

ผลและวิจารณ์

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย (ECF) เป็นระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโปแตสเซียมไดโครเมต เป็นตัวแทนน้ำเสียเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่มีความเข้มข้น 20 มก/ล ที่ pH 4 ความนำไฟฟ้า 1,300–1,400 ไมโครซีเมนต์ แปรผันกระแสไฟฟ้า 1, 3, 5, 7 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 15, 30, 45 นาที โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 21.11, 31.67, 63.33 มล/นาที ระยะห่างระหว่างขั้ว 1, 1.5, 2 ซม (พื้นที่ผิว 722, 541.5, 361 ตร.ซม) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาเดินระบบ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์หา pH ปริมาณโครเมียมรวมทั้งหมด ปริมาณตะกอน และก๊าซไฮโดรเจน หลังทำปฏิกิริยา โดยมีผลการศึกษา ๆ ดังนี้ (ข้อมูลการทดลองดังตารางในภาคผนวก ก)

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมด้วยระบบ Electro-Chemical and Electro Flotation Process

ผลของระบบ ECF ทุกสภาวะการทดลองสามารถกำจัดโครเมียมผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ด้านบนของถังปฏิกิริยาจะมีโครเมียมเหลืออยู่ระหว่าง <0.001-0.235 มก/ล ประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า 98.8% ด้านล่างของถังปฏิกิริยามีค่า <0.001-0.656 มก/ล 96.7% เนื่องจากลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำเสียภายในถังปฏิกิริยาของระบบ ECF ขั้วคาโทดอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวให้ ก๊าซไฮโดรเจน ไฮดรอกไซด์ไอออน(OH⁻) ไดรวาเลนต์โครเมียม (Cr³⁺) ฟองก๊าซไฮโดรเจนจะลอยขึ้นและพาให้น้ำเสียเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน Cr³⁺ และทำปฏิกิริยากับ OH⁻ เกิดเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr(OH)₃) ขณะเดียวกันขั้วแอโนดหลักที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดเฟอร์รัส (Fe²⁺) เฟอร์ริก (Fe³⁺) เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr⁶⁺) ที่ยังไม่ถูกรีดิวส์และที่ถูกรีดิวส์ Cr³⁺ แต่ยังไม่เกิดเป็นตะกอน Cr(OH)₃ มีทิศทางการไหลลงด้านล่างซึ่งมี OH⁻ น้อยกว่าด้านบน จึงทำให้ด้านบนของถังปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าด้านล่าง

ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้า พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น และระยะห่างระหว่างขั้วลดลง สำหรับอัตราการไหลมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนที่จะบ่งชี้ว่าอัตราการไหลจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ดังแสดงผลในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของระบบ ECF

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว (ซม)	พื้นที่ผิวของ ขั้วไฟฟ้า (ตร.ซม)	อัตราการ ไหลน้ำเสีย (มล/นาท)	โครเมียมที่เหลืออยู่		โครเมียมที่เหลือ/เริ่มต้น (Ce/Co)		โครเมียมที่ถูกกำจัด, (Co-Ce)/Co	
				ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน
1	1	722	21.11	0.544	ND	0.027	0.001	0.973	1.000
			31.67	0.464	0.049	0.023	0.002	0.977	1.000
			63.33	0.656	0.226	0.033	0.011	0.967	0.989
	1.5	541.5	21.11	0.497	ND	0.025	0.001	0.975	1.000
			31.67	0.361	ND	0.018	0.001	0.982	1.000
			63.33	0.538	ND	0.027	0.001	0.973	1.000
	2	361	21.11	0.535	0.085	0.027	0.004	0.973	0.996
			31.67	0.542	0.167	0.027	0.008	0.973	1.000
			63.33	0.546	0.235	0.027	0.012	0.973	0.988
3	1	722	21.11	0.402	0.003	0.020	0.000	0.980	1.000
			31.67	0.448	0.011	0.022	0.001	0.978	1.000
			63.33	0.290	ND	0.014	0.001	0.986	1.000

หมายเหตุ: ND = Non Detected คือ ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการวิเคราะห์หามีค่าน้อยกว่า 0.001 มก/ล

ตารางที่ 15 (ต่อ)

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว (ซม)	พื้นที่ผิวของ ขั้วไฟฟ้า (ตร.ซม)	อัตราการ ไหลน้ำเสีย (มล/นาท)	โครเมียมที่เหลือยู่		โครเมียมที่เหลือ/เริ่มต้น (Ce/Co)		โครเมียมที่ถูกกำจัด, (Co-Ce)/Co	
				ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน
				(มก/ล)	(มก/ล)				
3	1.5	541.5	21.11	0.417	ND	0.021	0.001	0.979	1.000
			31.67	0.468	0.051	0.023	0.003	0.977	0.997
			63.33	0.606	0.032	0.030	0.002	0.970	0.998
	2	361	21.11	0.217	0.013	0.011	0.001	0.989	1.000
			31.67	0.424	0.065	0.021	0.003	0.979	0.997
			63.33	0.260	0.059	0.013	0.003	0.987	0.997
5	1	722	21.11	0.031	0.007	0.001	0.000	1.000	1.000
			31.67	0.268	0.035	0.013	0.002	0.987	1.000
			63.33	0.384	0.074	0.019	0.004	1.000	0.996
	1.5	541.5	21.11	0.122	ND	0.006	0.001	0.994	1.000
			31.67	0.035	0.003	0.002	0.000	0.998	1.000
			63.33	0.249	0.097	0.012	0.005	0.988	1.000

หมายเหตุ: ND = Non Detected คือ ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการวิเคราะห์หามีค่าน้อยกว่า 0.001 มก/ล

ตารางที่ 15 (ต่อ)

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว (ซม)	พื้นที่ผิวของ ขั้วไฟฟ้า (ตร.ซม)	อัตราการ ไหลน้ำเสีย (มล/นาท)	โครเมียมที่เหลืออยู่		โครเมียมที่เหลือ/เริ่มต้น (Ce/Co)		โครเมียมที่ถูกกำจัด, (Co-Ce)/Co	
				ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน	ด้านล่าง	ด้านบน
				(มก/ล)	(มก/ล)				
5	2	361	21.11	ND	0.017	0.001	0.001	1.000	0.999
			31.67	0.300	ND	0.015	0.001	0.985	1.000
			63.33	0.324	0.015	0.016	0.001	0.984	0.999
7	1	722	21.11	0.525	0.101	0.026	0.005	0.974	0.995
			31.67	0.121	0.007	0.006	0.000	0.994	1.000
			63.33	0.363	0.028	0.018	0.001	0.982	0.999
	1.5	541.5	21.11	0.190	ND	0.009	0.001	0.991	1.000
			31.67	0.144	0.003	0.007	0.000	0.993	1.000
			63.33	0.304	ND	0.015	0.001	0.985	1.000
	2	361	21.11	0.384	0.112	0.019	0.006	0.981	0.994
			31.67	0.443	0.223	0.022	0.011	0.978	1.000
			63.33	0.167	0.058	0.008	0.003	0.992	0.997

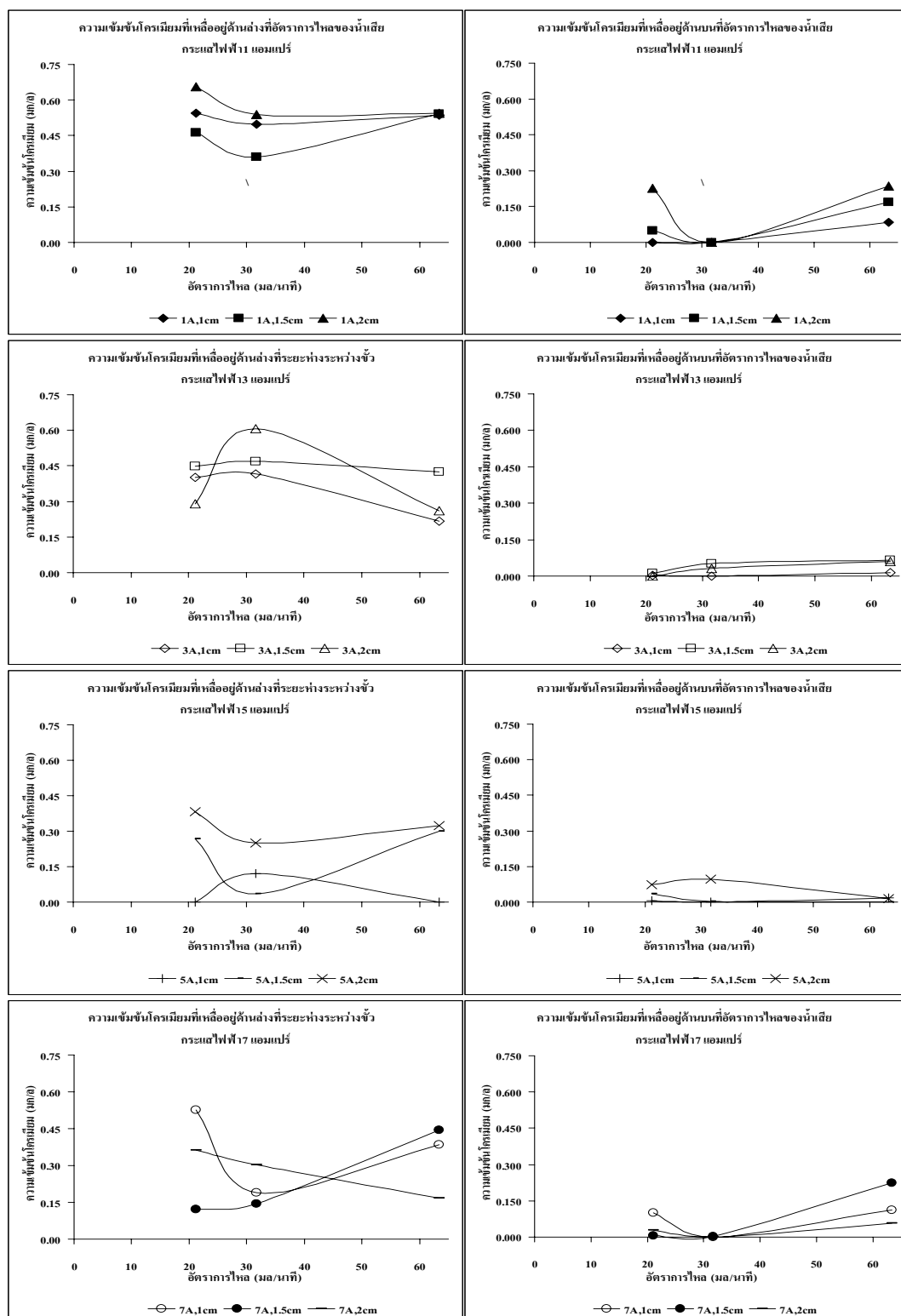
หมายเหตุ: ND = Non Detected คือ ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการวิเคราะห์หามีค่าน้อยกว่า 0.001 มก/ล

1.1 ผลของอัตราการไหล

อัตราการไหลของน้ำเสียจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการกำจัดโครเมียม ด้านล่างของถังปฏิกริยามีแนวโน้มรูปแบบการกำจัดโครเมียม มีทิศทางที่ไม่แน่นอนที่จะชี้บ่งบอกว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ส่วนด้านบนของถังปฏิกริยาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่สูงขึ้น ดังผลที่แสดงในภาพที่ 17

ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือมีเวลาทำปฏิกิริยาลดลง ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 31.67 มล/นาที่ หรือเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด ด้านล่างของถังปฏิกริยาระยะระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น และหรือพื้นที่ผิวลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะลดลง ที่ระยะระหว่างขั้ว 1.5 ซม (541.5 ตร.ซม) มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากที่ระยะระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังขั้วแอโนดและรีดิวส์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ได้มาก เกิดก๊าซไฮโดรเจนใกล้เคียงกัน ความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนจะมากที่พื้นที่ผิวน้อย จึงทำให้ Cr^{3+} บริเวณขั้วแอโนดไหลวนไปยังขั้วคาโทดและทำปฏิกิริยากับ OH^- บริเวณขั้วคาโทดได้น้อย ดังนั้น Cr^{3+} ก็จะไหลลงด้านล่างของถังปฏิกริยา แต่ที่ระยะระหว่างขั้ว 2 ซม (361 ตร.ซม) อิเล็กตรอนไปรีดิวส์ Cr^{6+} ได้น้อยลง รวมทั้งพื้นที่ผิวน้อยจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาช้าลง สำหรับด้านบนของถังปฏิกริยาระยะระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากด้านบนของถังปฏิกริยาซึ่งมี OH^- อยู่แล้ว จะทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} เกิดเป็นตะกอน $Cr(OH)_3$

ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ด้านล่างของถังปฏิกริยา แนวโน้มการกำจัดโครเมียมเริ่มมีทิศทางที่ไม่แน่นอนที่จะชี้บ่งบอกว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดลดลงหรือเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแส ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ขั้วคาโทดเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดไหลในช่องว่างระหว่างขั้วมาก และด้านล่างของถังปฏิกริยาจะมีการกวนผสมไม่ทั่วถึง ส่วนด้านบนของถังปฏิกริยาจะเกิดการกวนผสมอย่างทั่วถึง จากก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ Cr^{3+} ทำปฏิกิริยากับ OH^- ได้อย่างทั่วถึง



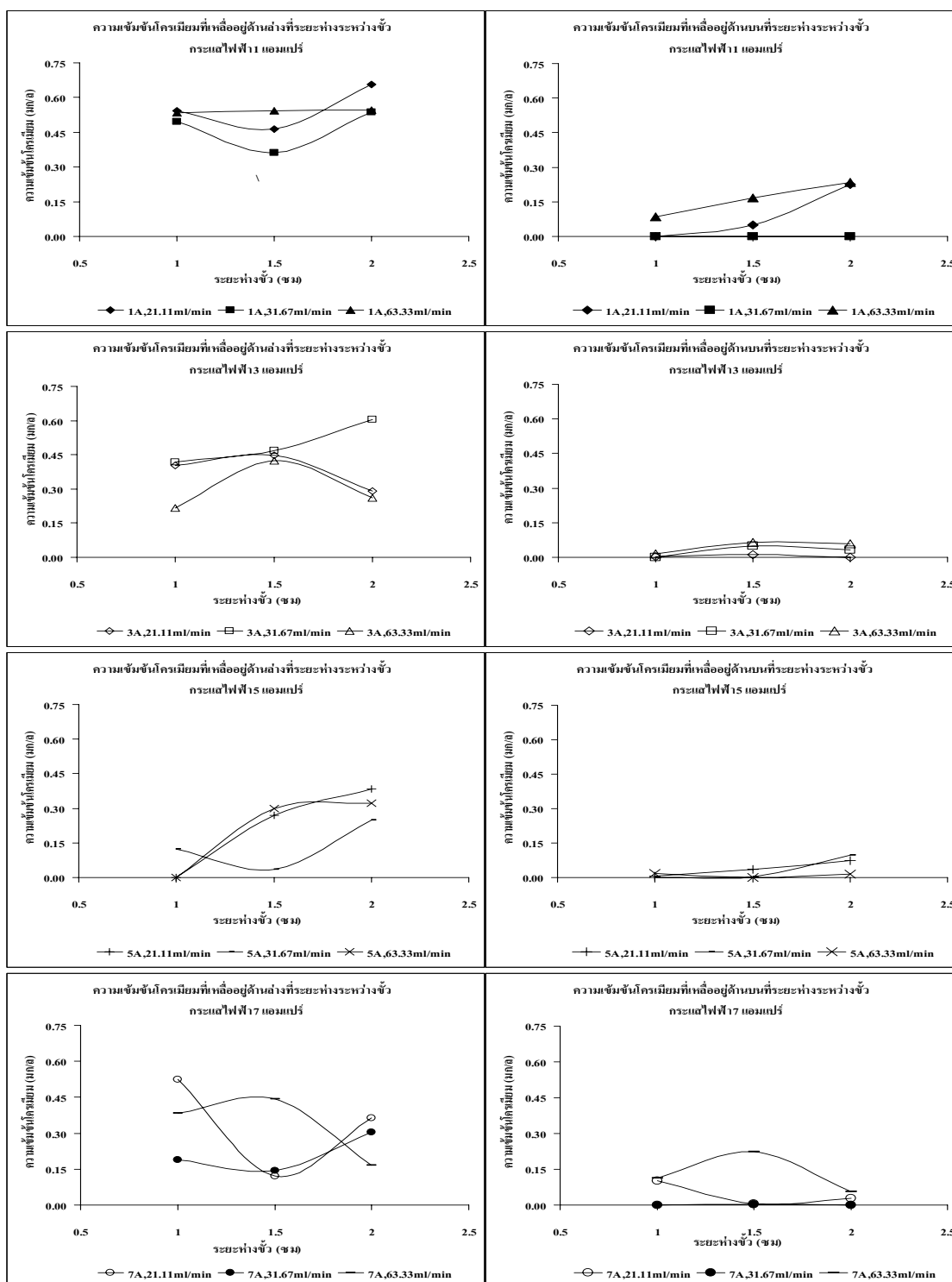
ภาพที่ 17 ผลของอัตราการใช้เกลือของน้ำเสียต่อการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF

ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 5 และ 7 แอมแปร์ ด้านล่างของถังปฏิกิริยา แนวโน้มการกำจัดโครเมียมมีทิศทางที่ไม่แน่นอนมากขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ขั้วคาโทดเกิดก๊าซไฮโดรเจนมากและจะทำให้เกิดไพลในช่องว่างระหว่างขั้วมาก ตะกอนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางอิเล็กตรอนในการเข้าไปรีดิวส์ Cr^{6+} ที่ขั้วแอโนด ขณะเดียวกันปริมาณ OH^- มากจะมีผลต่อ pH ที่สูงขึ้นมากกว่า 8.3 จะมีผลต่อการเกิดตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ที่ลดลง

1.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้ว

ระยะห่างระหว่างขั้วจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิวของขั้ว การแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วก็จะเป็นการแปรผันพื้นที่ผิวไปด้วย ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้านล่างของถังปฏิกิริยามีแนวโน้มรูปแบบทิศทางที่ไม่แน่นอนที่จะชี้บ่งบอกว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ด้านบนของถังปฏิกิริยาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวลดลง ดังผลที่แสดงในภาพที่ 18

ด้านล่างของถังปฏิกิริยา ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลง ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 ซม (541.5 ตร.ซม) ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) เนื่องจากที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) อิเล็กตรอนถูกตะกอนขัดขวางการเดินทางจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนด และช่องว่างระหว่างขั้วจะมีอัตราการไหลที่น้อยกว่าที่ 1.5 ซม (541.5 ตร.ซม) ทำให้ Cr^{6+} และ Cr^{3+} ไหลวนไปขั้วคาโทดได้น้อย แต่จะไหลลงด้านล่างของถังปฏิกิริยา ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 7 แอมแปร์ แนวโน้มการกำจัดโครเมียมมีทิศทางไม่แน่นอนและไม่มีความสำคัญต่อการกำจัด เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ขั้วแอโนดหลักจะสุกก่อน เป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} จะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ เกิดก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ตะกอนจะขัดขวางการเดินทางของอิเล็กตรอน ขณะเดียวกัน OH^- ที่เพิ่มขึ้นจะเกิด $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ มากขึ้น



ภาพที่ 18 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF

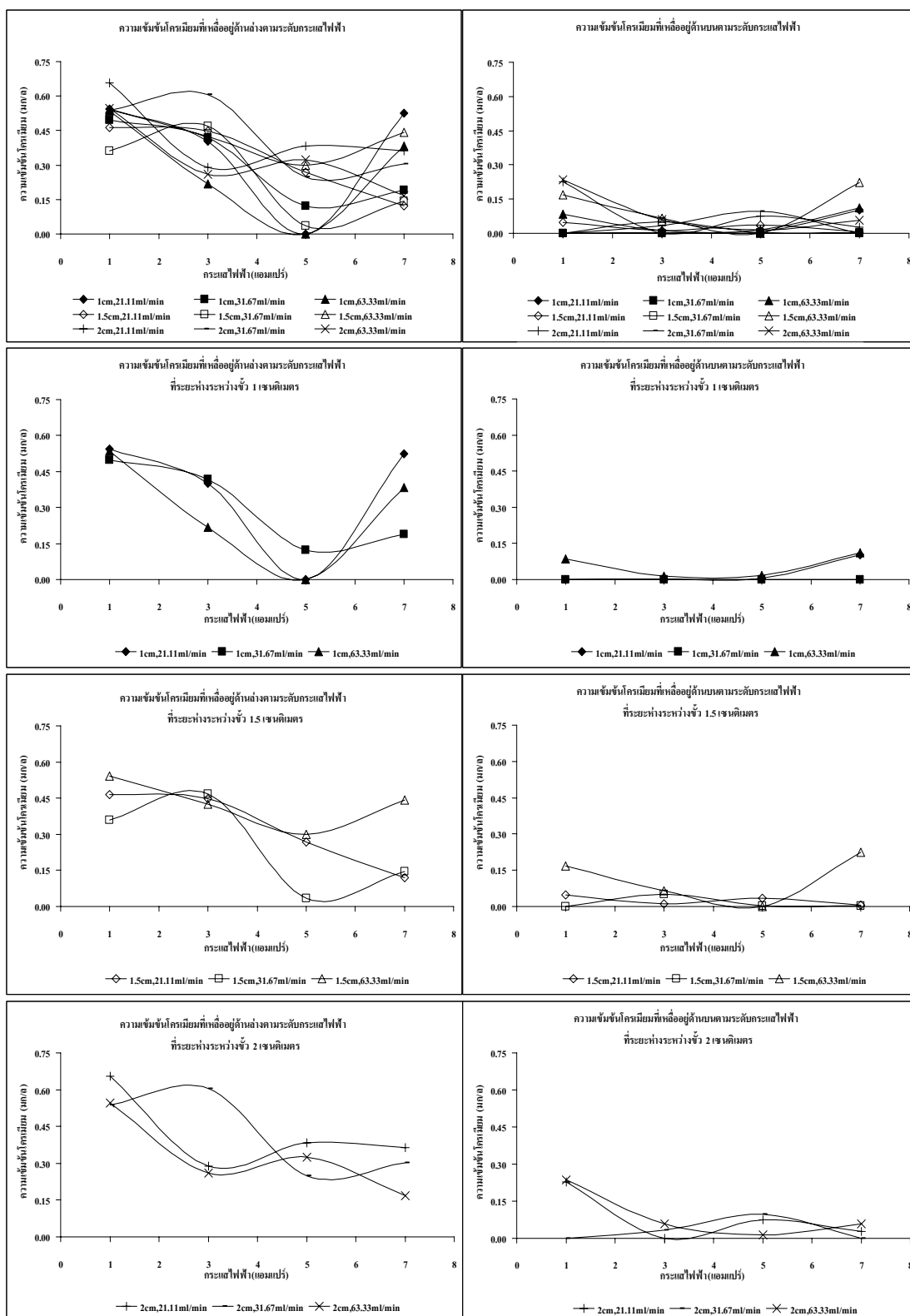
ด้านบนของถังปฏิกิริยา ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1, 3 และ 5 แอมแปร์ เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่ลอยขึ้นด้านบน จะเกิดการกวนผสมเป็นเนื้อเดียว ขณะเดียวกันพา OH^- และ Cr^{3+} ไหลขึ้นด้านบน OH^- จะเข้าทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} เกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ แต่เมื่อระดับกระแสไฟฟ้าเป็น 7 แอมแปร์ ปริมาณ OH^- ที่มีมากการเกิดตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ จะลดลง ปฏิกิริยาจะเกิดเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ จะอยู่ในรูปของสารละลายแทน

1.3 ผลของกระแสไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะไปรีดิวซ์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} พร้อมกับน้ำแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและ OH^- จากนั้น Cr^{3+} จะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ มากขึ้น ดังนั้นการทดลองจึงได้แปรผันกระแสไฟฟ้าอยู่ 4 ระดับ คือ 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์ โดยมีผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 19

ด้านล่างของถังปฏิกิริยา ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม. (722 ตร.ซม.) และ 1.5 ซม. (541.5 ตร.ซม.) เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าขึ้นเป็น 7 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง เนื่องจากตะกอน ก๊าซไฮโดรเจน และ OH^- ที่เพิ่มขึ้น โดยตะกอนที่อยู่ระหว่างแผ่นขั้วคาโทดและแอโนดจะขัดขวางอิเล็กตรอนที่จะไปรีดิวซ์ Cr^{6+} และก๊าซไฮโดรเจนจะทำให้อัตราการไหลภายในช่องว่างระหว่างขั้วสูงขึ้น ส่งผลให้บริเวณขั้วแอโนดมี Cr^{6+} ที่ยังไม่ถูกรีดิวซ์และ Cr^{3+} บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับ OH^- ไหลลงด้านล่างของถังปฏิกิริยา

ด้านบนของถังปฏิกิริยา เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ ที่อัตราการไหล 63.33 มล/นาที ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมกับลดลง ทั้งนี้เพราะอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดตะกอนมากขึ้น และกระแสไฟฟ้าที่มากจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน ตะกอน และ OH^- มากขึ้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม



ภาพที่ 19 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF

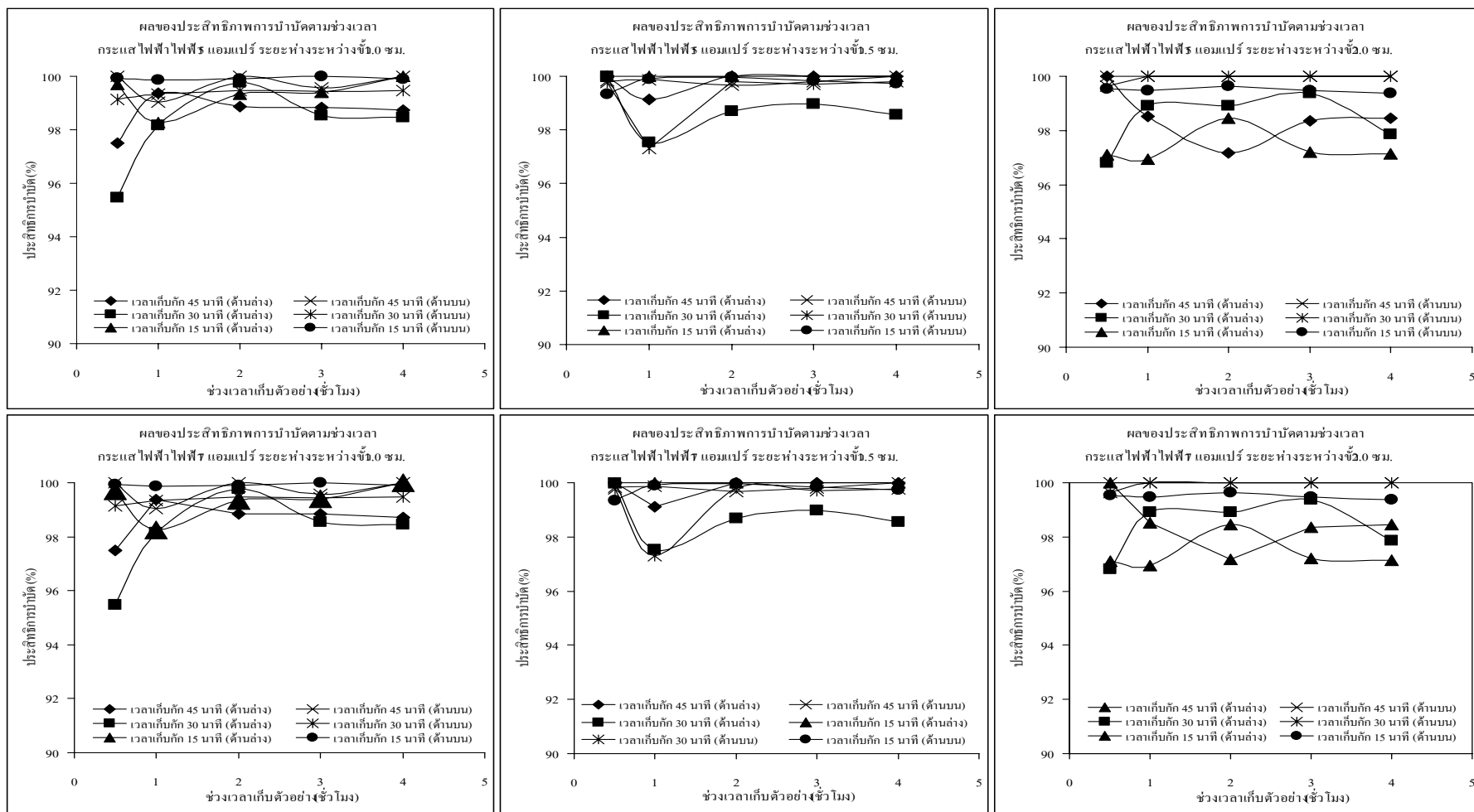
1.4 ผลของระยะเวลาเดินระบบ ECF

ระยะเวลาในการเดินระบบ ECF แบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาเดินระบบ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ดังแสดงผลในภาพที่ 20 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในแต่ละช่วงเวลามากกว่า 95% ด้านล่างของถังปฏิกริยา แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดกับระยะเวลาการเดินระบบในช่วงเวลาต่างๆ จะไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์ที่แน่นอน ทั้งนี้เนื่องจากระบบ ECF ที่ทดลองไม่มีการใช้อุปกรณ์ในการกวนผสมจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนและอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ ECF ทำให้เกิดการกวนผสมกันภายใน พบว่าตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านระบบ ECF เมื่อระยะเวลาเดินระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะลดลง

จุดเก็บตัวอย่างน้ำด้านบนตามช่วงเวลาการเดินระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากด้านบนจะมี OH^- จะทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ที่ไหลขึ้นด้านบนเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ โดยที่ Cr^{6+} ที่ขั้วแอโนดจะถูกรีดิวส์ได้จากอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากขั้วคาโทด ซึ่งจะทำให้ Cr^{6+} และ Cr^{3+} บางส่วนไหลลงด้านล่าง บางส่วนจะไหลขึ้นวนกลับไปบริเวณขั้วคาโทดขึ้นด้านบน Cr^{6+} จะถูกรีดิวส์เป็น Cr^{3+} และขึ้นไปทำปฏิกิริยากับ OH^- ที่อยู่ด้านบน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ช่วงเวลาเดินระบบไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

1.5 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF ที่สำคัญ คือ กระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 3 และ 5 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยด้านล่างของถังปฏิกริยามีปริมาณโครเมียมเหลืออยู่มากกว่า ด้านบนของถังปฏิกริยา โดยเกิดจากลักษณะของระบบ ECF ที่ไม่มีการกวนผสม จะใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ และก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดการกวนผสมกันภายใน โดยที่ขั้วคาโทดก๊าซไฮโดรเจนจะลอยขึ้นด้านบนทำให้เกิดทิศทาง การไหลของน้ำเสียไหลขึ้นด้านบน และผลักดันพาตะกอน และ OH^- ขึ้นด้านบน ในขณะที่ขั้วแอโนดมีทิศทาง การไหลลงจะพา Cr^{6+} และ Cr^{3+} ไหลลง จึงทำให้พบโครเมียมด้านล่างของถังปฏิกริยาสูงกว่าด้านบน เมื่อเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าเป็น 7 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน, ตะกอน และ OH^- มากขึ้น ตะกอนจะขัดขวางทางเดินของอิเล็กตรอนที่จะไปรีดิวส์ Cr^{6+} ที่ขั้วแอโนด OH^- ที่มากจะทำให้เกิดเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ มากขึ้น



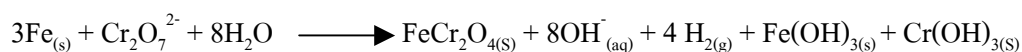
ภาพที่ 20 ต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในระบบ ECF ตามช่วงเวลาเดินระบบ

ระยะห่างระหว่างขั้วหรือพื้นที่ผิวของแผ่นขั้วต่อการกำจัดโครเมียม รูปแบบความสัมพันธ์ไม่ชัดเจน เนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ผิวของแผ่นขั้วลดลง แต่เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากันจึงให้ปริมาณอิเล็กตรอนเท่ากัน ทำให้ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ผิวสูงขึ้นตามระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มการกำจัดโครเมียมจะลดลงตามระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น

อัตราการไหลของน้ำเสียหรือระยะเวลาการทำปฏิกิริยา รูปแบบความสัมพันธ์ของการกำจัดโครเมียมกับอัตราการไหลของน้ำเสียมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน ทั้งนี้เพราะระบบ ECF ที่ทดลองใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและอัตราการไหลของน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียเกิดการกวนผสมในระบบเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง แต่เมื่อระดับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น มีตะกอน OH^- และก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้นจะทำให้รูปแบบความสัมพันธ์ไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการศึกษาของ ทรงยศ (2547) ที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือระยะเวลาทำปฏิกิริยาลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตะกอน

ระบบ ECF จะใช้หลักการของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นซึ่งจะลอยขึ้นด้านบนผลิตภัณฑ์ตะกอนที่อยู่ในระบบให้ลอยขึ้นและแยกตะกอนออกจากด้านบน จะเรียกว่าตะกอนลอย ส่วนตะกอนที่ไม่ถูกก๊าซไฮโดรเจนผลิตภัณฑ์ขึ้นด้านบนจะตกลงสู่ด้านล่างและแยกออกจากด้านล่าง จะเรียกว่าตะกอนหนัก ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะเกิดตามสมการปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ



เนื่องด้วยในระบบ ECF อิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนด ที่ขั้วคาโทดอิเล็กตรอนจะรีดิวส์ Cr^{6+} และน้ำ ให้เกิดเป็น Cr^{3+} ก๊าซไฮโดรเจน และ OH^- จากนั้น Cr^{3+} จะทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ สำหรับที่ขั้วแอโนดเหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ละลายออกมาอยู่ในน้ำเสีย และจะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ อีกส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} และ OH^- เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน FeCr_2O_4 โดยวิเคราะห์ปริมาณตะกอนลอยและตะกอนหนัก ในการแยกตะกอนออกจากระบบโดยมีผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการทดลองการเกิดตะกอนในระบบ ECF

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะห่าง ของขั้ว (ซม)	อัตราการ ไหลน้ำเสีย (มล/นาที่)	ความเข้มข้นตะกอน			อัตราเกิด ตะกอน (มก/นาที่)	สัดส่วน ตะกอนลอย/ ตะกอนหนัก
			ด้านล่าง	ด้านบน	รวม		
1	1	21.11	1212.67	1249.73	2462.40	51.98	1.03
		31.67	436.00	471.07	907.07	28.73	1.08
		63.33	464.27	447.87	912.13	57.77	0.96
	1.5	21.11	1051.60	1400.40	2452.00	51.76	1.33
		31.67	1046.40	831.20	1877.60	59.46	0.79
		63.33	429.20	431.60	860.80	54.51	1.01
	2	21.11	1561.47	1306.40	2867.87	60.54	0.84
		31.67	613.20	663.20	1276.40	40.42	1.08
		63.33	252.00	715.60	967.60	61.28	2.84
3	1	21.11	3236.40	1425.33	4661.73	98.41	0.44
		31.67	2040.40	697.20	2737.60	86.70	0.34
		63.33	1361.07	522.40	1883.47	119.28	0.38
	1.5	21.11	3447.60	816.00	4263.60	90.00	0.24
		31.67	2400.80	578.80	2979.60	94.36	0.24
		63.33	645.60	308.67	954.27	60.43	0.48
	2	21.11	1621.73	486.40	2108.13	44.50	0.30
		31.67	2116.80	783.60	2900.40	91.86	0.37
		63.33	739.20	580.00	1319.20	83.54	0.78
5	1	21.11	3776.80	1246.13	5022.93	106.03	0.33
		31.67	2463.47	1662.00	4125.47	130.65	0.67
		63.33	698.53	841.20	1539.73	97.51	1.20
	1.5	21.11	4561.60	1107.20	5668.80	119.67	0.24
		31.67	3170.40	1220.40	4390.80	139.06	0.38
		63.33	595.60	594.40	1190.00	75.36	1.00
	2	21.11	4343.20	1300.00	5643.20	119.13	0.30
		31.67	1238.13	787.20	2025.33	64.14	0.64
		63.33	1212.67	1249.73	2462.40	51.98	1.03

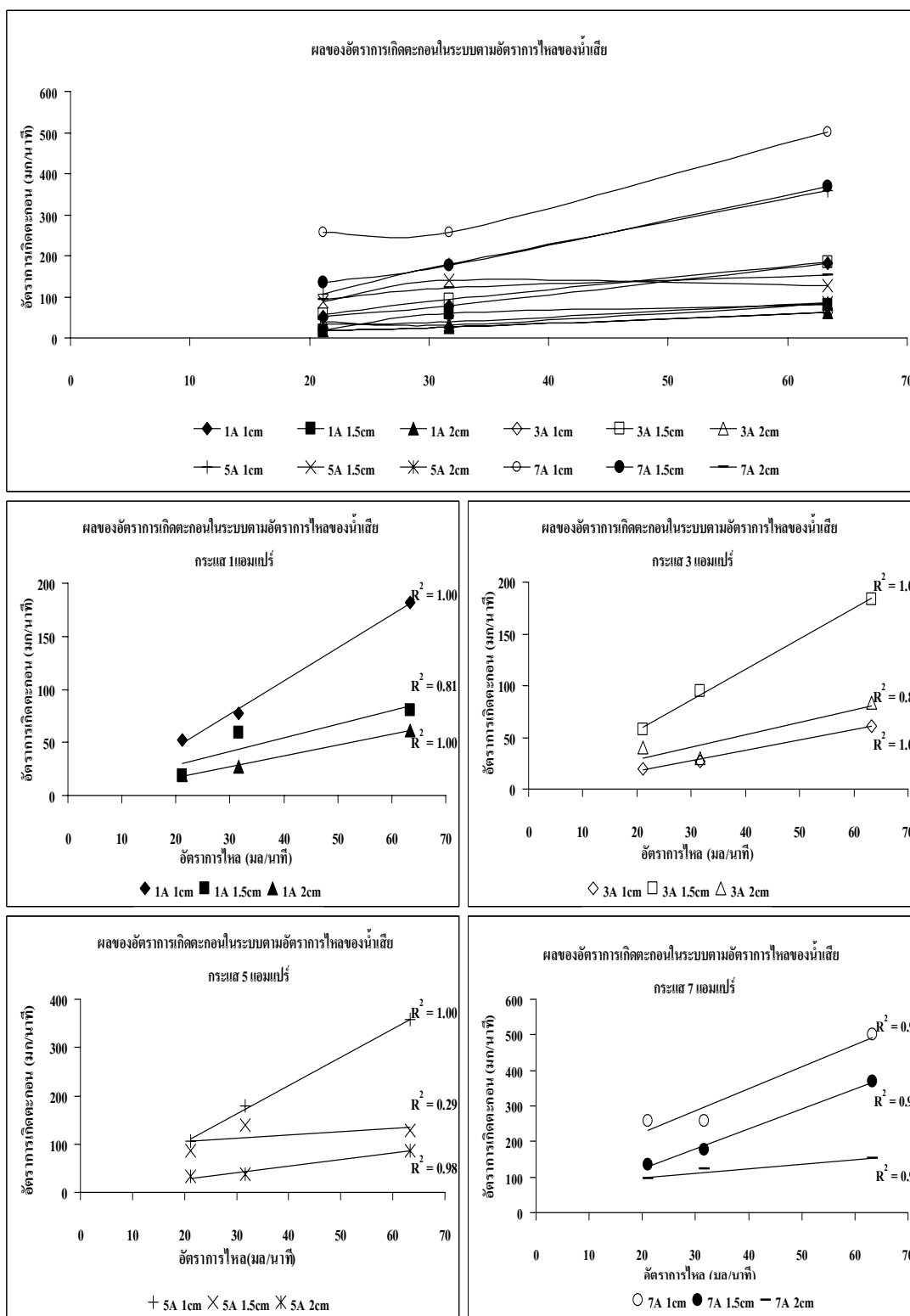
ตารางที่ 16 (ต่อ)

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ระยะห่าง ของขั้ว (ซม)	อัตราการ ไหลน้ำเสีย (มล/นาที่)	ความเข้มข้นตะกอน			อัตราเกิด ตะกอน (มก/นาที่)	สัดส่วน ตะกอนลอย/ ตะกอนหนัก
			ด้านล่าง	ด้านบน	รวม		
7	1	21.11	530.80	842.28	1373.08	86.96	1.59
		31.67	8060.40	4178.40	12238.80	258.36	0.52
		63.33	3178.80	3246.80	6425.60	203.50	1.02
	1.5	21.11	3045.60	1431.60	4477.20	283.54	0.47
		31.67	4775.20	3342.40	8117.60	171.36	0.70
		63.33	3210.40	2405.20	5615.60	177.85	0.75
	2	21.11	2716.40	1131.20	3847.60	243.67	0.42
		31.67	5020.40	2884.80	7905.20	166.88	0.57
		63.33	3517.20	2299.20	5816.40	184.21	0.65

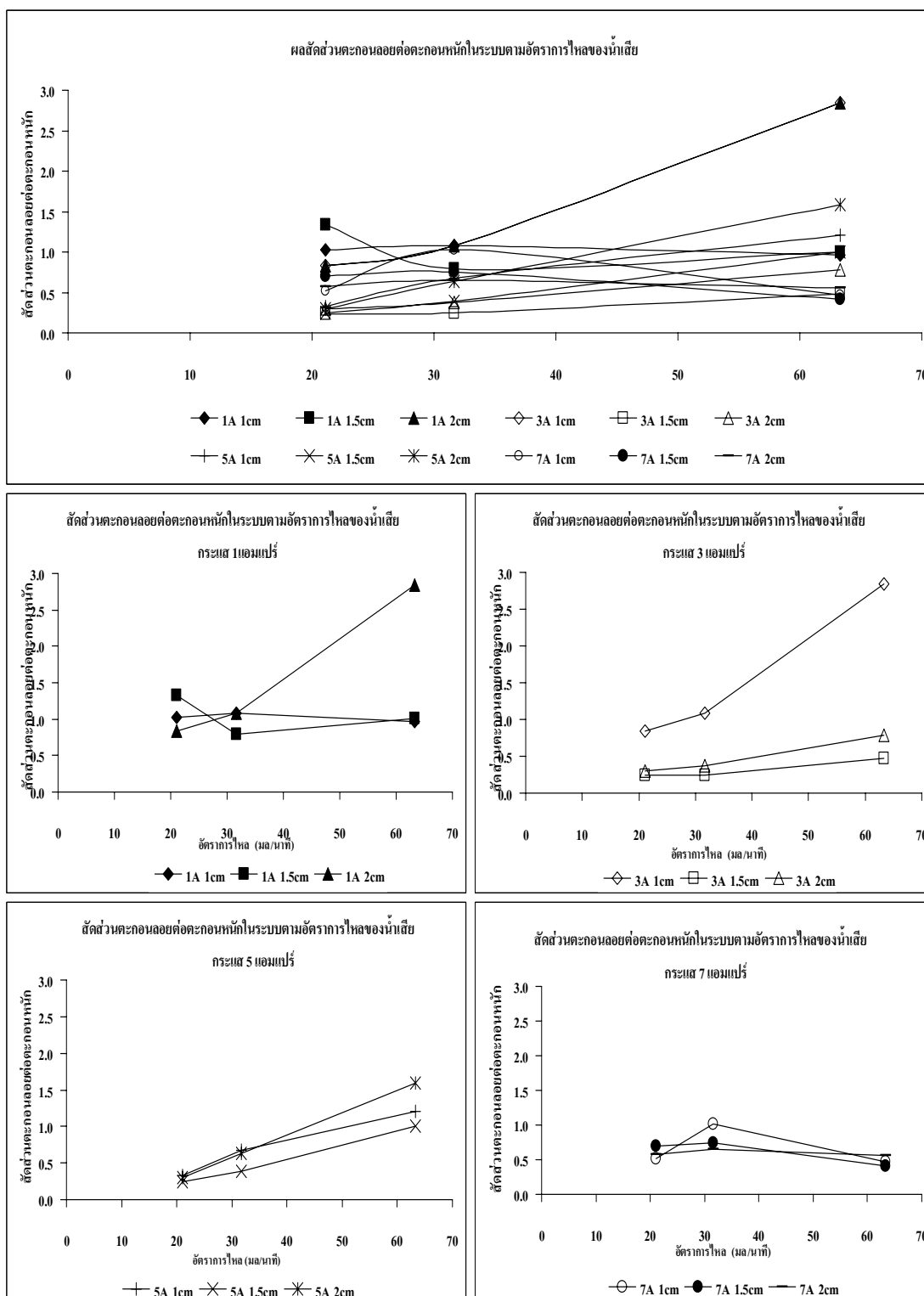
2.1 ผลของอัตราการไหล

อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ ECF จะเกี่ยวข้องกับปริมาณโครเมียมและอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบโดยมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มปริมาณโครเมียมเข้าระบบมากขึ้นตามไปด้วย จะทำให้เกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 21 สำหรับสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะมากขึ้นหรือน้อยจะเกี่ยวข้องกับก๊าซไฮโดรเจนที่ผลักดันให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบน การที่อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลขึ้นด้านบนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ตะกอนไหลขึ้นด้านบนเพิ่มขึ้น ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 22

เมื่อระดับกระแสไฟฟ้าคงที่ อัตราการเกิดตะกอนในระบบ และสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณ Cr^{6+} เข้าระบบมาก และที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ อิเล็กตรอนจะรีดิวส์ Cr^{6+} และน้ำที่บริเวณขั้วคาโทดมากกว่าที่อิเล็กตรอนจะปรีดิวส์ที่บริเวณขั้วแอโนด จึงทำให้เกิด Cr^{3+} OH^- และก๊าซไฮโดรเจน ตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกก๊าซไฮโดรเจนพาขึ้นด้านบนของถังปฏิกิริยา ด้านขั้วแอโนดแผ่นเหล็กที่เป็นขั้วจะผุกร่อนให้ Fe^{2+} และ Fe^{3+} จะทำปฏิกิริยากับ OH^- ที่อยู่ระหว่างขั้วและที่ไหลลงมาจากด้านบนของถังปฏิกิริยาเกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จะตกตะกอนแยกออกด้านล่างของถังปฏิกิริยา โดยพบว่าสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะมีสัดส่วนที่สูงกว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 7 แอมแปร์ ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ สัดส่วนตะกอนลอยและตะกอนหนักจะมีระดับใกล้เคียงกัน แสดงว่าระดับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นมากเกินไปในการรีดิวส์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ กระแสไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะทำให้เหล็กผุกร่อนเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} และจะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มากขึ้น



ภาพที่ 21 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการเกิดตะกอนในระบบ ECF

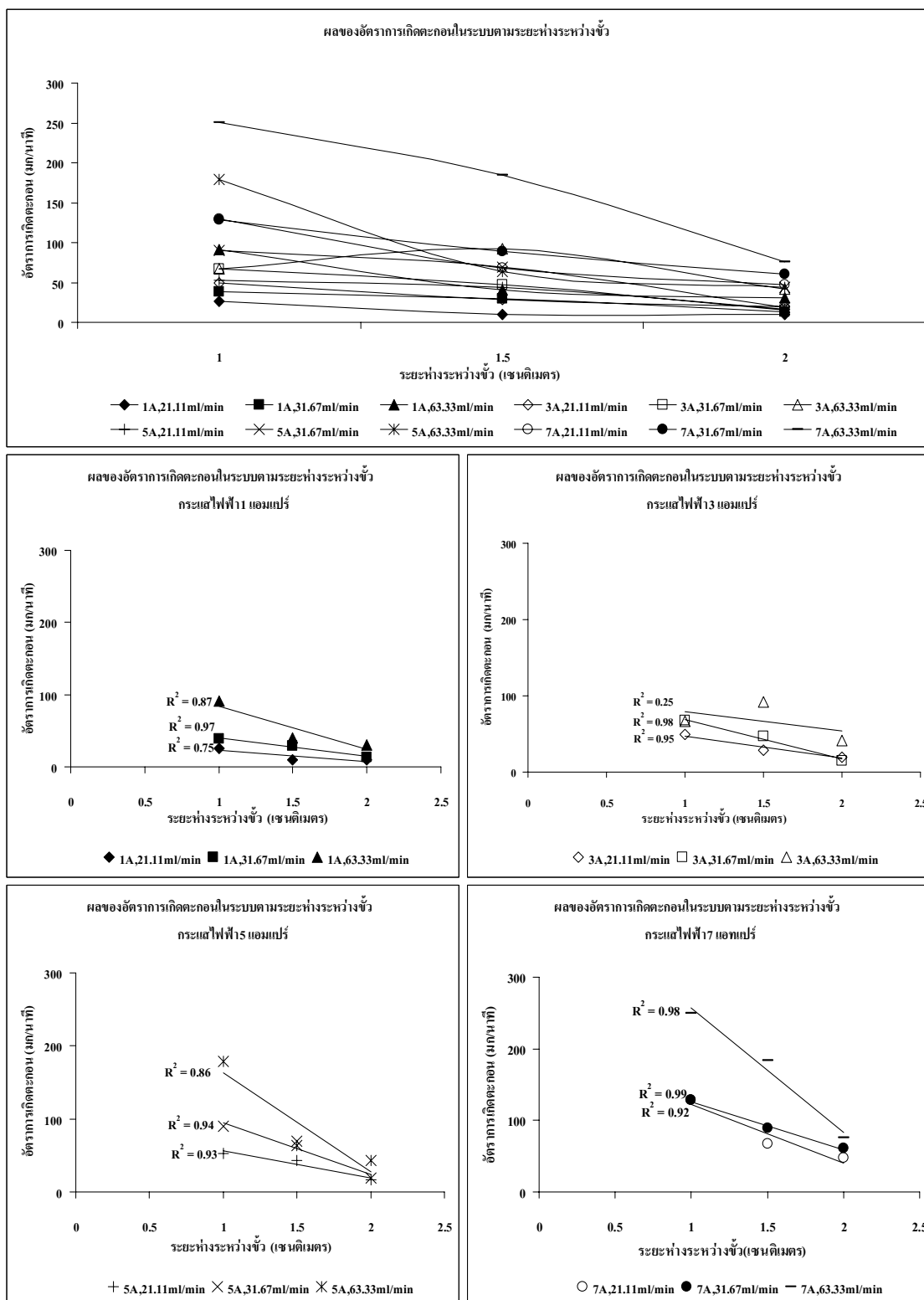


ภาพที่ 22 ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียต่อสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนัก

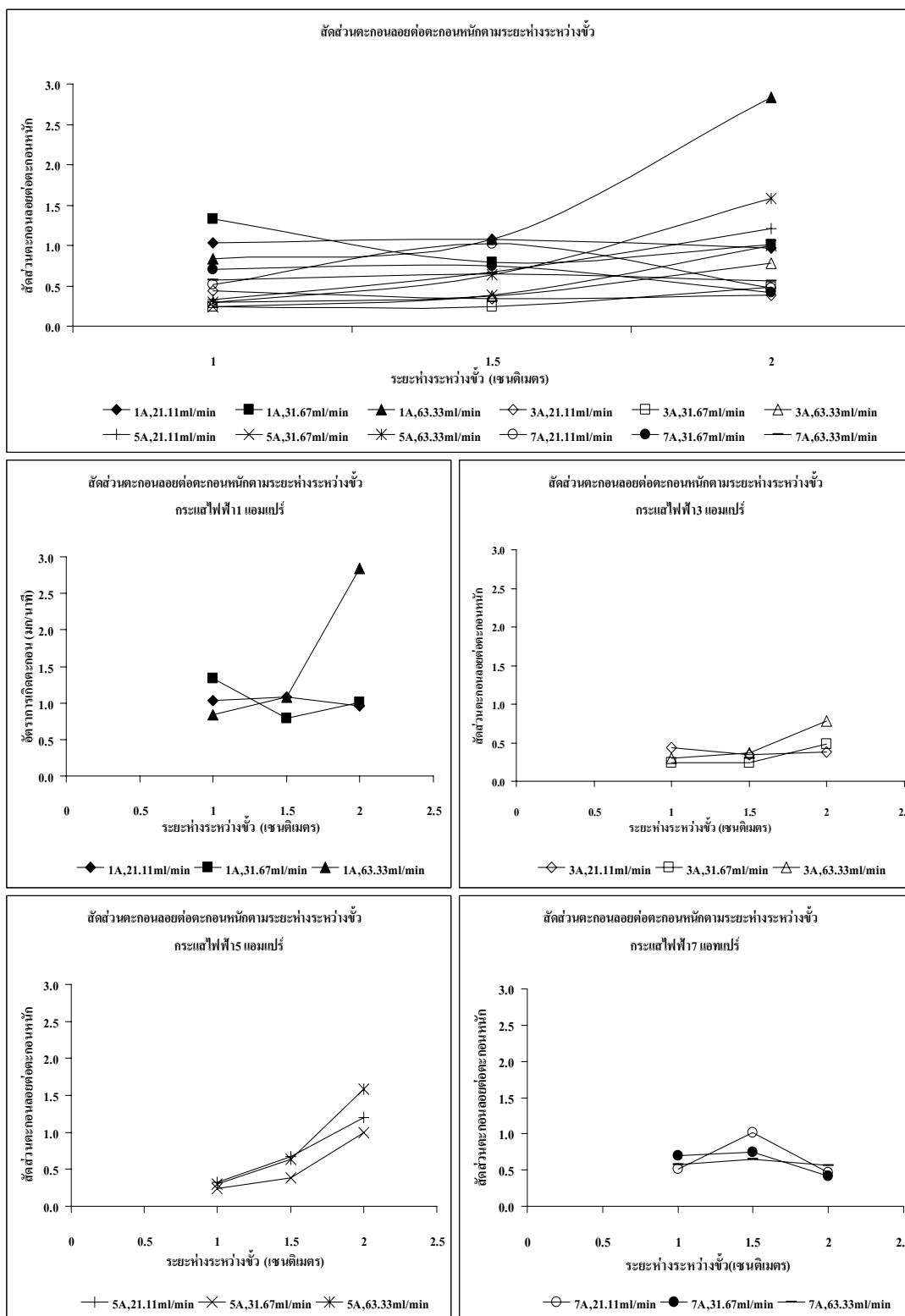
2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้ว

เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวลดลง ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนดเป็นระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ช้า ขณะเดียวกันพื้นที่ผิวน้อยจะมีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำเสียน้อยทำให้เกิดปฏิกิริยาช้า และเกิดตะกอนได้น้อยลงตามระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวลดลงดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 23 สำหรับสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะเกี่ยวข้องกับก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบน ระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น หรือพื้นที่ผิวลดลงจะส่งต่อความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วคาโทดที่สูงขึ้นที่จะช่วยพาให้ตะกอนไหลขึ้นด้านบน ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 24

เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากันจำนวนอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วคาโทดจะใกล้เคียงกัน ระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลง การรีดิวส์ Cr^{6+} จะเกิดมากบริเวณขั้วคาโทด ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์ อัตราการเกิดตะกอนจะลดลงตามระยะห่างระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นก็จะมีพื้นที่ผิวลดลง จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาช้าหรือน้อยลง และอิเล็กตรอนจะวิ่งไกลขึ้นจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนดเพื่อให้ครบวงจรได้ สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลง แนวโน้มสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า ที่ 3 และ 5 แอมแปร์ แนวโน้มสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยจะมีการรีดิวส์ Cr^{3+} , OH^- , Fe^{2+} , Fe^{3+} และก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลงการเกิดตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ลดลง ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมากที่ระดับกระแสไฟฟ้ามากที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีการไหลเวียนในระหว่างขั้วมากขึ้น ทำให้ OH^- ด้านบนของถังปฏิกิริยาไหลลงมาด้านล่างของถังปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนมากขึ้น



ภาพที่ 23 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการเกิดตะกอนในระบบ ECF

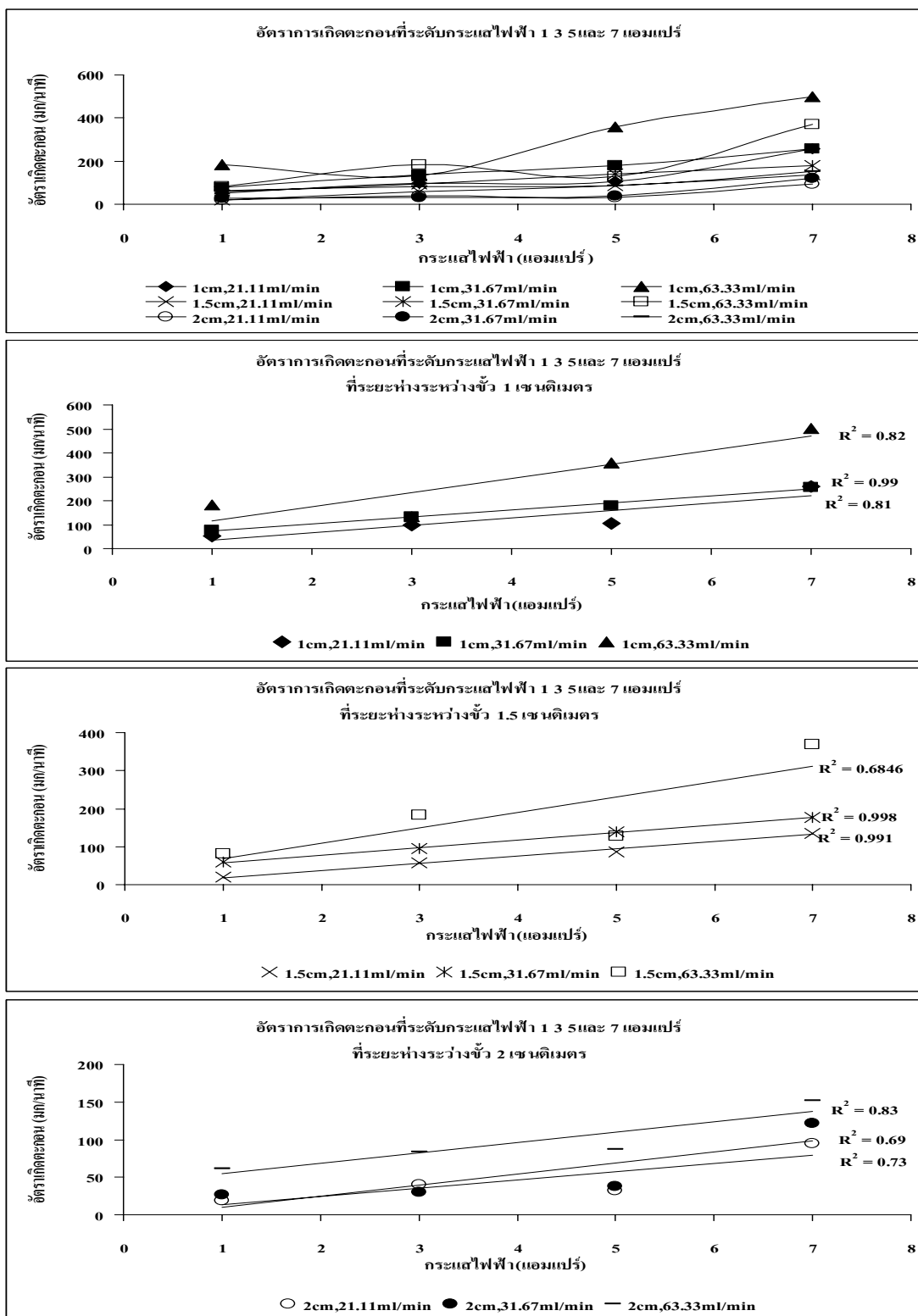


ภาพที่ 24 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนัก

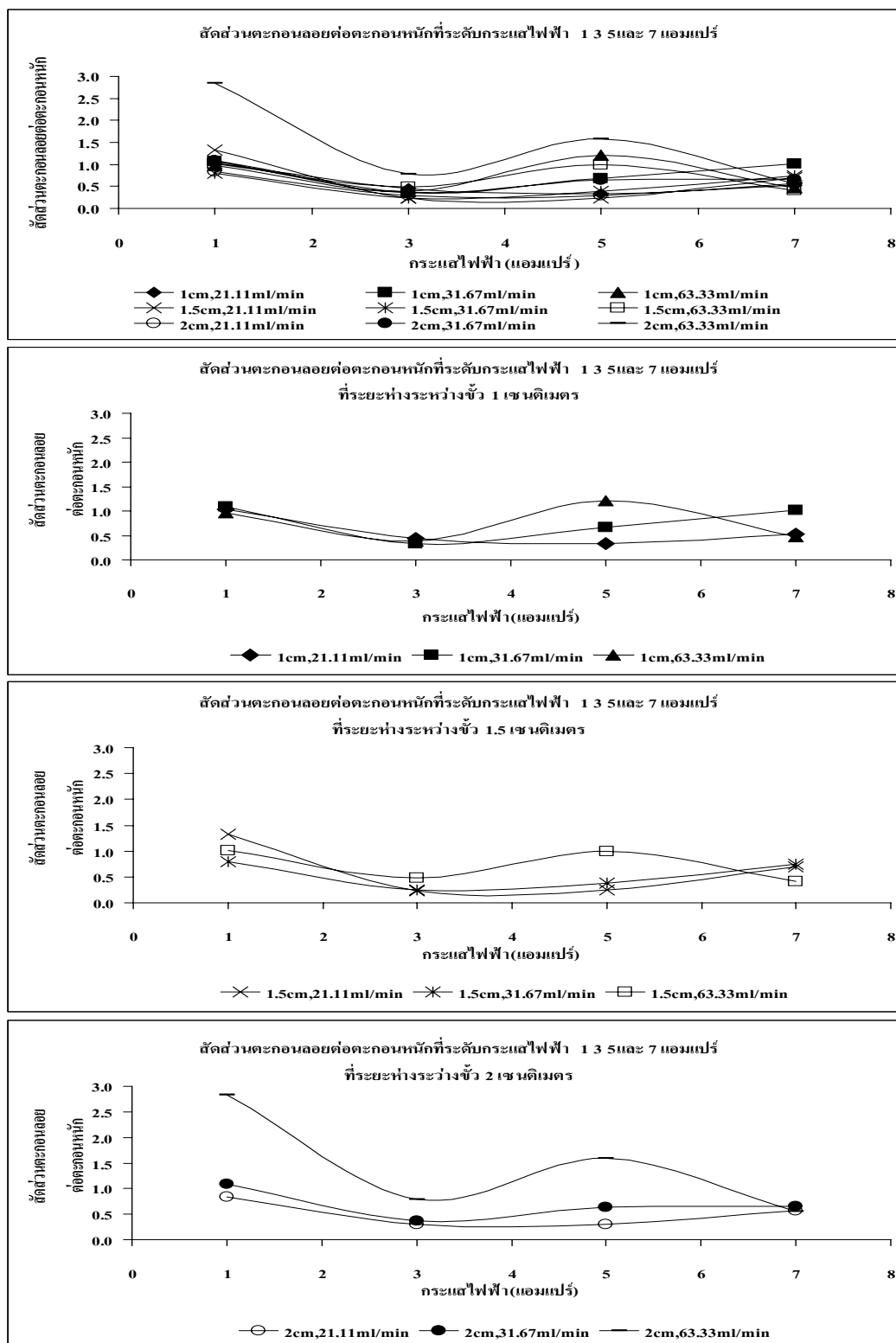
2.3 ผลของกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจะเป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนแก่ระบบ ที่ขั้วคาโทดอิเล็กตรอนจะปรีดิวิสต์ Cr^{6+} และน้ำ ให้ Cr^{3+} OH^- และก๊าซไฮโดรเจน ที่ขั้วแอโนดเหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอนถูกร่อนเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น การทำปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีตะกอนเพิ่มขึ้นตามกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงผลในภาพที่ 25 สำหรับสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนัก จะเกี่ยวข้องกับก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตดันให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบน เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนเกิดเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันขั้วแอโนดเหล็กถูกร่อนเพิ่มขึ้น และเกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มาก จึงทำให้สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญเมื่อระดับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 26

ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ สัดส่วนการเกิดตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.79-2.84 สูงกว่าระดับกระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 7 แอมแปร์ ทั้งนี้เพราะที่ระดับกระแสไฟฟ้าน้อยๆ อิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วคาโทดจะจำกัด การรีดิวิสต์ Cr^{6+} และน้ำ จะเกิดบริเวณขั้วคาโทดมากกว่าที่ขั้วแอโนด จึงทำให้เกิดตะกอนบริเวณขั้วคาโทดมาก และถูกก๊าซไฮโดรเจนผลิตดันขึ้นด้านบนของถังปฏิกิริยา แต่เมื่อระดับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนมากขึ้นการรีดิวิสต์บริเวณขั้วแอโนดจะมากขึ้น การเกิดก๊าซไฮโดรเจนก็มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดการไหลบริเวณช่องว่างระหว่างขั้วขึ้นป่วนมากขึ้น การถูกร่อนของเหล็กเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} มากขึ้น จะทำให้ทั้ง Cr^{3+} Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดตะกอนลอยและตะกอนหนักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ปริมาณของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ถูกร่อนมาก จึงเกิดตะกอนบริเวณขั้วแอโนดมากซึ่งเป็นตะกอนหนัก จึงทำให้สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักลดลง



ภาพที่ 25 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการเกิดตะกอนในระบบ ECF



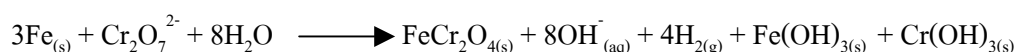
ภาพที่ 26 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนัก

2.4 ผลของระยะเวลาการเดินระบบต่อการเกิดตะกอน

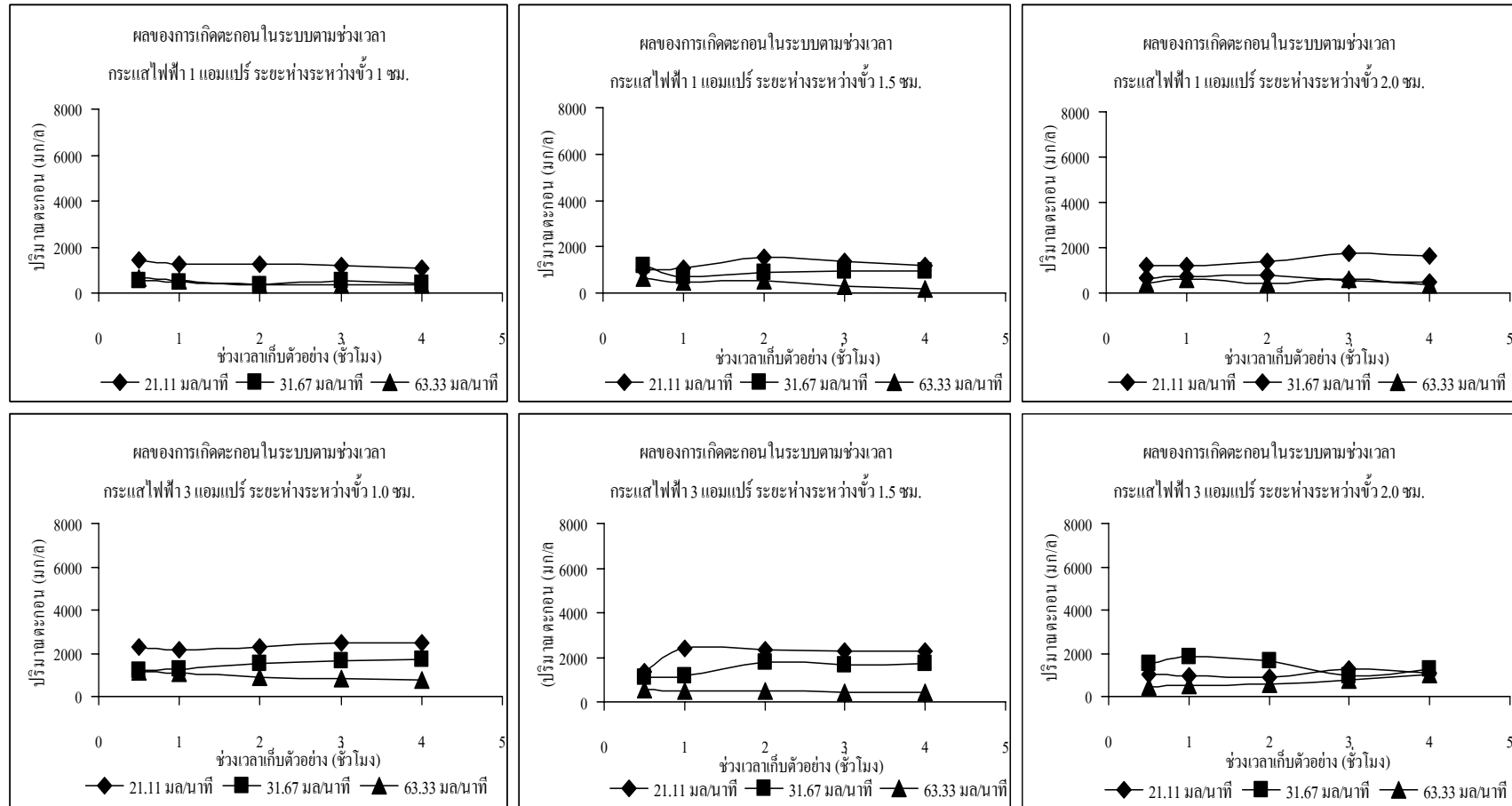
การทดลองจะเดินระบบ ECF เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แบบต่อเนื่อง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเดินระบบ 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ตะกอนที่เกิดขึ้นตามช่วงเวลาการเดินระบบที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 และ 3 แอมแปร์ ปริมาณตะกอนค่อนข้างจะคงที่ แสดงว่าอัตราการระบายตะกอนออกถึงปฏิกิริยากับอัตราการเกิดตะกอนในถังปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 5 และ 7 แอมแปร์ ปริมาณตะกอนในถังปฏิกิริยาจะสูงขึ้นตามช่วงเวลา ทั้งนี้จากอัตราการระบายตะกอนออกจากถังปฏิกิริยาน้อยกว่าอัตราการเกิดตะกอน จึงทำให้ตะกอนในถังปฏิกิริยาไม่สมดุลย์ จึงทำให้ตะกอนเกิดการสะสมอยู่ในระบบ ECF มากขึ้น ดังแสดงผลการศึกษาในภาพที่ 27

2.5 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตะกอน

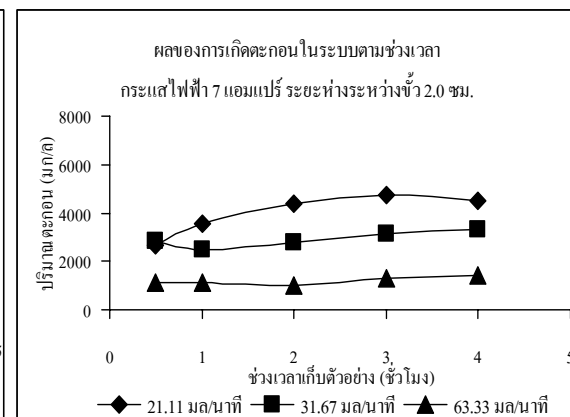
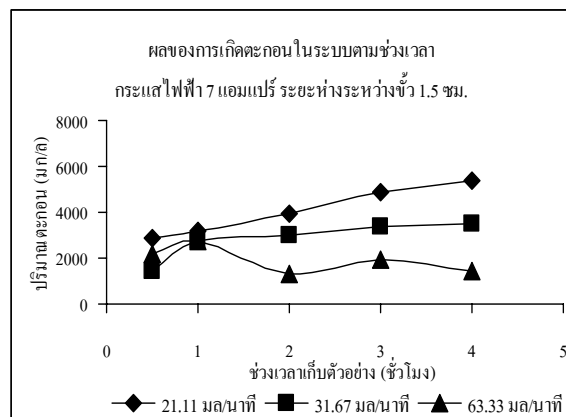
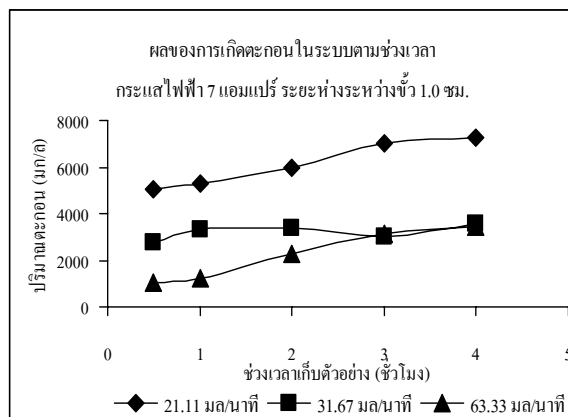
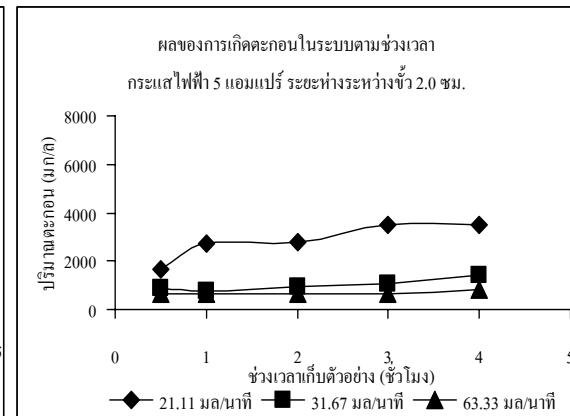
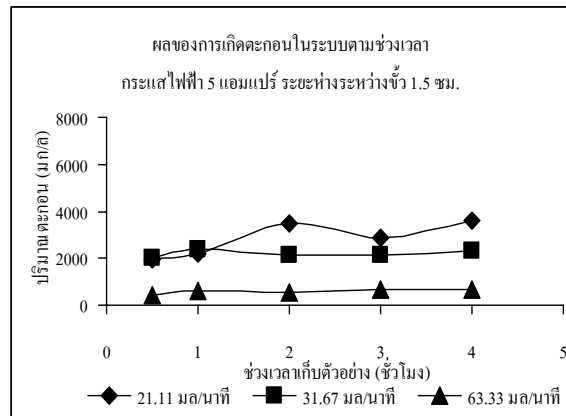
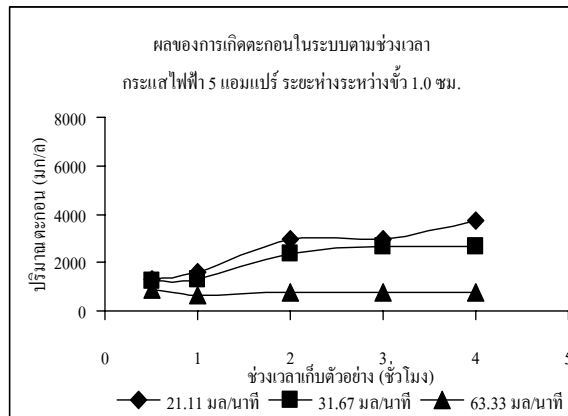
การเกิดตะกอนในระบบ ECF เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดตะกอนจะลดลงทุกสภาวะ กระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายการเกิดตะกอนตามสมการเคมีในหน้าที่ 40 ดังนี้



ตะกอนจะประกอบด้วยตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) โครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) และสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กและโครเมียม (FeCr_2O_4) สารตั้งต้นคือแผ่นเหล็ก ($\text{Fe}_{(s)}$) จะสูญเสียอิเล็กตรอนและฟลักซ์จะละลายออกมาอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} เสกชะวาลนที่โครเมียม Cr^{6+} เป็นสารตั้งจะถูกอิเล็กตรอนรีดิวส์เป็น Cr^{3+} และจะเข้าทำปฏิกิริยากับ OH^- จะเกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งอิเล็กตรอนจะมาจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนมากขึ้น ระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น จะทำให้จำนวนพื้นที่ผิวของแผ่นเหล็กลดลง จะมีผลต่อพื้นที่สัมผัสน้ำเสียลดลงทำให้เกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น และที่พื้นที่ผิวลดลงจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นตามสมการที่ (6) จะมีผลให้เกิดตะกอนลดลง



ภาพที่ 27 อัตราการเกิดตะกอนในระบบ ECF ตามช่วงเวลาการเดินระบบ



ภาพที่ 27 ต่อ อัตราการเกิดตะกอนในระบบ ECF ตามช่วงเวลาการเดินระบบ

ผลการศึกษาของ C.Y.Hu และ คณะ (2004) ที่หาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ อะลูมิเนียมที่ละลายออกจากขั้วแอโนดจากสมการ

$$[Al^{3+}] = \frac{Qe}{ZxF} \quad (14)$$

โดยที่	$[Al^{3+}]$	เป็นความเข้มข้นโลหะที่ละลายน้ำ สามารถแทนค่า $[Fe^{3+}]$ ได้
	Qe	เป็นปริมาณไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมบ์
	Z	เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ของโลหะที่เป็นขั้ว
	F	เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์

จากความสัมพันธ์ของสมการ (14) แทนอะลูมิเนียม ด้วยเหล็ก ดังนั้นปริมาณ Fe^{3+} ที่ละลาย ออกจากแผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนดจะขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้

สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สัดส่วนตะกอนลอยต่อ ตะกอนหนักจะลดลง เนื่องจาก Cr^{6+} ที่เข้าถึงปฏิกิริยาจะเกิดเป็นตะกอนลอย $Cr(OH)_3$ จะเกิดด้านขั้ว คาโทด เมื่อมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น และถูกอิเล็กตรอนรีดิวส์เป็น Cr^{3+} มากขึ้น ตาม จะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอนเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันก็จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน OH^- มากขึ้น และทำให้เหล็กที่ขั้วแอโนดผุกร่อนเกิดเป็น Fe^{2+} และเป็น Fe^{3+} มากขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิด มากขึ้นจะทำให้น้ำเสียบริเวณขั้วคาโทดไหลขึ้นด้านบนด้วยอัตราการไหลที่เร็วขึ้น และขั้วแอโนด จะไหลลงมากขึ้น จึงทำให้ OH^- ด้านบนของถังปฏิกิริยาบางส่วนไหลลงด้านล่างทำปฏิกิริยากับ Fe^{3+} เกิดเป็น $Fe(OH)_3$ ตกลงด้านล่างของถังปฏิกิริยามากกว่าที่ไหลวนกลับขึ้นไปด้านบนของถังปฏิกิริยา จึงทำให้สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักลดลงตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจน

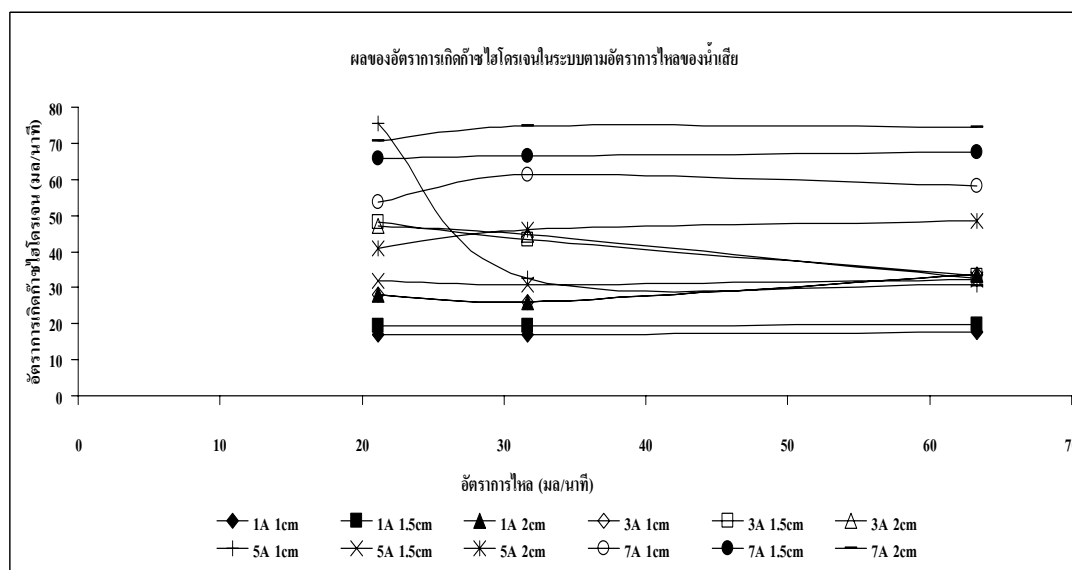
ระบบ ECF จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ขั้วคาโทด ซึ่งจะพาให้ตะกอนลอยขึ้นด้านบนและแยกออกที่รางรับตะกอน ในการทดลองได้วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ ECF มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 17 ดังนี้

ตารางที่ 17 ผลการทดลองแสดงอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ

พารามิเตอร์	อัตรา ไหลของ น้ำเสีย (มล/ นาท)	กระแสไฟฟ้า											
		1 แอมแปร์			3 แอมแปร์			5 แอมแปร์			7 แอมแปร์		
		1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2
		ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม	ชม
เวลาที่ใช้เก็บ	21.11	178	155	107	64	62	74	94	95	73	56	46	42
ก๊าซใน 50	31.67	176	155	115	67	69	74	93	97	65	49	45	40
มล (วินาที)	63.33	170	151	90	92	90	73	97	93	62	52	44	40
อัตราการเกิด	21.11	16.9	19.4	28.1	47.1	48.2	40.4	32.0	31.7	41.0	53.7	65.7	70.8
ก๊าซ (มล/ นาท)	31.67	17.0	19.3	26.0	44.5	43.3	40.7	32.4	30.8	46.0	61.2	66.4	74.9
	63.33	17.7	19.9	33.5	32.4	33.3	40.9	31.0	32.2	48.6	58.1	67.7	74.5

3.1 ผลของอัตราการไหล

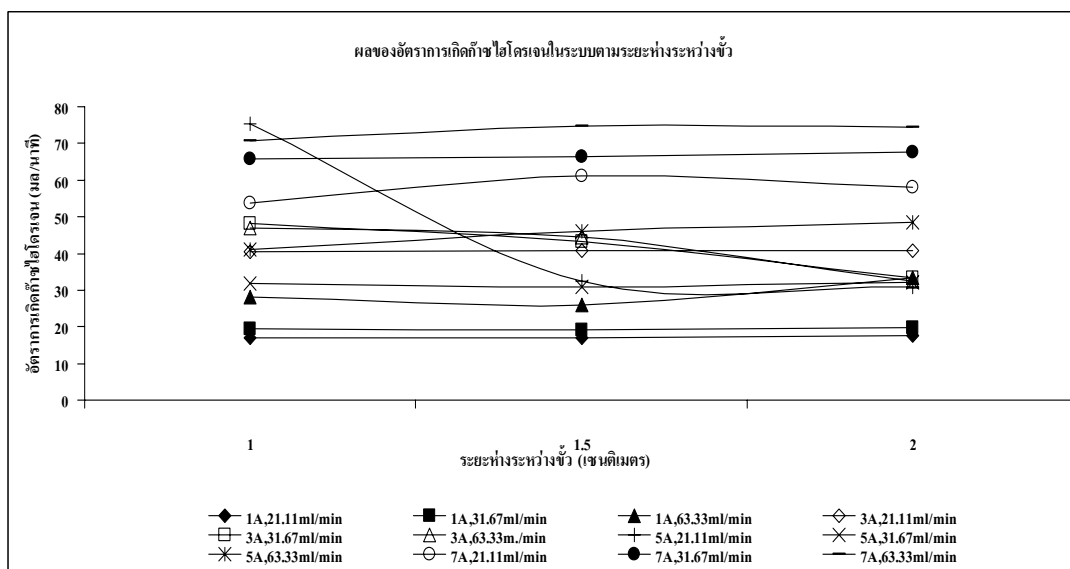
เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนค่อนข้างจะคงที่ ซึ่งแสดงว่าผลของอัตราการไหลไม่มีส่วนสัมพันธ์กันกับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน อัตราการไหลจะมีผลต่อปริมาณโครเมียมที่เข้าระบบและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน การเพิ่มอัตราการไหลหรือระยะเวลาทำปฏิกิริยาไม่ได้เป็นการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนจึงทำให้อัตราการเกิดก๊าซค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ซึ่งผลทดลองดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ผลของอัตราการใช้ต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF

3.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้ว

ระยะห่างระหว่างขั้วจะมีผลต่ออิเล็กตรอนที่จะวิ่งจากขั้วคาโทดไปที่ขั้วแอโนด พื้นที่ผิวมีผลต่อการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในการทำปฏิกิริยา โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว ที่ระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกันอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วคาโทดจะใกล้เคียงกัน อิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วคาโทดจะทำให้หน้าแตกตัวเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวลดลงอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะสูงขึ้นเล็กน้อยก่อนข้างจะคงที่ ซึ่งเกิดจากที่พื้นที่ผิวน้อยจะมีความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนมาก ก๊าซที่มีความหนาแน่นมากจะรวมตัวกันเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ลอยขึ้นด้านบน ในขณะที่พื้นที่ผิวมากการกระจายตัวของอิเล็กตรอนจะมีมากทำให้เกิดการไฮโดรเจนกระจายไปตามพื้นที่ผิว จะทำให้เกาะติดอยู่กับแผ่นขั้วจะลอยขึ้นมาช้ากว่า ขณะเดียวกันที่ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวลดลงมีผลต่อความนำไฟฟ้าที่ลดลง จะทำให้ในระบบ ECF เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซขยายตัวและลอยขึ้นด้านบน จึงทำให้พบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 29



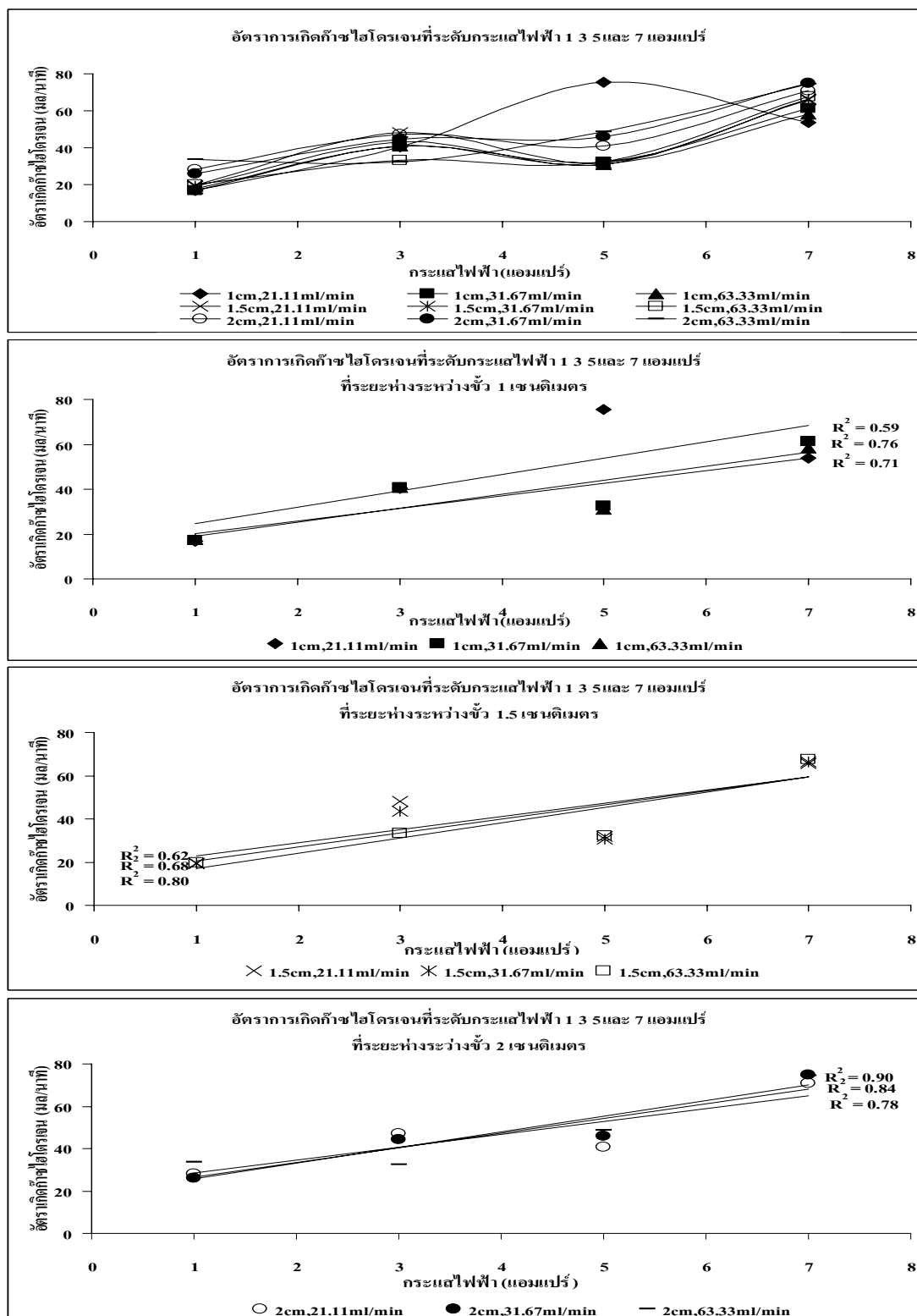
ภาพที่ 29 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF

3.3 ผลของกระแสไฟฟ้า

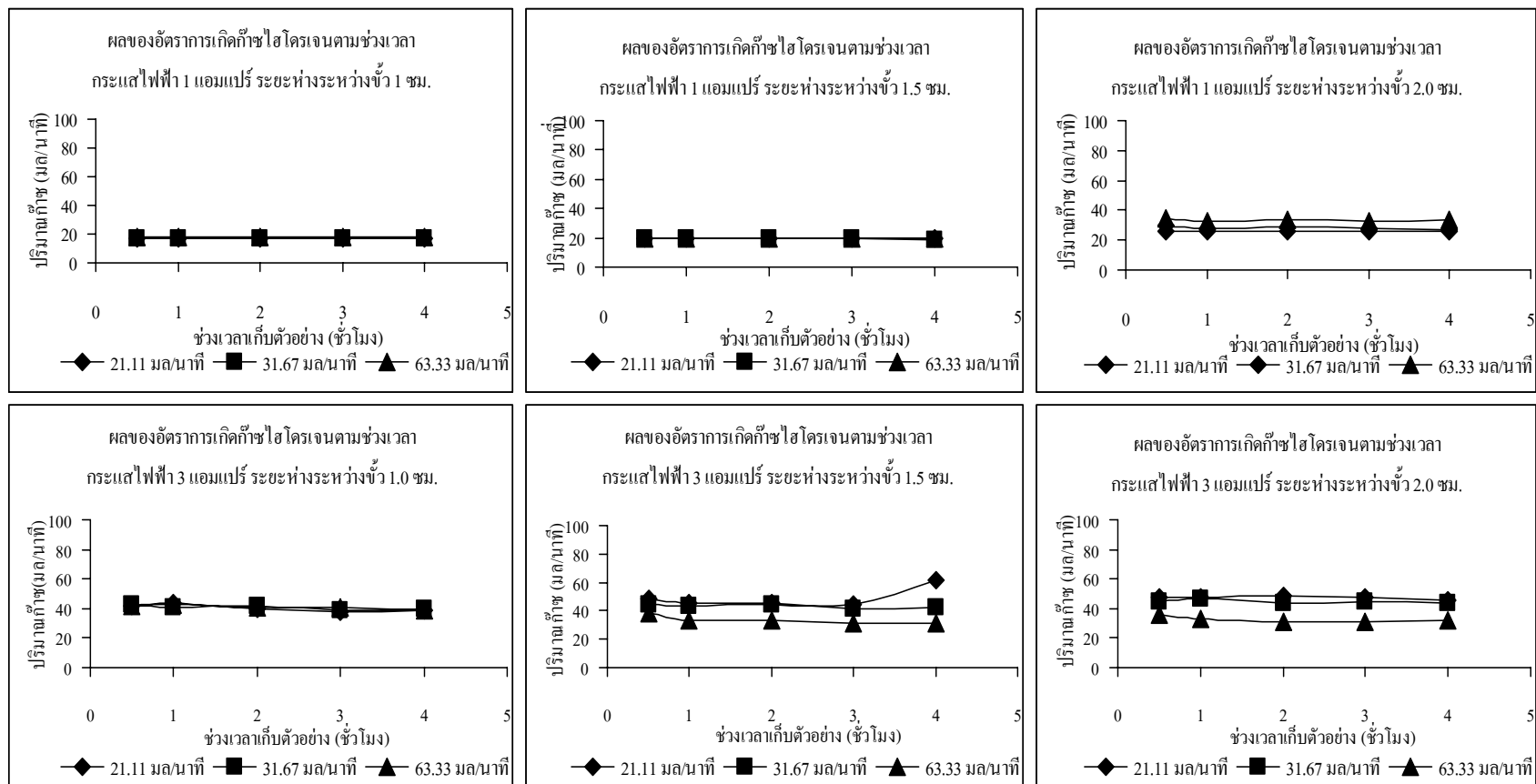
กระแสไฟฟ้าจะมีผลต่ออิเล็กตรอน เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจะทำให้ น้ำแตกตัวเกิดเป็นก๊าซเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 30 ซึ่งมีบางสภาวะที่ไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาที่สภาวะอื่นๆ คือ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม. ที่อัตราการไหล 21.11 มล/นาท ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ระดับกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ สูงกว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ เนื่องจากการศึกษาไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิภายนอก โดยอุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขึ้นสูงตาม จึงทำให้บางสภาวะไม่สอดคล้องกับสภาวะอื่นๆ

3.4 ผลของระยะเวลาการเดินระบบต่อการเกิดก๊าซ

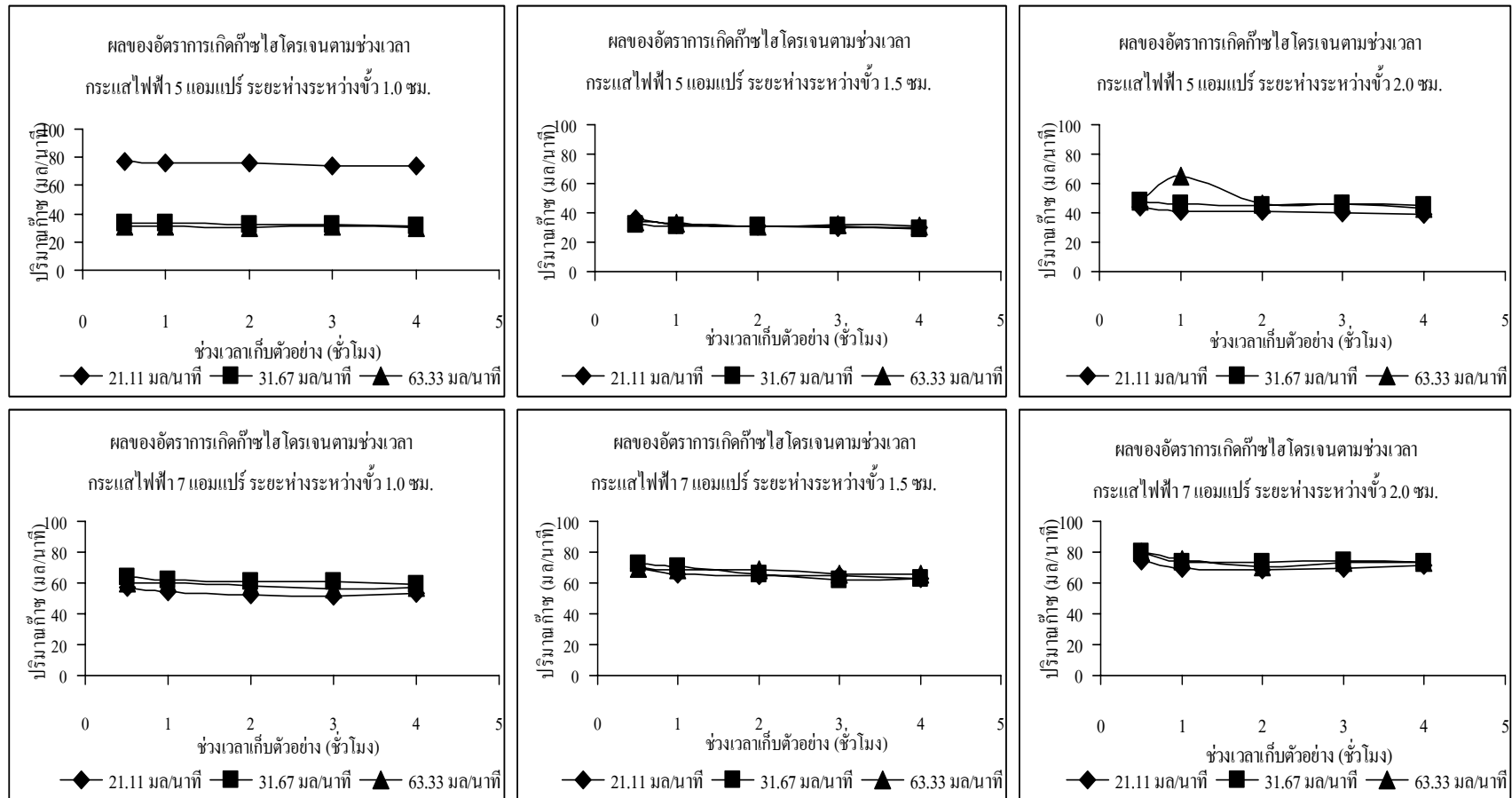
การเดินระบบ ECF เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แบบต่อเนื่อง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำช่วงเดินระบบที่เวลา 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ที่ระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกันก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเดียวกันจะให้อิเล็กตรอนเท่ากัน ซึ่งอิเล็กตรอนจะไปทำให้น้ำแตกตัวใกล้เคียงกัน ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 30 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF



ภาพที่ 31 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF ตามช่วงเวลาการเดินระบบ



ภาพที่ 31 (ต่อ) อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF ตามช่วงเวลาการเดินระบบ

มีสภาวะการทดลองที่ไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาที่สภาวะอื่นๆ คือ ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 ซม (541.5 ตร.ซม) และอัตราการไหล 21.11 มล/นาที่ (45 นาที) ที่ช่วงเวลาเดินระบบ 4 ชั่วโมง เกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น และที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม (361 ตร.ม) อัตราการไหล 63.33 มล/นาที่ เกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยภายนอกที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิทั้งภายในถึงปฏิกิริยา และภายนอกถึงปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนแปลง และจะมีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

3.5 สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจน

ผลของอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบต่ออัตราการเกิดก๊าซ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดก๊าซไม่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ และสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายตามผลการศึกษาของ C.Y.Hu และ คณะ (2004) และที่หาความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากกฎของก๊าซ (Ideal gas law) และกฎของฟาราเดย์ ได้ดังสมการ

$$V_{H_2} = \frac{V_x R_x T_x Q_e}{Z_x F_x P} \quad (15)$$

โดยที่	Q_e	เป็นปริมาณไฟฟ้าหาได้จาก $\frac{nIt}{V}$
	n	เป็นจำนวนแผ่นขั้วไฟฟ้า
	I	เป็นกระแสไฟฟ้า
	t	เป็นเวลา
	V_{H_2}	เป็นปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน
	V	เป็นปริมาตรของน้ำเสียที่ทำปฏิกิริยา
	R	เป็นค่าคงที่ก๊าซ $= 8.14 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
	T	เป็นอุณหภูมิ (องศาเคลวิน, K)
	P	เป็นความดันบรรยากาศ (นิวตันต่อตารางเมตร, Nm^{-2})

จะได้

$$V_{H_2} = \frac{R_x T_x I_{xt}}{Z_x F_x P} \quad (16)$$

จากสมการพบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียไม่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจมาจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิของระบบที่ทำการทดลองในอุณหภูมิห้อง ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ จึงส่งผลต่อปริมาตรก๊าซที่ได้สูงขึ้น

จากสมการเคมีของการเกิดก๊าซไฮโดรเจน



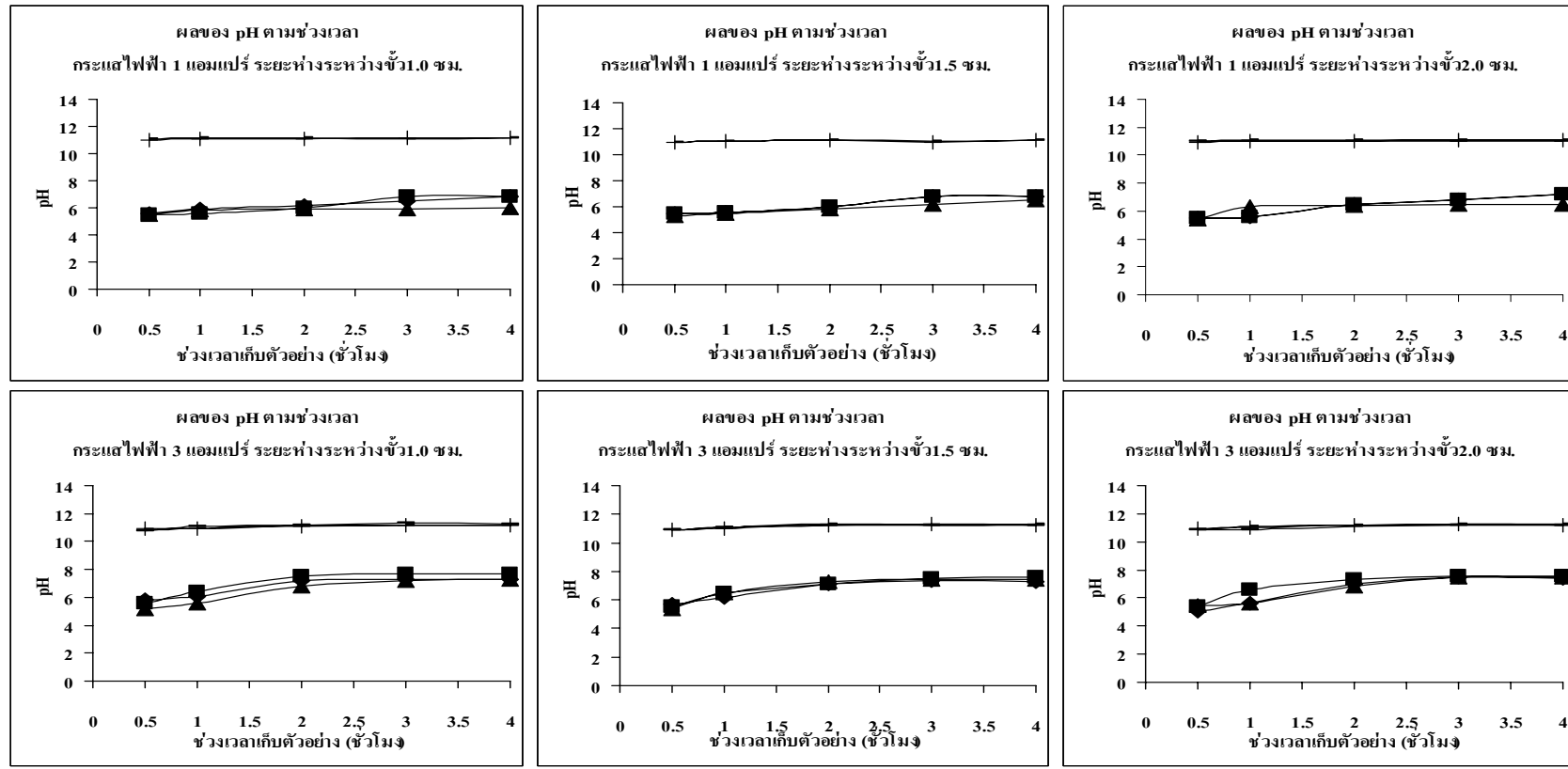
ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดที่ขั้วคาโทด น้ำจะรับอิเล็กตรอน แยกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเสียจึงไม่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดที่ขั้วคาโทด เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าจะสูงขึ้น จะมีผลต่ออุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาที่สูงขึ้น และก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดมากขึ้น จากสมการที่ (16) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซที่ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

กระแสไฟฟ้าแปรผันกับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ C.Y.Hu และ คณะ (2004) สำหรับค่า R^2 จากกราฟที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 ซึ่งแสดงว่าอัตราการเกิดก๊าซยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อผลการทดลองที่ไม่ได้ควบคุม เช่น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ

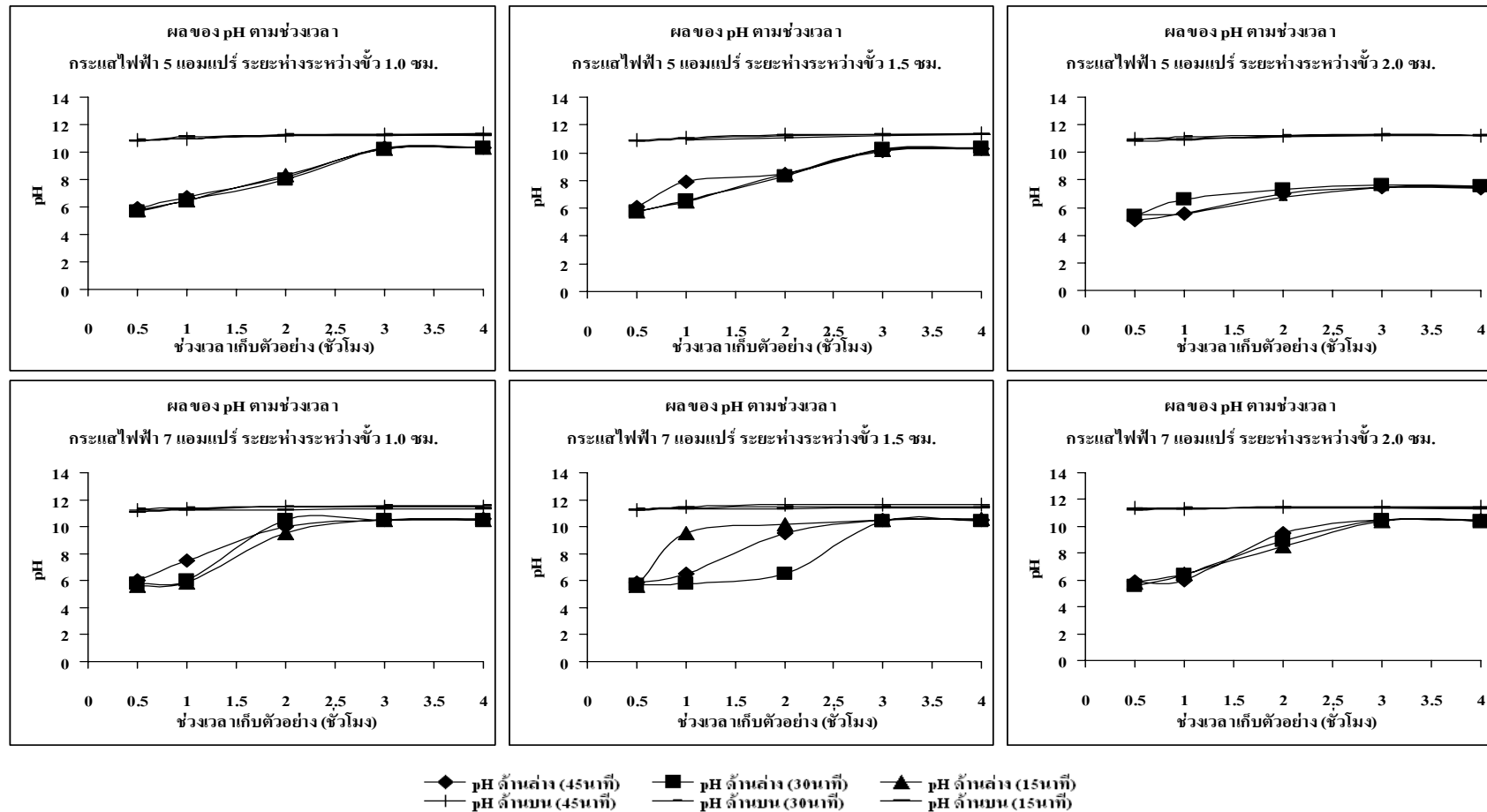
4. ระดับ pH ของน้ำที่ผ่านออกจากระบบ ECF

เมื่อเริ่มต้นการทดลองน้ำเสียมีระดับ pH 4 หลังจากระบบดำเนินไป ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากด้านบนของถังปฏิกิริยาจะมี pH อยู่ระหว่าง 11.00 ถึง 11.55 สูงกว่าด้านล่างของถังปฏิกิริยามีระดับ pH อยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 10.55 ดังแสดงในภาพที่ 32



◆ pH ด้านล่าง (45 นาที) ■ pH ด้านล่าง (30 นาที) ▲ pH ด้านล่าง (15 นาที)
 + pH ด้านบน (45 นาที) — pH ด้านบน (30 นาที) — pH ด้านบน (15 นาที)

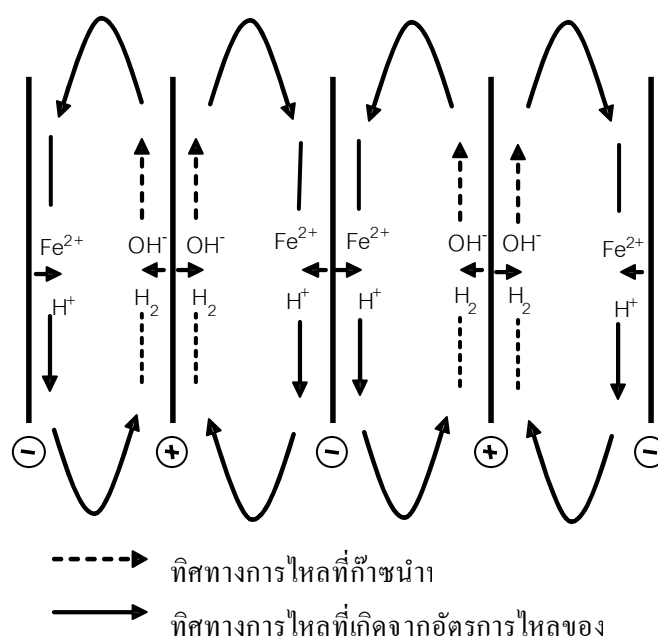
ภาพที่ 32 ระดับของ pH ตามเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ



ภาพที่ 32 (ต่อ) ระดับของ pH ตามเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ

ในช่วงแรกของการเริ่มต้นทดลอง pH ของน้ำตัวอย่างที่จุดเก็บด้านบนของถังปฏิกิริยาจะค่อนข้างไปทางกรด และจะสูงขึ้นเรื่อย เมื่อเวลา 2 ชั่วโมง ระดับของ pH จะสูงขึ้นในอัตราที่ลดลง และจะคงที่ ซึ่งแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลย์ จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า

ที่ระดับ pH ของจุดเก็บน้ำด้านบนสูงกว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำด้านล่าง เนื่องจากที่ขั้วคาโทดจะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน มีสถานะเป็นด่าง และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะพาให้ไฮดรอกไซด์ไอออนขึ้นด้านบน ในขณะที่ขั้วแอโนดซึ่งมีสถานะเป็นกรดนั้นจะถูกอัตราการไหลของน้ำเสียนำพาลงสู่ด้านล่างถึงปฏิกิริยา ตามภาพที่ 33 และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูง ขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้ในถังปฏิกิริยาเกิดการปั่นป่วนขึ้น จะทำให้เกิดการกวนผสมมากขึ้น จึงทำให้ระดับของ pH สูงขึ้นตามช่วงเวลา



ภาพที่ 33 การเกิดสภาวะกรด และด่างในถังปฏิกิริยา

ผล pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัด พบว่าที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำด้านบนและด้านล่าง จะมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน โดยจุดเก็บตัวอย่างน้ำด้านบนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าก็เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำด้านบนจะมีไฮดรอกไซด์ (OH^-) มากกว่าจึงทำให้โครเมียมที่อยู่ในน้ำในรูป Cr^{3+} เกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ขึ้น

5. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ ECF

ระบบ ECF ที่ทำการทดลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ทุกสภาวะที่ทำการทดลอง การใช้พลังงานของระบบในการกำจัดโครเมียมสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$W = U_v \times I \quad (17)$$

โดยที่ W เป็นงานทางไฟฟ้า (วัตต์)
 I เป็นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 U_v เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

พลังงานที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมจะหาได้จากงานทางไฟฟ้า (W) คูณกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Contact time) ในการทดลองควบคุมระยะเวลาอยู่ที่ 15, 30 และ 45 นาที หรือเท่ากับ 63.33, 31.67 และ 21.11 มล/นาที ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการทดลองหาได้จากสมการที่ (17) คูณด้วยเวลาทำปฏิกิริยา หรือหารด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ ECF ดังสมการที่ (18)

$$\frac{W}{Q} = \frac{U_v \times I}{Q} \quad (18)$$

โดยที่ W_Q เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีหน่วยเป็น (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตรของถังปฏิกิริยา)
 Q เป็นอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

5.1 ผลของอัตราการไหลต่อการใช้พลังงาน

พลังงานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาควบคุมกระแสไฟฟ้า 1, 3, 5 และ 7 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 15, 30 และ 45 นาที พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์ มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม โดยหาได้จากสมการ (18) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 18 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น การใช้พลังงานก็จะน้อยลง เนื่องจากอัตราการไหลจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการกำจัดโครเมียมออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด จะเป็นสถานะที่ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด และที่เวลาทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด คือ ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 63.33 มล/นาที ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 80.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กิโลกรัมของโครเมียมที่ถูกกำจัด ดังแสดงผลในภาพที่ 34

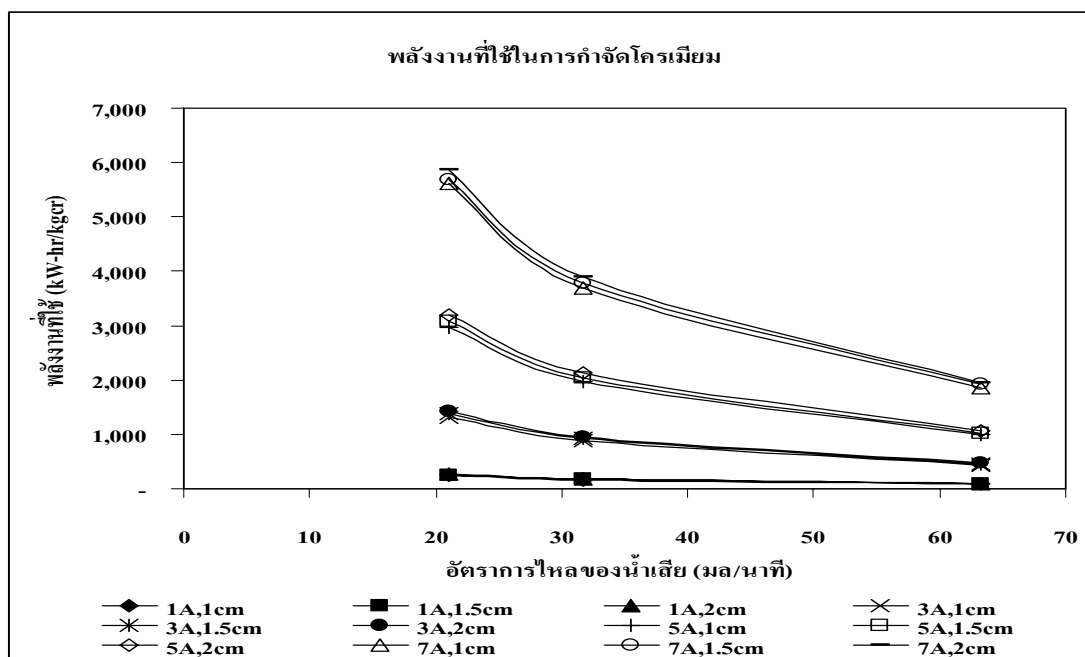
ตารางที่ 18 การใช้พลังงานในการกำจัดโครเมียมที่สภาวะต่าง ๆ

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลน้ำเสีย (มล/นาท)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (ซม)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)	โครเมียมที่เหลืออยู่		โครเมียมที่ถูกกำจัด (มก/ล)	พลังงานที่ใช้ กำจัด kW-hr/kgCr
				ด้านล่าง	ด้านบน		
1	21.11	1	6	0.544	ND	19.728	240.12
		1.5	6.5	0.464	0.049	19.743	259.93
		2	7	0.656	0.226	19.559	282.56
	31.67	1	6	0.497	ND	19.752	159.86
		1.5	6.5	0.361	ND	19.820	172.59
		2	7	0.538	ND	19.731	186.70
	63.33	1	6	0.535	0.085	19.690	80.20
		1.5	6.5	0.542	0.167	19.645	87.08
		2	7	0.546	0.235	19.610	93.94
3	21.11	1	11	0.402	0.003	19.797	1,316.04
		1.5	11.5	0.448	0.011	19.770	1,377.74
		2	12	0.290	ND	19.855	1,431.49
	31.67	1	11	0.417	ND	19.791	877.48
		1.5	11.5	0.468	0.051	19.740	919.74
		2	12	0.606	0.032	19.681	962.63
	63.33	1	11	0.217	0.013	19.885	436.75
		1.5	11.5	0.424	0.065	19.755	459.59
		2	12	0.260	0.059	19.840	477.52

ตารางที่ 18 (ต่อ)

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	อัตราการไหลน้ำเสีย (มล/นาท)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (ซม)	แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)	โครเมียมที่เหลืออยู่		โครเมียมที่ถูกกำจัด (มก/ล)	พลังงานที่ใช้ กำจัด kW-hr/kgCr
				ด้านล่าง	ด้านบน		
5	21.11	1	15	ND	0.007	19.997	2,961.17
		1.5	15.5	0.268	0.035	19.848	3,082.76
		2	16	0.384	0.074	19.771	3,194.62
	31.67	1	15	0.122	ND	19.939	1,979.51
		1.5	15.5	0.035	0.003	19.981	2,041.21
		2	16	0.249	0.097	19.827	2,123.42
	63.33	1	15	ND	0.017	19.992	987.30
		1.5	15.5	0.300	ND	19.850	1,027.50
		2	16	0.324	0.015	19.831	1,061.66
7	21.11	1	20	0.525	0.101	19.687	5,614.57
		1.5	20.5	0.121	0.007	19.936	5,682.95
		2	21	0.363	0.028	19.805	5,860.18
	31.67	1	20	0.190	ND	19.905	3,701.39
		1.5	20.5	0.144	0.003	19.926	3,789.89
		2	21	0.304	ND	19.848	3,897.59
	63.33	1	20	0.384	0.112	19.752	1,865.33
		1.5	20.5	0.443	0.223	19.667	1,920.26
		2	21	0.167	0.058	19.888	1,945.24

หมายเหตุ: ND = Non Detect คือ ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการวิเคราะห์ที่มีค่าน้อยกว่า 0.001 มก/ล

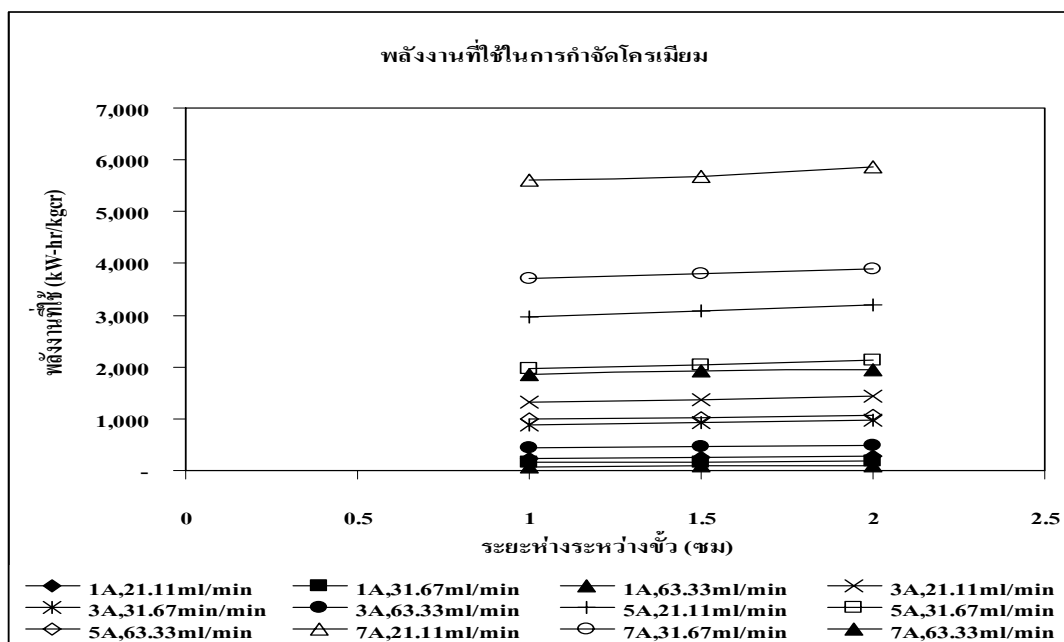


ภาพที่ 34 พลังงานที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่าง ๆ

5.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการใช้พลังงาน

ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำจัดโครเมียม ดังแสดงในภาพที่ 35 เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะมีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ตามสมการที่ (6) และ (8) เมื่อความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นในการทดลองต้องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพื่อปรับระดับของกระแสไฟฟ้าให้คงที่ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้น

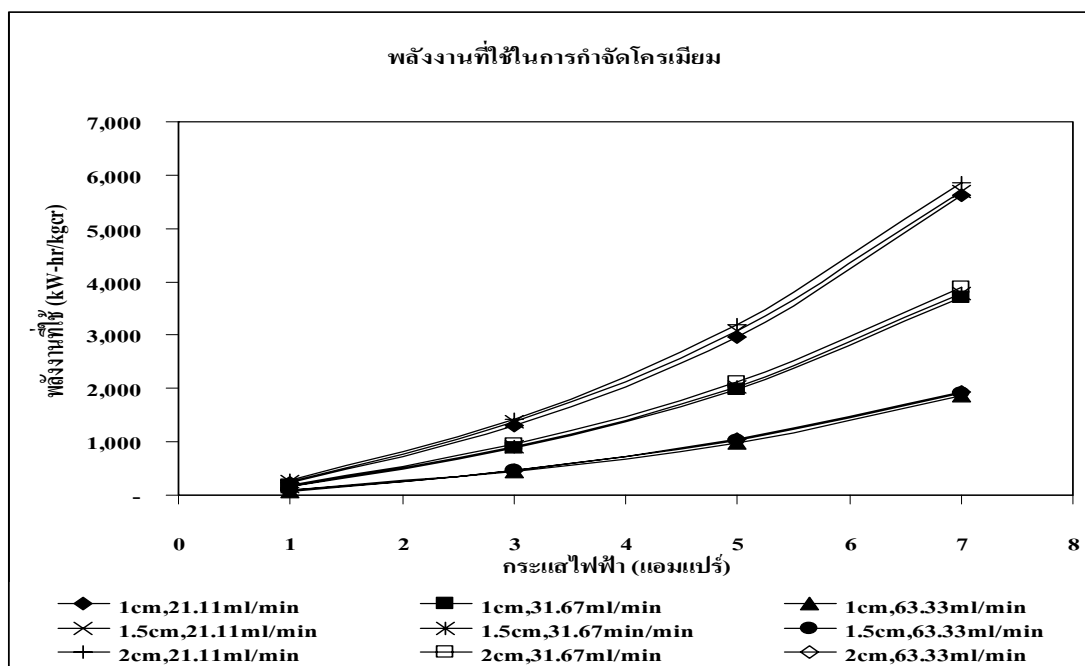
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดที่สามารถกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง คือ ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม ใช้พลังงานไฟฟ้า 80.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียมที่กำจัด



ภาพที่ 35 พลังงานที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่าง ๆ

5.3 ผลของกระแสไฟฟ้าต่อการใช้พลังงาน

กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณพลังงานไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 36 ที่ระดับกระแสไฟฟ้าที่ 5 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) ที่อัตราการไหล 21.11 มล/นาที จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมได้มากที่สุด ใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำจัดสูงถึง 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียมที่กำจัด ดังนั้นสถานะที่การกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ เวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) ใช้พลังงานไฟฟ้า 80.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียมที่กำจัด



ภาพที่ 36 พลังงานที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมในระบบ ECF แบบต่อเนื่อง

การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย (Electro – Chemical and Electro Flotation, ECF) มีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมทุกสภาวะการทดลอง ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF คือ

1.1 อัตราการไหลของน้ำเสีย

อัตราการไหลของน้ำเสียจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ด้านล่างของถังปฏิกิริยามีแนวโน้มรูปแบบการกำจัดโครเมียมมีทิศทางที่ไม่แน่นอนที่จะชี้บ่งบอกว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ส่วนด้านบนของถังปฏิกิริยาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการไหลที่สูงขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลมากปริมาณโครเมียมที่เข้าระบบมาก หรือมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย จึงทำให้มีโครเมียมเหลืออยู่ในระบบมากกว่าที่อัตราการไหลน้อย และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วคาโทด มีทิศทางการไหลขึ้น ซึ่งจะทำให้ด้านบนของถังปฏิกิริยาเกิดการกวนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ Cr^{3+} ทำปฏิกิริยากับ OH^- ได้อย่างทั่วถึง ส่วนด้านล่างการกวนผสมจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้รูปแบบการกำจัดโครเมียมไม่มีทิศทางที่แน่นอน

1.2 ระยะห่างระหว่างขั้ว

ระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นพื้นที่ผิวก็จะลดลง แนวโน้มการกำจัดโครเมียมด้านบนจะมีรูปแบบการกำจัดโครเมียมลดลงตามระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือมีพื้นที่ลดลงเล็กน้อย เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังขั้วแอโนดไกลทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างลง ส่วนด้านล่างของถังปฏิกิริยามีรูปแบบที่ไม่แน่นอนและที่ชัดเจน เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วคาโทด มีทิศทางการไหลขึ้นซึ่งจะทำให้ด้านบนของถังปฏิกิริยาเกิดการกวนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ Cr^{3+}

ทำปฏิกิริยากับ OH^- ได้อย่างทั่วถึง ส่วนด้านล่างการกวนผสมจะไม่ใช่เนื้อเดียวกัน ทำให้รูปแบบการกำจัดโครเมียมไม่มีทิศทางที่แน่นอน โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 ซม (361 ตร.ซม) ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ อัตราการไหลของน้ำเสีย 21.11 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุด

1.3 กระแสไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นปริมาณอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งอิเล็กตรอนจะไปรีดิวส์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} พร้อมกับน้ำแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจนและ OH^- จากนั้น Cr^{3+} จะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าขึ้นเป็น 7 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง เนื่องจากตะกอน ก๊าซไฮโดรเจน และ OH^- ที่เพิ่มขึ้น โดยตะกอนที่อยู่ระหว่างแผ่นขั้วคาโทดและแอโนดจะขัดขวางอิเล็กตรอนที่จะไปรีดิวส์ Cr^{6+} และก๊าซไฮโดรเจนจะทำให้อัตราการไหลภายในช่องว่างระหว่างขั้วสูงขึ้น ส่งผลให้บริเวณขั้วแอโนดมี Cr^{6+} ที่ยังไม่ถูกรีดิิวส์และ Cr^{3+} บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับ OH^- ไหลลงด้านล่างของถังปฏิกิริยา

1.4 ระดับของ pH

pH จะมีผลต่อการกำจัดโครเมียม เกิดเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 8.3 ตามภาพที่ 2 และ 3 เริ่มต้นเดินระบบ pH 4 เมื่อเดินระบบไประดับ pH จะสูงขึ้นอิเล็กตรอนทำให้น้ำแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน และ OH^- ซึ่งก๊าซจะพา OH^- ขึ้นด้านบนจะทำให้มี pH สูงกว่าด้านล่างและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้านบนของถังปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่าง เมื่อมี OH^- ในถังมากขึ้นระดับ pH จะสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจะลดลงเนื่องจากแทนที่ Cr^{3+} จะเกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ แต่จะเกิดเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ อยู่ในรูปของสารละลายเพิ่มขึ้น

1.5 ตะกอน

ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ หรือ FeCr_2O_4 จะมีผลต่อการขัดขวางการเดินทางของอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนด จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง โดยเฉพาะที่ระดับกระแสไฟฟ้าสูงที่ 7 แอมแปร์ ประสิทธิภาพการกำจัดจะน้อยกว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นมาก

1.6 ก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมาจะมีผลต่อการไหลภายในช่องว่างระหว่างขั้ว เมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนมากอัตราการไหลเวียนจะสูง รวมทั้งทำให้ด้านบนของถังปฏิกิริยาเกิดการควบแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้รูปแบบการกำจัดโครเมียมมีทิศทางที่แน่นอน

2. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดตะกอนในระบบ ECF แบบต่อเนื่อง

2.1 อัตราการไหลของน้ำเสีย

อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบเพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มปริมาณโครเมียมเข้าระบบมากขึ้นตามไปด้วย จะทำให้เกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะเพิ่มขึ้น อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณ Cr^{6+} เข้าระบบมาก โดยที่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ มีสัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักสูงกว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 7 แอมแปร์ แสดงว่าระดับกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นมากเกินไปในการรีดิวส์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ กระแสไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะทำให้เหล็กสุกก่อนเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} และจะไปทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มากขึ้น

2.2 ระยะห่างระหว่างขั้ว

เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นและพื้นที่ผิวลดลง ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งจากขั้วคาโทดไปขั้วแอโนดเป็นระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ช้า สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจะมาจากอิเล็กตรอนจากกระแสไฟฟ้าที่จะรีดิวส์ Cr^{6+} และแตกตัวของน้ำให้ OH^- ก๊าซไฮโดรเจนและทำให้เหล็กสุกก่อนเกิด Fe^{2+} , Fe^{3+} เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นหรือพื้นที่ผิวลดลงการเกิดตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ลดลงเหมือนกัน จึงทำให้สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักใกล้เคียงกัน

2.3 กระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าจะเป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนแก่ระบบ ที่ขั้วคาโทดอิเล็กตรอนจะปรีดิวิสต์ Cr^{6+} และน้ำ ให้ Cr^{3+} OH^- และก๊าซไฮโดรเจน ที่ขั้วอโนดเหล็กจะสูญเสียอิเล็กตรอนถูกร่อนเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} กระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะเกิดตะกอนเพิ่ม สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนัก เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดเพิ่มขึ้นตาม ขณะเดียวกันขั้วอโนดเหล็กถูกร่อนเพิ่มขึ้น จะเกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มาก จึงทำให้สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าไม่แตกต่างกัน ก็น้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ สัดส่วนการเกิดตะกอนลอยต่อตะกอนหนักจะมีค่าสูงกว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.79-2.84 สูงกว่าระดับกระแสไฟฟ้า 3, 5 และ 7 แอมแปร์

3. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF แบบต่อเนื่อง

3.1 อัตราการไหลของน้ำเสีย

อัตราการไหลของน้ำเสียที่มีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบ ECF พบว่า ในสถานะที่ระดับกระแสไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วเดียวกัน โดยแปรผันอัตราการไหลของน้ำเสีย เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดก๊าซก่อนข้างคงที่ เนื่องจากการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดจากอิเล็กตรอนทำให้น้ำแตกตัวได้ก๊าซไฮโดรเจนและ OH^- ดังนั้นอัตราการไหลจึงไม่มีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจน

3.2 ระยะห่างระหว่างขั้ว

ระยะห่างระหว่างขั้วเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของระบบเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความต้านทานความนำไฟฟ้า ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจะมีผลทำให้เกิดก๊าซเพิ่มขึ้น

3.3 กระแสไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้น ที่กระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ มีอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 53.7–74.9 มล/นาที่ ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ มีอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 31.0–48.6 มล/นาที่ ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 32.7–47.1 มล/นาที่ และที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ มีอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 16.9–33.5 มล/นาที่

4. ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมของระบบ ECF แบบต่อเนื่อง

ระบบ Electro-Chemical and Electro Flotation, ECF ที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมสามารถที่จะกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และในการเกิดปฏิกิริยาจะมีตะกอนเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ ตะกอนลอยที่ถูกก๊าซไฮโดรเจนพาขึ้นด้านบนของถังปฏิกิริยาซึ่งสามารถแยกออกได้จากรางรับตะกอนด้านบน ส่วนตะกอนหนักจะไหลลงด้านล่างของถังปฏิกิริยา โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดด้านบนของถังปฏิกิริยามีความเข้มข้นเหลืออยู่ระหว่าง <0.001-235 มก/ล. ส่วนด้านล่างมีความเข้มข้นเหลืออยู่ <0.001-0.656 มก./ล. สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมโดยพิจารณาจากเกณฑ์การกำจัดที่ผ่านมาตรฐาน ที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 ซม (722 ตร.ซม) และที่อัตราการไหลที่ 63.33 มล/นาที่ ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 80.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียมที่กำจัดได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลองมีบางปัจจัยที่การทดลองไม่ได้ควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซ ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาวิจัยถึงอุณหภูมิต่อระบบ ECF
2. ระบบ ECF ที่ทดลองเป็นแบบ โมโนโพลาร์ แบบต่อขนาน การปรับกระแสไฟฟ้าจะใช้การปรับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อระบบ ECF
3. ระบบ ECF ที่ทดลองน้ำเสียจะไหลเข้าระบบด้านข้างของถังปฏิกิริยา พบว่าระหว่างจุดเก็บน้ำด้านบนของถังปฏิกิริยาจะมีค่า pH สูง และประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าจุดเก็บน้ำด้านล่าง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาระบบ ECF ที่เป็นแบบน้ำเสียไหลขึ้นด้านบน UP Flow

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษและศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2547. เทคโนโลยีการตรวจประเมินและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนมลพิษ. โครงการพัฒนาเทคโนโลยีฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนมลพิษ สัมมนาเชิงปฏิบัติการ ช่วงที่ 1 เทคโนโลยีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี. กรุงเทพฯ. 144 น.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2539. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2532. หลักการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าทั่วไป. อุตสาหกรรมสาร. 3 (2): 3 – 8

กรรณิการ์ สิริสิงห์, สุรพล ผดุงชีวิตและกฤษณ์ เทียรประสิทธิ์. 2527. คุณสมบัติน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียม. รายงานฉบับสมบูรณ์ สภาวะและวิธีที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ. คณะสาธารณสุข มหาวิทยาลัยมหิดล : 1 – 4

กฤษณา ชูติมา. 2523. หลักเคมีทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์พิมพ์เนศ. กรุงเทพฯ. 914 น.

กัณหา ศุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. ภาควิชาเทคนิค. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.).

2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 2). เรือนแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ. 379 น.

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2525. การศึกษามาตรการควบคุม
ภาวะมลพิษและผลกระทบที่อาจเกิดจากการพัฒนาอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและเหล็ก เล่มที่ 3
อุตสาหกรรมเหล็ก. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ. 100 น.

ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2545. เคมีสำหรับวิศวกร. สำนักพิมพ์ ว. เพ็ชรสกุล, กรุงเทพฯ 336 น.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2525. สารานุกรมธาตุ, พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทโอ เอส ปรีนติ้งเฮ้าส์. กรุงเทพฯ. 689 น.

ทบวงมหาวิทยาลัย. 2528. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมีตาม
โครงการปรับปรุงหลักสูตรทางวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย. เคมีเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ อักษรเจริญทัศน์.

ณรงค์ วุฑฒเสถียร. 2540. การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมส่งเสริม
เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพฯ. 487 น.

เพิ่มพงษ์ พุ่มวิเศษ. 2541. การกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยวิธีการ
ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ

พุทธิสาร ชัยพันธุ์. 2538. การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ
ไอออน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม), จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

มาลินี ลิ้มโสภา. 2523. พิษวิทยาและการวินิจฉัยโรค, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล.

- ปริเมธ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยมหานคร
- บุปผา อุ่นแสงจันทร์. 2545. การกำจัดนิเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้คอลัมน์ที่
บรรจุเศษเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้อุณหภูมิรวมตะกอน
ด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
กรุงเทพฯ
- สาโรจ พันธุ์แพ และ อภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. ห้างหุ้นส่วนจำกัด
นิโบทการพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- สุรพล ผดุงชีวิต. 2524. การกำจัดโครเมียมในน้ำทิ้งจากการชุบโลหะโดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต
และปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานามัยสิ่งแวดล้อม,
บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2545. แผนแม่บทรายงานสาขารองเท้าและเครื่องหนัง
www.oie.go.th/Policy7/mplan/leather/les2.pdf
- แสวง เกิดประทุม และคณะ. 2546. รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์) การพัฒนาระบบการจัดการ
น้ำเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมเพื่อนำน้ำกลับแบบวนประกอบโครเมียมกลับมา
ใช้ใหม่. โครงการวิจัยการพัฒนาระบบการจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักเพื่อ
การนำกลับมาใช้ใหม่. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
กรุงเทพฯ

อุตสาหะ ตันอุ่สิน. 2521. การบำบัดกรดโครมิกจากน้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการชุบโครเมียมกลับมาใช้
 อีกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาสุขาภิบาล, มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ

Acar. Y.B., and A.N., Alshawabkeh, 1993. **Principles of Electro kinetic Remediation
 Environmental Science & Technology, Vol.**

Alleman. James E. and Kavanagh Joseph T. 1982. **Metal recovery from electroplating
 wastewater, Industrial Waste Proceeding of the Forteenth Mid-Atlentic Conference**

Akatsuka and Fairhall. 1934. Adsorption of Biochemically Resistant Material from Plating
 wastes. J. **Industrail Hygiene.** 16(1): 31-32

American Society of Civil Engineering. 1969. **Waste Treatment plant Design. American
 works association and Conference of state Sanitary Engineering.** , American Water
 Work Association

APHA, AWWA, WPCF. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and
 Wastewater.** 18th ed. Washington D. C.: American Public Health Association

Barceloux D.G.1999. **Chromium.** Clin Toxicol. 37(2): 173-194

Bloomfield, J.J.and Blum W. 1928. **Health hazards in chromium plating Public health Rep.**
 43: 2330-2347

Bookis, J.D.M., and Reddy, A. K.N. 1970. **Modern Electrochemistry.** Vol.1, Plenum Press,
 New York, 1970.

Cary F.E., Allway, W.H., Olson O.E.1977. **Control of chromium concentrations in food plant. I. Absorption and translocations of chromium by plants.** J.agric.Food Chem.25: 300-304

Chatdanai, J.1998, **Enhanced Electro kinetic Remediation of Soils Contaminated by Low Polarity Organic Compounds.** Ph.D.Dissertation in Environmental Engineering in the Graduate Collage of the Illinois Institute of Technology .

David M.Ayres, Allen P.Davis and Paul M.Gietka. 1994. **Removing Heavy Metals from Wastewater.** Engineering Research Center Report.

Dennis R.Jenke and Frank E.Diebold. 1984. **Electro precipitation treatment of acid mine wastewater.** Water Research (7): 855-859

Eckenfelder J.r., Wesley W. 1978. **Industrial Water Pollution control**, 2nd ed., McGraw – Hill

The Eric H. 1973. **Treatment of Electroplating Waste by Ion Exchange.** Wang Civil Engineering Research Faccility, University of New Mexico. Nation Technical Information Service.,USA.

“Electrokinetics”, August1999. URL:<http://www.cpeo.org/teachtree/ttdescript/electro.htm>

Frederick A. 1978. **Lowenheim. Electroplating. Mc Graw Hill Book.** New york

Hunter D. 1969. **The Diseases of Occupations.** 4th edn., Little Brown and Company, Boston, England

Kimbrough, D.E., Y.cohen, A.M.Winer, L.Creelman and C.Mabuni. 1999. **A critical assessment of Chromium in the environment.** Critical review in Environmental Science and Technology. 29(1): 1 – 46

Kongsricharoern, N. 1994 . **Application of Electro-Chemical Precipitation for Treatment of Cr Wastewater.** Doctoral Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok

—— and Polprasert. 1996. **Chromium Removal by a Bipolar Electro-Chemical Precipitation Process, Water Science and Technology, Vol. 34, No. 9, pp. 109-116.**

Lancy L. 1971. **Pollution Control in Plating operator.** Industrial Pollution Control handbook. Edited by Lund: Mc Graw Hill Book.

Lee, S.K. 1975. **Electrolytic contamination remove aqueous media.** U.S.Pat . December 16

Liaw Jeen Gang. 1995. **Treatment of Chromium wastewater with regionally available reagents.** Master of Engineering Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok

Mcdonald H. 1982. **Electrochemical processes for wastewater treatment.** Water Science Technology. 14: 331 – 344

Merian E. 1984. **Introduction on Environmental chemistry and global cycle of arsenic, cadmium, chromium, cobalt, nickel, selenium and their derivatives.** Toxicol. Env. Chem. (8) :9 – 38

Moore, A.D. 1973. **Electrostatic and Its Application** :, John Wiley & sons, Inc.

Nawa Rai Khatiwada . 1995. **Improvement of biological Sludge Quality by Electro-chemical Precipitation (ECP).** Master of Engineering Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok

Nemmerw N.L. 1971. **Industrial Water pollution.** California: Addison – Wesley

Oloman M. 1985. **Tutorial lectures in electroplating Engineering.** And Tech-II. AIChE. Symposium series 79: 67-77

Pertorius W., Johannes W. and Lempert G. 1991. **Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement.** Water SA. 17 (Apr): 133 –13/

Polprasert C. et.al. 1979. **Heavy Metals, DDT and PCGs in the Upper Gulf of Thailand, Phase I.** Asian Institute of Technology, Bangkok

UNEP. 1983. **Design Manual pollution Control Facilities for Small Electroplating Plant.** UNEP-ASEAN Environment Programmed Series. ROAP/ASEAN/83/1, April

Robert K.R. and Marzluf G.A.. 1971. **The specific interaction of chromium with due Sulfate permease system of Neurospora crassa .** Arch.Biochem.Biophys., 142: 651 – 659

Ross D.S., Sjogren R.E. and Bartlett R.J.. 1981. **Behaviors of chromium in soil. Toxicity to microorganism.** J.enviro.Qual., 10: 145 – 148

World Health Organization(WHO). 1988. **Environmental Health Criteria 61 CHROMIUM.** The International Programme on Chemical Safety (IPCS). Geneva

Vance, D.B. 1999. **Metal and Groundwater Part III: Remediation of Metals Contaminated Groundwater with Electrochemical Processes,** August 1999.

URL:<http://www.flush.net/~nm2the4/metal/2ele.htm>

Verfaillie G.R.M. 1974. **Kinetics of chromium absorption by intact rice plants.** In: Comparative studies of food and environmental contamination, Vienna, International Atomic Energy: 315 – 331

Vik et.al. 1984. **Electrocoagulation of Portable Water.** Water Research. 18 :1355-1399

Visvanathan C. 1993. **Application of clean technology in small scale electroplating plant – A case study in Seminar, Pollution Management Strategies for the Electroplating Industry.** Bangkok, June 1-2

Wanwarang Ritdhiwanna. 2002. **Removal of Chromium and Mercury from COD Analysis Wastewater by Electrochemical Precipitation, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University, Thailand**

Yousef M.and Robert Schennach. 2000. **Electrocoagulation (EC) – science and applications.** J. of Hazardous Materials. B84 2001: 29-41.

Zuranski, D. 1994. **Electrochemical supplementation to ion exchange for groundwater treatment.** Water Business Magazine. 5: 23-27

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลองระบบ ECF