

บทที่ 4

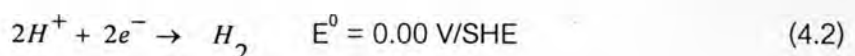
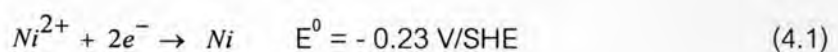
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

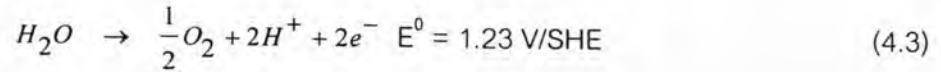
การทดลองนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีเคมีไฟฟ้าซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เช่น โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการทางชีวภาพไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหรือสารพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าการลงทุน ในงานวิจัยจะเลือกทำการศึกษาเฉพาะ สังกะสี (Zn) และนิกเกิล (Ni) ซึ่งโลหะทั้งสองชนิดมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานต่ำกว่าไฮโดรเจน ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับนิกเกิล และไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับสังกะสี [1] จึงทำให้การบำบัดด้วยชีวไฟฟ้าโลหะธรรมดาให้ประสิทธิภาพไม่ดี [2] ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาหาวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากน้ำเสียโดยใช้ชีวไฟฟ้าเป็นผ้าคาร์บอน (carbon cloth) โดยศึกษาหาผลของตัวแปร ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าความเข้มข้น และเวลา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลและสังกะสีโดยใช้ผ้าคาร์บอนเป็นชีวไฟฟ้า จากนั้นจึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ให้กับเมื่อใช้ชีวไฟฟ้าเป็นชีวโลหะ และทำการทดลองผลความสัมพันธ์ของตัวแปรร่วม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลที่ภาวะต่างๆ

ตอนที่ 1 ผลของตัวแปรที่มีต่อการขจัดของนิกเกิลออกจากสารละลายเจือจาง

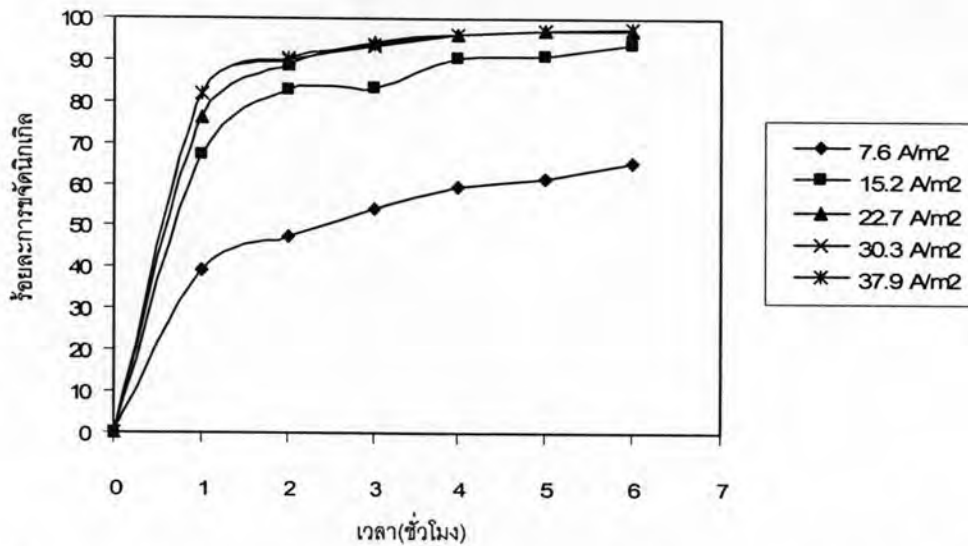
1.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้า

การทดลองหาค่ากระแสไฟฟ้าที่มีต่อกระบวนการขจัดนิกเกิล โดยใช้สารละลายนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมให้ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ บริเวณที่ชีวไฟฟ้าจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา โดยไอออนของนิกเกิลจะรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะนิกเกิลเกาะที่ขั้วแคโทด (อย่างคงที่) ควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) และที่ขั้วแอโนดจะเกิดแก๊สออกซิเจนดังสมการที่ (4.3)





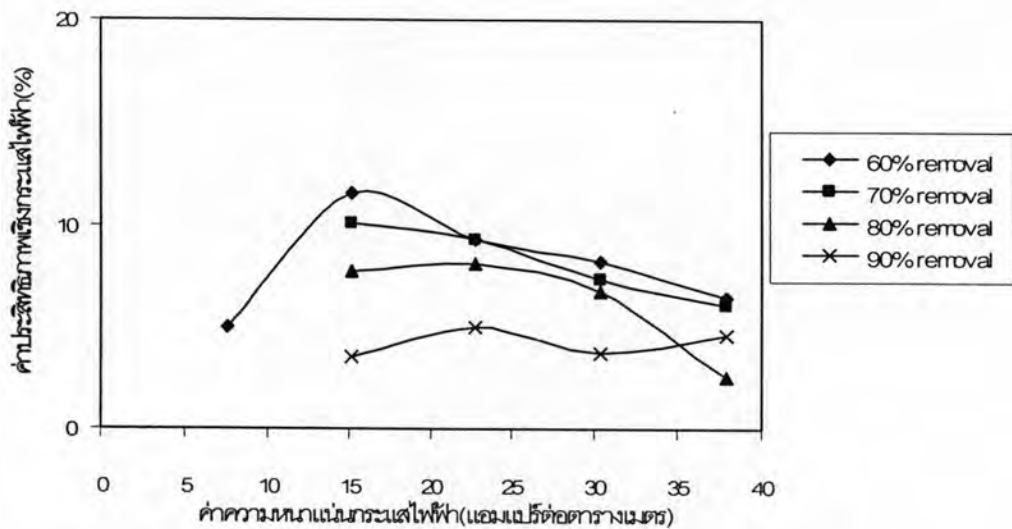
จากการวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลในสารละลายที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง AAS พบว่าปริมาณนิกเกิลในสารละลายลดลง เมื่อเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาเป็นค่าร้อยละการขจัดนิกเกิล พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ (Faraday's law) คือปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลา



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของร้อยละการขจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของนิกเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.2 พบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 แอมแปร์ จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุดร้อยละ 11.9 ที่ร้อยละการขจัดนิกเกิล 60 โดยคำนวณจากสมการที่ (2.14) แต่เมื่อพิจารณาที่ร้อยละการขจัดนิกเกิล 70 และ 80 พบว่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในช่วง 15.2 - 22.7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ส่วนที่ร้อยละการขจัดนิกเกิล 90 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยน ทั้งนี้เนื่องจากค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของนิกเกิล (-0.23 V/SHE) มีค่าต่ำกว่าไฮโดรเจน (0 V/SHE) ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจึงดึงกระแสไฟฟ้าไปใช้ส่วนหนึ่งและเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ก่อน ดังนั้นเมื่อมีการใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาของนิกเกิลเกิดได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าจึงเพิ่มมากขึ้น ส่วนที่ร้อยละการขจัดนิกเกิลสูงๆ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันกับเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นผลจาก

สารละลายมีปริมาณนิกเกิลเหลือ้น้อยมาก ทำให้นิกเกิลเกิดปฏิกิริยาข้างลงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกันตลอดช่วงของค่ากระแสไฟฟ้าที่ศึกษา จากผลการทดลองนี้ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการขจัดขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าและร้อยละการขจัดที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าไม่ต่างกันมากนัก เมื่อร้อยละการขจัดนิกเกิลมากกว่า 90 ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ 15.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือ 0.1 แอมแปร์ เพราะจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้านี้ จะสามารถแยกนิกเกิลได้สูงสุดร้อยละ 94.2 ที่เวลา 6 ชั่วโมง

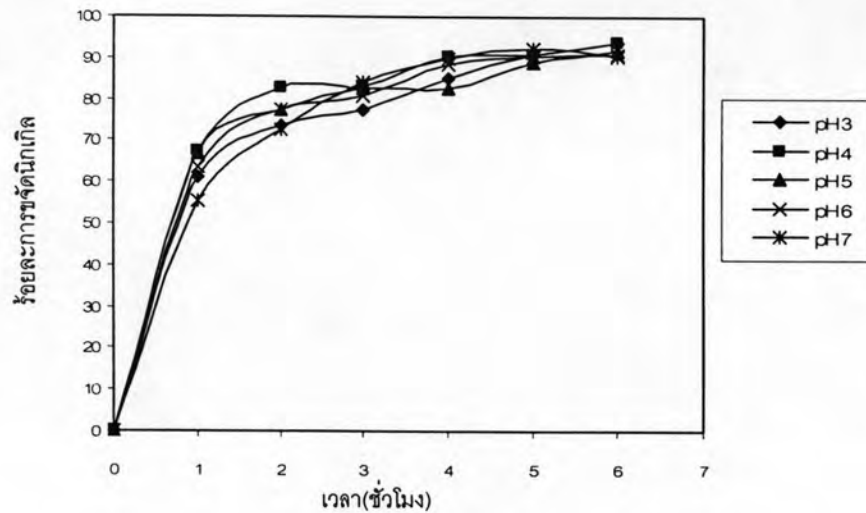


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการขจัดนิกเกิลใดๆ ในสารละลายนิกเกิลเจือจางความเข้มข้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4

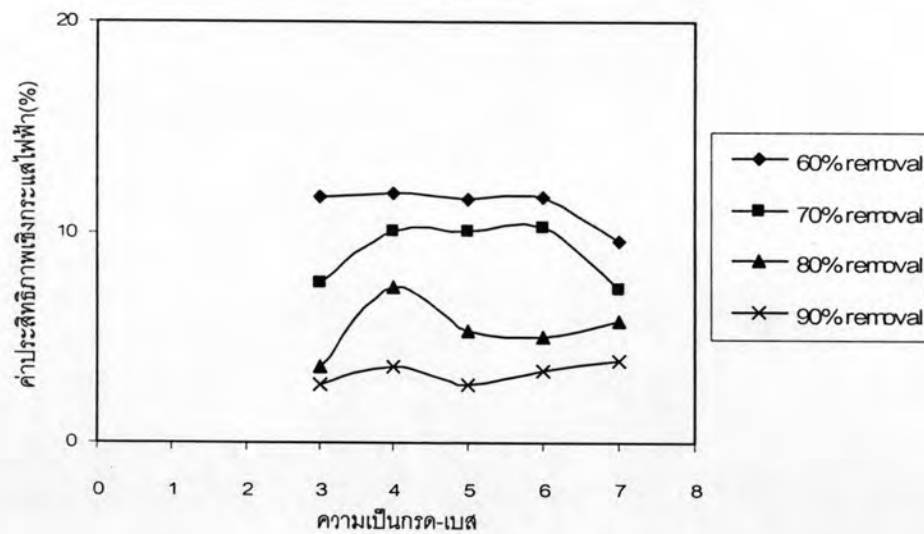
1.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส

การทดลองหาค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อกระบวนการขจัดนิกเกิล โดยใช้สารละลายนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.1 แอมแปร์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของสารละลายที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ร้อยละการขจัดนิกเกิล 60 คือ ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากกว่านี้ จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้ไปถึงกระแสไฟฟ้ามาใช้

ในปฏิริยามากขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดปฏิริยาของนิกเกิลจึงน้อยลง ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูง เมื่อเกิดจนปฏิริยาเป็นกลางที่บริเวณขั้วไฟฟ้า น้ำจะเกิดปฏิริยารีดักชันแทนให้ไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสที่ผิวของขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ทำให้ไอออนของนิกเกิลทำปฏิริยากับไฮดรอกซิลไอออนเกิดเป็นตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ขั้วแคโทด ซึ่งตะกอนของนิกเกิลไฮดรอกไซด์จะไปยับยั้งการเกิดนิวคลีเอชันของไอออนนิกเกิล ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าลดลง ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ 4



(ก)

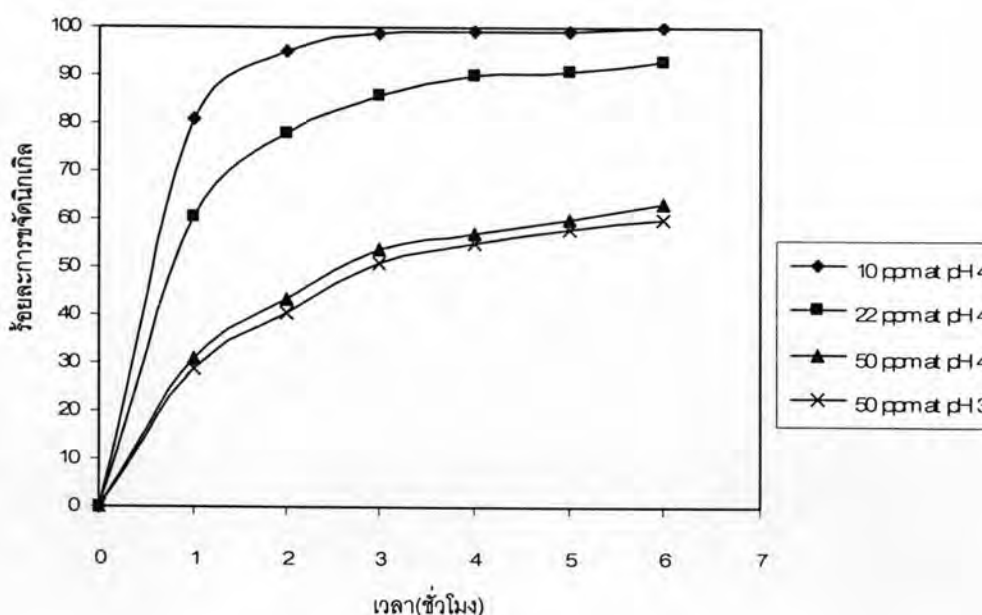


(ข)

รูปที่ 4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อการขจัดนิกเกิล (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดนิกเกิล ณ เวลาใดๆ ที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.1 แอมแปร์ ณ ปริมาณร้อยละของการขจัดนิกเกิลใดๆ

1.3 ผลของค่าความเข้มข้น

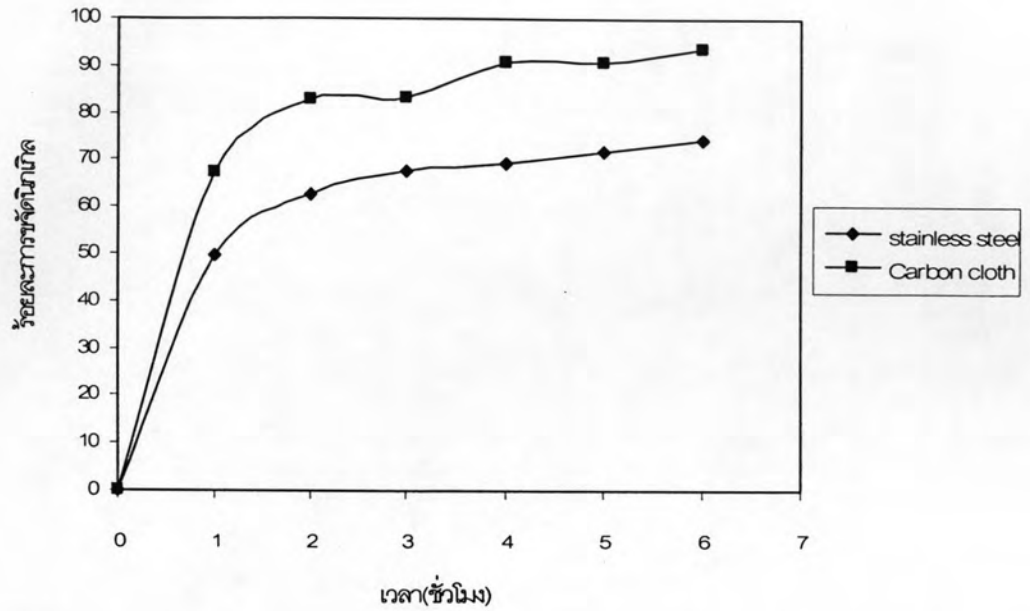
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะมีประมาณ 14.5 มิลลิกรัมต่อลิตร [21-25] ดังนั้นการทดลองหาผลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิล จึงศึกษาในช่วง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารละลายนิกเกิลปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 0.1 แอมแปร์ ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลต่ำจะสามารถขจัดนิกเกิลออกได้ทั้งหมด เมื่อความเข้มข้นของนิกเกิลเพิ่มขึ้นจะให้ร้อยละการขจัดนิกเกิลลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อปริมาณนิกเกิลที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้ายังคงมีค่าต่ำอยู่ เพราะกระแสไฟฟ้าบางส่วนถูกใช้ไปกับปฏิกิริยารีดักชันของน้ำหรือไฮโดรเจนไอออนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นจึงทำการทดลองเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูง (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) เพื่อดูผลปริมาณของโปรตอน พบว่าร้อยละการขจัดนิกเกิลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป 4.4 แสดงว่าค่าความเป็นกรด-เบส ช่วงนี้ไม่มีผลต่อการขจัดนิกเกิล ซึ่งผลการทดลองได้สอดคล้องกับการทดลองหาค่าความเป็นกรด-เบสที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นในช่วง 3-4 จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ได้ใกล้เคียงกัน



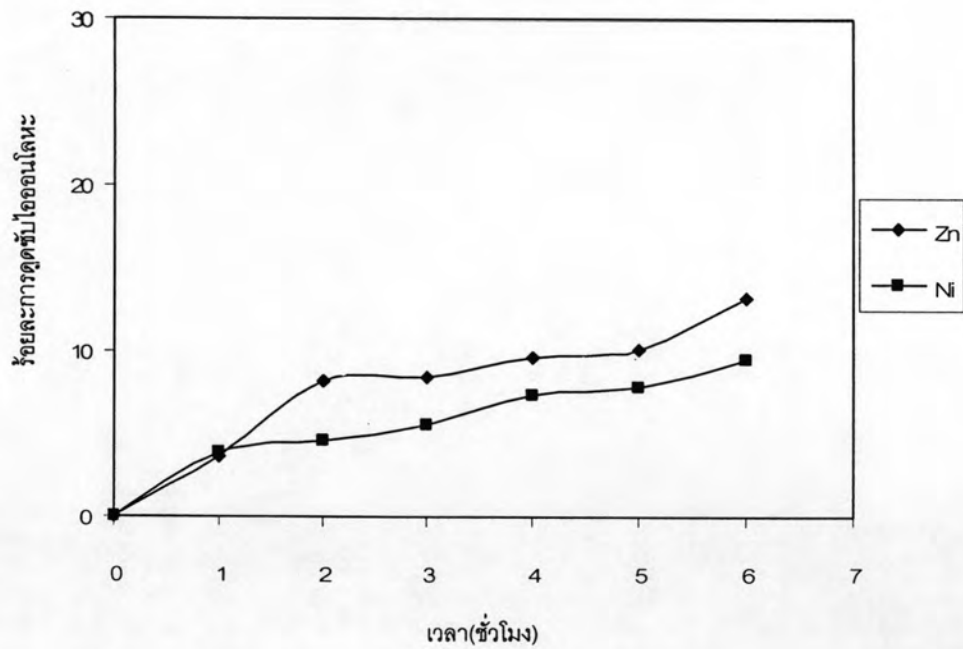
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดนิกเกิล ณ ค่าความเข้มข้นใดๆ ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 0.1 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 3

1.4 ผลของขั้วไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขจัดนิกเกิล โดยการใช้ผ้าคาร์บอนกับการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด โดยใช้สารละลายนิกเกิลปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 กระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ และความเข้มข้นของนิกเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณการขจัดนิกเกิลที่ได้จากใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วแคโทดมีค่าสูงกว่าการใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 1.3 เท่า (ร้อยละ 94.2 ต่อ ร้อยละ 74.1 ที่เวลา 6 ชั่วโมง) ดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้เพราะผ้าคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นใยสานกันดังแสดงในรูปขยายขนาดด้วย SEM ในภาคผนวก ง (รูป ง-1) ซึ่งมีความเป็นรูพรุนสูง (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1485 ไมโครเมตร) และพื้นที่ผิวมาก (29.42 ตารางเมตรต่อกรัม) จากสมบัติดังกล่าวทำให้ผ้าคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาสามารถดูดซับไอออนโลหะไว้ที่ขั้วไฟฟ้าได้ดีกว่าขั้วโลหะ โดยทำการทดสอบยืนยัน โดยทดลองหาการดูดซับของผ้าคาร์บอนโดยไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ในสารละลายสังกะสีและนิกเกิลเดี่ยวปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และควบคุมความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของโลหะไอออนในสารละลายทั้งสองที่เวลาต่างๆ พบว่าปริมาณการดูดซับนิกเกิล และสังกะสีคิดเป็นได้ร้อยละ 9.5 และ 13.5 ที่เวลา 6 ชั่วโมงตามลำดับ ดังรูป 4.6 อธิบายได้ว่าโดยทั่วไปนิกเกิลและสังกะสีจะอยู่ในรูปของไอออนบวก ซึ่งไอออนเหล่านี้จะถูกดูดซับบนผิวหน้าตัวดูดซับ (ผ้าคาร์บอน) ซึ่งเกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ ระหว่างโมเลกุลเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับด้วยการดึงดูดของแรงดึงดูดของแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสอง ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นชั้นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดก่อน จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ดังนั้นสังกะสีซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าจึงเกาะผ้าคาร์บอนได้มากกว่านิกเกิล [26] และอะตอมของสังกะสี (1.53 อังสตรอม) ยังมีขนาดเล็กกว่านิกเกิล (1.62 อังสตรอม) ดังนั้นไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ [27]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขจัดนิเกิล ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 แอมแปร์ และ ความเข้มข้นของนิเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับนิเกิลและสังกะสี ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นตัวดูดซับ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสคงเริ่มต้นเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของนิเกิล และสังกะสีคงที่ที่ 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

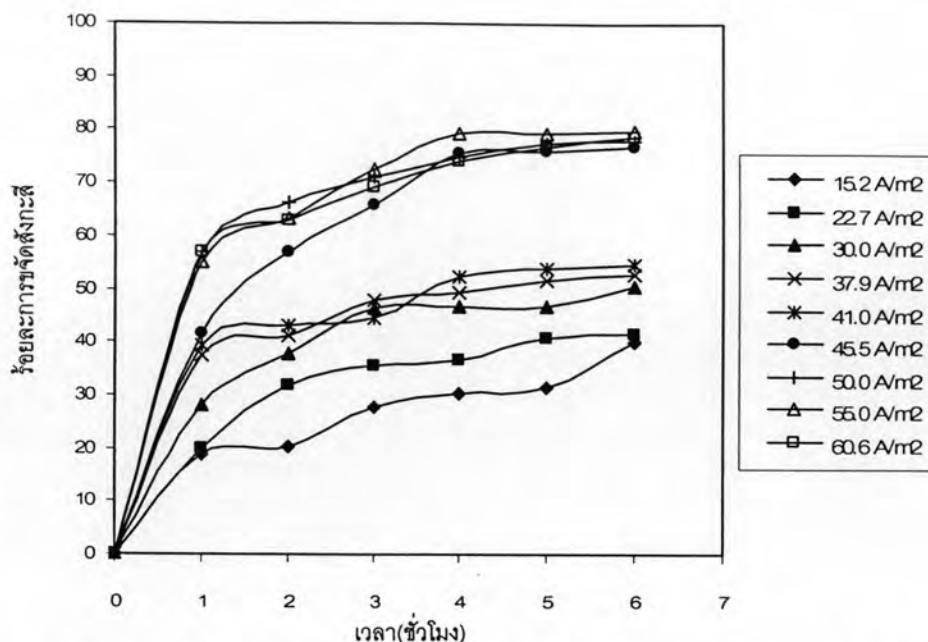
ตอนที่ 2 ผลของตัวแปรที่มีต่อการจัดสังกะสีออกจากสารละลายเจือจาง

2.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้า

การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อกระบวนการจัดสังกะสี ดำเนินการโดยใช้สารละลายสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมให้ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ บริเวณขั้วไฟฟ้าจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาการแยกสังกะสีไปเป็นโลหะสังกะสีเกาะที่ขั้วแคโทดและปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ (4.4) และ (4.2) ตามลำดับ ที่ขั้วแอโนดจะเกิดแก๊สออกซิเจนดังสมการที่ (4.3)

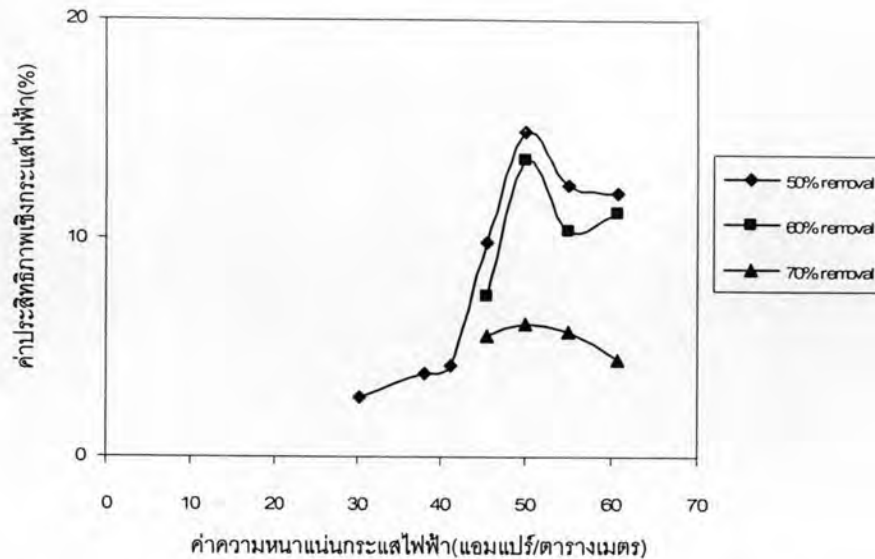


เมื่อนำสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสี พบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยการจัดสังกะสีจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.2-41 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะได้อัตราการจัดสังกะสีสูงสุด 50 เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้ในระบบยังน้อยเกินไปทำให้ไม่เพียงพอสำหรับความต้องการในการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสีทำให้กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจน แต่เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 45.5-60.6 แอมแปร์ต่อตารางเมตรสามารถจัดสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 50 เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทำให้มีกระแสไฟฟ้าเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสีทำให้อัตราการจัดสังกะสีเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของร้อยละการขจัดสังกะสีกับเวลาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ณ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

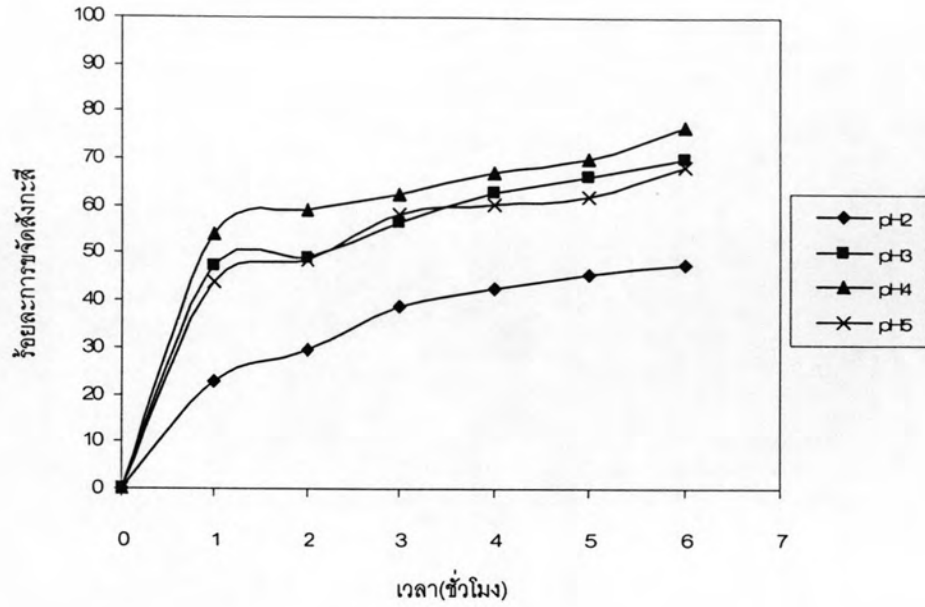
เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.33 แอมแปร์ จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงสุดร้อยละ 14.9 ที่ร้อยละการขจัดสังกะสีเท่ากับ 50 ซึ่งสามารถแยกสังกะสีได้สูงสุดร้อยละ 80 ภายในเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น ปรากฏว่าค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นในระบบที่เป็นปฏิกิริยาร่วมที่ขั้วอิเล็กโทรด เช่นการเกิดแก๊สไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการแยกโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้ลดลง นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อย มีสาเหตุมาจากการที่ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของไฮโดรเจน (0 V/SHE) มีค่ามากกว่าสังกะสี (-0.76 V/SHE) ทำให้ไฮโดรเจนไอออนเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าสังกะสีไอออนที่ขั้วแคโทด



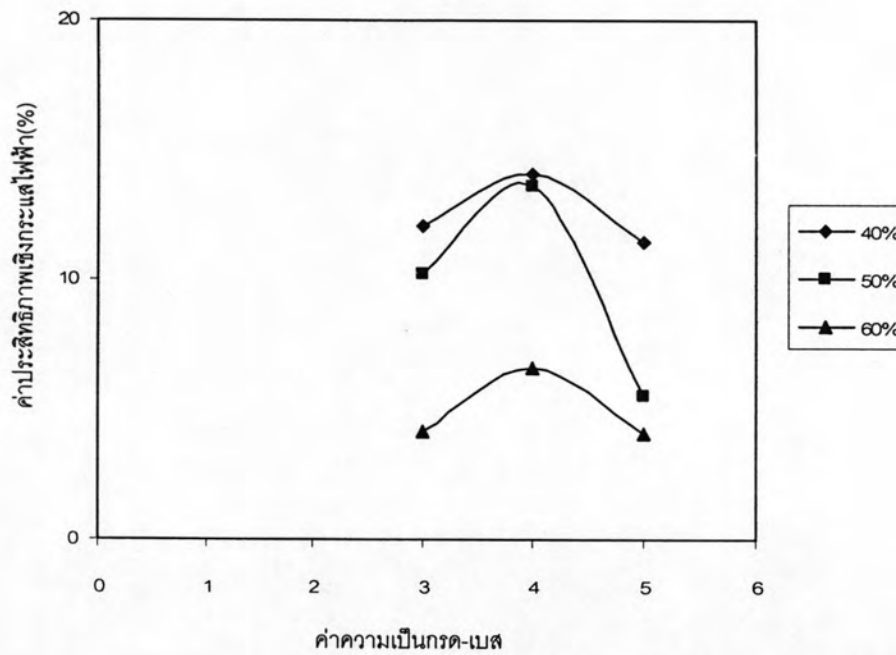
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการขจัดสังกะสีใดๆ ในสารละลายสังกะสีเจือจางความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4

2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส

การทดลองหาค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อกระบวนการขจัดสังกะสี โดยใช้สารละลายสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.33 แอมแปร์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 2 จะได้ร้อยละการขจัดสังกะสีต่ำ เนื่องจากค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจน ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ 4 ให้ค่าร้อยละการขจัดสังกะสีใกล้เคียงกัน และที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 5 ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทำให้ขั้วไฟฟ้าเกิดสภาพเป็นกลาง น้ำจึงเกิดปฏิกิริยารีดักชันแทนไฮโดรเจนไอออนให้ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนสังกะสีเกิดเป็นตะกอนสังกะสีไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์จะไปยับยั้งการเกิดนิวเคลิเอชันของไอออนสังกะสี แต่เมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าสูงกว่า ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่เหมาะสมในการขจัดสังกะสี คือ 4 โดยให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าร้อยละ 14.9 ที่ร้อยละการขจัดสังกะสี 50



(ก)

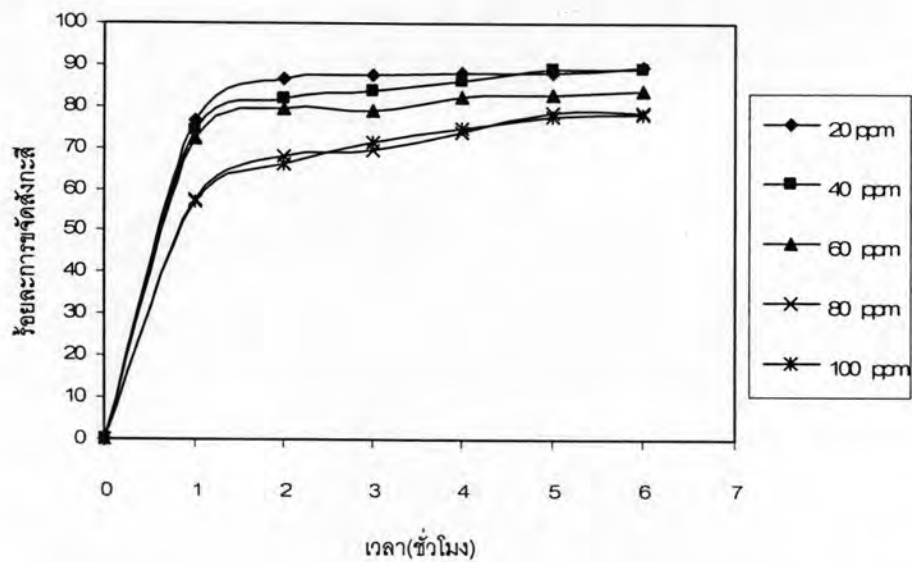


(ข)

รูปที่ 4.9 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อการขจัดสิ่งสกปรก (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละของการขจัดสิ่งสกปรก ณ เวลาใดๆที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.33 แอมแปร์ ณ ปริมาณร้อยละของการขจัดสิ่งสกปรกใดๆ

2.3 ผลของค่าความเข้มข้น

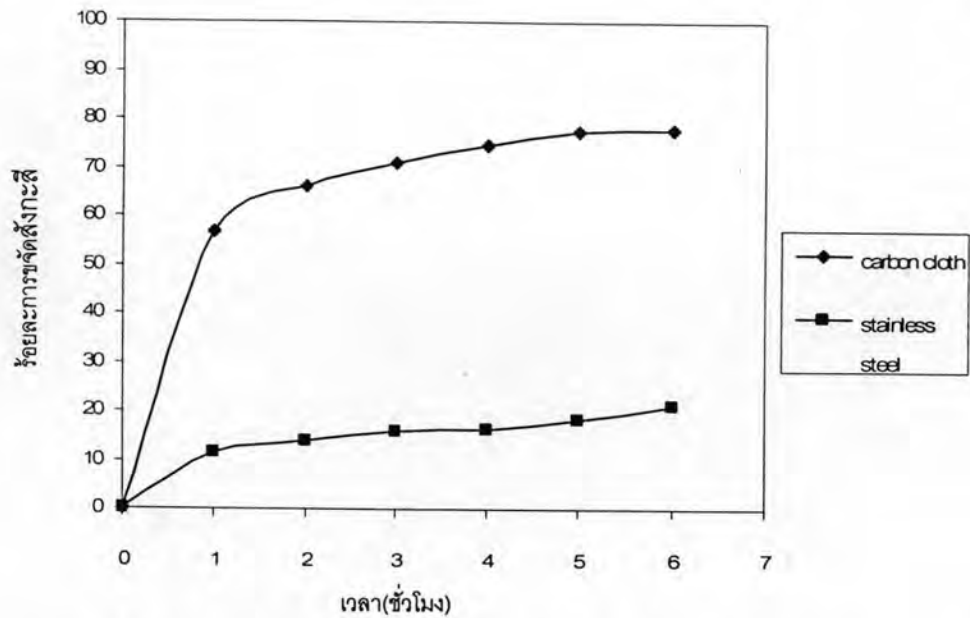
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะมีประมาณ 76.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [21-25] ดังนั้นจึงทำการทดลองหาผลของความเข้มข้นที่มีต่อการขจัดสังกะสี โดยศึกษาความเข้มข้นของสังกะสีในช่วง 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้สารละลายสังกะสีปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 0.33 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำจะได้ร้อยละการขจัดสังกะสีมีค่าสูงสุด 89.4



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดสังกะสี ณ ค่าความเข้มข้นใดๆ ที่กระแสไฟฟ้า 0.33 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ตามลำดับ

2.4 ผลของขั้วไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขจัดสังกะสี โดยการใช้ผ้าคาร์บอนกับการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด โดยใช้สารละลายสังกะสีปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควบคุมค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 0.33 แอมแปร์ และสารละลายสังกะสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าปริมาณการนำสังกะสีกลับคืนที่ได้จากใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วแคโทดมีค่าสูงกว่า 3.7 เท่า (ร้อยละ 77.9 ต่อ ร้อยละ 21.1 ที่เวลา 6 ชั่วโมง) ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากสังกะสีมีค่าศักย์ไฟฟ้า (-0.76 V/SHE) น้อยกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิล (-0.23 V/SHE) ดังนั้นนิกเกิลจึงมีความว่องไวในการรับอิเล็กตรอนหรือมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเร็วกว่าสังกะสี จึงทำให้ปริมาณการนำนิกเกิลกลับคืนมีค่ามากกว่าสังกะสี เมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า

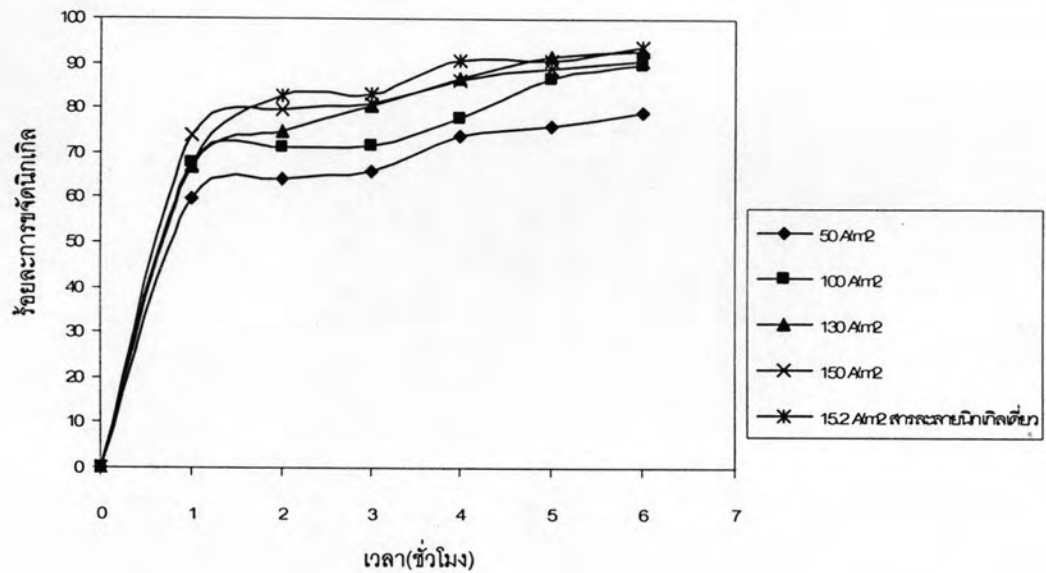


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการจับตัวของเหล็ก ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ขั้วแคโทดต่างกัน ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 0.3 แอมแปร์ และสารละลายสังกะสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

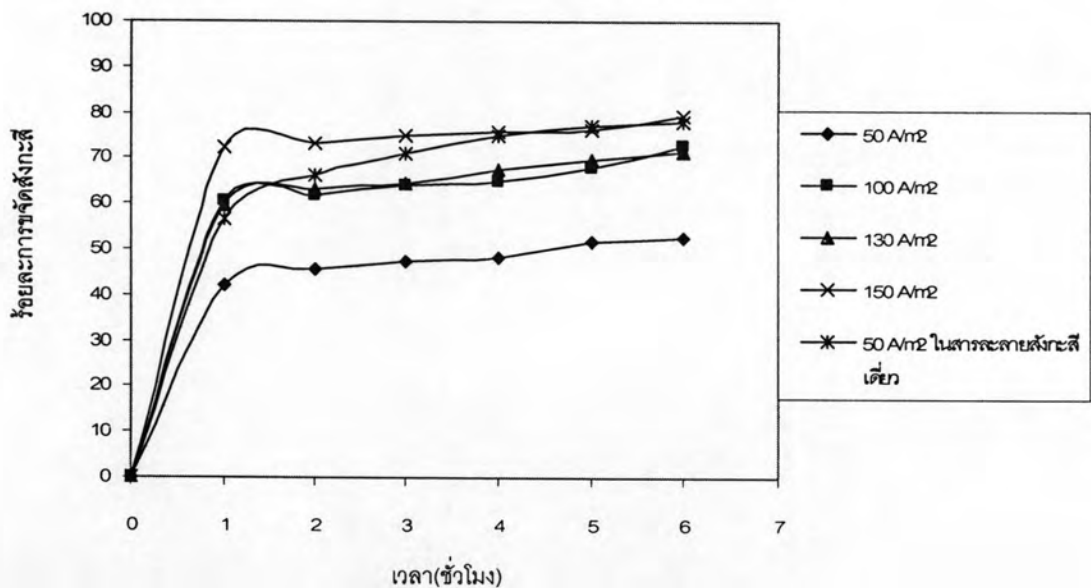
ตอนที่ 3 การขจัดของนิเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายผสม

เนื่องจากได้ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีผลต่อการขจัดนิเกิลและสังกะสี ในตอนที่ 1 และ 2 พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ไม่มีผลต่อการขจัดของโลหะทั้งสอง ดังนั้น จึงศึกษาเฉพาะผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่มีต่อกระบวนการขจัดนิเกิลและสังกะสี โดยใช้สารละลายผสมนิเกิลและสังกะสีที่มีความเข้มข้นของนิเกิลและสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.12 (ก) และ (ข) พบว่าการนำนิเกิลและสังกะสีกลับคืนจากสารละลายผสมใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าในสารละลายเดี่ยว โดยนิเกิลและสังกะสีใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 และ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ สามารถนำนิเกิลและสังกะสีกลับคืนได้ร้อยละ 90.7 และ 79.5 ตามลำดับ แต่ในสารละลายเดี่ยวจะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับนิเกิลและสังกะสีเพียง 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ในการนำนิเกิลและสังกะสีกลับคืนใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 94.2 และ 80.9 ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องมาจากในสารละลายผสมมีโลหะ 2 ชนิด คือ นิเกิลและสังกะสี เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป ทั้งไอออนนิเกิลและสังกะสีต่างก็ใช้กระแสไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการนำโลหะผสมกลับคืนเพื่อให้ได้ปริมาณที่ใกล้เคียงกันกับในระบบ

สารละลายเดี่ยวจะต้องให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจนสามารถแยกนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายผสมได้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับสารละลายนิกเกิลและสังกะสีอย่างเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายผสมซึ่งมีความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ณ ค่าความความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดๆ และค่าความเป็นกรด-เบสคงเริ่มต้นเท่ากับ 4

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้น ความเข้มข้นของสารละลายหรือปริมาณโลหะไอออน และเวลา มีผลต่อกระบวนการขจัด ไอออนโลหะด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงจะทำการศึกษาผลความสัมพันธ์ของตัวแปร ร่วม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล

ตอนที่ 4 การหาความสัมพันธ์ของผลการทดลองจากสารละลายผสมเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2^k

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว ที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจาง ค่าตอบสนองในงานวิจัยนี้คือ ร้อยละการขจัด ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปรได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้น และเวลา โดยการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^4 และ 2^3 (โดยรวม ตัวแปรกระแสไฟฟ้าและเวลาเป็นตัวแปรประจุไฟฟ้า) แฟกทอเรียล ซึ่งกำหนดให้

- A คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
- B คือ ความเข้มข้นของโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- C คือ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น
- D คือ เวลา (ชั่วโมง)

จากการออกแบบการทดลองจะทำการทดลองทั้งหมด 16 และ 8 การทดลอง โดยทำซ้ำ การทดลองละ 2 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่มี ผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม จะได้ผลการทดลองดังตาราง ที่ 4.1 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาผลกระทบและความแปรปรวน (Analysis of variace, ANOVA) ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อรูปแบบของสมการถดถอย

4.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม

ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปรได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ความเข้มข้น และเวลา โดยการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^4 ซึ่งกำหนดให้

A คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำสุด 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (-) และสูงสุด 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (+)

B คือ ความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสีต่ำสุดเท่ากันคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (-) และสูงสุด 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (+) ตามลำดับ

C คือ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำสุด 3 (-) และสูงสุด 6 (+)

D คือ เวลาต่ำสุด 3 ชั่วโมง (-) และสูงสุด 6 ชั่วโมง (+)

ตารางที่ 4.1 ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม

ลำดับที่	การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละการขจัด			
						Ni		Zn	
		A	B	C	D	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 1	Replicate 2
1	(1)	-	-	-	-	30.9	30.5	83.8	86.3
2	a	+	-	-	-	96.5	85.9	83.7	82.8
3	b	-	+	-	-	40.8	49.6	31.7	30.6
4	ab	+	+	-	-	65.7	72.9	58.6	63.4
5	c	-	-	+	-	69.7	60.0	60.8	48.6
6	ac	+	-	+	-	54.6	64.4	52.6	45.0
7	bc	-	+	+	-	62.4	58.6	51.6	54.8
8	abc	+	+	+	-	54.5	52.8	38.0	28.8
9	d	-	-	-	+	97.8	96.0	94.1	93.6
10	ad	+	-	-	+	99.3	92.7	88.0	96.1
11	bd	-	+	-	+	51.0	60.3	37.2	32.8
12	abd	+	+	-	+	79.8	79.7	70.8	74.6
13	cd	-	-	+	+	79.7	72.4	72.7	63.3
14	acd	+	-	+	+	76.0	77.3	62.0	67.6
15	bcd	-	+	+	+	67.5	60.0	58.4	58.1
16	abcd	+	+	+	+	77.7	70.5	78.3	69.0

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลออกจากสารละลายเจือจางผสม

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิกเกิล

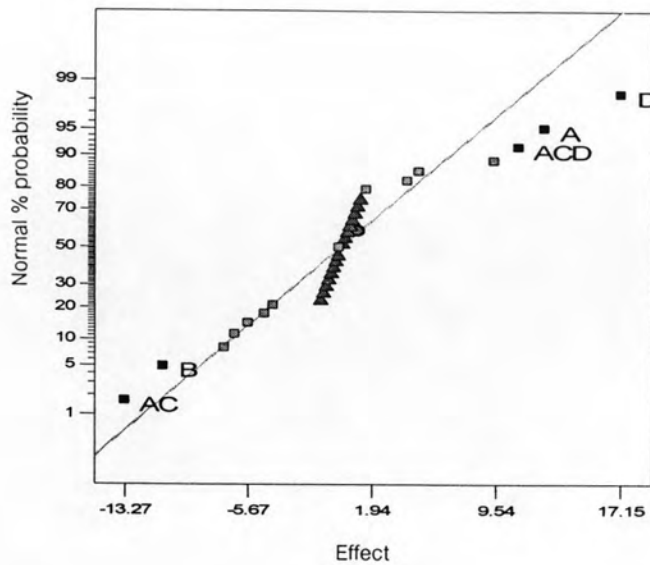
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
A	1245.01	1	1245.01	55.45	0.0020
B	951.57	1	951.57	42.38	0.0058
D	2352.98	1	2352.98	104.79	<0.0001
AC	1409.27	1	1409.27	62.76	<0.0011
ACD	952.01	1	952.01	42.40	<0.0058
Residual	2742.99	26	105.50		
Cor Total	9653.82	31			

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า F value ของตัวแปร A, B, D, AC และ ACD มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ($F_{0.05,1,26}$) คือ 4.23 แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบกับร้อยละการขจัดของนิกเกิลดังแสดงในรูป 4.13 สามารถกล่าวได้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (B) เวลา (D) สหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (AC) และ สหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และเวลา (ACD) มีผลต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.5

$$\hat{y} = 67.93 + 6.24A - 5.45B + 8.58D - 6.64AC + 5.45ACD \quad (4.5)$$

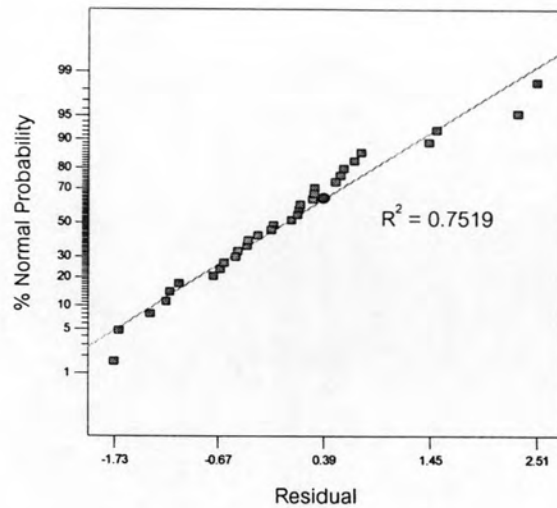
DESIGN-EXPERT Plot
Response 1

A: Current Density
B: concentration
C: pH
D: Time

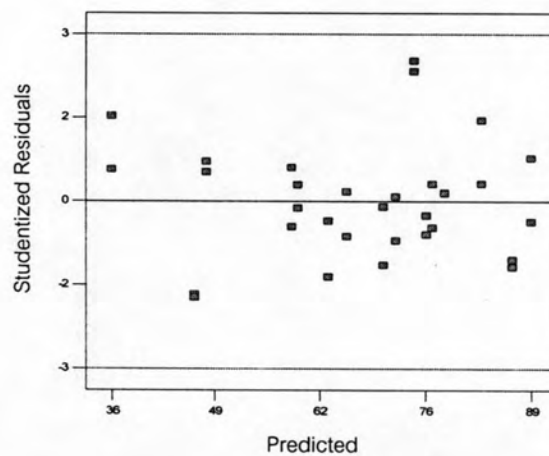


รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (Normal probability plot)

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยเชิงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ Normal probability plot ของร้อยละการขจัดนิกเกิลที่ได้จากคำนวณในสมการ 4.5 จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.7519$ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายดังแสดงในรูป 4.15 จะพบว่ามี การกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

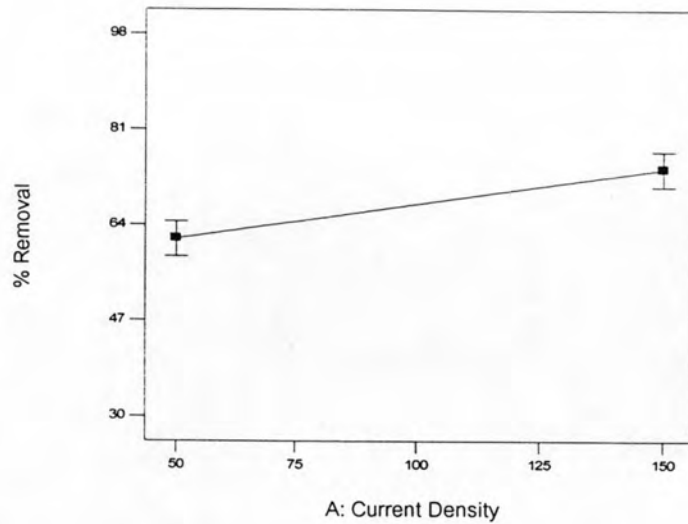


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขาดนิกเกิล



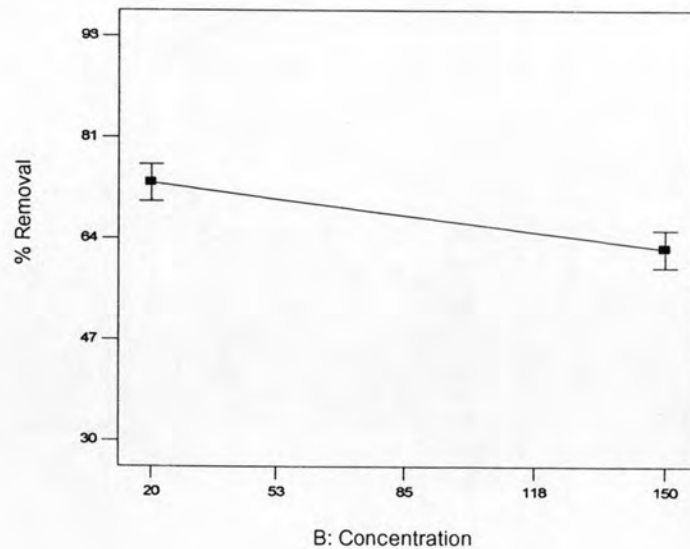
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิล

ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการขาดนิกเกิล ดังแสดงในรูป 4.16 พบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ร้อยละการขาดนิกเกิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าตามความสัมพันธ์ฟาราเดย์ คือปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาดังสมการที่ (2.13)

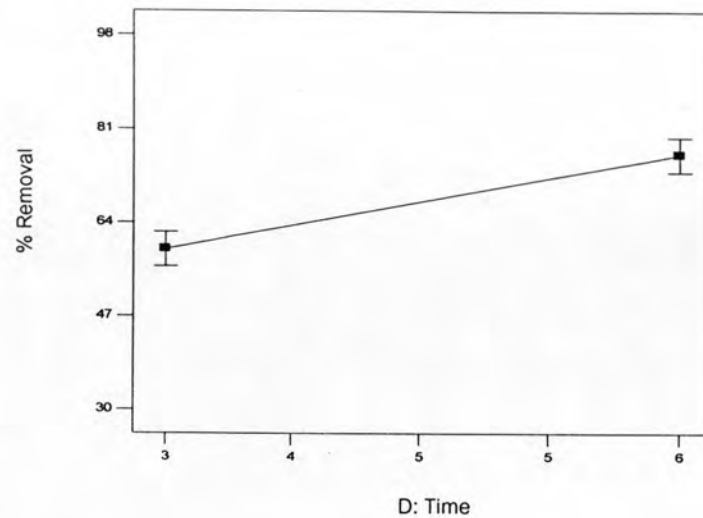


รูปที่ 4.16 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล

ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจางที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล ดังแสดงในรูป 4.17 พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเจือจางต่ำจะให้ร้อยละการขจัดนิกเกิลสูง และผลของเวลาที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล ดังแสดงในรูป 4.18 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะให้ร้อยละการขจัดนิกเกิลสูง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ คือ ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาหรือประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรในตอนที่ 1 และ 2

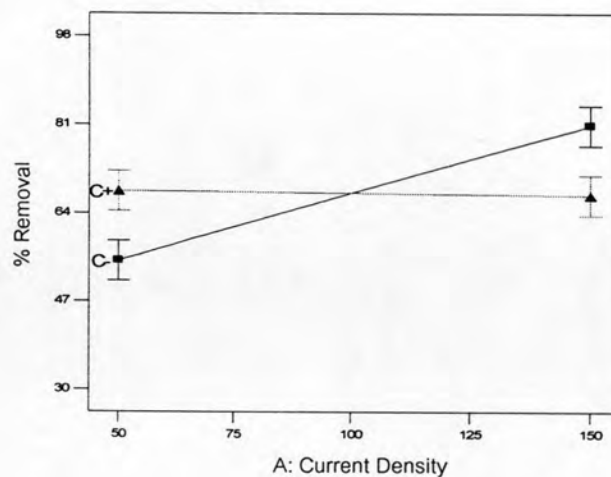


รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจางที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.18 ผลของเวลาที่มีต่อร้อยละการขจัดนิเกิล

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะได้ร้อยละการขจัดนิเกิลสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อให้ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นลดลง แต่ในขณะเดียวกัน ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำจะได้ร้อยละการขจัดนิเกิลลดลงที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำ ช่วงที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าไม่มีผลต่อร้อยละการขจัดนิเกิล ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนและไอออนโลหะคงที่ในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสสูง จึงไม่มีผลต่อการใช้กระแสไฟฟ้าและร้อยละการขจัดนิเกิล



รูปที่ 4.19 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสที่มีต่อร้อยละการขจัดนิเกิล

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการจัดตั้งกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการจัดตั้งกะสี

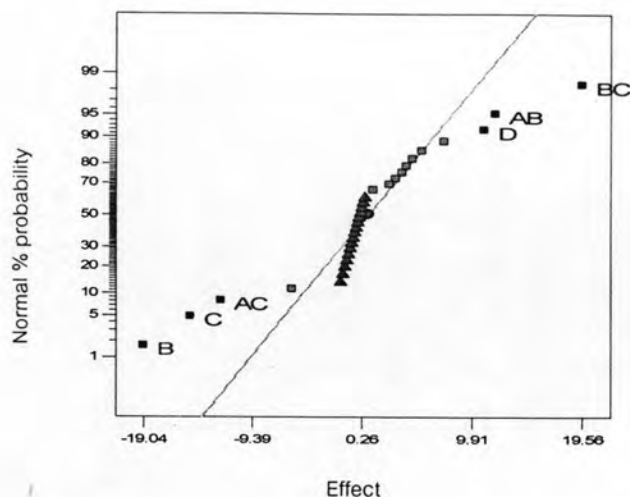
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
B	2899.79	1	2899.79	156.43	<0.0001
C	1770.13	1	1770.13	95.49	<0.0001
D	963.61	1	963.61	51.98	0.0014
AB	1142.42	1	1142.42	61.63	0.0006
AC	1184.14	1	1184.14	63.88	0.0005
BC	3060.36	1	3060.36	165.09	<0.0001
Residual	1869.01	25	74.46		
Cor Total	12889.45	31			

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า F Value ของตัวแปร B, C, D, AB, AC และ BC มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ($F_{0.05,1,25}$) คือ 4.24 แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบต่อร้อยละการจัดของสังกะสีดังแสดงในรูป 4.20 สามารถกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (B) ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (C) และ เวลา (D) สหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (AB) สหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (AC) และ สหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (BC) มีผลต่อร้อยละการจัดตั้งกะสีอย่างมีนัยสำคัญในภาวะที่คงที่ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.6

$$\hat{y} = 61.80 - 9.52B - 7.44C + 5.49D + 5.98AB - 6.08AC + 9.78BC \quad (4.6)$$

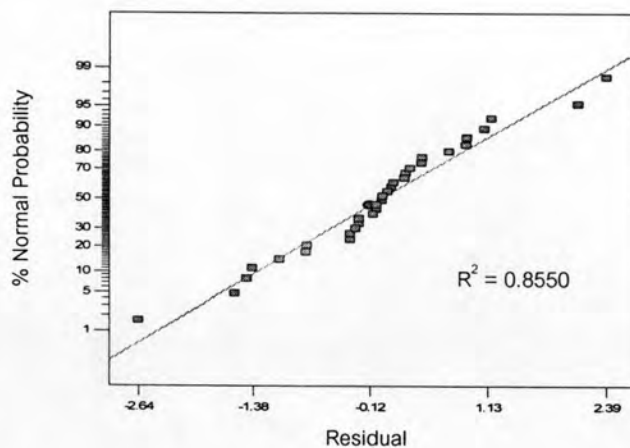
DESIGN-EXPERT Plot
Response 1

A: Current Density
B: concentration
C: pH
D: Time

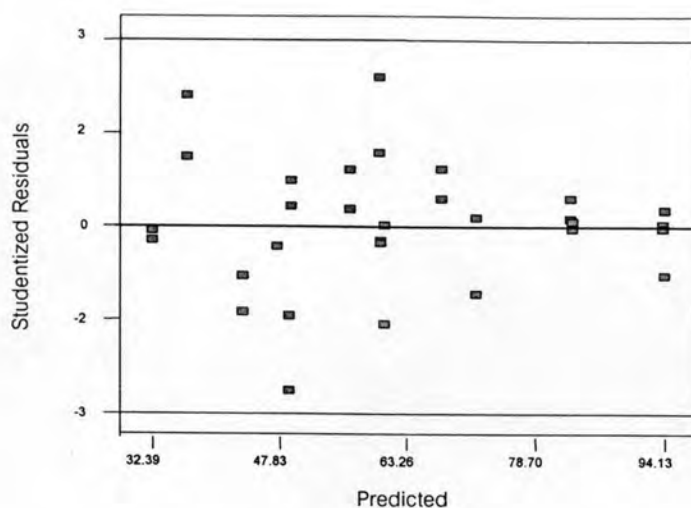


รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของสังกะสี (Normal probability plot)

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยเชิงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.21 แสดงกราฟ Normal probability plot ของร้อยละการขจัดสังกะสีที่ได้จากคำนวณในสมการ 4.6 จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.8550$ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายดังแสดงในรูป 4.22 จะพบว่ามีการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

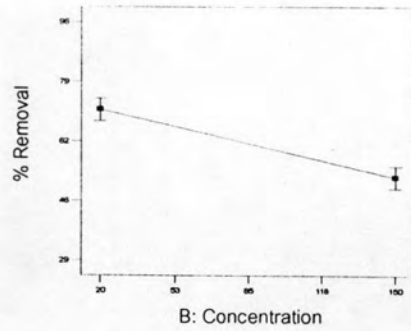


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของสังกะสี

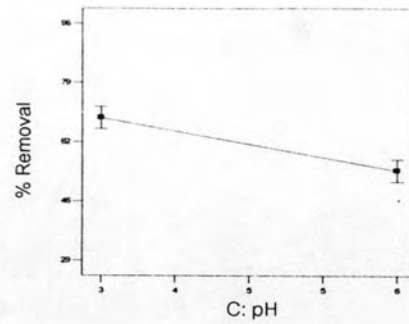


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของสังกะสี

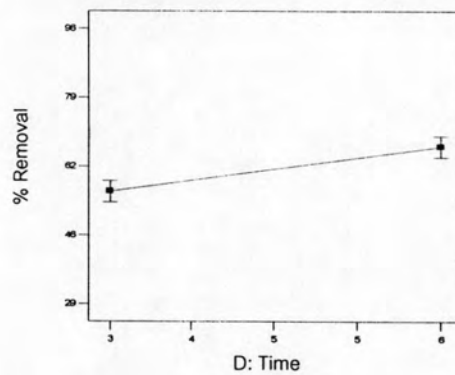
ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น และ เวลา ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี ดังแสดงในรูป 4.23 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเจือจางต่ำ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำ และเวลาสูง จะได้ร้อยละการขจัดสังกะสีสูง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ คือ ปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น และที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำจะได้ร้อยละการขจัดสังกะสีสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง เนื่องจากว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออนที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะมีภาวะเป็นกลางน้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันแทนให้ไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสที่ผิวของขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ทำให้ไอออนของสังกะสีทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนเกิดเป็นตะกอนสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ขั้วแคโทด ซึ่งตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์จะไปยับยั้งการเกิดนิวคลิเอชันของไอออนสังกะสีและไอออนสังกะสีเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวขั้วไฟฟ้าได้น้อยลง



(ก)



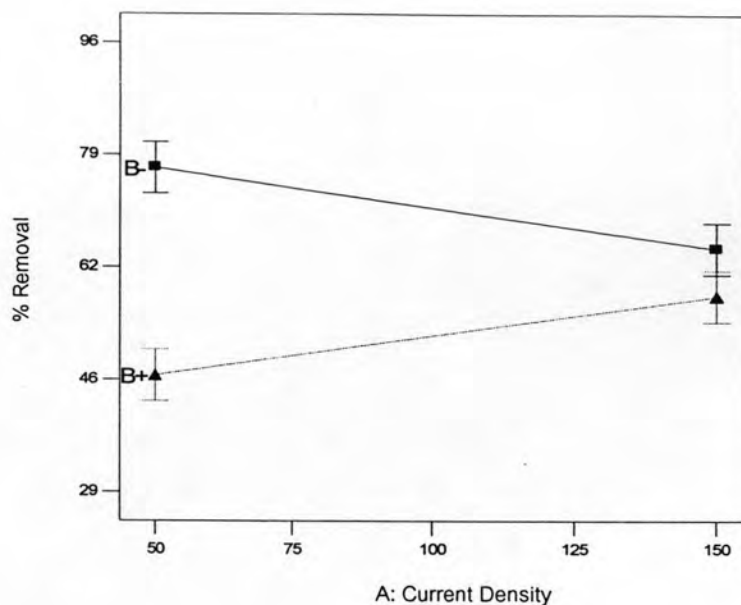
(ข)



(ค)

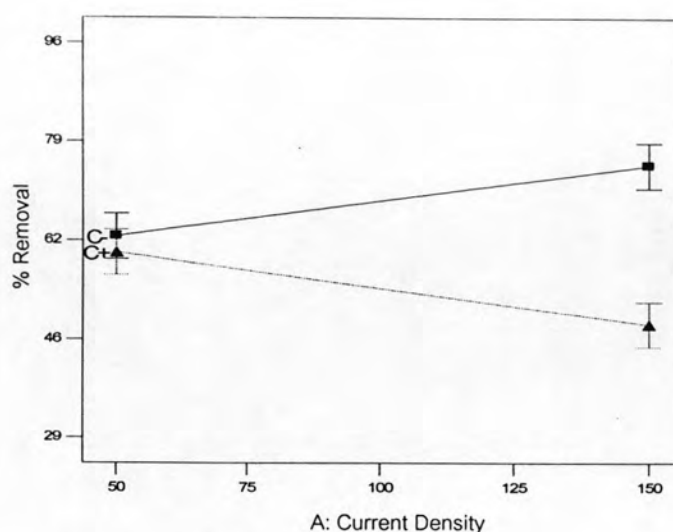
รูปที่ 4.23 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ก) ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ข) และเวลา (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี

ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงและปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเจือจางผลมต่ำจะให้ร้อยละการขจัดสังกะสีสูงที่สุด เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้นแต่ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลง และส่งผลอย่างชัดเจนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลง



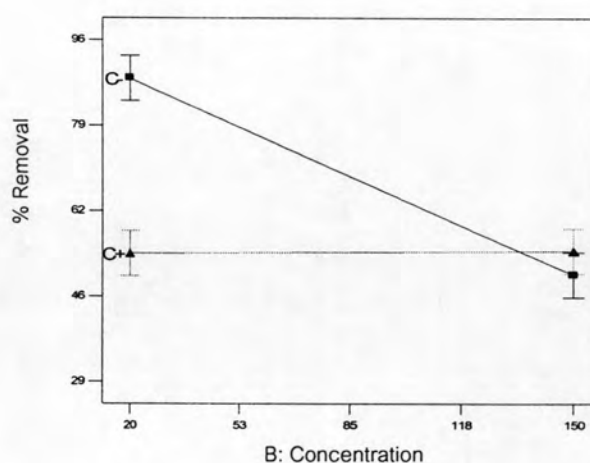
รูปที่ 4.24 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของสารละลายเจือจางที่มีต่อการขจัดสังกะสี

ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีต่อการขจัดสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นจะสูงหรือต่ำจะให้ร้อยละการขจัดสังกะสีใกล้เคียงกันที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำ แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นมีผลต่อระบบมาก ซึ่งในภาวะที่ทำการทดลองการให้กระแสไฟฟ้าในระบบเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากถ้าให้กระแสไฟฟ้าในระบบมากเกินไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์ในระบบในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง แต่ถ้าในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำในระบบจะเกิดแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งได้ทำการทดลองในตอนที่ 2.2 พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ให้ร้อยละการขจัดสังกะสีและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าในระบบสารละลายสังกะสีเดี่ยวสูงที่สุด ดังนั้นที่ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 จึงเหมาะสมที่สุดที่นำมาเป็นภาวะในการแยกสังกะสีออกจากสารละลายผสม



รูปที่ 4.25 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีต่อการขจัดสังกะสี

ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจางและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางผสมต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำจะได้ร้อยละการขจัดสังกะสีสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูง เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูงๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นกลางที่บริเวณขั้วไฟฟ้า น้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันแทน ทำให้ตกตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์ ดังนั้นร้อยละการขจัดของสังกะสีจึงลดลง



รูปที่ 4.26 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจางและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี

4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกิลและ สังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าตัวแปรที่มีผลในการเกิดปฏิกิริยาในระบบ คือ ประจุไฟฟ้าหรือผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับเวลาตามสมการที่ 4.7 ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการวิเคราะห์ผลของความสัมพันธ์ของตัวแปรเมื่อพิจารณาที่ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

$$Q = it \quad (4.7)$$

เมื่อ i คือ กระแสไฟฟ้า(แอมแปร์)
 t คือ เวลา (ชั่วโมง)

ที่ประจุไฟฟ้า 1.1×10^6 คูลอมบ์ต่อตารางเมตร เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะทำการทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะใช้เวลา 2 ชั่วโมง

ดังนั้น ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 3 ตัวแปรได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ความเข้มข้น และให้เวลาเปลี่ยนแปลงตามกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ประจุไฟฟ้าคงที่ โดยการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^3 ซึ่งกำหนดให้

A คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำสุด 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (-) และสูงสุด 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (+)

B คือ ความเข้มข้นของนิกิลและสังกะสีต่ำสุดเท่ากันคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (-) และสูงสุด 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (+) ตามลำดับ

C คือ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำสุด 3 (-) และสูงสุด 6 (+)

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการขจัดนิเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

ลำดับที่	การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละการขจัด			
					Ni		Zn	
		A	B	C	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 1	Replicate 2
1	(1)	-	-	-	97.8	96.0	94.0	93.6
2	a	+	-	-	30.9	30.5	28.4	27.3
3	b	-	+	-	51.0	60.3	37.2	32.8
4	ab	+	+	-	21.7	24.1	19.1	20.9
5	c	-	-	+	79.7	72.4	72.7	63.3
6	ac	+	-	+	18.0	21.3	17.4	14.8
7	bc	-	+	+	67.5	60.0	58.4	58.1
8	abc	+	+	+	18.0	17.4	12.5	9.5

4.2.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิเกิลออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

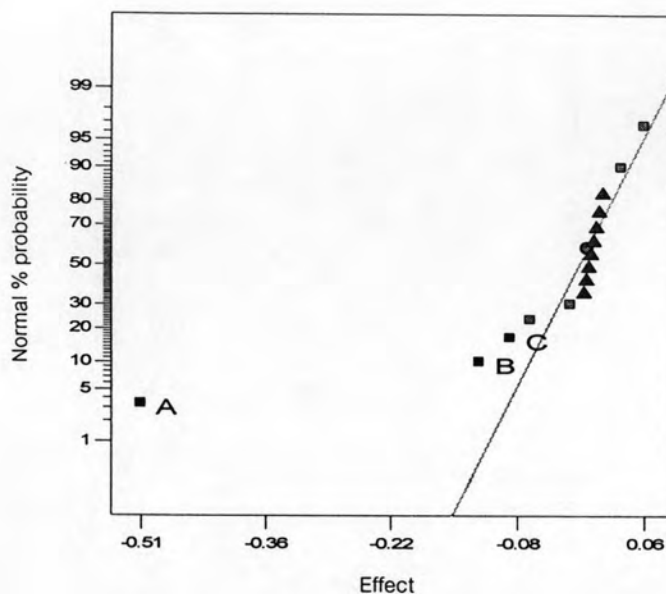
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
A	1.03	1	1.03	912.61	<0.0001
B	0.06	1	0.06	53.60	0.0022
C	0.03	1	0.03	27.46	0.0166
Residual	0.05	12			
Cor Total	1.17	15			

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่า F Value ของตัวแปร A, B และ C มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ($F_{0.05, 1, 12}$) คือ 4.75 แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบกับร้อยละการขจัดของนิเกิล ดังแสดงในรูป 4.27 สามารถกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (B) และ ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (C) มีผลต่อร้อยละการขจัดนิเกิลอย่างมีนัยสำคัญในภาวะที่คงที่ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.8

$$\log y_{Ni} = 1.60 - 0.25A - 0.061B - 0.044C \quad (4.8)$$

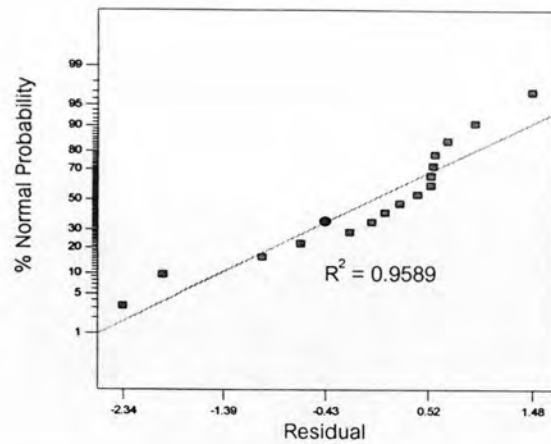
DESIGN-EXPERT Plot
Log10(Response 1)

A: current density
B: concentration
C: pH

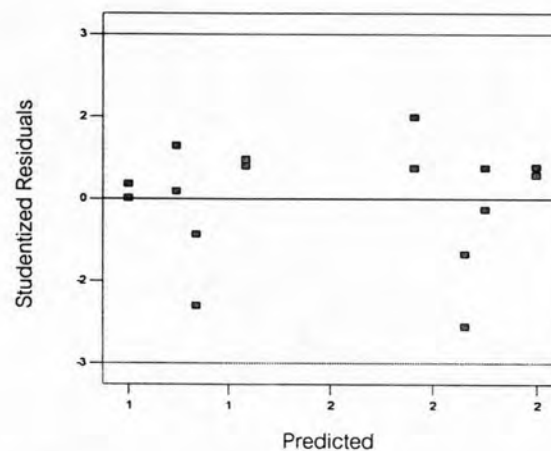


รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยเชิงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.28 แสดงกราฟ Normal probability plot ของร้อยละการขจัดนิกเกิลที่ได้จากคำนวณในสมการ 4.8 จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.9589$ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายดังแสดงในรูป 4.29 จะพบว่าการกระจายตัวมีลักษณะรูปแบบไม่แน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

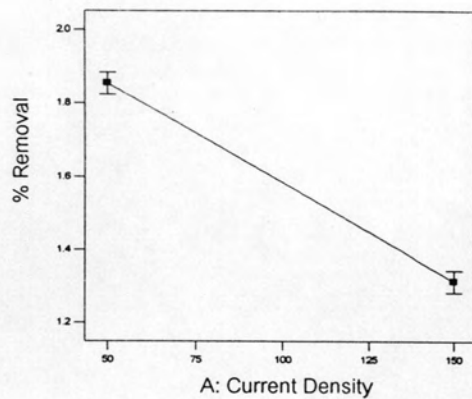


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

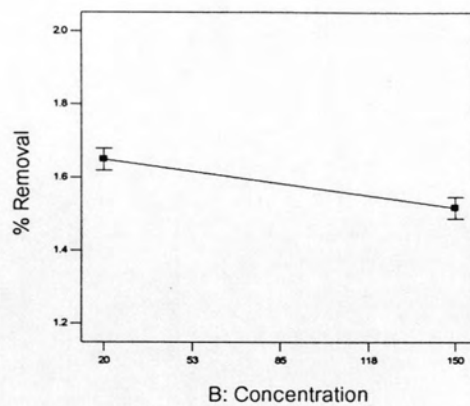


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

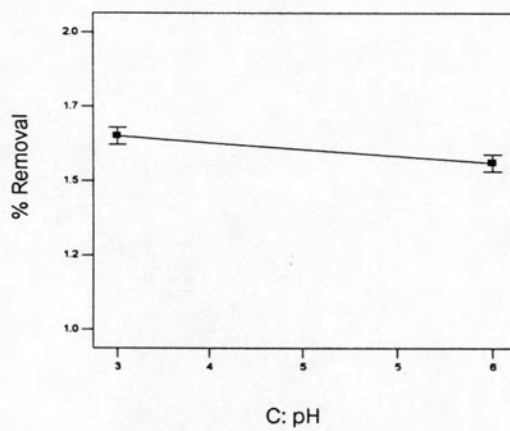
ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อการขจัดนิกเกิลดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง จะให้ร้อยละการขจัดนิกเกิลลดลง เนื่องจากว่าเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอื่นในระบบที่เป็นปฏิกิริยาร่วมที่ขั้วไฟฟ้า เช่น การเกิดไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการแยกโลหะ ทำให้ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลง ส่วนที่ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางสูงทำให้กระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการขจัดโลหะ และที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูงจะทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.30 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ข) และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลที่เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

4.2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการจัด
 สังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการกำจัดสังกะสีเมื่อให้
 ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

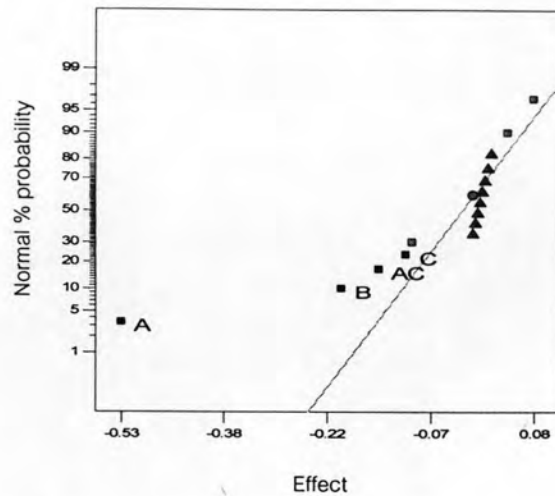
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
A	1.13	1	1.13	949.5	<0.0001
B	0.16	1	0.16	99.33	0.0009
C	0.05	1	0.05	25.81	0.0373
AC	0.09	1	0.09	48.95	0.0076
Residual	0.09	11	0.09		
Cor Total	1.51	15	1.51		

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่า F Value ของตัวแปร A, B, C และ AC มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ($F_{0.05, 1, 11}$) คือ 4.84 แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบต่อร้อยละการกำจัดของสังกะสี ดังแสดงในรูป 4.31 สามารถกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (B) ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (C) และ สหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (AC) มีผลต่อร้อยละการกำจัดสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าคงที่ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.9

$$\log \hat{y}_{zn} = 1.51 - 0.27A - 0.10B - 0.053C - 0.073AC \quad (4.9)$$

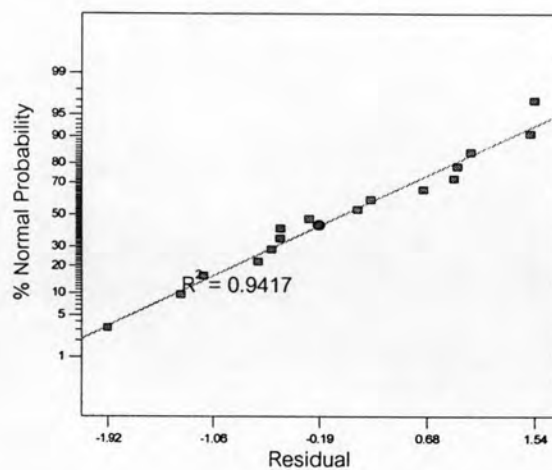
DESIGN-EXPERT Plot
Log10(Response 1)

A: current density
B: concentration
C: pH

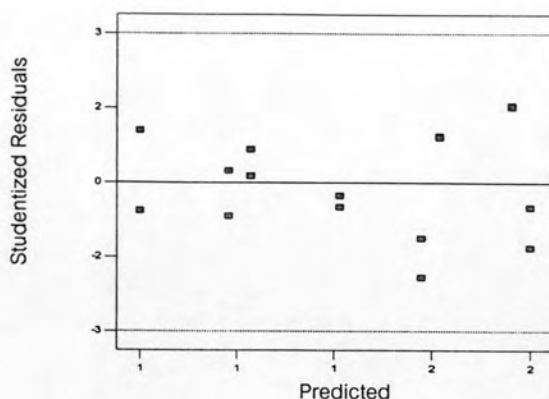


รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์หีบัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของสังกะสี (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยเชิงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.32 แสดงกราฟ Normal probability plot ของร้อยละการขจัดสังกะสีที่ได้จากคำนวณในสมการ 4.9 จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.9417$ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายดังแสดงในรูป 4.33 จะพบว่ามีการกระจายตัวมีลักษณะรูปแบบไม่แน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

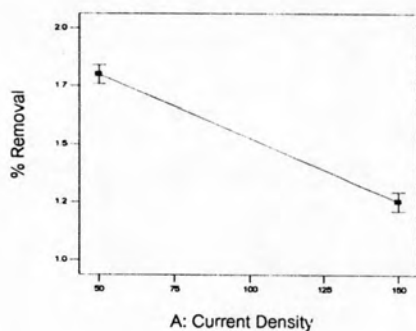


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

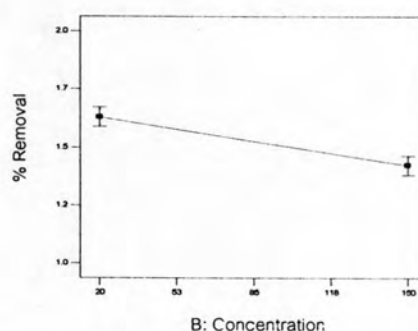


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

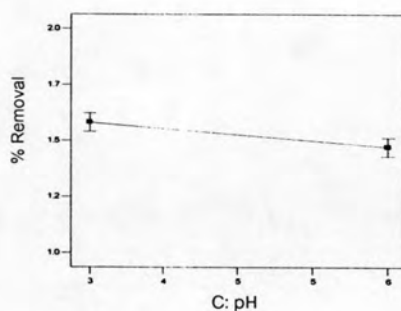
ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีต่อการขจัดสังกะสีดังแสดงในรูปที่ 4.34 (ก) (ข) และ (ค) พบว่าเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางผสม และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง จะให้ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลงเหมือนกับการขจัดของนิกเกิล



(ก)



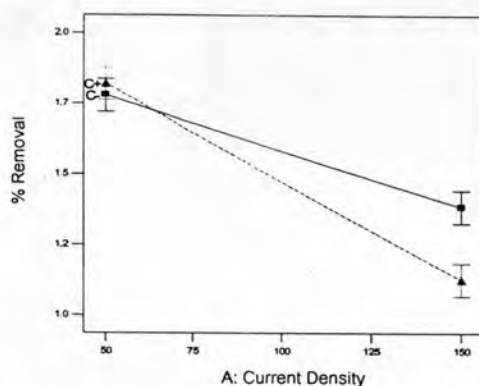
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.34 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ข) และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสีที่เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นมีผลต่อร้อยละการขจัดสังกะสีดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง ทำให้ร้อยละการขจัดสังกะสีลดลง เนื่องจากว่าเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูงทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนดังที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว



รูปที่ 4.35 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน

4.3 การศึกษาสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

การศึกษาโดยให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน โดยกำหนดให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 2 ชั่วโมง จะได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด 3.6×10^5 คูลอมป์ต่อตารางเมตร และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เวลา 6 ชั่วโมง จะได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด 3.2×10^6 คูลอมป์ต่อตารางเมตร

ดังนั้น ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 3 ตัวแปรได้แก่ ประจุไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ความเข้มข้น โดยการออกแบบการทดลองจะเป็นแบบ 2^3 ซึ่งกำหนดให้

A คือ ค่าประจุไฟฟ้าต่ำสุด 3.6×10^5 คูลอมป์ต่อตารางเมตร (-) และสูงสุด 3.2×10^6 คูลอมป์ต่อตารางเมตร (+)

B คือ ความเข้มข้นต่ำสุด 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (-) และสูงสุด 150 มิลลิกรัมต่อลิตร (+)

C คือ ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำสุด 3 (-) และสูงสุด 6 (+)

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

ลำดับที่	การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละการขจัด			
					Ni		Zn	
		A	B	C	Replicate 1	Replicate 2	Replicate 1	Replicate 2
1	(1)	-	-	-	30.9	30.5	27.7	28.5
2	a	-	+	-	13.5	16.4	10.5	10.1
3	b	-	-	+	23.0	19.8	20.1	16.1
4	ab	-	+	+	20.6	19.3	17.0	18.1
5	c	+	-	-	99.3	92.7	88.0	96.1
6	ac	+	+	-	79.8	79.7	70.8	74.5
7	bc	+	-	+	76.0	77.3	62.0	67.6
8	abc	+	+	+	77.7	70.5	78.3	69.0

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
A	77.43	1	26.91	201.43	<0.0001
B	2.04	1	77.43	579.62	0.0021
BC	1.26	1	2.04	15.26	0.0097
Residual	1.60	12	0.13	9.42	
Cor Total	82.33	15			

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

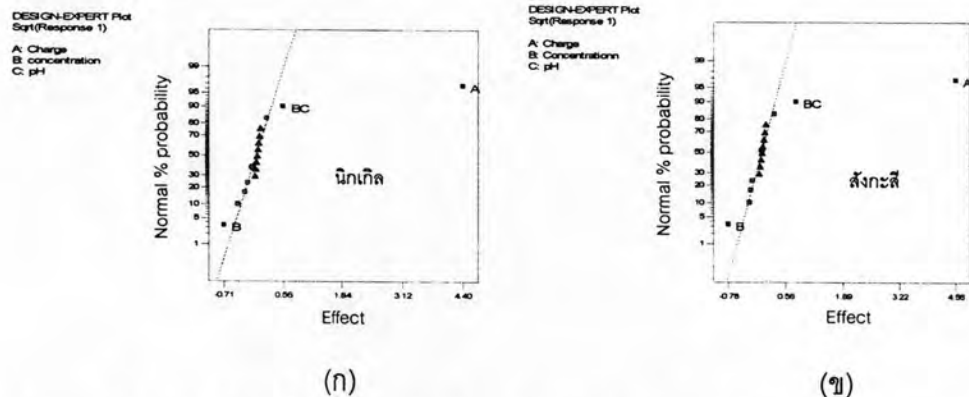
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F
A	83.05	1	83.05	1062.18	<0.0001
B	2.41	1	2.41	24.45	0.0012
BC	2.59	1	2.59	28.22	0.0003
Residual	1.62	12	0.13		
Cor Total	89.67	15			

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าค่า F Value ของตัวแปร A,B และ BC มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ ($F_{0.05, 1, 12}$) คือ 4.75 แสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบต่อร้อยละการขจัด

ของนิกเกิลและสังกะสีแสดงในรูป 4.36 (ก) และ (ข) สามารถกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (B) และสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (BC) มีผลต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญในภาวะที่ประจุไฟฟ้าต่างกัน จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.10 และ 4.11

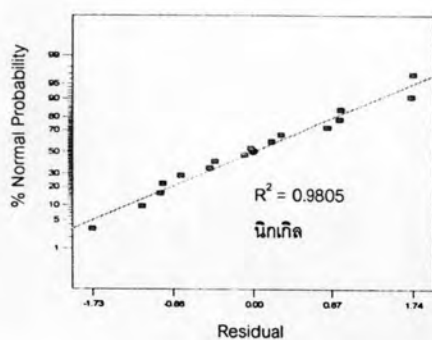
$$\hat{y}_{Ni} = 6.82 + 2.20A - 0.36B + 0.28BC \quad (4.10)$$

$$\hat{y}_{Zn} = 6.51 + 2.28A - 0.39B + 0.40BC \quad (4.11)$$

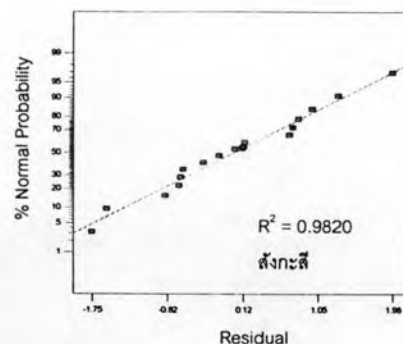


รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยเชิงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.37 (ก) และ (ข) แสดงกราฟ Normal probability plot ของร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีที่ได้จากคำนวณในสมการ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.9805$ และ 0.9820 สำหรับนิกเกิลและสังกะสี ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายดังแสดงในรูป 4.38 (ก) และ (ข) จะพบว่าการกระจายตัวมีลักษณะรูปแบบไม่แน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม

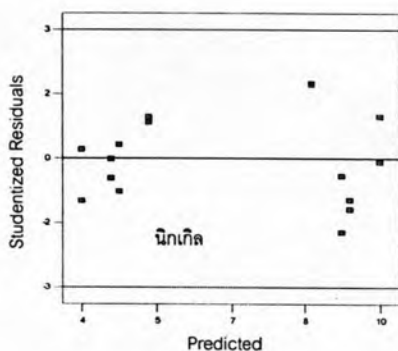


(ก)

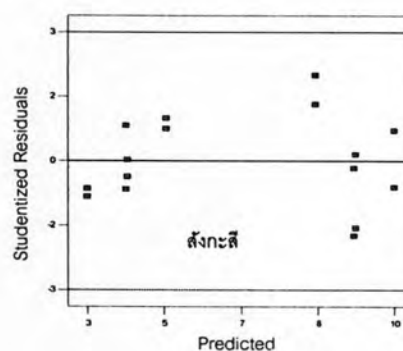


(ข)

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน



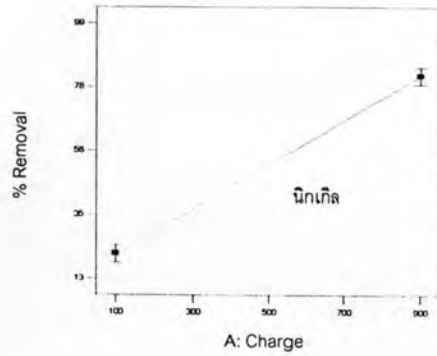
(ก)



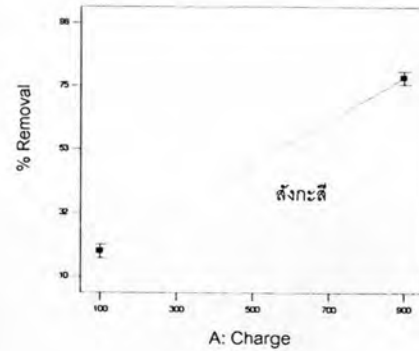
(ข)

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

ผลของค่าประจุไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายเจือจางที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสี ดังแสดงในรูป 4.39 (ก) และ (ข) และ 4.40 (ก) และ (ข) พบว่าเมื่อค่าประจุไฟฟ้าสูงขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายเจือจางต่ำจะมีผลทำให้ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ (Faraday's law) ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาหรือประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการ (2.13) ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรในตอนที่ 1 และ 2

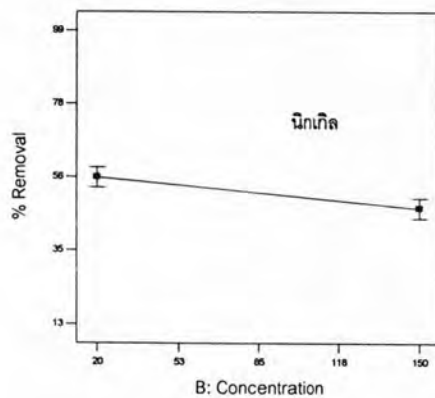


(ก)

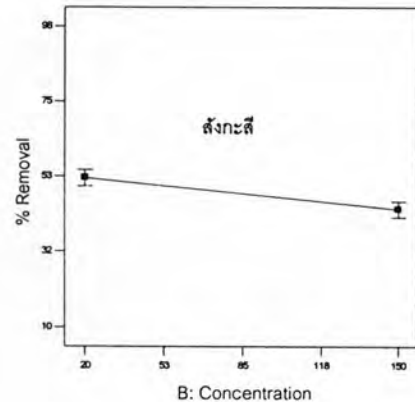


(ข)

รูปที่ 4.39 ผลของค่าประจุไฟฟ้าต่อการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน



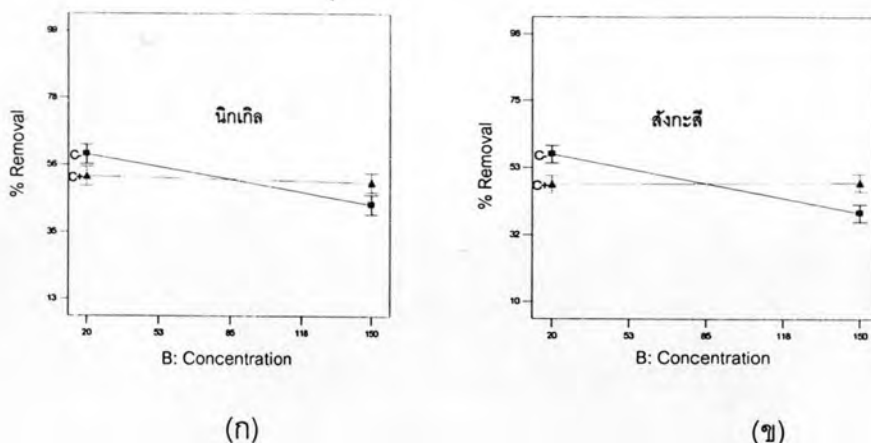
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.40 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจางต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และ สังกะสี (ข) ที่ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจางและความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 4.41 (ก) และ (ข) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายเจือจางผสมต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นต่ำจะร้อยละการขจัดสังกะสีสูงกว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูง เนื่องจากว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นสูงๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นกลางที่บริเวณขั้วไฟฟ้า น้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันแทน ทำให้ตกตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์ป้องกันการแพร่ของสังกะสีไอออนไปทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นร้อยละการขจัดของสังกะสีจึงลดลง



รูปที่ 4.41 ผลสัมพัทธ์ของความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) ที่ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการขจัดโลหะที่ภาวะต่างๆ พบว่าตัวแปรทุกตัวมีผลต่อการขจัด ในการวิเคราะห์การขจัดที่ภาวะที่ไม่คำนึงถึงค่าประจุไฟฟ้า พบว่าเวลาเป็นตัวแปรที่มีผลอย่างมากในภาวะที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ เมื่อพิจารณาที่ภาวะของค่าประจุไฟฟ้า พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการขจัดมากที่สุด คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยส่งผลต่อการขจัดต่างกันในส่วนภาวะที่ประจุไฟฟ้าเท่ากันและไม่เท่ากัน ในกรณีที่ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน ถ้าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มจะทำให้การขจัดที่ดีขึ้น แต่ในกรณีที่ภาวะค่าประจุไฟฟ้าไม่เท่ากัน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่การขจัดลดลงอาจเนื่องมาจากมีผลของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าภาวะที่เหมาะสมที่หาได้จะสามารถใช้ได้ดีในช่วงตัวแปรที่ศึกษาเท่านั้น