

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.1 ลักษณะทั่วไปของฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า

โดยทั่วไปกระบวนการในการผลิตเหล็กกล้าโดยใช้เตาอาร์กไฟฟ้าจะมีลักษณะคล้ายกัน คือ จะเริ่มจากการป้อนวัตถุดิบ เช่น เศษเหล็ก, หินปูน (Limestone), ปูนขาว (Burnt lime) และเฟอร์โรอัลลอยต่างๆ เข้าไปในเตาทางด้านบน แต่ในปัจจุบันได้เริ่มมีเทคโนโลยีในการป้อนวัตถุดิบเข้าทางด้านข้างเตาอย่างต่อเนื่องด้วยระบบสายพาน จากนั้นแท่งอิเล็กโตรดจะถูกเลื่อนลงมาจากด้านบนผ่านช่องหลังคาเตาเพื่อทำการอาร์กให้ได้อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหล็กประมาณ 1600 องศาเซลเซียส

ฝุ่นจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตตั้งแต่การป้อนเศษเหล็ก, การเทน้ำเหล็ก, การเติมเฟอร์โรอัลลอย, การพ่นออกซิเจนและในช่วงระหว่างการหลอม โดยฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าเหล่านี้จะประกอบไปด้วยสังกะสี, ตะกั่ว, แคดเมียม, เหล็ก และโครเมียม เป็นต้น โดยจะอยู่ในก๊าซร้อนที่ออกมาจากเตาเมื่ออุณหภูมิของก๊าซลดต่ำลงก็จะกลายเป็นฝุ่นออกไซด์ต่างๆ ซึ่งจะถูกดักไว้ด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่นแบบถุงกรอง องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจะมีความแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ถูกป้อนเข้าไปในกระบวนการผลิต ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหลายโรงงานจะเห็นว่าฝุ่นเตาอาร์กมีเหล็กและสังกะสีเป็นองค์ประกอบหลักและมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากการใช้เศษเหล็กที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ฝุ่นเตาอาร์กจากโรงงานผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมมีโครเมียมและนิกเกิลสูงเนื่องจากใช้เศษเหล็กที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียมและนิกเกิลเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ถ้าใช้เศษเหล็กที่เป็นพวกเหล็กชุบสังกะสีเป็นส่วนผสมมากก็จะมีปริมาณสังกะสีในฝุ่นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยมวล)					แหล่งที่มา	เอกสารอ้างอิง
เหล็ก	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม	แคลเซียม		
19.73	24.87	2.84	0.1	13.88	Chaparral Steel (Texas)	(7)
16.55	27.8	3.22	0.07	11.5	CO-steel Lasco, Canada	(8)
35.1	15.4	1.5	0.028	-	โรงงานผลิตเหล็กคาร์บอนด้วยเตาอาร์กไฟฟ้าในสหรัฐอเมริกา จำนวน 25 โรงงาน	(8)
28.5	19	2.1	<0.01	-	โรงงานผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนในสหรัฐอเมริกาจำนวน 52 โรงงาน	(8)

โดยทั่วไปสังกะสีที่อยู่ในฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าจะอยู่ในรูปของสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ประมาณ 50 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือมักอยู่ในรูปซิงก์เฟอร์ไรต์ ($ZnFe_2O_4$) นอกจากนี้ อาจจะมีบางส่วนซึ่งอยู่ในรูปของซิลไฟด์, ซิลิเกตหรืออะลูมิเนต ส่วนเหล็กมักจะอยู่ในรูปแมกเนไทต์ (Fe_3O_4) เป็นหลัก สำหรับตะกั่วมักจะอยู่ในรูปตะกั่วออกไซด์ (PbO) เหมือนกับสังกะสี⁽⁸⁾

ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าจำนวนมากพบว่า ฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้ามีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนกระทั่งใหญ่กว่า 300 ไมครอน ขนาดของฝุ่นโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 6 ไมครอน ส่วนรูปร่างของฝุ่นจะเป็นทรงกลมเป็นหลัก แต่ก็มีบางส่วนเป็นรูปทรงเหลี่ยม เนื่องมาจากการแตกหักของฝุ่นรูปทรงกลม เม็ดฝุ่นที่เป็นทรงกลมบางส่วนจะมีฟองอากาศอยู่ตรงกลาง ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนสถานะและปกติเม็ดฝุ่นเหล่านี้มักจะไม่เกาะติดกัน⁽⁹⁾

2.2 กระบวนการในการจัดการฝุ่น

2.2.1 การปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมี (Chemical Stabilization)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากโรงงานผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้า
ไร้สนิมในสหรัฐอเมริกา ⁽⁸⁾

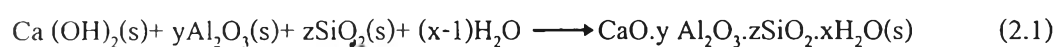
ธาตุ	ฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจากโรงงานผลิตเหล็กกล้า คาร์บอน (% โดยมวล)	ฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าจากโรงงานผลิต เหล็กกล้าไร้สนิม (% โดยมวล)
เหล็ก	24.9-46.9	22.2-35.9
สังกะสี	11.12-26.9	1.77-6.22
ตะกั่ว	1.09-3.81	0.23-0.78
แคดเมียม	0.03-0.15	0.006-1.79
โครเมียม	0.06-0.58	2.01-10.1
นิกเกิล	0.01-0.12	0.15-3.34
โมลิบดีนัม	<0.02-0.08	0.37-1.46
มังกานีส	2.46-4.60	2.36-4.59
แมกนีเซียม	0.77-2.93	1.70-4.74
ทองแดง	0.06-2.32	0.09-1.26
แคลเซียม	1.85-10.0	1.76-6.93
ซิลิกอน	1.35-2.49	1.36-4.83
คลอรีน	0.51-2.36	0.47-1.17
ฟลูออไรด์	0.01-0.88	1.36-4.83
โปแตสเซียม	0.06-0.88	0.80-5.07
โซเดียม	0.29-2.31	0.47-4.60

กระบวนการปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมี ⁽¹⁰⁾ ใช้กับฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าที่มีปริมาณธาตุสังกะสีต่ำ เพราะเมื่อนำมาแยกสังกะสีออกจากฝุ่นจะไม่คุ้มกับการลงทุน สำหรับกระบวนการนี้เป็นการเติมสารประกอบบางตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับของเสียมีพิษให้กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปถมที่หรือทำปุ๋ย เป็นต้น

โดยปกติการปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมีของฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจะใช้หินปูน, สารประกอบบางตัว, ความชื้นและให้เวลาที่เพียงพอเพื่อให้เกิดสารประกอบที่ต้องการ โดยสารประกอบนี้จะ

เป็นของแข็งที่มีโครงสร้างแข็งแรงไม่ถูกทำลายได้โดยง่าย สามารถนำไปถมที่โดยไม่มีปัญหาของเสียมีพิษละลายลงสู่ลำน้ำใต้ดิน

ตัวอย่างกระบวนการในการปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมีของฝุ่นเตาอาร์คโดยใช้หินปูน, जिईถ้าจากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและฝุ่นเตาอาร์คจะทำให้เกิดสารประกอบโครงสร้างเชิงซ้อนของปูนขาว, อะลูมินาและซิลิกาที่อยู่ในวัตถุดิบตั้งปฏิกิริยาเคมีที่ 2.1



จากปฏิกิริยานี้จะเกิดผลผลิตที่มีโครงสร้างแข็งแรงหุ้มรอบฝุ่นเตาอาร์คซึ่งสามารถช่วยป้องกันไม่ให้ของเสียมีพิษรั่วซึมออกไปได้

สำหรับกระบวนการในการปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมีที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Bethlehem Steel ที่เรียกว่า กระบวนการ Super Detox ได้มีการทำมาตั้งแต่ปี 1989 ที่ Northwestern Steel และที่บริษัท Wire ที่มีเมืองสเตอร์ริงค์ มลรัฐอิลลินอยด์

2.2.2 การหลอมเป็นแก้ว

สำหรับกระบวนการหลอมเป็นแก้วเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถจัดปัญหาเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมได้โดยการนำฝุ่นจากเตาอาร์คไฟฟ้ามาทำการหลอมเป็นแก้ว กระบวนการนี้พัฒนาขึ้นโดย Cleveland Fluid Systems Co. และ Inorganic Recycling Co. เรียกว่า กระบวนการ Inorganic Recycling⁽¹¹⁾ ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

(1) การผสมและการเกิดปฏิกิริยา (Mixing, Blending and Reaction)

วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกป้อนเข้าไปในกระบวนการครั้งละ 1 ถึง 5 ตัน จากนั้นเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างซิลิเกต โดยทั่วไปจะใช้ทรายซิลิกาหรือดินเป็นต้น ส่วนชนิดของโครงสร้างซิลิเกตของผลผลิตที่เกิดขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสารเคมีที่เติมเข้าไป หลังจากทำการผสมเรียบร้อยแล้ววัตถุดิบเหล่านี้จะถูกป้อนไปยังส่วนการหลอมเป็นแก้ว

(2) การหลอมเป็นแก้ว

ในส่วนนี้ จะใช้เตาหลอมที่สามารถป้อนพลังงานให้กับปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ อุณหภูมิในเตาหลอมจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ ปกติจะอยู่ในช่วง 820 ถึง 1370 องศาเซลเซียส เมื่อวัตถุดิบถูกหลอมแล้วจะถูกส่งผ่านไปทำการหล่อเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น กระจก แวนดา เป็นต้น

(3) ระบบดักฝุ่น

ส่วนฝุ่นขนาดเล็กจากเตาหลอมที่เกิดระหว่างการผลิตซึ่งดักไว้ด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่นแบบเปียกจะถูกป้อนผ่านเครื่องกรองเพื่อกรองเป็น Filter cake ⁽¹²⁾ เพื่อส่งกลับไปทำการผสมในวัตถุดิบใหม่ต่อไป

2.2.3 กระบวนการใช้ความร้อน (Pyrometallurgical Process)

กระบวนการใช้ความร้อนที่นิยมใช้มีดังต่อไปนี้

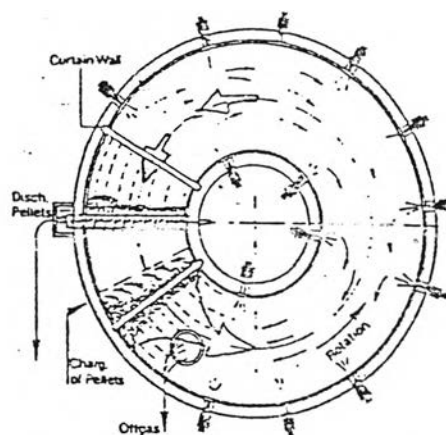
2.2.3.1 กระบวนการ Waelz kiln

เป็นกระบวนการที่ใช้ครั้งแรกในประเทศเยอรมนีในปี ค.ศ. 1923 ⁽¹³⁾ จากนั้นก็มีการนำมาใช้ในประเทศญี่ปุ่น, อิหร่าน, ตุรกี, แอฟริกาเหนือและบราซิล ในกระบวนการ Waelz kiln จะผสมฝุ่นเตาอาร์กกับคาร์บอนและฟลักซ์ โดยคาร์บอนทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ส่วนฟลักซ์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมคุณสมบัติทางเคมีและทางกลของสแลก (Slag) ที่เกิดขึ้น วัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าเตาหมุน (Rotary kiln) ที่หมุนอย่างช้าๆ เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น สังกะสี, ตะกั่วและแคดเมียมจะถูกรีดิวซ์และระเหยออกจากเตา โลหะเหล่านี้จะเกิดการออกซิไดซ์อีกครั้งเนื่องจากการพ่นอากาศภายในเตา ออกไซด์ของโลหะที่ได้จะมีสังกะสีประมาณ 52 ถึง 58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าปริมาณสังกะสีในผลผลิตค่อนข้างต่ำ ⁽²⁾ นอกจากนี้ยังมีธาตุมีค่าพวกตะกั่วและแคดเมียมปนไปด้วย กระบวนการดังกล่าวมักเรียกว่า Single-Stage Waelz Kiln Process

กระบวนการ Waelz kiln นี้ได้มีการพัฒนาต่อมาโดย Horsehead Resources Development Company (HRDC) ในสหรัฐอเมริกาและ Zinc National ในเม็กซิโกเรียกว่า Two-Stage Waelz Kiln Process ⁽⁴⁾ ซึ่งเป็นกระบวนการเกี่ยวกับการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าเหมือนเดิมโดยจะทำการป้อนฝุ่นเข้าในเตาดำแรกเพื่อที่จะแยกสังกะสี, ตะกั่ว, แคดเมียมและคลอไรด์ออก ฝุ่นที่เกิดจากเตาดำแรกจะถูกนำไปเข้ากระบวนการในเตาดำที่สองเพื่อให้ได้สังกะสีออกไซด์, ตะกั่วคลอไรด์, แคดเมียมคลอไรด์ จากนั้นจึงนำไปทำการแยกตะกั่วและแคดเมียมต่อไป

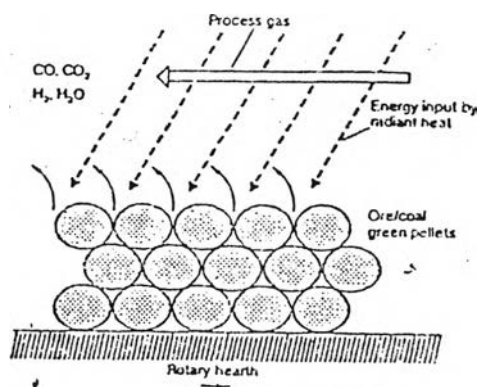
2.2.3.2 กระบวนการ Inmetco

ทางบริษัท Inco ได้พัฒนากระบวนการ Inmetco ⁽¹⁴⁾ ตั้งแต่ช่วงกลางทศวรรษที่ 1970 ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ในช่วงปี 1980 ได้ใช้กระบวนการนี้เพื่อผลิตเหล็กพูน และใช้ในการแยกสังกะสีออกจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยกระบวนการ Inmetco นี้จะเริ่มจากการผสมฝุ่นจากเตาอาร์กกับผงถ่าน จากนั้นวัตถุดิบเหล่านี้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปั้นเม็ด (Pelletizing Disc)



รูปที่ 2.1 ลักษณะ Rotary Hearth Furnace ⁽¹⁴⁾

จากนั้นจึงถูกลำเลียงไปยังเตา Rotary Hearth Furnace ซึ่งเป็นขั้นตอนการรีดิวซ์โดยใช้อุณหภูมิ 1200-1250 องศาเซลเซียส จะได้เหล็ก 90-92 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสังกะสีและตะกั่วจะระเหยออกจากเตา ถูกออกไซด์และถูกดักด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่น ฝุ่นที่ได้จะนำไปผ่านกระบวนการต่อไปเพื่อให้ได้สังกะสีบริสุทธิ์

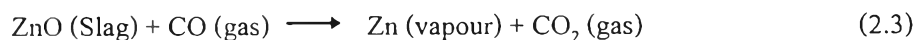
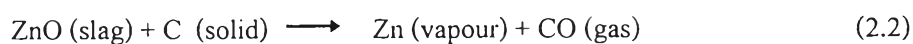


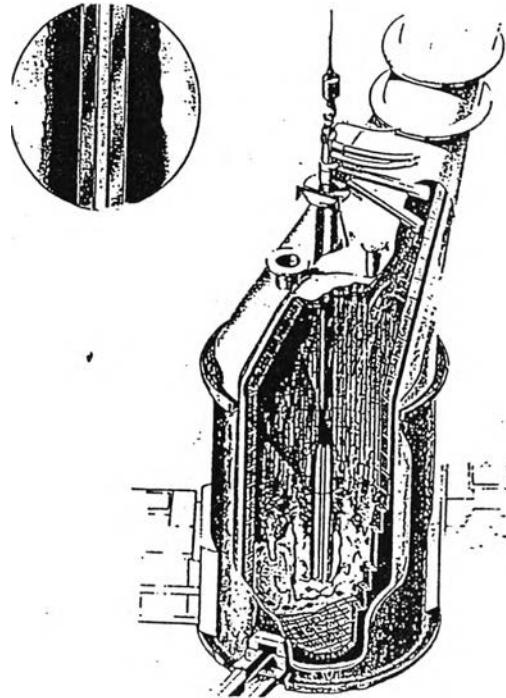
รูปที่ 2.2 กระบวนการ Inmetco ⁽¹⁴⁾

2.2.3.3 กระบวนการ Ausmelt

กระบวนการ Ausmelt ⁽¹⁵⁾ เป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่าสเถียรที่ได้ไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ฝุ่นสังกะสีและตะกั่วออกไซด์มีความเหมาะสมที่จะแยกสังกะสีและตะกั่วออกมา ความสามารถในการผลิตประมาณ 50,000 ตันของฝุ่นเตาอาร์คไฟฟ้าต่อปี

เตา Ausmelt จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีช่องในการป้อนวัตถุดิบ, ทางปล่อยก๊าซและสเถียรดังรูปที่ 2.3 อากาศ, ออกซิเจนบริสุทธิ์และเชื้อเพลิงจะถูกพ่นเข้าเตาผ่านท่อทางด้านบน ส่วนวัตถุดิบ, ฟลักซ์และตัวรีดิวส์ จะถูกป้อนเตาทางด้านบนผ่านช่องป้อนวัตถุดิบเช่นกัน โดยไม่มีการผ่านกระบวนการใดๆ มาก่อน นอกจากในกรณีที่มีการใช้วัตถุดิบป่นเม็ดด้วยน้ำซึ่งอาจจะต้องทำให้แห้งก่อน สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นพวกถ่านหินละเอียด, น้ำมันเตา, ก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 1250-1400 องศาเซลเซียส สังกะสีออกไซด์จะถูกรีดิวส์เป็นโลหะและระเหยออกไป ดังสมการ





รูปที่ 2.3 ลักษณะเตาที่ใช้ในกระบวนการ Ausmelt ⁽¹⁵⁾

ไอสังกะสีจะทำปฏิกิริยากับอากาศกลายเป็นออกไซด์ นอกจากสังกะสีแล้วในฝุ่นที่ได้ยังประกอบด้วยตะกั่ว, เงิน, สารหนู, แคดเมียม, คลอรีน, ฟลูออรีน, โปแตสเซียมและโซเดียม ซึ่งจะถูกผ่านไปยังเครื่องดักฝุ่นก่อนปล่อยสู่อากาศ สำหรับตัวอย่างฝุ่นที่ดักได้มีปริมาณสังกะสี 58 เปอร์เซ็นต์ ตะกั่ว 12 เปอร์เซ็นต์ และเงิน 190 ส่วนในล้านส่วน (ppm.) ส่วนสเล็กที่ได้จากเตาตัวแรกจะประกอบด้วยสังกะสี 4.5 เปอร์เซ็นต์, ตะกั่ว 0.4 เปอร์เซ็นต์และเงิน 25 ppm. จะถูกลำเลียงจากเตาแรกไปยังเตา Ausmelt ตัวที่สองเพื่อที่จะแยกสังกะสีออกจากสเล็กอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเตา Ausmelt ตัวที่สองซึ่งมีอุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสนี้ใช้เฉพาะถ่านหินและอากาศในการเผาไหม้เท่านั้นไม่มีการใช้ออกซิเจนเข้าช่วย ผลผลิตที่ได้จากเตา Ausmelt ตัวที่สอง

คือฝุ่นสังกะสีที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 73 เปอร์เซ็นต์, ตะกั่ว 6 เปอร์เซ็นต์ และเงิน 270 ppm. ส่วนสแล็กที่ได้จะมีสังกะสีต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว 0.03 เปอร์เซ็นต์

2.2.3.4 กระบวนการ Flame Reactor

กระบวนการ Flame Reactor⁽²⁾ ถูกนำมาใช้จัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าที่บริษัท North Star Steel ซึ่งตั้งอยู่ที่เมืองเบอร์มิงแฮม รัฐเท็กซัส กระบวนการดังกล่าวเริ่มจากการป้อนฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าและออกซิเจนเข้าไปพร้อมกับถ่านหินเพื่อทำปฏิกิริยากันใน Cyclone reactor จะได้ผลผลิตที่มีสังกะสีออกไซด์ปนมากับตะกั่ว, แคลเซียมและเฮไลต์ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการแยกสังกะสีเพื่อให้ได้สังกะสีบริสุทธิ์อีก ส่วนสแล็กที่ได้จะประกอบด้วยธาตุเหล็กเป็นหลักและไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม แต่กระบวนการนี้ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากต้นทุนการผลิตสูง

2.2.3.5 กระบวนการ Met Wool

กระบวนการ Met Wool พัฒนาขึ้นโดย Environscience Inc⁽²⁾ กระบวนการนี้จะเริ่มจากการปั้นเม็ด (Briquetting) โดยผสมฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้ากับฟลักซ์ จากนั้นจะป้อนเข้าเตาดัง (Shaft Furnace) หรือ เตาคุโปลา (Cupola Furnace) โดยใช้ถ่านโค้กหรือ Aluminium Portliner เป็นตัวรีดิวซ์ ผลผลิตที่ได้จะเป็นเหล็กพิกและสแล็กที่มีเหล็กต่ำส่วนก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกทำให้เย็นและผ่านอุปกรณ์ทำความสะอาดเพื่อดักสังกะสี, ตะกั่วและแคลเซียม กระบวนการนี้เป็นที่สนใจทั่วไปและผ่านการทดสอบแล้ว

2.2.3.6 กระบวนการ ZTT Ferrolime

กระบวนการ ZTT Ferrolime⁽²⁾ เป็นกระบวนการที่ Babcock International ได้พัฒนาขึ้นจากกระบวนการ 2 FA และกระบวนการนี้ได้เริ่มใช้ที่เมืองคาร์เวลล์ มลรัฐเท็กซัส ตั้งแต่ปี 1994 ขั้นตอนการผลิตจะเริ่มจากการปั้นเม็ดฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าก่อนที่จะป้อนเข้าเตาหมุน (Rotary Kiln) โดยใช้ถ่านหินและผงถ่านเป็นตัวรีดิวซ์สังกะสีออกไซด์ในฝุ่นเตาอาร์ก สังกะสีจะระเหยออกมาและจะเกิดการออกซิไดซ์อีกครั้ง ก่อนถูกดักด้วยอุปกรณ์เก็บฝุ่นพร้อมด้วยตะกั่ว, แคลเซียมและเฮไลต์ ผลผลิตที่ได้จะถูกนำไปจัดพวกเฮไลต์ออกไป

2.2.3.7 กระบวนการ Laclede Steel

กระบวนการ Laclede Steel ⁽²⁾ นี้ได้พัฒนามาจากโรงงาน Elkem ซึ่งใช้ระบบเตาอาร์กไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยเริ่มจากการป้อนฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าและตัวรีดิวส์ เข้าไปในเตาอาร์กไฟฟ้าที่เป็นระบบปิด สังกะสี, ตะกั่วและแคดเมียมในฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจะถูกรีดิวส์ กลายเป็นโลหะและระเหยขึ้นมา และถูกทำให้เย็นตัวเป็นโลหะสังกะสีใน Zinc Sprash Condenser.

กระบวนการนี้ได้เริ่มมีการใช้จริงที่ Laclede แต่คุณภาพของสังกะสีที่ได้ไม่ดีไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการชุบสังกะสีในโรงงานได้ทำให้วิธีนี้จึงไม่มีผู้ประกอบการรายใดนำมาใช้อีก

2.2.3.8 กระบวนการ All Met

กระบวนการ All Met ⁽²⁾ นี้ถูกพัฒนาโดย Tervose ในมลรัฐเพนซิลเวเนียในปี 1994 และเป็นการรวมกระบวนการของ Inmetco ซึ่งใช้ Rotary Hearth กับกระบวนการ Tetronics ซึ่งใช้เทคโนโลยีเกี่ยวกับพลาสมา (Plasma) สำหรับขั้นตอนการผลิตจะเริ่มจากการป้อนฝุ่นจากเตาอาร์กไฟฟ้าและตัวรีดิวส์ เข้าเครื่องปั้นเม็ด (Pelletizer) ก่อนจะส่งผ่านไปยังเตา Rotary Hearth ในขั้นตอนนี้เหล็กออกไซด์จะถูกรีดิวส์และเหล็กบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นเหล็กคาร์ไบด์ สามารถนำไปใช้ได้ อีก ส่วนโลหะตัวอื่น เช่น สังกะสี แคดเมียมและตะกั่ว หลังจากถูกรีดิวส์แล้วจะเกิดการออกซิไดซ์ใหม่จากนั้นจะถูกป้อนเข้าเตาอาร์กแบบพลาสมาพร้อมกับคาร์บอน ซึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้จะถูกรีดิวส์เป็นโลหะอีกครั้ง ส่วนพวงฮาโลเจนจะระเหยกลายเป็นไอออกไป สำหรับไอโลหะสังกะสี, แคดเมียมและตะกั่วภายหลังเย็นตัวแล้วสามารถนำไปใช้ในโรงงานชุบสังกะสีได้

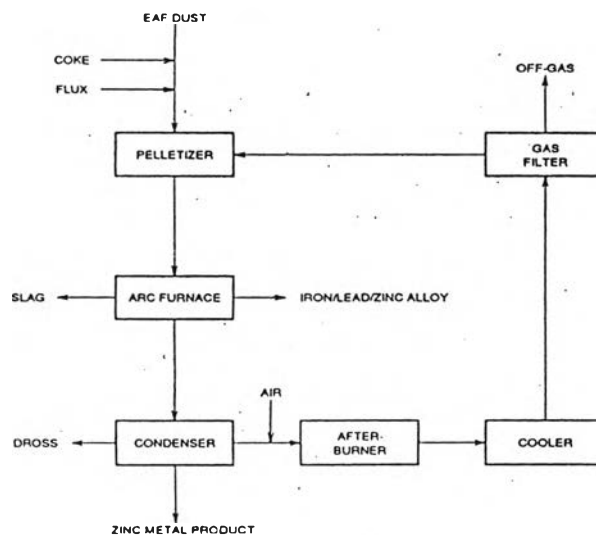
กระบวนการนี้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปและเริ่มมีการใช้จริงตั้งแต่ปี 1997 ในสหรัฐอเมริกา

2.2.3.9 กระบวนการ IBDR-ZIPP

กระบวนการ Iron Bearing Dust Recovery (IBDR) - Zinc Iron Plasma Process (ZIPP)⁽²⁾ เป็นกระบวนการที่ต้องการแยกสังกะสีและเหล็กออกจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคของการใช้พลาสมากับเตาดั่ง (Vertical Shaft Furnace) โดยนำฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า ผงถ่านมาผสมกับฟลักซ์ป้อนเข้าเตาดั่ง จากนั้นจึงให้ความร้อนด้วยพลาสมา ซึ่งจะทำให้เหล็กออกไซด์ถูกรีดิวซ์ได้ เหล็กฟลัก ซึ่งสามารถนำไปหลอมใหม่ในเตาอาร์กไฟฟ้าหรือขายได้ ส่วนฝุ่นที่ได้จากกระบวนการหลอมนี้จะเป็นพวกสังกะสีออกไซด์และตะกั่วออกไซด์สามารถนำไปผ่านกระบวนการในการแยกเป็นสังกะสีบริสุทธิ์ได้ กระบวนการนี้เริ่มมีการผลิตในปี 1997 ที่ฮามิลตัน ในสหรัฐอเมริกา มีกำลังการผลิต 77.000 ตันต่อปี

2.2.3.10 กระบวนการ Elkem

กระบวนการ Elkem⁽¹⁶⁾ ดังในรูปที่ 2.4 เริ่มจากการนำฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า, ถ่านโค้กและ



รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการ Elkem⁽¹⁶⁾

ฟลักซ์มาผ่านกระบวนการปั้นเม็ด (Pelletizing) จากนั้นป้อนเข้าสู่เตาอาร์กไฟฟ้าและให้ความร้อนถึง 1400 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการรีดิวซ์โลหะต่างๆ สังกะสีและตะกั่วจะระเหยออกจากระบบและจะถูกทำให้เย็นตัวใน Splash Condenser

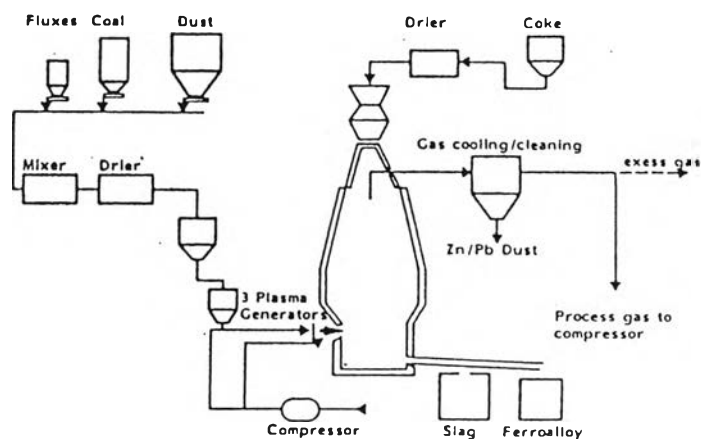
2.2.3.11 กระบวนการ Enviroplas

บริษัท Mintek และ Pyromet ในแอฟริกาใต้ได้พัฒนากระบวนการ Enviroplas⁽²⁾ ขึ้น กระบวนการนี้จะนำฝุ่นเตาอาร์คไฟฟ้าไปผ่านกระบวนการกำจัดพหุฮาโลเจนโดยกระบวนการ โลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgy) ก่อนทำให้แห้ง จากนั้นจึงป้อนเข้าเตาอาร์คไฟฟ้าแบบ พลาสมาพร้อมกับถ่านโค้ก ทำให้สังกะสีออกไซด์, ตะกั่วออกไซด์และแคดเมียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ และระเหยออกจากเตาอาร์คไฟฟ้าแบบพลาสมา ก่อนจะถูกทำให้เย็นตัวเพื่อเก็บโลหะมีค่าเหล่านี้ ส่วนสแลกที่ได้จากกระบวนการนี้ก็ไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

2.2.3.12 กระบวนการ Plasmadust

กระบวนการ Plasmadust⁽¹⁷⁾ พัฒนาขึ้นโดย SKF Steel Engineering ในประเทศสวีเดนและมีการนำมาใช้จริงในปี 1984 ที่ Lanskrona ในสวีเดนมีกำลังการผลิต 35,000 ตันต่อปี

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำฝุ่นจากเตาอาร์คไฟฟ้าซึ่งมีน้ำปนประมาณ



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการ Plasmadust⁽¹⁸⁾

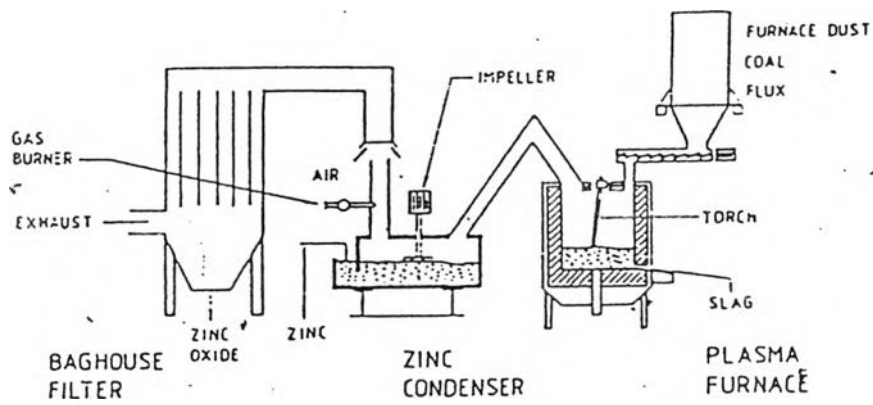
0-30 เปอร์เซ็นต์ มาเก็บในถังเก็บขนาดใหญ่จากนั้นนำมาผสมกับน้ำเพื่อให้ได้ Slurry ก่อนที่จะนำมาผสมกับถ่านหินและฟลักซ์ โดยส่วนผสมที่ได้จะเป็นของแข็ง 50 เปอร์เซ็นต์และน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่งได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจะถูกดูดเข้าเครื่องกรอง (Filter

Press) เพื่อจะลดปริมาณน้ำจาก 50 เปอร์เซ็นต์ลงมาที่ประมาณ 15 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะได้ฟิลเตอร์
 เค้กนำไปทำให้แห้ง ก่อนส่งไปเก็บในถังเก็บและป้อนเข้าในเตาดัง (Shaft Furnace) ซึ่งใช้ระบบ
 พลาสมาถึง 3 ชุดมีขนาด 6 เม็กกะวัตต์ และมีกำลังการผลิต 8-10 ตันต่อชั่วโมง ผลผลิตที่ได้จาก
 กระบวนการนี้จะเป็นน้ำเหล็กซึ่งก็จะนำไปหล่อเป็นเหล็กพิก ส่วนสแล็กจะถูกเทและทำให้เย็นตัว
 ก่อนนำไปจำหน่ายต่อไป ก๊าซที่เกิดขึ้นจากระบบมีอุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียสจะถูก
 ทำความสะอาดและทำให้เย็นตัวลงโดยสังกะสีและตะกั่วจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วลงมาที่
 อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสก่อนผ่านไปอุปกรณ์เก็บฝุ่นเพื่อคัดธาตุมีค่าไว้ โดยเฉลี่ยจากฝุ่นเตา
 อาร์ค 1 ตันจะได้สังกะสีประมาณ 200 ถึง 400 กิโลกรัม ซึ่งจะถูกล่อเป็นอินก๊อทหรือสแลป
 ขนาดประมาณ 25 กิโลกรัมเพื่อจำหน่ายต่อไป

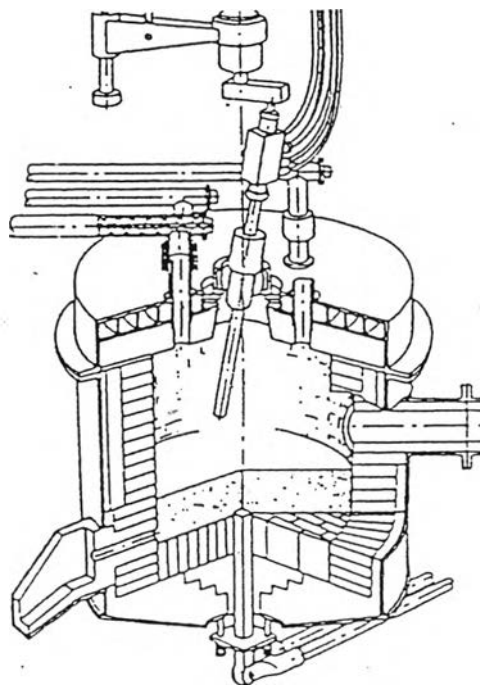
2.2.3.13 กระบวนการ Tetronics

กระบวนการ Tetronics⁽¹⁹⁾ เป็นกระบวนการที่ทางบริษัท IMS ในมลรัฐฟิลาเดลเฟีย สหรัฐ
 อเมริกา ได้เริ่มดำเนินการและได้มีการทำโรงงานทดลอง (Pilot Plant) ขึ้นที่เมืองฟาร์ริงค้อน ใน
 ประเทศอังกฤษ

สำหรับกระบวนการนี้โลหะออกไซด์ในฝุ่นเตาอาร์คไฟฟ้าจะถูกรีดิวซ์ในเตาอาร์คไฟฟ้า
 แบบพลาสมา จะได้สแล็กที่ไม่มีปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ส่วนโลหะสังกะสีและตะกั่วจะถูกแยกตัว
 ในคอนเดนเซอร์ ตามในรูปที่ 2.6 ข้อดีของกระบวนการนี้คือวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบไม่ต้องมีการ
 ผ่านกระบวนการปั้นเม็ด (Pelletizing) อุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการคือ เตาพลาสมา (Plasma
 Furnace), หัวพลาสมา (Plasma torch) และอุปกรณ์ควบแน่นสังกะสี (Zinc Condenser) ในส่วน
 ของเตาพลาสมาจะใช้ระบบ Expanded - Processing Plasma (EPP) มีขนาด 3 เม็กกะวัตต์ โดยเตา
 จะเป็นระบบปิดแต่จะมีช่องระบายก๊าซร้อนและมีช่องสำหรับป้อนฝุ่นเตาอาร์คไฟฟ้า, ตัวรี
 ดิวซ์และฟลักซ์ ทางด้านบนของเตาดังในรูปที่ 2.7 ส่วนหัวพลาสมา ทำหน้าที่เป็นแท่งคาโทดจะมี
 ระบบน้ำหล่อเย็นโดยรอบ ส่วนปลายของหัวพลาสมาทำด้วยทังสแตน จะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า
 โดยผ่านท่อทองแดง ในส่วนนี้จะมีระบบหล่อเย็นอยู่ภายนอก สำหรับอุปกรณ์ควบแน่นสังกะสี
 จะประกอบไปด้วยใบพัดแกรไฟต์ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างสังกะสีเหลวและหมุนทำให้เกิดละอองของ
 สังกะสีเพื่อดึงสังกะสีที่จะระเหยออกมาจากระบบและเป็นตัวหล่อเย็นด้วย



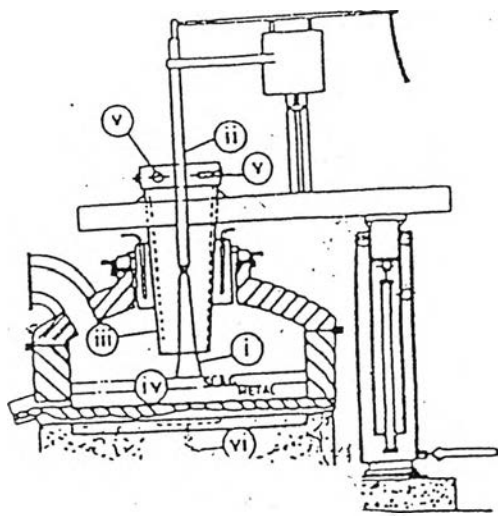
รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการ Tetronics⁽⁸⁾



รูปที่ 2.7 ลักษณะเตาที่ใช้ในกระบวนการ Tetronics⁽⁸⁾

2.2.3.14 กระบวนการ Hi-plas

Davy McKee ได้พัฒนากระบวนการ Hi-plas⁽²⁰⁾ ตั้งแต่ปี 1980 โดยใช้เตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมาดังในรูปที่ 2.8 โดยจะเป็นระบบเตาอาร์กไฟฟ้ากระแสตรงแบบพลาสมาที่มีแท่งคาโทด



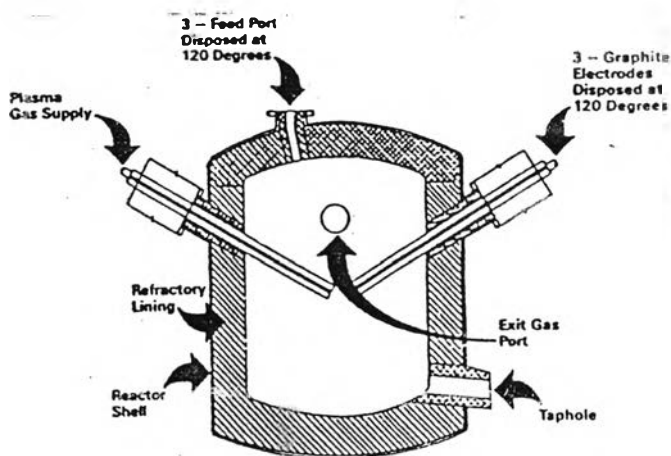
- (i) - argon stabilized DC transferred arc
- (ii) - non-consumable water cooled cathode gun
- (iii) - molten pool of reactants
- (iv) - furnace hearth
- (v) - point where reactants are injected
- (vi) - anode at bottom of the furnace

รูปที่ 2.8 ลักษณะพื้นฐานของเตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมาของ Davy McKee⁽²¹⁾

และมีแท่งคาโทดอยู่ที่ก้นเตา สารตั้งต้นจะถูกพ่นเข้าไปในเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยความเร็วสูงและได้รับความร้อนจากการอาร์ก การแผ่รังสีและการพาความร้อน ทำให้เกิดการหลอมตัวในเตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมา ส่วนก๊าซร้อนที่ระเหยออกจากเตาประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (อาจจะมีก๊าซไฮโดรเจนเมื่อใช้ถ่านหิน), สังกะสีและโลหะอื่น ๆ และบางส่วนจะเป็นฝุ่นด้วย ในกรณีที่ฝุ่นมีสังกะสีสูง ก๊าซร้อนที่ออกจากระบบก็จะมีสังกะสีมากเช่นกัน ซึ่งจะถูกลบแน่นอนเป็นโลหะในคอนเดนเซอร์

2.2.3.15 กระบวนการ Tibur Howden Extended Arc Reactor

กระบวนการ Tibur Howden Extended Arc Reactor ⁽²²⁾ ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี 1970 โดยนักวิจัยของมหาวิทยาลัยโตรอนโต ในประเทศแคนาดา กระบวนการผลิตเริ่มจากการป้อนฝุ่นเตาอาร์ก, ถ่านหินและฟลักซ์เข้าสู่เตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมาจากด้านบนของเตาผ่านบริเวณที่เกิดการอาร์ก ก่อนที่จะถูกหลอมละลาย ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปผ่านกระบวนการแยกธาตุมีค่าออก ส่วนน้ำเหล็กและสแล็กจะถูกเทออกนอกเตา ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมาในกระบวนการ Tibur Howden Extended Arc Reactor ⁽²²⁾

2.2.4 กระบวนการโลหวิทยาสารละลาย (Hydrometallurgical Process)

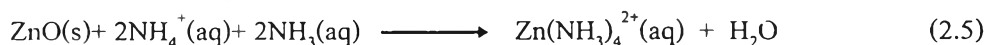
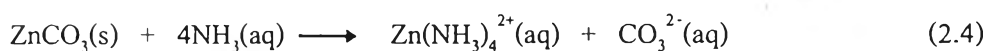
กระบวนการโลหวิทยาสารละลายเป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ในการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าได้ แต่ในปัจจุบันยังมีการนำมาใช้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการใช้ความร้อน กระบวนการโลหวิทยาสารละลายที่เป็นที่รู้จักมีดังต่อไปนี้

2.2.4.1 กระบวนการ UBC-Chaparral

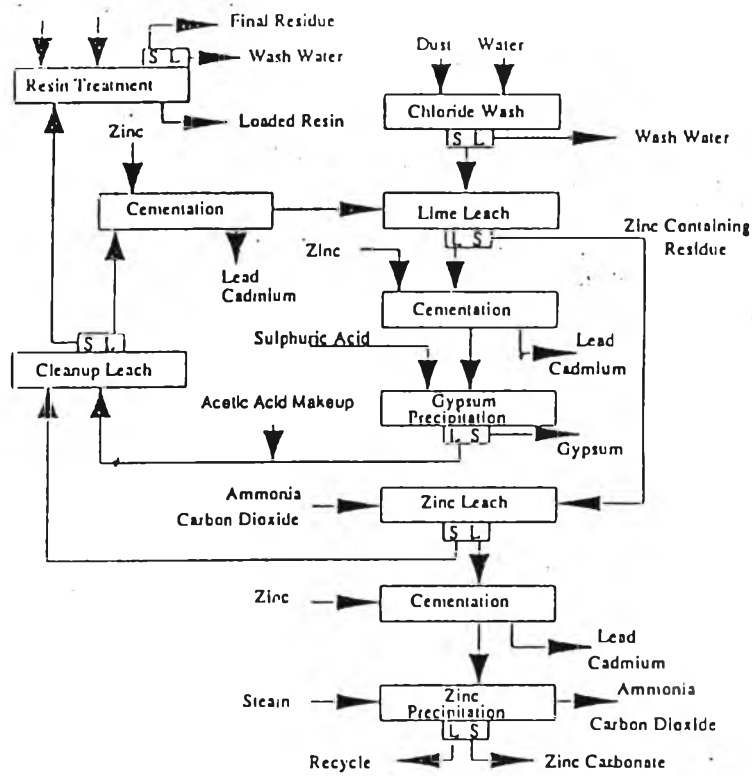
กระบวนการ UBC-Chaparral⁽²³⁾ ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยความร่วมมือระหว่าง Chaparral Steel และมหาวิทยาลัยบริติชโคลัมเบีย เพื่อจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจาก Midlothian ในมลรัฐเท็กซัส ในช่วงปี 1986 กระบวนการนี้สามารถลดการสูญเสียโลหะมีค่าจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าและได้กากของเสียที่ไม่เป็นปัญหาต่อสภาพแวดล้อม ดังแผนผังกระบวนการผลิตในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้⁽²³⁾

- (1) การขจัดคลอไรด์โดยใช้น้ำ
- (2) การขจัดแคลเซียมในสารละลายกรดอะซิติก
- (3) การละลายสังกะสีออกจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลายแอมโมเนีย
- (4) การแยกโลหะ เช่น ตะกั่วและแคดเมียมออกจากสารละลายโดยใช้สังกะสี
- (5) การตกตะกอนสังกะสีให้ได้ความบริสุทธิ์สูง

ในการขจัดคลอไรด์สามารถใช้น้ำร้อนหรือน้ำเย็นก็ได้ เนื่องจากโซเดียมคลอไรด์, โพแทสเซียมคลอไรด์และแคดเมียมคลอไรด์สามารถละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น สภาวะในการละลายด้วยน้ำร้อนนี้จะใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 33 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ส่วนการขจัดแคลเซียมจะทำการละลายโดยใช้กรดอะซิติกความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร, อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 33 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน สาเหตุที่ใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็งนี้ เนื่องจากสังกะสีจะไม่ถูกละลายด้วยกรดอะซิติกออกไปด้วยดังรูปที่ 2.11 จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการละลายสังกะสี ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้สารละลาย $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{CO}_3$ เพื่อละลายสังกะสีออกจากกากที่ได้หลังจากการละลายแคลเซียมออกไปแล้ว สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นมีดังนี้

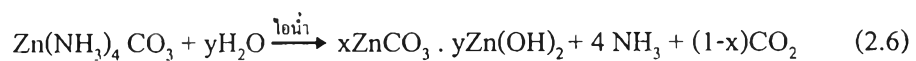


สำหรับสภาวะที่ใช้ในการละลายจะใช้ NH_3 4 โมลต่อลิตรและ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 0.75 โมลต่อลิตร จำนวน 1.5 ลิตร และใช้กากที่ผ่านการละลายแคลเซียม 600 กรัม โดยทำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลวิเคราะห์จะพบว่าซิงก์เฟอร์ไรต์ ($\text{Zn-Fe}_2\text{O}_4$) ยังคงอยู่ในกากไม่สามารถละลายออก

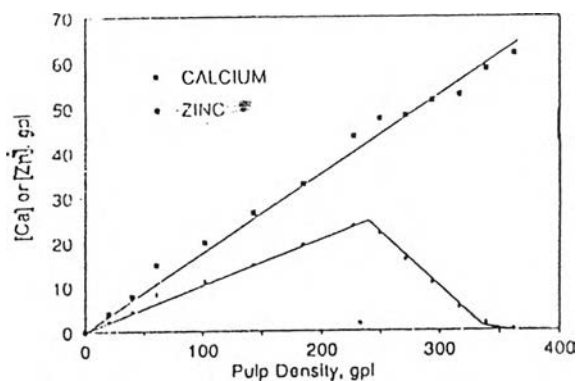


รูปที่ 2.10 แผนผังกระบวนการผลิตแบบ UBC-Chapparral ⁽²³⁾

มาได้ ส่วนตะกั่วและแคดเมียมสามารถละลายออกมาได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการ Cementation เพื่อแยกตะกั่วและแคดเมียมออกไป ก่อนที่นำไปผ่านกระบวนการตกตะกอนสังกะสี (Precipitation) ดังสมการที่ 2.6



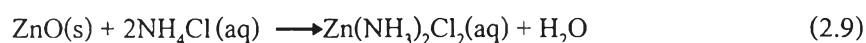
จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการกรองเพื่อแยกสารประกอบสังกะสีออกมาซึ่งพบว่าสามารถดึงสังกะสีออกมาได้ประมาณ 55 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์, ตะกั่ว 55 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์, แคดเมียม 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์และแคลเซียม 95 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์



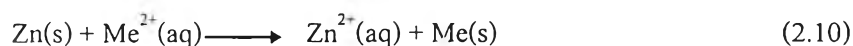
รูปที่ 2.11 ความเข้มข้นของแคลเซียมและสังกะสีกับอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส⁽²³⁾

2.2.4.2 กระบวนการ Ezinex

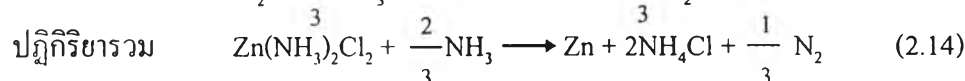
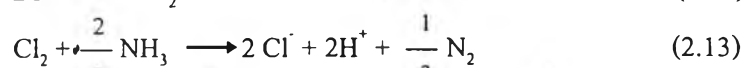
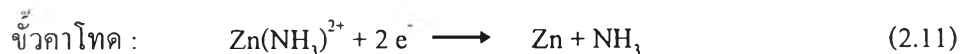
บริษัท Engitec Impianti ในประเทศอิตาลีได้พัฒนากระบวนการ Ezinex⁽¹⁴⁾ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารละลายกระบวนการหนึ่งและได้ดำเนินการผลิตจริงที่ Ferriere Nord ขนาด 10,000 ตันต่อปี โดยเริ่มการผลิตตั้งแต่กันยายนปี 1995 กระบวนการผลิตเริ่มด้วยการใช้สายพานลำเลียงแบบสกรูลำเลียงฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจากเครื่องดักฝุ่นผ่านไปยังถึงทำปฏิกิริยาการละลาย (Leaching Reactor) โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ดังสมการ



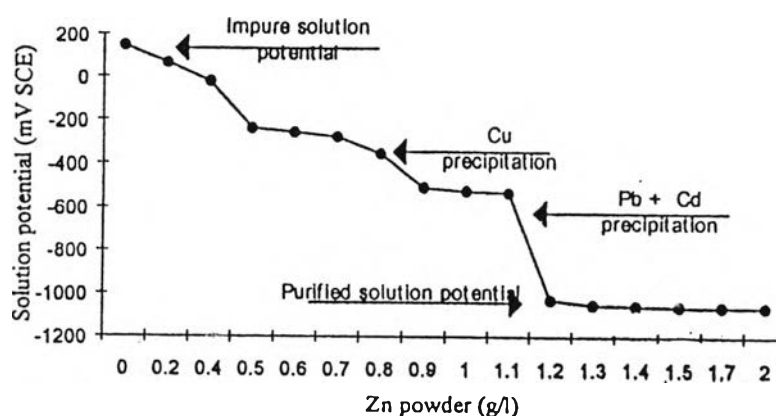
ใช้เวลาในการละลายประมาณ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส ส่วนซัลฟิดและซิงก์เฟอร์ไรต์ไม่สามารถละลายได้ จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรอง (Filter Press) เพื่อแยกกากซึ่งประกอบด้วยเหล็กออกไซด์และซิงก์เฟอร์ไรต์ออก ส่วนสารละลายที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ Cementation เพื่อแยกโลหะอื่นออกดังสมการ



โดย Me ได้แก่ ทองแดง, ตะกั่ว, แคดเมียม, นิกเกิลและเงิน จากรูปที่ 2.12 พบว่าการตกตะกอนจะมี 2 ช่วงด้วยกัน โดยช่วงแรกจะเป็นการตกตะกอนของทองแดง ช่วงที่สองจะเป็นการตกตะกอนของตะกั่วและแคดเมียม การควบคุมขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีเป็นหลัก จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผ่านกระบวนการทางไฟฟ้า (Electrolysis) โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ในขั้นตอนนี้จะได้สังกะสีที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 95 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำไปจำหน่ายให้กับอุตสาหกรรมซุบสังกะสีได้

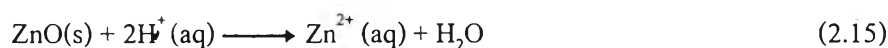


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายกับปริมาณผงสังกะสี⁽²⁴⁾

2.2.4.3 กระบวนการ Zincex

บริษัท Technical Reunidas S.A. ได้พัฒนากระบวนการ Modified Zincex (MZP) จากกระบวนการ Zincex เดิม⁽²⁵⁾ และได้เริ่มการผลิตตั้งแต่ปี 1975 ด้วยกำลังการผลิต 8,000 ตันต่อปี ต่อมาในช่วงปี 1990 ได้มีการก่อตั้งโรงงานแห่งที่สองมีกำลังการผลิต 11,500 ตันต่อปี

สำหรับขั้นตอนการผลิต (รูปที่ 2.13) เริ่มต้นจากการนำฟลูออไรด์ไฟฟ้ามาผ่านกระบวนการละลายในสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสโดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



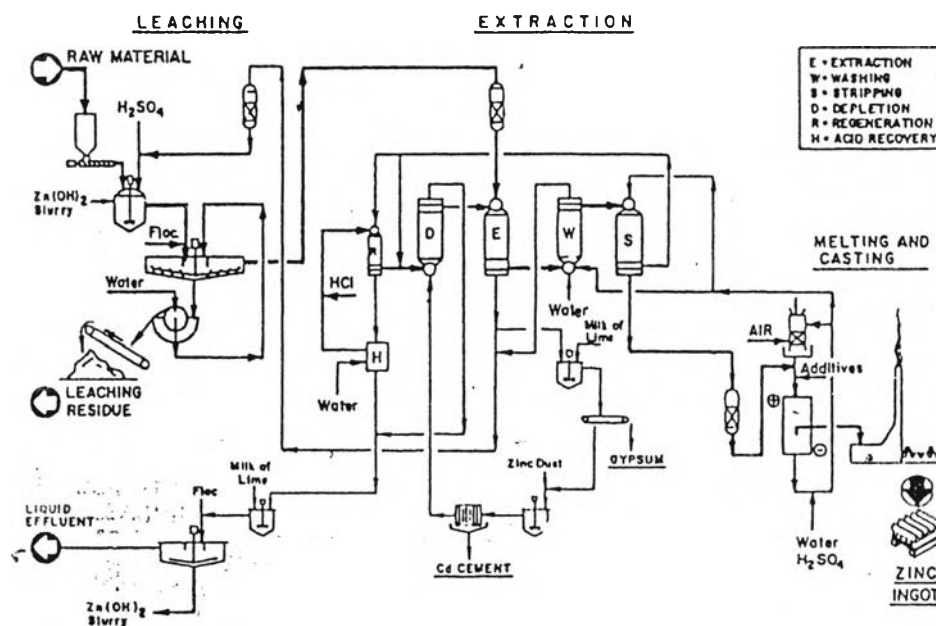
นอกจากสังกะสีแล้วยังมีโลหะมีค่าบางตัวถูกละลายออกมาด้วยเช่นกัน จากนั้นนำสารละลายไปผ่านเครื่อง Thickeners และทำการกรองก่อนเติมปูนขาวหรือหินปูนเพื่อทำสารละลายให้บริสุทธิ์มากขึ้นโดยการแยกสิ่งเจือปนบางตัวออกมา เช่น เหล็กและอะลูมิเนียม กากที่เหลือส่วนใหญ่จะเป็นพวกยิปซัมและไฮดรอกไซด์ จากนั้นผ่านสารละลายที่มีสิ่งเจือปนอยู่ต่ำมาสกัดสังกะสีในสารละลายออกด้วยวิธี Solvent extraction ในขั้นตอนนี้จะใช้สารละลายคีโรซีนผสมกับ DEHPA สกัดสังกะสีออกมาอยู่ในเฟสอินทรีย์ (Organic phase) ซึ่งจะนำไปแยกสังกะสีออกด้วยสารละลายกรดเพื่อนำมาผ่านกระบวนการทางไฟฟ้า (Electrowinning) เพื่อแยกสังกะสีออกมาในที่สุด กระบวนการ Zincex นี้ สามารถแยกสังกะสีออกจากฟลูออไรด์ไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 70 ถึง 91 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการแยกสังกะสีขึ้นอยู่กับปริมาณของซิงก์เฟอร์ไรด์ในฟลูออไรด์เนื่องจากกระบวนการนี้ไม่สามารถละลายซิงก์เฟอร์ไรด์ได้

2.2.4.4 กระบวนการละลายด้วยกรดอะซิติก

กระบวนการละลายด้วยกรดอะซิติก⁽⁷⁾ ใช้ความเข้มข้นสูงเพื่อละลายโลหะมีค่า เช่น สังกะสี, ตะกั่ว, ทองแดงและแคดเมียมออกมา ส่วนกากที่เหลือซึ่งประกอบด้วยเหล็กออกไซด์และซิงก์เฟอร์ไรด์จะถูกนำกลับไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้าใหม่ ดังในรูปที่ 2.14

กระบวนการผลิตเริ่มจากการละลายฟลูออไรด์เข้าในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เปอร์เซ็นต์ของแข็ง 15 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกรองเพื่อแยกกากออกไปปั่นเม็ดและนำไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้าใหม่ ส่วนสารละลายที่ได้จะใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยาให้สังกะสี, ตะกั่ว, แคดเมียมและทองแดงตกตะกอนออกมาจากสาร

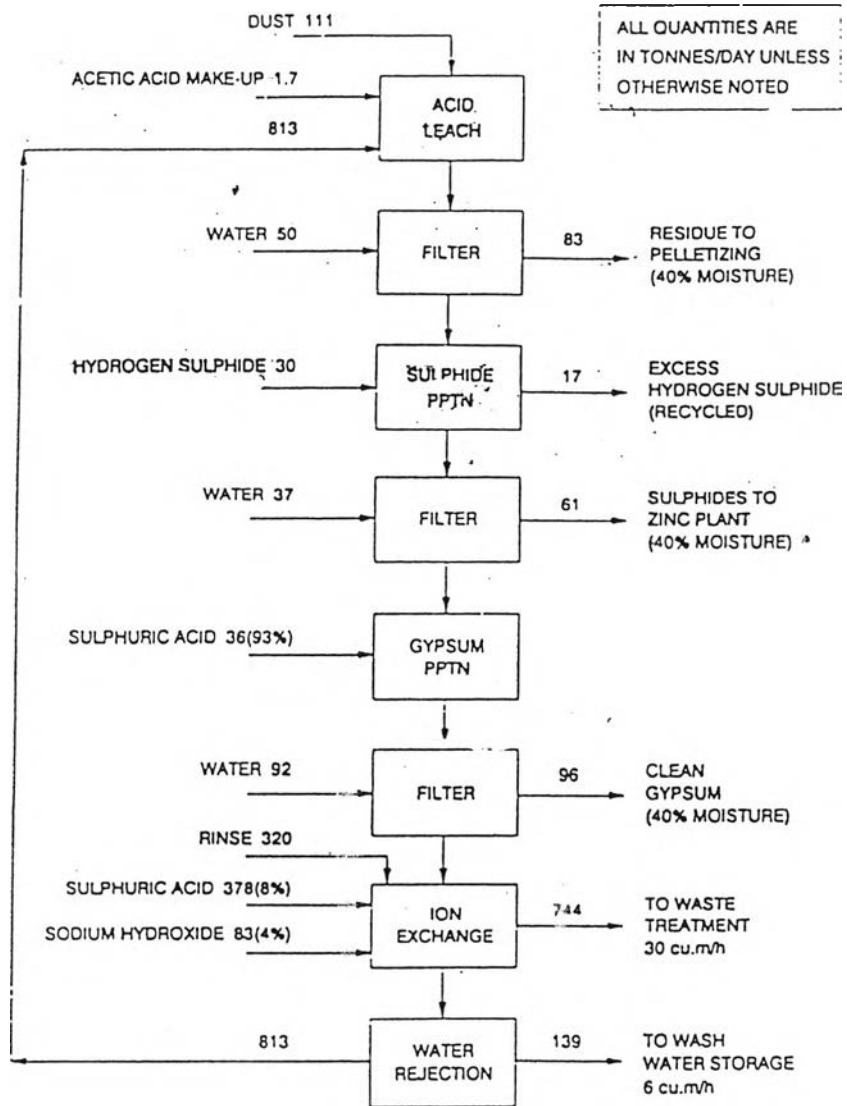
ละลาย ส่วนเหล็กที่อยู่ในสารละลายสามารถตกตะกอนเช่นกันแต่ใช้เวลานาน สามารถแยกโลหะสังกะสีได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีเหล็กออกมาด้วยประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.13 แผนภูมิของกระบวนการ Modified Zincex ⁽²⁵⁾

2.2.4.5 กระบวนการ MRT

กระบวนการ MRT ⁽²⁾ เป็นกระบวนการใช้สารละลายกระบวนการแรกที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตจริงและประสบความสำเร็จที่บริษัททนูคอร์ เมืองคาร์ลิ่งตัน มลรัฐเซาธ์คาโรไลนา ประเทศสหรัฐอเมริกา กระบวนการผลิตนี้จะใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อุณหภูมิสูงในการละลายสังกะสี, ตะกั่วและแคดเมียมออกจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า จากนั้นนำมากรองจะได้กากที่มีเหล็กออกไซด์และซิงก์เฟอร์ไรด์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งสามารถนำไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้า



รูปที่ 2.14 แผนภูมิกระบวนการละลายด้วยกรดอะซิติก (7)

ใหม่ได้ ส่วนสารละลายที่ได้นำมาผ่านกระบวนการซีเมนเตชันโดยการใส่ฝุ่นสังกะสีเพื่อให้ตะกั่วและแคดเมียมตกตะกอนออกมา นำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนเป็นสังกะสีออกไซด์เพื่อจำหน่ายต่อไป ส่วนสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2.4.6 กระบวนการ Cashman

บริษัท American Metal Recovery ได้พัฒนากระบวนการ Cashman⁽²⁾ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าในสภาวะความดันสูงแต่ก็สามารถละลายได้เพียงสังกะสีออกไซด์ ไม่สามารถละลายซิงก์เฟอร์ไรต์ได้ สำหรับสารละลายที่ได้จะผ่านกระบวนการซีเมนเตชันโดยใช้ผงสังกะสีในการตกตะกอนโลหะตะกั่วและโลหะแคดเมียม ส่วนสารละลายที่เหลือนำไปตกตะกอนเป็นสังกะสีออกไซด์เพื่อจำหน่ายต่อไป

2.2.4.7 กระบวนการ Terra Gaia

บริษัทในกลุ่มของ Terra Gaia ได้ร่วมมือกับบริษัท Canadian Engineering ประเทศแคนาดา ในการพัฒนากระบวนการใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์⁽²⁾ ในการผลิตจะเริ่มจากการป้อนฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าเข้าไปในกระบวนการละลายโดยใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และออกซิเจนช่วยภายใต้ความดันสูง ซึ่งจะช่วยให้สามารถละลายสังกะสี, ตะกั่วและแคดเมียมจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า จากนั้นนำสารละลายมาตกตะกอนสังกะสี (Precipitation) โดยใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้ได้สังกะสีในรูปสังกะสีซัลไฟด์ ส่วนกากที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นเฮมาไทต์สามารถนำไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้าใหม่ได้

2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า

หลักการโดยทั่วไปในการเลือกใช้กระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้า มีดังนี้

- 1) มูลค่าในการลงทุน
- 2) ประสิทธิภาพหรือต้นทุนของกระบวนการผลิต
- 3) คุณภาพของผลผลิตที่ได้

- 4) พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต
- 5) กากหรือสแล็กที่ได้จากกระบวนการผลิตไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม
- 6) กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน

สำหรับกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยการปรับให้มีเสถียรภาพทางเคมีเป็นกระบวนการในการแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยการฟอร์มสารประกอบเชิงซ้อนหุ้มด้านนอกป้องกันไม่ให้โลหะหนักที่คงอยู่ในฝุ่นเตาอาร์กสามารถละลายออกมาได้เท่านั้น แต่จะสูญเสียโลหะมีค่า เช่น สังกะสี, ตะกั่วและแคดเมียมไป ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเหมาะสำหรับโรงงานที่มีกำลังการผลิตต่ำหรือมีปริมาณโลหะมีค่าในฝุ่นเตาอาร์กในปริมาณต่ำ

กระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กด้วยการหลอมเป็นแก้ว เป็นกระบวนการที่น่าสนใจ ในกรณีที่สามารถหลอมเป็นแก้วที่ได้คุณภาพสูงพวกแว่นสายตาต่าง ๆ และในกรณีที่ฝุ่นเตาอาร์กมีปริมาณโลหะมีค่าต่ำด้วย

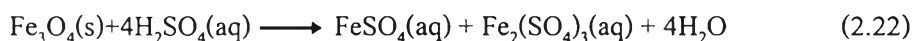
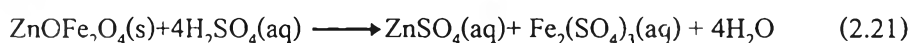
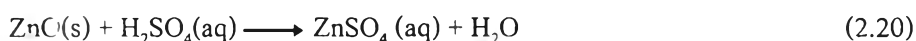
กระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยความร้อนเป็นกระบวนการที่มีความนิยมสูง เนื่องจากส่วนใหญ่ จะได้ปริมาณการแยกสังกะสี สูงเพราะสามารถแยกสังกะสีออกจากซิงก์เฟอร์ไรต์ได้ ส่วนผลผลิตที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้าใหม่ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าได้ สังกะสีที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสังกะสีออกไซด์ซึ่งจะต้องนำไปผ่านกระบวนการในการทำสังกะสีให้อยู่ในรูปโลหะสังกะสีอีกขั้นตอนหนึ่ง ยกเว้นกระบวนการที่ใช้เตาอาร์กไฟฟ้าแบบพลาสมา เช่น กระบวนการ Enviroplas, กระบวนการ Tetronics, กระบวน Hi-plas หรือกระบวนการ Tibur Howden Extended Arc Reactor เป็นต้น ซึ่งสามารถแยกสังกะสีออกมาให้อยู่ในรูปโลหะสังกะสี นอกจากนี้ส่วนใหญ่ก่อนที่วัตถุดิบจะถูกส่งเข้าเตาอาร์กไฟฟ้าจะต้องผ่านขั้นตอนการบดเม็ดก่อน จะเห็นได้ว่ากระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยความร้อนสามารถดึงโลหะมีค่าได้ในปริมาณสูง แต่มีกระบวนการค่อนข้างซับซ้อน, สิ้นเปลืองพลังงานสูง, ต้นทุนการผลิตตลอดจนมูลค่าต้นทุนสูง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับกำลังการผลิตสูงซึ่งต้องมีปริมาณฝุ่นเตาอาร์กมากพอกับการลงทุนและฝุ่นจะต้องมีปริมาณสังกะสีสูงด้วย

กระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลายเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในการผลิตจริงน้อย เนื่องจากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่สามารถแยกสังกะสีได้ประมาณ 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

ขึ้นอยู่กับปริมาณซิงก์เฟอร์ไรต์ซึ่งถือว่าไม่สูงมาก เนื่องจากซิงก์เฟอร์ไรต์ละลายได้ค่อนข้างยาก นอกจากนี้ยังต้องใช้ปริมาณสารละลายค่อนข้างสูงในกระบวนการผลิต แต่กระบวนการนี้มีข้อดีคือส่วนใหญ่การลงทุนต่ำ, ประหยัดพลังงานและต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยในการผลิตจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 95 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ส่วนใหญ่ฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีการผ่านกระบวนการใดๆ ก่อนที่จะเข้ากระบวนการละลายและขนาดของโรงงานสามารถออกแบบตามปริมาณฝุ่นเตาอาร์กที่ได้จากการผลิต ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับโรงงานที่ต้องการการลงทุนต่ำและมีปริมาณฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจากกระบวนการผลิตไม่มากเท่ากับกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยความร้อน

2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับคิเนติกส์ของการละลายฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลาย

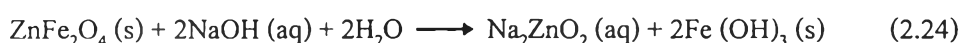
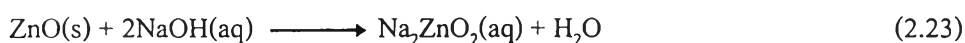
2.4.1 Cruells และคณะ⁽¹⁾ ได้ศึกษาอัตราเร็วในการละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 0.1 ถึง 2 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิ 18 ถึง 51 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการละลายประกอบด้วย



ปฏิกริยาที่ 2.21 เกิดช้าที่อุณหภูมิห้องแต่เกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง พบว่าสังกะสีประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์อยู่ในรูปที่ทำปฏิกริยาได้ดี ในขณะที่สังกะสีที่เหลือจะอยู่ในรูปซิงก์เฟอร์ไรต์ อัตราเร็วของการละลายสังกะสีที่ไวต่อปฏิกริยาจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้แต่อัตราเร็วของการละลายเหล็กขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทำให้ต้องทำการละลายที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ได้ปริมาณการสกัดสังกะสีสูง ในขณะที่ได้ปริมาณการสกัดเหล็กต่ำ Cruells และคณะสรุปว่าสภาวะที่เหมาะสมในการละลายควรสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและเปอร์เซ็นต์ของแข็งเท่า

กับ 10 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์การละลายสังกะสีเฉลี่ย 80 เปอร์เซ็นต์และเหล็กละลาย 40 เปอร์เซ็นต์

2.4.2 Frenay และคณะ⁽⁶⁾ ได้นำฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้ามาทำการแยกด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแยกซิงก์เฟอร์ไรต์ออกจากสังกะสีออกไซด์ เนื่องจากซิงก์เฟอร์ไรต์ละลายได้ยากจึงนำมาละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 450 กรัมต่อลิตรที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่วนสังกะสีออกไซด์จะถูกละลายโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 240 กรัมต่อลิตรที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง สำหรับปฏิกิริยาทางเคมีที่สำคัญมีดังนี้

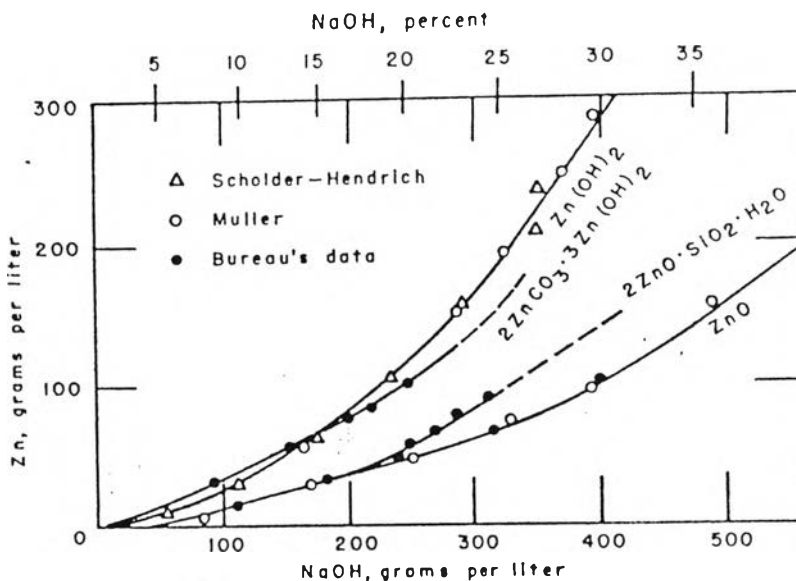


สำหรับเปอร์เซ็นต์การแยกสังกะสีและตะกั่วโดยรวม (% Recovery) ประมาณ 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์

2.4.3 Merrill และ Lang⁽²⁶⁾ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการละลายของสังกะสีจากแร่สังกะสีที่เป็นแร่ออกไซด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการแยกสังกะสีจากสารละลายด้วยวิธีไฟฟ้าและวิธีเคมีในส่วนของ การละลายพบว่าแร่สังกะสีที่เป็นออกไซด์ยกเว้นซิลิเกต (ZnSiO₃) ละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 180 ถึง 240 กรัมต่อลิตร โดยสามารถแยกสังกะสีจากแร่ที่มีสังกะสี 21.2 % ได้ประมาณ 85 % อุณหภูมิที่ใช้มีผลต่อการละลายของสังกะสีมากกว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายและเวลา Merrill และ Lang ยังได้หาความสามารถในการละลายของสังกะสี (Solubility) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของสารประกอบสังกะสีต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 2.15

2.5 สรุป

ส่วนใหญ่ฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เนื่องจากชนิดของเศษเหล็ก, ชนิดของวัตถุดิบอื่น ๆ และชนิดของเกรดเหล็กที่ต้องการผลิตแต่จะมีธาตุที่เป็นองค์



รูปที่ 2.15 ความสามารถในการละลายของสารประกอบสังกะสีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์⁽²⁶⁾

ประกอบหลักเหมือนกันก็คือ เหล็กและสังกะสี โดยสังกะสีจะอยู่ในรูปสังกะสีออกไซด์และซิงก์เฟอร์ไรต์ ส่วนเหล็กมักอยู่ในรูปเฮมาไทต์ แมกเนไทต์และซิงก์เฟอร์ไรต์ นอกจากนั้นยังมีตะกั่วและแคดเมียมซึ่งอยู่ในรูปออกไซด์เช่นกัน

เนื่องจากฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นของเสียมีพิษและมีโลหะมีค่า เช่น สังกะสี, ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นต้นประกอบอยู่ในฝุ่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหากระบวนการในการจัดการฝุ่นเตาอาร์ก โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ กระบวนการปรับสภาพทางเคมี, กระบวนการหลอมเป็นแก้ว, กระบวนการใช้ความร้อนและกระบวนการใช้สารละลาย

สำหรับกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้าด้วยการใช้สารละลายเหมาะสำหรับผู้ผลิตเหล็กกล้าที่มีกำลังการผลิตไม่สูงมาก, ปริมาณการลงทุนต่ำ, ต้นทุนการผลิตต่ำ, ประหยัดพลังงาน รวมทั้งฝุ่นเตาอาร์กไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการใดๆ ก่อนการสกัดซึ่งน่าจะเหมาะกับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าของประเทศไทยในปัจจุบัน

สำหรับสารละลายที่ใช้ในกระบวนการจัดการฝุ่นเตาอาร์กไฟฟ้ามียุทธวิธีด้วยกัน แต่สารละลายที่น่าสนใจคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถละลายสังกะสีจากฝุ่นเตาอาร์กได้โดยมีเหล็กเจือปนต่ำ ทำให้ง่ายต่อการแยกสังกะสีออกมาในกระบวนการถัดไป ส่วนกากซึ่งมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำกลับไปป้อนเตาอาร์กไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าได้ใหม่ทำให้ช่วยลดปัญหาในการสูญเสียสังกะสีและเหล็กด้วย