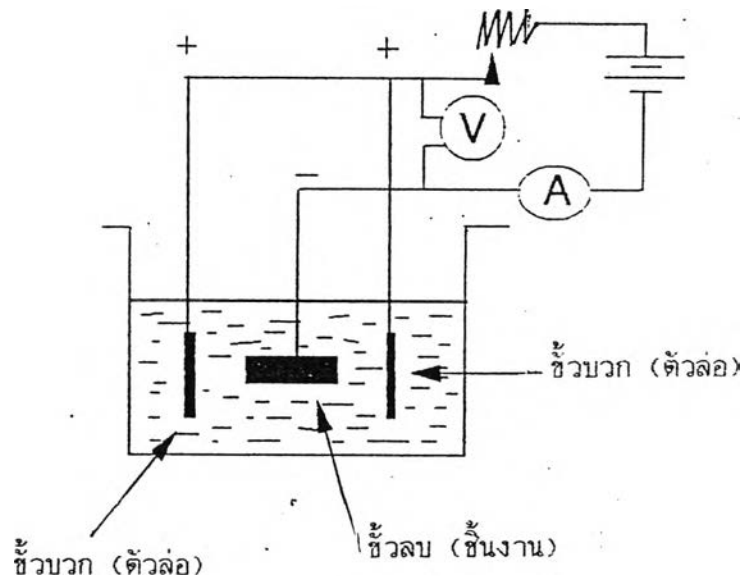


บททวนเอกสาร

3.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

1. หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ การเคลือบโลหะลงบนผิวของโลหะอีกชนิดหนึ่งด้วยวิธีเคมี-ไฟฟ้า โดยการจุ่มชิ้นงานที่ต่อเข้ากับขั้วลบ (cathod) ของกระแสไฟฟ้าตรง (D.C.current) ลงในน้ำยาชุบและต่อตัวล่อกับขั้วบวก (anode) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดการเกาะจับของโลหะที่ชิ้นงาน (ขั้วลบ) ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ



รูปที่ 3.1 แสดงการต่อของส่วนต่างๆ ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (อนันต์, 2527)

ในการชุบโลหะจะต้องทำการควบคุมสภาวะต่างๆที่เหมาะสม เช่น
 พีเอช ที่เป็นกรดมากไปจะทำให้ประสิทธิภาพขั้วลบ (ชิ้นงาน) ลดลง
 พีเอช ที่เป็นด่างมากไปจะทำให้ประสิทธิภาพขั้วบวก (ตัวล่อ) ลดลง

เวลาและความหนาแน่นของกระแส จะมีผลต่อความหนาของผิวที่ชุบ
ระยะระหว่างตัวล่อและชิ้นงาน จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาของ
ผิวที่ชุบ



2. วัตถุประสงค์ในการชุบชิ้นงาน

1. เพื่อความสวยงาม
2. เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวชิ้นงาน เช่น เพิ่มความแข็ง ป้องกันสนิม
3. เพื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงาน ในกรณีที่ชิ้นงานสึกกร่อน

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบ

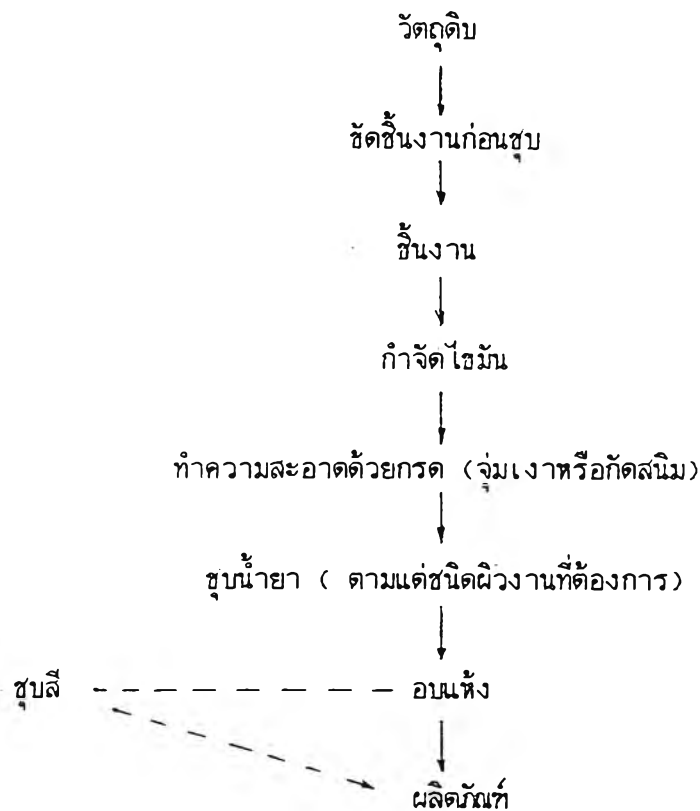
1. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ทำหน้าที่แปลง ไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C.) ให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) ปกติขนาดแรงเคลื่อนไม่เกิน 12 โวลต์
2. ถังบรรจุน้ำยา ซึ่งโดยทั่วไปทำด้วยเหล็กนิกายในด้วยวัสดุทนกรด , ต่าง แต่อาจเลือกใช้ดังต่อไปนี้
 - ถัง โพลีทีน เหมาะในการใช้สำหรับกัดสนิมและน้ำยาชุบ
 - ถัง ไฟเบอร์กลาส เหมาะสำหรับน้ำล้าง, กรดเจือจางแต่ไม่เหมาะสม สารที่เป็นต่าง
 - สแตนเลส (นิกเกิล 18 % , โครเมียม 8%) ใช้บรรจุกรดดินประสิว (HNO_3) และกรดที่มีออกซิเจนผสม เช่น กรดโครมิก (CrO_3) และ กรดกำมะถัน (H_2SO_4) ไม่เหมาะกับกรดเกลือ (HCl)
 - ถังเหล็กนิกายในด้วย PVC สามารถบรรจุน้ำยาชุบได้ทุกชนิด ที่อุณหภูมิ ไม่เกิน 70 องศา ถังเหล็กนิกายด้วยตะกั่วเหมาะกับน้ำยาชุบโครเมียม
3. ทางเดินของกระแสไฟฟ้า (Busbars) หมายถึง ทางเดินของไฟฟ้าจาก เครื่องแปลงกระแส (Rectifier) ไปยังถังชุบต่าง ๆ โดยทั่วไปใช้ ทองแดง เสิ้แบบและอลูมิเนียม
4. แอมแปร์-ชั่วโมง มิเตอร์ ใช้ควบคุมการทำงานของน้ำยาชุบ
5. เครื่องร่อนน้ำยา ใช้กำจัดสิ่งสกปรกที่ปนในน้ำยา
6. บีมลม, ท่อจ่ายลม เพื่อกวนน้ำยาและป้องกันการเกาะของก๊าซที่ขั้วทั้งสอง
7. เครื่องทำความร้อน สำหรับควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม
8. แผงควบคุมกระแสไฟฟ้า
9. อุปกรณ์ขัดชิ้นงาน เช่น แปรงขัด, ผ้าขัด, เครื่องขัดถึงหมุน ฯลฯ
10. เครื่องอบแห้ง หรือเครื่องเหวี่ยงน้ำ

4. น้ำยาชุบ

ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่ละประเภท เช่น ชุบโครเมียม, ชุบสังกะสี, ชุบนิเกิล ชุบทองแดง ฯลฯ น้ำยาที่ใช้ในการชุบก็จะต่างกันไป นอกจากนั้นในการชุบประเภทเดียวกันก็ยังมีน้ำยาหลายสูตร ตัวอย่างส่วนประกอบของน้ำยาชุบ และสภาวะการทำงานแสดงในภาคผนวก ข.

5. ขั้นตอนในการชุบโลหะ

รูปแบบขั้นตอนในการชุบโลหะอย่างง่าย ประกอบไปด้วย การเตรียมชิ้นงาน ซึ่งหมายถึง การขัดผิวชิ้นงานจนได้ขนาดและความเรียบตามต้องการ จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดไขมัน จากนั้นนำไปจุ่มกรดเพื่อกัดเอาสนิมออก แล้วนำชิ้นงานไปชุบในน้ำยา ซึ่งควบคุมสภาวะการชุบตามกำหนด หลังจากเสร็จแล้วนำไปอบแห้ง สุดท้ายจะได้ชิ้นงานตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

ความซับซ้อนของขั้นตอนในการชุบจะขึ้นอยู่กับชนิดโลหะที่เป็นวัตถุชุบ และชนิดของผิวโลหะที่ต้องการ โดยวัตถุชุบส่วนมากจะเป็นเหล็ก เหล็กหล่อ ทองเหลือง อะลูมิเนียม

การขัดชิ้นงานก่อนชุบ แบ่งออกเป็น การขัดหยาบและการขัดละเอียด โดยการขัดหยาบเป็นการขัดขั้นแรก โดยขัดเอารอยขีดข่วนเล็ก ๆ หรือบริเวณที่ไม่สม่ำเสมอออก โดยใช้ล้อขัดที่เคลือบด้วยทรายหยาบ ส่วนการขัดละเอียดเป็นการขัดต่อเพื่อลบรอยจากการขัดหยาบทำให้ชิ้นงานเรียบ โดยใช้ล้อขัดที่มีทรายละเอียดเบอร์ 280 ขึ้นไป นอกจากนี้ในกรณีที่ชิ้นงานเล็กมาก ๆ อาจขัดโดยการใช้อุปกรณ์ที่มีหินขัดบรรจุภายใน

การกำจัดไขมัน ทำโดยการใช้วิธีดังต่อไปนี้

- กำจัดโดยโอระเหยไตรคลอโรเอทิลีน (Vapour degreasing) โดยนำชิ้นงานจุ่มในถังบรรจุไตรคลอโรเอทิลีน มีการให้ความร้อนจนถึง 86 องศา จะกลายเป็นไอมากกระทบกับท่อขัดทำความสะอาดบริเวณปากขอบถังและชิ้นงาน ไอจะกลั่นตัวบนผิวงาน และทำการชำระล้างไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง

- กำจัดโดยใช้ถังร้อน (Soak clean) แช่ชิ้นงานในถังเหล็ก หรือสแตนเลสที่บรรจุด้วยถังและน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าทำงานอยู่

การทำความสะอาดด้วยกรดหรือจุ่มเงา (Pickling and dipping) เป็นการกัดสนิมเหล็ก เหล็กกล้า ออกไซด์ของทองแดง นิกเกิล และทองแดงผสมอื่น โดยใช้ความเข้มข้นของกรดที่ประมาณ 5-10 % หรืออาจใช้กรดเกลือ ในอัตราส่วน 1:5 โดยปริมาตร (กรด 1 ส่วนต่อน้ำ 5 ส่วน) ในขั้นตอนนี้จะต้องระวังไอกรดระเหย โดยต้องมีการดูดไอพิษไปกำจัด

การชุบโลหะประเภทต่าง ๆ

1. การชุบทองแดง เป็นการชุบเคลือบผิวขั้นแรกก่อนนำไปชุบอย่างอื่น เช่น ชุบน้ำเงินที่มีรอยบัดกรีบนสังกะสีผสม ก่อนที่จะนำไปชุบนิกเกิล เพราะหากเอาชิ้นงานที่มีรอยบัดกรีหรืองานที่มีสังกะสีผสมอยู่ สังกะสีจะละลายในน้ำยานิกเกิลทันที การชุบทองแดงแบ่งออกเป็น การชุบทองแดงแบบต่าง และแบบกรด แบบต่างมีกำลังการเคลือบผิวดีมาก และการเกาะจับติดแน่น เหมาะสำหรับชุบรองพื้นขั้นแรกก่อนชุบแบบกรด และนิกเกิลเงา งานสังกะสีหล่อไม่สามารถชุบทองแดงแบบกรดได้โดยตรง ก็ต้องนำมาชุบทองแดงแบบต่างก่อน โดยทั่วไปการชุบทองแดงแบบต่าง สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ

1. แบบสไตรค์ (Strike Bath)
2. แบบร็อกเชล (Rochelle Bath)
3. แบบมีประสิทธิภาพสูง (High efficiency Bath)

ส่วนการชุบแบบกรด มีความเงางามมาก นิยมใช้ชุบผิวโลหะเพื่อเพิ่มความหนาของทองแดงที่รองพื้นก่อนชุบนิกเกิลเงา

ส่วนประกอบของน้ำยาแต่ละชนิดและสภาพในการทำงานแสดงในภาคผนวก ข. และหน้าที่ของส่วนผสม มีดังนี้

1. โซเดียมหรือโบรเมตสเติมโซยาไนต์ เป็นตัวช่วยนำกระแสไฟฟ้าและถ้ามีโซยาไนต์ปริมาณน้อยกว่าที่กำหนด จะทำให้ผิวขี้บวกลายเป็นสีดำ ไม่สามารถทำงานได้
2. โซเดียมหรือโบรเมตสเติมไฮดรอกไซด์ ช่วยในการนำไฟฟ้าและช่วยให้ขี้บวกละลายดีขึ้น
3. คาร์บอเนต ช่วยควบคุม pH ไม่ให้เปลี่ยนแปลงได้ง่าย

2. การชุบนิเกิล การชุบเคลือบนิเกิลลงบนเหล็ก ทองเหลือง และโลหะอื่น ๆ นั้นเพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะ และยังทำให้ผิวดูสวยงาม ปกติจะตามด้วยการชุบโครเมียมเพราะทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด ส่วนผสมของน้ำยาชุบประกอบด้วย

1. นิเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวให้นิเกิลออกออน
2. นิเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวให้นิเกิลออกออนและเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและช่วยให้ขี้บวกละลายดีขึ้น
3. กรดบอริก (H_3BO_3) ควบคุมพีเอชไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก

การชุบนิเกิลสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังต่อไปนี้

1. นิเกิลดำน (Dull Nickel) ใช้ชุบชิ้นงานที่ไม่เหมาะกับการชุบนิเกิลเงา
2. นิเกิลกึ่งเงา (Semi bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบนิเกิลเงา
3. นิเกิลเงา (Bright Nickel) ชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม, ทอง, ทองเหลือง
4. นิเกิลดำ (Black Nickel) ใช้ในงานซึ่งไม่ต้องการสะท้อนแสง เช่น กรอบแว่น อวูธ
5. นิเกิลซาติน (Satin Nickel) จะได้สีเคลือบเหมือนสีนัวร์ หรือเคลือบเหมือนผิวไข่มุกเงา
6. นิเกิลแบบหนา (Heavy electrodeposition of Nickel) ชุบชิ้นงานที่สึกหรอ

ส่วนผสมของน้ำยาและสภาพต่างๆ ที่เหมาะสมในการชุบแสดงในภาคผนวก ข.

3. ชุบโครเมียม การชุบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ชุบเพื่อความสวยงาม (Decorative Chromium) และชนิดหนา (Hard Chromium) การชุบเพื่อความสวยงามหรือชนิดบาง จำเป็นต้องมีการชุบรองพื้นก่อนชุบโครเมียม เพราะโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งแต่

เพราะมาก การชุบบางโดยตรงบนเหล็กจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไปและทำให้หลุดร่อนได้ การชุบทำได้โดยการรองพื้นชิ้นงานด้วยทองแดง ก่อนชุบนิเกิล และรองพื้นด้วยนิเกิล ก่อนชุบโครเมียม เหมาะกับชิ้นงานที่เป็นเหล็ก เหล็กหล่อ โลหะผสม ฯลฯ ตัวล่อโครเมียม ใช้โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก หรือโลหะผสมระหว่างตะกั่วกับพลวง โดยอัตราส่วน ตะกั่ว 93% กับดีบุก 7% หรือ ตะกั่ว 92% กับพลวง 8% ขั้นตอนการชุบโครเมียมบนชิ้นงานประเภทต่าง ๆ แสดงในรูปแบบที่ 3.3

ชุบนเหล็ก	ชุบนทองแดง-ทองเหลือง	ชุบนสังกะสีหล่อ	ชุบนอะลูมิเนียม
- ชัดชิ้นงาน	- ชัดชิ้นงาน	- ชัดชิ้นงาน	- ล้างชิ้นงาน
- ล้างชิ้นงาน	- ล้างชิ้นงาน	- ล้างชิ้นงาน	- ล้างด้วยไฟฟ้า
- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างด้วยไฟฟ้า	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- จุ่มน้ำยา Bondal dip 1-2 นาที
- จุ่มกรด	- จุ่มกรด	- จุ่มกรด	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ชุมนิเกิลเงา
- ชุมนิเกิลกึ่งเงา	- ชุมนิเกิลเงา	- ชุบทองแดงต่าง	- ล้างน้ำ
- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ	- ชุบโครเมียม
- ชุมนิเกิลเงา	- ชุบโครเมียม	- จุ่มกรดกำมะถัน	- จุ่มถัง Drag out
- ล้างน้ำ	- จุ่มถัง Drag out	- ล้างน้ำ	- ล้างน้ำ
- ชุบโครเมียม	- ล้างน้ำ	- ชุมนิเกิลกึ่งเงา	- อบแห้ง
- จุ่มถัง Drag out	- อบแห้ง	- ชุมนิเกิลเงา	
- ล้างน้ำ		- ล้างน้ำ	
- อบแห้ง		- ชุบโครเมียม	
		- จุ่มถัง Drag out	
		- ล้างน้ำ	
		- อบแห้ง	

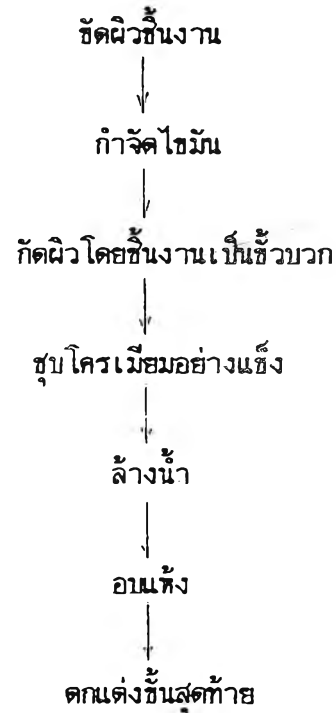
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการชุบโครเมียมบนชิ้นงานประเภทต่าง ๆ

การชุบชนิดแข็ง (Hard Chromium) สามารถทำการชุบโดยตรง ไม่ต้องมีการชุบทองแดงหรือนิเกิลรองพื้น คุณสมบัติของชิ้นงานหลังชุบจะมีดังนี้

- มีความแข็งและทนทาน
- ทนต่อการเกิดสนิมและทนต่อความร้อน

- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานต่ำ
- มองดูสวยงาม
- ใช้แม่เหล็กดูดได้

ขั้นตอนการชุบโครเมียมอย่างแข็ง แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการชุบโครเมียมอย่างแข็ง

4. การชุบสังกะสี นิยมใช้กับชิ้นส่วนของรถยนต์ การชุบชิ้นงานแม่เหล็กทำได้โดยตรง ไม่ต้องมีการชุบรองพื้น การชุบมีทั้งการชุบสังกะสีแบบกรด และ การชุบสังกะสีแบบด่าง การชุบแบบด่าง สามารถแบ่งได้เป็นแบบ มีไฮยาไนด์สูง มีไฮยาไนด์ต่ำ และไม่มีไฮยาไนด์ การชุบแบบกรด ไม่มีไฮยาไนด์เป็นส่วนผสม

ส่วนผสมของสภาวะการทำงานของน้ำยาแสดงในภาคผนวก ข. ส่วนขั้นตอนในการชุบสังกะสีจะเหมือนกับขั้นตอนในการชุบโลหะทั่วไป ดังรูปที่ 3.2

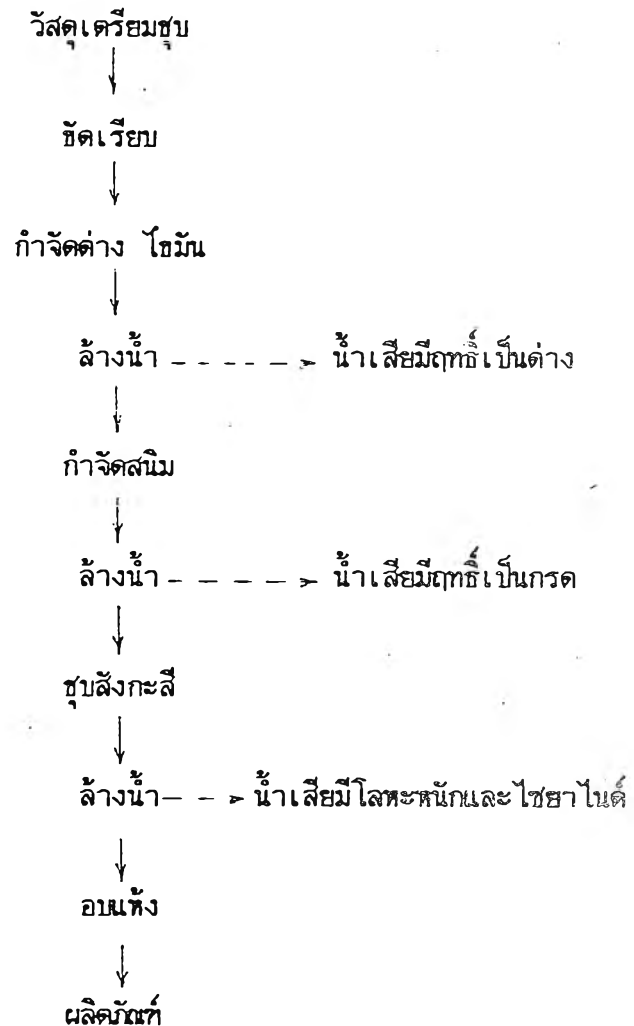
3.2 แหล่งที่มาและลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Newerrow, 1978)

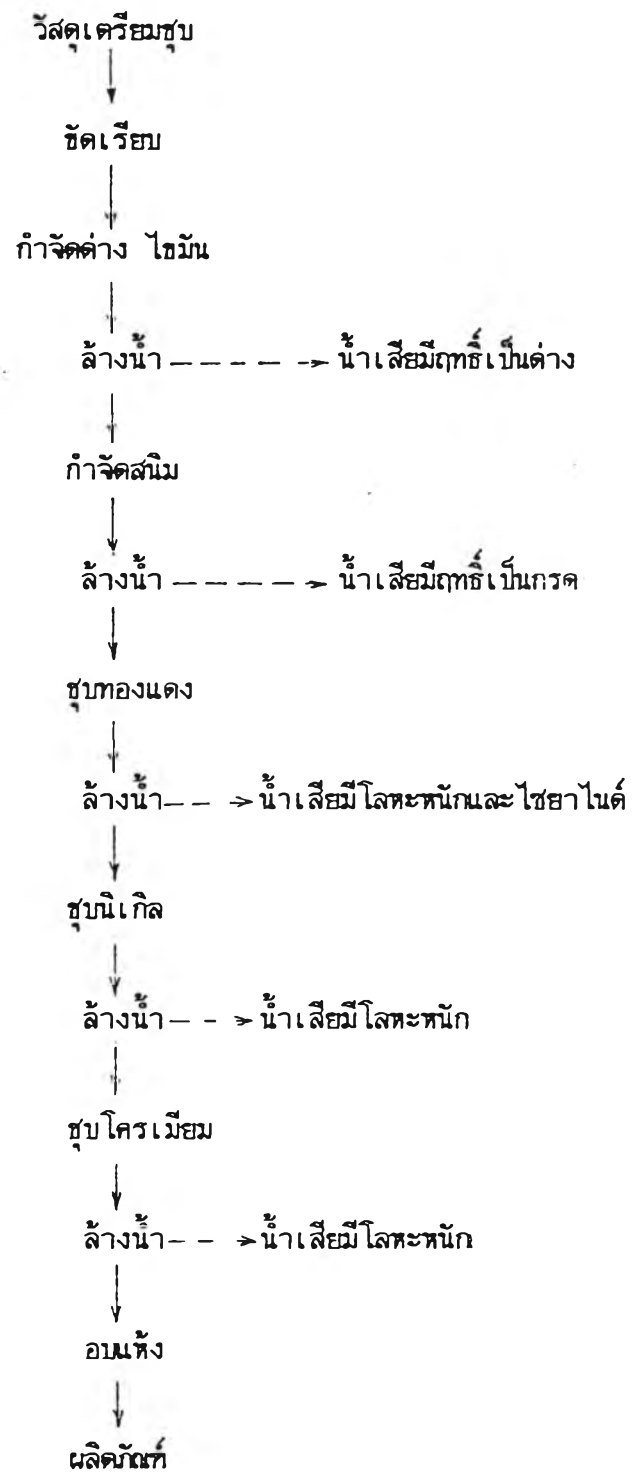
1. น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมันและน้ำมัน
2. น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม

3. น้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา
4. น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
5. น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่

มลพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมันและไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลมาเนื่องจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่หากจะเกิดขึ้นสักครั้ง และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำและปริมาณไม่มากนัก สำหรับแหล่งกำเนิดน้ำเสียของ โรงงานชุบโครเมียมและสังกะสีโดยทั่วไป แสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการชุบสังกะสี (TISTR, 1982)



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการซุบโครเมียม (IISTR, 1982)

มีผู้ศึกษาปริมาณและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะไว้มากมาย พบว่ามีการแปรเปลี่ยนทั้งปริมาณและลักษณะน้ำเสียอย่างมากเมื่อเปลี่ยนโรงงาน หรือแม้แต่โรงงานเดียวกันเมื่อวันเวลาที่ศึกษาต่างกัน (Tay, 1986) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของโรงงาน รูปแบบการจับชิ้นงาน วิธีการล้างชิ้นงานหลังชุบ การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปริมาณและลักษณะน้ำเสียมีดังนี้ Tay, 1986 ได้สรุปความเข้มข้นของมลสารในโรงงานชุบโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

สุดใจ, 2524 ได้รวบรวมลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะจำนวน 14 โรงงาน ภายในเขตกรุงเทพมหานครและสรุปไว้ดังตารางที่ 3.2

จิระศักดิ์, 2526 ได้เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจาก 5 โรงงาน สรุปได้ดังตารางที่ 3.3

TISTR, 1982 ได้เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจาก 20 โรงงาน ในเขตกรุงเทพมหานครสรุปได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 แสดงช่วงของความเข้มข้นของมลสารในโรงงานชุบโลหะ (Tay, 1986)

มลสาร	ความเข้มข้น มก./ล.
Cyanide	1 - 150
Chromium	0.25 - 2,600
Copper	0.74 - 75
Nickel	0.07 - 125
Zinc	0.12 - 140
Lead	0.45 - 20
Tin	1.0 - 20
Iron	0.17 - 300

ตารางที่ 3.2 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ (หน่วย mg/l)
(สุดใจ, 2524)

FACTORY	TYPE	FLOW, cu.m/d	pH	DS	SS	Cu	CN	Zn	NI	Cr	REMARK
1	Cr, Ni, Cu, Zn	4	3.2	1410	110	8.2	19.7	14.2	10	2.6	
2	Cr, Ni, Cu, Zn	33	7.4	483	67	2.9	3.2	40	6	8.9	INF
			4.5	2580	158	1	0.5	35.5	1.6		EFF
3	Cr, Ni, Cu	8	7.7	707	8	-	24			60	INF
			8	583	12	-	2.4		0.22	2.8	EFF
4	Cr, Ni, Cu	4	6.1	864	244	21.5			14.3	7.5	EFF
5	Cr, Ni, Cu	2	7.1	462	84	0.9	10.3		1.9	0.9	
6	Ni, Cu, Zn	10	8.9	1722	320	10.7	86.6	54	7	47	
7	Cr, Ni, Cu	4.5	7.6	574	200	5.7	14		20.5	2.2	
8	Cr, Ni, Cu	2	6.7	272	264	1.1	3.8		5.7	19.4	
9	Cr, Ni, Cu	4	7.1	658	520	0.2	0.5		8.9	28.3	
10	Cr, Ni, Cu	3	7.2	1218	280	0.4	1.4		25.6	8	
11	Cr, Ni, Cu	2	7.4	264	160	0.7			0.6	0.2	
12	Cr, Ni, Cu	3	6.7	1823	507	1.9			104	39.5	
13	Cr, Ni, Cu, Zn	6	6	1470	1050	0.8	25.8	158	33.6	31.4	
14	Cr, Ni, Cu, Zn	2	7.3	884	72	0.9	1.5	2.8	16.1	18.6	

3.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ มีสารมลพิษสูงเจือปนอยู่ คือ โลหะหนัก ไซยาไนต์ ซึ่งการปล่อยมลสารเหล่านี้สู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมทั้งที่อาจเกิดต่อมนุษย์โดยทางอ้อม

1. ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (ชัยวัฒน์, 2525)

โครเมียม (Cr) สารประกอบของโครเมียมประจุบวกสาม ไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย แต่สารประกอบของโครเมียมประจุบวกหก ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง เป็นพิษต่อร่างกาย การสูดดมไอกรดโครมิกเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

ทองแดง (Cu) เป็นโลหะที่ร่างกายต้องการในปริมาณเล็กน้อย ผู้ใหญ่ต้องการประมาณ 2 มก./วัน แต่ถ้าร่างกายได้รับมากเกินไปก็ก่อให้เกิดโทษแก่ร่างกายได้ เช่น รับประทาน $CuSO_4$ ในปริมาณ 27 กรัม ทำให้เสียชีวิตได้ ถ้ารับประทานในปริมาณน้อยกว่านี้ จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และลำไส้

ตะกั่ว (Pb) เป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ แต่ร่างกายคนเราสามารถทนต่อปริมาณตะกั่วได้ โดยคนทั่วไปสามารถมีตะกั่วในเลือด 0.25 ppm โดยไม่เป็นพิษ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากกว่าที่ทนได้ เช่น พบในเลือดมากกว่า 0.8 ppm เกิดเป็นพิษยับยั้งไต

นิเกิล (Ni) สารประกอบของนิเกิล ไม่มีผลทางสรีระของสัตว์และพืช หรือ เป็นพิษในเกณฑ์ที่ต่ำมาก

019602

ตารางที่ 3.3 สรุปข้อมูลการทำงานของโรงงานชุบโลหะ (จระศักดิ์, 2526)

โรงงาน	ลักษณะงานชุบ	ปริมาณงานชุบ (ชิ้น/วัน)	น้ำแข็ง (ม.³/วัน)	อัตราน้ำแข็ง (ลิตร/ชิ้น)	ปริมาณโลหะหนักก่อนการชุบ (mg/L)					ปริมาณโลหะหนักหลังการชุบ (mg/L)					ปริมาณโลหะหนัก 4 ชนิด			
					Cr	Ni	Cu	Zn	รวม	Cr	Ni	Cu	Zn	รวม	มก. / 1000 ชิ้น		กก. / วัน	
															ก่อนชุบ	หลังชุบ	ก่อนชุบ	หลังชุบ
5	Cr, Ni, Cu, Brass	35,000	26	0.74	3.5	252.0	166.9	10.9	433.3	1.9	41.2	34.0	3.4	80.5	0.12	0.02	11.27	2.09
6	Cr, Ni	200	5.5	27.5	41.9	143.3	16.4	14.1	215.7	3.3	43.4	2.2	2.4	51.3	0.78	2.56	1.19	0.28
7	Cr, Ni, Cu, Zn, Brass	22,500	20	0.89	48.8	15.0	0.8	44.7	109.3	22.9	14.7	1.2	9.4	58.2	0.05	0.03	2.19	1.16
8	Cr, Ni, Zn	750	2.5	3.33	120.2	95.7	4.9	5.4	226.2	45.3	6.0	0.9	0.3	52.5	3.02	0.7	0.56	0.13
9	Cr, Ni, Cu, Brass	130	0.2	1.54	212.3	161.0	22.1	14.4	409.8	73.9	0.2	0.5	0.3	74.9	1.52	5.76	0.08	0.01
ค่าเฉลี่ย		11,716	10.8	6.8	85.3	133.4	42.2	17.9	278.8	29.1	21.2	7.0	5.1	63.5	9.1	1.81	3.06	0.73

- หมายเหตุ
- ค่าที่นำมาใช้ เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละโรงงาน
 - โรงงานชุบโลหะโรงที่ 6 มีงานชุบแค่มีงานขนาดเล็ก



ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงปริมาณและลักษณะน้ำเสียจำนวน 20 โรงงาน ในกรุงเทพฯ
(TISTR, 1982)

Factory Name	Plating Activity	Waste Volume m ³ /d.	Waste characteristics, mg/l						
			Cr	Ni	Cu	Zn	Au	Al	CN ⁻
1. Jintanasuwan	Cr, Au	15	0.05	275	-	-	0.05	-	-
2. Sangjaroen	Cr	1	40.3	27.5	-	-	-	-	-
3. Golden Lamp Co.	Ni, Cu	6	-	1.4	-	-	-	-	100
4. Thai-vasco.Electro.Ltd.	Al	8	-	-	-	-	-	345- 1,520	-
5. Suthichai chromium	Cr	8	27.3	29.0	4.7	-	-	-	-
6. Semsarapad	Cr, Zn	3.5	22.5	-	-	91	-	-	5.0
7. Kimhuad	Cr	0.5	2.9	10.8	11.0	-	-	-	-
8. Sawimee	Cr	3	0.9	7.0	-	-	-	-	-
9. Theptip-chromium	Cr	3	96.6	21.3	2.3	-	-	-	-
10. Sahajerawat	Zn	4	-	-	-	0.28	-	-	-
11. Thaijaroenkarnchang	Cr, Zn	20	18.6	24.9	10	19.7	-	-	10
12. Ha-senghuad	Cr	4	0.5	2.0	185.5	-	-	-	667
13. Samchai-Usahakam	Zn	4	-	-	-	467	-	-	1,000
14. Yongwatanaplastic	Cr	2	6.3	5.5	0.2	-	-	-	-
15. Ifong-senghuad	Cr	2	94.1	420.9	-	-	-	-	-
16. Watanakij	Cr	1	12.8	37.8	-	-	-	-	-
17. P.T.I. Battery	Cr	25-30	14.7	57.3	108.4	-	-	-	30
18. D.Bunnag	Cr	6.7	447.9	15.0	4.0	-	-	-	-
19. Sangboon	Cr	3-4	146	7.5	9.5	-	-	-	-
20. Sew-jeng	Au	1.5	-	18.6	-	-	0.1	-	-
Average		6.34	62	60.1	37.3	144.5	0.75	933	302
Range		0.5- 30	0.05- 447.9	1.4- 420.9	0.2- 185.5	0.28- 467	0.05- 0.1	345- 1,520	5- 1,000

สังกะสี (Zn) สังกะสีในรูปของธาตุ ไม่ปรากฏความเป็นพิษ แต่สารประกอบหลายตัวเป็นพิษแต่อยู่ในเกณฑ์ต่ำ

ไซยาไนด์ (CN^-) ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็นพิษอย่างแรง ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และอาจทำให้เสียชีวิตได้

2. ผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

โลหะหนักที่เจือปนในน้ำเสีย มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยโลหะหนักบางชนิดในปริมาณต่ำ สามารถกระตุ้นให้การทำงานดีขึ้น เช่น ทองแดง สังกะสี เป็นต้น แต่จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเมื่อมีปริมาณสูง โลหะหนักบางตัวไม่มีความสามารถในการกระตุ้น แต่เป็นพิษเมื่อมีปริมาณสูงพอ สำหรับปริมาณที่ทนได้ต่อโลหะหนัก มีผู้ศึกษาไว้ดังนี้

Forstner และ Wittmann ,1981 ได้แสดงระดับที่ทนได้ของระบบบำบัดทางชีวภาพ ระบบฟอกตัวเองตามธรรมชาติ สัตว์ และมนุษย์ ดังตารางที่ 3.5

WPCF และ ASCE ,1977 ได้เสนอปริมาณที่ทนได้ของระบบบำบัดตะกอนเร่ง ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ความสามารถในการทนต่อโลหะหนักของกระบวนการตะกอนเร่ง

(WPCF และ ASCE ,1977)

Heavy metal	Concentration (mg/l)	
	Carbonaceous removal	Nitrification
Aluminium	15 - 26	-
Cadmium	10 - 100	-
Chromium (VI)	1 - 10	0.25
Chromium (III)	50	-
Copper	1	0.005 - 0.5
Iron	1000	-
Lead	0.1	0.5
Mercury	0.1 - 5	-
Nickel	1.0 - 2.5	0.25
Zinc	0.08 - 10	0.08 - 0.5
Cyanide	0.1 - 5	0.34

ตารางที่ 3.5 ความสามารถในการทนต่อระดับความเป็นพิษของ โลหะหนัก
และสารประกอบโลหะหนัก (Forstner และ Wittmann ,1981)

Element/Compound	Biologic Purification ^a	Self-purification ^a	Crustacean ^b	Fish ^b	Mammal ^b	Man ^b
Al ₂ (SO ₄) ₃			136	1.8 (trout)	12 g/kg	
Ag-compounds			0.01 -- 0.03	0.003 -- 0.1		(0.05 mg/l chron.)
As-compounds	> 0.7		4 -- 9.1	1 -- 23	2 1.5mg/kg	2 mg/kg (0.05 mg/l chron.)
BaCl ₂	1000		83 -- 1500	0.15 -- 8.3 g/l	30 500 mg/kg	3.3 -- 8.3 mg/kg
BeSO ₄ (Be)				1.3 (sunfishes) 0.2 (others)		
H ₂ BO ₃				1 -- 10 g/l	1 -- 5.1 g/kg	5 -- 20 g
CdCl ₂ (Cd)	1-5	0.1	0.03 -- 0.4	3.0 (trout)	0.07 -- 0.15 mg/kg	50 -- 500 mg/kg
Co-compound (Co)		5	(0.5) protozoa	0.01 -- 0.1	0.7 -- 1.5 g/kg	50 -- 500 mg/kg
Chromate [Cr(VI)]			0.3 -- 0.7	0.015 -- 0.195	(0.45 -- 11 mg/l chron.)	0.5 -- 5 g/kg
Cr ₂ (SO ₄) ₃ (Cr)	2-5	0.3	0.03 -- 0.1	1.2 -- 200		
CuSO ₄ (Cu)	1	0.01	0.08 -- 0.8	0.03 -- 0.8 (trout)	(8 g)	(8 g)
FeSO ₄ (Fe)	> 35	Fe-deposits	1.62 -- 152	0.9 -- 152	0.5 -- 5 g/kg	0.5 -- 5 g/kg
HgCl ₂ (Hg)		0.018	0.03 -- 0.1	0.15 -- 0.25 (trout)	(0.1 -- 1 g)	
Mn-compounds (Mn)			0.5 -- 1 g/l	0.05 -- 1.2 g/l		0.5 -- 5 g/kg
Ni-compounds (Ni)	6	0.1	0.0055 -- 1 g/l	0.8 -- 55		50 -- 500 mg/kg
Pb(NO ₃) ₂ (Pb)	5		3 -- 170	0.33 -- 200 (trout)	2 g/kg	
Se-compounds			(183) protozoa	2 -- 10.5	(5 -- 10 mg/l chron.)	(0.01 mg/l chron.)
Sn-compounds				2		
ZnSO ₄ (Zn)	1-3	0.1	19.4	1 -- 5 (trout)	1.9 -- 2.2 mg/kg	

^a Data after Liebmann, 1958.

^b Data after Jung, 1973, and the Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Gelsenkirchen.

Gokcay และ Yetis ,1990 พบว่า ปริมาณโครเมียมประจุบวกหกในปริมาณ 1-25 มก./ล. Cr(VI) ไม่เป็นพิษต่อระบบตะกอนเร่ง นอกจากนี้ยังมีการกระตุ้นการทำงานของระบบอย่างมีนัยสำคัญ

ภัทรารักษ์, 1983 พบว่าปริมาณของสังกะสีในช่วง 5-15 มก./ล. ไม่มีผลต่อการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

บุญจง, 1983 พบว่าปริมาณของตะกั่วในช่วง 1-10 มก./ล. ไม่มีผลต่อการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

สุรพงษ์, 1983 พบว่า อิทธิพลร่วมของตะกั่วและสังกะสี มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบตะกอนเร่งลดน้อยลงเล็กน้อย โดยความเข้มข้นที่ใช้ศึกษาคือ ตะกั่ว 1.24 มก./ล. และสังกะสี 1.74 มก./ล., ตะกั่ว 5.34 มก./ล. และสังกะสี 1.54 มก./ล., ตะกั่ว 1.30 มก./ล. และสังกะสี 6.57 มก./ล.

3.4 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้ (Patterson, 1985 และ Wentz, 1989)

1. การตกผลึก (Precipitation) เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (Solids) สามารถทำได้โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

- การเติมสารเคมีเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น การเติมซัลไฟด์ เป็นต้น
- การเปลี่ยนสมมูลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง ได้แก่ การปรับพีเอช
- การเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นการปรับเพื่อให้สารประกอบของโลหะนั้นมีค่าความสามารถในการละลายได้น้อยลง

2. การรวมตะกอน (Flocculation) เป็นกระบวนการในการทำให้ตะกอนรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เร็ว

3. การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบโลหะหนักมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ สามารถตกตะกอนได้เร็ว โดยกระบวนการนี้มักจะต่อจากกระบวนการตกผลึกและกระบวนการรวมตะกอน

4. การกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากน้ำ เนื่องจากตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยได้ ไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนค่าเลขประจุ เพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลง และสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น

เช่น ไซยาไนต์ และโครเมียมประจุบวกตก

6. กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) เป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะหนักที่มีประจุบวกหรือสารประกอบที่มีประจุลบ เมื่อผ่านเรซินก็จะถูกจับไว้ในเรซิน ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดี แต่หลังจากใช้งานลักษณะประสิทธิภาพจะต่ำลง ต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regeneration) และได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

7. การระเหย (Evaporation) เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไป ทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้น หรือกลายเป็นกาต้มน้ำ พลังงานที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง (Fuel) การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) หรือใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์

8. รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยการใช้แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อ (Semipermeable membrane) ซึ่งเยื่อนี้จะมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางตัวผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง กระบวนการนี้จะต้องใช้พลังงานมาก และต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียเข้า

9. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุนต่างๆ ทำให้น้ำทิ้งสะอาด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วไม่ควรกำจัดโดยการเผา

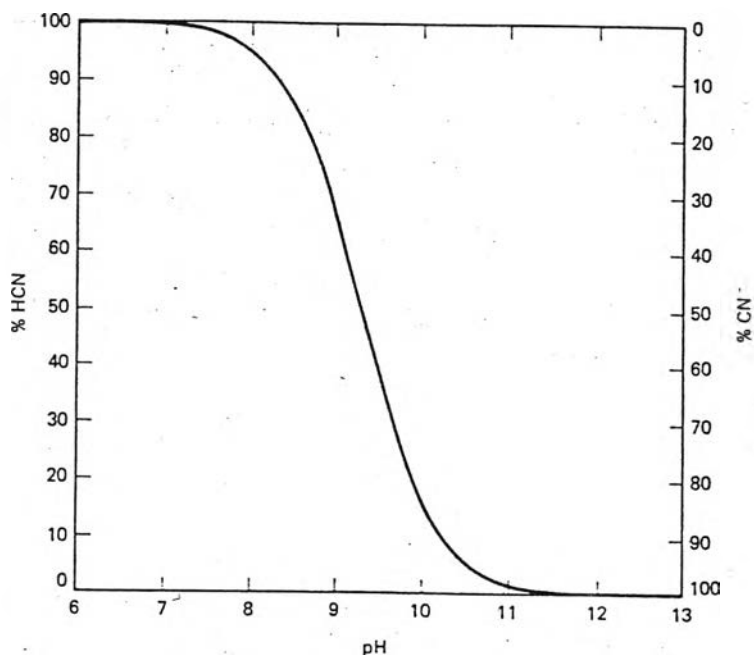
หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างนั้นจะต้องพิจารณาความเหมาะสมต่างๆ ในหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด
2. คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
3. พื้นที่ที่ต้องใช้ทั้งหมด
4. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ
5. ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
6. ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ หรือ กากที่ต้องกำจัด

3.5 การกำจัดไซยาไนต์

ไซยาไนต์ (CN^-) ในน้ำเสียสามารถเปลี่ยนเป็นกาซไฮโดรเจนไซยาไนต์ (HCN) ซึ่งเป็นกาซพิษ โดยการเปลี่ยนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเสีย ดังรูปที่ 3.7

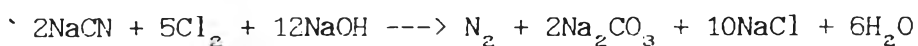
ในการกำจัดไซยาไนต์ (CN^-) นั้นจะต้องอาศัยขบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการเติมสารเคมี ที่เป็นตัวรีดิวซ์เล็กน้อย (Oxidizing agent) ไซยาไนต์จะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอื่นที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือไม่เป็นพิษเลย สารเคมีและสมการเคมีในการกำจัดไซยาไนต์ในน้ำเสียแสดงในตารางที่ 3.7



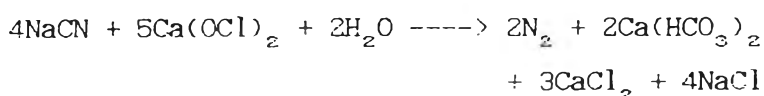
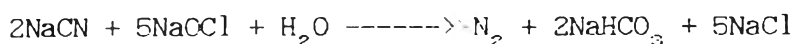
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซยาไนด์และก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์
ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Benfield และคณะ ,1982)

ตารางที่ 3.7 แสดงสารเคมีและสมการเคมีในการกำจัดไซยาไนด์

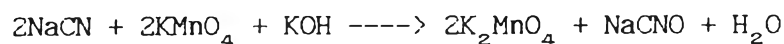
1. การทำลายไซยาไนด์ โดยใช้ก๊าซคลอรีน



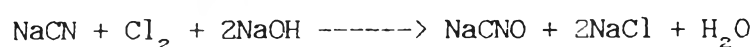
2. การทำลายไซยาไนด์ โดยใช้ไฮโปคลอไรท์



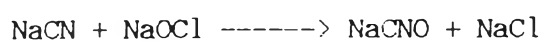
3. การเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนต โดยใช้เปอร์มังกาเนต



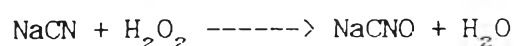
4. การเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนต โดยใช้ก๊าซคลอรีน (Cl_2)



5. การเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนต โดยใช้ไฮโปคลอไรท์



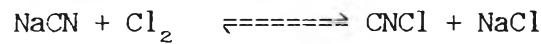
6. การเปลี่ยนไซยาไนด์เป็นไซยาเนต โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



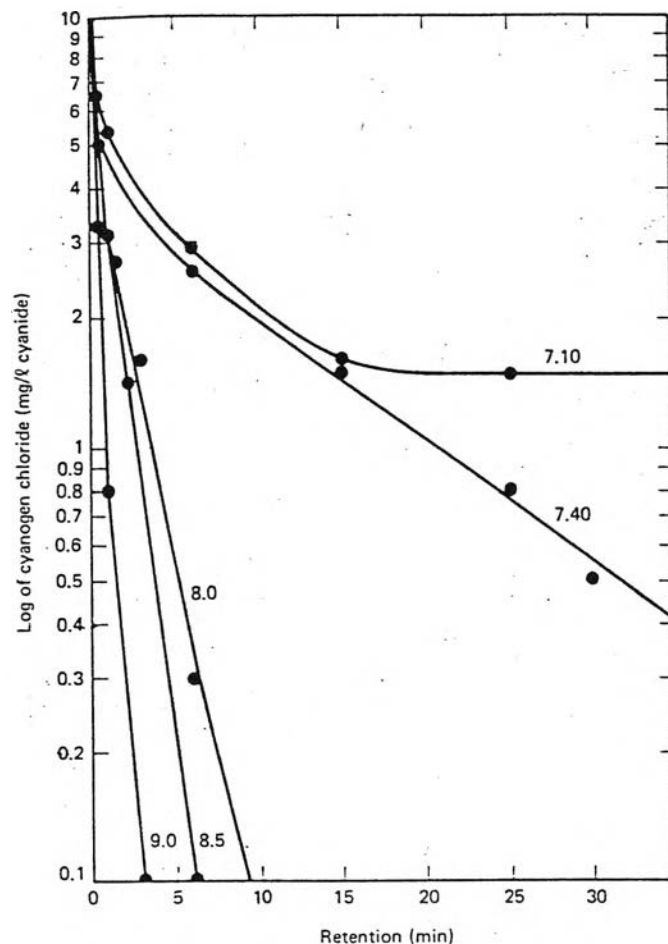
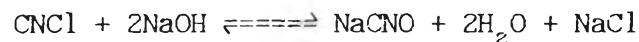
การทำลายไซยาไนด์ (CN^-) โดยใช้ก๊าซคลอรีน (Cl_2)

การทำงานของกระบวนการนี้จะแบ่งแยกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก ไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไซยาเนตโดยคลอรีน และในขั้นตอนที่สองจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ก๊าซไนโตรเจน โดยพีเอชจะต้องสูงกว่า 8.5 สำหรับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาอย่างละเอียดมีดังต่อไปนี้

ขั้นแรกไซยาไนด์จะถูกออกซิไดซ์โดยคลอรีนเป็นไซยาโนเจนคลอไรด์ ดังสมการ

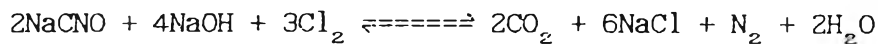


ซึ่งไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) เป็นสารระเหยและมีกลิ่นเหม็น แต่ถ้าอยู่ในสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีค่าพีเอชมากกว่า 8.5 จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นโซเดียมไซยาเนต (NaCNO) ภายใน 30 นาที ดังสมการด้านล่าง และผลกระทบบของพีเอชต่อปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ผลกระทบบของพีเอชต่อการเปลี่ยนไซยาโนเจนคลอไรด์ (CNCl) เป็นโซเดียมไซยาเนต (NaCNO) (Benefield และคณะ ,1982)

จากนั้นคลอรีนจะออกซิไดส์สารไซยาเนต ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ดังสมการ



เมื่อคำนวณทางทฤษฎี พบว่าในการกำจัดไซยาไนด์ 1 ส่วน ต้องใช้ก๊าซคลอรีน 6.82 ส่วน แต่เนื่องจากมีคลอรีนบางส่วนทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของไนโตรเจน ทำให้ต้องเพิ่มคลอรีนเป็น 7.35 ส่วน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์และปริมาณไฮดรอกไซด์ 9.23 ส่วน ในการกำจัดไซยาไนด์ 1 ส่วน ในการบำบัดสามารถทำได้ทั้งแบบเท (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous)

การทำลายไซยาไนด์ (CN^-) โดยใช้ไฮโปคลอไรท์ (OCl^-)

จากสมการเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.7 เมื่อคำนวณทางทฤษฎีพบว่า ในการกำจัดไซยาไนด์ 1 ส่วนต้องใช้ ไฮดรอกไซด์ไฮโปคลอไรท์ 7.16 ส่วน หรือใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ 6.87 ส่วน ในการบำบัดโดยวิธีนี้มักจะทำเป็นแบบเท โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. สูบน้ำเสียเข้าถัง
2. วัดปริมาณไซยาไนด์
3. เติมน้ำสารเคมีในปริมาณตามต้องการ เพื่อทำลายไซยาไนด์
4. กวนจนเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ โดยประมาณ 30 นาที
5. ทำการตรวจสอบปริมาณไซยาไนด์ ถ้าเกินค่าที่ยอมได้ให้ทำตามข้อ 3
6. ปล่อยน้ำเสียทิ้งไป

3.6 การรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก

ในการกำจัดโครเมียมประจุบวกหกโดยวิธีการตกผลึกทางเคมีนั้น จะต้องทำการเปลี่ยนจากโครเมียมประจุบวกหกไปเป็นโครเมียมประจุบวกสาม หลังจากนั้นจึงทำการตกผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ หรือ คาร์บอเนต สารเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดแสดงได้ดังตารางที่ 3.8

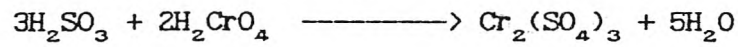
ในการรีดิวซ์โครเมียมประจุบวกหก ค่าพีเอชจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อย่างเช่น เมื่อใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ผลของพีเอชจะเป็นดังรูปที่ 3.9

ส่วนปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการกำจัดโครเมียมประจุบวกหก 1 มก./ล. ในทางทฤษฎี แสดงในตารางที่ 3.9 แต่ในทางปฏิบัติจะต้องใส่ประมาณ 2 เท่า เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์

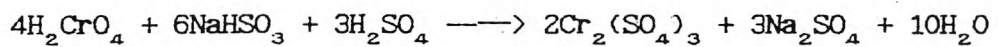
ค่าพีเอชที่เหมาะสมและการควบคุมด้วยค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) ของสารเคมีที่ใช้แต่ละตัวจะต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.8 สารเคมีและปฏิกิริยาที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียมบวกหก

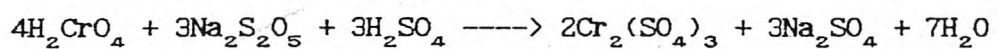
1. ใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)



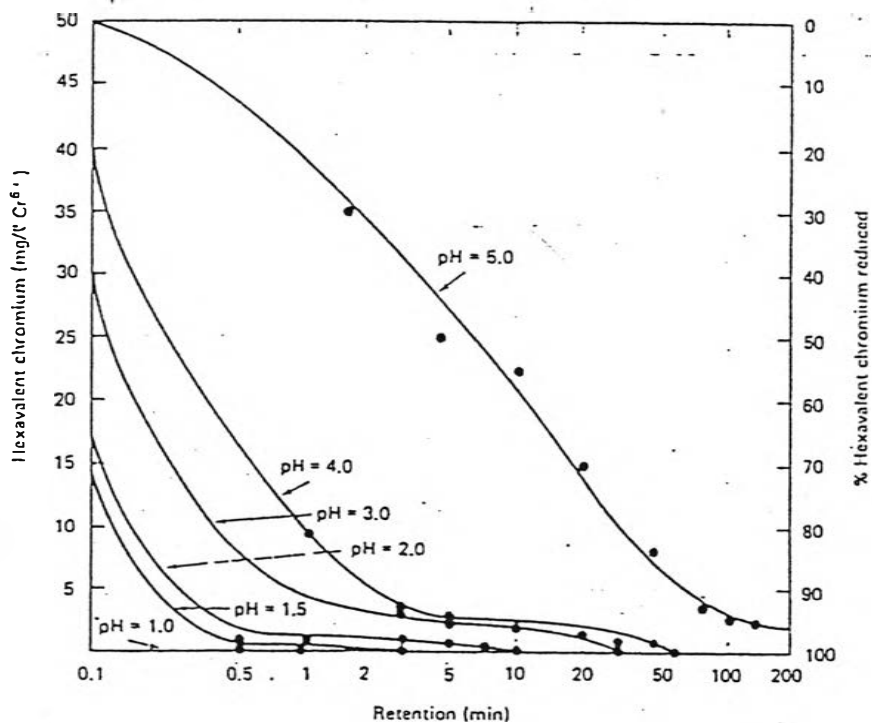
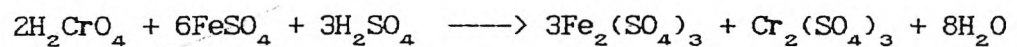
2. ใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3)



3. ใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)



4. ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4)



รูปที่ 3.9 ผลของพีเอชที่มีต่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมบวกหก (Benefield และคณะ, 1982)

ตารางที่ 3.9 แสดงปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีที่ต้องใช้ในการกำจัด
โครเมียมบวกทุก 1 มก./ล.

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ SO_2	โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	เฟอร์รัสซัลเฟต $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
1.85 mg/l	2.81 mg/l $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 97.5% 1.52 mg/l H_2SO_4	16.03 mg/l 6.01 mg/l H_2SO_4

ตารางที่ 3.10 แสดงค่าพีเอชและค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)
ของสารแต่ละตัว



สารเคมี	พีเอช	ORP (mV)	
		H electrode	calomel electrode
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	2.9	+165	-85
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	2.5	+130	+130
เฟอร์รัสซัลเฟต	2.0	+500	+250

ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมบวกทุกแบบเท (Batch) สามารถทำได้
ดังต่อไปนี้

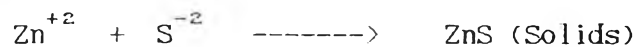
1. สูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา
2. วัดปริมาณโครเมียมบวกทุก
3. ใส่น้ำเสียด้วยกรด จนพีเอชมีค่าเหมาะสมตามตารางที่ 3.10
4. คำนวณปริมาณกรดที่ต้องใช้แล้วเติมลงไป
5. คำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ จากตารางที่ 3.9 แล้วเติมประมาณ 2 เท่าของค่าที่คำนวณได้
6. กวนน้ำเสียเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
7. ตรวจสอบปริมาณโครเมียมบวกทุกที่เหลือ หากเกินค่าที่ยอมรับได้ ให้เริ่มข้อ 5 ใหม่

8. น้ำเสียจะถูกส่งไปเพื่อบำบัดโครเมียมโดยการตกผลึกในรูปไฮดรอกไซด์

3.7 การตกผลึกทางเคมีของโลหะหนัก

การตกผลึกทางเคมี โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. การตกผลึกเนื่องจากการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง ในการกำจัดโลหะหนักก็อาจใช้หลักการนี้ได้เช่นกัน เช่น ในการกำจัดสังกะสีละลายน้ำ (Zn^{+2}) จะต้องเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งละลายน้ำได้ดี เกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก ดังสมการ



2. การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนสมดุลของการละลาย (Solubility equilibrium) ในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโลหะละลายจะต่ำลง และโลหะส่วนเกินจะอยู่ในรูปตะกอน สามารถจมตัวได้ดี เช่น ในการกำจัดสังกะสีนั้น สามารถตกผลึกในรูปไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการ



ที่สภาวะสมดุลค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบ $Zn(OH)_2$ หาได้ ดังสมการ

$$\begin{aligned} K_{sp} &= [Zn^{+2}][OH^{-}]^2 \\ &= 4.5 * 10^{-17} \end{aligned}$$

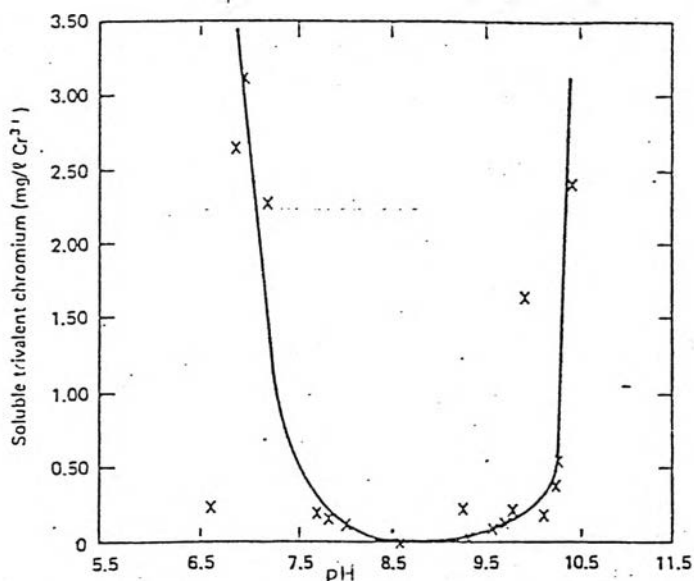
จะเห็นว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีละลายโดยตรง คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (โดยการเพิ่มพีเอช) จะทำให้เกิดการลดความเข้มข้นของสังกะสีละลายเพื่อรักษาสมดุล ความสามารถในการละลายของโลหะที่พีเอชต่างๆแสดงในรูปที่ 3.10 ถึงรูปที่ 3.12 ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบโลหะแสดงในภาคผนวก ค.

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ ปูนขาว และ โซดาไฟ

ปูนขาว (CaO) เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการตกผลึกในรูปหินปูน จะทำให้เกิดตะกอนสูง

โซดาไฟ ($NaOH$) เป็นสารเคมีราคาแพงกว่าปูนขาว เกิดอันตรายง่ายกว่าปูนขาว การใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าปูนขาว เกิดตะกอนน้อยกว่า

3. การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ จะเป็นการลดค่าความสามารถในการละลาย (K_{sp}) ให้น้อยลง วิธีนี้ไม่เหมาะสมในการใช้กำจัดโลหะหนัก

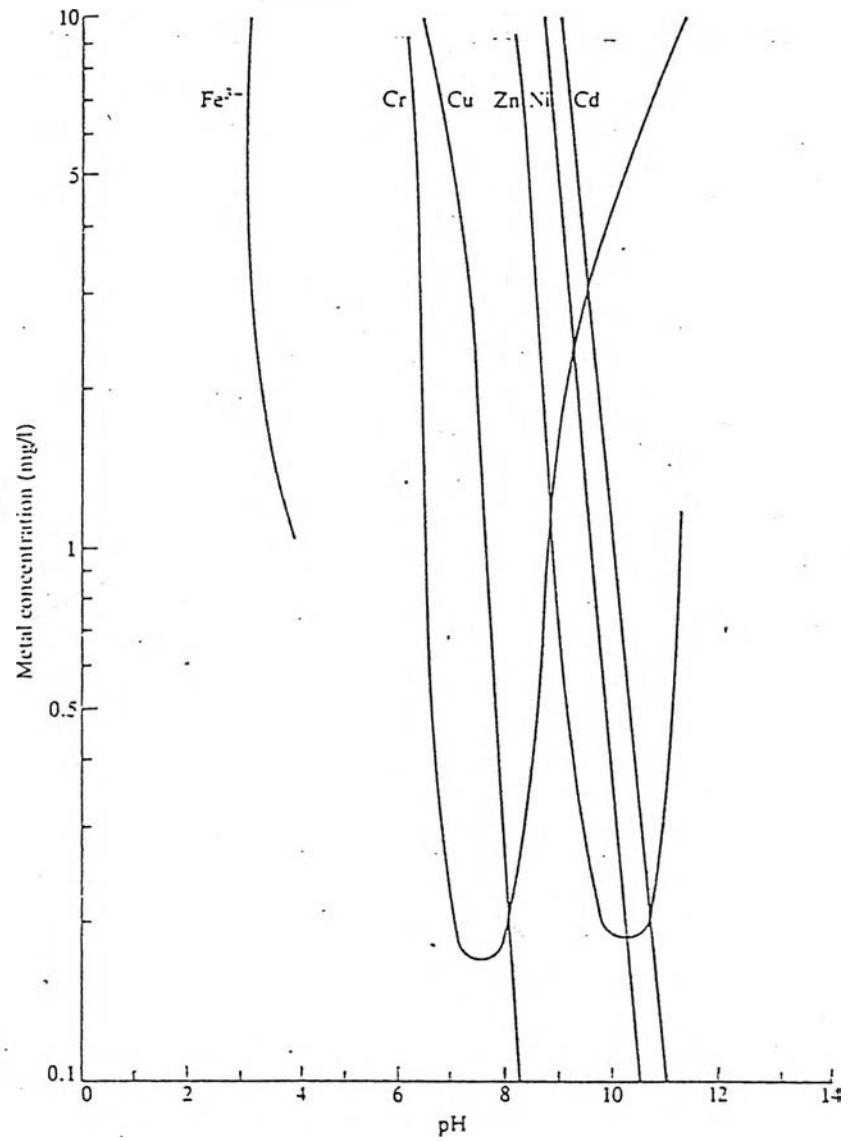


รูปที่ 3.10 ช่วงพีเอชสำหรับการกำจัดโครเมียมประจุบวกสาม (Benfield และคณะ ,1982)

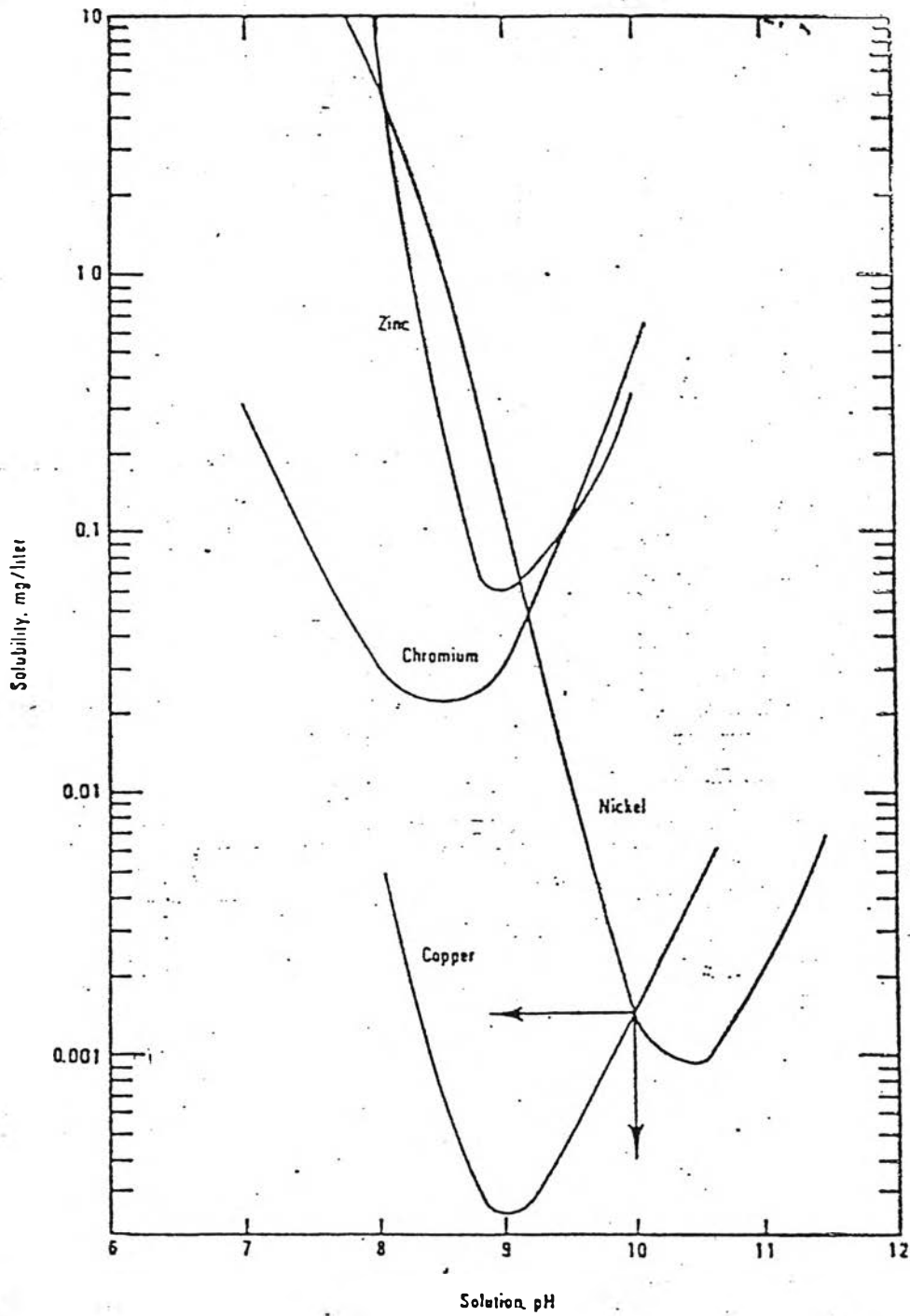
3.3 การแยกของแข็งออกจากน้ำ

หลังจากที่โลหะหนักที่ละลายน้ำถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแข็งแล้ว จำเป็นต้องมีการแยกออกก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยการปล่อยให้ตกตะกอนและการกรอง การตกตะกอน (Sedimentation) ตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบของโลหะหนักซึ่งเป็นตะกอนเคมีที่มีความสามารถในการตกตะกอนดีอยู่แล้ว โดยความสามารถในการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับขนาดของตะกอน ความหนืดของน้ำ อุณหภูมิ ความหนาแน่นของตะกอน และน้ำ

การกรอง (Filtration) หลังจากปล่อยให้ตะกอนของโลหะหนักตกตะกอนแล้ว จะยังคงมีตะกอนโลหะหนักบางส่วนที่มีขนาดเล็ก สามารถแขวนลอยในน้ำ และจะออกไปพร้อมกับน้ำทิ้งอาจทำให้คุณภาพของน้ำทิ้งเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีการกรองเอาของแข็งที่แขวนลอยนี้ออก เหนือในการแบ่งประเภทของการกรองมีหลายอย่างเช่น ชนิดของการไหล ชนิดและจำนวนชนิดของสารกรอง อัตราการกรอง ฯลฯ ในที่นี้จะถือเอาอัตราการกรองเป็นเกณฑ์ในการแบ่งโดยแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ซึ่งใช้ทรายเป็นสารกรอง คือ การกรองทรายเร็ว (Rapid sand filtration) และการกรองทรายช้า (Slow sand filtration) โดยมีข้อแตกต่างดังตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ
(Ecklenfelder, 1989)



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำ
ของ โลหะหนักต่างๆ (มันสัน, 2534)

ตารางที่ 3.11 แสดงความแตกต่างของการกรองทรายช้าและการกรองทรายเร็ว
(ไวไลลักษณ์, 2531)

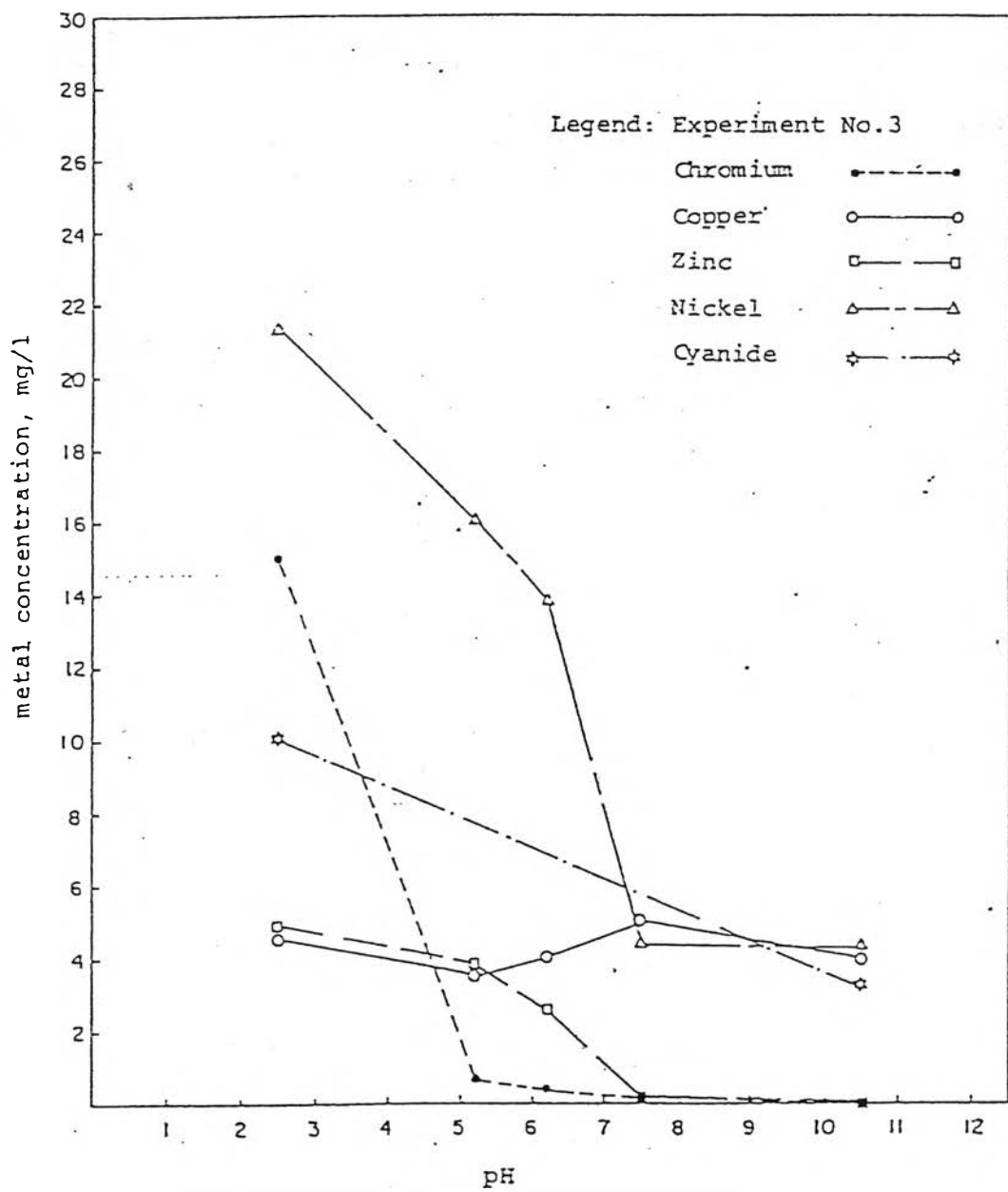
รายละเอียด	การกรองทรายช้า	การกรองทรายเร็ว
พื้นที่	ต้องการพื้นที่มาก	ต้องการพื้นที่น้อย
ปริมาณทรายกรอง	ต้องการปริมาณมาก	ต้องการปริมาณน้อย
คุณภาพทรายกรอง	ขนาดสัมฤทธิ์ 0.2-0.4 มม สปส. ความไม่สม่ำเสมอ 2-4	ขนาดสัมฤทธิ์ 0.36-0.6 มม สปส. ความไม่สม่ำเสมอ 1.2-1.8
ความหนา	0.6-1.2 ม.	1.45-0.75 ม.
คุณภาพน้ำดิบ	มีความขุ่นไม่เกิน 50 NTU	ต้องผ่านโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอนก่อน
ความยืดหยุ่นในการ ควบคุม	ไม่มี	มี
อัตราการกรอง	0.1-0.2 ม./ชม.	4-5 ม./ชม.
การกระจายสารกรอง	ขนาดเท่ากันหมด	ขนาดเล็กไปหาใหญ่จากบนลงล่าง
ความยากง่ายในการ ควบคุม	ควบคุมง่าย	ควบคุมยาก ต้องการผู้มีความรู้ และประสบการณ์สูง
อายุการใช้งาน	1-3 เดือน	24-48 ชั่วโมง
การทำความสะอาด	ชุดผิวหน้าออก 2-3 ชม.	ทำการล้างย้อน
การสูญเสียเข็ด	15-75 ซม.	2-4 ม.
ปริมาณน้ำที่ใช้ล้าง ทรายกรอง	0.2-0.6% ของน้ำที่กรองได้	2-4% ของน้ำที่กรองได้
ค่าใช้จ่ายในการ ก่อสร้าง	แพงเพราะต้องการพื้นที่ และวัสดุก่อสร้างมาก	ถูกและประหยัด
ค่าใช้จ่ายในการ บำรุงรักษา	น้อย	มาก

3.9 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดทางเคมีน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

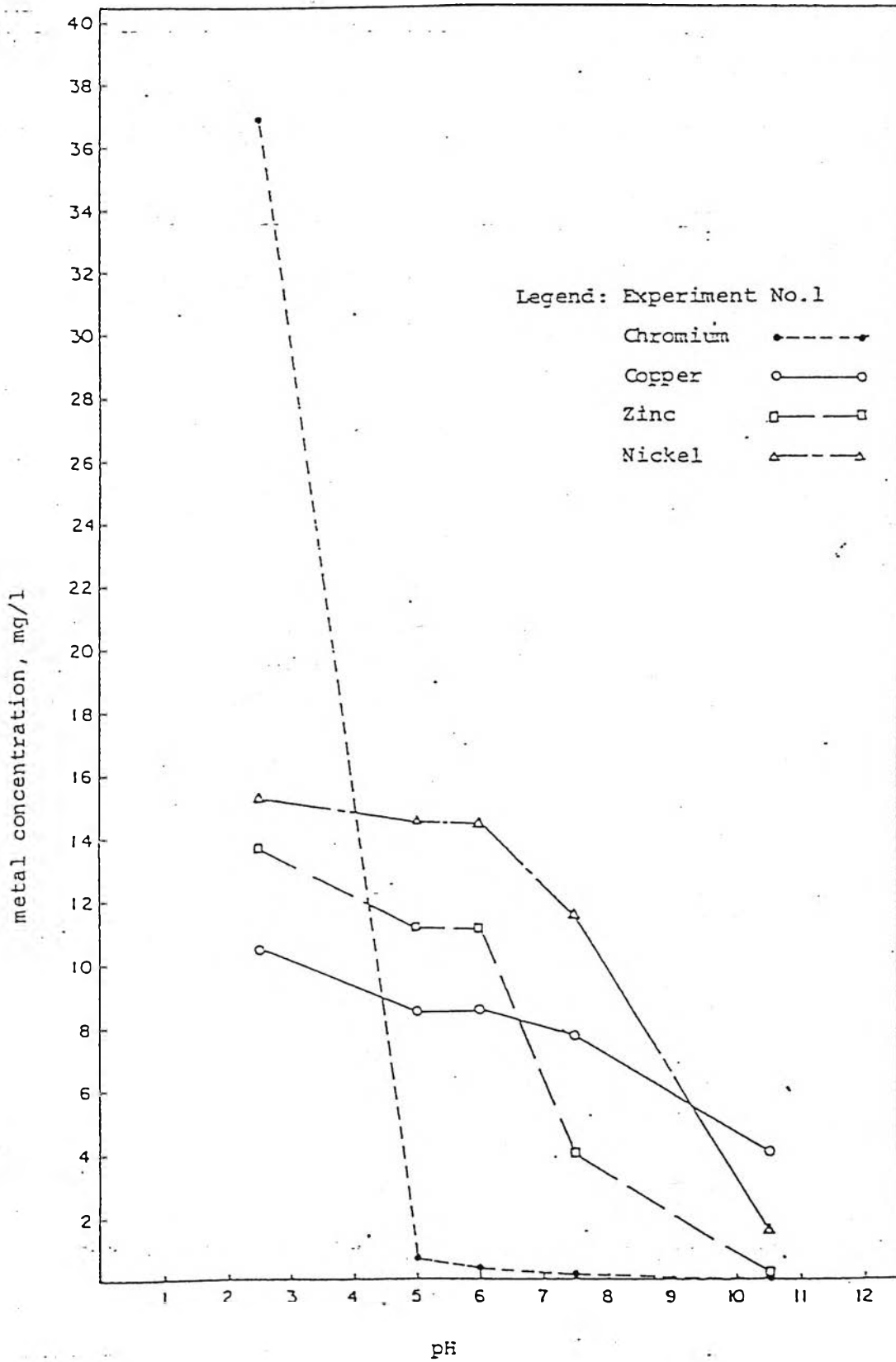
การศึกษาในประเทศไทย

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ,TISTR ,1982 ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักและไซยาไนด์ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ พบว่าการใช้ปูนขาวและโซดาไฟ ในการตกผลึกโลหะหนัก มีโลหะหนักเหลือภายหลังตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า การใช้ปูนขาวและโซดาไฟจะสามารถกำจัดโครเมียมและสังกะสีให้เหลือต่ำกว่ามาตรฐาน (0.5 และ 5 มก/ล.ตามลำดับ) แต่ไม่สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลให้เหลือต่ำกว่ามาตรฐาน (1.0 และ 0.2 มก/ล. ตามลำดับ) และได้เสนอวิธีในการบำบัดน้ำเสียดังรูปที่ 3.15 ส่วนปริมาณสารเคมีและค่าสารเคมีในการบำบัดแสดงได้ดังตารางที่ 3.12

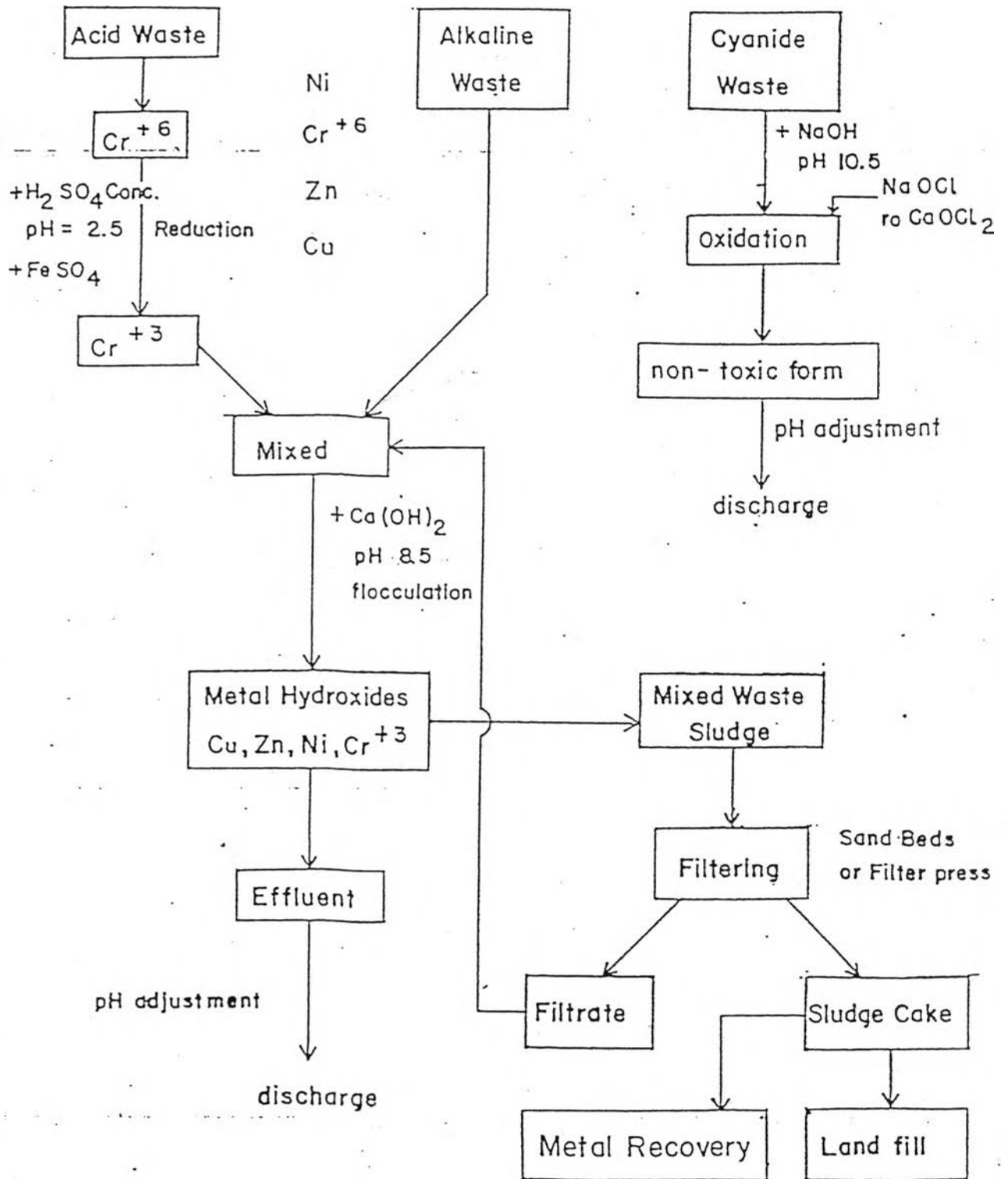
มงคล,2532 ได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสี โดยน้ำเสียแบ่งได้เป็น น้ำร้อนล้าง น้ำเย็นล้าง น้ำหล่อเย็น กรดโครมิกที่ใช้แล้ว สารละลายกรดและสารละลายต่างเข้มข้น โดยศึกษาและเปรียบเทียบ การบำบัดน้ำเสียรวมและน้ำเสียแยกโดยวิธีทางเคมีและฟิสิกส์ การทดลองใช้โซดาไฟ ปูนขาว และสารโพลิเมอร์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี และโครเมียม เปรียบเทียบการใช้โซเดียมเมตาซัลไฟท์ และเฟอร์รัสซัลเฟตในการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ให้เป็นโครเมียม (III) พบว่า การใช้ปูนขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียรวมและน้ำหล่อเย็นสูงกว่าโซดาไฟโดยมีพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 9.5 การใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ให้ประสิทธิภาพการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ในกรดโครมิกสูงกว่าเฟอร์รัสซัลเฟต โดยโครเมียม (VI) ถูกรีดิวซ์หมด เมื่อใช้ความเข้มข้น 1.75 เท่าของค่าทางทฤษฎี ในขณะที่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตที่ความเข้มข้น 2.0 เท่าของค่าทางทฤษฎี ยังมีโครเมียม(VI)เหลือเท่ากับ 0.75 มก/ล.และการใช้ปูนขาวให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ผ่านการรีดิวซ์สูงกว่าโซดาไฟ โดยมีค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 8.5 แต่การใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์และปูนขาวที่สภาวะที่เหมาะสมยังไม่สามารถกำจัดโครเมียมในกรดโครมิกได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.5 มก/ล. จำเป็นต้องมีการกรองทรายจึงจะสามารถกำจัดได้ตามมาตรฐาน การใช้สารโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.2-1.0 มก/ล. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำหล่อเย็นและน้ำเสียรวม แต่ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดกรดโครมิก เมื่อเปรียบเทียบค่าบำบัดน้ำเสียพบว่า การให้ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม ในการควบคุมของกระทรวงอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียรวมจาก น้ำร้อนล้าง น้ำเย็นล้าง น้ำหล่อเย็น และกรดโครมิก เสียค่าบำบัดต่ำสุด การแยกบำบัดน้ำหล่อเย็น จากน้ำร้อนล้าง และน้ำเย็นล้าง และแยกบำบัดกรดโครมิก โดยโรงงาน



รูปที่ 3.13 การตกตะกอนทางเคมีด้วยการควบคุมพีเอชโดยการใช้ปูนขาว
(TISTR, 1982)



รูปที่ 3.14 การตกตะกอนทางเคมีด้วยการควบคุมพีเอช โดยการใช้โซดาไฟ (TISTR. 1982)



รูปที่ 3.15 แผนผังแสดงการบำบัดน้ำเสียชุมชนโลหะ (IISTR, 1982)

ตารางที่ 3.12 ราคาสารเคมีในการตกตะกอนทางเคมี (TISTR, 1982)

Experiment No.	Plating-plant Wastes sample	Chemicals used				Cost, ฿/m^3				
		H_2SO_4 Conc. ml/m^3	FeSO_4 gm/m^3	NaOH gm/m^3	CaOCl_2 gm/m^3	H_2SO_4 (2)	FeSO_4 (3)	NaCl (4)	CaOCl_2 (5)	Total
1	Thajaroen	333.33	556.67	172.2	-	5.03	5.567	2.50	-	13.50
2	Thajaroen	142.06	457.14	240.0	95.71	2.5	0.571	3.6	3.54	10.21
3	Thajaroen (6)	162.5	425.0	500 ⁽¹⁾	147.5	2.04	4.25	1.0 ⁽¹⁾	5.46	13.55 ⁽¹⁾
4	Thajaroen (6)	250.0	500.0	153.33	133.33	4.375	5.0	2.30	4.93	16.61
5	Jintanasuvan	1,000.0	656.67	531.67	233.33	17.5	6.57	7.90	0.63	40.60
6	Sermasrapad	30.75	450.0	356.25	150.0	0.60	4.50	5.34	5.55	16.07
7	Golden Lamp Co.	-	-	4,033.33	-	-	-	60.50	-	60.50
8	D. Bunnag	1,320.75	2,000.0	1,301.07	-	23.11	20.0	19.53	-	62.64
9	T. Patanakarnkol	2,356.67	456.67	3,300.33	200.0	41.24	4.57	49.62	7.4	102.03
10	Parnsiam	676.67	1,656.67	1,333.33	500.0	11.04	16.57	20.0	10.5	66.91
11	Patchkhaem	55.0	-	174.20	114.20	0.96	-	2.61	4.23	7.80
12	Sang-sawang	1,704.6	14,780.0	2,600.0	670.0	31.23	147.0	39.0	24.79	242.02
13	Kitjaroen	1,170.0	600.0	2,620.0	240.0	20.40	6.0	39.3	0.00	74.66
14	Vorasakkarnchub	311.0	11,000.0	1,150.0	-	5.44	110.0	17.25	-	140.69
15	Jongnam	745.0	9,800.0	1,900.0	670.0	13.04	90.0	29.7	24.79	165.53
	Average	739.1	3,426.0	1,425.0 500 ⁽¹⁾	206.7	12.93	34.26	21.30 1.0 ⁽¹⁾	10.61	79.10 14.55 ⁽¹⁾

- Remarks :
- (1) Lime, commercial grade, 2 ฿/kg .
 - (2) H_2SO_4 conc., commercial grade, 17.5 ฿/l .
 - (3) FeSO_4 , commercial grade, 10 ฿/kg .
 - (4) NaCl , commercial grade, 15 ฿/kg .
 - (5) CaOCl_2 , commercial grade, 37 ฿/kg .
 - (6) Same sample collected on Mar. 1, 1982



เป็นผู้บำบัดเอง เสียค่าบำบัดสูงกว่า และการบำบัดน้ำเสียรวม จากน้ำร้อนล้าง น้ำเย็นล้าง น้ำหล่อเย็น และการแยกบำบัดกรดโครมิก โดยโรงงานเป็นผู้บำบัดเอง เสียค่าบำบัดแพงสุด

การศึกษาในต่างประเทศ

Patterson, 1985 ได้รวบรวมประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและไซยาไนด์ไว้ดังต่อไปนี้

การกำจัดไซยาไนด์ ความเข้มข้นของไซยาไนด์ในอุตสาหกรรมชุบโลหะ แสดงในตารางที่ 3.13 การกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธี Alkaline Chlorination มักควบคุมพีเอชมากกว่า 10 และเวลาการเกิดปฏิกิริยานาน 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง และประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์ด้วยวิธีต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.14 จะเห็นว่าแหล่งอ้างอิงบางแหล่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดไซยาไนด์สูง ค่าไซยาไนด์หลงเหลือต่ำกว่ามาตรฐาน แต่บางแหล่งค่าไซยาไนด์หลงเหลือเกินมาตรฐาน (0.2 มก/ล.)

การกำจัดโครเมียมประจุบวกหก ประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.15 จะเห็นว่า การกำจัดโดยใช้กาซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ค่าโครเมียม(VI) ที่เหลือมีค่าต่ำกว่า 0.5 มก/ล. แต่บางรายงานมีค่าสูงกว่า การกำจัดโดยใช้เมตาไบซัลไฟท์ ค่าโครเมียม (VI) ที่เหลือมีค่าต่ำกว่า 0.5 มก/ล. ส่วนการใช้ไบซัลไฟท์หรือเพอร์ร็อกซัลเฟต ค่าโครเมียม (VI) ที่เหลือมีค่าต่ำกว่า 0.5 มก/ล. แต่บางรายงานมีค่าสูงกว่า

การกำจัดโครเมียมประจุบวกสาม จะตกผลึกได้ดีโดยในช่วงพีเอช 8.5-9.5 จะมีค่าโครเมียมละลายต่ำกว่ามาตรฐาน (0.5 มก/ล) แต่อย่างไรก็ตามบางรายงานกล่าวว่า จำเป็นต้องมีการกรองเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.16 จะเห็นว่า มีรายงานว่าโครเมียมที่เหลือมีทั้งต่ำกว่าและเกินมาตรฐาน

การกำจัดทองแดง ความเข้มข้นของทองแดงจะอยู่ในช่วง 3-50 ก/ล. โดยน้ำล้างหลังชุบ (Rinse water) มักจะมีค่าทองแดงอยู่ในช่วง 0.02-1.0 % ประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.17 และตารางที่ 3.18 จากตารางที่ 3.17 จะเห็นว่าทองแดงในช่วง 50-1000 มก/ล. หลังบำบัดจะมีค่าทองแดงละลายต่ำกว่า 0.01 และ 6 มก/ล. (น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำล้างหลังชุบ) แต่เมื่อมีไซยาไนด์ปน มีค่าทองแดงละลายต่ำกว่า 0.05 มก/ล. (น้ำเสียสังเคราะห์) มีค่าทองแดงละลายต่ำกว่า 7.0 มก/ล. (น้ำล้างหลังชุบ)

ตารางที่ 3.13 ความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำเสียชุบโลหะ
(Patterson, 1985)

<i>Process</i>	<i>Average (mg/l)</i>	<i>Range (mg/l)</i>	<i>Reference</i>
Plating rinse	2	0.3-4	2
	700		3
		10-25	4
	32.5		5
	25		6
		60-80	7
		30-50	8
	3		9
	55.6	1.4-256	2
	Bright dip		15-20
Alkaline cleaning bath		4,000-8,000	8
Plating Bath	30,000		10
Plating Bath		45,000-100,000	11
Plating Bath			
Brass		16,000-48,000	8,12-14
Bronze		40,000-50,000	
Cadmium		20,000-67,000	
Copper		15,000-57,000	
Silver		12,000-60,000	
Tin-zinc		40,000-50,000	
Zinc		4,000-64,000	

ตารางที่ 3.14 ตารางรวบรวมวิธีและผลการกำจัดไซยาไนด์โดยวิธีต่างๆ
(Patterson, 1985)

<i>Treatment Process</i>	<i>Cyanide Concentration (mg/l)</i>		<i>Percent Removal</i>	<i>Reference</i>
	<i>Initial</i>	<i>Final</i>		
Alkaline chlorination ^a	28 (avg)	2.0	92.9	25
	—	1.7	—	66
	—	0.1	—	40
Alkaline chlorination ^b	—	0.4	—	10
	700	0.0	100	3
	32.5	0.0	100	5
	1.3	0.25	80.7	67
Alkaline chlorination ^c	—	0.6	—	67
	5.1	0.1	98	44
Ferro-ferrocyanide precipitation	—	5-10	—	46
Electrolytic decomposition	45,000-			
	100,000	0.1-0.5	99.99+	11
Electrolytic decomposition	20	0.5	97.5	50
Ozonation	25	0.0	100	7
Kastone process	350-400	0.3	99.9+	52

^a Single-stage chlorination.

^b Two-stage chlorination.

^c High-pH, high-temperature process.

ตารางที่ 3.15 สรุปการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมประจุบวกหก
(Patterson, 1985)

<i>Treatment Process</i>	<i>Chromium (VI) Concentration (mg/l)</i>		<i>Reference</i>
	<i>Initial</i>	<i>Final</i>	
Reduction			
Sulfur dioxide	100	<0.05	5
	—	0.3-1.3	39
	—	1.0	41
	1,300	"zero"	22
	—	0.01	42
	—	0.05	43
	0.23-1.5	0.1	44
Bisulfite	140	0.7-1.0	27
	—	0.05-0.1	49
	450-688	<0.10	24
	10.4	<0.005	16
Bisulfite plus hydrazine	8-20.5	0.1	29
Metabisulfite	70	0.5	32
	—	0.025-0.05	100
	—	0.1	53
	—	0.001-0.4	54
Ferrous sulfate	—	1.0	57
Ferrous sulfate (waste pickle liquor)	1,300	0.01	4
Ion exchange	—	0.023	83
	—	0.025	84
	8-10.7	0.0-0.09	33
Cementation	16.3	0.09	60
Electrolytic (DC-12V, Carbon bed)	100-200	<1.0	58
Activated carbon	0.09-0.19	0.017 (avg)	92
	5.0	0.017 (avg)	94
	100-820	0.006-0.087	28
		5.05-195	
Freeze concentration	100	0.225	99

ตารางที่ 3.16 สรุปการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมประจุบวกสาม
(Patterson, 1985)

Method	pH	Chromium (mg/l)		Reference
		Initial	Final	
Precipitation	—	—	0.75	5
	8.8	650	18	28
	12.2	650	0.3	28
	7-8	140	1.0	33
	—	1,300	0.06	34
Precipitation	8.5	7,400	1.3-4.6	37
With sand filtration	8.5	7,400	0.3-1.3	37
Precipitation	—	2.2	0.02	40
Precipitation	7.8-8.2	16.0	0.06-0.15	10
	8.5-10.5	26.0	0.44-0.86	49
	—	11.75	2.50	16
	8.8-10.1	—	0.6-30	50
	8.5	47-52	0.3-1.5	13
	—	164	1	18
Precipitation	9.8-10.0	49.4	0.17	24
With filtration	9.8-10.0	49.4	0.05	24
Electrocoagulation	—	15-60	5-4	11
Microflotation	—	5-10	1	14
Electrolysis	—	2.1	0.1	16
Alum coagulation	—	—	—	—
Filtration	6.4	0.7	0.017	51
Followed by carbon absorption	—	—	0.006	51

ตารางที่ 3.17 ความสามารถในการละลายและพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน
ทางเคมีน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม (Patterson, 1985)

Initial Copper Concentration (mg/l)	Freshly Prepared CuSO_4 Solution*		Diluted CuSO_4 Plating Bath	
	Opt. pH	Min. Cu	Opt. pH	Min. Cu
1,000	10.5	0.008	10.0	0.06
500	10.5	0.008	10.0	0.04
200	10.5	0.008	10.0	0.02
50	10.5	0.003	10.0	0.01
Initial Copper Concentration (mg/l)	Freshly Prepared $\text{Cu}(\text{CN})_2$ Solution*		Diluted $\text{Cu}(\text{CN})_2$ Plating Bath	
	Opt. pH	Min. Cu	Opt. pH	Min. Cu
1,000	11.7	0.05	13.0	7.0
500	12.0	0.02	12.5	1.2
200	12.0	0.012	12.0	0.06
50	11.5	0.001	12.0	0.02

* Cyanide not initially present for CuSO_4 solutions, and destroyed by two-stage alkaline chlorination for $\text{Cu}(\text{CN})_2$ solutions.

การกำจัดตะกั่ว ผลกระทบของพีเอช แสดงในตารางที่ 3.19 ค่าพีเอช 7.1-8.5 ค่าตะกั่วละลายจะต่ำกว่า 0.2 มก/ล. แต่ค่าตะกั่วหลังตกตะกอนเกิน 0.2 มก/ล. ทุกค่าพีเอช และประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.20 รายงานว่าตะกั่วที่เหลือมีทั้งต่ำกว่าและเกินมาตรฐาน (0.2 มก/ล.)

การกำจัดนิเกิล ผลกระทบของพีเอชต่อความสามารถในการละลายแสดงในตารางที่ 3.21 เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิเกิล 96 มก/ล. พบว่า พีเอชในช่วง 11.6-12.0 จะมีค่านิเกิลละลายต่ำกว่า 0.2 มก/ล. ในขณะที่น้ำล้างจากการชุบโลหะ เมื่อมีค่านิเกิลเริ่มต้น 110 มก/ล. พบว่า พีเอชในช่วง 10.0-11.0 จะมีค่านิเกิลละลายต่ำกว่า 0.2 มก/ล. และประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.22 จะเห็นว่าค่านิเกิลจะมีค่าเกินมาตรฐานเมื่อไม่มีการกรองก่อนทิ้ง

การกำจัดสังกะสี ประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.23 ค่าสังกะสีภายหลังการบำบัดส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (5 มก/ล.)

ตารางที่ 3.18 ผลการบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบทองแดง (Patterson, 1985)

Wastewater Source	pH		Copper (mg/l)	
	Initial	Final	Initial	Final
Chrome-plating rinse	2.0	9.5	33.6	<0.05
Nickel-plating rinse	7.4	8.0	2.1	<0.05
Zinc-plating rinse	9.4	11.5	16.8	2.97

ตารางที่ 3.19 ผลของพีเอชต่อการบำบัดตะกั่ว (Patterson, 1985)

Settled Supernatant [50]		Soluble Concentration [51]		
pH	Lead (mg/l)	pH	Lead ^a (mg/l)	Lead ^b (mg/l)
5.2	107	—	—	—
—	—	6.3	24.6	1.30
—	—	6.6	1.10	—
7.1	37	7.1	—	0.035
—	—	7.4	0.131	0.025
—	—	7.6	—	0.040
8.0	11.9	8.5	0.055	0.075
9.2	10.7	9.4	0.215	4.10
10.5	2.9	10.5	0.150	—
10.8	1.5	10.8	—	8.36
11.0	4.2	—	—	—
11.6	8.9	—	—	—

^a Inorganic carbon less than 2 mg/l.

^b Inorganic carbon is 3-5 mg/l.

ตารางที่ 3.20 สรุปวิธีการและประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว
(Patterson, 1985)

Treatment Process	Treatment pH	Lead Concentration (mg/l)	
		Initial	Final
Ion exchange	5.0-5.2	0.1	0.01
Ion exchange*	—	0.055	0.0015
	—	126.7-144.8	0.020-0.053
Lime + sedimentation	8.3	11.7	0.27
	7.1	0.91	0.19
	8.2	1.2	0.15
	—	30	1
	—	6.5	0.1
	—	0.31	0.1
Lime + 8-hr sedimentation	7.7	98	39
Lime + 30-hr sedimentation	6.8	—	0.48
Caustic + 1-hr sedimentation	5.5	—	1.6
Caustic + 24-hr sedimentation	7.0	—	0.04
Ammonium hydroxide	7.8	—	23.9
Lime + ferric sulfate + sedimentation + filtration*	10.0	5.0	0.25
			0.029
Lime + sedimentation + filtration*	11.5	5.0	0.20
			0.019
	9.5	0.9-4.6	0.11-0.21
	9.5	0.9-4.6	0.10-0.17
Caustic + soda ash*	9.0-9.5	5.0	0.01-0.03
Sodium carbonate + filtration*	6.4-8.7	10.2-70.0	0.2-3.6
Sodium phosphate + filtration*	7.2-7.5	3.0-5.0	0.2-0.6
Ferric sulfate + sedimentation + filtration*	6.0	5.0	0.25
	6.0	5.0	0.03
Ferrous sulfate + sedimentation	10.4-10.8	45	1.7

* Pilot-plant results.

ตารางที่ 3.21 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการละลายของนิกเกิล
(Patterson, 1985)

Treatment pH	Nickel Concentration (mg/l)					
	I	II	III	IV	V	VI
6.0	—	93.0	—	—	—	—
7.0	—	77.0	7.4	16.2	—	0.85
7.3-7.5	83.0	—	—	—	—	0.65
8.0	—	47.7	6.7	10.0	4.13	0.47
8.4-8.5	75.0	—	—	—	3.74	0.25
9.0	69.0	—	—	—	2.48	0.13
10.0	—	0.20	1.60	0.70	2.58	0.12
11.0	0.40	0.12	—	—	4.13	0.12
11.6-12.0	<0.10	—	—	—	—	0.10

- I. Synthetic wastewater [37], initial concentration = 96 mg/l.
 II. Plating rinsewater [11], initial concentration = 110 mg/l.
 III. Copper sulfate manufacturing waste, treated with caustic [22], initial concentration = 22 mg/l.
 IV. Same as II], treated with lime [22].
 V. Chlor-alkali wastewater [22], initial concentration not reported.
 VI. Titanium dioxide wastewater [22], initial concentration = 1.3 mg/l.

ตารางที่ 3.22 สรุปผลการตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียโรงงานชุบนิเกิล
(Patterson, 1985)

Source	Treatment pH	Nickel Concentration (mg/l)		Comments	Reference
		Initial	Final		
Plating	—	46	0.8		6
	8.8	5.6	0.6		34
	—	7.7	2.5		9
Mixed plating	5.5-10.1	16.3	1.0		13
	9.4-10.2	5.7	2.5	Poor solids removal	13
	8.5	35	1.00	Clarification only	12
			0.75	Filtration	
	10.0	35	0.04	Clarification only	
Tableware plating	—	21	0.09-1.9	FeCl ₃ + sand filtration	15
	12.0-12.5	85-140	<0.5	High pH, lime, polymer	14
Electroless plating	11.6-12.0	51.9	0.1		14
Steel pickle rinse	—	5-10	2.0		20
Stainless steel pickle rinse	8.5-9.2	9.5	<0.1		21
Nonferrous metal works	8.5-9.0	—	0.05-0.13		38
	8.1	—	15		39
Appliance manufacturing	—	35	0.4		16
Office machine manufacturing	—	39	0.17	Polymer	40
Record changer manufacturing	—	—	0.1-0.2		41
Mixed boiler wastes	8.2-8.6	15-30	<0.1		30
	11.2-11.8	15-30	<0.1		30
Copper sulfate manufacture	—	159	<0.5	Sand filtration	35
Nickel sulfate manufacture	10.2	12.2	3.0	Sand filtration	35

ตารางที่ 3.23 สรุปการตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียโรงงานชุบสังกะสี
(Patterson, 1985)

<i>Industrial Source</i>	<i>Zinc Concentration (mg/l)</i>		<i>Comments*</i>	<i>Reference</i>
	<i>Initial</i>	<i>Final</i>		
Zinc plating	—	0.2–0.5	pH 8.7–9.3	46
General plating	18.4	2	pH 9.0	47
	—	0–6	sand filtration	48
	55–120	1.0	pH 7.5	10
	4.1	0.39		49
	46	2.9	pH 8.5	14
		1.9	pH 9.2	
		2.8	pH 9.5	
		2.9	pH 10.5	
Vulcanized fiber	100–300	1.0	pH 8.5–9.5	23
Brass wire mill	36–374	0.08–1.60	integrated treatment for copper recovery	5
Tableware plant	16.1	0.02–0.23	sand filtration	2
Viscose rayon	20–120	0.88–1.5		20
	70	3–5	pH 5	50
	20	1.0		19
Metal fabrication	—	0.5–1.2	sedimentation	51
		0.1–0.5	sand filtration	
Radiator manufacture	—	0.33–2.37	sedimentation	52
		0.03–0.38	sand filtration	
Blast furnace gas scrubber water	50	0.2	pH 8.8	53
Zinc smelter	744	50		42
	1,500	2.6		42
Ferroalloy wastes	11.2–34	0.29–2.5		26
	3–89	4.2–7.9		26
Ferrous foundry	72	1.26	sedimentation	38
		0.41	sand filtration	
Deep coal mine—acid waters	33–7.2	0.01–10		1

* All treatment involved precipitation plus sedimentation. Special or additional aspects of treatment are indicated under *Comments*.

3.10 ข้อมูลเกี่ยวกับการให้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ (สำนักงานบริการและการกำจัดกากอุตสาหกรรม, 2531)

1. ความเป็นมา ในปี พ.ศ. 2528 กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้รับอนุมัติงบประมาณเพื่อจัดซื้อที่ดินที่แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน 65 ไร่ เพื่อตั้งเป็นศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำและก่อสร้างสำเร็จจุลวง เปิดบริการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 โดยศูนย์ฯ ตั้งอยู่บริเวณกิโลเมตรที่ 14-15 ถนนสาทรบุรี-ปากท่อ แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร

2. ความสามารถในการกำจัดสารพิษ ทางศูนย์ฯ สามารถให้บริการได้เต็มที่ดังนี้

1. บำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
2. บำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
3. ทำลายฤทธิ์กากตะกอนหรือของแข็ง 100 ตันเป็ยกต่อวัน

3. ค่าบริการ ศูนย์ฯจะดำเนินการโดยเอกชนผู้ประมูลเข้า (สัญญาเช่า 5 ปี) โดยมีรัฐเป็นผู้ควบคุมราคาค่าบริการ โดยใช้หลักเกณฑ์ ดังนี้

1. ค่าขนส่งของเสียจากโรงงานไปยังศูนย์คิดราคาต่อหน่วยน้ำหนักและระยะทาง (บาท/ตัน-กม.)
2. ค่าบำบัดกากของเสียที่ศูนย์ คิดเป็นราคาต่อน้ำหนัก (บาท/ตัน) แยกตามชนิดประเภท ซึ่งแปรตามวิธีการกำจัด สารเคมีและพลังงานที่ใช้
3. ค่าขนส่งกากที่ผ่านการกำจัดและทำลายฤทธิ์แล้ว จากศูนย์ฯ ไปฝังที่ราชบุรี คิดเป็นราคาต่อหน่วยน้ำหนักและระยะทาง (บาท/ตัน-กม.)
4. ค่าจัดการฝังที่ราชบุรีคิดเป็นราคาต่อหน่วยน้ำหนัก (บาท/ตัน)

จากหลักเกณฑ์ข้างต้น เอกชนผู้ดำเนินการสามารถคิดค่าบริการสูงสุดไม่เกินค่าที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.24

4. การประเมินค่าใช้จ่ายในการให้บริการบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ จากตารางที่ 3.24 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ที่แสดงค่าใช้จ่ายที่โรงงานจะต้องรับภาระดังนี้

4.1 โรงงานที่มีน้ำเสียประเภทที่ 1 (น้ำเสียที่ไม่มีโครเมียมและโซยาไนต์ปนกัน)

$$\text{ค่าใช้จ่าย(บาท/วัน)} = K_1 QD + K_2 Q + K_3 * 150 * 0.03Q + K_4 * 0.03Q$$

4.2 โรงงานที่มีน้ำเสียประเภท 2 (น้ำเสียที่มีทั้งโครเมียมและโซยาไนต์)

$$\text{ค่าใช้จ่าย (บาท/วัน)} = K_1 QD + 2 * K_2 Q + K_3 * 150 * 0.03Q + K_4 * 0.03Q$$

โดย Q = ปริมาณน้ำเสีย

D = ระยะทางไป-กลับ ระหว่างศูนย์กับโรงงาน(กม.)

K_1 = ค่าขนส่งจากโรงงานไปศูนย์ (1 บาท/ตัน-กม.)

K_2 = ค่าบำบัดที่ศูนย์ (45 บาท/ตัน)

K_3 = ค่าขนส่งจากจากศูนย์ไปราชบุรี (2 บาท/ตัน-กม.)

K_4 = ค่าจัดการฝังที่ราชบุรี (100 บาท/ตัน)

150 = ระยะทางเป็นกม. จากศูนย์ไปยังราชบุรี

0.03 = ปริมาณของแข็งจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

Assume = ความหนาแน่นของน้ำเสียประมาณ 1



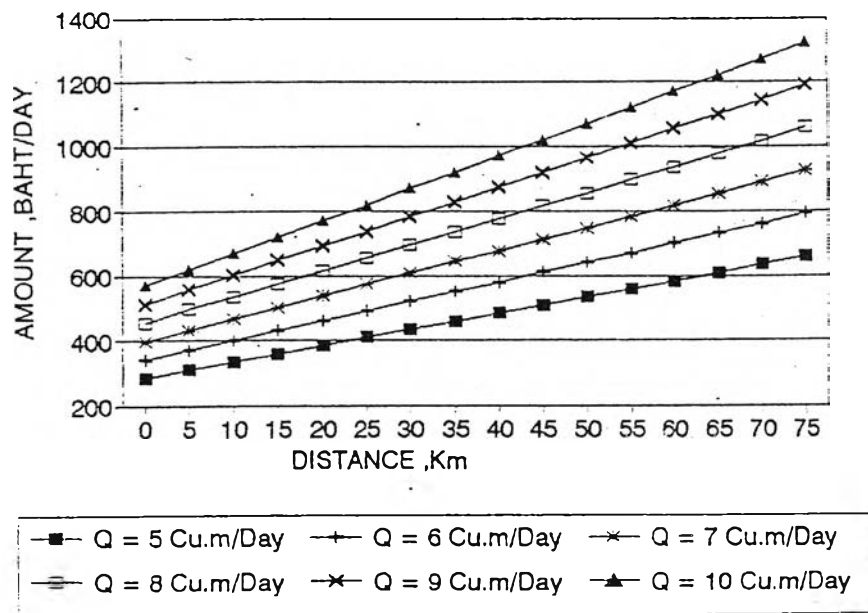
ตารางที่ 3.24 ค่าบริการสูงสุดที่เอกชนผู้ดำเนินการสามารถเก็บจากโรงงาน

ชนิดของเสีย	ค่าขนส่งจากโรงงานไปศูนย์ (บาท/ตัน-กม.)	ค่าบำบัดที่ศูนย์ (บาท/ตัน)	ค่าขนส่งจากจากศูนย์ไปราชบุรี (บาท/ตัน-กม.)	ค่าจัดการฝังที่ราชบุรี (บาท/ตัน)
1. น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	1	45	2	100
2. น้ำเสีย โรงงานฟอกย้อม	1	45	-	-
3. กากปรอท	2	450	2	100
4. กากตะกอน	1	450	1	100
5. กากอื่นๆ	2	450	2	100

จากสมการคำนวณค่าใช้จ่ายดังกล่าวสามารถแสดงได้รูปที่ 3.16 และ 3.17

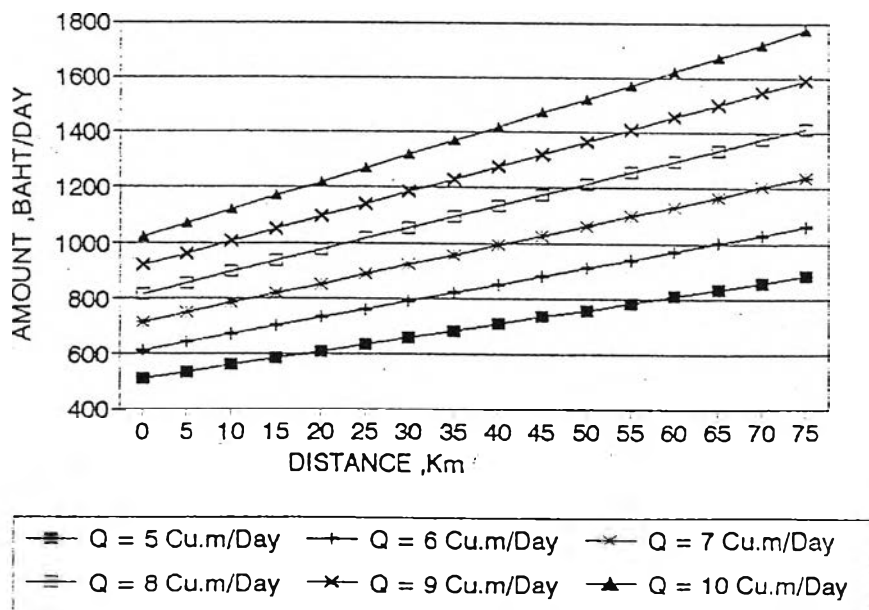
5. ศูนย์บริการกำจัดกากแห้งอื่น นอกจากศูนย์บริการกำจัดกากผสมคั่วแล้ว ทางสำนักงานบริการและกำจัดกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้มีแผนที่จะดำเนินการจัดสร้างศูนย์บริการกำจัดกากรังสี ระยะเวลา และสมุทรปราการต่อไป

COST OF WASTE TREATMENT (TYPE I) CENTRAL TREATMENT SERVICE



รูปที่ 3.16 ค่าใช้จ่ายในการใช้บริการศูนย์บริการกำจัดกากแสมดำ เมื่อน้ำเสียเป็นประเภทที่ 1 (ไม่มีไซยาไนด์ปนกับโครเมียม)

COST OF WASTE TREATMENT (TYPE II) CENTRAL TREATMENT SERVICE



รูปที่ 3.17 ค่าใช้จ่ายในการใช้บริการศูนย์บริการกำจัดกากแสมดำ เมื่อน้ำเสียเป็นประเภทที่ 2 (มีไซยาไนด์ปนกับโครเมียม)

3.11 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาทางเลือกที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการนั้น จะแบ่งแยกออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้ คือ (จันทนาและศิริจันทร์, 2534)

- ความเป็นไปได้ในทางวิศวกรรม
- ความเป็นไปได้ในทางบริหาร
- ความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

ก่อนมีการทำโครงการจะต้องผ่านการศึกษาความเป็นไปได้ตามลำดับ ถ้าขาดอันใดอันหนึ่งก็จะทำให้โครงการนั้นไม่สามารถดำเนินการได้ งานบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมก็จำเป็นต้องมีการพิจารณาตามข้างต้นเช่นกัน โดยความเป็นไปได้ในทางวิศวกรรมและทางบริหารนั้นจะมีความเป็นไปได้อยู่แล้ว และในเชิงวิศวกรรมน้ำเสียสามารถดำเนินการได้หลายทาง ข้อสรุปของโครงการจะอยู่ที่ความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการเทียบว่าทางเลือกใดก่อให้เกิดผลตอบแทนสูงสุด หรือในกรณีที่มีแต่ค่าใช้จ่าย ซึ่งจำเป็นต้องจ่ายก็จะเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดจะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายต่ำสุด ซึ่งหมายถึงกำไรสูงสุดของการประกอบการ ในกรณีของโรงงานชุบโลหะขนาดกลางและขนาดเล็ก เมื่อติดตั้งรับบำบัดน้ำเสียภายในโรงงานก็จะมีแต่ค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น ดังนั้นจะกล่าวถึงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุดของทางเลือกต่าง ๆ

ศัพท์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม มีดังนี้ (พิชัย, 2532)

- เงินลงทุน (Costs) ค่าใช้จ่ายต่างๆของโครงการ เช่น ค่าก่อสร้าง ค่าไฟฟ้า ฯลฯ
- ผลตอบแทน (Benefits) รายได้จากโครงการ ในบางโครงการได้ผลผลิตที่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่
- อายุโครงการ (Life of the Project) เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งมีค่าเท่ากับอายุการใช้งานของเครื่องจักรขนาดใหญ่ช่วงเวลาที่เกิดความคุ้มทุน
- อัตราดอกเบี้ยทบต้น (Compound Interest Rate) ใช้ในการหาค่าเงินในอนาคต หรือค่าในปัจจุบัน หรือค่าเงินในอดีต
- ค่าเงินในปัจจุบัน (Present Value, PV) สามารถหาได้จากสูตร

(วันชัยและช่อม, 2534)

$$PV = P \cdot (1+r)^{-n}$$

เมื่อ PV คือ ค่าเงินในปัจจุบัน (x)

P คือ ค่าเงินในอนาคตปี x+n

r คือ อัตราดอกเบี้ยทบต้น หน่วยเปอร์เซ็นต์ต่อปี

n คือ จำนวนปี

- ค่าเงินในอนาคต (Future Value, FV) สามารถหาได้จากสูตร
(วันชัยและชอุ่ม, 2534)

$$FV = P \cdot (1+r)^n$$

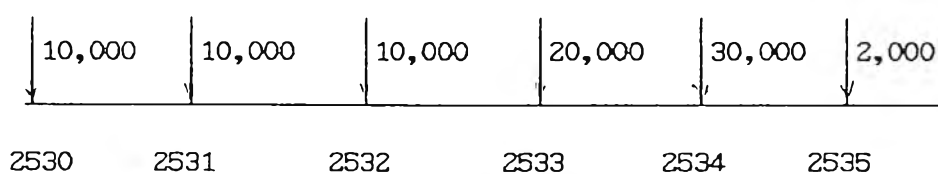
เมื่อ P คือ ค่าเงินในปีปัจจุบัน (x)

FV คือ ค่าเงินในอนาคตปี x+n

r คือ อัตราดอกเบี้ยทบต้น หน่วยเปอร์เซ็นต์ต่อปี

n คือ จำนวนปี

- การกระจายเงินในแต่ละปี (Cash flow) เป็นการแสดงค่าใช้จ่ายหรือผลตอบแทนลงบนเส้นเวลา ตัวอย่างดังรูป



แสดงถึงการมีค่าใช้จ่ายหรือผลตอบแทนสิ้นปีต่าง ๆ ดังตัวเลขกำหนด

- ค่าเงินปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) เป็นค่าผลต่างของค่าเงินในปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมดกับค่าเงินในปัจจุบันของเงินลงทุนทั้งหมด

$$NPV = PV(\text{benefit}) - PV(\text{cost})$$
- ค่าเงินอนาคตสุทธิ (Net Future Value, NFV) เป็นค่าผลต่างของค่าเงินในอนาคตของผลตอบแทนทั้งหมดกับค่าเงินในอนาคตของเงินลงทุนทั้งหมด

$$NFV = FV(\text{benefit}) - FV(\text{cost})$$
- อัตราส่วนผลตอบแทนและเงินลงทุน (Benefit-Cost Ratio, B/C)

จากโครงการการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีภายในโรงงาน จะมีแต่เงินลงทุน ไม่มีผลตอบแทน ดังนั้นการเปรียบเทียบความเหมาะสมของทางเลือกทางเศรษฐศาสตร์ ทำโดยการเปรียบเทียบค่าเงินในปัจจุบันหรืออนาคตของเงินลงทุนทั้งหมดของแต่ละทางเลือกก็จะรู้ว่าทางเลือกใดก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด