

บทที่ 4

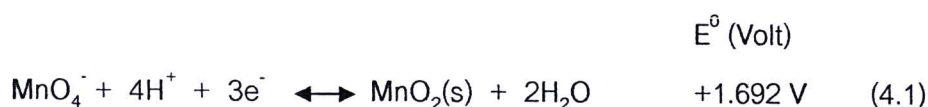
ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) ค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และค่าพีเอช 1.7 โดยใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดตลอดช่วงเวลาในการกักเก็บ

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกริยา ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีปรับค่าความหนาแน่นกระแสอย่างต่อเนื่อง และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

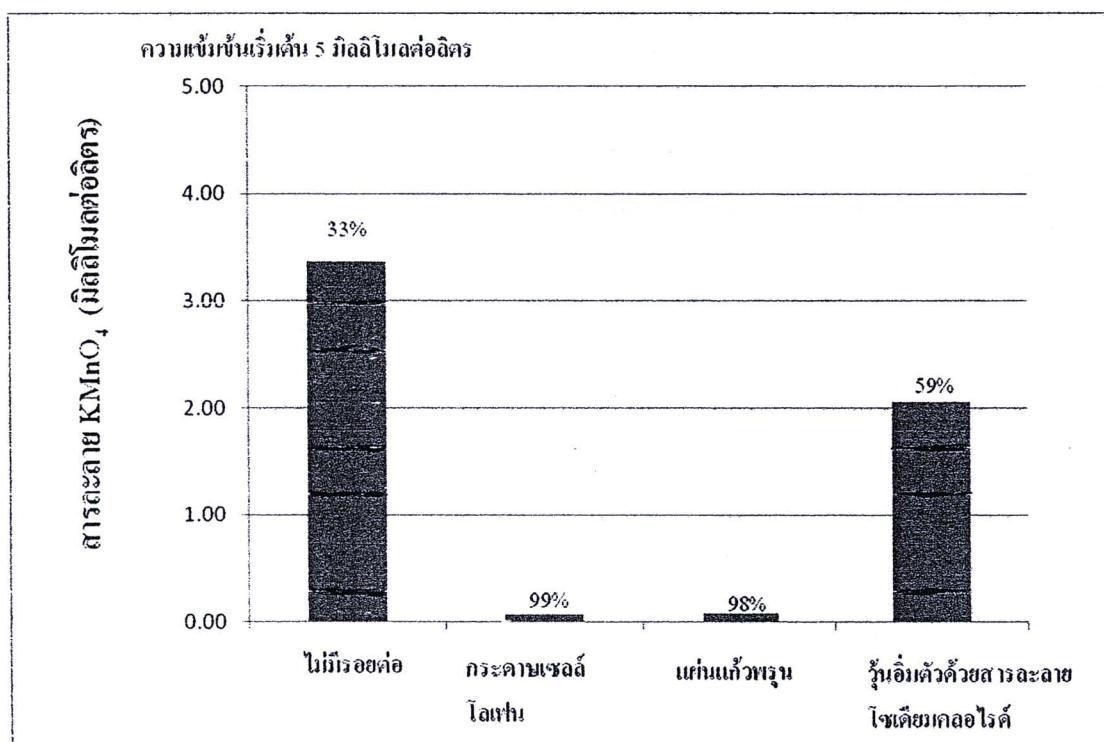
4.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกริยา

ถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย และแบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยกระดาษเซลลูลอสแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และอุ่นอิมตัวด้วยสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ถูกทดสอบและเปรียบเทียบผล โดยอาศัยการติดตามการดำเนินไปของปฏิกริยารีดักชันของ KMnO_4 (สมการที่ 4.1) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร หลังทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาทีแก่ระบบ ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ KMnO_4 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ค่าความเข้มข้นของ KMnO_4 ที่วัดได้ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.1



เลือกใช้ KMnO_4 มาทดสอบในขั้นตอนการออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกริยา เนื่องจากเป็นสารเคมีที่สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเนื่องจากมีสีม่วงเข้ม และวัดค่าความ

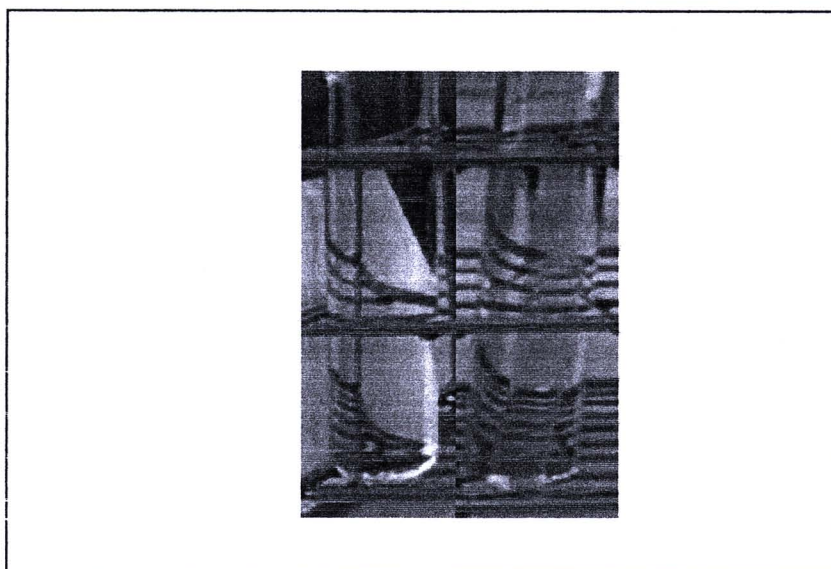
เข้มข้นที่เปลี่ยนไปได้ง่ายโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร และใช้หัวทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเนื่องจากหัวทองแดงหาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถตัดขนาดได้ตามต้องการเนื่องจากมีความบางและอ่อนนุ่มเป็นรูปได้



รูปที่ 4.1 ค่าความเข้มข้นของ KMnO_4 ในถังปฏิกรณ์แบบไม่มีรอยต่อของสารละลายและแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยกระดาษเซลล์โพลีเมอร์ แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และอุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที

จากผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยารีดักชันของ KMnO_4 เกิดขึ้นได้เพียง 33% ในถังปฏิกรณ์แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการดำเนินไปของปฏิกิริยาเดียวกันนี้ ในถังปฏิกรณ์ที่มีรอยต่อของสารละลายทั้ง 3 แบบ โดยในถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อสารละลายที่ทำจากกระดาษเซลล์โพลีเมอร์ แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และอุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบการดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันของ KMnO_4 99%, 98% และ 59% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ค่าเดียวกัน ระยะเวลาเท่ากัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ทำด้วย กระดาษเซลลิวโลส และแผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) ซึ่งมีค่าการดำเนินไปของ ปฏิกิริยาที่สูงถึง 99% และ 98% ตามลำดับ พบว่าถึงปฏิกิริยาที่มีกระดาษเซลลิวโลสเป็น องค์ประกอบ พบการเปื่อยยุ่ยของกระดาษเซลลิวโลส และเมื่อทิ้งสารละลายไว้ในถึงปฏิกิริยา นานเกิน 1 ชั่วโมง พบการปนเปื้อนของสารสีเขียวลงมาในสารละลายดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สีของสารละลายในถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อด้วยกระดาษเซลลิวโลส

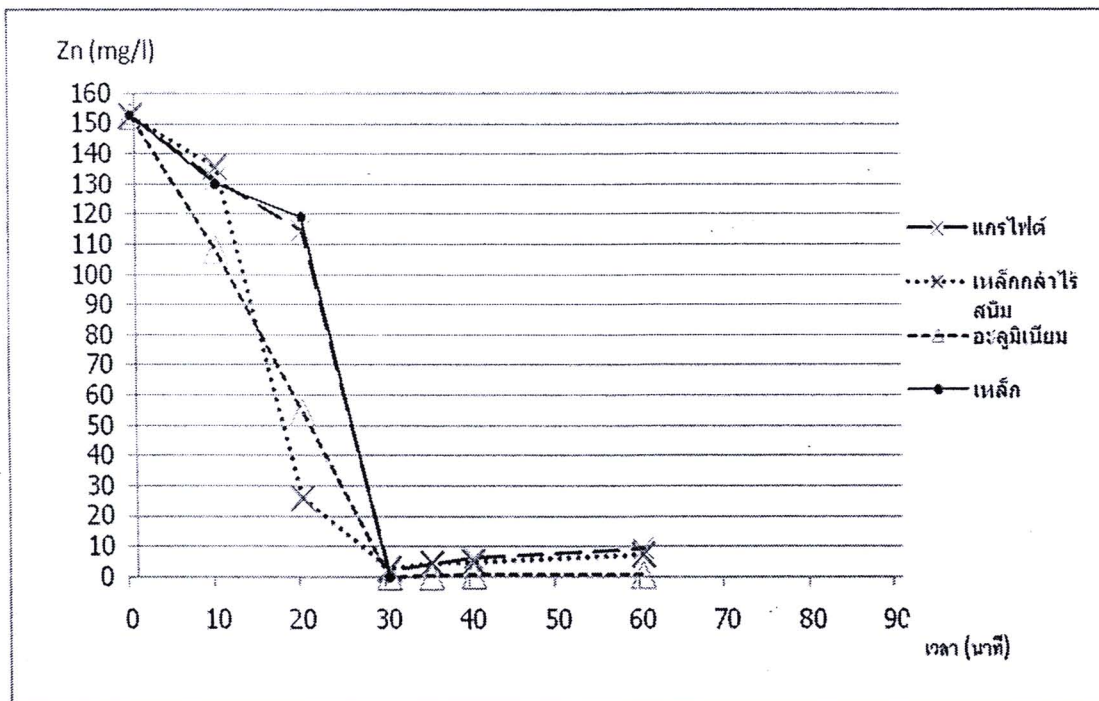
(หลอดขวา) หลังการกำจัดสี KMnO_4 เมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาทีเทียบกับ น้ำกลั่น (หลอดซ้าย)

จากรูปที่ 4.2 สีเขียวเหลืองที่ออกมาในสารละลาย คาดว่าเป็นสารที่ละลาย ออกมาจากกระดาษเซลลิวโลส เนื่องจากกระดาษเซลลิวโลสเป็นวัสดุที่ทำจากเซลลูโลส (cellulose) ในไม้หรือพืชเส้นใยอื่น ๆ เคลือบด้วยสารป้องกันความชื้นอัน ได้แก่ ไนโตรเซลลูโลส โพลีไวนิลคลอไรด์ ไวนิลโคพอลิเมอร์ และโพลีเอทิลีน ซึ่งสารเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับสารละลาย KMnO_4 หรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไป จึงทำให้ปล่อยสีเขียวเหลืองออกมา (รูปที่ 4.2) ดังนั้นถึง ปฏิกิริยาที่มีกระดาษเซลลิวโลสเป็นองค์ประกอบจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีสภาวะความเป็นกรดสูง ถึงแม้อัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลายที่ทำด้วยแผ่นแก้วพรุนจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการทดสอบการกำจัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมในลำดับต่อไป

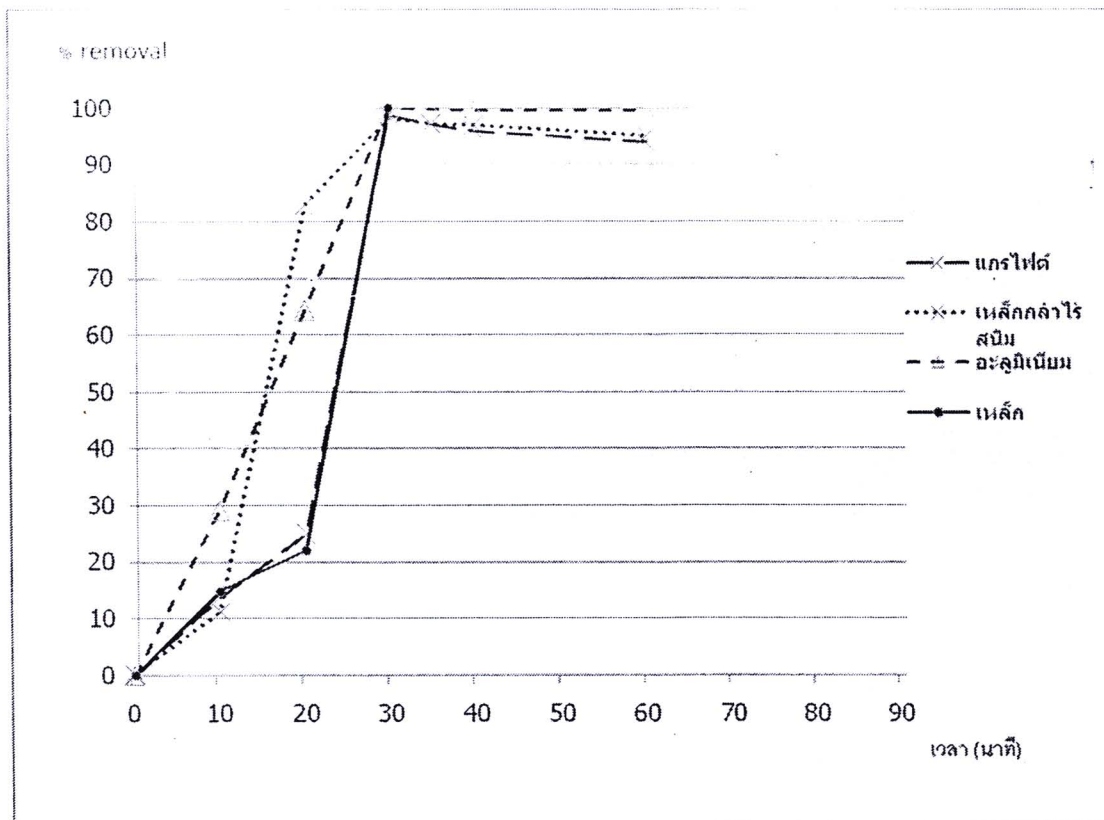
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย

4.2.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้า

บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ลงในถังปฏิกิริยาที่มีรอยต่อสารละลายที่ทำมาจากแผ่นแก้วพูน ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ 1,500 mA แก่ระบบ ผ่านขั้วไฟฟ้าแคโทดชนิดต่างๆ ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาที (รูปที่ 4.3) ซึ่งคิดเป็น 100%, 100%, 99% และ 98% ของ การกำจัดสังกะสี ตามลำดับ (รูปที่ 4.4)

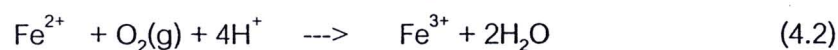
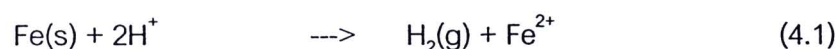


รูปที่ 4.3 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA



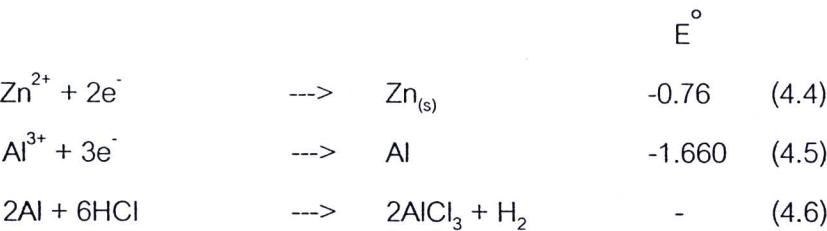
รูปที่ 4.4 ค่าร้อยละการกำจัดสิ่งก่สียเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทด เป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA

จากผลการทดลองพบว่า ขั้วเหล็กและอะลูมิเนียมให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัด สิ่งก่สียสูงที่สุด แต่จากการสังเกตลักษณะของสารละลาย พบตะกอนสีส้มแดงของเหล็กไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นตั้งแต่ 10 นาทีแรกที่เริ่มทำการทดลอง เป็นผลมาจากการละลายของขั้วเหล็กตามปฏิกิริยาที่ 4.1 ถึง 4.3



ขั้วเหล็กเมื่ออยู่ในสารละลายกรดจะละลายออกมาในรูป Fe^{2+} จากนั้น Fe^{2+} ซึ่งไม่ ค่อยอยู่ตัว สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศในสภาวะกรด แล้วถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็น Fe^{3+} (ทำให้สารละลายมีสีเหลืองส้มจางๆ) เมื่อมี Fe^{3+} เกิดขึ้นในสารละลาย ร่วมกับมี OH^- เกิดขึ้น ในสารละลายด้วย Fe^{3+} จะทำปฏิกิริยาได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ทำให้สารละลายมีตะกอนสีน้ำตาลแดง)

ดังนั้นขั้วเหล็กจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสังกะสีหรือโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มีสภาวะความเป็นกรดสูง เมื่อพิจารณาขั้วอะลูมิเนียม ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีสูงสุดเหมือนขั้วเหล็กเช่นกัน พบว่าขั้วอะลูมิเนียมมีลักษณะบางลงหลังทำการทดลอง ซึ่งแสดงถึงการละลายหรือการกัดกร่อนของขั้วตามปฏิกิริยาที่ 4.4 ถึง 4.6



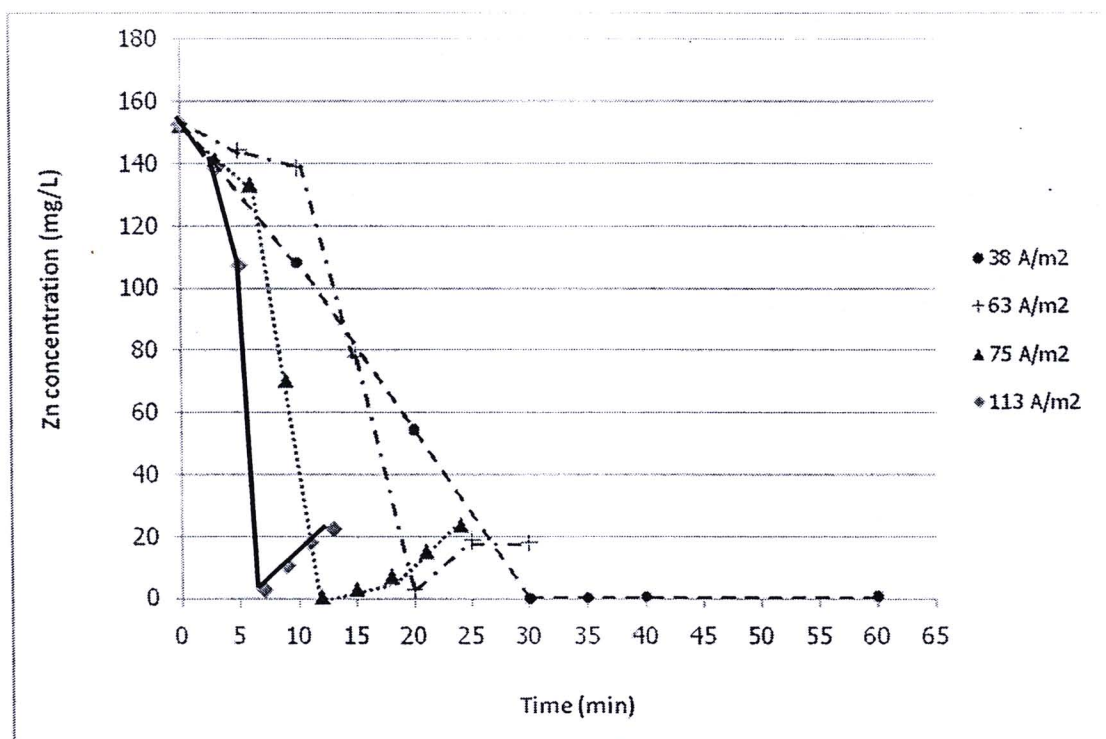
เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยาที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า สังกะสีสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันบนแผ่นอะลูมิเนียมได้เองโดยไม่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป (ปฏิกิริยาแบบกัลวานิก) ทำให้ขั้วอะลูมิเนียมเกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลาย (ปฏิกิริยาที่ 4.5 แบบย้อนกลับ) และเมื่อสังเกตสารละลายระหว่างการทดลองยังพบของแข็งแขวนลอยสีเทาดำเกิดขึ้นกระจายทั่วสารละลาย คาดว่าเป็น AlCl_3 จากปฏิกิริยาที่ 4.6 ลักษณะดังกล่าวทำให้ขั้วอะลูมิเนียมไม่เหมาะสมในการใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย

ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีสูงกว่า 98% และไม่พบการละลายหรือการกัดกร่อนของขั้วลงสู่สารละลาย ดังนั้นขั้วทั้งสองจึงสามารถนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดเพื่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่มีสภาวะความเป็นกรดสูงนี้ได้ ซึ่งขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมมีราคาย่อมเยากว่าขั้วแกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิมในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% เป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อสแตนเลสได้เป็นอย่างดี ป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากสารละลายที่เป็นกรดและไม่ซำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป ดังนั้นในการทดลองต่อจากนี้จึงเลือกใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

4.2.2 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75

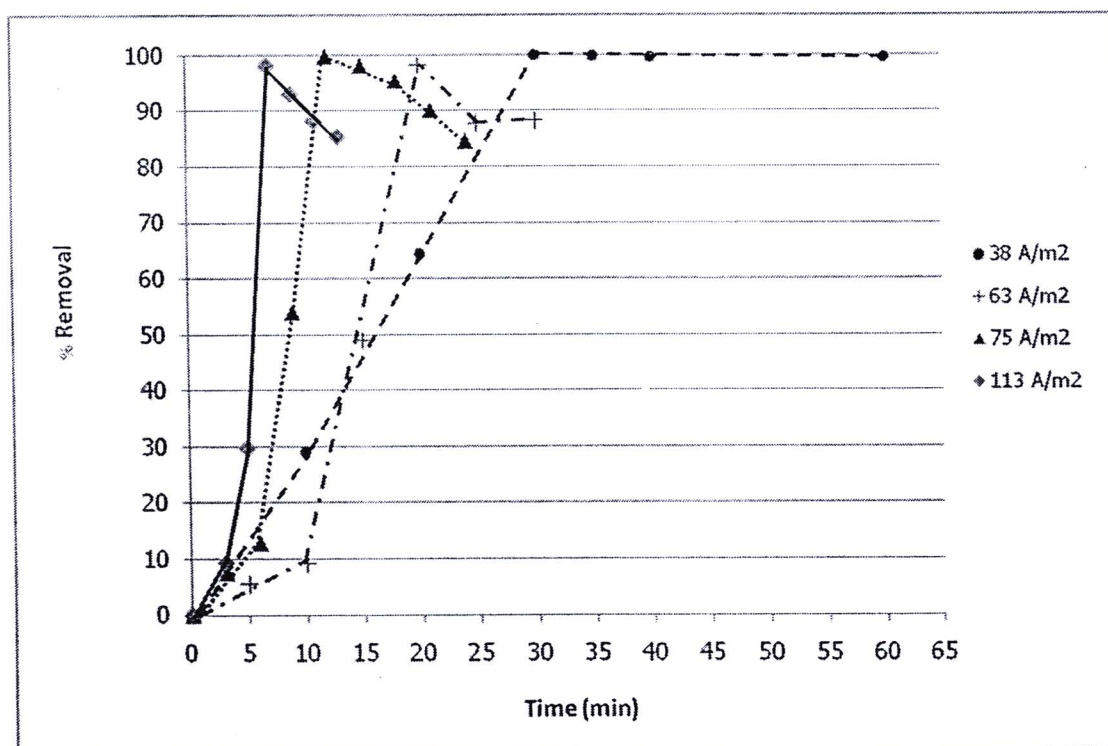
และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (การคำนวณตามภาคผนวก ข.3) โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อให้เวลาในการผ่านกระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายลดลงจนมีความเข้มข้นน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 30 ถึง 60 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 ถึง 24 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 12 ถึง 15 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 7 ถึง 8 นาที เมื่อผ่านช่วงเวลาที่ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 4 ค่า จะมีการละลายกลับของสังกะสีเกิดขึ้นซึ่งสาเหตุถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.3

รูปที่ 4.6 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ เทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุม โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่า 155 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 30 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 100% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที (การคำนวณในภาคผนวก ข.4) ที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 20 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 98% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 8 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 12 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 100% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 13 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 7 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 98% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 22 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลาเมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

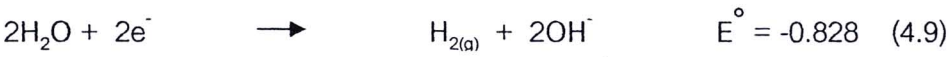
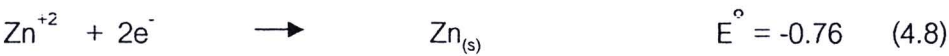
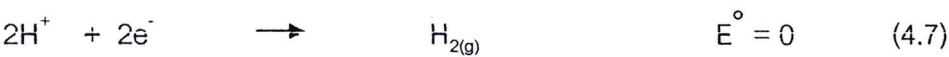
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น สามารถกำจัดสังกะสีให้ลดลงได้อย่างรวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีออกจาก

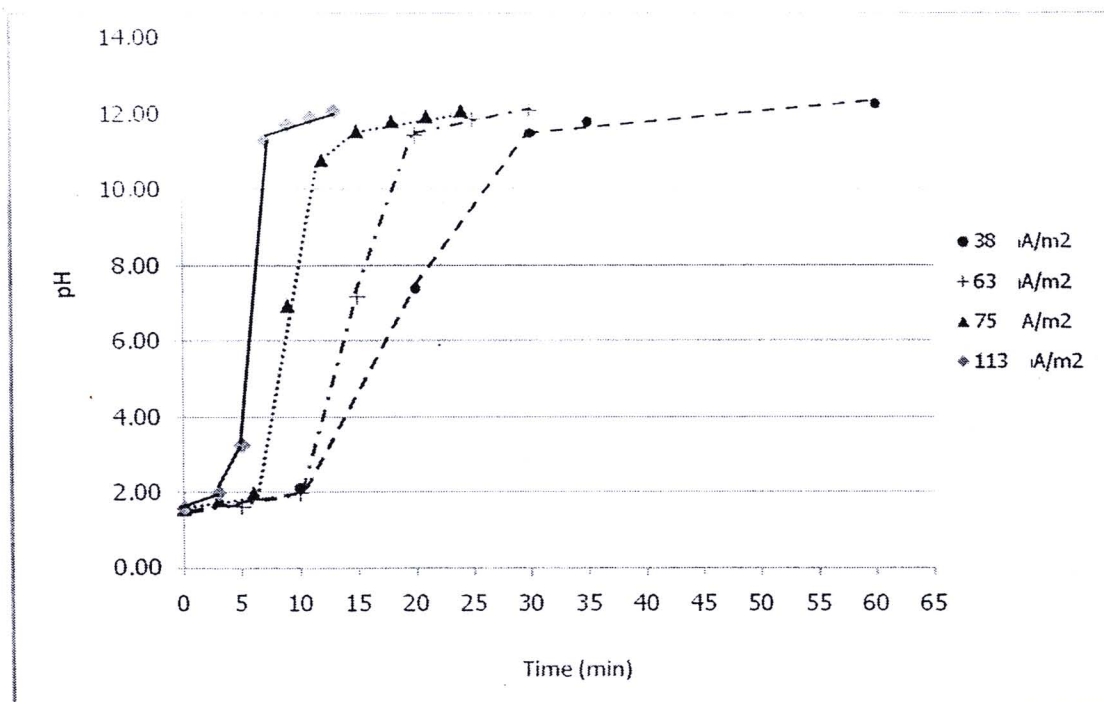
น้ำเสียซึ่งต่ำกว่าการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ในช่วงผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร กลับพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ สามารถลดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานและคงที่กว่าการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความหนาแน่นกระแส 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสต่ำสุด สามารถลดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ยาวนานและคงที่ตั้งแต่เวลาที่ 30 ถึงเวลาที่ 60

4.2.3 พีเอช

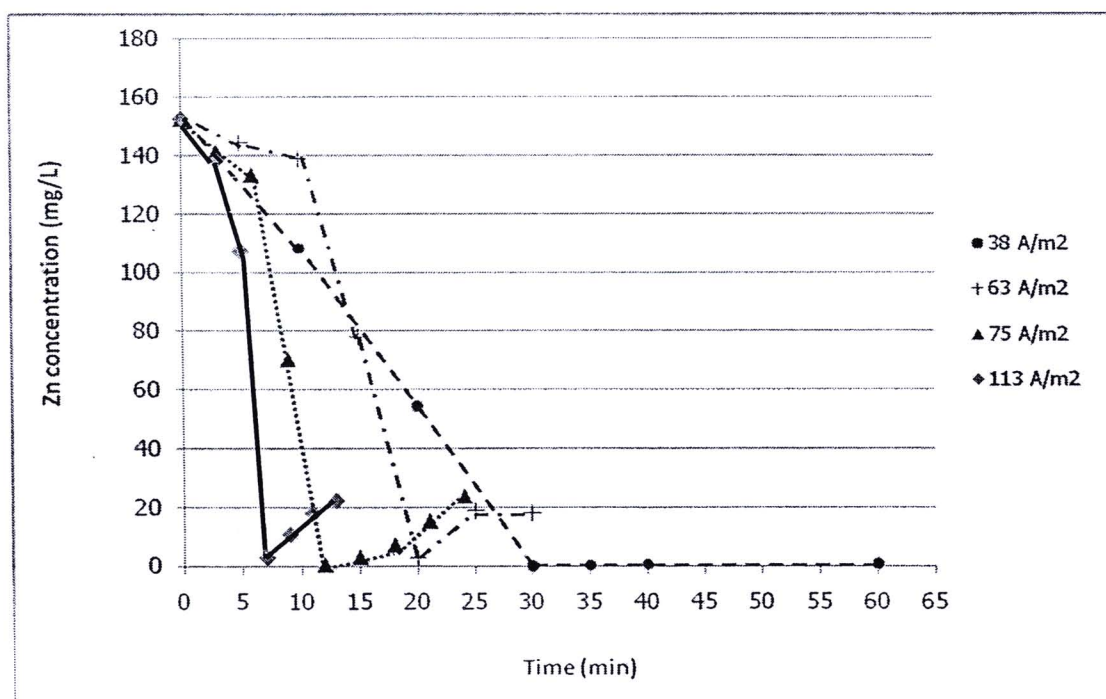
น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 1.7 ซึ่งได้จากการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร เมื่อทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด ทำการตรวจวัดค่าพีเอชจากน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดช่วงการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสามารถอธิบายสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยอาศัยสมการที่ 4.7 – 4.9

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแคโทด





รูปที่ 4.7 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

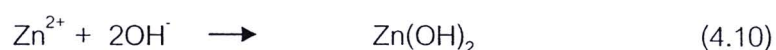


รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความ
หนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

จากการทดลองค่าพีเอชมีการปรับเปลี่ยนด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันในแต่ละช่วงเวลา (รูปที่ 4.7) และมีความสัมพันธ์กับอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีในสารละลาย (รูปที่ 4.5) ดังนี้

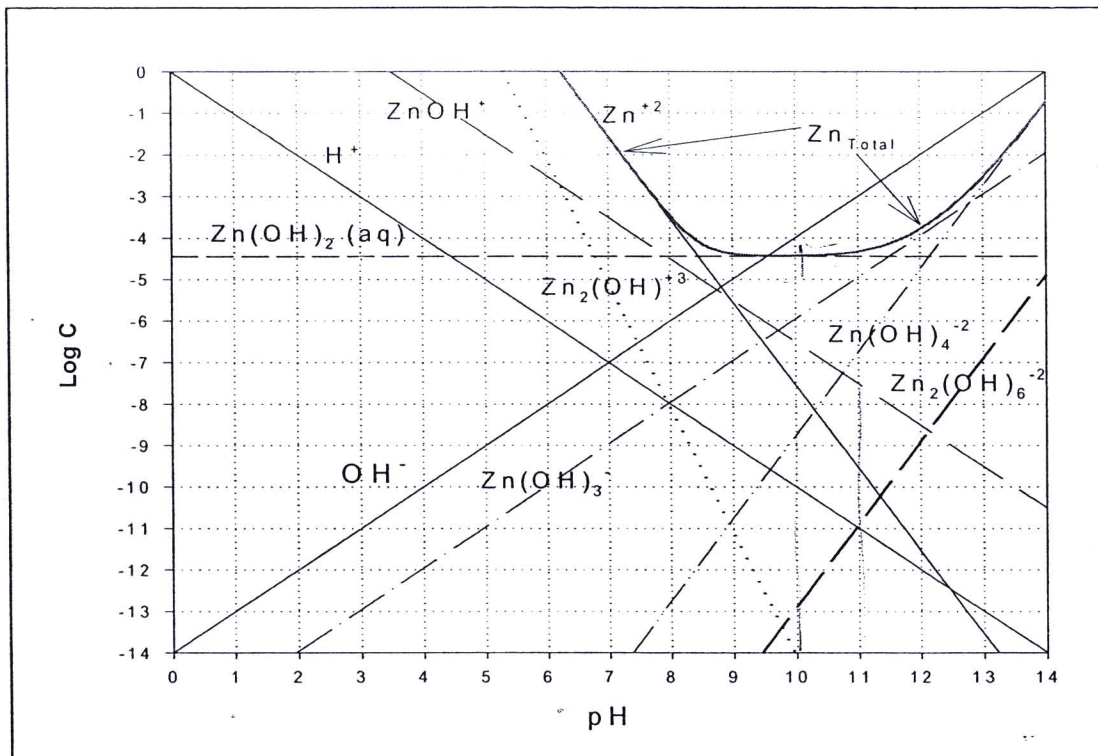
ช่วงต้น : 0 ถึง 3 หรือ 5 หรือ 10 นาที (ขึ้นกับค่าความหนาแน่นกระแสแต่ละค่า) ในช่วงต้นของการทดลอง เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 3 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 5 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 10 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 10 นาที พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด หลักๆ คือปฏิกิริยาที่ 4.7 และ 4.8 ค่าพีเอชมีการปรับเปลี่ยนด้วยอัตราเร็วช้าๆ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีที่มีความเข้มข้นลดลงน้อย (รูปที่ 4.5)

ช่วงกลาง : กระแสที่ไหลในวงจรเป็นผลมาจากปฏิกิริยา 4.7, 4.8 และ 4.9 เป็นหลัก โดยสังเกตจากอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชที่สูง และเมื่อปฏิกิริยา 4.9 ดำเนินต่อ จะได้ผลิตภัณฑ์คือ OH^- และ OH^- ที่เกิดจะส่งผลให้เกิด Zn(OH)_2 ตามสมการที่ 4.10



ดังนั้นจะพบอัตราการลดลงของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา 4.7 และ 4.9

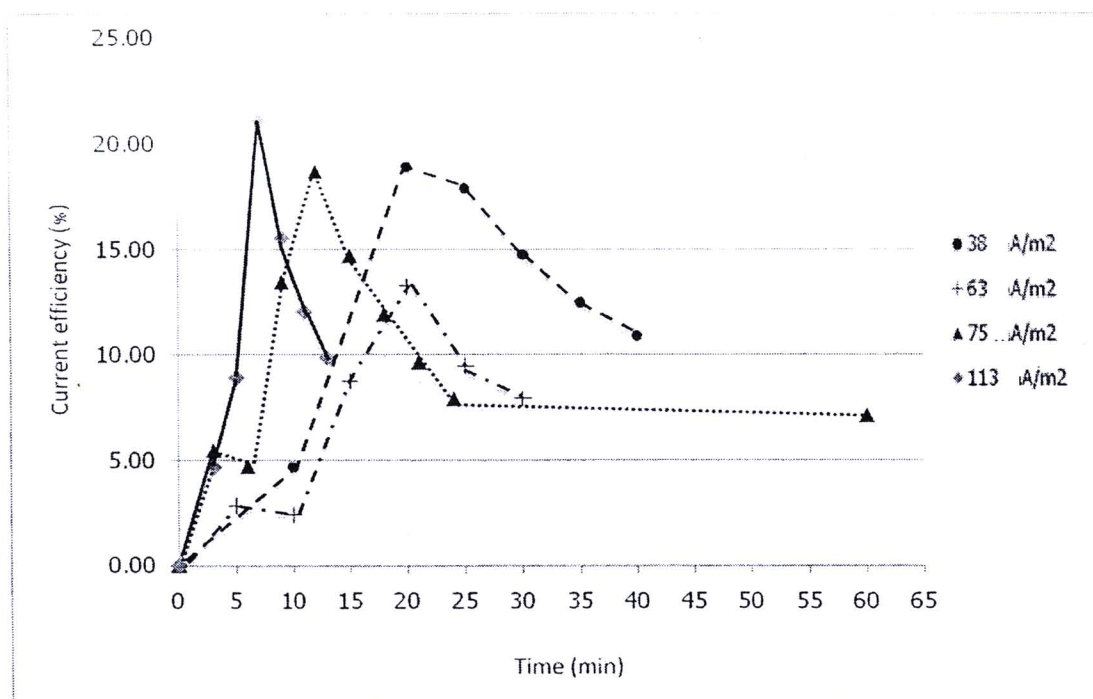
ช่วงปลาย : เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงกลางของการทดลอง แสดงว่าความเข้มข้นของ H^+ ลดลงอย่างมากหรือหมดไป ทำให้ปฏิกิริยาที่ดำเนินอยู่ในช่วงเวลานี้ หลักๆ คือปฏิกิริยาที่ 4.5 ดังนั้นจึงพบอัตราการเพิ่มขึ้นของพีเอชลดลง (ตามปฏิกิริยาที่ 4.3 เท่านั้น) และในช่วงเวลานี้ค่าพีเอชมีค่าอยู่ในช่วงพีเอช 11-12 ซึ่งเป็นช่วงที่ตะกอน Zn(OH)_2 (ปฏิกิริยาที่ 4.10) สามารถละลายกลับลงสู่สารละลาย (Benjamin, 2002) ดังแสดงในรูป 4.8 จึงพบการเพิ่มขึ้นของสังกะสีในช่วงเวลานี้ (รูปที่ 4.5)



รูปที่ 4.8 แผนภาพการละลายของ Zn(OH)_2 (Benjamin, 2002)

4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดสิ่งสีหรือโลหะหนักออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ

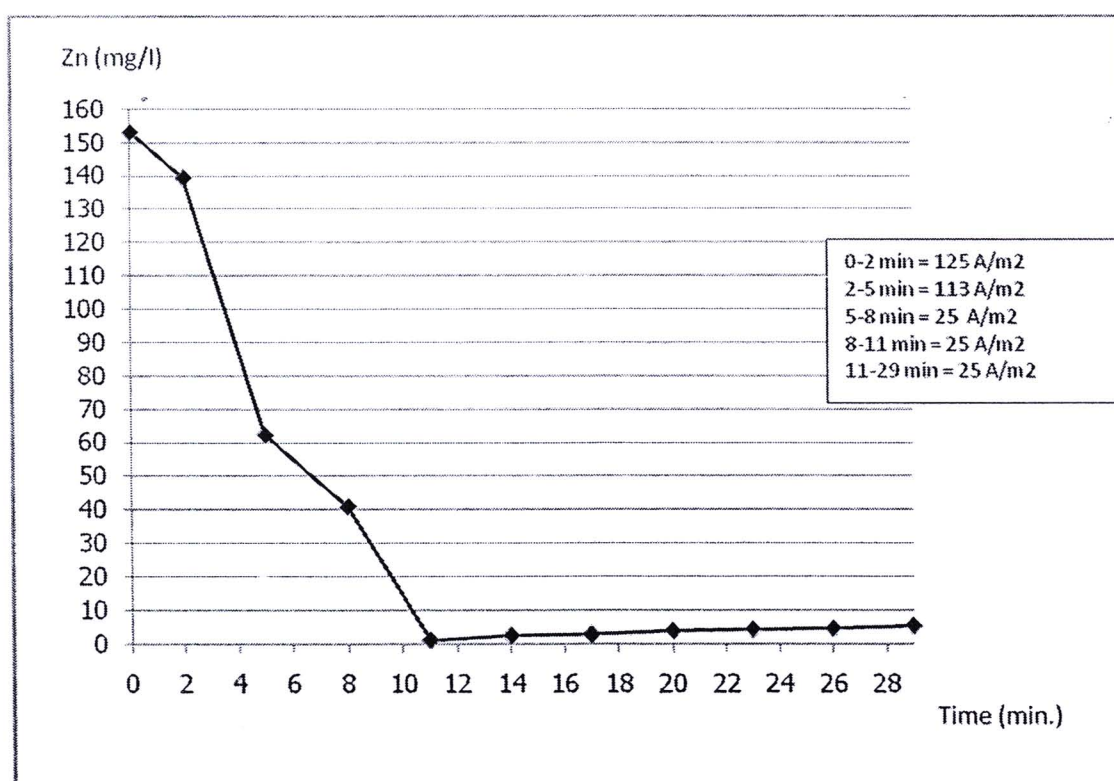


รูปที่ 4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร บนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

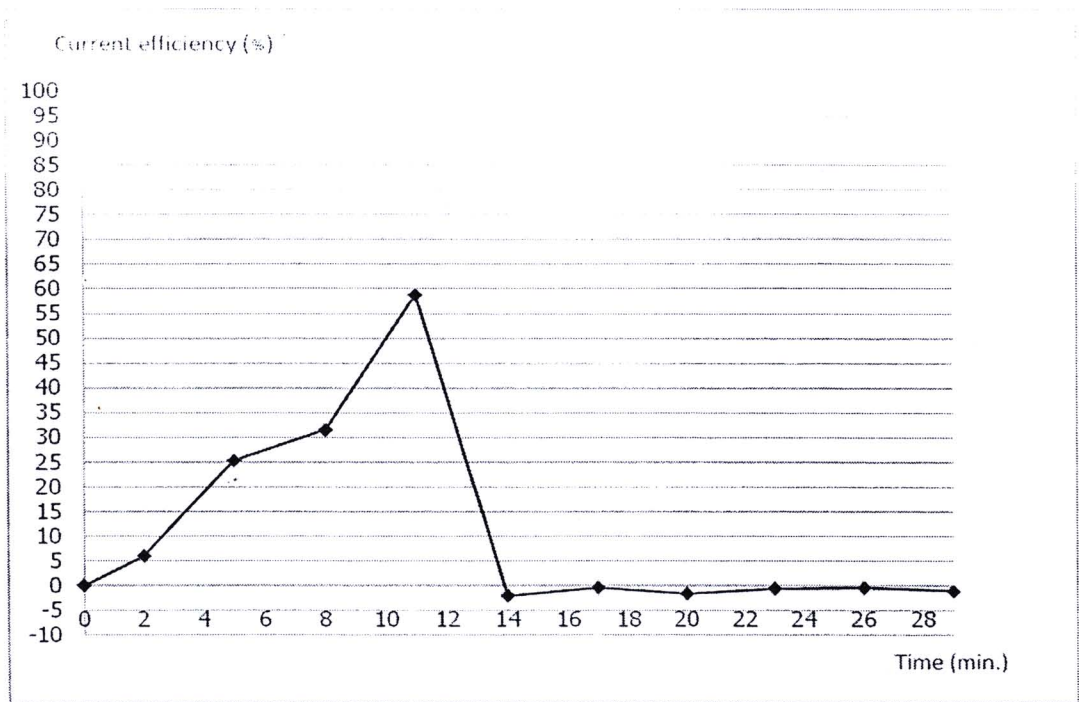
รูปที่ 4.9 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้จากการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แก่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 โมลต่อลิตร) พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่คำนวณได้ในแต่ละชุดการทดลองมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม กล่าวคือ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้แก่วัสดุในปริมาณที่สูง ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูงที่สุดก็จะมีค่ามากด้วย เช่น เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่คำนวณได้มีค่า 19%, 13%, 19% และ 21% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่มีประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 7% โดยใช้ระยะเวลากำจัดยาวนานถึง 6 ชั่วโมง (สหรัฐ เซารูปดี, 2552) และจากการทดลองหลังผ่านจุดสูงสุดของค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสแล้ว พบว่าประสิทธิภาพเชิงกระแสตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการลดลงนี้สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงๆ ประสิทธิภาพเชิงกระแสจะตกลงเร็วกว่าการควบคุมกระแสไฟฟ้าต่ำๆ นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปที่ 4.9 ยังแสดงให้เห็นว่าเวลาที่พบการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดนี้จะลดลงเมื่อปริมาณความหนาแน่นกระแสที่

ให้กับระบบมีค่ามากขึ้น เช่น พบค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด ณ เวลา 20, 20, 12 และ 7 นาที เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตรตามลำดับ แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสมากกว่า 50% ดังนั้นจากข้อมูลที่กล่าวมานี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ควบคุมให้เกิดความเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการตกลงของประสิทธิภาพเชิงกระแสหลังผ่านจุดสูงสุด และมีผลทำให้สามารถรักษาระดับของประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีให้สูงตามสมควรได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในที่สุด

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงอัตราการลดลงของสังกะสีและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุมตามเวลาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.10 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยน
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง
พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้

ระยะเวลา (นาทื)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ความเข้มข้นสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
0-2	125	140	6
2-5	113	62	25
5-8	25	41	32
8-11	25	1	59
11-14	25	2	-2
14-17	25	3	0
17-20	25	3	-2
20-23	25	4	-1
23-26	25	4	0
26-29	25	5	-1

จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณสังกะสีลดลงอย่างรวดเร็ว ภายในเวลา 11 นาที ส่งผลให้ค่าความค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสได้สูงสุดที่ 59% ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่าสูงสุดที่ได้เมื่อไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม (รูปที่ 4.9) ซึ่ง แนวคิดนี้เป็นผลมาจากการใช้กระแสหรือควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ทำให้ใช้เวลา ในการกำจัดสังกะสีเร็วขึ้น แต่หากใช้ความหนาแน่นกระแสสูงคงที่ตลอดการทดลองจะทำให้กำจัด สังกะสีผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ไม่ถึง 1 นาที จะทำให้สังกะสีละลาย กลับสู่สารละลายเช่นเดิม (รูปที่ 4.8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความหนาแน่นกระแสสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ปรับความหนาแน่นกระแสให้ต่ำลง ทำให้สามารถป้องกันการละลายกลับของโลหะสังกะสีลงสู่ สารละลาย เนื่องจากสังกะสีละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ (มันลิน ตันทุลเวศน์, 2545) เป็นผล ให้สามารถควบคุมปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำเสียให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลายาวนานหรือตลอดการทดลองได้ โดยในการทดลองนี้สามารถควบคุม ให้สังกะสีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ทำให้สามารถเก็บกักไว้ในถังปฏิกิริยาต่อไป ได้โดยควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ช่วยทำให้สังกะสีไม่ละลาย กลับมาในถังปฏิกิริยาตั้งแต่นาทีที่ 11 จนถึงนาทีที่ 26 รวมเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งคาดว่าเพียงพอ สำหรับการนำไปปรับใช้ในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม (เหตุผลจะ อธิบายในหัวข้อต่อไป)

4.4 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่าง ต่อเนื่อง

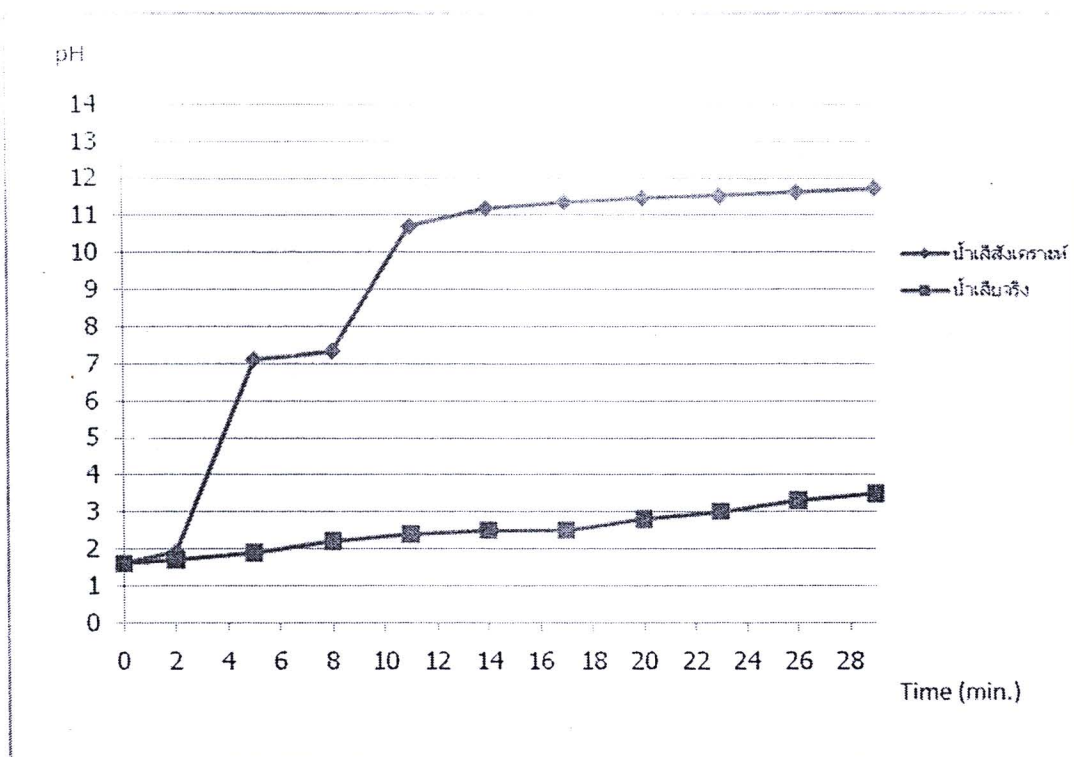
น้ำเสียจริงเก็บมาจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตเส้นใย ที่จัดได้ว่าเป็น กระบวนการผลิตหลักของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยน้ำเสียที่เก็บมามีลักษณะสีเหลือง ใส ประกอบด้วยโลหะหนักที่สำคัญ คือ สังกะสี ปริมาณ 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 ค่าความ นำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพารามิเตอร์อื่นๆ อีก ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น	วิธีการตรวจวัดค่า
พีเอช		1.7	pH meter
ไนเตรท	mg/l	27	ICP
ซัลเฟต	mg/l	11,800	ICP
ของแข็งแขวนลอย	mg/l	100	-
ซีโอดี	mg/l	3,200	-
ของแข็งละลายน้ำ	mg/l	23,600	-
สังกะสี	mg/l Zn	155	AAS

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ จึงนำรูปแบบการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามาใช้ทดลองกับน้ำเสียจริง ผลปรากฏว่าค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในเวลาการกำจัด 29 นาทีตามการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 กับน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์

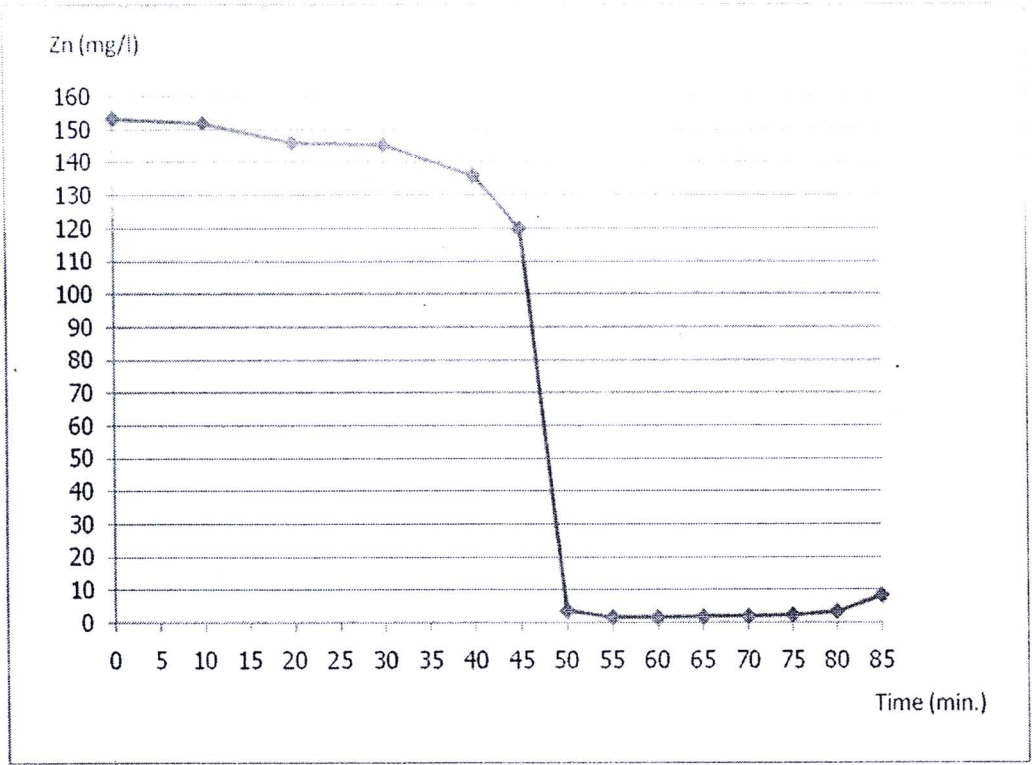
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.3 พบว่าการกำจัดสภาวะที่เกิดขึ้นได้มากเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าสูง และจากรูปที่ 4.12 ในระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นไฟฟ้าตามตารางที่ 4.2 เป็นเวลา 29 นาที พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 1.7 เป็น 11.73 ซึ่งเกิดการกำจัดสภาวะที่เกิดขึ้นเป็นลำดับดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.3 ในขณะที่น้ำเสียจริงมีค่าพีเอชเพิ่มจาก 1.7 เป็น 3.5 ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน ดังนั้นการกำจัดสภาวะสื่อน้ำเสียจริงจึงเกิดขึ้นในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นผลให้ไม่สามารถนำรูปแบบการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ได้ดีกับน้ำเสียสังเคราะห์มาใช้น้ำเสียจริงได้โดยตรง

ตารางที่ 4.3 แสดงการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียจริง โดยอาศัยหลักการเดียวกันที่ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์

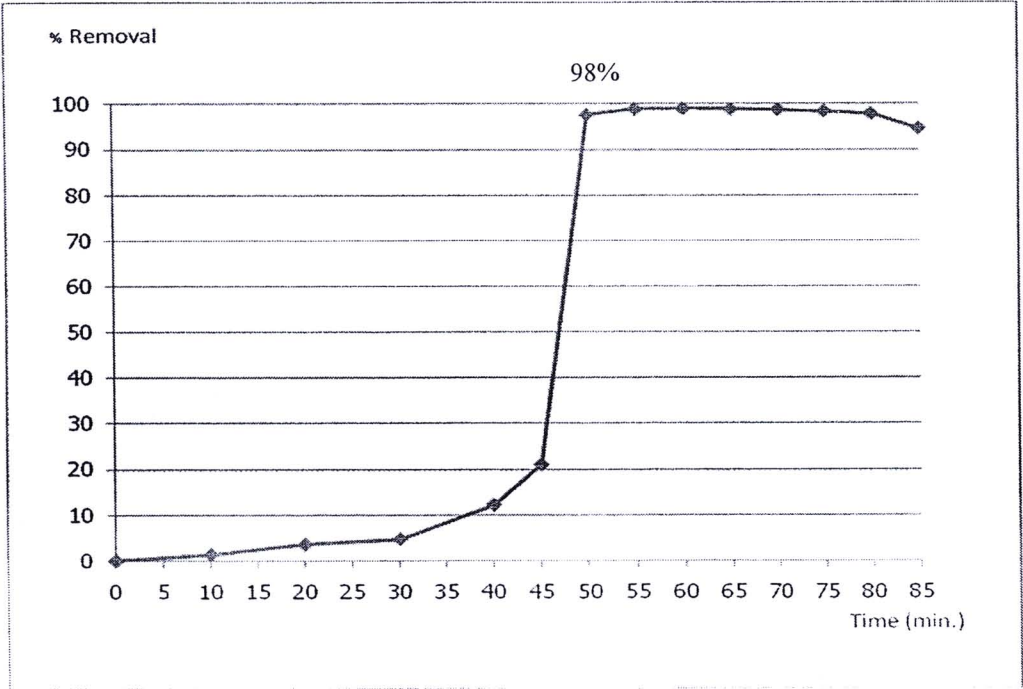
ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง
พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้จากน้ำเสียจริง

ระยะเวลา (นาทื)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ความเข้มข้นสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
0-30	125	145	0
30-40	75	134	2
40-45	50	120	6
45-50	25	4	100
50-55	17	2	3
55-60	17	1	0
60-65	17	2	0
65-70	17	2	0
70-75	17	2	0
75-80	17	3	-1
80-85	17	8	-6

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ในระยะเวลา 50 นาทื (ตารางที่ 4.3) โดยสังกะสีในสารละลายลดลงเหลือ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 98% ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



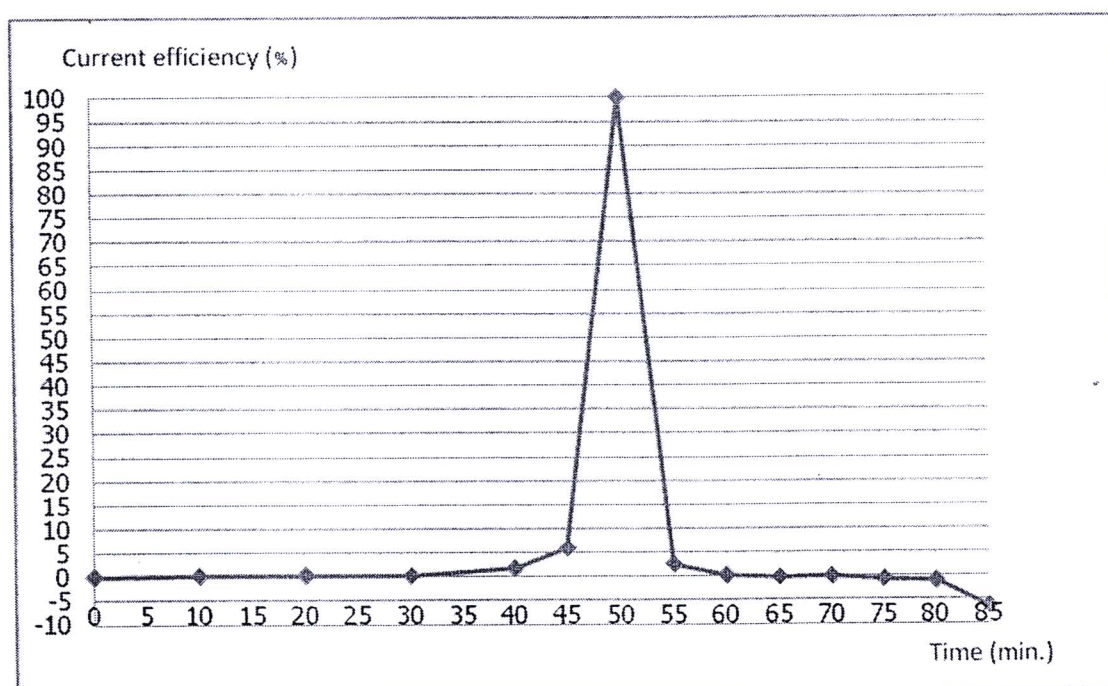
รูปที่ 4.13 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.14 ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.13 แสดงการลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 0 นาที ถึง 30 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 30 นาที ถึง 40 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 40 นาที ถึง 45 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 45 นาที ถึง 50 นาที และควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (เป็นค่าต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถทำงานได้) ที่เวลา 50 นาที ถึง 85 นาที ซึ่งแนวคิดนี้เป็นผลมาจากการทดลองในส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการใช้กระแสหรือควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ทำให้ใช้เวลาในการกำจัดสังกะสีเร็วขึ้น แต่หากใช้ความหนาแน่นกระแสสูงคงที่ตลอดการทดลองจะทำให้กำจัดสังกะสีผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ไม่ถึง 1 นาที จะทำให้สังกะสีละลายกลับสู่สารละลายเช่นเดิม (รูปที่ 4.8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความหนาแน่นกระแสสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ปรับความหนาแน่นกระแสให้ต่ำลงโดยอาศัยแนวโน้มการปรับความหนาแน่นกระแสตามการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่างๆ ตามภาคผนวก ก. (ตารางที่ ก.9 ถึง ก.12) แนวคิดดังกล่าวทำให้สามารถกำจัดสังกะสีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งลดลงภายในเวลา 50 นาที ส่งผลให้คำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสได้สูงสุดที่ 100% ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้มีค่าสูงมาก เนื่องจากสังกะสีลดลงอย่างรวดเร็วจากความเข้มข้นสังกะสี 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 45 ลดลงเหลือ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 50 และ ณ เวลา 50 นาที สามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 98% เป็นผลทำให้สามารถควบคุมปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำเสียให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลายาวนานหรือตลอดการทดลองได้ โดยในการทดลองนี้สามารถควบคุมให้สังกะสีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ตั้งแต่นาทีที่ 50 จนถึงนาทีที่ 80 รวมเป็นเวลา 30 นาทีที่สามารถป้องกันการละลายกลับของสังกะสีได้ และการกำจัดสังกะสีได้ตั้งแต่นาทีที่ 50 คาดว่าสามารถช่วยประหยัดเวลาในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงในโรงงานเส้นใยเรยอนได้ ซึ่งค่าการออกแบบระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในบ่อดกตะกอนเพื่อกำจัดโลหะหนักด้วยสารเคมี เช่น ปูนขาว โซดาไฟ เก็บกักในช่วงระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ตะกอนสามารถรวมตัวกันและตกตะกอนลงก้นบ่อดกตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) แต่งานวิจัยนี้สามารถใช้ไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าตกตะกอนสังกะสีออกจากน้ำเสียเส้นใยเรยอนได้ในระยะเวลาที่สั้นลง คือสามารถกำจัดได้ตั้งแต่นาทีที่ 50 และมีร้อยละการกำจัดสูงถึง 98% เมื่อเทียบกับงานวิจัยการกำจัดสังกะสีด้วยการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีคงที่กระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้เพียง 24% และใช้เวลากำจัดถึง 6 ชั่วโมง (สหรัฐ เชาว์รูปดี, 2552)

จากผลข้างต้น พบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 มีค่ามากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ (รูปที่ 4.11) แต่ใช้ระยะเวลาในการกำจัด ยาวนานกว่าและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์เล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดง ตารางที่ 4.4

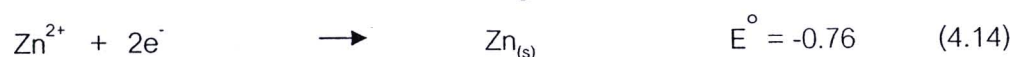
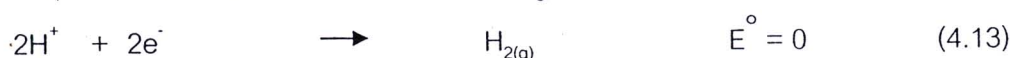
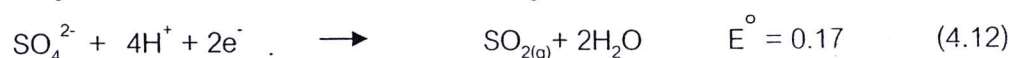
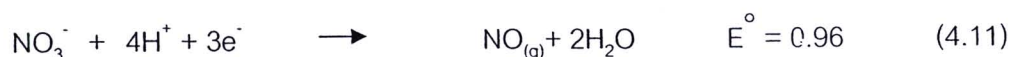


รูปที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยน
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 สมบัติของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	น้ำเสียจริง	น้ำเสียสังเคราะห์
pH	1.7	1.6
Zinc, Total (mg/l)	155	155
Nitrate (mg/l)	27	-
Sulfate (mg/l)	11,800	-

จากตารางที่ 4.4 องค์ประกอบที่แตกต่างระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ไออนไนเตรท ไออนซัลเฟต ซึ่งสามารถรับอิเล็กตรอน ได้ดีกว่าสังกะสี ดังแสดงในสมการที่ 4.11 ถึง 4.14



โดยไออนไนเตรทมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไออนซัลเฟต แต่มีอยู่ในปริมาณน้อย ในขณะที่ไออนซัลเฟตมีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าสังกะสีถึง 40 เท่า เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนต่อโมล ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหลักที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดลงของสังกะสี เกิดขึ้นได้ต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาการกำจัดไนเตรทและซัลเฟตก่อน ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ควรมีวิธีการกำจัดไนเตรทและซัลเฟตก่อนการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

แบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน โดยไม่รวมค่าเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า (Galvanometer) และสายไฟต่างๆ

4.5.1 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับอุปกรณ์และสารที่ใช้ซ้ำๆ ได้

Lab Scale (งานวิจัยนี้)

- ค่าถังปฏิกิริยา (ทำจากแผ่นอะครีลิก) ความจุ 1,274 มิลลิลิตร เท่ากับ 6,500 บาท (สำหรับฝั่งน้ำเสียจริงเท่านั้น)
- ค่าขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วแคโทดที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 2×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น ราคา 20 บาท และขั้วแอโนดที่ใช้เป็นแกรไฟต์ ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ราคา 900 บาท

- ค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฝังแวนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ NaCl เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 900 มิลลิลิตร) ราคา 21 บาท

$$\begin{aligned}\text{รวมเป็นค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)} &= \frac{6,500 + 20 + 900 + 21 \text{ บาท}}{1.274 \text{ ลิตร}} \\ &= 5,840 \text{ บาท/ลิตร} \\ &= 5,840,000 \text{ บาท/ลบ.ม. (Lab scale)}\end{aligned}$$

Plant Scale

- ค่าสร้างบ่อดกตะกอน (ทำจากคอนกรีต) อัตราน้ำเสียไหลก่อนเข้าบ่อดกตะกอนเท่ากับ 4,000 ลบ.ม./วัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) ระยะเวลาที่เก็บน้ำสำหรับการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ 50-80 นาที (ในการคำนวณจะใช้ 60 นาทีหรือ 1 ชั่วโมง)

$$\begin{aligned}\text{คำนวณจาก ขนาดบ่อดกตะกอน} &= 1 \text{ hr} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ hr}} \times 4,000 \text{ m}^3 \\ &= 170 \text{ m}^3\end{aligned}$$

ความลึกน้ำบ่อดกตะกอนต้องไม่น้อยกว่า 0.9 เมตร (มันลิน ตันทุลเวศน์, 2545)
ดังนั้นออกแบบบ่อดกตะกอนสูง 2 เมตร พื้นที่บ่อดกตะกอน

$$= 170 \text{ m}^3 / 2 \text{ m} = 85 \text{ m}^2$$

ใช้ปูนฉาบ 5 ตร.ม./25 กก. ราคาปูน 1 ถุง (25 กก.) = 106 บาท (ปูนซีเมนต์ผสม)

$$\text{ดังนั้นใช้ปูน} = 85 \text{ m}^2 / 5 \text{ m}^2 = 17 \text{ ถุง}$$

$$\text{ราคาก่อสร้าง} = 17 \text{ ถุง} \times 106 \text{ บาท} \times 2 \text{ เมตร} = 3,604 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

ราคาก่อสร้างนี้คิดเฉพาะค่าปูนซีเมนต์ผสมเพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะคริลิก ไม่ได้รวมค่าทราย ปูนขาว น้ำ ค่าวัสดุป้องกันกรด ฯลฯ

- ค่าขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วแคโทดที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 2×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น ราคา 20 บาท และขั้วแอโนดที่ใช้เป็นแกรไฟต์ ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ราคา 900 บาท

- ค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฝังแอโนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ NaCl เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 900 มิลลิลิตร) ราคา 21 บาท

รวมค่าขั้วไฟฟ้าและค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฝังแอโนด (บาท/ลบ.ม.)

$$= \frac{20 + 900 + 21 \text{ บาท}}{1.274 \text{ ลิตร}}$$

1.274 ลิตร

$$= 740 \text{ บาท/ลิตร}$$

$$= 740,000 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

$$\text{รวมเป็นค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)} = 740,000 + 3,604$$

$$= 743,604 \text{ บาท/ลบ.ม. (Plant scale)}$$

4.5.2 ค่าใช้จ่ายที่แปรผันตามปริมาณของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

ใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสที่ควบคุมตามเวลา ดังแสดงในตารางที่

4.3 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลาและค่าใช้จ่าย แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายที่แปรผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัดโดยใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสที่ควบคุมตามเวลา

เวลา (min.)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/m ²)	ค่ากระแสที่ควบคุม (mA)	กำลังไฟฟ้า (kw.hr/m ³)	ค่าใช้จ่าย (Baht/m ³)
0-30	125	5,000	1.125	2.81
30-40	75	3,000	0.058	0.15
40-45	50	2,000	0.007	0.02
45-50	25	1,000	0.003	0.01
50-55	17	680	0.006	0.01
			รวม	3.00

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าไฟฟ้าในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใย 3 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (lab scale) โดยไม่ได้รวมกับค่าวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีในหัวข้อ 4.5.1 มีค่าใช้จ่ายที่ถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยโดยใช้สารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ค่าสารเคมีในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่า 110.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และโซเดียมซัลไฟด์มีค่า 141.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (สหรัฐ เชาว์รูปดี, 2552) และนอกจากจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีแล้ว ร้อยละการกำจัดยังสูงถึง 98% และสามารถกำจัดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ในเวลา 50 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปเปรียบเทียบงานวิจัยการใช้ไฟฟ้าเคมีในการตกตะกอน

ผู้วิจัย	งานวิจัย	ขั้วไฟฟ้า	ค่ากระแส	ปฏิก.การกำจัด
Kobyra และคณะ (2009)	กำจัดซิงก์ฟอสเฟต -pHo 3.8, -[Zn] 40 mg/l -ไนเตรท 85 mg/l -ฟอสเฟต 120 mg/l -ซัลเฟต 60 mg/l	-เหล็ก -Al	10-100(A/m ²) คงที่กระแส	-97.80% @ 15 min (Fe) น้ำเสียจริง -96.70% @ 25 min (Al) น้ำเสียจริง
Mohammad และคณะ (2008)	กำจัดฟลูออไรด์ -pHo 4.0 -[F] 25 mg/l	-Al	12.5-50 (A/m ²) คงที่กระแส	- 95.70% @ 200 ml/min
สหรัฐ เชาว์รูปดี (2552)	กำจัดสังกะสี -pHo 2.0, [Zn] 155 mg/l -ไนเตรท 27 mg/L -ซัลเฟต 11,800 mg/l	-แกรไฟต์	3-133(A/m ²) (50-2,000 mA) คงที่กระแส	-100% @ 6 hr. น้ำเสียสังเคราะห์ -24% @ 6 hr. น้ำเสียจริง
งานวิจัยนี้	กำจัดสังกะสี - pHo 1.7, [Zn] 155 mg/l -ไนเตรท 27 mg/L -ซัลเฟต 11,800 mg/l	-เหล็ก -Al -เหล็กกล้า ไร้สนิม (St.) -แกรไฟต์	17-125(A/m ²) ปรับเปลี่ยน กระแส	-99% @ 11 min. น้ำเสียสังเคราะห์ (ขั้ว St.) -98% @ 50 min. น้ำเสียจริง (ขั้ว St.)