

บททวนเอกสาร

3.1 การผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสี

3.1.1 โลหะวิทยาของสังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุในกลุ่ม IIB ของระบบตารางธาตุ ซึ่งประกอบด้วยธาตุ 3 ชนิด คือ สังกะสี แคดเมียม และปรอท สังกะสีเป็นธาตุที่มีมากเป็นลำดับที่ 25 ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเปลือกโลก และเป็นธาตุที่รู้จักกันมานานแล้วในรูปของทองเหลือง ซึ่งทำมาจากทองแดงผสมสังกะสี ชื่อเรียกสังกะสีในภาษาอังกฤษยังไม่ทราบแน่ชัดนักแต่สันนิษฐานว่ามาจากคำในภาษาเยอรมันคือ "Zinke" ซึ่งแปลว่า เตี้ยแหลม หรือฟัน สังกะสีพบทั่วไปในธรรมชาติในรูปของโลหะซัลไฟด์ แร่ที่สำคัญที่สุดของสังกะสี คือ ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งรู้จักในอีกชื่อว่า สฟาลีไรท์ (Sphalerite) หรือซิงค์เบลน (Zinc Blende) ขึ้นอยู่กับรูปผลึกของมัน นอกจากนี้สังกะสียังเป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์หลายชนิด ที่จำเป็นต่อการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของพืชและสัตว์

3.1.1.1 คุณสมบัติของสังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะที่มีลักษณะนุ่มและเหนียวพอควร เมื่อหักออกหรือขีดผิวหน้าออกจะมีสีขาวแกมฟ้า สังกะสีบริสุทธิ์ละลายง่ายในกรดหรือด่างมีความแข็งเท่ากับทองแดงที่อุณหภูมิห้องและสภาพอากาศแห้งไม่สามารถทำให้สังกะสีเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ความชื้นในอากาศเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขาว (White Rust) ที่ผิวสังกะสี สนิมขาวทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีมีสีหม่น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการจุ่มน้ำยาเคลือบผิวสังกะสีเพื่อป้องกันการเกิดสนิมขาวบนชิ้นงาน คุณสมบัติของสังกะสีแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสังกะสี (1)

Atomic number	30
Atomic weight	65.37
Electrochemical equivalent, mg C	0.339
Electrochemical equivalent, g A·h	1.22
Electronic configuration	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$
Melting point, °C	419.5
Boiling point, °C	907.0
Density, g/cm ³ , 25°C	7.133
Crystal structure	hcp
Electrical resistivity, $\mu\Omega\text{-cm}$, 20°C	5.92
Hardness, Knoop, 400-g load, rolled	55
Hardness, Knoop, 400-g load, annealed	47
Tensile strength, rolled sheet, MPa	4.43
Tensile strength, annealed sheet, MPa	1.86
Tensile strength, electrodeposited, MPa	1-2.3
Standard potential, E° , 25°C, V $\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.7628

3.1.1.2 การใช้งาน

สังกะสีส่วนใหญ่ถูกใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปสังกะสีในแบบหล่อ (Zinc-die Castings) สังกะสีที่เหลือชิ้นนี้จะนำไปชุบบนผิวโลหะในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การใช้สังกะสีรองลงมาก็คือ การผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสี (Gavanizing Steel) โดยการจุ่มแผ่นเหล็กในสังกะสีหลอมเหลว (Hot Dipping) ตามด้วยการใช้สังกะสีผสมทองแดงในการหล่อทองเหลือง การใช้สังกะสีทั้ง 3 แบบประมาณได้ 90% ของการใช้สังกะสีทั้งหมด ส่วนที่เหลืออีก 10% เป็นการใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรม เช่น แบตเตอรี่ โลหะหล่อชนิดน้ำหนักเบา อุตสาหกรรมเคมี และอื่นๆ

3.1.2 แผ่นเหล็กอาบสังกะสี

แผ่นเหล็กอาบสังกะสีหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าแผ่นสังกะสี เป็นวัสดุก่อสร้างที่ถูกนำมาใช้ในการปลูกสร้างบ้านเรือนของชาวไทยมานานแล้ว แม้ว่าในปัจจุบันวิวัฒนาการทางด้านเทคโนโลยีการปลูกสร้างอาคารบ้านเรือนจะก้าวหน้าไปมาก โดยเริ่มมีงานก่อสร้างบางส่วนเปลี่ยนมาสร้างด้วยอิฐและปูนตลอดจนใช้กระเบื้องมุงหลังคาแทน จนทำให้ในแถบเมืองหลวงหรือตัวเมืองใหญ่นั้น บทบาทของแผ่นเหล็กอาบสังกะสีดูออกจะด้อยหรือลดความสำคัญไปมากก็ตาม แต่

สำหรับในต่างจังหวัดแล้ว แผ่นเหล็กอาบสังกะสียังคงจัดเป็นวัสดุก่อสร้างสำคัญในการปลูกบ้านเรือนกันแพร่หลายอยู่ โดยเฉพาะอาคารบ้านเรือนของเกษตรกร แผ่นเหล็กอาบสังกะสีที่รู้จักกันดีนี้ผลิตขึ้นมาจากการนำแผ่นเหล็กดำที่มีขนาดความหนาไม่เกิน 3 มม. ไปผ่านการรีดให้บางด้วยความร้อนหรือความเย็น แล้วนำไปชุบกับโลหะสังกะสีซึ่งมีวิธีการชุบ 2 วิธีคือ แบบเรียงแผ่นและแบบต่อเนื่อง

สังกะสีที่ใช้กันอยู่พอจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันตามรูปร่างคือ

1) ชนิดแผ่นเรียบ(Plain Sheet) มีขนาดมาตรฐานทั่วไปคือ 910x2435 มม. มีความหนาตั้งแต่ 0.20 มม. ขึ้นไป นิยมใช้ในการทำป้ายโฆษณา ภาชนะต่างๆ ท่อ รางน้ำ ฝาห้องน้ำ ตู้เก็บเอกสาร ตลอดจนหลังคารถบิกอ้น

2) ชนิดลูกฟูก(Corrugated Sheet) มีทั้งแบบลอนเล็ก ลอนใหญ่และลอนเหลี่ยม ตัวอย่างเช่นแผ่นเหล็กอบสังกะสีลูกฟูกลอนเล็ก โดยทั่วไปมักมีความกว้างก่อนทำลอน 760 มม. ทำลอนแล้วความกว้างจะเหลือ 665 มม. แผ่นเหล็กอาบสังกะสีชนิดนี้มีความหนาให้เลือกใช้หลายขนาดเช่นเดียวกับชนิดแผ่นเรียบ

วารสารวงการก่อสร้าง (2) รายงานว่าในปีพ.ศ.2531 ปริมาณความต้องการแผ่นเหล็กอาบสังกะสีทั้งประเทศ อยู่ในระดับประมาณ 180,000-190,000 ตันต่อปี มีผู้ผลิต 4 ราย ซึ่งมีกำลังการผลิตและเครื่องหมายการค้าดังแสดงในตารางที่ 3.2

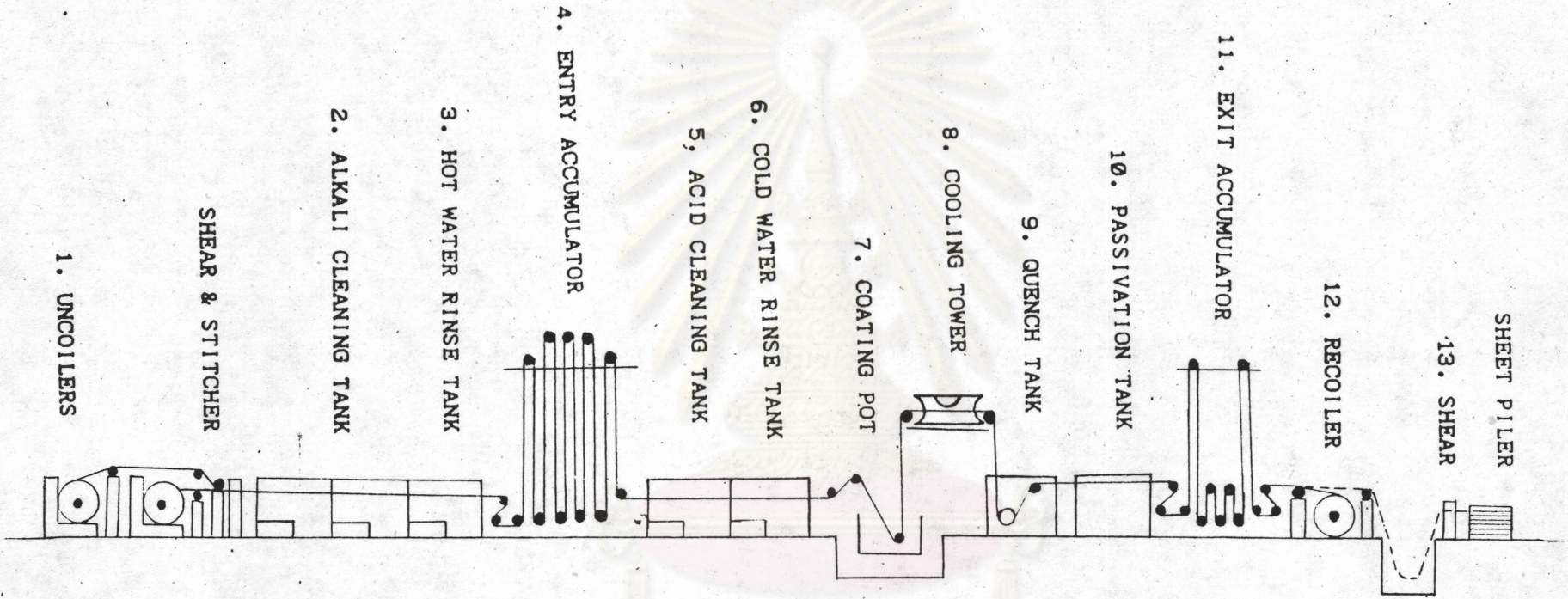
ตารางที่ 3.2 ผู้ผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสีในปัจจุบัน (2)

บริษัทผู้ผลิต	ทุนจดทะเบียน (ล้านบาท)	วันเปิดดำเนินการ	กำลังผลิต (เมตริกตัน/ปี)	ชื่อผลิตภัณฑ์
ไทยแลนด์ไอออนเวิร์ค	20	15 ก.พ.2503	60,000	สามดาวเทียม, TIW
สังกะสีไทย	15	15 ม.ค.2504	80,000	สามมงกุฎ, สามK
สังกะสีฟาร์อีสท์	20	ม.ค.2507	51,000	สามแหวน
บีเอสจี	300	มี.ค.2527	55,000	ห้าคันไถ, สิงห์

3.1.3 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสีแบบต่อเนื่อง

การผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสีแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมที่ต้องพึ่งพาเครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติต่างๆ ซึ่งทำให้ลดจำนวนแรงงานคนไปได้มาก และมีกำลังการผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสีสูง สำหรับโรงงานที่เลือกทำการศึกษา มีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ทำการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง กระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีกรรมวิธีการผลิตดังนี้

- 1) แผ่นเหล็กม้วนซึ่งมีความหนาตามต้องการ ถูกนำมาคลี้ออกแล้วป้อนเข้าสู่สายพานน้ำแผ่นเหล็กอย่างต่อเนื่อง
- 2) แผ่นเหล็กจะผ่านเข้าสู่บ่อสารละลายด่างเข้มข้น (Alkali Cleaner Tank) ซึ่งเตรียมจากโซดาไฟ เพื่อล้างกำจัดน้ำมันซึ่งเคลือบผิวแผ่นเหล็กเพื่อป้องกันสนิมออก
- 3) แผ่นเหล็กที่ผ่านการกำจัดน้ำมันแล้วนำมาล้างในบ่อน้ำร้อน (Hot Water Rinse Tank) เพื่อล้างสารละลายด่างที่ติดบนแผ่นเหล็กออกก่อนทำให้แห้ง
- 4) Entry Accumulator จะทำหน้าที่ผึ่งตากแผ่นเหล็กให้แห้งและเป็นที่เตรียมแผ่นเหล็กให้พร้อมสำหรับขั้นตอนต่อไป
- 5) หลังจากผ่าน Entry Accumulator แล้ว แผ่นเหล็กจะผ่านเข้าสู่บ่อสารละลายกรดเข้มข้น (Acid Cleaner Tank) ซึ่งเตรียมจากกรดเกลือ เพื่อกำจัดสนิมและความสกปรกต่างๆออกจากแผ่นเหล็ก
- 6) แผ่นเหล็กที่ผ่านบ่อสารละลายกรดเข้มข้นแล้ว จะถูกนำมาล้างในบ่อน้ำเย็น (Cold Water Rinse Tank) เพื่อล้างเอากรดที่ติดค้างบนแผ่นเหล็กออกก่อนทำการชุบสังกะสี
- 7) แผ่นเหล็กที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ถูกนำมาชุบสังกะสีในบ่อสังกะสีหลอมเหลว ซึ่งประกอบด้วยสังกะสีหลอมรวมกับตะกั่วและอลูมิเนียม เพื่อคุณสมบัติในการนำความร้อนและการชุบสังกะสีให้ติดแน่นบนแผ่นเหล็ก
- 8) หอระบายความร้อน (Cooling Tower) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กที่ผ่านการอบชุบสังกะสีขึ้นมาใหม่ โดยใช้ระบายความร้อนด้วยการเป่าลม
- 9) หลังจากรบายความร้อนแผ่นเหล็กอบสังกะสีด้วยอากาศแล้ว แผ่นเหล็กอบสังกะสีจะถูกฉีดพ่นด้วยน้ำ เพื่อระบายความร้อนในบ่อน้ำหล่อเย็น (Quench Tank) น้ำหล่อเย็นนี้จะต้องเป็นน้ำที่สะอาดและมีปริมาณคลอรีนต่ำมาก ทั้งนี้เพราะคลอรีนจะทำลายผิวสังกะสีที่เคลือบบนแผ่นเหล็กให้เกิดตำหนิได้ น้ำหล่อเย็นส่วนหนึ่งจะถูกหมุนเวียนไปยังแผงระบายความร้อนนอกโรงงานเพื่อลดอุณหภูมิลง ก่อนนำกลับมาใช้อีก
- 10) กรดโครมิกในบ่อเคลือบน้ำยา (Passivation Tank) ถูกใช้เคลือบแผ่น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสีแบบต่อเนื่อง

เหล็กอบสังกะสี เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับความชื้นเกิดเป็นสนิมขาวของผิวสังกะสี สำหรับกรดโครมิกก็จำเป็นต้องมีคลอไรด์ในปริมาณต่ำเช่นเดียวกับน้ำหล่อเย็น

11) Exit Accumulator ทำหน้าที่ฝังตากแผ่นเหล็กอบสังกะสีให้แห้งและเตรียมแผ่นเหล็กอบสังกะสีให้พร้อมจะม้วนเก็บ

12) แผ่นเหล็กอบสังกะสีที่ผ่านกระบวนการต่างๆแล้ว จะถูกม้วนเก็บในลูกกลิ้งอีกครั้ง

13) ม้วนแผ่นเหล็กอบสังกะสีจะถูกนำมาเคลื่อน แล้วป้อนเข้าเครื่องตัดแผ่นเหล็กอบสังกะสีตามความยาวที่ต้องการ ได้เป็นแผ่นเหล็กอบสังกะสีชนิดแผ่นเรียบ หรือเมื่อตัดออกเป็นแผ่นแล้วจึงนำไปทำลอนเป็นแผ่นเหล็กอบสังกะสีชนิดลูกฟูกหรือการจำหน่ายต่อไป

3.2 ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

น้ำเสียที่มาจากการผลิตแผ่นเหล็กอบสังกะสีเกิดจากขั้นตอนในการผลิตต่างๆดังนี้

3.2.1 การกำจัดน้ำมันจากแผ่นเหล็ก

น้ำเสียในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นจาก 2 แหล่ง คือ

- 1) น้ำเสียที่เป็นด่างเข้มข้นจากการถ้ำสารละลายในบ่อสารละลายต่างเข้มข้นทั้งเป็นครั้งคราว เมื่อสารละลายเสื่อมคุณภาพหรือเมื่อถึงเวลาตามที่กำหนด
- 2) น้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้าง ซึ่งไหลล้นจากบ่อน้ำร้อนสู่ท่อรับน้ำเสียตลอดเวลา โดยน้ำร้อนใหม่จะไหลเข้าแทนที่น้ำส่วนนี้ตลอดเวลา เพื่อรักษาสภาพน้ำในบ่อไม่ให้มีความเข้มข้นของด่างสูงเกินไป

3.2.2 การกำจัดสนิมเหล็กและมลทินจากแผ่นเหล็ก

น้ำเสียในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นจาก 2 แหล่ง คือ

- 1) น้ำเสียที่เป็นกรดเข้มข้นจากการถ้ำสารละลายในบ่อสารละลายกรดเข้มข้นทั้งเป็นครั้งคราว เมื่อสารละลายเสื่อมคุณภาพหรือถึงเวลาตามตารางที่กำหนด
- 2) น้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้างซึ่งไหลจากบ่อน้ำเย็นสู่ท่อรับน้ำเสียตลอดเวลา โดยน้ำเย็นใหม่จะไหลเข้าแทนที่น้ำส่วนนี้ตลอดเวลา เพื่อรักษาสภาพน้ำในบ่อไม่ให้มีความเข้มข้นของกรดสูงเกินไป

3.2.3 การหล่อเย็นและล้างแผ่นเหล็กที่ผ่านการอบสังกะสี

น้ำเสียในขั้นตอนนี้เกิดขึ้น 2 ลักษณะ คือ

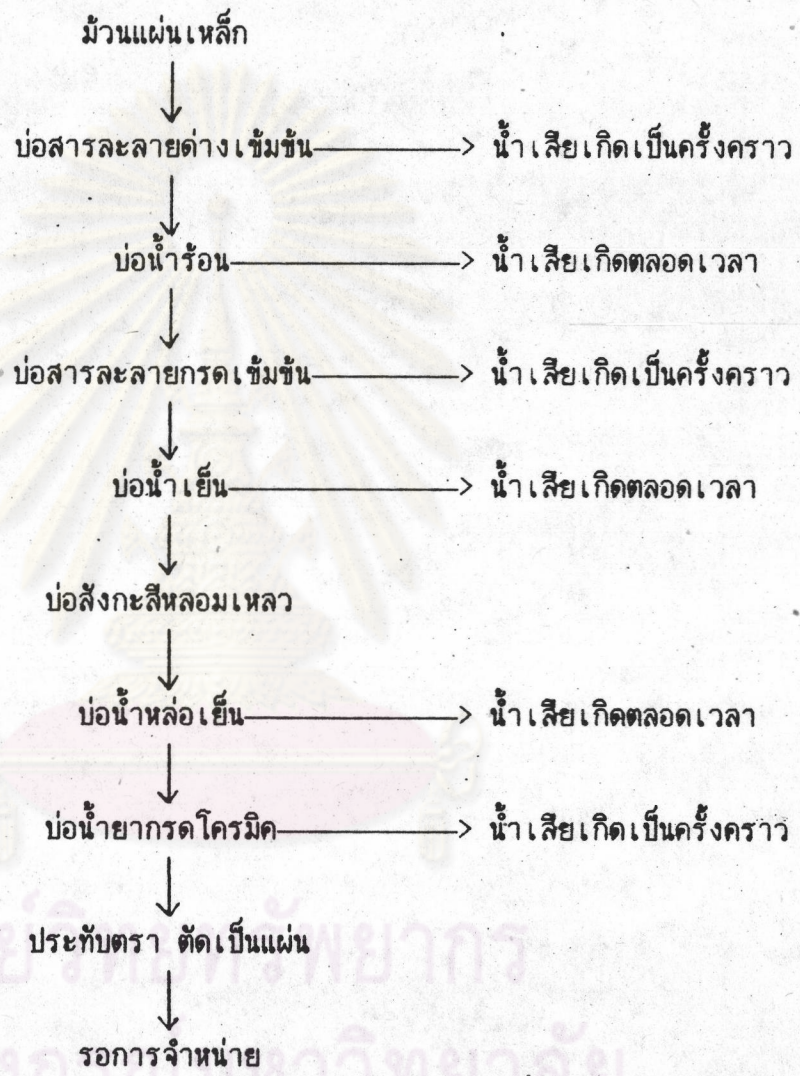
- 1) การถ่ายน้ำจากบ่อน้ำหล่อเย็นทิ้งเป็นน้ำเสีย เมื่อผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำในบ่อมีความขุ่น หรือปริมาณคลอรีนเกินค่าที่กำหนดในการควบคุมคุณภาพ
- 2) เกิดจากการไหลล้นจากบ่อน้ำหล่อเย็นตลอดเวลาโดยน้ำสะอาดจะไหลเข้ามาแทนที่น้ำส่วนนี้ตลอดเวลา

3.2.4 การเคลือบน้ำยากรดโครมิกบนแผ่นเหล็กอบสังกะสี

น้ำเสียในขั้นตอนนี้จะเกิดจากการถ่ายกรดโครมิกในบ่อเคลือบน้ำยาทิ้งเป็นครั้งคราว เมื่อผลการตรวจสอบพบว่าปริมาณคลอรีนเกินค่าที่กำหนดในการควบคุมคุณภาพ

แผนผังที่มาของน้ำเสียแสดงดังรูปที่ 3.2

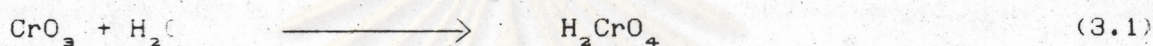
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



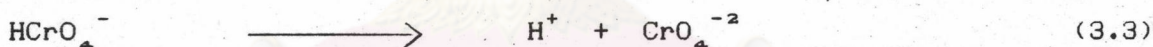
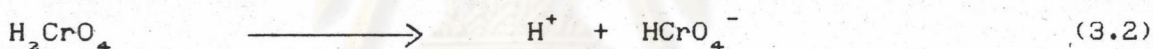
รูปที่ 3.2 แผนผังที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กอาบสังกะสี

3.3 รีดักชันทางเคมีของโครเมียม(VI)

โครเมียมที่พบในน้ำเสียได้แก่โครเมียม(VI) และโครเมียม(III) โครเมียม(VI) ในน้ำเสียอยู่ในรูปโครเมต (CrO_4^{-2}) และไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$) สารประกอบโครเมียมใช้เติมในน้ำหล่อเย็น เพื่อยับยั้งการกัดกร่อนและยังใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น การผลิตหมึก การผลิตสี ย้อม การชุบโลหะ แหล่งที่มาของโครเมียมในน้ำเสียที่สำคัญคือ น้ำล้างในการชุบโลหะด้วยโครเมียมและกรดโครมิก กรดโครมิกที่ใช้เป็นน้ำยาเคลือบเงาแผ่นเหล็กอาบสังกะสีเพื่อกันสนิมเตรียมขึ้นจากการนำโครเมียมไตรออกไซด์ (CrO_3) มาละลายน้ำ จะได้กรดโครมิกดังสมการที่ 3.1



กรดโครมิกมีคุณสมบัติเป็นกรดแก่ แม้ว่าจะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนอย่างสมบูรณ์ การแตกตัวของกรดโครมิกเป็นดังนี้



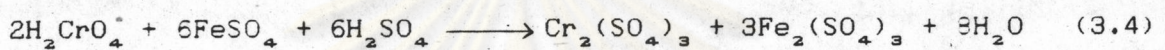
การกำจัดโครเมียม(VI) โดยกระบวนการทางเคมีจำเป็นต้องรีดิวส์โครเมียม(VI) ให้อยู่ในรูปโครเมียม(III) ก่อน แล้วจึงตามด้วยการตกตะกอนทางเคมีในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่พีเอชที่เหมาะสม

3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวส์โครเมียม

สารเคมีที่นิยมใช้ในการรีดิวส์โครเมียมมีหลายชนิด ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต สารประกอบซัลไฟท์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ละชนิดมีลักษณะการใช้งานและปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกันดังนี้

3.3.1.1 เฟอร์รัสซัลเฟต

เหล็ก(II) ในเฟอร์รัสซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับโครเมียม (VI) ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยโครเมียม(VI)ถูกรีดิวส์เป็นโครเมียม(III) และเหล็ก(II) ออกซิไดส์เป็นเหล็ก(III) ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เร็วที่พีเอชต่ำกว่า 3 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อควบคุมพีเอชและใช้ในปฏิกิริยารีดักชัน การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารรีดิวส์มีข้อเสียที่สำคัญคือ เมื่อกำจัดโครเมียมซึ่งผ่านการรีดิวส์แล้วด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ จะเกิดตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ขึ้นในปริมาณมากซึ่งจะเป็นภาระในการกำจัดตะกอนในขั้นต่อไป การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตสามารถเติมทั้งในแบบของแข็งหรือเตรียมเป็นสารละลายก่อน ปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมโดยเฟอร์รัสซัลเฟตเป็นดังนี้



3.3.1.2 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารประกอบซัลไฟท์

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2) และสารประกอบซัลไฟท์ต่างๆ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟท์(Na_2SO_3) โซเดียมไบซัลไฟท์(NaHSO_3) โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) เมื่อใช้เป็นสารรีดิวส์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดกรดซัลฟูริก(H_2SO_3) ตามลำดับดังนี้

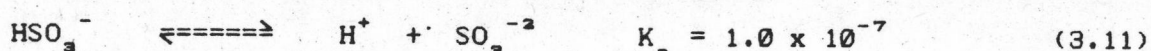


กรดซัลฟูริกที่เกิดจากปฏิกิริยาในสมการที่ 3.5 ถึง 3.8 จะทำหน้าที่ในการรีดิวส์โครเมียมดังนี้

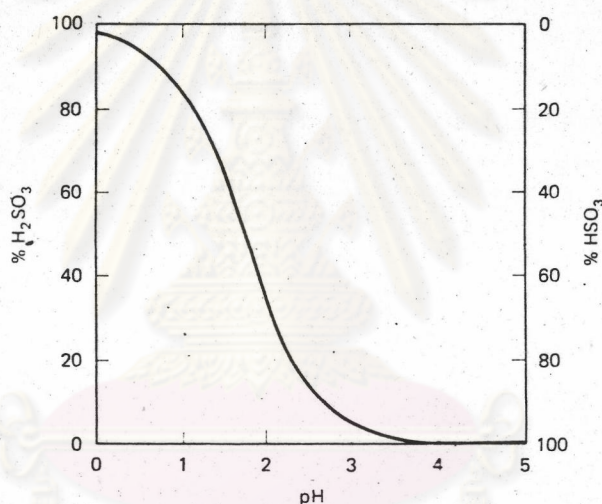


ปฏิกิริยารีดักชันเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำ ทั้งนี้เพราะที่พีเอชต่ำกรดซัลฟูริกแตกตัวเป็นอออน

ได้น้อยดังสมการที่ 3.10 และ 3.11 ทำให้มีกรดซัลฟูรัสเพียงพอในการรีดิวส์โครเมียม

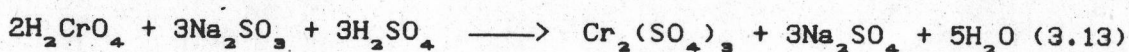
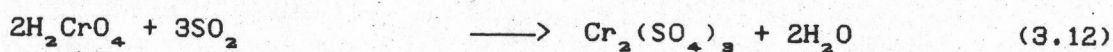


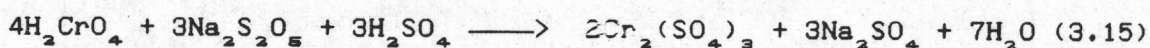
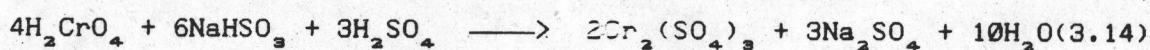
ปริมาณ H_2SO_3 จะเริ่มลดลงอย่างมากเมื่อพีเอชมากกว่า 2 และแตกตัวเป็นไอออนหมด เมื่อพีเอชมากกว่า 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ H_2SO_3 และ HSO_3^- ที่พีเอชต่างๆ (3)

จากปฏิกิริยาในสมการที่ 3.6 ถึง 3.8 พบว่าการใช้สารประกอบซัลไฟต์เป็นสารรีดิวส์จะเกิดต่างคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมกรดเพื่อรักษาระดับพีเอชให้เหมาะสมและใช้ในปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมโดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสารประกอบซัลไฟต์เป็นดังนี้





3.3.2 ความต้องการปริมาณสารเคมีทางทฤษฎี

จากสมการเคมีที่ 3.4 และ 3.12 ถึง 3.15 สามารถคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียม(VI) 1 มก./ล. ดังสรุปในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความต้องการปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีในการรีดิวซ์โครเมียม(VI) 1 มก./ล.

ชนิดของสารรีดิวซ์	สูตรเคมี	ปริมาณสารรีดิวซ์ (มก./ล.)	ปริมาณกรดซัลฟูริก (มก./ล.)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	SO_2	1.85	0.00
เฟอร์รัสซัลเฟต	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	16.03	5.66
โซเดียมซัลไฟต์	Na_2SO_3	3.64	2.83
โซเดียมไบซัลไฟต์	NaHSO_3	3.00	2.83
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	2.74	1.41

หมายเหตุ สมมติว่าสารเคมีมีความบริสุทธิ์ 100%

3.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดักชันโครเมียม

การรีดิวซ์โครเมียมเกิดได้สมบูรณ์เพียงไรขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่

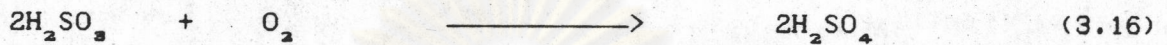
3.3.3.1 ชนิดของสารรีดิวซ์

ความแรงในการรีดิวซ์ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับศักย์รีดักชัน (Reduction Potential) ของสารนั้นๆ ซึ่งวัดในหน่วยของมิลลิโวลต์ สารที่มีค่าศักย์รีดักชันต่ำ (เป็นลบมาก) จะสามารถรีดิวซ์สารอื่นได้ดีกว่าสารที่มีศักย์รีดักชันสูงกว่า



3.3.3.2 ปริมาณสารรีติวัลส์

ปริมาณสารรีติวัลส์ที่คำนวณได้ตามตารางที่ 3.3 เมื่อนำไปใช้ งานจริงมักจะไม่สามารถรีติวัลส์โครเมียมได้หมด ทั้งนี้เพราะในน้ำเสียมักจะมีสารอื่นที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารรีติวัลส์ได้ เช่น ออกซิเจนและลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเกิดกรดซัลฟูริก ดังสมการนี้

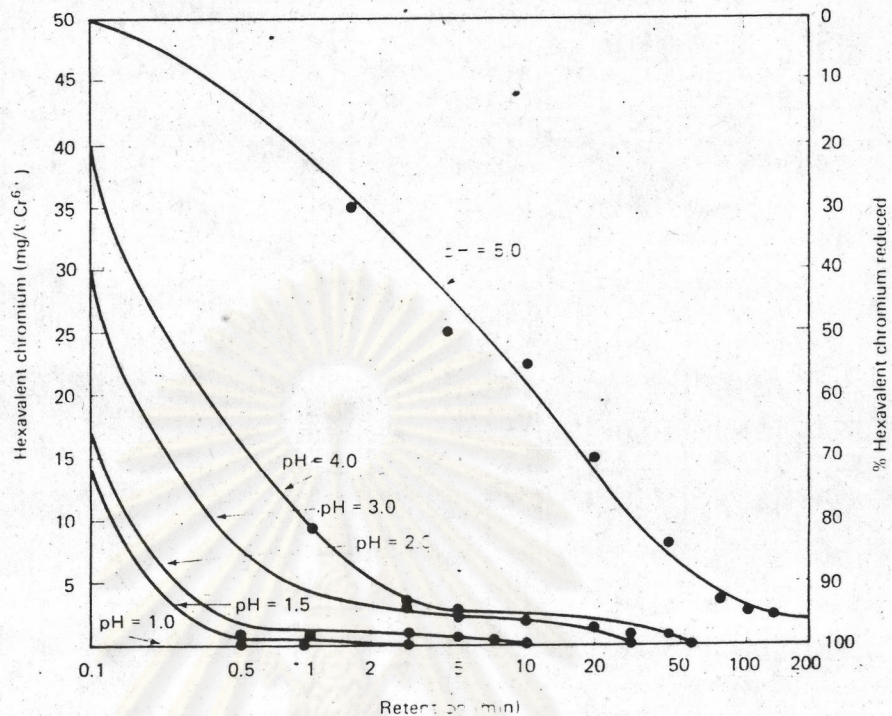


ทำให้ความต้องการสารรีติวัลส์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมสารเคมีในการรีติวัลส์โครเมียมจำเป็นต้องเติมเกินกว่าที่คำนวณได้จากสมการเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและปริมาณสารอื่นๆในน้ำเสียนั้นๆ

3.3.3.3 พีเอชและเวลาในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมเกิดได้เร็วที่พีเอชต่ำ ที่พีเอชสูงการรีติวัลส์โครเมียมไม่มีโอกาสเกิดได้สมบูรณ์ Chamberlain และ Day (3) อธิบายการรีติวัลส์โครเมียมโดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดได้สมบูรณ์ และใช้เวลาทำปฏิกิริยาล้นลงเมื่อพีเอชต่ำลงเมื่อพีเอชสูงกว่า 5 อัตราการรีติวัลส์โครเมียมจะช้าและไม่สามารถรีติวัลส์โครเมียมได้หมด ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมจำเป็นต้องมีการเติมกรด เพื่อรักษาพีเอชของปฏิกิริยาให้คงที่ที่พีเอชที่ต้องการตลอดปฏิกิริยา ปริมาณความต้องการกรดในการรีติวัลส์โครเมียมขึ้นอยู่กับความเป็นกรด พีเอชของน้ำเสียมเติม พีเอชขณะทำปฏิกิริยาที่ต้องการ และชนิดของสารรีติวัลส์ที่ใช้ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะคำนวณปริมาณสารรีติวัลส์และกรดที่ใช้ให้ถูกต้อง จำเป็นต้องไตเตรทน้ำเสียมที่จะทำการรีติวัลส์โครเมียมก่อนกับสารละลายกรดมาตรฐาน และทดลองแปรค่าปริมาณสารรีติวัลส์ที่ใช้ เพื่อให้ปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรีดิวซ์โครเมียม(VI) กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่างๆ โดยใช้ซิลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารรีดิวซ์ (3)

3.4 ทฤษฎีการตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปสารละลาย ให้อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้นๆ ซึ่งเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยอาจจะเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกัน กล่าวคือ

- 1) การเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่มีอยู่ในสารละลาย เพื่อให้สารนั้นละลายน้ำได้น้อยลงเกิดเป็นตะกอนขึ้น
- 2) การเติมสารเคมีโดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะสมดุลของสารละลาย ให้เลื่อนมาถึงจุดที่สารที่ละลายอยู่ในน้ำไม่สามารถละลายน้ำต่อไปได้แล้วเกิดเป็นตะกอนขึ้น
- 3) การเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิมตัว หรือเกือบอิมตัวไปในทิศทางที่ทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็ง

การตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย นิยมใช้สารประกอบหลายชนิด ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และซัลไฟด์ซึ่งแต่ละชนิดจะตกตะกอนโลหะในรูปที่แตกต่างกัน การใช้สารเคมีเหล่านี้สามารถใช้แยกกัน หรือใช้ร่วมกันในปริมาณที่เพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสียดังกล่าวกับสารเคมีทำให้เกิดเป็นตะกอนเคมี ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนและการกรอง

3.4.1 การตกตะกอนทางเคมีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์

สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะในรูปโลหะไฮดรอกไซด์คือ ปูนขาว และโซดาไฟ ในสภาวะอิ่มตัวโลหะไฮดรอกไซด์มีผลคูณของความเข้มข้นไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์เท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp}) ซึ่งแสดงในสมการดังนี้

$$[M^{+n}] [OH^-]^n = K_{sp}$$

$[M^{+n}]$ แทนความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำที่มีประจุ +n

$[OH^-]$ แทนความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

K_{sp} แทนค่าคงที่ผลคูณการละลาย

เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟในน้ำเสียที่มีโลหะละลายอยู่ทำให้พีเอชน้ำเสียเพิ่มขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์มีค่ามากจนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลคูณการละลายโดยหลักของเลอ ชาเตอลิเยร์ ซึ่งกล่าวว่า "เมื่อระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลถูกรบกวน จะทำให้สมดุลของระบบเสียไป ระบบจึงปรับตัวไปในทิศทางหนึ่งที่จะทำให้ปัจจัยที่รบกวนนั้นลดลงเหลือน้อยที่สุด แล้วระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง" (4) ด้วยหลักการนี้ไอออนของโลหะจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ขึ้น และตะกอนจะเพิ่มมากขึ้นจนกว่าผลคูณของไอออนจะเท่ากับค่า K_{sp} ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องแยกออกจากน้ำโดยกระบวนการอื่นต่อไปนี้ มิฉะนั้นเมื่อพีเอชหรือความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ลดลง ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จะละลายกลับไปอยู่ในน้ำเสียอีก ทำให้การกำจัดโลหะหนักไม่ได้ผล ค่าคงที่ผลคูณการละลายมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคงที่ ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่ผลคูณการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 °C (5)

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (K_{sp})
$Mg(OH)_2$	1.8×10^{-11}
$Mn(OH)_2$	1.9×10^{-13}
$Cd(OH)_2$ fresh	2.5×10^{-14}
$CuOH$	1.0×10^{-14}
$Fe(OH)_2$	8.0×10^{-15}
$Pb(OH)_2$	1.2×10^{-15}
$Cr(OH)_2$	2.0×10^{-16}
$Zn(OH)_2$	1.2×10^{-17}
$Cu(OH)_2$	2.2×10^{-20}
$Hg_2(OH)_2$	2.0×10^{-24}
$Hg(OH)_2$	3.0×10^{-26}
$Cr(OH)_3$	6.0×10^{-31}
$Al(OH)_3$ amorphous	1.3×10^{-33}
$Fe(OH)_3$	4.0×10^{-38}
$Pb(OH)_4$	3.2×10^{-66}

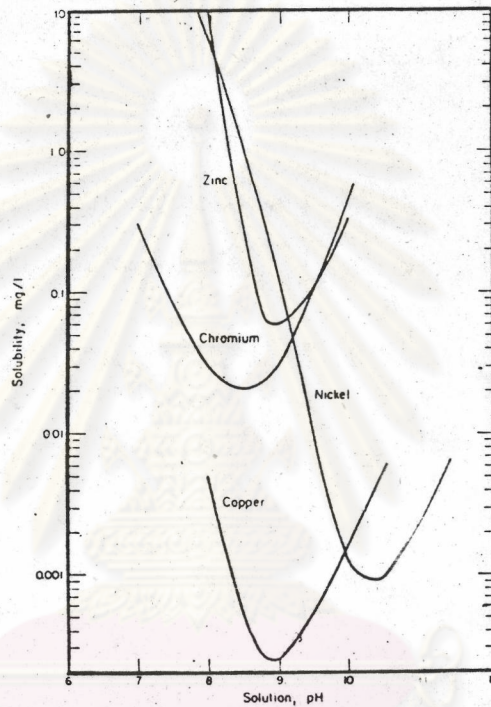
การใช้ปูนขาวและโซดาไฟในการกำจัดโลหะหนักสละดวกต่อการทำงานในโรงบำบัดน้ำเสียเพราะสามารถวัดปริมาณสารเคมีที่ไว้ในรูปของค่าพีเอช ดังนั้นการทำงานของระบบนี้เพียงติดตั้งเครื่องวัดพีเอชในถังกวนเร็ว เพื่อคอยควบคุมการสลับจ่ายสารเคมีให้มีพีเอชของปฏิกิริยาเท่ากับพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะชนิดนั้นๆ

3.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี

3.4.2.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ

โลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิด มีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่างๆไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก เช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียม นิเกิล

จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุด และเมื่อเลยพีเอชนี้แล้วโลหะแอมโฟเทอริกจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การกำจัดโลหะออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดเป็นไปได้ยาก ยกเว้นแต่มีการเกิดกลไกอย่างอื่นร่วมด้วย เช่น มีการดูดซับไอออนโลหะบนตะกอนเคมี เป็นต้น (6)



รูปที่ 3.5 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะบางชนิดที่พีเอชต่างๆ (7)

3.4.2.2 พีเอชและปริมาณสารเคมี

เนื่องจากสารเคมีที่ใช้เติมเพื่อให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ จะทำหน้าที่ปรับพีเอชของน้ำเสียด้วย ดังนั้นการควบคุมพีเอชและปริมาณต่างๆที่ใช้ต้องคำนึงถึงพีเอชที่ทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดของโลหะที่ต้องการกำจัด ในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะหลายๆชนิดออกจากน้ำเสียพร้อมกันจำเป็นต้องทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งสามารถกำจัดโลหะส่วนใหญ่ในน้ำเสียได้ผลดี สำหรับโลหะแอมโฟเทอริกการควบคุมพีเอชจะต้องทำอย่างระมัดระวังมิฉะนั้นโลหะอาจไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ตามต้องการ

B.

3.4.2.3 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิขึ้นกับปฏิกิริยาการตกตะกอนเคมี เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนหรือคายร้อน ถ้าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ สิ่งที่ได้จากค่าคงที่ผลคูณการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิลดลงการตกตะกอนทางเคมีจะเกิดได้ดีขึ้น ยกเว้นตะกอนเคมีบางชนิดเช่น CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ และ FePO_4 ซึ่งจะละลายได้น้ำได้มากขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ (8)

3.4.2.4 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การตกตะกอนการเคมีต้องการเวลาในการกวนผสมสารเคมีที่เติมให้กระจายอย่างทั่วถึง และมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอ็อนต่างๆในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ สารเคมีบางชนิด เช่น ปูนขาว ละลายน้ำได้น้อยต้องการเวลาในการกวนผสมนานกว่าโซดาไฟซึ่งละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ยังต้องการเวลาในการกวนผสมอย่างช้าๆเพื่อให้ตะกอนที่เกิดมีโอกาสสัมผัสกันเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรสูง และสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนได้ง่าย

3.4.2.5 อ็อนเชิงซ้อน

ไซยาไนด์ แอมโมเนีย และสารคีแลนท์เช่น EDTA สามารถเกิดอ็อนเชิงซ้อนที่เสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย อ็อนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ Scott (7) ได้ทดลองใช้ปูนขาวและเฟอร์รัสซัลไฟด์ในการตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนัก โดยเติมสารคีแลนท์ 2 ชนิดคือ EDTA และ Rochelle พบว่าสารคีแลนท์ทั้ง 2 ชนิดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง

3.5 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยกระบวนการทางเคมี

Scott (7) ได้ทดลองใช้เฟอร์รัสซัลไฟด์และปูนขาวกำจัดโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์ที่มีการเติมสารคีแลนท์ 2 ชนิดพร้อมกันได้แก่ EDTA ในปริมาณตั้งแต่ 4.5-45 มก./ล. และ Rochelle ในปริมาณตั้งแต่ 12.5-127 มก./ล. โลหะหนักแต่ละชนิดถูกเติมในน้ำที่สังเคราะห์จาก ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิเกิล และสังกะสีในปริมาณ 4 มก./ล. ผลการทดลอง

ปรากฏว่าการใช้เฟอร์ริซัลไฟด์เติมในลักษณะน้ำตะกอนในปริมาณ 25 มก./ล. ที่พีเอช 8.3-8.5 สามารถกำจัดโลหะหนักส่วนมากในน้ำสังเคราะห์ที่มีการเติมสารเคมีแลนที่ในปริมาณสูง ได้ดีกว่าการใช้ปูนขาวปรับพีเอชน้ำสังเคราะห์ที่พีเอช 9.0 อย่งเห็นได้ชัด ยกเว้นโครเมียม และสังกะสี ซึ่งสามารถกำจัดได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และน้ำสังเคราะห์ที่มีปริมาณสารเคมีแลนที่ต่ำปูนขาวและเฟอร์ริซัลไฟด์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่เฟอร์ริซัลไฟด์ก็ยังสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าปูนขาวเกือบทุกกรณี ยกเว้นสังกะสีซึ่งที่ปริมาณสารเคมีแลนที่ต่ำปูนขาวสามารถกำจัดได้ดีกว่าเฟอร์ริซัลไฟด์

Maruyama et al. (9) ได้ทำการศึกษาผลการกำจัดโลหะหนักหลายชนิด ได้แก่ แคดเมียม อาร์เซนิก แมงกานีส พรอท ตะกั่ว สังกะสี และแบเรียม โดยนำโลหะหนักเหล่านี้ มาเติมในน้ำเสียที่นำมาจากเทศบาลเมืองแห่งหนึ่ง ให้มีความเข้มข้นโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 5 มก./ล. ทำการทดลองกับสารเคมีดังนี้

- 1) เฟอร์ริซัลเฟตในปริมาณ 45 มก./ล. ในเทอมของเหล็ก ที่พีเอช 6.0
- 2) ปูนขาวในปริมาณ 260 มก./ล. ร่วมกับเฟอร์ริซัลเฟต 20 มก./ล. ในเทอมของเหล็ก ที่พีเอช 10.0
- 3) ปูนขาวอย่างเดียวในปริมาณ 600 มก./ล. ที่พีเอช 11.5

หลังจากการกวนผสมสารเคมีในปริมาณดังกล่าวแล้วปล่อยให้ตกตะกอนพบว่าไม่มีสารใดที่ใช้ในการทดลองสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดได้ผลดีพร้อมกัน การใช้ปูนขาวเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 95% โดยเฉลี่ย การใช้ปูนขาวร่วมกับเฟอร์ริซัลเฟตได้ผลดีรองลงมาโดยสามารถกำจัดโลหะหนักส่วนมากได้มากกว่า 90% โดยเฉลี่ย และการใช้เฟอร์ริซัลเฟตอย่างเดียวได้ผลน้อยที่สุด

Kreye et al. (10) ได้ศึกษาและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบสังกะสีด้วยสังกะสีพบว่า น้ำเสียที่มีโครเมียมสามารถกำจัดได้โดยการปรับพีเอชที่ 2.5 โดยกรดซัลฟูริก แล้วใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์เป็นสารรีดิวซ์ ความเข้มข้นโครเมียม(VI) เริ่มแรก 20 มก./ล. ลดลงเหลือ 0 มก./ล. โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที น้ำเสียของโรงงานจากบ่อรับและบ่อล้างต่างๆรวมทั้งน้ำเสียที่ผ่านการรีดิวซ์นำมาบำบัดรวมกัน โดยใช้โซดาไฟเป็นสารปรับพีเอชและตกตะกอนโลหะหนักที่พีเอช 9.5 รวมทั้งมีการเติมสารโพสิเมอร์ประจุลบที่ความเข้มข้น 1 มก./ล. อัตราน้ำล้นผิว 2.0 ม./ชม. ผลปรากฏว่าตะกอนโลหะหนักตกตะกอนได้ดีมาก ของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดได้ถึง 96% ความเข้มข้นของสังกะสีลดลงจาก 52.0 มก./ล. เหลือ 0.23 มก./ล. ความเข้มข้นของโครเมียมที่ผ่านการรีดิวซ์แล้วลดลงจาก 5.5 มก./ล. เหลือ 0.43 มก./ล. และความเข้มข้นของเหล็กลดลงจาก 14.5 มก./ล. เหลือ 0.31 มก./ล.

Rouse (6) รายงานถึงผลการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากเหมืองแห่งหนึ่งในประเทศแคนาดา ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้เหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายต่ำสุดของสังกะสีซึ่งคำนวณได้ 2.3 มก./ล. แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยการปรับพีเอชด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์สามารถลดสังกะสีเหลือ 0.4 มก./ล. ทั้งนี้เนื่องจากการตกตะกอนร่วมของตะกอนเคมีอื่นในน้ำเสีย แล้วเกิดกลไกดูดซับไอออนสังกะสีกับตะกอนเคมีทำให้สังกะสีถูกกำจัดได้มากกว่าค่าทางทฤษฎี

Macvaugh และ Wall (11) ได้ศึกษาผลการกำจัดโลหะหนักโดยกระบวนการบำบัดทางเคมีกับน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งหนึ่ง น้ำเสียมีคุณลักษณะดังนี้ ปริมาณของแข็งแขวนลอย 200 มก./ล. โครเมียมทั้งหมด 26 มก./ล. เหล็ก 56 มก./ล. ตะกั่ว 8.9 มก./ล. และ สังกะสี 42 มก./ล. การทดลองใช้ปูนขาวเป็นสารเคมีในการตกตะกอนโลหะหนัก และปรับพีเอชของน้ำเสียจากการทดลองพบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งหมดคือ 10.5 โดยให้คุณภาพน้ำที่ผ่านจากถังตกตะกอนเป็นดังนี้ ปริมาณของแข็งแขวนลอย 28 มก./ล. โครเมียมทั้งหมด 0.40 มก./ล. เหล็ก 1.59 มก./ล. ตะกั่ว 0.62 มก./ล. สังกะสี 2.88 มก./ล. และโดยเฉพาะสังกะสีพบว่า ปริมาณสังกะสีในน้ำต่ำที่สุด คือ 1.91 มก./ล. ที่พีเอช 9.2 แต่ที่พีเอชนี้โลหะอื่นกลับเหลือในปริมาณสูงกว่าที่พีเอช 10.5

Patterson et al. (12) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการตกตะกอนโลหะหนักในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะคาร์บอเนตในการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ สังกะสี นิเกิล แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้โซดาไฟและกรดไนตริกเป็นสารปรับพีเอช และใช้โซเดียมคาร์บอเนตเติมเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอเนตในน้ำที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า

- 1) ระบบคาร์บอเนตกำจัดสังกะสีได้น้อยกว่าระบบไฮดรอกไซด์ที่พีเอชเดียวกัน และที่พีเอชต่ำกว่า 10.0 ไม่เกิดตะกอนของซิงค์ไฮดรอกไซด์
- 2) พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีของระบบไฮดรอกไซด์คือ 9.5 ให้ปริมาณสังกะสีละลายเหลือต่ำสุดคือ 0.25 มก./ล. และพีเอชที่เหมาะสมของระบบคาร์บอเนตคือ 10.0 ให้ค่าสังกะสีละลายเหลือต่ำสุดคือ 0.60 มก./ล.
- 3) ที่พีเอชเดียวกันในช่วงพีเอชต่ำกว่า 7.5 ระบบคาร์บอเนตสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าระบบไฮดรอกไซด์ แต่ที่พีเอชสูงกว่านั้นระบบไฮดรอกไซด์จะกำจัดได้ดีกว่า
- 4) ตะกอนที่เกิดจากระบบคาร์บอเนตหนาแน่น และอัดตัวดีกว่าระบบไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณตะกอนน้อยกว่าและแยกตะกอนออกจากน้ำได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังมีความสามารถในการรีดน้ำออกจากตะกอนได้ดีกว่าระบบไฮดรอกไซด์

Wing และ Rayford (13) ทดลองใช้สาร ISX (Insoluble Strach Xanthate) ในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ได้ผลดี เมื่อความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียไม่เกิน 100 มก./ล. สาร ISX เป็นสารประกอบที่เตรียมขึ้นจากแป้งโดยการทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ และคาร์บอนไดซัลไฟด์ มีการเติมแมกนีเซียมซัลเฟตเพื่อช่วยความมีเสถียรของสาร ISX สาร ISX จะทำหน้าที่เสมือนสารแลกเปลี่ยนไอออนโดยมีการแทนที่ไอออนโลหะหนักกับไอออนโซเดียมหรือไอออนแมกนีเซียมโดยเติมเป็นผงหรือเป็นน้ำตะกอนก็ได้ การทำงานของสาร ISX เกิดได้ดีที่พีเอช 3-11 และดีที่ลุดที่พีเอชเท่ากับ 7 ตะกอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะตกตะกอนได้เร็วและสามารถรีดน้ำออกได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีลักษณะคงตัวและไม่กัดเซาะโลหะ จากการทดลองพบว่าสาร ISX สามารถกำจัดโลหะต่างๆ ได้ดี เช่น สังกะสี ในน้ำเสีย ลดลงจากความเข้มข้น 32.69 มก./ล. เหลือ 0.32 มก./ล. โดยใช้สาร ISX 0.32 ก./ล. และ โครเมียม (III) ลดลงจากความเข้มข้น 26.00 มก./ล. เหลือ 0.02 มก./ล. โดยใช้สาร ISX 0.64 ก./ล. นอกจากนี้ยังพบว่าสาร ISX สามารถกำจัดทองแดง ได้ผลดี แม้ว่า มีคอปเปอร์แอมโมเนีย ซึ่งเป็นสารเชิงซ้อนอยู่ในน้ำเสียก็ตาม

เลิศชัย เจริญรัฐรักษ์ และสุพจน์ เลิศธนาไพจิตร (14) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีกับน้ำสังเคราะห์ที่มีพีเอช 1.9 และความเข้มข้นของสังกะสี แคลเซียม แมงกานีส และแมกนีเซียมเท่ากับ 450, 150, 1058 และ 3154 มก./ล. ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนด้วยปูนขาวเท่ากับหรือมากกว่า 9.5 สามารถลดปริมาณโลหะหนักลงจนได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งกระทรวงอุตสาหกรรมและหากใช้สารโพสิเมอร์ในปริมาณ 0.5 มก./ล. ร่วมกับปูนขาวจะสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ในการกำจัดขึ้นที่สองพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการใช้ปูนขาวเท่ากับหรือมากกว่า 9.5 ดังเดิม ความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักมากกว่า 250 มก./ล.

Campbell et al. (15) ได้ศึกษาการรีดิวส์โครเมียม (VI) และกำจัดโครเมียมทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีผง โดยเปรียบเทียบการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเฟอร์รัสซัลไฟด์เป็นสารรีดิวส์ ผลการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณ 1.5 เท่าของค่าความต้องการทางทฤษฎีสามารถรีดิวส์โครเมียม (VI) จากความเข้มข้น 250 มก./ล. เหลือ 0.5 มก./ล. และการใช้เฟอร์รัสซัลไฟด์ 1.3 เท่าของค่าความต้องการทางทฤษฎีสามารถรีดิวส์โครเมียม (VI) เหลือ 0.2 มก./ล. เมื่อเปรียบเทียบราคาสารเคมีพบว่าเฟอร์รัสซัลไฟด์สิ้นเปลืองกว่าและยังเกิดตะกอนมากกว่าการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถึง 50% นอกจากนี้ยังพบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 7 การใช้เฟอร์รัสซัลไฟด์ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีพิษและการเติมสารโพสิเมอร์ประจุลบปริมาณ 1-3 มก./ล. ทำให้ตะกอนอัดตัวได้ดีขึ้นและน้ำใส

จากถังตกตะกอนมีปริมาณสารแขวนลอยต่ำกว่า 30 มก./ล.

Taylor และ Quasin (16) ได้ทดลองเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานซูบโครเมียมโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารรีดิวซ์และกรดซัลฟูริกในการควบคุมพีเอช กรณีที่ศึกษาได้แก่ การควบคุมพีเอชที่ 2.0 และ 4.5 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 และ 90 นาที ระบบปิดและระบบเปิด จากการทดลองพบว่า

- 1) ระบบเปิดสิ้นเปลืองโซเดียมซัลไฟด์ในการทำปฏิกิริยามากกว่าระบบปิดประมาณ 80% ทั้งนี้เพราะออกซิเจนในอากาศออกซิไดส์โซเดียมซัลไฟด์
- 2) ระบบปิดที่พีเอช 4.5 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที สามารถรีดิวซ์โครเมียมได้ผลดีโดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดในทุกกรณี เนื่องจากป้องกันออกซิเจนในอากาศได้และใช้ต่างในการปรับพีเอชเพื่อตกตะกอนโครเมียม(III) น้อยกว่าที่พีเอช 2.0
- 3) ในระบบปิดอัตราการรีดิวซ์โครเมียมที่พีเอช 2.0 เร็วกว่าที่พีเอช 4.5 ถึง 9 เท่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากัน
- 4) ออกซิเจนที่ละลายอยู่เดิมในน้ำเสียมิผลต่อความสิ้นเปลืองโซเดียมซัลไฟด์น้อยมากเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโครเมียม(VI) ในปริมาณสูง

Arellano (17) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้กระเบื้องซึ่งทำมาจากแผ่นเหล็กชุบดีบุกและเฟอร์รัสซัลเฟตกับโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ในการรีดิวซ์โครเมียมในกรดโครมิก โดยศึกษาผลของพื้นที่ผิวกระเบื้อง ปริมาณสารรีดิวซ์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าดีบุกที่ผิวกระเบื้องสามารถรีดิวซ์โครเมียมได้ดี โดยสามารถลดความเข้มข้นโครเมียมจาก 1733 มก./ล. เหลือ 176.3, 40.0 และ 0.0 มก./ล. ที่เวลาทำปฏิกิริยา 12, 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ ข้อมูลการทดลองไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกระเบื้องกับอัตราการรีดิวซ์ได้ การใช้เฟอร์รัสซัลเฟต 2.25 เท่าและโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ 1.75 เท่าของค่าความต้องการสารเคมีทางทฤษฎีสามารถรีดิวซ์โครเมียมได้สมบูรณ์ใน 7 และ 5 นาทีของเวลาทำปฏิกิริยาตามลำดับ โดยใช้กรดซัลฟูริกในการควบคุมพีเอชเท่ากับ 2.0 ตลอดปฏิกิริยา