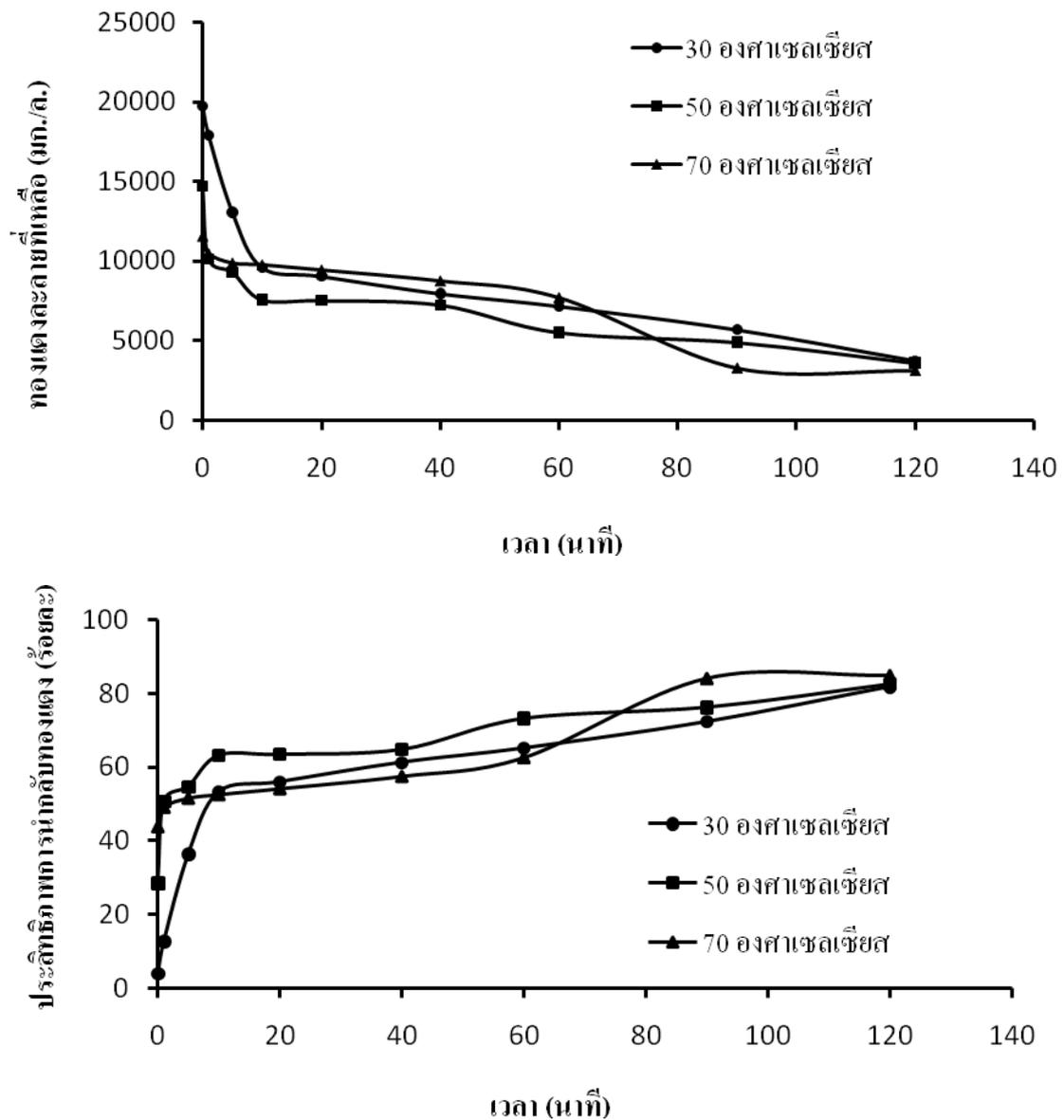
จะเห็นว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียสพบร้อยละโดยน้ำหนักทองแดงในตะกอนสูงสุดคือร้อยละ 19.62 ซึ่งมากกว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส โดยประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือของปฏิกิริยา ให้ผลแสดงดังภาพที่ 3-28 – 3-30



ภาพที่ 3-28 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 3-28 พบว่าทันทีที่เติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเทนชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยในช่วง 20 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมากและช้าลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นโดยพบว่ามีประสิทธิภาพในการนำกลับคือร้อยละ 64.37, 82.82 และ 94.95 ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30, 50, และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับที่สามารถเห็นความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนและเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ความชันของกราฟเริ่มที่จะคงที่ ในทางกลับกันปริมาณความเข้มข้นของทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับพบว่าปริมาณทองแดงละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 40

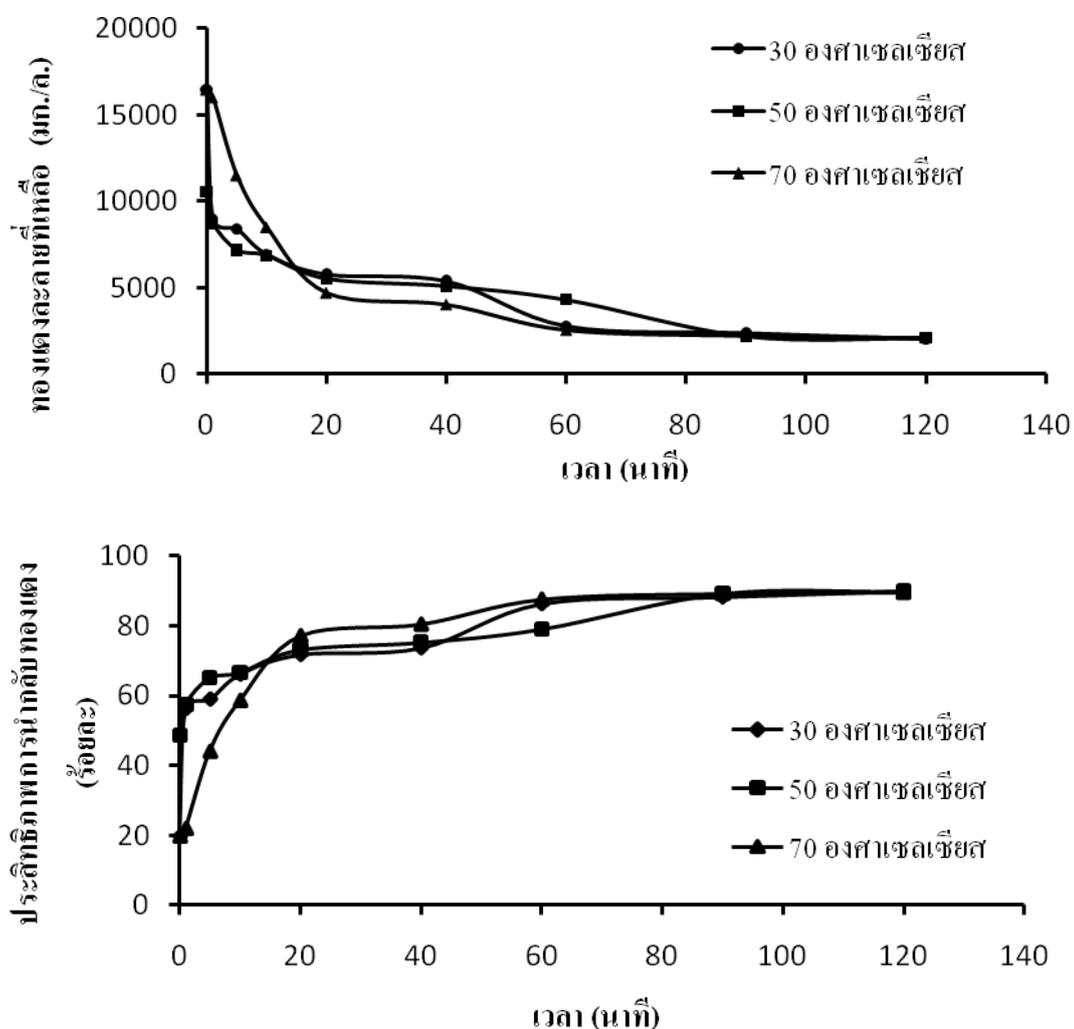
นาที่แรกและเริ่มช้าลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปกระทั่งคงที่ในช่วงนาที่ที่ 60 มีปริมาณทองแดงละลายที่เหลือเท่ากับ 2,350.38, 1,149.4 และ 1,138.11 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30, 50, และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิปฏิกิริยาที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงละลายเหลือต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 อุณหภูมิ จากนั้นได้ทำการทดลองโดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคของผงเหล็กโดยใช้ขนาด 125–250 ไมโครเมตรผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 3-29



ภาพที่ 3-29 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 125-250 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 3-29 พบว่าทันทีที่เติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเตชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยในช่วง 5 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมากของอุณหภูมิปฏิกิริยา 50 และ 70 องศาเซลเซียสส่วนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียสอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วง 10 นาทีแรกและเริ่มมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมากในช่วงนาที่ที่ 20 เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเริ่มที่จะมีแนวโน้มสูง

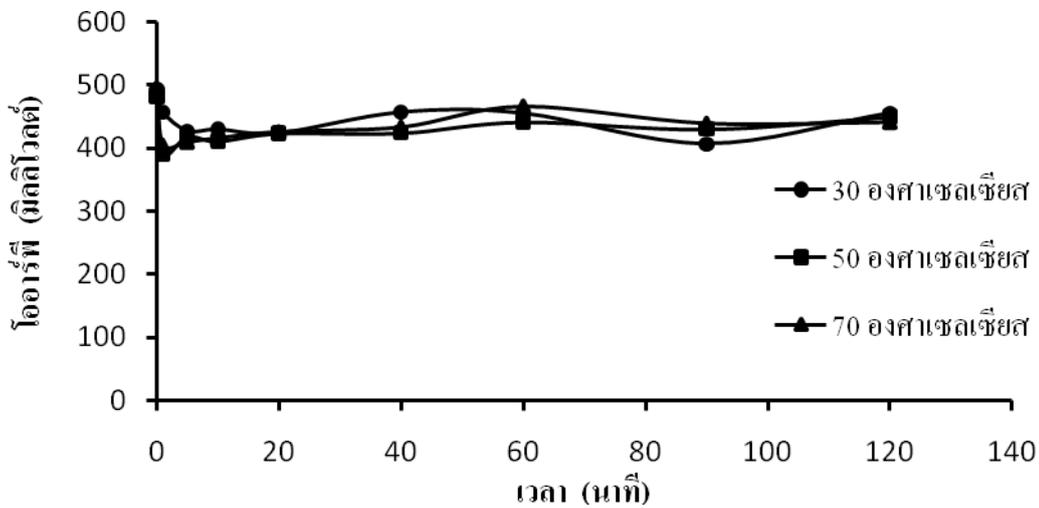
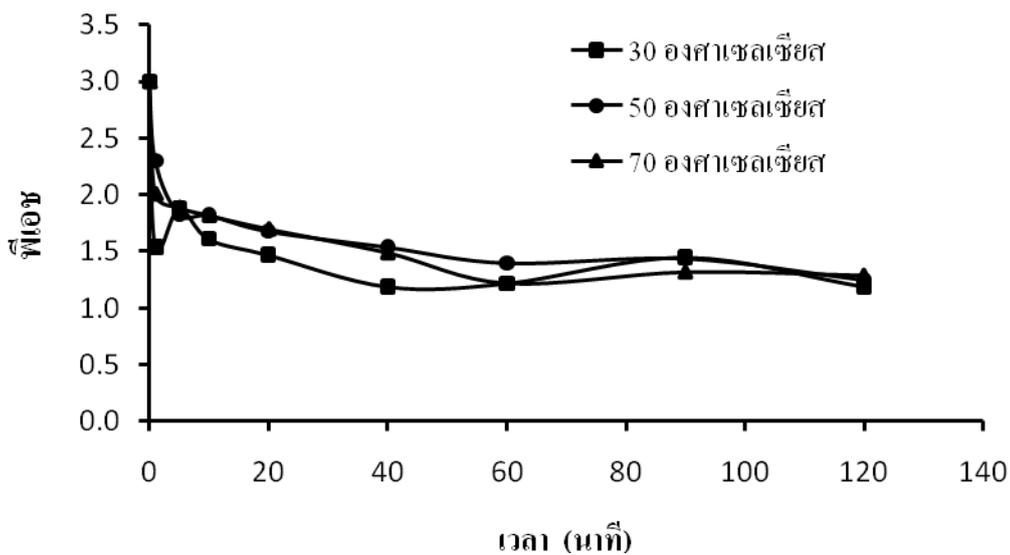
เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงนาทีที่ 90 ที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 72.31, 76.18, 84.00 ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30, 50, และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับจากผลดังกล่าวพบว่า ที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอีกด้านหนึ่งที่บอกในรูปของปริมาณทองแดงละลายที่เหลืออยู่หลังการนำกลับโดยปริมาณทองแดงละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไปกระทั่งถึง 120 นาที พบปริมาณทองแดงละลายที่เหลือเท่ากับ 3,733.95, 3,592.74 และ 3,119.72 จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณทองแดงละลายที่เหลือน้อยที่สุดคือ 70 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงละลายเหลือต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 อุณหภูมิ จากนั้นได้ทำการทดลองโดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคของผงเหล็กโดยใช้ขนาด 250-500 ไมโครเมตรผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 3-30



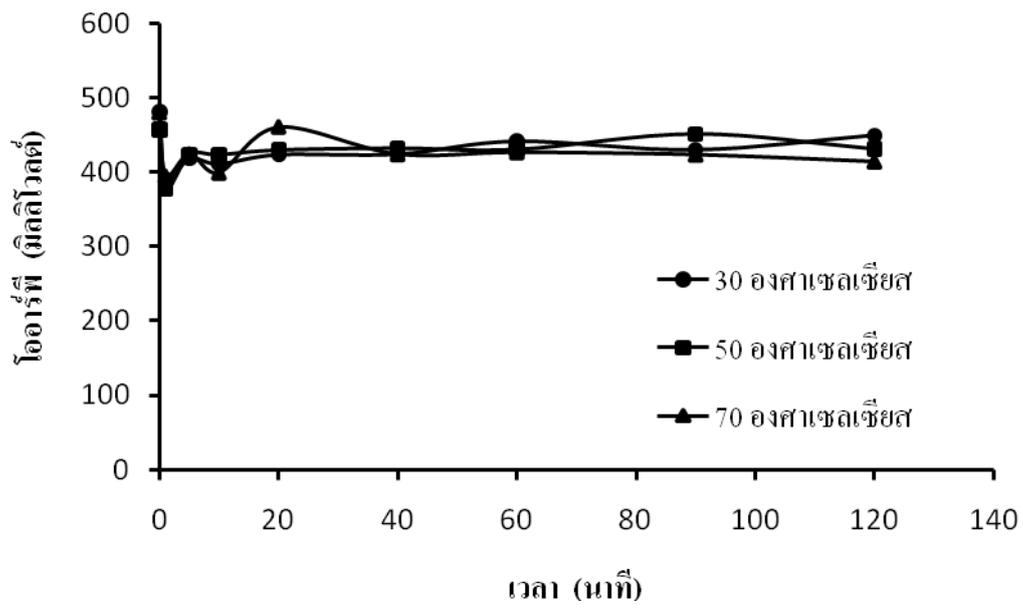
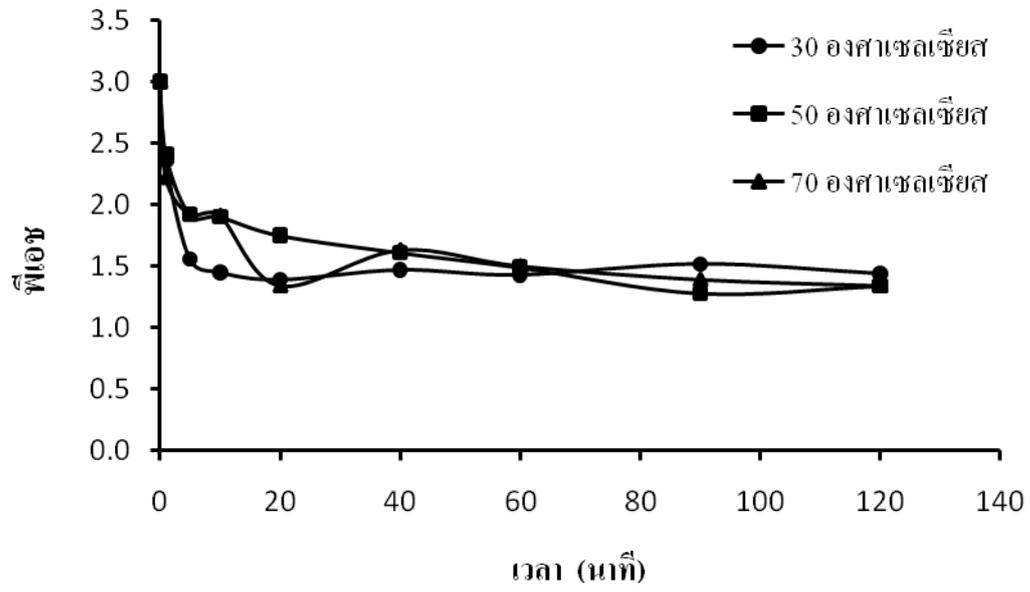
ภาพที่ 3-30 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (ผงเหล็กขนาด 250-500 ไมโครเมตร)

จากภาพที่ 3-30 พบว่าทันทีที่เติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงมากและช้าลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่ในนาทีที่ 60 ตลอดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา คือ 120 นาที ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเท่ากับ 90.05,

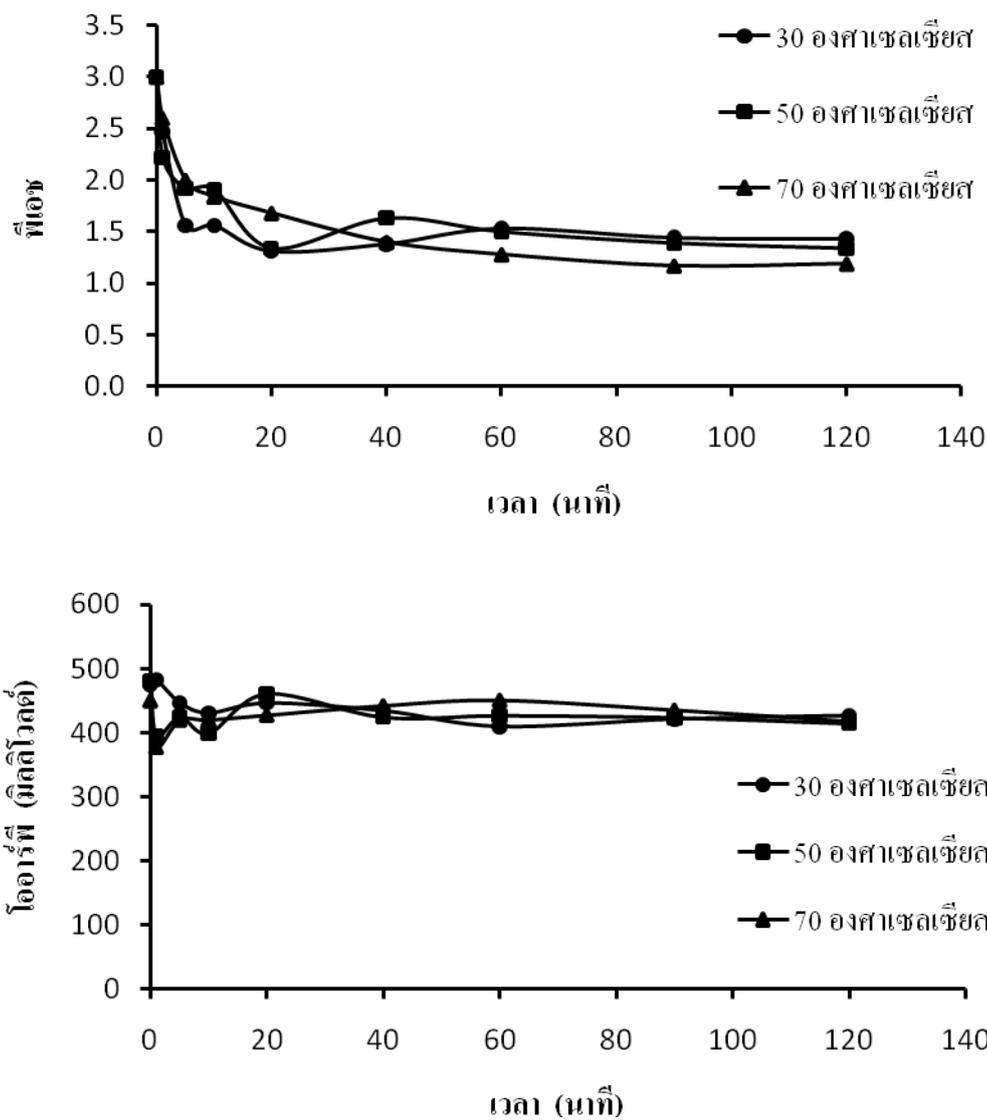
89.89 และ 89.68 ที่อุณหภูมิปฏิบัติการยา 30, 50, และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับจะเห็นว่าประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณทองแดงละลายที่เหลือที่ 120 นาทีคือ 2,039.95, 2,030.67 และ 2,030.30 มิลลิกรัม/ลิตรที่อุณหภูมิปฏิบัติการยา 30, 50, และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับจะพบว่าที่อุณหภูมิปฏิบัติการยาเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่มีปริมาณทองแดงละลายที่เหลือ น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 อุณหภูมิ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3-31 ผลของอุณหภูมิปฏิกิริยาต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (ก) (ข) และ (ค)

ผงเหล็กขนาด 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ

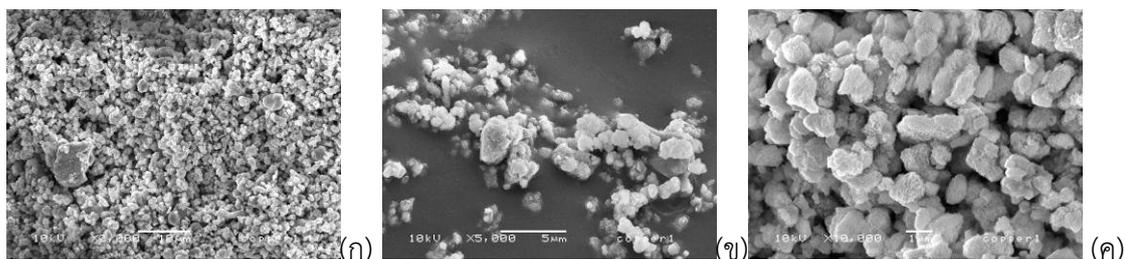
จากภาพที่ 3-31 พบว่าตลอดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตลอด 120 นาที ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงกระทั่งคงที่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 3.0 ขณะที่ค่าโออาร์พีมีค่าระหว่าง 400 - 500 มิลลิโวลต์

ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาเป็นข้อสรุปของประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ขนาดของผงเหล็กที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ประสิทธิภาพในการนำกลับที่นาทีสุดท้ายของการทดลองคือนาทีที่ 120 พบว่าประสิทธิภาพในการนำกลับในช่วงขนาดอนุภาค 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรเท่ากับ 94.65, 84.79 และ 89.68 ตามลำดับ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับสูงที่สุดทั้ง 3 การทดลองและมีปริมาณความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือต่ำคือ 1,097.517, 3,119.72 และ 2,080.3 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวจะนำไปอ้างอิงเป็นข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินการทดลองชุดต่อไป

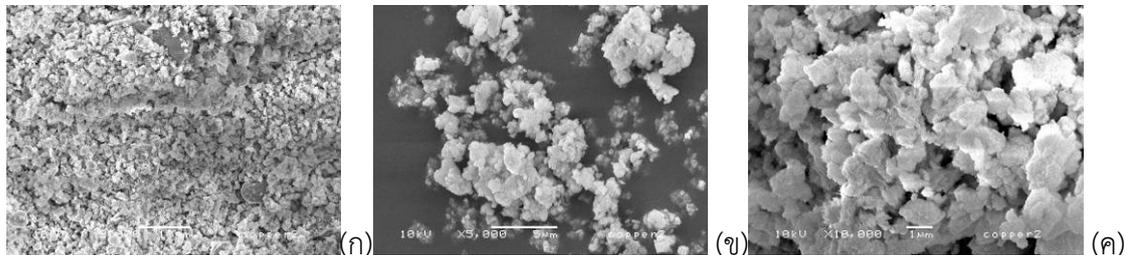
3.7.11.3 ผลของขนาดอนุภาคผงเหล็กที่มีผลต่อการนำกลับทองแดง

1) อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส

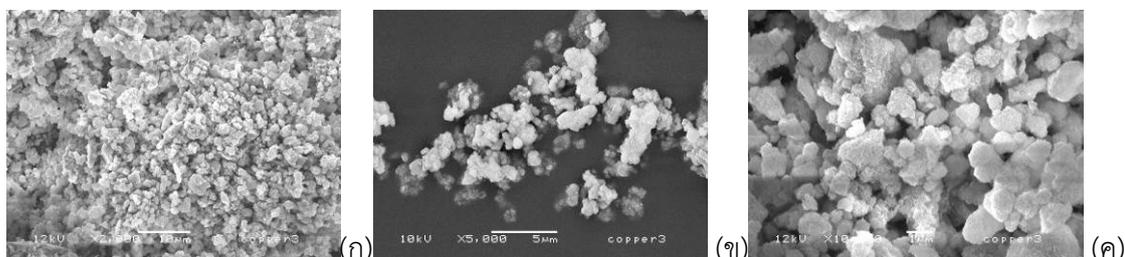
ทำการทดลองโดยใช้ผงเหล็ก 3 ขนาดคือ 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรเพื่อพิจารณาเลือกสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการนำกลับและร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงในตะกอนสูงสุด ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างภายนอกของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) แสดงดังภาพที่ 3-32 – 3-34 และองค์ประกอบธาตุที่เชิงปริมาณจากเทคนิค Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) เพื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุในตะกอน แสดงดังภาพที่ 3-35



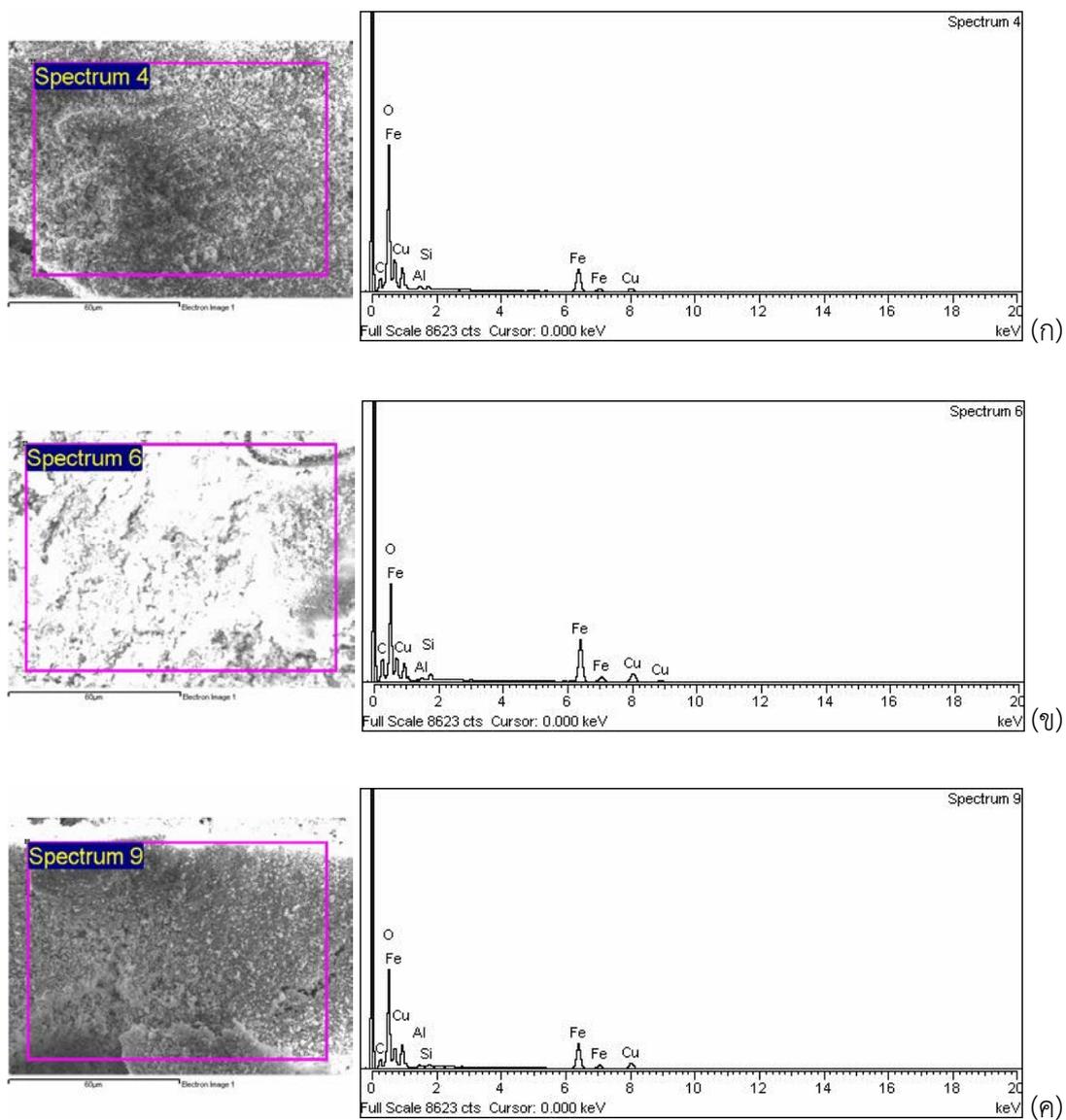
ภาพที่ 3-32 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3-33 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร

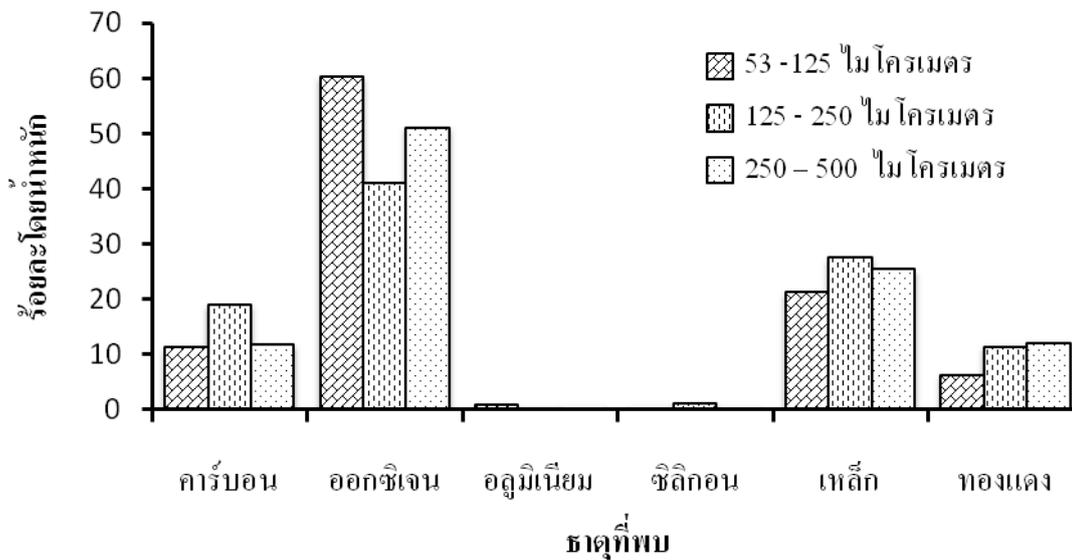


ภาพที่ 3-34 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3-35 องค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิจำกัด 30 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ

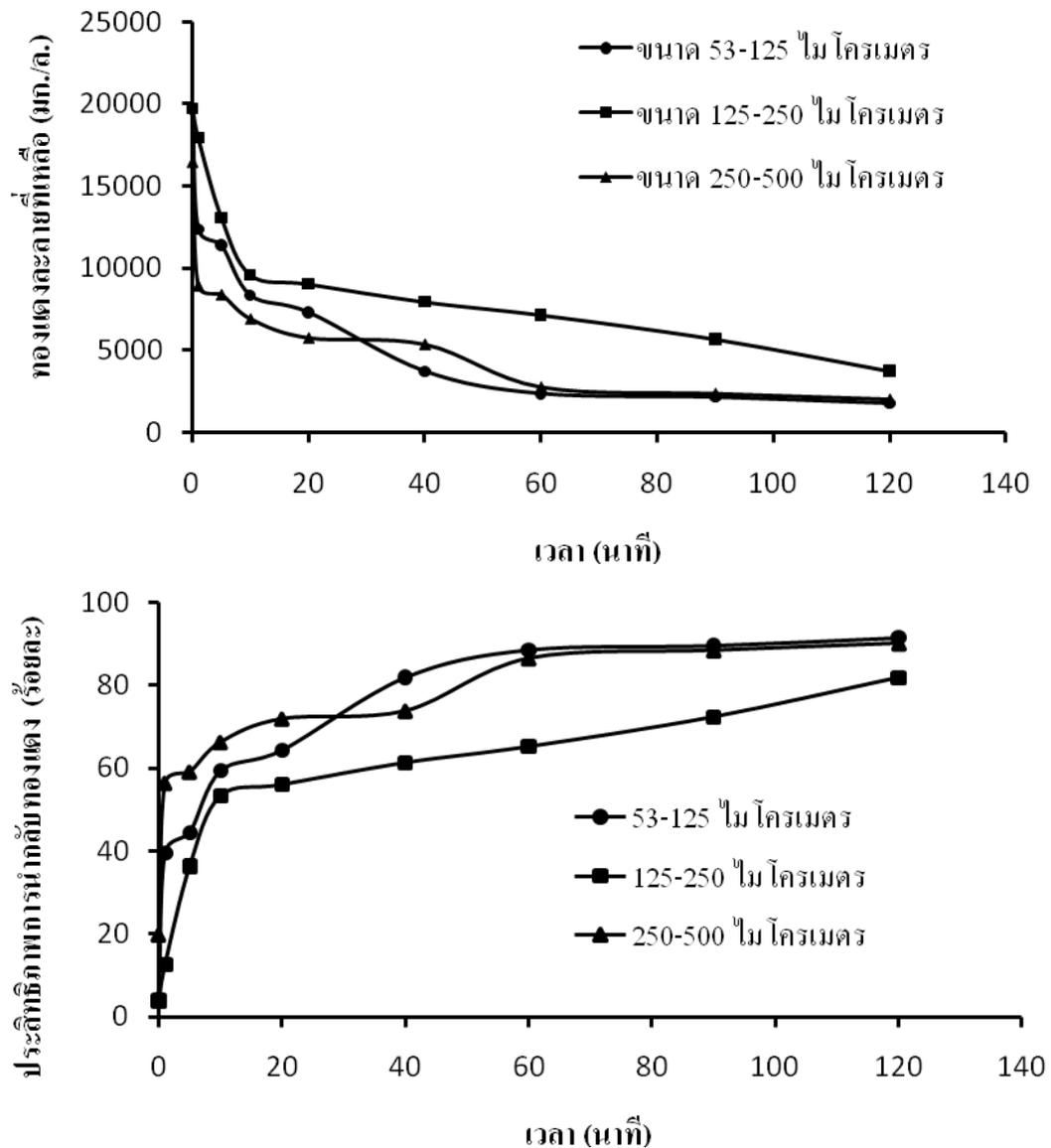
จากภาพที่ 3-35 พบธาตุหลายชนิดได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน อลูมิเนียม ซิลิกอน เหล็ก ทองแดงในปริมาณที่ต่างกันซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-36



ภาพที่ 3-36 องค์ประกอบธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิบัติการ 30 องศาเซลเซียส

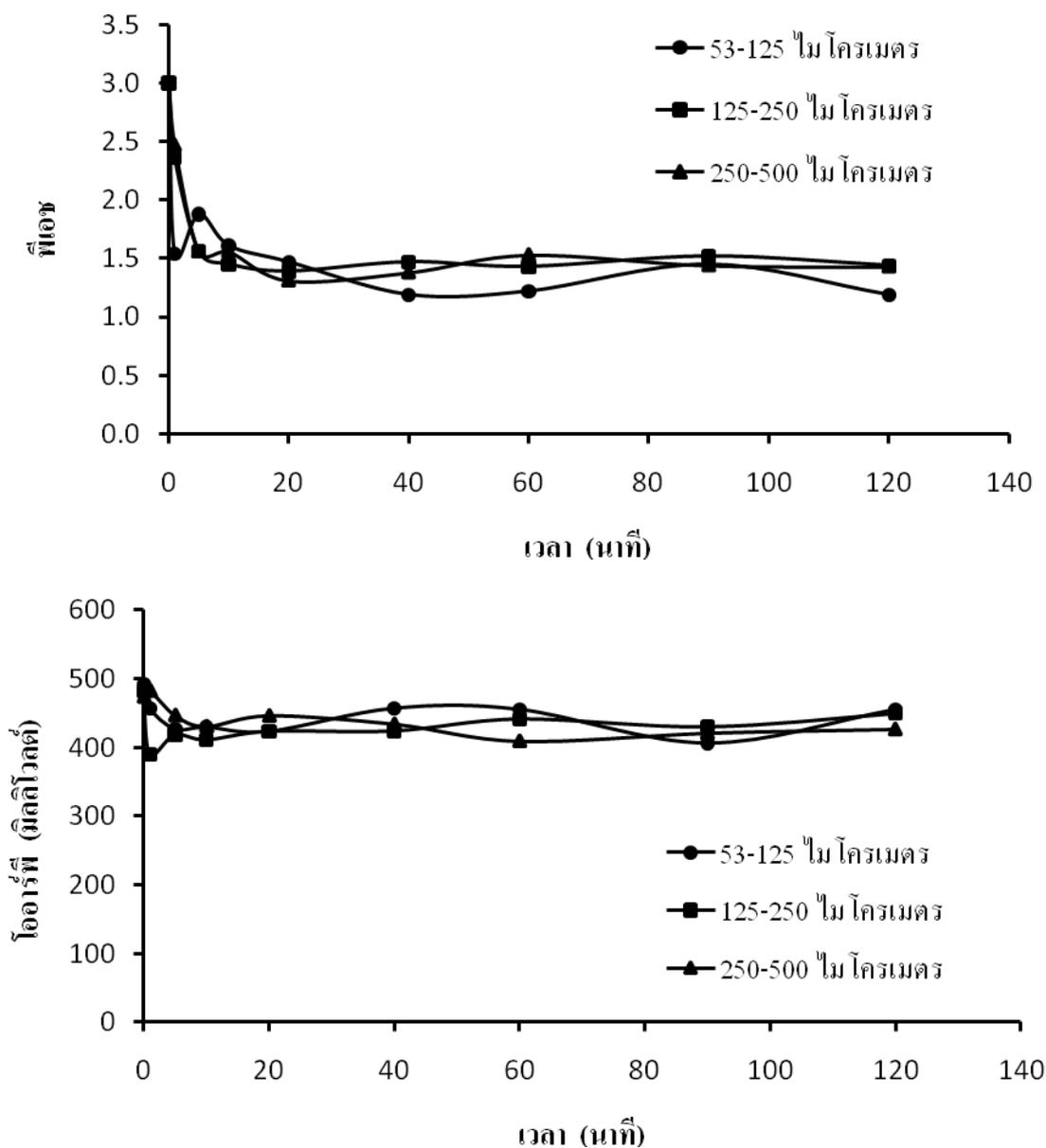
จากภาพที่ 3-36 ธาตุที่พบในตะกอนนั้นเป็นธาตุที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้าเมื่อนำแผ่นวงจรไฟฟ้าดังกล่าวมาชะละลายจึงทำให้มีธาตุเหล่านั้นอยู่ในน้ำชะและทันทีที่เติมผงเหล็กลงไปเพื่อเกิดปฏิกิริยากับน้ำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า ไอออนของเหล็กจึงได้ทำปฏิกิริยากับไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำชะ จึงสามารถพบธาตุเหล่านั้นในตะกอนได้ เหตุที่พบทองแดงสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณมากที่สุดและค่าศักย์ไฟฟ้า (E^0) ของทองแดงยังมีความสามารถพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนมากกว่าธาตุอื่นที่พบในน้ำชะโดยมีค่า 0.34 มิลลิโวลต์ จึงส่งผลให้ผงเหล็กที่เติมทำปฏิกิริยากับทองแดงได้ดีกว่าธาตุอื่น จึงพบว่าภายหลังการนำกลับพบทองแดงและเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆโดยออกซิเจนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตะกอนซึ่งผู้ทดลองไม่ได้เตรียมในสภาวะไร้ออกซิเจนจึงทำให้ตะกอนอาจถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจนในบรรยากาศส่วนคาร์บอนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) จะต้องมีการติดกระดาษคาร์บอนที่ สดับเพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์และต้องเตรียมตัวอย่างให้เบาบางที่สุดจึงเป็นไปได้ว่าอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์พบคาร์บอนได้

พบว่าขนาดอนุภาคของผงเหล็กส่งผลต่อปริมาณธาตุต่างๆที่พบในตะกอนคือขนาดอนุภาคของผงเหล็กยิ่งเล็กรวมธาตุต่างๆ ที่พบก็ยิ่งมีมากกว่าอีก 2 ขนาดที่เปรียบเทียบกัน และ เมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือภายหลังจากนำกลับโดยการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงละลายโดยใช้เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ที่อุณหภูมิจากปฏิบัติการ 30 องศาเซลเซียสให้ผลแสดงดังภาพที่ 3-37



ภาพที่ 3-37 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 3-37 ทันทีที่เริ่มเติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเตชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรกและช้าลงในช่วง 20-40 นาทีจนกระทั่งเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 90 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากการทดลองพบว่าทั้ง 3 ขนาดมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากคือร้อยละ 81.79, 91.45 และ 90.05 เมื่อขนาดอนุภาคของ ผงเหล็ก 125-250, 53-125, และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับพบว่าอนุภาค ผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรเป็นสภาวะที่เหลือปริมาณทองแดงละลายต่ำมากที่สุดคือ 1,754.22 มิลลิกรัม/ลิตรและอีก 2 ขนาดเมื่อเริ่มปฏิกิริยาปริมาณทองแดงละลายที่เหลือไม่แตกต่างกันคือ 3,733.93 และ 2,039.95 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเติมผงเหล็กขนาด 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ



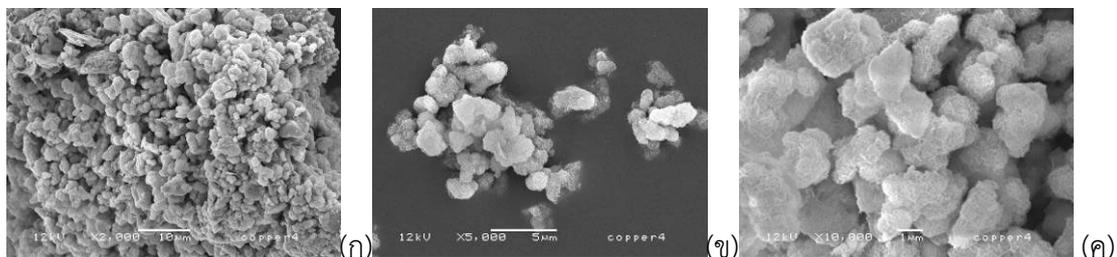
ภาพที่ 3-38 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 3-38 พบว่าตลอดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตลอด 120 นาทีค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงกระทั่งคงที่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 - 2.0 ขณะที่ค่าโออาร์พีมีค่าระหว่าง 400 - 500 มิลลิโวลต์

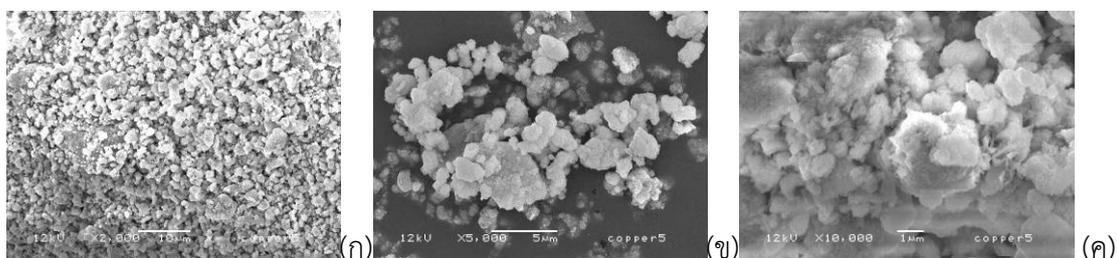
2) อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างภายนอกของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) แสดงดังภาพที่ 3-39 - 3-41 และองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณจากเทคนิค Scanning Electron

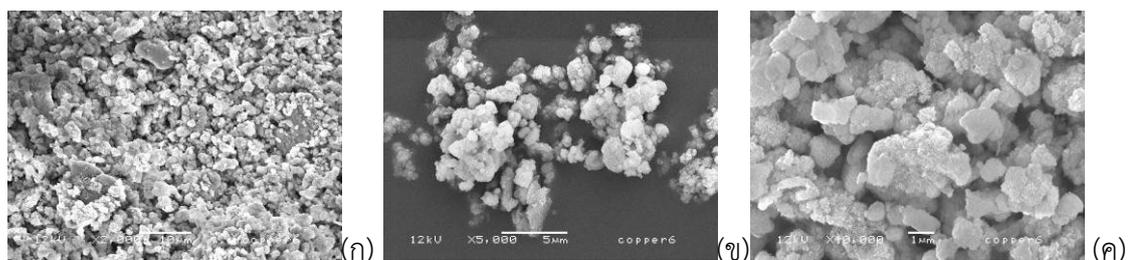
Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) เพื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุในตะกอน แสดงดังภาพที่ 3-42



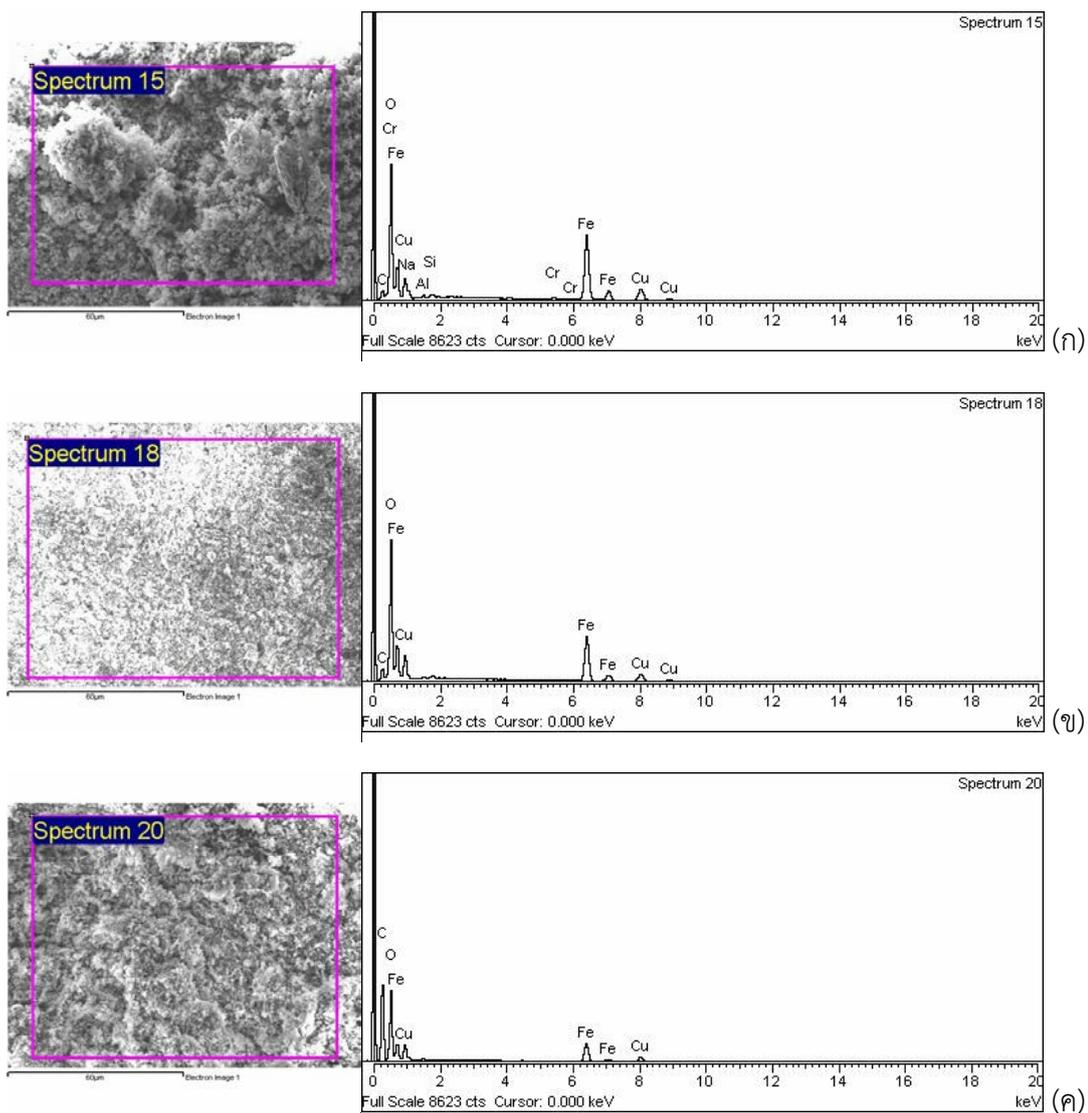
ภาพที่ 3-39 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3-40 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร

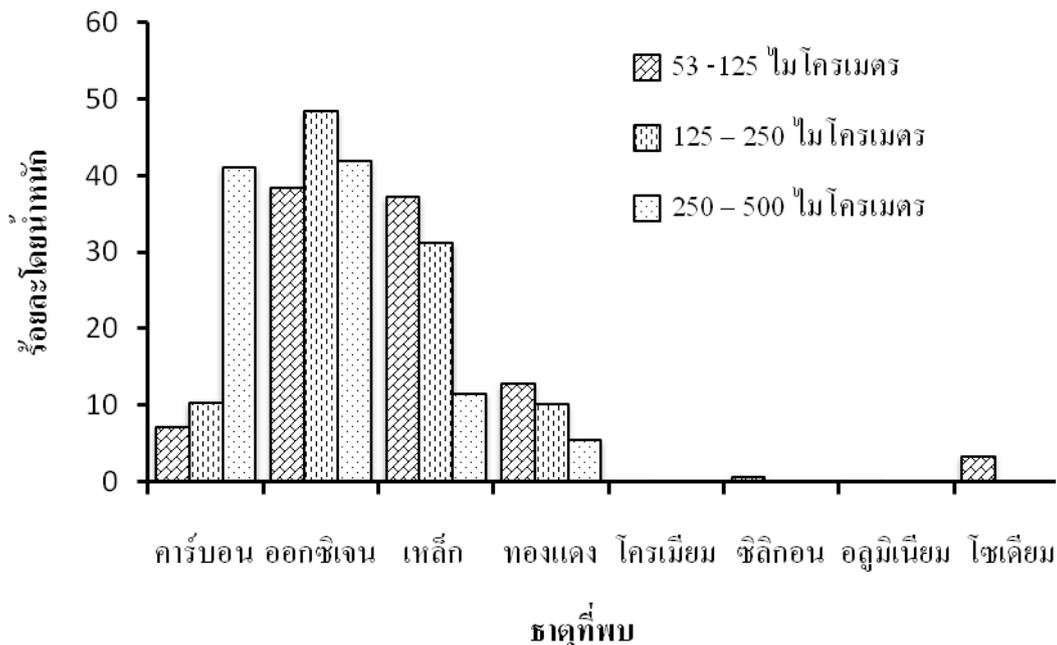


ภาพที่ 3-41 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก)(ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3-42 องค์ประกอบธาตุที่เชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ

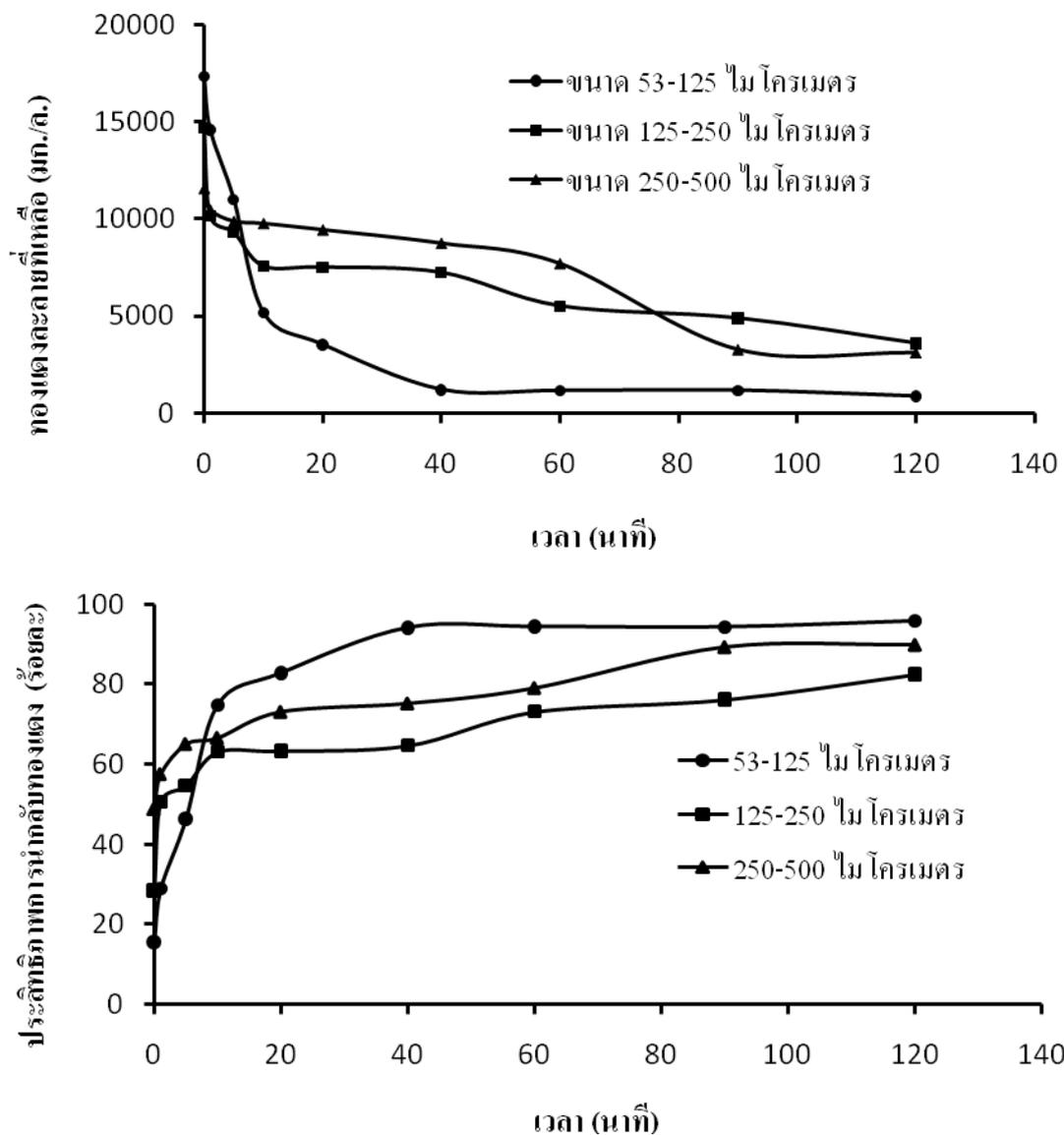
จากภาพที่ 3-42 พบธาตุหลายชนิดได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน เหล็ก ทองแดง โครเมียม ซิลิกอนอลูมิเนียม โซเดียม ในปริมาณที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 3-43



ภาพที่ 3-43 องค์ประกอบธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส

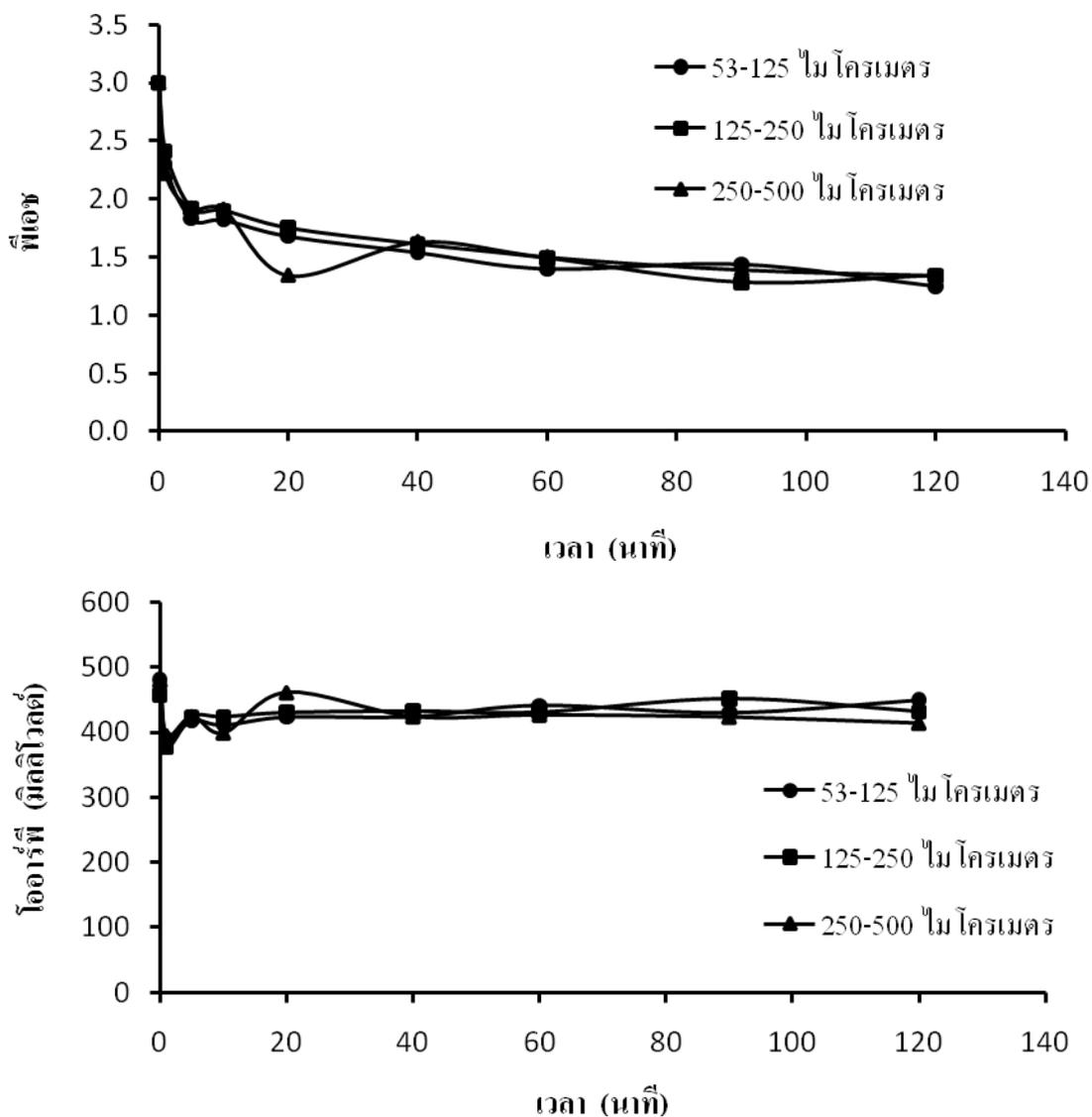
จากตารางที่ 3-43 ธาตุที่พบในตะกอนนั้นเป็นธาตุที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้าตามที่ได้รายงานไว้ เมื่อเรานำแผ่นวงจรไฟฟ้างี้มาละลายจึงทำให้มีธาตุเหล่านั้นอยู่ในน้ำชะและทันทีที่เติมผงเหล็ก ลงไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า ไอออนของเหล็กจึงได้ทำปฏิกิริยากับไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำชะ จึงสามารถพบธาตุเหล่านั้นในตะกอนได้เหตุที่พบทองแดงสูงสุดเนื่องจากมี ปริมาณมากที่สุดและค่าศักย์ไฟฟ้า (E^0) ของทองแดงยังมีความสามารถพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนมากกว่า ธาตุอื่นที่พบในน้ำชะโดยมีค่า 0.34 มิลลิโวลต์จึงส่งผลให้ผงเหล็กที่เติมทำปฏิกิริยากับทองแดงได้ดีกว่า ธาตุอื่นจึงพบว่าภายหลังการนำกลับพบทองแดงและเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆโดยออกซิเจนคาด ว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตะกอนซึ่งผู้ทดลองไม่ได้เตรียมในสภาวะไร้ออกซิเจนจึงทำให้ตะกอน อาจถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจน ในบรรยากาศส่วนคาร์บอนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียม ตัวอย่างเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) จะต้อง มีการติดกระดาษคาร์บอนที่ สดับเพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์และต้องเตรียมตัวอย่างให้เบา บางที่สุดจึงเป็นไปได้ว่าจะทำให้ผลการวิเคราะห์พบคาร์บอนได้

พบว่าขนาดอนุภาคของผงเหล็กส่งผลต่อปริมาณธาตุต่างๆที่พบในตะกอนอาจเนื่องจาก อนุภาค ผงเหล็กที่เล็กมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่าและเกิดปฏิกิริยาดีกว่าอนุภาคผงเหล็กที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยโลหะได้ดีและไม่เฉพาะเจาะจงเพียงทองแดงเท่านั้นแต่ยังทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาการให้และรับอิเล็กตรอนกับ ผงเหล็กได้และเมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและความเข้มข้นของทองแดงที่ เหลือภายหลังจากนำกลับโดยการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงละลายโดยใช้เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียสให้ผลแสดงดังภาพที่ 3-44



ภาพที่ 3-44 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 3-44 ทันทีที่เริ่มเติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเทนชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกและเริ่มซาลงจนกระทั่งเริ่มคงที่ในช่วงนาทีที่ 90 ตลอดระยะเวลาในเกิดปฏิกิริยา 120 นาทีพบว่าสถานะที่เต็มอนุภาคของผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรมีประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงกว่าอีก 2 ขนาดที่ทำการทดลอง คือ 99.80, 82.48 และ 89.89 เมื่อขนาดอนุภาคของผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับพบว่าอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรเป็นสถานะที่เหลือปริมาณทองแดงละลายต่ำสุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ขนาดคือ 861.10, 3,592.74 และ 2,073.06 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเติมผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ

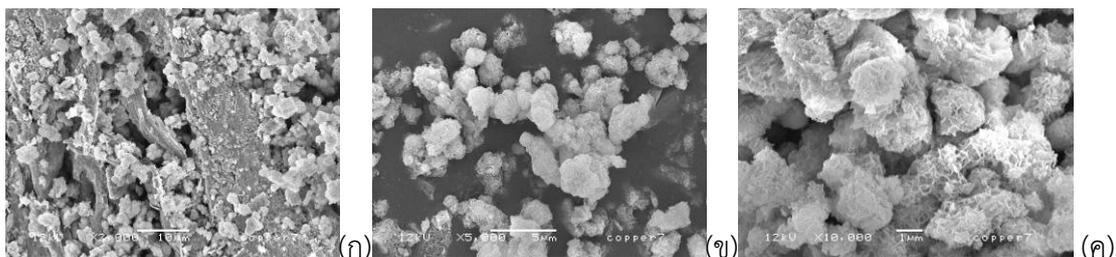


ภาพที่ 3-45 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส)

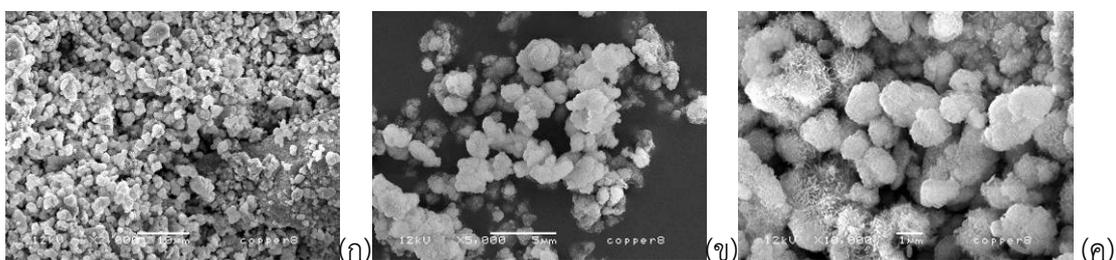
จากภาพที่ 3-45 พบว่าตลอดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตลอด 120 นาทีค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงกระทั่งคงที่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 - 2.0 ขณะที่ค่าโออาร์พีมีค่าระหว่าง 400 - 500 มิลลิโวลต์

3) อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส

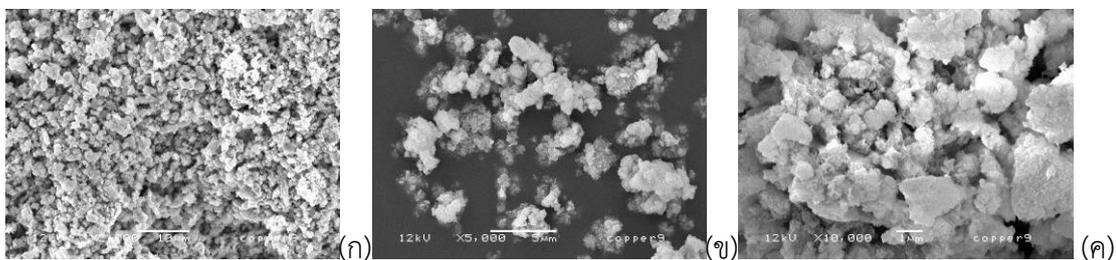
อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างภายนอกของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) แสดงดังภาพที่ 3-46 - 3-48 และองค์ประกอบธาตุกึ่งเชิงปริมาณจากเทคนิค Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) เพื่อพิจารณาร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุในตะกอน แสดงดังภาพที่ 3-49



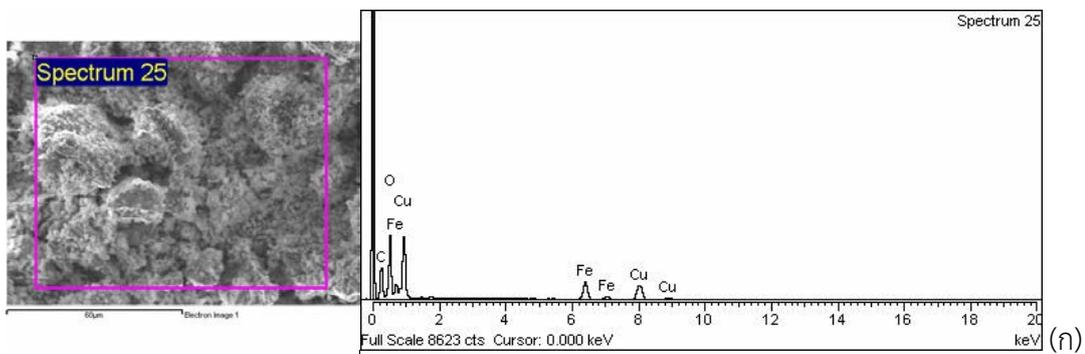
ภาพที่ 3-46 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร

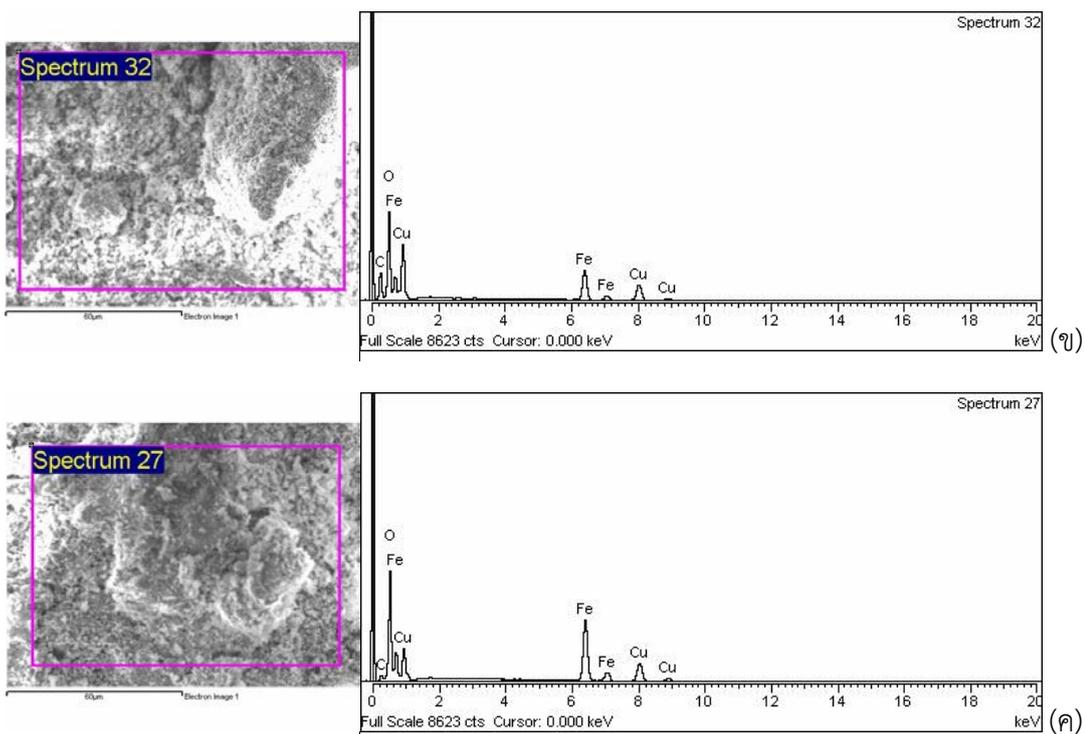


ภาพที่ 3-47 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร



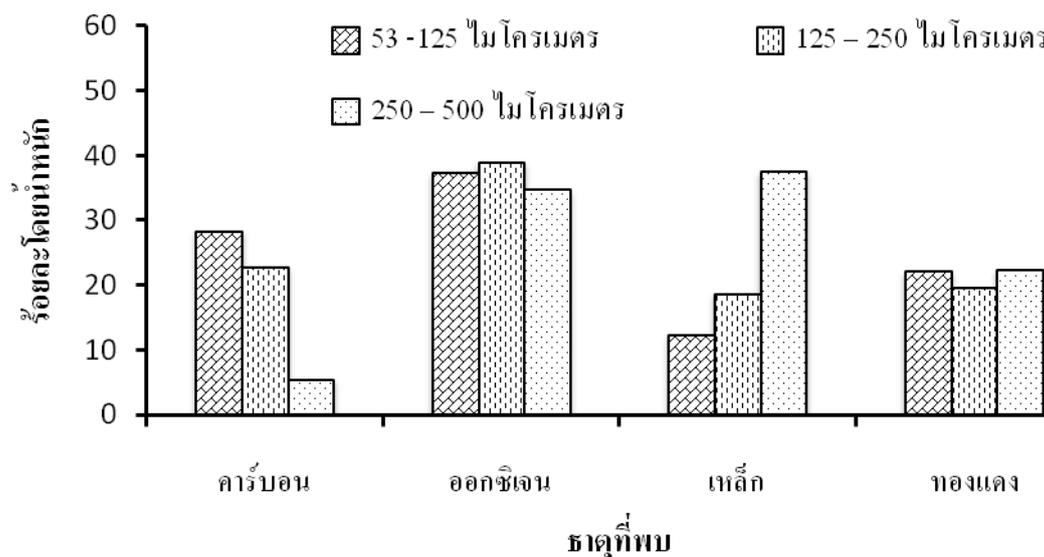
ภาพที่ 3-48 ลักษณะพื้นผิวของตะกอนที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขยาย 2,000 5,000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ขนาดผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร





ภาพที่ 3-49 องค์ประกอบธาตุที่เชิงปริมาณของตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิบัติการ 70 องศาเซลเซียส (ก) (ข) และ (ค) ขนาดผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ

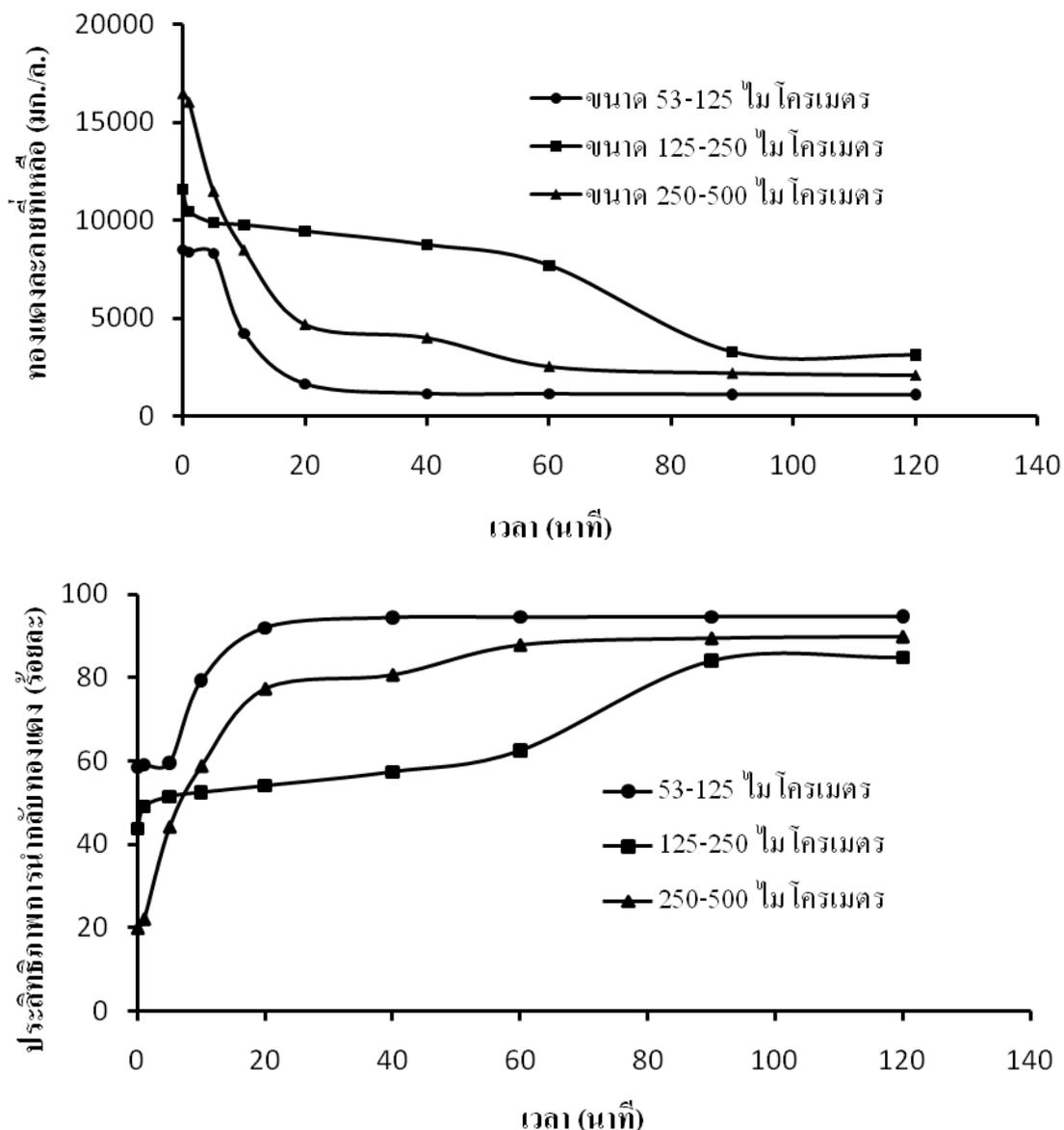
จากภาพที่ 3-49 พบธาตุหลายชนิดได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน เหล็ก ทองแดง ในปริมาณที่ต่างกันซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-50



ภาพที่ 3-50 องค์ประกอบธาตุที่พบในตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิบัติการ 70 องศาเซลเซียส

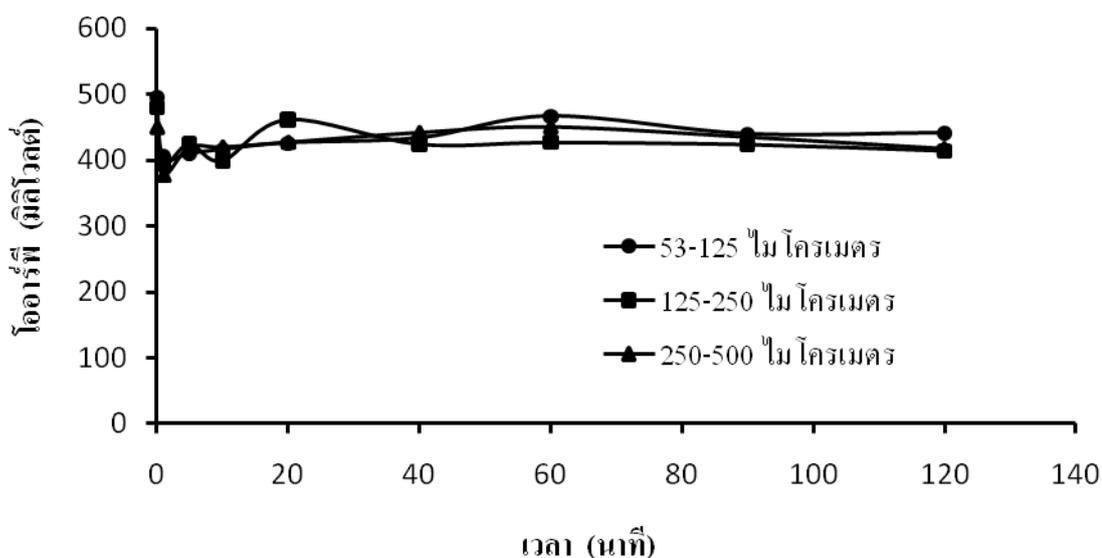
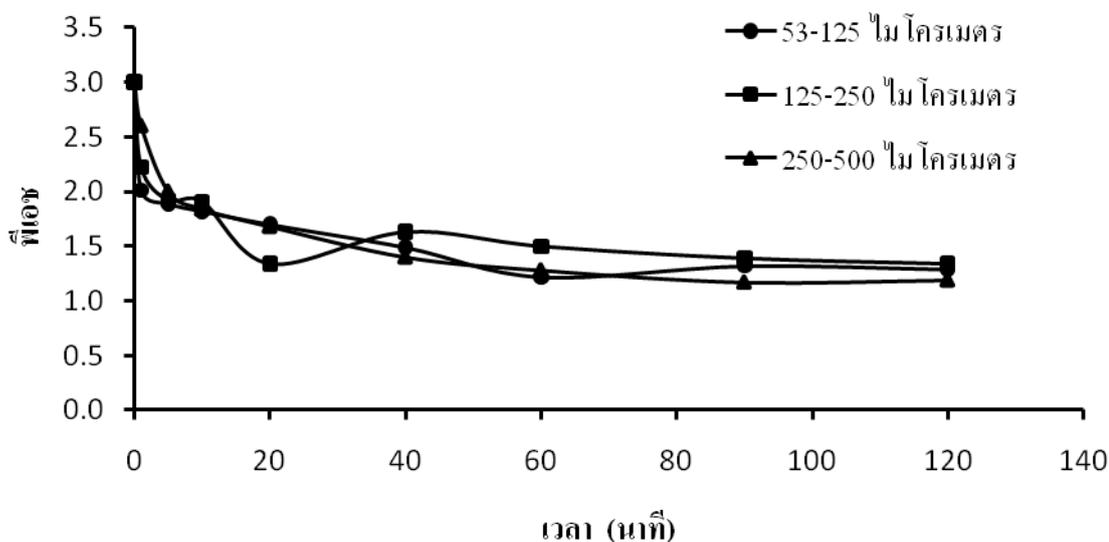
จากตารางที่ 3-50 ธาตุที่พบในตะกอนนั้นเป็นธาตุที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้า เมื่อเรานำแผ่นวงจรไฟฟ้างี้ดงกล่าวมาชะละลายจึงทำให้มีธาตุเหล่านั้นอยู่ในน้ำชะและทันทีที่เติมผงเหล็กลงไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า ไอออนของเหล็กจึงได้ทำปฏิกิริยากับไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำชะ จึงสามารถพบธาตุเหล่านั้นในตะกอนได้เหตุที่พบทองแดงสูงสุดเนื่องจากมีปริมาณมากที่สุดและค่าศักย์ไฟฟ้า (E^0) ของทองแดงยังมีความสามารถพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนมากกว่าธาตุอื่นที่พบในน้ำชะโดยมีค่า 0.34 มิลลิโวลต์จึงส่งผลให้ผงเหล็กที่เติมทำปฏิกิริยากับทองแดงได้ดีกว่าธาตุอื่นจึงพบว่าภายหลังการนำกลับพบทองแดงและเหล็กในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆโดยออกซิเจนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตะกอนซึ่งผู้ทดลองไม่ได้เตรียมในสภาวะไร้ออกซิเจนจึงทำให้ตะกอนอาจถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจนในบรรยากาศส่วนคาร์บอนคาดว่าเกิดจากขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX) จะต้องมีการติดกระดาษคาร์บอนที่สตั๊บ เพื่อเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์และต้องเตรียมตัวอย่างให้เบาบางที่สุดจึงเป็นไปได้ว่าอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์พบคาร์บอนได้

พบว่าขนาดอนุภาคของผงเหล็กส่งผลต่อปริมาณธาตุต่างๆที่พบในตะกอนคือขนาดอนุภาคของผงเหล็กยิ่งเล็กรธาตุต่างๆ ที่พบก็ยิ่งมีมากกว่าอีก 2 ขนาดที่เปรียบเทียบกัน และเมื่อพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือภายหลังจากนำกลับโดยการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงละลายโดยใช้เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียสให้ผลแสดงดังภาพที่ 3-51



ภาพที่ 3-51 ประสิทธิภาพการนำกลับของแดงและปริมาณทองแดงที่เหลือเทียบกับเวลา (อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส)

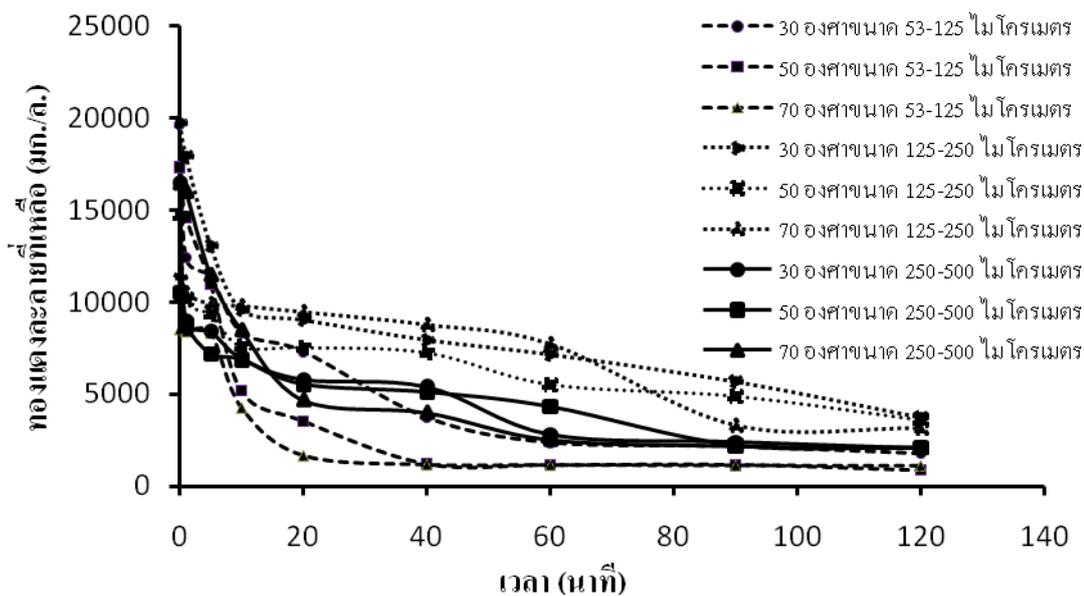
จากภาพที่ 3-51 ทันทีที่เริ่มเติมผงเหล็กปฏิกิริยาซีเมนเตชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกและเริ่มช้าลงในนาทีที่ 60 จนกระทั่งคงที่ในช่วงนาทีที่ 90 ตลอดระยะเวลาในเกิดปฏิกิริยา 120 นาทีพบว่าสถานะที่เต็มอนุภาคของผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรมีประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงกว่า อีก 2 ขนาดที่ทำการทดลอง คือ 94.65, 84.79 และ 89.86 เมื่อขนาดอนุภาคของผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงละลายที่เหลือภายหลังการนำกลับพบว่าอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรเป็นสถานะที่เหลือปริมาณทองแดงละลายต่ำสุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ขนาดคือ 1,097.51, 3,119.72 และ 2,080.30 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเติมผงเหล็ก 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรตามลำดับ



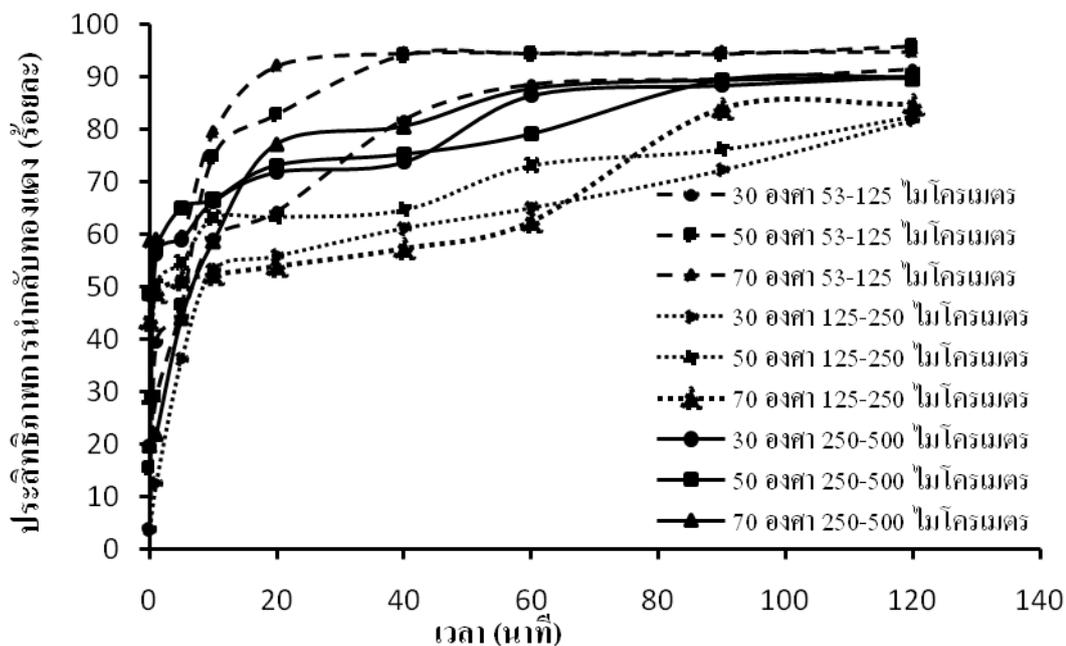
ภาพที่ 3-52 ผลของขนาดผงเหล็กต่อค่าพีเอชและโออาร์พี (อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 3-52 พบว่าตลอดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตลอด 120 นาทีค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงกระทั่งคงที่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นคือมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 - 2.5 ขณะที่ค่าโออาร์พีมีค่าระหว่าง 400 - 500 มิลลิโวลต์

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือภายหลังการนำกลับของทั้ง 3 อุณหภูมิปฏิกิริยา คือ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส และทั้ง 3 ขนาดที่ 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตร การทดลองทั้ง 2 ปัจจัยเราจึงนำผลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงและความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-53 และ 3-54



ภาพที่ 3-53 ปริมาณทองแดงละลายที่เหลือเทียบกับเวลา



ภาพที่ 3-54 ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงเทียบกับเวลา

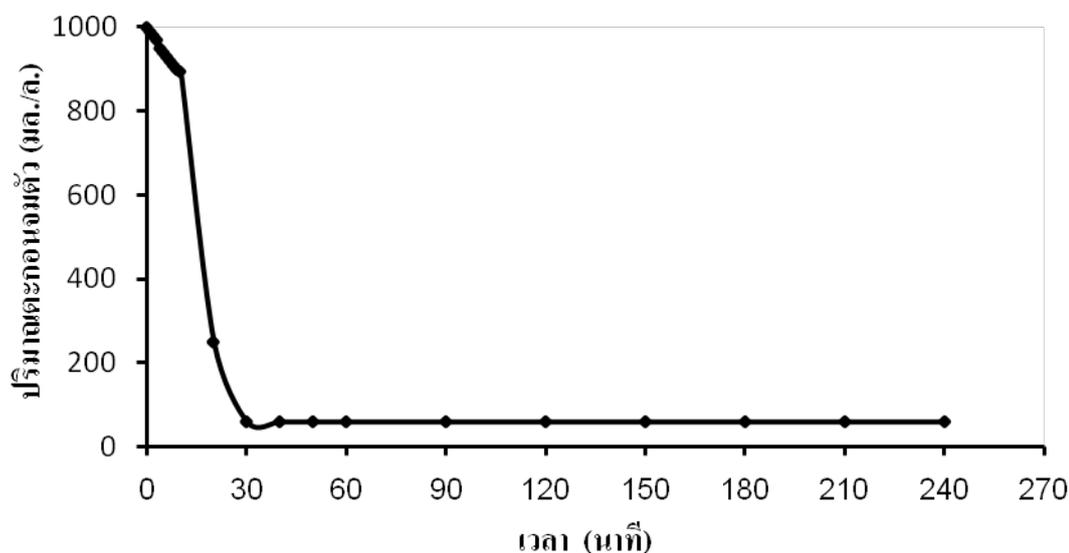
จากภาพที่ 3-53 และ 3-54 พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับทองแดงภายใต้อุณหภูมิปฏิบัติการเท่ากับ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียสและอนุภาคผงเหล็กขนาดที่ 53-125, 125-250 และ 250-500 ไมโครเมตรจะเห็นว่าพื้นที่ที่เริ่มเติมผงเหล็กปฏิบัติการซีเมนเทนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกพบว่าที่สภาวะที่อุณหภูมิปฏิบัติการ 70 องศาเซลเซียสอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรมีประสิทธิภาพในการนำกลับสูงสุดและปริมาณทองแดงละลายเหลือต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นกระทั่งเมื่อระยะเวลาผ่านไปกราฟเริ่มคงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหมายถึงปฏิบัติการซีเมน

เกิดขึ้นเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ใน 20 นาทีแรก ในบางครั้งอาจไม่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการนำกลับถึง 120 นาที เพื่อเป็นการลดระยะเวลา และต้นทุนของกระบวนการนำกลับในส่วนค่าไฟฟ้าเนื่องจากต้องใช้ อุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณทองแดงในตะกอนคิดเป็นร้อยละ 22.17 และ 95.80 (เทคนิคการย่อยและ AAS และ SEM-EDS) จากผลการทดลองจึงเป็นข้อสรุปที่ว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียสอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตรเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดง จากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า โดยใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาซีเมนเทนที่สมบูรณ์อย่างน้อย 20 นาที

3.7.12 การตกตะกอนทองแดงที่ได้จากการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า

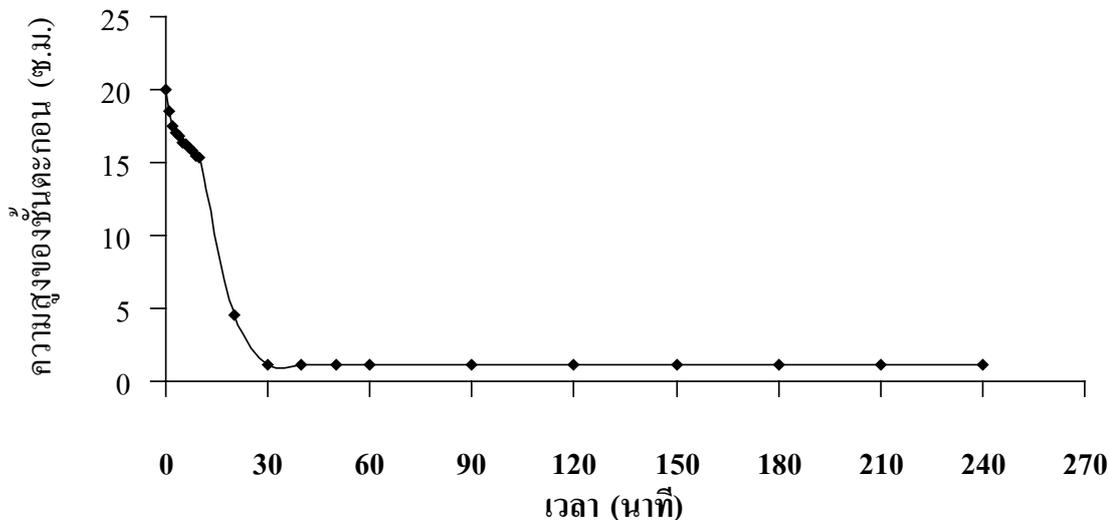
ด้วยกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์ในสภาวะที่ดีที่สุด

จากการศึกษาการตกตะกอนของตะกอนทองแดงจากสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 ผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก ความเร็วรอบ 750 รอบ/นาที อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียสและอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตร เพื่อทำการศึกษากการตกตะกอนใน กระบอกตวงซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 3-55

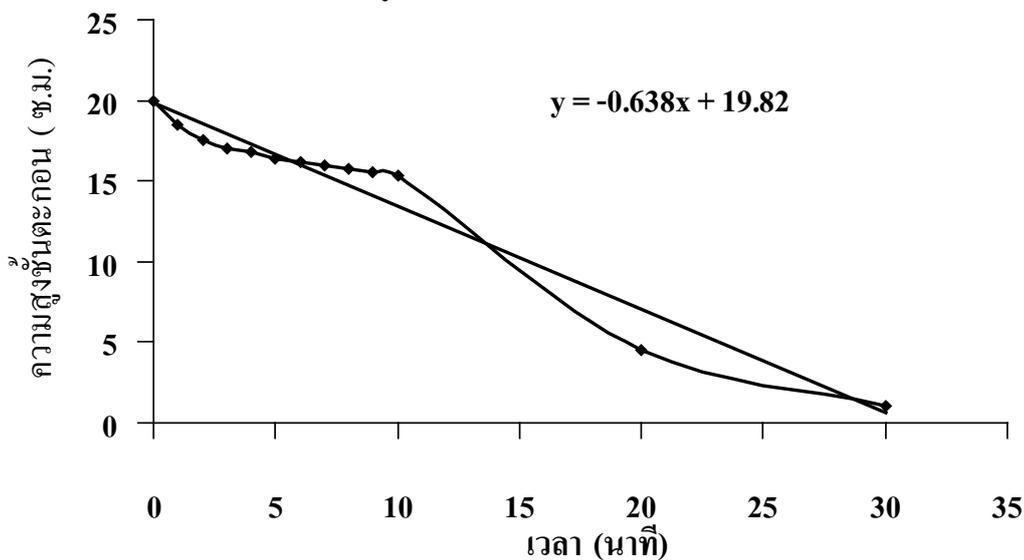


ภาพที่ 3-55 รูปแบบการตกตะกอนของตะกอนจากกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์

จากภาพ 3-55 พบว่าอัตราการตกตะกอน (Sedimentation rate) ของตะกอนทองแดง เป็นไปอย่างรวดเร็วอย่างเป็นระยะ ๆ ในช่วงแรกและเริ่มเกิดการตกตะกอนแบบเปลี่ยนแปลงที่ สุด ในช่วงระยะเวลา 20 นาที แล้วจึงเริ่มตกตะกอนคงที่ตั้งแต่ 30 นาทีแรกจนครบ 4 ชั่วโมง โดยรูปแบบ การตกตะกอนพบ 2 แบบคือ การตกตะกอนแบบโดด (Type I : discrete settling) คือตะกอนแต่ละ ก้อน จะตกลงอย่างเป็นอิสระไม่ส่งผลกระทบต่ออนุภาคใกล้เคียงและจากนั้นจึงเริ่มเป็นการเข้าสู่การ ตกตะกอนแบบบีบอัดตัว (Compression settling) เนื่องจากขนาดของอนุภาคและความเร็วในการ ตกตะกอนมีค่าคงที่ ภายหลังจากเติมผงเหล็กทำให้ไอออนทองแดงรวมตัวกับผงเหล็กส่งผลให้เม็ด ตะกอนมีขนาดเพิ่มขึ้นและตะกอนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเป็นกลุ่ม ก้อนขนาดใหญ่ตะกอนจึงเกิดการอัดตัวสามารถแยกตะกอนจากน้ำเป็นอย่างดี



ภาพที่ 3-56 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา



ภาพที่ 3-57 การหาความเร็วในการตกตะกอน

จากภาพที่ 3-57 พบว่าความสูงของชั้นตะกอนทองแดงเริ่มลดลงในช่วงแรกเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ความสูงของชั้นตะกอนทองแดงลดลงและเริ่มคงที่จนกระทั่งครบ 4 ชั่วโมง ระดับความสูงของชั้นตะกอนยังคงเท่าเดิมซึ่งจะส่งผลต่อความเร็วของการตกตะกอนของตะกอนทองแดง โดยความเร็วในการตกตะกอนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมถังตกตะกอนเนื่องจากความเร็วในการตกตะกอน (V_s) มีความสัมพันธ์กับอัตราน้ำล้นผิว (Q/A)

ดังนั้นการ $V_s = Q/A$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วในการตกตะกอน (เมตร/วินาที)

Q คือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถังตกตะกอน (ลูกบาศก์เมตร/วัน)

A คือ พื้นที่ผิวของถังตกตะกอน (ตารางเมตร)

หากตะกอนมีความเร็วในการตกตะกอนมาก ถึงตกตะกอนจะสามารถรับภาระน้ำล้นผิวได้มาก ส่งผลให้ถังตกตะกอนไม่ต้องมีพื้นที่ผิวมากเกินไป การหาความเร็วในการตกตะกอนหาได้จากความชันของกราฟระยะทางตกตะกอนและระยะเวลาการตกตะกอน แสดงดังภาพที่ 57 จากภาพสรุปได้ว่าความเร็วในการตกตะกอนของตะกอนทองแดงเท่ากับ 0.00638 เมตรต่อนาที (0.638 เซนติเมตรต่อนาที) อัตราน้ำล้นผิวเท่ากับ 9.187 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร.วัน

3.7.13 องค์ประกอบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของตะกอนที่ได้ภายหลังจากการนำกลับทองแดง

3.7.13.1 องค์ประกอบเชิงปริมาณของตะกอนภายหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) และ

Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)

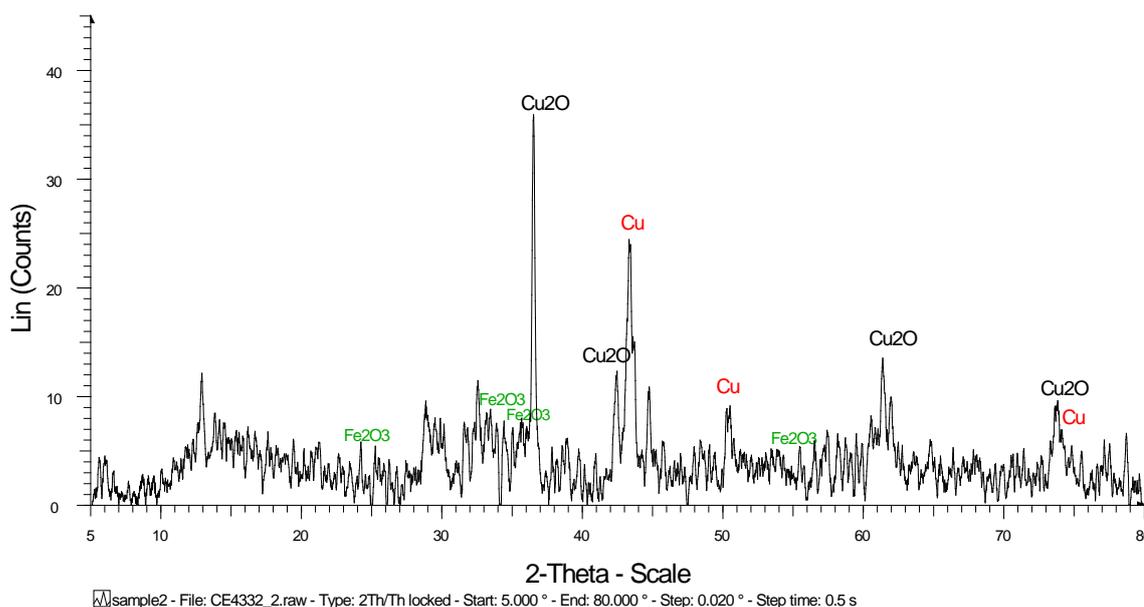
จากการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดง คือ พีเอชเริ่มต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเท่ากับ 3 ปริมาณการเติมผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริกอุณหภูมิกของกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์ 70 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาคผงเหล็กช่วง 53-125 ไมโครเมตร โดยสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงถึง ร้อยละ 95.80 จากการเตรียมตะกอนทองแดงประมาณ 1 กรัม ย่อยเพื่อวิเคราะห์ร้อยละของทองแดงในตะกอนได้ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 องค์ประกอบเชิงปริมาณจากเทคนิค Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) และ Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray (SEM-EDX)

สภาวะ	ปริมาณทองแดง(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ผลจากการวิเคราะห์ (AAS)	ผลจากการวิเคราะห์ (SEM-EDX)
เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3	66.40	25.40
เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3 ความเร็ว 750 รอบ/นาที	93.79	14.82
เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3 ความเร็ว 750 รอบ/นาที อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 53-125 ไมโครเมตร	95.80	22.17
เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3 ความเร็ว 750 รอบ/นาที อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร	89.44	19.62
เหล็ก 1 เท่า พีเอช 3 ความเร็ว 750 รอบ/นาที อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 250-500 ไมโครเมตร	87.90	16.62

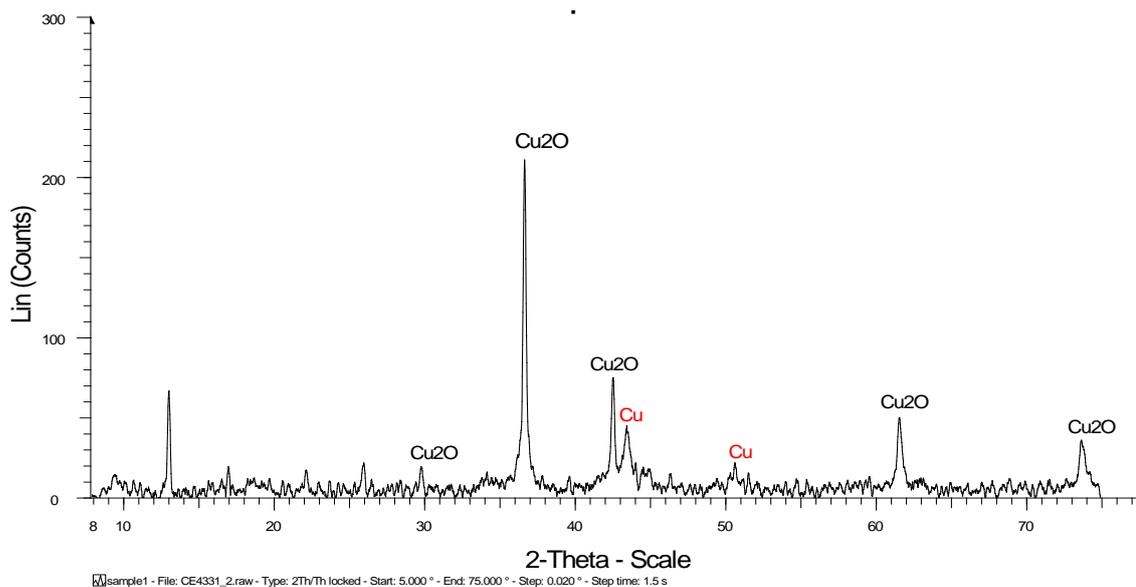
3.7.13.2 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนภายหลังการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

จากการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดง คือ พีเอชเริ่มต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเท่ากับ 3 ปริมาณการเติมผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริกของกระบวนการใช้เหล็กออกซิเดชันศูนย์ 70 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาคผงเหล็กช่วง 53-125 ไมโครเมตร โดยสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงถึง ร้อยละ 95.80 เพื่อนำตะกอนที่ได้วิเคราะห์องค์ประกอบของทองแดงในตะกอนได้ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-58 และ 3-59



ภาพที่ 3-58 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนในสภาวะเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก พีเอช 3 ที่อุณหภูมิห้อง

จากภาพที่ 3-58 สามารถระบุชนิดของสารประกอบที่พบในตะกอนโดยสารประกอบที่พบคือ โลหะทองแดง (Cu), ทองแดง(I)ออกไซด์ (Cu_2O) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยเหล็กออกไซด์คาดว่าเกิดจากการเติมผงเหล็กเพื่อเกิดปฏิกิริยาการให้และรับอิเล็กตรอนโดยในบางส่วนที่ละลายจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นทั้งหมดแต่บางส่วนไม่สามารถที่จะละลายได้ภายใต้ระยะเวลาที่จำกัดจึงพบเหล็กออกไซด์ภายหลังการนำกลับทองแดงโลหะทองแดงและทองแดง(I)ออกไซด์ (Cu_2O) เนื่องจากในน้ำชะมีธาตุหลากหลายชนิดที่เป็นองค์ประกอบด้วยคุณสมบัติของค่าศักย์ไฟฟ้า (E^0) โดยมีค่า 0.34 มิลลิโวลต์ที่มีความสามารถพร้อมที่จะให้และรับอิเล็กตรอนมากกว่าธาตุอื่นๆจึงส่งผลให้เหล็กที่ทำปฏิกิริยาในการให้และรับอิเล็กตรอนกับธาตุทองแดงได้ดีกว่าธาตุอื่น ภายหลังการนำกลับจึงพบสารประกอบของทองแดงในตะกอนและเมื่อทำการทดลองโดยจำกัดปัจจัยต่างๆเช่นความเร็วรอบ อุณหภูมิปฏิกิริยา และขนาดอนุภาคผงเหล็กผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-59



ภาพที่ 3-59 องค์ประกอบเชิงคุณภาพของตะกอนภายหลังจากการนำกลับที่สภาวะเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริก พีเอช 3 ความเร็ว 750 รอบ/นาที อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียสและอนุภาคผงเหล็กขนาด 53-125 ไมโครเมตร

จากภาพที่ 3-59 สามารถระบุชนิดของสารประกอบในตะกอนทองแดงพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วสารประกอบที่พบในตะกอนอยู่ในรูปทองแดง (I) ออกไซด์ (Cu₂O) นอกจากนี้ยังพบทองแดงที่อยู่ในรูปทองแดงบริสุทธิ์ (Cu) บ้างเล็กน้อย และไม่พบเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เนื่องจากด้วยปัจจัยต่างๆที่เพิ่มขึ้นเช่นความเร็วในการกวน อุณหภูมิปฏิกิริยาและขนาดอนุภาคผงเหล็กที่ใช้ก็มีขนาดเล็กจึงทำให้โอกาสในการละลายและการให้และรับอิเล็กตรอนกับธาตุต่างๆที่มีอยู่ในน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเกิดได้ดีกว่า

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเพนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน

4.1.1 สรุปผล

1. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อการบำบัดคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยเบื้องต้น โดยการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีตามสภาวะที่เหมาะสมพบว่า สารเคมีที่เหมาะสมคือสารส้ม โดยใช้ในอัตราส่วน 0.4 กรัม/ลิตร สามารถบำบัดสีปรากฏและความขุ่นได้ดี มีประสิทธิภาพการบำบัด COD สี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 90.70 78.66 90.20 และ 83.69 ตามลำดับ

2. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยกระบวนการเพนตันออกซิเดชัน เพื่อการกำจัดสีแท้และสารอินทรีย์ละลาย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้สารเพนตันในอัตราส่วน H_2O_2/Fe^{2+} คือ 1.5 mol/mol ปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} คือ 6 mmol/L และ 4 mmol/L ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียคือ 5 ระยะเวลาการกวนทำปฏิกิริยาคือ 90 นาที และการใช้สารรวมตะกอนเพื่อการกำจัดอนุภาคเพนตันคือการใช้โพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ อัตราส่วน 1 mg/L สามารถบำบัดสารอินทรีย์ สีแท้ และความขุ่นได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด COD สี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 89.17 99.54 98.98 และ 95.65 ตามลำดับ

3. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน ถือเป็นวิธีการที่ประสิทธิภาพสูง ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และสีปรากฏ ถูกกำจัดด้วยกลไกการสร้างและการรวมตะกอนทางเคมี สารอินทรีย์ละลายและสีแท้ถูกกำจัดด้วยกลไกการเกิดออกซิเดชัน โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดรวม ของการบำบัด COD สี ความขุ่น และของแข็งแขวนลอยคิดเป็นร้อยละ 98.99 99.90 99.90 และ 99.29 ตามลำดับ

4. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน มีราคาต้นทุนสำหรับค่าสารเคมี 5 ชนิด สารส้มชนิดผง ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% (H_2O_2) เฟอร์รัสซัลเฟตชนิดผง ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) โซดาไฟชนิดเม็ด (NaOH) และโพลิอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ คิดเป็นเงิน 2,116.15 บาทต่อการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน 1 ลบ.ม.

5. ผู้ประกอบการด้านสิ่งทอ ฟอกย้อม และสิ่งพิมพ์ สามารถประยุกต์ใช้วิธีการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเพนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสถานประกอบการของตนได้

4.1.2 ข้อเสนอแนะ

1. ใช้ผลการศึกษาในครั้งนี้เป็นข้อมูลในการออกแบบและก่อสร้างถึงปฏิกิริยาเพื่อการปฏิบัติการจริงในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนสำหรับสถานประกอบการ

2. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น น้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งพิมพ์ น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันหรือตัวทำละลาย น้ำเสียปนเปื้อนยาฆ่าแมลง น้ำเสียที่มีความเป็นพิษทางชีวภาพ โดยการใช้กระบวนการเพนตันออกซิเดชันร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

3. ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำเสียที่มีความเป็นพิษสูง (High Strength Wastewater) ด้วยการใช้กระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ในรูปแบบ BOD COD TOC อัตราส่วน BOD/COD และ COD/TOC
4. ศึกษา น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันในเชิงพิษวิทยาเพิ่มเติม

4.2 การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทชัน

4.2.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ

1. การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy)
2. การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทชันด้วยผงเหล็ก

การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy)

ศึกษา องค์ประกอบต่างๆของแผ่นวงจรไฟฟ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของสารชะละลาย ความเข้มข้นของสารชะละลาย และอัตราส่วนระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อสารชะละลาย (S/L Ratio) โดยทำการชะละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. องค์ประกอบแผ่นวงจรไฟฟ้าประกอบด้วย โลหะ แผ่นวงจรไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน พลาสติกและอื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 36, 30, 21, 11 และ 2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
2. ขนาดอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ผ่านการบด (เฉพาะส่วนที่เป็นโลหะ) มีการกระจายตัวโดยมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.125 – 1.000 มิลลิเมตร และพบว่าอนุภาคแผ่นวงจรไฟฟ้าส่วนใหญ่ร้อยละ 44.17 โดยน้ำหนัก มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.250 – 0.600 มิลลิเมตร
3. แผ่นวงจรไฟฟ้า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 0.0389 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารระเหยร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 82.31 โดยน้ำหนัก แผ่นวงจรไฟฟ้ามีความเป็นไปได้ที่สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ในทั้งนี้แผ่นวงจรไฟฟ้าไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนในการประกอบกิจกรรมในครัวเรือน เนื่องจากเกิดสารไดออกซิน (ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง) และ ฟิวแรน ระหว่างการเผา ควรเลือกนำแผ่นวงจรไฟฟ้าในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาโรงปูน เพราะมีการเผาที่อุณหภูมิสูงๆ สามารถลดปัญหามลพิษทางอากาศ และเป็นวิธีการกำจัดของเสียอีกทางหนึ่ง
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายโลหะหนักจากแผ่นวงจรไฟฟ้า ต้องพิจารณารวมทั้ง ชนิดของสารชะละลาย ความเข้มข้นของสารชะละลาย รวมทั้งอัตราส่วนของแผ่นวงจรไฟฟ้ากับปริมาณสารชะละลาย (S/L Ratio) รวมถึงอุณหภูมิและเวลาในการชะละลาย

4.1 ชนิดของสารชะละลายมีความสามารถในการชะละลายโลหะออกจากแผ่นวงจรไฟฟ้าได้ไม่เท่ากัน ดังนี้

- 1) กรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะตะกั่วได้ดีที่สุดคือ กรดไนตริก รองลงมาคือ กรดไฮโดรคลอริก Aqua regia และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ
- 2) กรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะนิกเกิลได้ดีที่สุดคือ Aqua regia รองลงมาคือ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ตามลำดับ
- 3) กรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะเหล็กได้ดีที่สุดคือ Aqua regia รองลงมาคือ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ตามลำดับ

4) กรดที่มีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะทองแดงได้ดีที่สุดคือ กรดไนตริก รองลงมาคือ Aqua regia กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ

4.2 โลหะแต่ละชนิด ถูกชะละลายได้แตกต่างกัน โลหะที่ถูกชะละลายได้มากที่สุดคือ ทองแดง รองลงมาคือ เหล็ก ตะกั่ว และนิกเกิล ตามลำดับ

1) สภาพที่เหมาะสมในการชะละลายโลหะจากแผ่นวงจรไฟฟ้า โลหะทองแดงสามารถชะละลายได้ดีที่สุดในกรดไนตริก ที่ความเข้มข้นของสารชะละลาย 4 โมลต่อลิตร อัตราระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรด 20 กรัม

2) โลหะเหล็กสามารถชะละลายได้ดีที่สุดใน Aqua regia ที่ความเข้มข้นของสารชะละลาย 4 โมลต่อลิตร อัตราระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรด 30 กรัม

3) โลหะตะกั่วสามารถชะละลายได้ดีที่สุดในกรดไนตริก ที่ความเข้มข้นของสารชะละลาย 6 โมลต่อลิตร อัตราระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรด 30 กรัม

4) โลหะนิกเกิลสามารถชะละลายได้ดีที่สุดใน Aqua regia ที่ความเข้มข้นของสารชะละลาย 4 โมลต่อลิตร อัตราระหว่างแผ่นวงจรไฟฟ้าต่อกรด 30 กรัม

5. โลหะทองแดงสามารถชะละลายออกมาได้ดีถึงร้อยละ 96.71 โดยน้ำหนัก โลหะเหล็กสามารถชะละลายได้ร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก โลหะตะกั่วสามารถชะละลายได้ร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนัก โลหะนิกเกิลสามารถชะละลายได้ร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก

ควรที่จะเลือกนำกลับโลหะทองแดง เพราะเพราะคุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากการชะละลายจากแผ่นวงจรไฟฟ้าทำได้ง่าย ให้ความเข้มข้นในการชะละลายและให้ร้อยละโดยน้ำหนักสูงที่สุด อีกทั้งเป็นโลหะที่มีศักยภาพในการนำกลับสูง

การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทนชันด้วยผงเหล็ก

การวิจัยในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาพที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงในน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า โดยใช้ผงเหล็ก ศึกษาการตกตะกอนของตะกอนทองแดง พร้อมทั้งศึกษาองค์ประกอบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของทองแดงในตะกอนทองแดง ที่ได้จากนำกลับทองแดง กลไกหรือกระบวนการที่เกิดขึ้นในการนำกลับทองแดงในน้ำเสีย คือ การแทนที่ด้วยโลหะ (metallic replacement) หรือกระบวนการซีเมนเทนชัน (cementation process)

โดยพบว่าลักษณะเบื้องต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้า คือมีความเข้มข้นของทองแดงละลายทั้งหมด 102,552.15 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 0.87 ในการทดลองกระบวนการซีเมนเทนชันได้เจือจางน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกรดไนตริกได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 20,510.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงเหล็กที่ใช้มีขนาด 53 - 500 ไมโครเมตร โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 38.38 มีขนาด 125 - 250 ไมโครเมตร พีเอชเริ่มต้นของน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเท่ากับ 3 ปริมาณ ผงเหล็ก 1 เท่าของสตอยชิโอเมตริกความเร็วในการกวน 750 รอบ/นาที ผงเหล็กขนาด 53 - 125 ไมโครเมตร อุณหภูมิปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์อย่างน้อย 20 นาที เป็นสภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าเพราะมีประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงสูงถึงร้อยละ 94.65 พบทองแดงในรูปของโลหะทองแดง (metallic copper), ทองแดง (I) ออกไซด์ (Cu_2O) และพบว่าปริมาณทองแดงในตะกอนคิดเป็นร้อยละ 22.17 และ 95.80 (AAS และ SEM-EDS) โดยสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้แยกทองแดงออกจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยมีความเร็วในการตกตะกอนเท่ากับ 0.00638 เมตรต่อนาที อัตราน้ำล้นผิวเท่ากับ 9.187 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร.วัน

4.2.2 ข้อเสนอแนะ

การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าเป็นการชะละลายทางเคมี (Chemical Hydrometallurgy)

1. ศึกษาการนำกลับทองแดง จากสถานะการชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในการแยกทองแดงออกจากสารชะละลายด้วยวิธีอื่นต่อไป เช่น เทคนิคซีเมนเทชัน กระบวนการไฟฟ้าเคมีหรือกระบวนการรีดักชัน
2. การชะละลายโลหะจากของเสียที่จะเป็นทางเลือกในการนำกลับโลหะหนัก ควรพิจารณาปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดในองค์ประกอบนั้นๆ และความสามารถในการละลายในสภาวะต่างๆ เนื่องจากส่งผลต่อความเข้มข้นที่ได้ในสารชะละลาย
3. แผ่นวงจรไฟฟ้ามีความเป็นไปได้ที่สามารถให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ในทั้งนี้แผ่นวงจรไฟฟ้าไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนในการประกอบกิจกรรมในครัวเรือน ควรเลือกนำแผ่นวงจรไฟฟ้าในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาโรงปูน เพราะมีการเผาที่อุณหภูมิสูงๆ สามารถลดปัญหามลพิษทางอากาศ และเป็นวิธีการกำจัดของเสียอีกทางหนึ่ง

การนำกลับทองแดงจากน้ำชะแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยเทคนิคซีเมนเทชันด้วยผงเหล็ก

1. ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อป้องกันตะกอนถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในบรรยากาศ
2. อาจประยุกต์ใช้ผลการศึกษาเพื่อนำกลับโลหะมีค่าชนิดอื่นในของเสียอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆ

ภาคผนวก

1. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน

ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน

ตารางผนวกที่ 1-1 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

ความเข้มข้นสารสร้างตะกอน (กรัม/ลิตร)	ค่าซีไอดี (มก./ล.)		
	สารส้ม	เพอริกคลอไรด์	เพอร์สัลเฟต
0	3,776	3,776	3,776
1	857	1,811	1,982
2	1,160	2,089	1,746
3	1,688	2,176	1,324
4	2,074	2,011	1,817
5	2,516	2,433	1,214
6	2,824	2,929	1,976
7	2,631	3,056	1,878
8	2,577	3,213	2,231
9	2,709	3,088	1,944
10	2,953	3,269	3,062

ตารางผนวกที่ 1-2 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี

ความเข้มข้นสารสร้างตะกอน (กรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง		
	สารส้ม	เพอริกคลอไรด์	เฟอร์รัสซัลเฟต
0	1.012	1.012	1.012
1	0.637	0.821	0.891
2	0.738	0.813	0.926
3	0.763	0.866	0.851
4	0.766	0.932	0.702
5	0.778	0.919	0.727
6	0.797	0.954	0.777
7	0.844	0.994	0.849
8	0.806	1.046	0.828
9	0.856	1.037	0.869
10	0.829	1.062	0.938

หมายเหตุ 1. ค่ากลืนแสง ณ ความยาวคลื่น 526 nm

2. ค่าการดูดกลืนแสงแสดงในตารางได้จากการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า

ตารางผนวกที่ 1-3 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

ความเข้มข้นสารสร้างตะกอน (กรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่น (NTU)		
	สารส้ม	เพอริกคลอไรด์	เพอร์สซัลเฟต
0	1000	1000	1000
1	392	512	540
2	481	628	512
3	522	654	464
4	532	639	421
5	568	687	433
6	601	742	504
7	577	714	588
8	634	884	541
9	616	863	686
10	681	841	717

หมายเหตุ ค่าความขุ่นแสดงในตารางได้จากการเจือจางด้วยน้ำกลั่น 5 เท่า

ตารางผนวกที่ 1-4 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเสียอม
จากการพิมพ์ซิลค์สกรีนด้วยกระบวนการสร้างตะกอน

ปริมาณสารส้ม (กรัม/ลิตร)	COD		สี		ความขุ่น	
	COD (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)	การดูดกลืนแสง	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)	ความขุ่น (NTU)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
0.24	2037	46.05	0.990	3.04	288	71.20
0.26	983	73.97	0.700	31.44	201	79.90
0.28	772	79.56	0.465	54.46	115	88.50
0.30	832	77.97	0.775	24.09	191	80.90
0.32	780	79.34	0.500	51.03	135	86.50
0.34	468	87.61	0.715	29.97	174	82.60
0.36	468	87.61	0.800	21.65	182	81.80
0.38	572	84.85	0.615	39.76	174	82.60
0.40	208	94.49	0.250	75.51	99	90.10
0.42	468	87.61	0.775	24.09	117	88.30
0.44	416	88.98	0.375	63.27	117	88.30

หมายเหตุ 1. ค่า COD เริ่มต้นของน้ำเสียเสียอมจากการพิมพ์ซิลค์สกรีนคือ 3,776 มก./ล.

2. ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น ณ λ 526 nm (เจือจาง 5 เท่า) คือ 1.012

3. ค่าความขุ่นเริ่มต้น (เจือจาง 5 เท่า) คือ 1,000 NTU

ตารางผนวกที่ 1-5 อัตราส่วนระหว่าง H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสม

อัตราส่วน H_2O_2 (mol/mol)	ประสิทธิภาพการบำบัด ณ ความเข้มข้นของ Fe^{2+}											
	0.5 mmol/l				1.0 mmol/l				3.0 mmol/l			
	COD		สี		COD		สี		COD		สี	
	mg/l	% การกำจัด	abs	% การกำจัด	mg/l	% การกำจัด	abs	% การกำจัด	mg/l	% การกำจัด	abs	% การกำจัด
0.6	204.80	41.65	0.053	95.09	163.84	53.32	0.046	95.74	153.60	56.24	0.052	95.19
0.8	163.84	53.32	0.059	94.54	174.08	50.40	0.048	95.56	143.36	59.16	0.049	95.46
1.0	143.36	59.16	0.056	94.81	153.60	56.24	0.052	95.19	143.36	59.16	0.050	95.37
1.2	153.60	56.24	0.051	95.28	176.08	49.83	0.049	95.46	153.60	56.24	0.049	95.46
1.5	163.84	53.32	0.051	95.28	143.36	59.16	0.047	95.65	143.36	59.16	0.046	95.74
2.0	153.60	56.24	0.051	95.28	174.08	50.40	0.050	95.37	143.36	59.16	0.049	95.46

หมายเหตุ 1. ค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้นภายหลังการรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 g/l คือ 351 mg/l

2. ค่าการดูดกลืนแสง ณ λ_{526nm} ภายหลังการรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 g/l คือ 0.216 (เจือจาง 5 เท่าด้วยน้ำกลั่น)

ตารางผนวกที่ 1-6 ปริมาณการใช้ H_2O_2 และ Fe^{2+} ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วน H_2O_2 / Fe^{2+} เท่ากับ 1.5 mmol/mmol

ความเข้มข้นของ Fe^{2+} mmol/l	COD		สี		ความขุ่น	
	mg/l	ร้อยละการกำจัด	abs	ร้อยละการกำจัด	NTU	ร้อยละการกำจัด
0.8	179.52	48.85	0.055	94.91	3	99.39
1.6	126.72	63.90	0.049	95.46	1	99.80
2.4	73.92	78.94	0.051	95.28	1	99.80
3.2	73.92	78.94	0.049	95.46	2	99.59
4.0	63.36	81.95	0.049	95.46	1	99.80
4.8	63.36	81.95	0.049	95.46	2	99.59
5.6	52.80	84.96	0.053	95.09	6	98.78
6.4	52.80	84.96	0.058	94.63	11	97.76
7.2	42.24	87.97	0.072	93.33	16	96.73
8.0	31.68	90.97	0.161	85.09	88	82.04

หมายเหตุ 1. ค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้นภายหลังการรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 g/l คือ 351 mg/l

2. ค่าการดูดกลืนแสง ณ λ_{526nm} ภายหลังการรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 g/l คือ 0.216 (เจือจาง 5 เท่าด้วยน้ำกลั่น)

3. ค่าความขุ่นเริ่มต้นภายหลังการรวมตะกอนทางเคมีโดยใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 g/l คือ 98 NTU (เจือจาง 5 เท่าด้วยน้ำกลั่น)

ตารางผนวกที่ 1-7 ค่าพีเอชเริ่มต้นในการใช้สารฟอสเฟตที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม การพิมพ์ซิลค์สกรีน

pH เริ่มต้น	COD		color		NTU	
	mg/L	% การกำจัด	abs	% การกำจัด	NTU	% การกำจัด
เริ่มต้น	351		1.08		490	
2	76.22	78.28	0.173	83.98	4	99.18
3	88.92	74.67	0.051	95.28	3	99.18
4	63.52	81.90	0.048	95.56	3	99.18
5	50.82	85.52	0.055	94.91	3	99.18
6	76.24	78.28	0.081	92.50	4	99.18
7	88.93	74.66	0.079	92.69	3	99.18
8	63.52	81.90	0.067	93.80	3	99.18
9	63.52	81.90	0.059	94.54	3	99.18

ตารางผนวกที่ 1-8 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีน

เวลา (นาที)	COD		pH	ORP (mV)
	mg/l	% การกำจัด		
5	97.44	72.24	3.54	522.9
10	55.68	84.14	3.52	532.1
15	97.44	72.24	3.53	543.8
20	69.6	80.17	3.51	544.7
30	97.44	72.24	3.5	547.3
45	69.6	80.17	3.5	549.3
60	83.2	76.3	3.49	552.7
90	55.68	84.14	3.49	557.5
120	55.68	84.14	3.48	561.9

ตารางผนวกที่ 1-9 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตัน

ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความขุ่น (NTU)
0	0.05	1
100	0.049	2
200	0.049	2
300	0.053	2
400	0.065	3
500	0.088	2
600	0.071	8
700	0.096	11
800	0.134	18
900	0.126	20
1000	0.141	24

ตารางผนวกที่ 1-10 ปริมาณโพลีอิเล็กโตรไลท์ที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคเฟนตัน

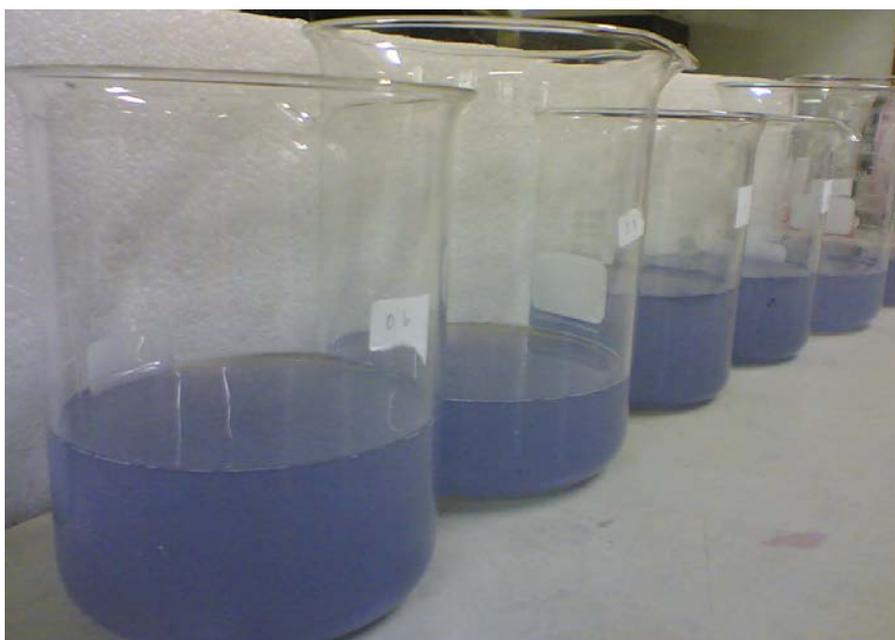
ความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลท์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความขุ่น (NTU)
0.00	0.05	1
0.25	0.05	2
0.50	0.049	2
0.75	0.05	1
1.00	0.035	1
1.25	0.035	1
1.50	0.038	1
1.75	0.045	1
2.00	0.041	2
2.25	0.042	1
2.50	0.04	2

ตารางผนวกที่ 1-11 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน

กระบวนการ	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)			
	ซีไอดี	สี	ความขุ่น	ของแข็งแขวนลอย
โคแอกกูเลชั่น	90.7	78.66	90.2	83.69
เฟนตันออกซิเดชั่น	89.17	99.54	98.98	95.65
โคแอกกูเลชั่น+เฟนตันออกซิเดชั่น	98.99	99.9	99.9	99.29



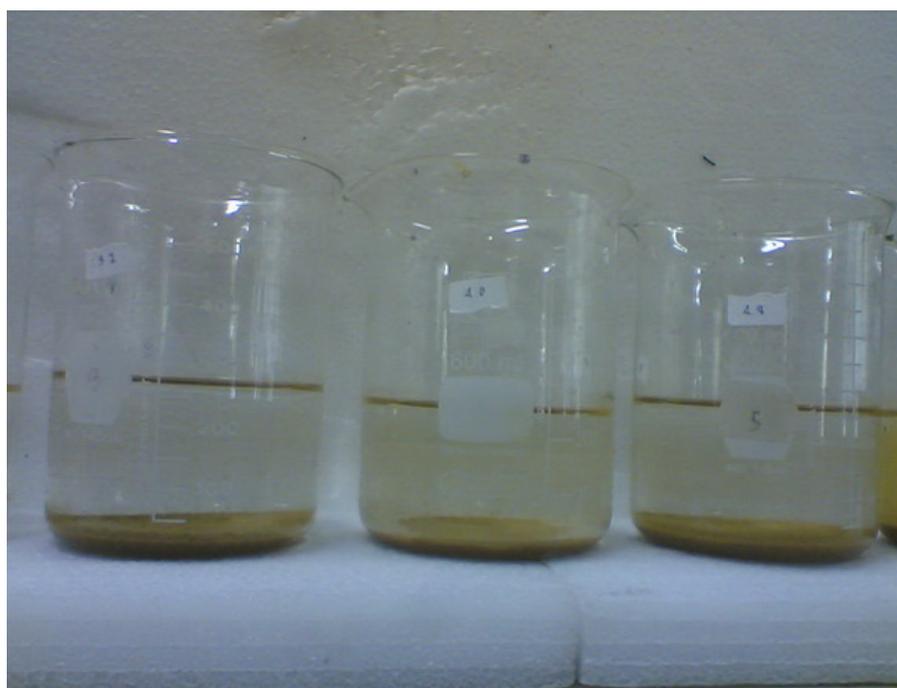
ภาพผนวกที่ 1-1 น้ำเสียเบื้องต้นจากการพิมพ์ซิลค์สกรีน



ภาพผนวกที่ 1-2 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนที่ผ่านกระบวนการ Coagulation ด้วยสารสร้างตะกอน



ภาพผนวกที่ 1-3 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนระหว่างการทำปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน



ภาพผนวกที่ 1-4 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังกระบวนการเฟนตันออกซิเดชัน



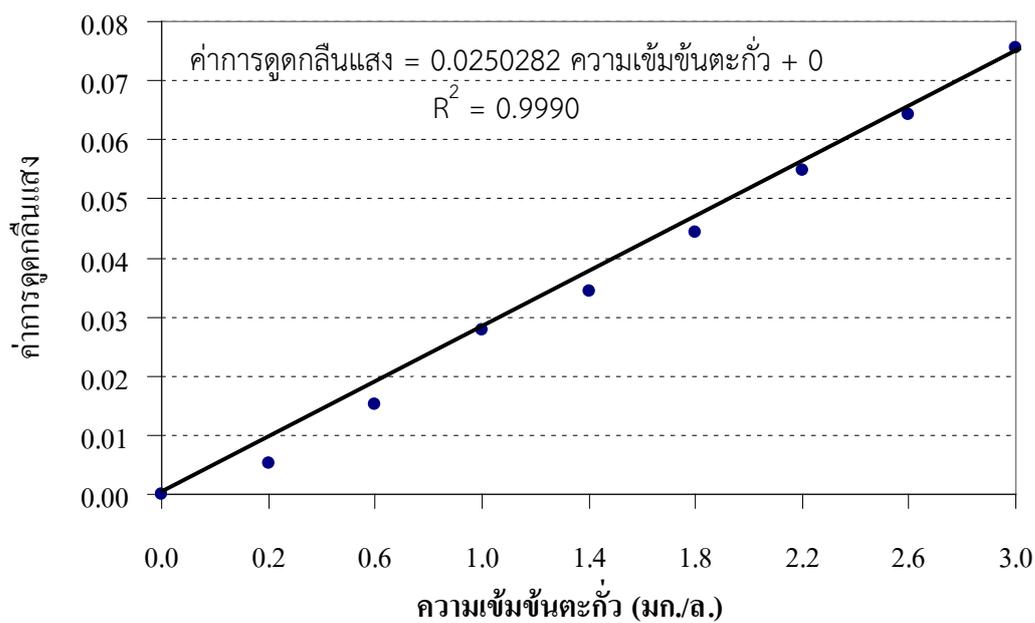
ภาพผนวกที่ 1-5 น้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนภายหลังกระบวนการฟันทันออกซิเดชั่น
และการกำจัดอนุภาพฟันทันด้วยโพลีอิเล็กโตรไลต์ประจุลบ

2. การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนซ์

กราฟมาตรฐานของโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิลและเหล็ก

ตารางผนวกที่ 2-1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะตะกั่ว

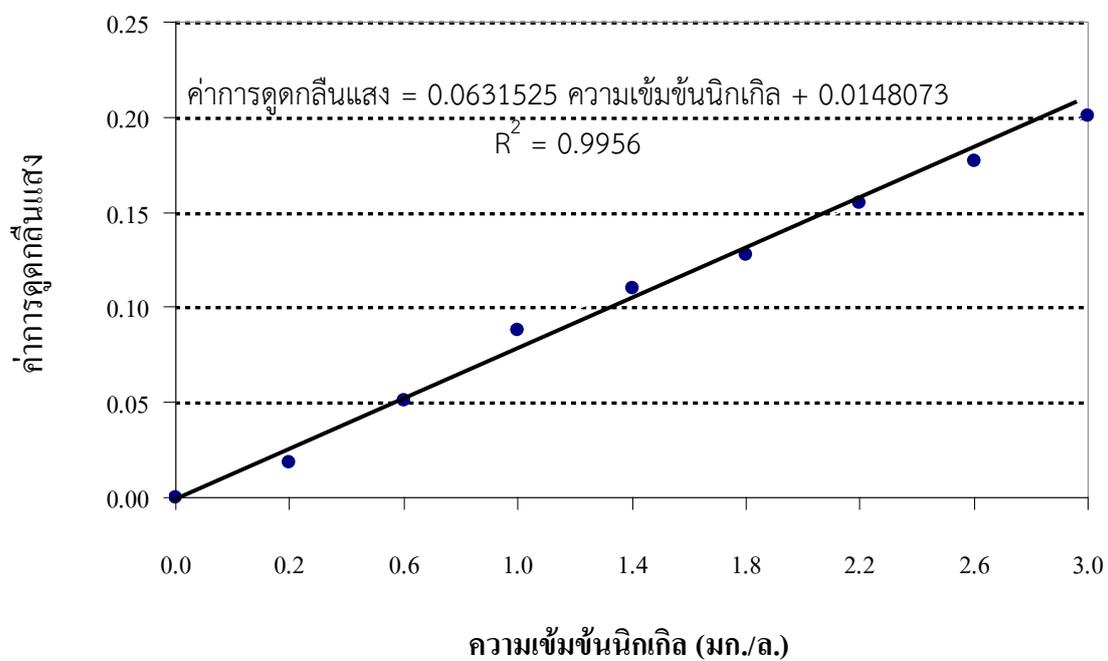
ความเข้มข้นของตะกั่ว (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.2	0.0053
0.6	0.0152
1.0	0.0277
1.4	0.0343
1.8	0.0443
2.2	0.0549
2.6	0.0643
3.0	0.0756



ภาพผนวกที่ 2-1 กราฟมาตรฐานตะกั่ว

ตารางผนวกที่ 2-2 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะนิกเกิล

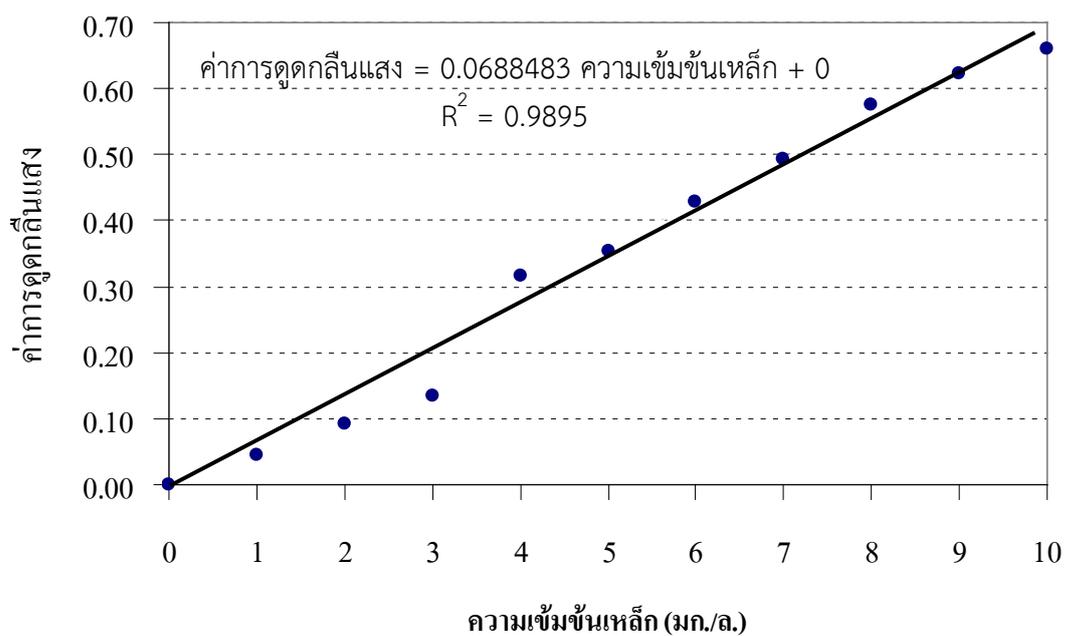
ความเข้มข้นของนิกเกิล (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.2	0.0188
0.6	0.0508
1.0	0.0876
1.4	0.1100
1.8	0.1277
2.2	0.1548
2.6	0.1765
3.0	0.2008



ภาพผนวกที่ 2-2 กราฟมาตรฐานนิกเกิล

ตารางผนวกที่ 2-3 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะเหล็ก

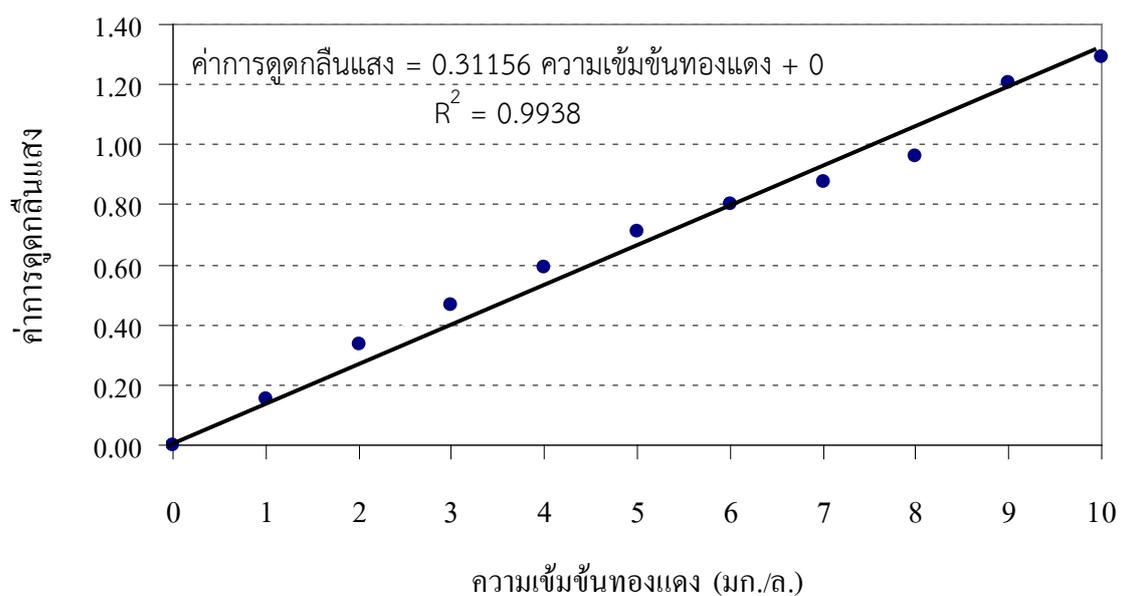
ความเข้มข้นของเหล็ก (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.0440
2	0.0932
3	0.1354
4	0.3176
5	0.3541
6	0.4291
7	0.4931
8	0.5747
9	0.6217
10	0.6610



ภาพผนวกที่ 2-3 กราฟมาตรฐานเหล็ก

ตารางผนวกที่ 2-4 ข้อมูลกราฟมาตรฐานโลหะทองแดง

ความเข้มข้นของทองแดง (มก./ล)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.1509
2	0.3344
3	0.4658
4	0.5893
5	0.7093
6	0.8024
7	0.8744
8	0.9634
9	1.2038
10	1.2897



ภาพผนวกที่ 2-4 กราฟมาตรฐานทองแดง

การวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อทราบปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้า

1. การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content)

น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมฝา+ ตัวอย่าง 1 กรัม (ก่อนอบ)

$$= 51.37 \text{ g (A)}$$

น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมฝา+ ตัวอย่าง 1 กรัม (หลังอบ ที่ 105° C 24 ชม.)

$$= 51.35 \text{ g (B)}$$

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{ปริมาณความชื้น (\%) (A-B)/A} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างทดลองก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังอบ (กรัม)

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(51.37 - 51.35)}{51.37} \times 100$$

$$= 0.0389 \text{ \%}$$

2. การหาปริมาณเถ้า (Ash Content)

น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมเถ้า (หลังเผาที่ 750 ° C 2 ชม.)

$$= 50.46 \text{ g (A)}$$

น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมฝา (ก่อนเผา)

$$= 50.30 \text{ g (B)}$$

น้ำหนักตัวอย่างทดลองที่ใช้ 1 g (C)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{(A-B)}{C} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมเถ้า (กรัม)

B = น้ำหนักของถ้วยทนไฟพร้อมฝา(กรัม)

C = น้ำหนักตัวอย่างทดลองที่ใช้ (กรัม)

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{(50.46 - 50.30)}{1} \times 100$$

$$= 16 \text{ \%}$$

3. การหาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

น้ำหนักถ้วยทนไฟพร้อมฝา + ตัวอย่าง 1 g

$$= 51.37 \text{ g (A)}$$

น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (950 ° C 7 นาที)

$$= 50.50 \text{ g (B)}$$

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. คำนวณน้ำหนักที่หายไป

$$\text{Weight Loss (\%)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100$$

A = น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (กรัม)

2. คำนวณหาปริมาณสารระเหย

$$\text{Volatile Matter (\%)} = C-D$$

C = Weight Loss (%)

D = ความชื้น (%) จากข้อ 1.

$$\begin{aligned} \text{Weight Loss (\%)} &= (51.37 - 50.50) / 51.37 \times 100 \\ &= 1.69 \% \\ \text{Volatile Matter (\%)} &= 1.69 - 0.0389 \\ &= 1.65 \% \end{aligned}$$

4. การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

คำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ ความชื้น} + \% \text{ ปริมาณเถ้า} + \% \text{ ปริมาณสารระเหย})$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้อยที่ 1 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} &= 100 - (0.0389 + 16 + 1.65) \\ &= 82.31 \% \end{aligned}$$

ผลการศึกษาหลังจากวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในแผ่นวงจรไฟฟ้าพบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 0.0389 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารระเหยร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 82.31 โดยน้ำหนัก

การชะละลายแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมี

ตารางผนวกที่ 2-5 การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้นของกรดและปริมาณแผ่นวงจรไฟฟ้า	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่าของการเจือจาง	ความเข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H ₂ SO ₄	2 M 10 g	0.0546	2.9505	1	2.95	0.0015
	2 M 20 g	0.0197	1.0268	5	5.13	0.0013
	2 M 30 g	0.0111	0.5783	10	5.78	0.0010
HNO ₃	2 M 10 g	0.0454	2.3708	31.25	74.09	0.0370
	2 M 20 g	0.0476	2.4806	31.25	77.52	0.0194
	2 M 30 g	0.0406	2.1197	100	211.97	0.0353
HCl	2 M 10 g	0.0250	1.3058	100	130.58	0.0652
	2 M 20 g	0.0378	1.9744	100	197.44	0.0494
	2 M 30 g	0.0309	1.6126	100	161.26	0.0269
Aqua regia	2 M 10 g	0.0336	1.7531	100	175.31	0.0877
	2 M 20 g	0.0381	1.9855	100	198.55	0.0496
	2 M 30 g	0.0190	0.9934	100	99.34	0.0165

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-6 การชะละลายนิกเกิลจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	2 M 10 g	0.0881	1.5445	1	1.545	0.0008
	2 M 20 g	0.1189	2.0834	1	2.083	0.0005
	2 M 30 g	0.1336	2.3413	1	2.341	0.0004
HNO ₃	2 M 10 g	0.0360	0.6304	1	0.630	0.0003
	2 M 20 g	0.0372	0.6517	1	0.652	0.0002
	2 M 30 g	0.0727	1.2737	1	1.274	0.0002
HCl	2 M 10 g	0.0221	0.3870	1	0.387	0.0002
	2 M 20 g	0.0391	0.6846	1	0.685	0.0002
	2 M 30 g	0.0810	0.8436	1	0.844	0.0001
Aqua regia	2 M 10 g	0.0617	1.0814	1	1.081	0.0005
	2 M 20 g	0.0767	1.3432	1	1.343	0.0003
	2 M 30 g	0.0629	1.0462	83.33	87.179	0.0145

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-7 การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 2 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	2 M 10 g	0.1836	1.9013	20	38.026	0.0190
	2 M 20 g	0.2404	2.6750	31.25	83.593	0.0209
	2 M 30 g	0.2101	2.3376	31.25	73.050	0.0122
HNO ₃	2 M 10 g	0.6028	8.8271	1	8.827	0.0044
	2 M 20 g	0.2113	3.0226	5	15.113	0.0038
	2 M 30 g	0.2724	3.8956	2	19.478	0.0032
HCl	2 M 10 g	0.1319	1.8661	15.625	29.158	0.0146
	2 M 20 g	0.0656	0.9386	62.5	58.663	0.0147
	2 M 30 g	0.1694	1.8843	35.71	67.288	0.0112
Aqua regia	2 M 10 g	0.0823	1.1774	20	23.548	0.0118
	2 M 20 g	0.1027	1.4695	20	29.390	0.0073
	2 M 30 g	0.3525	5.0412	100	504.140	0.0840

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-8 การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารละลาย 2 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	2 M 10 g	0.3445	3.1187	38.33	259.880	0.1299
	2 M 20 g	0.2784	2.5201	50	126.000	0.0315
	2 M 30 g	0.5755	5.2090	15.625	81.390	0.0136
HNO ₃	2 M 10 g	1.0032	7.6488	10,000	76,488.000	32.244
	2 M 20 g	0.6476	4.9374	8,333.33	41,144.980	10.2862
	2 M 30 g	1.1239	8.5692	8,333.33	71,409.970	11.9017
HCl	2 M 10 g	0.1861	1.4192	416.66	591.320	0.2967
	2 M 20 g	0.2776	2.1167	250	529.175	0.1323
	2 M 30 g	0.2625	2.0011	100	200.110	0.0334
Aqua regia	2 M 10 g	0.4063	3.0979	10,000	30,979.000	15.490
	2 M 20 g	0.1921	1.7387	25,000	43,467.500	10.8669
	2 M 30 g	0.1552	1.4045	25,000	35,112.500	5.8521

หมายเหตุ ปริมาณสารละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-9 การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	4 M 10 g	0.0093	0.5014	7.142	3.581	0.0018
	4 M 20 g	0.0130	0.7027	5	3.514	0.0009
	4 M 30 g	0.0045	0.2632	10	2.632	0.0004
HNO ₃	4 M 10 g	0.0134	0.7862	50	39.310	0.0196
	4 M 20 g	0.0628	3.6909	31.25	115.340	0.0288
	4 M 30 g	0.0256	1.3856	100	138.560	0.0230
HCl	4 M 10 g	0.0211	1.2405	41.66	21.560	0.0108
	4 M 20 g	0.0502	2.7121	83.33	225.990	0.0565
	4 M 30 g	0.0283	1.5319	125	191.490	0.0319
Aqua regia	4 M 10 g	0.0088	0.5175	41.66	21.560	0.0108
	4 M 20 g	0.0138	0.8099	31.25	25.310	0.0063
	4 M 30 g	0.0529	3.1084	20	62.160	0.0103

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-10 การชะละลายนิกเกิลจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	4 M 10 g	0.0914	1.4373	1	1.437	0.0007
	4 M 20 g	0.1019	1.6033	1	1.603	0.0004
	4 M 30 g	0.1162	1.8277	1	1.828	0.0005
HNO ₃	4 M 10 g	0.0400	0.6292	1	0.629	0.0003
	4 M 20 g	0.0304	0.4785	1	0.479	0.0001
	4 M 30 g	0.0554	0.8713	1	0.871	0.0001
HCl	4 M 10 g	0.0407	0.6403	1	0.640	0.0003
	4 M 20 g	0.0576	0.9056	1	0.906	0.0002
	4 M 30 g	0.0269	0.4709	10	4.709	0.0008
Aqua regia	4 M 10 g	0.0355	0.5582	1	0.558	0.0003
	4 M 20 g	0.0723	1.1383	1	1.138	0.0003
	4 M 30 g	0.0895	1.4895	100	148.950	0.0248

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-11 การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 4 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	4 M 10 g	0.2479	3.6284	10	36.284	0.0181
	4 M 20 g	0.1707	2.4982	41.66	104.075	0.0260
	4 M 30 g	0.0346	0.5447	50	27.235	0.0045
HNO ₃	4 M 10 g	0.0812	1.0013	4	4.005	0.0020
	4 M 20 g	0.0659	0.9429	20	18.858	0.0047
	4 M 30 g	0.0358	0.5632	20	11.264	0.0019
HCl	4 M 10 g	0.1522	2.2279	31.25	69.621	0.0348
	4 M 20 g	0.0698	1.0993	41.66	45.796	0.0114
	4 M 30 g	0.1085	1.7077	35.71	60.981	0.0102
Aqua regia	4 M 10 g	0.0937	1.4748	250	368.700	0.1843
	4 M 20 g	0.0963	1.5163	125	189.583	0.0474
	4 M 30 g	0.5761	9.0682	100	906.820	0.1511

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-12 การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารละลาย 4 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	4 M 10 g	0.0307	0.3152	833	262.561	0.1313
	4 M 20 g	0.1365	1.3994	500	699.700	0.1749
	4 M 30 g	0.2636	2.7031	416.66	1,126.270	0.1877
HNO ₃	4 M 10 g	0.9516	8.6138	50,000	230,690	90.3450
	4 M 20 g	0.9652	8.7364	50,000	386,820	69.7050
	4 M 30 g	1.1830	9.0200	25,000	225,500	37.5833
HCl	4 M 10 g	0.3214	3.2941	833	2,743.90	1.3719
	4 M 20 g	0.5138	5.2681	500	2,634.05	0.6585
	4 M 30 g	0.3149	3.2292	416.66	1,345.48	0.2242
Aqua regia	4 M 10 g	0.4862	4.4008	25,000	110,020	55.01
	4 M 20 g	0.4574	3.4871	8,333.33	29,059.15	7.2468
	4 M 30 g	0.9449	7.2044	5,000	36,022	6.0037

หมายเหตุ ปริมาณสารละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-13 การชะละลายตะกั่วจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารละลาย 6 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	6 M 10 g	0.0082	0.4282	10 (2)	8.564	0.0043
	6 M 20 g	0.0102	0.5333	7.142 (2)	7.617	0.0019
	6 M 30 g	0.0055	0.2953	10 (2)	5.906	0.0010
HNO ₃	6 M 10 g	0.191	1.1243	62.5	70.268	0.0351
	6 M 20 g	0.0050	0.1936	1000	193.600	0.0484
	6 M 30 g	0.0099	0.3860	925.92	357.405	0.0596
HCl	6 M 10 g	0.0201	1.1795	62.5	73.718	0.0369
	6 M 20 g	0.0084	0.3268	1000	326.800	0.0817
	6 M 30 g	0.0039	0.1513	892.85	135.088	0.0225
Aqua regia	6 M 10 g	0.0047	0.2758	50	13.790	0.0069
	6 M 20 g	0.0118	0.6929	31.25	21.650	0.0054
	6 M 30 g	0.0313	1.8419	20	36.840	0.0061

หมายเหตุ ปริมาณสารละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-14 การชะละลายนิกเกิลเกิดจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	6 M 10 g	0.0166	0.2465	10 (2)	4.930	0.0025
	6 M 20 g	0.0248	0.3693	5 (2)	3.693	0.0010
	6 M 30 g	0.0391	0.5807	3.125 (2)	3.629	0.0006
HNO ₃	6 M 10 g	0.0381	0.5658	1	0.566	0.0003
	6 M 20 g	0.0359	0.5342	1	0.534	0.0001
	6 M 30 g	0.0362	0.7061	1	0.537	0.0001
HCl	6 M 10 g	0.0629	0.9352	1	0.935	0.0005
	6 M 20 g	0.0596	0.8858	1	0.886	0.0002
	6 M 30 g	0.0475	0.7061	1	0.706	0.0001
Aqua regia	6 M 10 g	0.0617	0.9175	1	0.918	0.0005
	6 M 20 g	0.0374	0.5552	1	0.555	0.0002
	6 M 30 g	0.0800	1.1883	1	1.188	0.0002

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-15 การชะละลายเหล็กจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้น ของกรดและ ปริมาณ แผ่นวงจร ไฟฟ้า	ค่าการ ดูดกลืนแสง	ความ เข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่า ของการ เจือจาง	ความ เข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดย น้ำหนัก
H ₂ SO ₄	6 M 10 g	0.5528	7.9599	1	15.919	0.0080
	6 M 20 g	0.0706	1.0091	15.625 (2)	31.534	0.0040
	6 M 30 g	0.0873	1.2490	15.625 (2)	39.031	0.0070
HNO ₃	6 M 10 g	0.0917	1.3204	1	1.3204	0.0007
	6 M 20 g	0.0163	0.2350	1	ND	
	6 M 30 g	0.0125	0.1793	1	ND	
HCl	6 M 10 g	0.0467	0.7350	62.5	45.937	0.0230
	6 M 20 g	0.0616	0.9695	41.66	40.389	0.0110
	6 M 30 g	0.0610	0.9600	35.71	34.282	0.0057
Aqua regia	6 M 10 g	0.2589	3.7900	1	3.790	0.0019
	6 M 20 g	0.3320	4.8598	1	4.859	0.0012
	6 M 30 g	0.6000	8.7819	1	8.782	0.0015

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ND คือ non detectable (ความเข้มข้นต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่อง AAS)

ตารางผนวกที่ 2-16 การชะละลายทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าที่ความเข้มข้นสารชะละลาย 6 โมล/ลิตร

ชนิดกรด	ความเข้มข้นของกรดและปริมาณแผ่นวงจรไฟฟ้า	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นจาก AAS	จำนวนเท่าของการเจือจาง	ความเข้มข้นจริง mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H ₂ SO ₄	6 M 10 g	0.2496	2.4698	1,000 (2)	4,939.600	2.4700
	6 M 20 g	0.2848	2.8175	1,250 (2)	7,043.750	1.7610
	6 M 30 g	0.1834	1.8140	833 (2)	3,022.120	0.5037
HNO ₃	6 M 10 g	0.7423	5.6600	50,000	183,000	91.500
	6 M 20 g	0.9267	7.0656	50,000	303,280	75.820
	6 M 30 g	0.8910	6.7933	50,000	289,665	48.280
HCl	6 M 10 g	0.2452	2.4262	1,562.5	3,790.937	1.8955
	6 M 20 g	0.3064	3.0316	1,250	3,789.500	0.9473
	6 M 30 g	0.1915	1.8944	1,000	1,894.400	0.3157
Aqua regia	6 M 10 g	1.0188	9.6864	8,333.33	80,719.967	40.3560
	6 M 20 g	0.8842	8.7477	1,250	10,934.625	2.7337
	6 M 30 g	0.9802	9.6976	1,000	9,697.500	1.6162

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-17 สรุปผลการชะละลายตะกั่วและร้อยละโดยน้ำหนักของตะกั่วในแผ่นวงจรไฟฟ้า

อัตราส่วนโลหะ	2 M		4 M		6 M	
	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H ₂ SO ₄						
10 g	2.950	0.0015	3.581	0.0018	8.564	0.0043
20 g	5.134	0.0013	3.514	0.0009	7.617	0.0019
30 g	5.783	0.0010	2.632	0.0004	5.906	0.0010
HNO ₃						
10 g	74.087	0.0370	39.310	0.0196	70.268	0.0351
20 g	77.518	0.0194	115.340	0.0288	193.600	0.0484
30 g	211.970	0.0353	138.560	0.0230	357.405	0.0596
HCl						
10 g	130.580	0.0652	21.560	0.0108	73.718	0.0369
20 g	197.440	0.0494	225.990	0.0565	326.800	0.0817
30 g	161.260	0.0269	191.490	0.0319	135.088	0.0225
Aqua regia						
10 g	175.310	0.0877	21.560	0.0108	13.790	0.0069
20 g	198.550	0.0496	25.310	0.0063	21.650	0.0054
30 g	99.340	0.0165	62.160	0.0103	36.840	0.0061

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-18 สรุปผลการชะละลายนิกเกิลและร้อยละโดยน้ำหนักของนิกเกิลในแผ่นวงจรไฟฟ้า

อัตราส่วนโลหะ	2 M		4 M		6 M	
	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H_2SO_4						
10 กรัม	1.545	0.0008	1.437	0.0007	4.930	0.0025
20 กรัม	2.083	0.0005	1.603	0.0004	3.693	0.0010
30 กรัม	2.341	0.0004	1.828	0.0005	3.629	0.0006
HNO_3						
10 กรัม	0.630	0.0003	0.629	0.0003	0.566	0.0003
20 กรัม	0.652	0.0002	0.479	0.0001	0.534	0.0001
30 กรัม	1.274	0.0002	0.871	0.0001	0.537	0.0001
HCl						
10 g	0.387	0.0002	0.640	0.0003	0.935	0.0005
20 g	0.685	0.0002	0.906	0.0002	0.886	0.0002
30 g	0.844	0.0001	4.709	0.0008	0.706	0.0001
Aqua regia						
10 g	1.081	0.0005	0.558	0.0003	0.917	0.0005
20 g	1.343	0.0003	1.138	0.0003	0.555	0.0002
30 g	87.179	0.0145	148.950	0.0248	1.188	0.0002

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

ตารางผนวกที่ 2-19 สรุปผลการชะละลายเหล็กและร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กในแผ่นวงจรไฟฟ้า

อัตราส่วนโลหะ	2 M		4 M		6 M	
	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H ₂ SO ₄						
10 g	38.026	0.0190	36.284	0.0181	15.919	0.0080
20 g	83.593	0.0209	104.075	0.0260	31.534	0.0040
30 g	73.050	0.0122	27.235	0.0045	39.031	0.0070
HNO ₃						
10 g	8.8271	0.0044	4.005	0.0020	1.3204	0.0007
20 g	15.113	0.0038	18.858	0.0047	ND	
30 g	19.478	0.0032	11.264	0.0019	ND	
HCl						
10 g	29.158	0.0146	69.621	0.0348	45.937	0.0230
20 g	58.663	0.0147	45.796	0.0114	40.389	0.0110
30 g	67.288	0.0112	60.981	0.0102	34.282	0.0057
Aqua regia						
10 g	23.548	0.0118	368.700	0.1843	3.790	0.0019
20 g	29.390	0.0073	189.583	0.0474	4.859	0.0012
30 g	504.140	0.0840	906.820	0.1511	8.782	0.0015

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

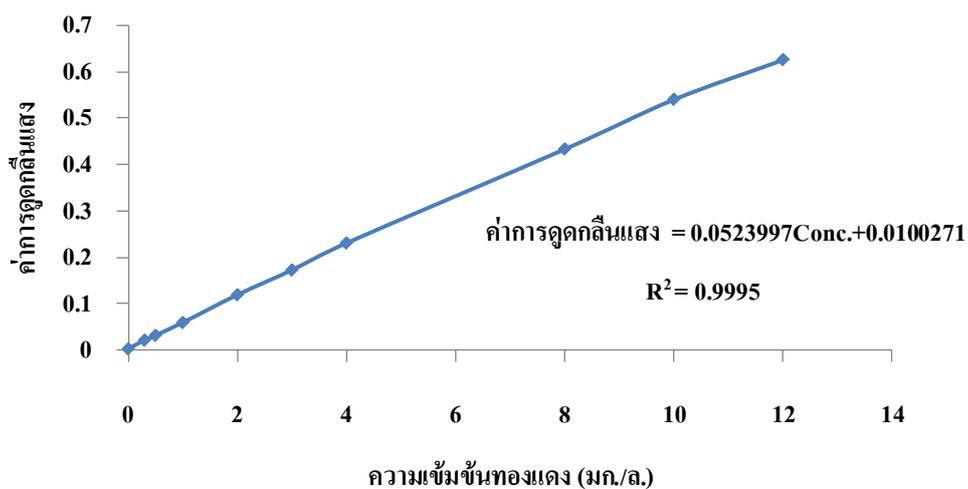
ND คือ non detectable (ความเข้มข้นต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่อง AAS)

ตารางผนวกที่ 2-20 สรุปผลการชะละลายทองแดงและร้อยละโดยน้ำหนักของทองแดงในแผ่นวงจรไฟฟ้า

อัตราส่วนโลหะ	2 M		4 M		6 M	
	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ความเข้มข้น mg/L	ร้อยละโดยน้ำหนัก
H ₂ SO ₄						
10 g	259.880	0.1299	262.561	0.1313	4,939.600	2.4700
20 g	126.000	0.0073	699.700	0.1749	7,043.750	1.7610
30 g	81.390	0.0136	1,126.27	0.1877	3,022.120	0.5037
HNO ₃						
10 g	76488.000	32.244	230,690	90.3450	183,000	91.500
20 g	41144.980	10.2862	386,820	69.7050	303,280	75.820
30 g	71409.970	11.9017	225,500	37.5833	289,665	48.280
HCl						
10 g	591.320	0.2967	2,743.900	1.3719	3,790.937	1.8955
20 g	529.175	0.1323	2,634.050	0.6585	3,789.500	0.9473
30 g	200.110	0.0334	1,345.480	0.2242	1,894.400	0.3157
Aqua regia						
10 g	30979.000	15.490	110,020.000	55.01	80,719.967	40.3560
20 g	43467.500	10.8669	29,059.150	7.2648	10,934.625	2.7337
30 g	35112.500	5.8521	36,022.000	6.0037	9,697.500	1.6162

หมายเหตุ ปริมาณสารชะละลาย 50 มล.

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ 2-5 กราฟมาตรฐานทองแดง (Cu – calibration curve)

ตารางผนวกที่ 2-21 ข้อมูลกราฟมาตรฐานทองแดง

ความเข้มข้นทองแดงละลาย (มก./ล.)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.0000	0.0029
0.3000	0.0217
0.5000	0.0320
1.0000	0.0596
2.0000	0.1193
3.0000	0.1727
4.0000	0.2309
8.0000	0.4333
10.0000	0.5402
12.0000	0.6256

ตารางผนวกที่ 2-22 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคผงเหล็ก

ขนาดช่องว่างของตะแกรง (ไมโครเมตร)	เบอร์ตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)	ร้อยละโดยน้ำหนัก
1000	18	2.16	2.16
710	25	8.37	8.37
500	35	16.37	16.37
250	60	36.95	36.95
125	120	22.80	22.80
53	270	11.99	11.99
45	325	1.27	1.27
<45	325	0.09	0.09
รวม		100	100

ตารางผนวกที่ 2-23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 0.92)

ปริมาณผงเหล็ก (จำนวนเท่า)	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงละลาย (ร้อยละ)
1	0	1.09	783	22,988.75	0.313
	5	1.03	782	22,695.10	5.689
	10	1.13	781	22,551.67	6.285
	20	1.13	782	23,957.90	0.441
	40	1.15	780	23,276.75	3.272
	60	1.18	782	21,669.50	9.951
	90	1.21	785	24,285.18	0.919
	120	1.18	788	22,591.23	6.120
2	0	0.08	412	23,938.11	0.524
	5	0.29	773	22,530.34	6.374
	10	0.29	783	20,656.76	14.160
	20	0.32	782	23,004.66	4.403
	40	0.21	795	23,400.86	2.756
	60	0.20	779	24,760.70	2.895
	90	0.26	786	25,083.26	4.235
	120	0.25	788	24,015.58	0.202
3	0	0.14	829	24,265.50	0.000
	5	1.40	435	3,514.88	85.394
	10	1.48	432	2,589.58	89.239
	20	1.47	434	1,712.33	92.884
	40	1.53	422	425.89	98.230
	60	1.54	421	350.89	98.542
	90	1.55	421	309.53	98.714
	120	1.50	424	291.69	98.005

หมายเหตุ : ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงละลาย คัดจากความเข้มข้นเริ่มต้น 24,064 มก./ล.

ตารางผนวกที่ 2-24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 2)

ปริมาณผงเหล็ก (จำนวนเท่า)	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงละลาย (ร้อยละ)
1	0	2.10	230	20,456.55	14.991
	5	2.58	357	2,366.70	69.387
	10	2.54	366	6,432.00	73.271
	20	2.29	390	685.05	97.153
	40	2.68	346	926.94	96.148
	60	2.96	315	914.27	96.201
	90	3.09	290	1,130.13	95.304
	120	3.24	259	965.57	95.988
2	0	2.20	521	20,315.92	15.575
	5	3.08	293	0.38	99.998
	10	3.16	275	18.74	99.922
	20	3.02	303	16.88	99.930
	40	3.14	283	18.64	99.923
	60	3.28	266	20.97	99.913
	90	3.14	289	14.38	99.940
	120	2.75	367	60.15	99.750
3	0	2.08	376	17,483.39	27.346
	5	2.61	339	29.30	99.878
	10	2.61	348	81.00	99.663
	20	2.67	334	183.95	99.236
	40	2.65	344	34.80	99.855
	60	2.64	336	57.70	99.760
	90	2.76	328	44.10	99.817
	120	2.73	332	108.00	99.551

หมายเหตุ : ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงละลาย คัดจากความเข้มข้นเริ่มต้น 24,064 มก./ล.

ตารางผนวกที่ 2-25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3)

ปริมาณผงเหล็ก (จำนวนเท่า)	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงละลาย (ร้อยละ)
1	0	3.77	274	16,146.11	32.903
	5	3.43	301	12,864.47	46.541
	10	2.98	341	11,628.84	51.675
	20	2.17	412	5,481.70	77.220
	40	2.88	310	122.62	99.490
	60	2.79	327	10.69	99.956
	90	3.11	282	16.50	99.931
	120	3.16	274	7.04	99.971
2	0	3.53	205	5,203.80	78.375
	5	3.05	205	166.12	99.310
	10	2.58	300	9.63	99.960
	20	2.42	367	1.51	99.994
	40	2.60	359	2.55	99.989
	60	2.72	347	5.24	99.978
	90	3.00	306	9.63	99.960
	120	3.24	262	8.56	99.964
3	0	3.31	309	14,865.18	38.226
	5	3.27	261	108.53	99.549
	10	3.11	295	13.90	99.942
	20	3.17	293	4.13	99.983
	40	3.25	273	3.08	99.987
	60	3.25	263	1.29	99.995
	90	3.14	290	3.68	99.985
	120	3.52	225	1.96	99.992

หมายเหตุ : ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงละลาย คัดจากความเข้มข้นเริ่มต้น 24,064 มก./ล.

ตารางผนวกที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอช โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 4)

ปริมาณผงเหล็ก (จำนวนเท่า)	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้นทองแดงละลายที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงละลาย (ร้อยละ)
1	0	4.46	453	2,775.95	88.464
	5	2.75	446	1,786.85	92.575
	10	2.54	402	51.50	99.786
	20	3.00	342	10.33	99.957
	40	2.89	350	9.90	99.959
	60	3.09	320	14.65	99.939
	90	3.36	301	11.39	99.953
	120	3.36	286	16.28	99.932
2	0	4.03	419	1,571.10	93.471
	5	2.35	442	6,949.10	71.122
	10	2.28	443	14.15	99.941
	20	2.46	415	39.24	99.837
	40	2.88	360	26.20	99.891
	60	2.64	400	11.38	99.953
	90	2.80	390	11.09	99.954
	120	2.89	371	22.93	99.905
3	0	4.73	363	1,163.70	95.164
	5	2.98	394	179.12	99.256
	10	2.97	390	22.70	99.906
	20	2.82	381	10.68	99.956
	40	2.83	383	10.41	99.957
	60	3.00	366	13.45	99.944
	90	3.07	360	19.520	99.919
	120	3.21	297	20.599	99.914

หมายเหตุ : ประสิทธิภาพการนำกลับทองแดงละลาย คัดจากความเข้มข้นเริ่มต้น 24,064 มก./ล.

ตารางผนวกที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3.00 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์ 3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และ ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 53 - 125 ไมโครเมตร)

ปริมาณ ผงเหล็ก 1 เท่า ที่ อุณหภูมิ ปฏิกิริยา	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้น ทองแดงละลาย ที่เหลือ (มก. /ล.)	ประสิทธิภาพ การจัด ทองแดงละลาย (ร้อยละ)
30 องศาเซลเซียส	0	3.00	492.4	19658.9	4.15
	1	1.54	457.2	12387.75	39.6
	5	1.88	427.1	11392.76	44.45
	10	1.61	429.6	8335.9	59.36
	20	1.47	423.7	7308.12	64.37
	40	1.19	457.0	3712.26	81.9
	60	1.22	455.3	2350.38	88.54
	90	1.45	406.9	2137.871	89.58
50 องศาเซลเซียส	120	1.19	455.5	1754.225	91.45
	0	3.00	482.4	17315.04	15.58
	1	2.36	393.3	14591.14	28.86
	5	1.56	444.3	10991.1	46.41
	10	1.45	443.3	5162.6	74.83
	20	1.39	426.6	3521.02	82.89
	40	1.47	414.3	1202.19	94.14
	60	1.43	423.4	1149.4	94.4
70 องศาเซลเซียส	90	1.52	411.5	1166.183	94.31
	120	1.44	424.6	861.1	95.8
	0	3.00	473.9	8508.15	58.52
	1	2.47	482.6	8392.325	59.08
	5	1.56	446.9	8307.3	59.5
	10	1.56	430.8	4242.17	79.32
	20	1.31	446.3	1650.82	91.95
	40	1.38	434.2	1155.733	94.37
70 องศาเซลเซียส	60	1.53	409.4	1138.117	94.45
	90	1.44	421.1	1110.983	94.58
	120	1.43	426.7	1097.517	94.65

ตารางผนวกที่ 2-28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3.00 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์ 3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และ ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 125-250 ไมโครเมตร)

ปริมาณ ผงเหล็ก 1 เท่า ที่ อุณหภูมิ ปฏิกิริยา	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้น ทองแดงละลาย ที่เหลือ (มก. /ล.)	ประสิทธิภาพ การจัด ทองแดงละลาย (ร้อยละ)
30 องศาเซลเซียส	0	3.00	481.1	19727.42	3.82
	1	2.30	390.2	17926.16	12.6
	5	1.83	418.3	13072.52	36.26
	10	1.82	411.2	9598.7	53.24
	20	1.68	423.5	9030.45	55.97
	40	1.54	424.1	7945.875	61.26
	60	1.40	441.6	7151.225	65.13
	90	1.44	430.1	5679.4	72.31
	120	1.25	449.7	3733.95	81.79
50 องศาเซลเซียส	0	3.00	457.4	14680.58	28.42
	1	2.41	376.8	10137.32	50.57
	5	1.92	423.6	9296.575	54.67
	10	1.90	423.8	7560.575	63.14
	20	1.75	430.1	7514.266	63.36
	40	1.61	432.5	7237.6	64.71
	60	1.49	430.8	5511.9	73.13
	90	1.28	451.8	4886.42	76.47
	120	1.34	431.7	3592.74	82.48
70 องศาเซลเซียส	0	3.00	480.2	11564.4	43.62
	1	2.22	395.2	10468.33	48.96
	5	1.92	424.8	9873	51.41
	10	1.91	399.4	9760.873	52.41
	20	1.34	461.1	9437.067	53.99
	40	1.63	424.3	8747.9	57.35
	60	1.50	426.8	7699.8	62.46
	90	1.39	423.6	3280.8	84.00
	120	1.34	414.3	3119.72	84.79

ตารางผนวกที่ 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับค่าพีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี และทองแดงละลายที่เหลือ (พีเอชเริ่มต้น 3.00 ความเร็วรอบในการกวน 750 รอบ/นาที (เบอร์ 3) ปริมาณผงเหล็ก 1 เท่า และ ขนาดอนุภาคผงเหล็ก 250 - 500 ไมโครเมตร)

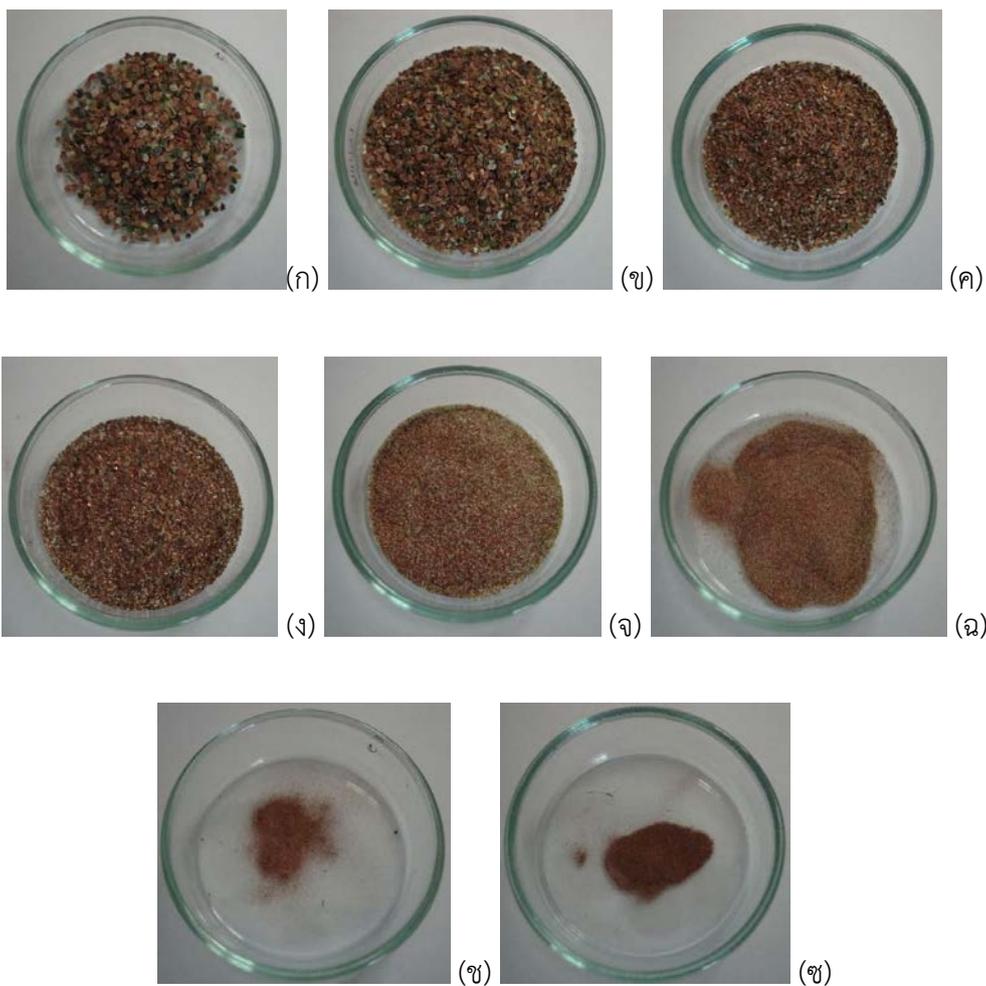
ปริมาณ ผงเหล็ก 1 เท่า ที่ อุณหภูมิ ปฏิกิริยา	เวลา (นาที)	พีเอชสุดท้าย	โออาร์พีสุดท้าย (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้น ทองแดงละลาย ที่เหลือ (มก. /ล.)	ประสิทธิภาพ การจัด ทองแดงละลาย (ร้อยละ)
30 องศาเซลเซียส	0	3.00	495.4	16470.5	19.70
	1	2.01	404.8	8954.92	56.34
	5	1.89	409.6	8401.78	59.04
	10	1.82	415.8	6931.4	66.21
	20	1.70	425.9	5774.475	71.85
	40	1.49	433.3	5381.567	73.76
	60	1.22	466.5	2798.06	86.43
	90	1.32	439.4	2386.48	88.36
	120	1.29	441.2	2039.95	90.05
50 องศาเซลเซียส	0	3.00	464.5	10512.72	48.74
	1	2.53	378.3	8715.5	57.51
	5	2.20	408.6	7170.62	65.04
	10	2.05	410.8	6852.25	66.59
	20	1.95	411.3	5512.58	73.12
	40	1.77	419.6	5084.05	75.21
	60	1.54	437.7	4293	79.07
	90	1.50	420.3	2189.56	89.32
	120	1.30	438.9	2073.067	89.89
70 องศาเซลเซียส	0	3.00	450.4	16456.72	19.76
	1	2.60	376.3	16007.14	21.96
	5	2.00	419.7	11474.02	44.06
	10	1.84	420.1	8476.44	58.67
	20	1.68	427.5	4673.58	77.21
	40	1.40	442.5	3994.06	80.53
	60	1.28	451.2	2524.62	87.69
	90	1.17	435.5	2190.1	89.32
	120	1.19	417.7	2080.3	89.68

ตารางผนวกที่ 2-30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณตะกอนจมตัวและความสูงของชั้นตะกอน

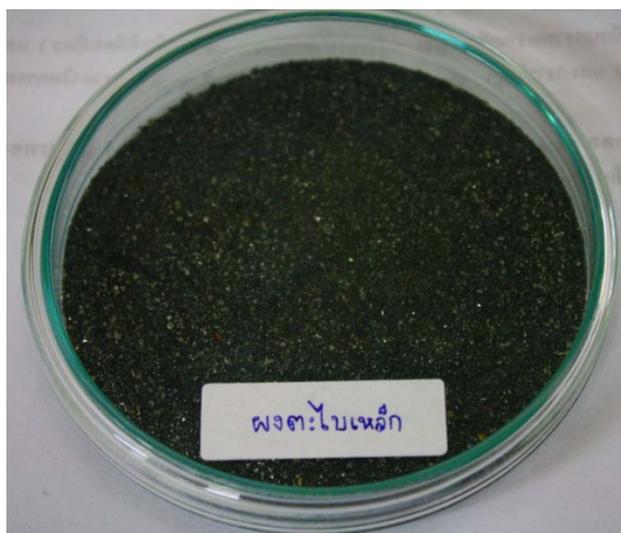
ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตะกอนจมตัว (มล./ล.)	ความสูงของชั้นตะกอน (ซ.ม.)
0	1,000	20.0
1	1,000	20.0
2	995	19.9
3	990	19.8
4	985	19.7
5	980	19.6
6	950	19.0
7	940	18.8
8	925	18.5
9	910	18.2
10	900	18.0
20	350	7.0
30	50	1.0
40	50	1.0
50	50	1.0
60	50	1.0
90	50	1.0
120	50	1.0
150	50	1.0
180	50	1.0
210	50	1.0
240	50	1.0



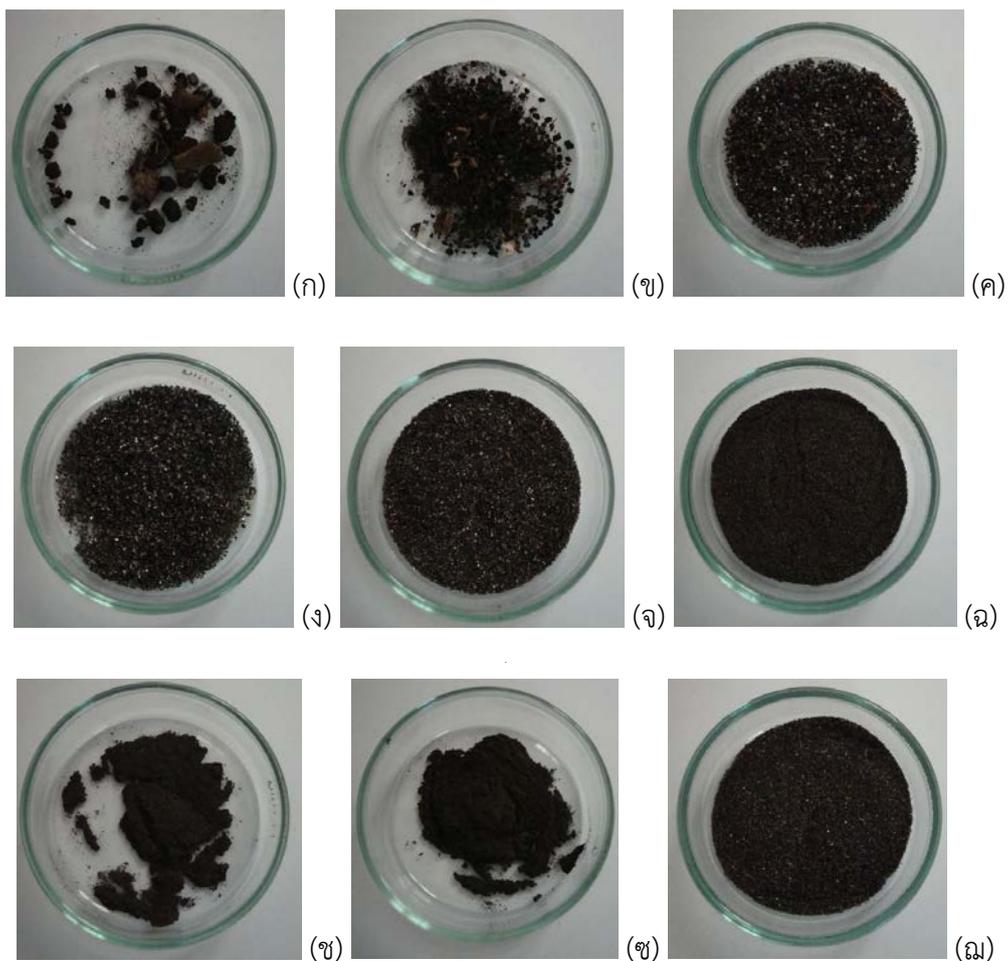
ภาพผนวกที่ 2-6 แผ่นวงจรไฟฟ้าบด



ภาพผนวกที่ 2-7 (ก) – (ซ) ลักษณะแผ่น PCB บดร่อนขนาดช่องว่างตะแกรง 1,000, 710, 500, 250, 125, 53, 45 และเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร



ภาพผนวกที่ 2-8 ผงเหล็ก



ภาพผนวกที่ 2-9 (ก) – (ฅ) ลักษณะผงเหล็กก้อนขนาดช่องว่างตะแกรง 2,000, 1,000, 710, 500, 250, 150, 53, 45, เล็กกว่า 45 ไมโครเมตร ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ 2-10 การชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพผนวกที่ 2-11 การกรองน้ำเซสแซแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพผนวกที่ 2-12 น้ำเซสแซแผ่นวงจรไฟฟ้า



ภาพผนวกที่ 2-13 น้ำเซสแซแผ่นวงจรไฟฟ้าที่เจือจางด้วยกรดไนตริก



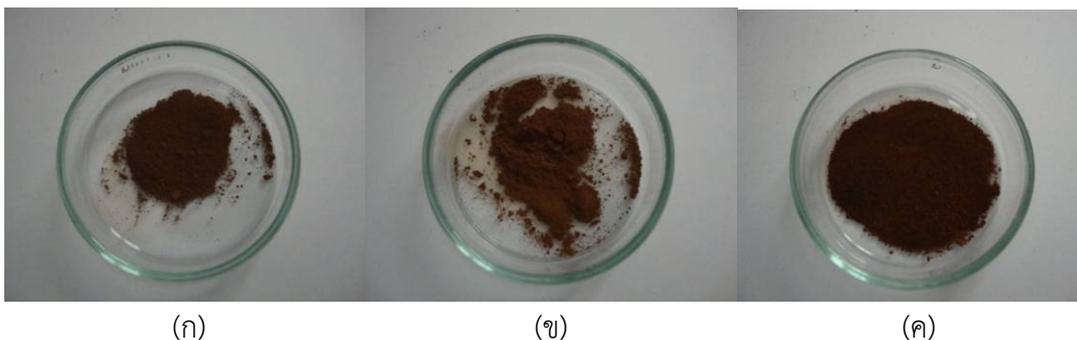
ภาพผนวกที่ 2-14 น้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้า ภายหลังจากกระบวนการใช้เหล็กออกไซด์ชั้นศูนย์



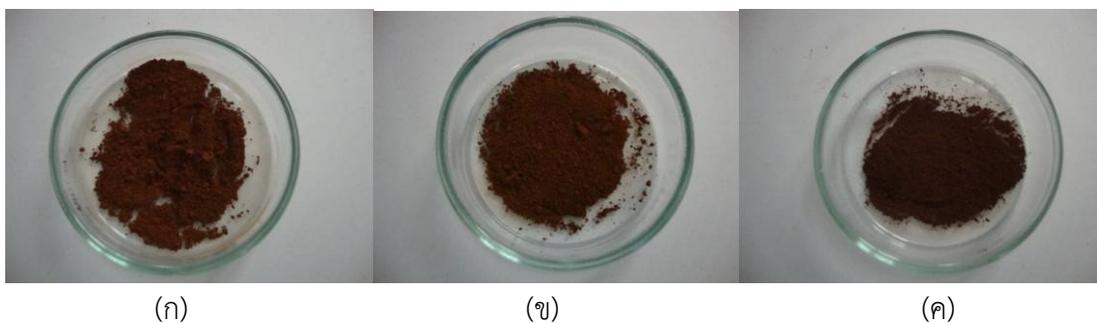
ภาพผนวกที่ 2-15 ตะกอนทองแดงขณะกรอง



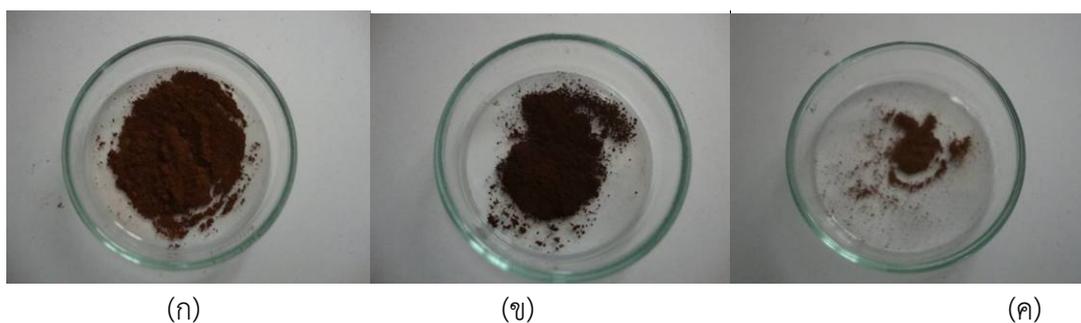
ภาพผนวกที่ 2-16 การตกตะกอนน้ำชะเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าภายหลังจากกระบวนการใช้เหล็กออกไซด์ชั้นศูนย์



ภาพผนวกที่ 2-17 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 30 องศาเซลเซียส
(ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็กขนาด 53-125, 125-250
และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ 2-18 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 50 องศาเซลเซียส
(ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็กขนาด 53-125, 125-250
และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ 2-19 ลักษณะตะกอนที่อุณหภูมิจากปฏิกิริยา 70 องศาเซลเซียส
(ก) (ข) และ (ค) ผงเหล็กขนาด 53-125, 125-250
และ 250-500 ไมโครเมตร ตามลำดับ

บรรณานุกรม

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน

- [1] สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (2552)
- [2] โครงการพัฒนาความรู้และยุทธศาสตร์ด้านความตกลงพหุภาคีระหว่างประเทศด้านสิ่งแวดล้อม (2552) www.measwatch.org/autopage/show-page.php?t=27&s_id=3458&d_id=3455
- [3] Ma, X.,J., and Xia, H.,L.(2008) Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation. J. Hazardous Materials.
- [4] Lee,H., and Shoda, M (2008) Removal of COD and color from livestock wastewater by the Fenton method. J.Hazardous Materials. 153:1314-1319
- [5] Z.Wang, G>Zeng, J.Zhu (2008) Treatment of jean-wash wastewater by combined coagulation, hydrolysis/acidification and Fenton oxidation. Hazardous Materials. 153: 810-186
- [6] Z.P.Xing, D/Z/ Sun (2009) Treatment of antibiotic fermentation wastewater by combined polyferric sulfate coagulation, Fenton and sedimentation process. J. Hazardous Materials.168 : 1264-1268
- [7] Z.M.Qiu, W.T.Jiang, Z.J.He (2009) Post-treatment of banknote printing wastewater using polysilicate ferro-aluminum sulfate (PSFA). J. Hazardous Materials.166: 740-745
- [8] A.Dhauadi, L.Monser, N. ADhoum (2009) Anodic oxidation and electro-Fenton treatment of rotenone. Electrochemica Acta 54:4473-4480
- [9] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2546) ของเสียอันตราย. จัดจำหน่ายโดย ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, กรุงเทพฯ. 650 น.
- [10] มัลลิกา ปัญญาคะโป (2549) การจัดการของเสียอันตราย. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม. 256น.
- [11] A.Mates, N.Koprivance, A.Glasnovic (2000) Flocculation as a treatment method for printing ink wastewater. Environ. Res. 72 (6), 680-688
- [12] T. Nandy, R.D. Vyas, S.Shastry, S.N.Kaul (2002) Optimization of coagulants for pretreatment of printing ink wastewater. Environ. Eng. Sci.19, 1-7
- [13] S.Sostar-Turk, M.Simonic, I. Prtrinic (2005) Wastewater treatment after reactive printing. Dyes and Pigment. 64: 147-152
- [14] P.Copper (1995) Colour in dye house effluent. Oxford : Society of Dyers and Colourists. Alden Press
- [15] S. Khansorthong, M.Hunsom (2009) Remediation of wastewater from plup and paper mill industry by the electrochemical technique. Chemical Engineering Journal.151: 228-234
- [16] S.H. Chang, K.S.Wang, S.J. Chao, T.H. Peng, L.C. Huang (2009) Degradation of azo and anthraquinone dyes by a low-cost Fe⁰/air process. J. Hazardous Materials. 166: 1127-1133

- [17] S.Rigoni-Stern, L. Szpyrkowicz, F.Z. Grandi (1996) Treatment of silk and lycra printing wastewater with the objective of water reuse. *Water Sci. Technol.* 33(8):95-104
- [18] I. Koyuncu (2003) Influence of dyes, salts and auxiliary chemicals on the nanofiltration of reactive dye baths : experimental observations and model verification. *Desalination* 154: 79-88
- [19] D. Pokhrel, T.Viraraghavan (2004) Treatment of pulp and paper mill wastewater – a review. *Sci. Total Environ.* 333:37-58
- [20] J.Garcia-Montano, F.Torrades, J.A. Garcia-Hortal, x.Domenech J.Peral (2006) Combining photo-fenton process with aerobic sequencing batch reactor for commercial hetero-bioreactive dye removal, *Appl. Catal. B-Environ.*67:86-92
- [21] P. Copper (1993) Removing colour from dye house wastewater – a critical review of technology available. *J. Soc. Dye Colour* 109:97-100
- [22] มั่นสิน ต้นทุลเวศม์ (2542) วิศวกรรมกรรมการประปา เล่ม1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 305 น.
- [23] ณรงค์พลและวุฒิไกร (2552) การกำจัด COD และสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [24] นภดล และจรงค์ษ์ (2540) การประยุกต์ใช้เทคนิคการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดโลหะหนักและสีออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ สสวท40.
- [25] ภัคพงษ์ เญยวิจิตร (2546) การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [26] J.B. Parsa, M.Rezaci, A.R.Soleymani (2009) Electrochemical oxidation of an azo dye in aqueous media investigation of operational parameters and kinetics. *J. Hazardous Materials.*168:997-1003
- [27] W.L. Chov, C.T. Wang, s.Y. Chang (2009) Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption. *J. Hazardous Materials.*168:1200-1207

การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน

- พลังและคณะ. 2550. การแยกอนุภาคโลหะออกจากของเสียจำพวกแผงวงจรคอมพิวเตอร์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- พันฤทธิ และสมัย. 2551. กระบวนการใช้เหล็กออกไซด์เข้มข้นเพื่อรีดิวซ์ทองแดงจากน้ำยากัดทองแดง. ปัญหาพิเศษสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม.
- ศุภกันส์และคณะ. 2529. การชะละลายโลหะจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- ศรัยุดา ตาสี และ ศุภาวดี ยาระศรี. 2550. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและนำกลับทองแดงจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมแอนโอด. ปัญหาพิเศษสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.

- อัมพรและคณะ. 2548. การนำโลหะมีค่าออกจากแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานไม่ได้. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- F. Veglio, R. Quaresima, P. Fornari, S. Ubaladini, Recovery of valuable metals from electronic and galvanic industrial wastes by leaching and electrowinning. Waste Management 23 (2003), pp. 245-252
- Hugo Marcelo Veit, Andrea Moura Bernardes, Jane Zoppas Ferreira, Jorge Alberto Soares Tenorio, Celia de Fraga Malfatti, Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. Hazardous Materials B137 (2006), PP. 1704-1709
- Blowes D.W., Ptacet C.J. and Jambor J.L., 1997. In-Situ remediation of Cr(VI) – Contaminated Groundwater using permeable reactive walls: Laboratory Studies, Environmental Science & Technology, 31., 3348-3357.
- Gu B., Dickey L., Yin X. and Dai S., 1988. Reductive precipitation of uranium(VI) by zero-valent iron. Environment Science & Technology, 32., 3366-3373.
- Wang Z., Chen D.H. and Chen L., 2007. Gold cementation from thiocyanate solutions by iron powder. Minerals Engineering, 20., 581-590.
- ทองสุข พงศทัต. หลักทฤษฎีและสมบัติของสาร เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: คุรุสภาลาดพร้าว; 2526.
- พรรณภา คักดีสูงและอมรา คัมภีรานนท์. พิษของโลหะหนักต่อพันธุกรรม. วิทยาศาสตร์ 2526; 17(2): 38-44
- เสนีย์ กาญจนวงศ์. วิศวกรรมน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2538.
- วิสิทธิ์ สุขป้อม. การบำบัดไฮยาไนด์ในน้ำเสียจากขบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสี โดยวิธีออกซิเดชันด้วยโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล; 2540.
- พัฒนา มุลพฤกษ์. อนามัยสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: หจก. เอ็น. เอส. แอล.พรินติ้ง; 2541.
- สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์ สายใจ ชาญเศรษฐิกุลและอัจฉรา วงศ์ชัยสุวัฒน์. เคมีทั่วไป 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โอ. เอส. พรินติ้ง เฮาส์; 2541.
- มันสิน ตัลทูลเวศน์. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2542.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. การจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์; 2544.
- ลัดดา มีสุข. เคมีทั่วไป เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์; 2548.
- อัมพร เย็นสุขจิตต์ พิณิจ ศิริบุญคุ้ม มนธวัช บุญส่งประเสริฐและสงบทิพย์ พงศ์สถาปตี. การนำโลหะมีค่าออกจากแผงวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานไม่ได้. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2548.
- พลัง บำรุงสกุลสวัสดิ์ พงษ์พัฒน์ หงส์ทองและธวัชชัย ชรินพานิชกุล. การแยกอนุภาคโลหะออกจากของเสียจำพวกแผงวงจรคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2550.
- ศรียุตา ตาสีและศุภาวดี ยาระศรี. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและนำกลับทองแดงจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมแอนโธรี. ปัญหาพิเศษ มหาสารคาม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2550.

- พายसान อิงเอนูและศิริรัตน์ เจริญราช. การชะละลายโลหะมีค่าจากแผ่นวงจรไฟฟ้า. ปัญหาพิเศษ
มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2551.
- พันฤทธิ์ ธนโชติและสมัย นุสนทรา. กระบวนการใช้เหล็กออกไซด์เข้มข้นเพื่อรีดิวซ์ทองแดงจากน้ำยา
กัดทองแดง. ปัญหาพิเศษ. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2551.
- Strickland, B.M. and F.Lawson. The measurement and interpretation of cementation rate
data, 3rd ed. Inproceeding of the International Sysposium on Hydromatallurgy: AIME,
\Chicago; 1973. p. 293-330.
- Lee E.C., Lawson F. and Han K.N. Effect of precipitant surface roughness on cementation
kinetics. Hydrometallurgy 1978:3:7-21.
- Berman E. Toxic Metals and their analysis. 3rd ed. London: Cambridge University ; 1980. p.
389.
- Davies, N.T. Studies on the adsorption of zinc by rat intestine. J. Nutri. 1980:43:189-223
- Reilly C. Metal Contamination of food. Applied Science Publishers Ltd, 3rd ed. London: EN;
1980. p. 235
- Harrison R.M. and Laxen D.P.H. Lead pollution causes and control Champman and Hall
Ltd. 3rd ed. New York: USA; 1981. p. 168
- Khundenko B.M. Machanism and kinetic of cementation processes. Wat. Sci. Tech. 1984:17:
719-731
- Ku Y, Chen C H, Removal of chelated copper from wastewater by iron cementation, Ind. Eng.
Chem. Res. 31:1992:1111-1115
- Kim C, Ong S.K., Recycling of lead-contaminated EDTA wastewater, J. Hazard. Mater.
69:(1999):279-286.
- Veglio F, Quaresima R, Ubaldini S, Recovery of valuable metals from electronic and galvanic
industrial wastes by leaching and electrowinning. Waste Management 23:2003:
pp. 245-252
- Nizamettin Demirkiran, Ahmet Ekmekyapar, Asim Kunkul and Ahmet Baysar. A kinetic study of
copper Cementation with zinc in aqueous solution. Int. J. Miner. Process. 82:2006.
pp. 80-85
- Wang Z., Chen D.H. and Chen L., Gold cementation from thiocyanate solutions by iron
Powder. 3rd ed: Minerals Engineering, 20; 2007 p. 581-590
- Fariba Farahmand, Davood Moradkhani, Mohammad Sadegh Safarzadeh and Fereshteh
Rashchi. Optimization and kinetics of the cementation of lead with aluminum
powder. Hydrometallurgy 98:2009: pp. 81-85
- Matin Fabian, Peter Balaz and Jaroslav Briancin. Study of silver ions cementation after
mechanical activation of cementator. Hydrometallurgy 97:2009. pp. 15-20
- Mohammad Sadegh Safarzadeh, Davood Moradkhani and Pedram Ashtari. recovery of Cd-Ni
from Zinc plant residual. Hydrometallurgy 97:2009. pp. 67-72

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

- ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายพรคพงษ์ ศรีประเสริฐ
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Pakpong Sriprasert
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3449900058144
- ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานวิชาการ (อาจารย์)
- สังกัดหน่วยงาน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
โทรศัพท์ 0-4374-2135 E-mail neo14nio@yahoo.com
- ประวัติการศึกษา
2544 – 2547 ปริญญาโท (วศ.ม.) วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
2537– 2541 ปริญญาตรี (วศ.บ.) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
- สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (ต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา
- เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ของเสีย (Waste Exchange/ Waste Utilization)
- เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย (ทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ) และการผลิตน้ำสะอาด
- เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอันตราย
- ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

หัวหน้าโครงการวิจัย

- การกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษโดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านจากเศษเยื่อไม้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์และรับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (IRPUS 2550)
- การศึกษาการใช้เมล็ดมะขามเป็นสารสร้างตะกอนในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
- การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้กากตะกอนจากการผลิตน้ำประปาและกากปูนขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550
- การกำจัดตะกั่วจากน้ำผิวดินโดยการสร้างตะกอนทางเคมีด้วยการใช้ปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนตร่วมกับโพลีอิเล็กโทรไลต์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
- การกำจัดสีน้ำย้อมสีอ้อมโดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่าน ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
- การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการดูดซับสีอ้อมได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี

7. ประสิทธิภาพการกำจัดสีของเรซินรูปไข่และเรซินชานอ้อยจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2551

8. การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียรวมจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ร่วมกับโพลีเมอร์ ภายใต้แผนงานทรัพยากรธรรมชาติและจัดการของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2552

9. การนำกลับทองแดงในน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่าของเสีย ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2553

10. การวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสำหรับกลุ่มทอผ้าและย้อมผ้า โดยกระบวนการสร้างตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการดูดซับด้วยแกลบเผา เครื่องช่วยบริหารการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปีงบประมาณ 2553

11. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

12. การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนโดยใช้สารเฟนตันร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2554

ผู้ร่วมทำงานวิจัย

1. การนำกลับโครเมียม (Cr^{3+}) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยกากปูนขาว จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์

2. การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าถ่านไม้ขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี

3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและปริมาณโครเมียม (Cr^{3+}) ในกากตะกอนด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอนทางเคมีจากน้ำใต้ดินที่มีความกระด้าง ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550

4. การกำจัดโครเมียม (Cr^{3+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยเถ้าไม้ขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี

5. การกำจัดสีย้อมใหม่โดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยแกลบ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์

6. การบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มโดยใช้แบคทีเรียชอบเจริญในที่เค็มและแบคทีเรียทนเค็ม

“Treatment of Saline Wastewater Using Halophilic Bacteria and Halotolerant Bacteria”,

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร. กรรณิการ์ ชูเกียรติวัฒนาสถานที่ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

7. การนำกลับทองแดงจากการชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทนชันโดยใช้ผงเหล็ก ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการโครงการงานอุตสาหกรรมสำหรับนิสิตปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2552 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ ได้รับทุนเพิ่มเติมจากโครงการจัดตั้งศูนย์ความเป็นเลิศเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

8. การกำจัดและนำกลับทองแดงความเข้มข้นสูง ในน้ำยากัดทองแดง (น้ำยาไมโครเอช) จากน้ำเสียกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมเอนทรี ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคามโดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2552

9. การพัฒนาเทคโนโลยีการนำกลับทองแดงในน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการรีดักชันโดยใช้ไฮดรารซิน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่าของเสีย ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2553

10. การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

11. การใช้ประโยชน์และนำกลับทองแดงจากน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการซีเมนเทนชันโดยใช้ผงเหล็ก ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2554

12. การกำจัดสีที่เกิดจากกรดฮิวมิคในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ ภายใต้แผนงานวิจัย แนวคิดการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาและการใช้ประโยชน์จากตะกอนประปา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2555

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นางนันท์ณัฐ ศรีประเสริฐ
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mrs. Nanthanat Sriprasert
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3460700389513
3. ตำแหน่งปัจจุบัน พนักงานวิชาการ (อาจารย์)
4. สังกัดหน่วยงาน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
โทรศัพท์ 0-4374-2135 E-mail sensory_nun@yahoo.com
5. ประวัติการศึกษา
2544 – 2547 ปริญญาโท (วศ.ม.) วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา
2540– 2544 ปริญญาตรี (วศ.บ.) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (ต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา

- เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์ของเสีย (Waste Exchange/ Waste Utilization)
- เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย (ทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ) และการผลิตน้ำสะอาด
- เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอันตราย

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. การนำกลับโครเมียม (Cr^{3+}) จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยกากปูนขาว จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์
2. การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าถ่านไม้ขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและปริมาณโครเมียม (Cr^{3+}) ในกากตะกอนด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอนทางเคมีจากน้ำใต้ดินที่มีความกระด้าง ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550
4. การกำจัดโครเมียม (Cr^{3+}) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยเถ้าไม้ขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
5. การกำจัดสีย้อมไหมโดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยแกลบ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์
6. การกำจัดทองแดงออกจากน้ำยากัดทองแดงโดยใช้กระบวนการไบโโรไฮโดรจีเนติกชัน ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนิสิตปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2551 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
7. การกำจัดและนำกลับทองแดงความเข้มข้นสูง ในน้ำยากัดทองแดง (น้ำยาไมโครเอช) จากน้ำเสียกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมแอนโธรี ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคามโดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2552
8. การนำกลับทองแดงจากการชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทนชันโดยใช้ผงเหล็ก ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนิสิตปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2552 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ ได้รับทุนเพิ่มเติมจากโครงการจัดตั้งศูนย์ความเป็นเลิศเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
9. การพัฒนาเทคโนโลยีการนำกลับทองแดงในน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการรีดักชันโดยใช้ไฮดราซีน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่าของเสีย ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2553
11. การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก : การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553
12. การใช้ประโยชน์และนำกลับทองแดงจากน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการซีเมนเทนชันโดยใช้ผงเหล็ก ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2554

13. การกำจัดสีที่เกิดจากกรดฮิวมิกในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับ แคลเซียมคลอไรด์ ภายใต้แผนงานวิจัย แนวคิดการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาและการใช้ประโยชน์จากตะกอนประปา ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2555

ผู้ร่วมทำงานวิจัย

1. การบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มโดยใช้แบคทีเรียชอบเจริญในที่เค็มและแบคทีเรียทนเค็ม หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ.ดร. กรรณิการ์ ชูเกียรติวัฒนา
2. การกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษโดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านจากเศษเยื่อไม้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์
3. การศึกษาการใช้เมล็ดมะขามเป็นสารสร้างตะกอนในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
4. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้กากตะกอนจากการผลิตน้ำประปาและกากปูนขาว ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550
5. การกำจัดตะกั่วจากน้ำผิวดินโดยการสร้างตะกอนทางเคมีด้วยการใช้ปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนตร่วมกับโพลีอิเล็กโทรไลต์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
6. การกำจัดสีน้ำย้อมสีออกโดยการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านแกลบและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2550 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
7. การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการดูดซับสีย้อม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2551 ประเภทนิสิตระดับปริญญาตรี
8. ประสิทธิภาพการกำจัดสีของเรซินรูปทุษีและเรซินชานอ้อยจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2551
9. การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียรวมจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ร่วมกับโพลีเมอร์ ภายใต้แผนงานทรัพยากรธรรมชาติและจัดการของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการพิจารณาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2552
10. การนำกลับทองแดงจากการชะละลายเศษแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคซีเมนเทนซ์โดยใช้ผงเหล็ก ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนิสิตปริญญาตรี ปีงบประมาณ 2552 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ ได้รับทุนเพิ่มเติมจากโครงการจัดตั้งศูนย์ความเป็นเลิศเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
11. การนำกลับทองแดงในน้ำยากัดทองแดงที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่าของเสีย ได้รับ

ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการศึกษาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2553

12. การวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสำหรับกลุ่มทอผ้าและย้อมผ้า โดยกระบวนการสร้างตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการดูดซับด้วยแกลบเผา เครือข่ายบริหารการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปีงบประมาณ 2553

13. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553

14. การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียการพิมพ์ซิลค์สกรีนโดยการใช้สารเฟนตันร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี ภายใต้แผนการวิจัย เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์และการบำบัดของเสียอุตสาหกรรม ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการศึกษาของ วช. ประจำปีงบประมาณ 2554

นิสิตช่วยโครงการวิจัย

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับเฟนตันออกซิเดชันเพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียพิมพ์ซิลค์สกรีน

1. นางสาวณัฐชนันท์ เชียงพุกษ์
2. นางสาวพรพิมล วัฒนปรีดี

การนำกลับทองแดงจากแผ่นวงจรไฟฟ้าด้วยผงเหล็ก: การชะละลายทางเคมีร่วมกับเทคนิคซีเมนเทนชัน

1. นายพายसान อิงเอนู
2. นางสาวศิริรัตน์ เจริญราช
3. นายณัฐพงษ์ ทดทะศรี
4. นายทรงศักดิ์ ศรีไกรรัตน์
5. นางสาวกัลยานี บุญประภาศรี
6. นางสาวพนิดา เทียมขุนทด
7. นางสาวสุดารัตน์ ชุมเงิน