



ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์ รวมไปถึงภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k Factorial design) ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความดันของแก๊สไฮโดรเจน ความดันของแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์และภาวะที่ใช้ในการทดลองทำให้ไม่สามารถหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้ จึงได้ทำการทดลองในส่วนที่สองขึ้น โดยส่วนที่สองตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อัตราการไหลของออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ความดันของระบบและศึกษาผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง และการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน

4.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) [9]

การทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่นความดัน อัตราการไหลของแก๊ส ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษหาภาวะเหมาะสมต่อการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์ของบริษัท Electrochem, Inc ขนาด 50 วัตต์ พื้นที่ทำปฏิกิริยา 50 ตารางเซนติเมตรต่อเซลล์ โดยทำการออกแบบการทดลองและเลือกตัวแปรที่จะนำมาศึกษาประกอบด้วย ความดันของแก๊สไฮโดรเจน ความดันของแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ทำการทดลองเป็นแบบ 2^4 แฟกทอเรียลเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k Factorial design)

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลเป็นการศึกษาผลของตัวแปรหลายตัวที่มีต่อค่าการตอบสนองของปัจจัยที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้ค่าตอบสนองคือค่ากระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปรได้แก่ ความดันของแก๊สไฮโดรเจน ความดันของแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน จะได้การออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^4 แฟกทอเรียล โดยกำหนดให้

A คือความดันของแก๊สไฮโดรเจนค่าต่ำสุดที่ 20 psig (-) และค่าสูงสุดที่ 50 psig (+)

B คือความดันของแก๊สออกซิเจนค่าต่ำสุดที่ 20 psig (-) และค่าสูงสุดที่ 50 psig (+)

C คืออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนค่าต่ำสุดที่ 500 sccm (-) และค่าสูงสุดที่ 1000 sccm (+)

D คืออัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนค่าต่ำสุดที่ 500 sccm (-) และค่าสูงสุดที่ 1000 sccm (+)

จากการออกแบบการทดลองจะต้องทำทั้งหมด 16 การทดลองและทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) ของตัวแปรคือที่ A = 35 psig, B = 35 psig, C = 750 sccm, D = 750 sccm จำนวน 3 ครั้งเพื่อเป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูล จะได้ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.1 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาผลกระทบและความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อรูปแบบของสมการถดถอย

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 5.0 โวลต์ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มที่ภาวะต่าง ๆ

ลำดับที่	การทดลอง	ตัวแปร				ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	
		A	B	C	D	Replicate 1	Replicate 2
1	(1)	-	-	-	-	2.85	2.92
2	a	+	-	-	-	4.09	4.22
3	b	-	+	-	-	5.79	5.81
4	ab	+	+	-	-	5.12	5.02
5	c	-	-	+	-	2.92	2.89
6	ac	+	-	+	-	3.69	3.58
7	bc	-	+	+	-	5.07	4.94
8	abc	+	+	+	-	4.43	4.68
9	d	-	-	-	+	3.83	3.93
10	ad	+	-	-	+	4.71	4.74
11	bd	-	+	-	+	4.39	4.22
12	abd	+	+	-	+	3.32	3.59
13	cd	-	-	+	+	2.32	2.43
14	acd	+	-	+	+	4.06	4.10
15	bcd	-	+	+	+	5.49	5.69
16	abcd	+	+	+	+	5.52	5.44
17	center	0	0	0	0	3.89	3.79
18	center	0	0	0	0	3.99	3.84
19	center	0	0	0	0	3.96	3.81

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรโดยพิจารณาจากค่า F_0 เป็นหลัก ถ้าค่า F_0 ของตัวแปรใดมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต F_{α, v_1, v_2} (เมื่อ α คือระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณา v_1 คือระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ของตัวแปร และ v_2 คือระดับความเสรีของความคลาดเคลื่อน) หมายความว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสมมติฐานที่กำหนดไว้ใน การทดลองหรืออีกนัยหนึ่งคือมีผลกระทบต่อทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ในการทดลองนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่าวิกฤต ($F_{0.05, 1, 28}$) เท่ากับ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.2

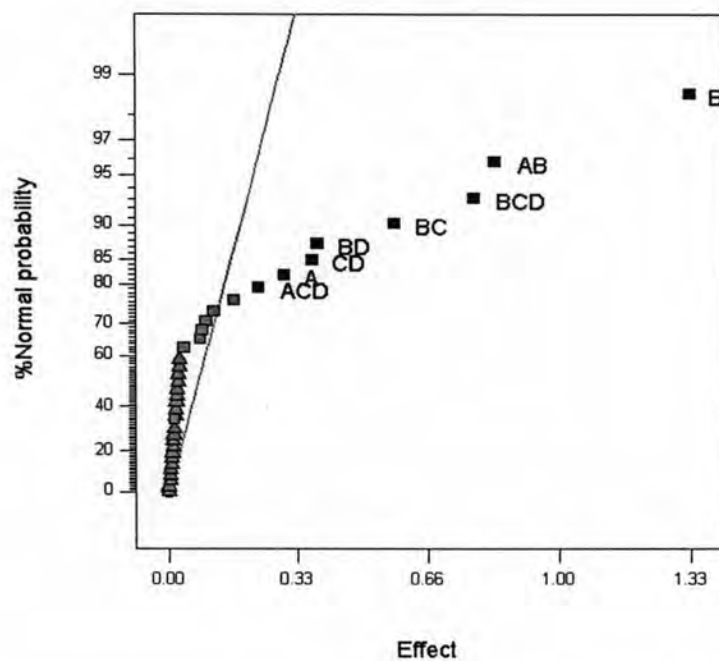
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA)

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	0.73	1	0.73	28.22
B	14.10	1	14.10	547.96
AB	5.59	1	5.59	217.45
BC	2.70	1	2.70	105.05
BD	1.19	1	1.19	46.09
CD	1.10	1	1.10	42.86
ACD	0.43	1	0.43	16.81
BCD	4.91	1	4.91	191.00
Pure quadratic	0.67	1	0.67	25.98
Error	0.72	28	0.026	
Total	32.15	37		

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า F_0 ของตัวแปร A, B, AB, BC, BD, CD, ACD และ BCD มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต และ F_0 ของ Pure quadratic ก็มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตแสดงว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลกระทบต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถกล่าวได้ว่าความดันของแก๊สไฮโดรเจน (A) ความดันของแก๊สออกซิเจน (B) สหสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน (AB) สหสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (BC) สหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของ

แก๊สออกซิเจน (BD) สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน (CD) สหสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน (ACD) สหสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สออกซิเจน อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน (BCD) มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regressive model) ได้ดังสมการที่ 4.1

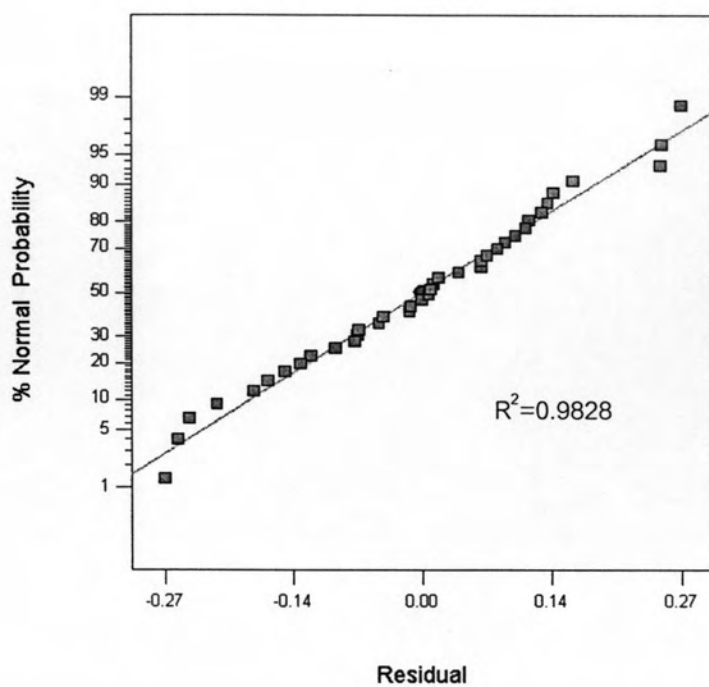
$$I = 4.24 + 0.15A + 0.66B - 0.42AB + 0.29BC - 0.19BD + 0.19CD + 0.12ACD + 0.39BCD \quad (4.1)$$



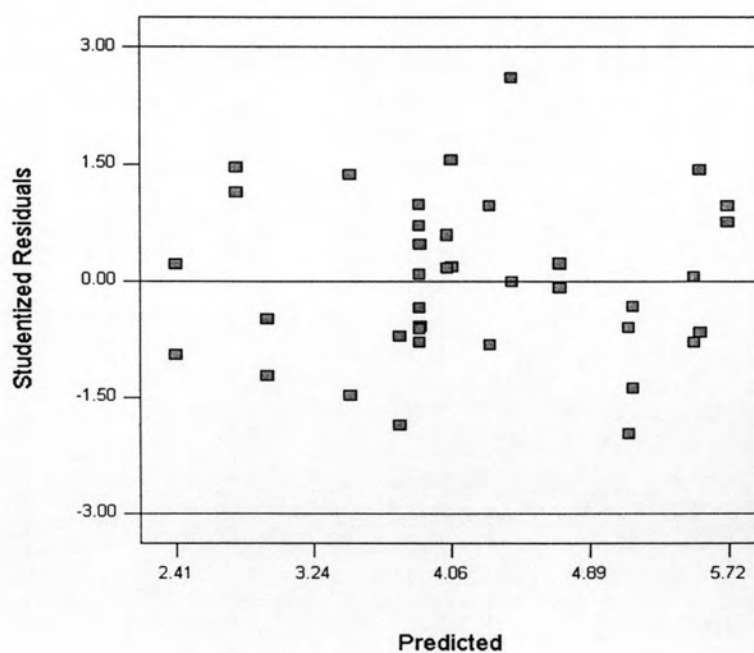
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้า (Half normal probability plot)

นำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.2 แสดงกราฟ Normal probability plot ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.1 จะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.9828$ ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 กล่าวคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายแสดงในรูปที่ 4.3 จะพบว่ามี การกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม





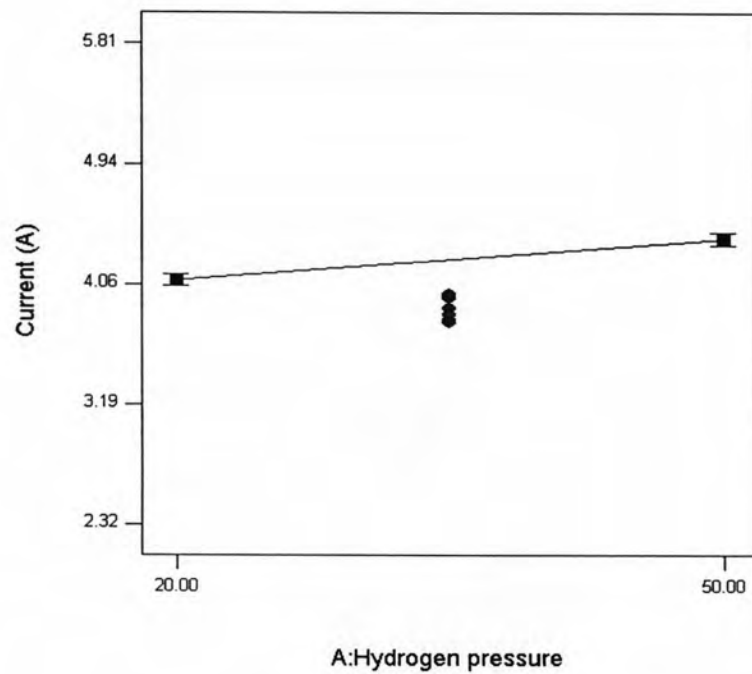
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของค่ากระแสไฟฟ้า



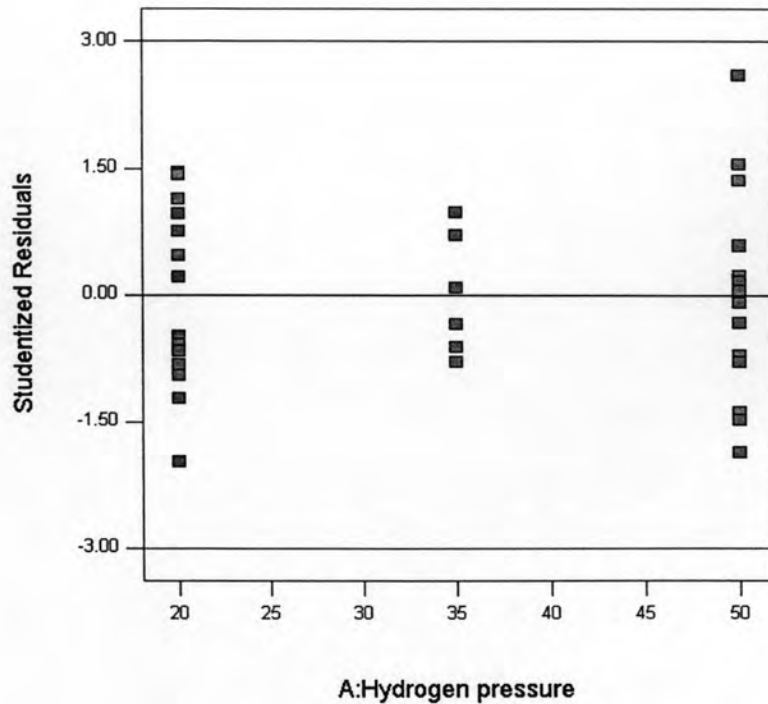
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย

4.1.1 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

ผลกระทบของความดันแก๊สไฮโดรเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยลดปัญหาการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นได้ แต่เมื่อพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนกับความดันแก๊สไฮโดรเจนจากรูปที่ 4.5 พบว่าความแปรปรวนของความดันแก๊สไฮโดรเจนมีค่าคงที่ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สไฮโดรเจนไม่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก



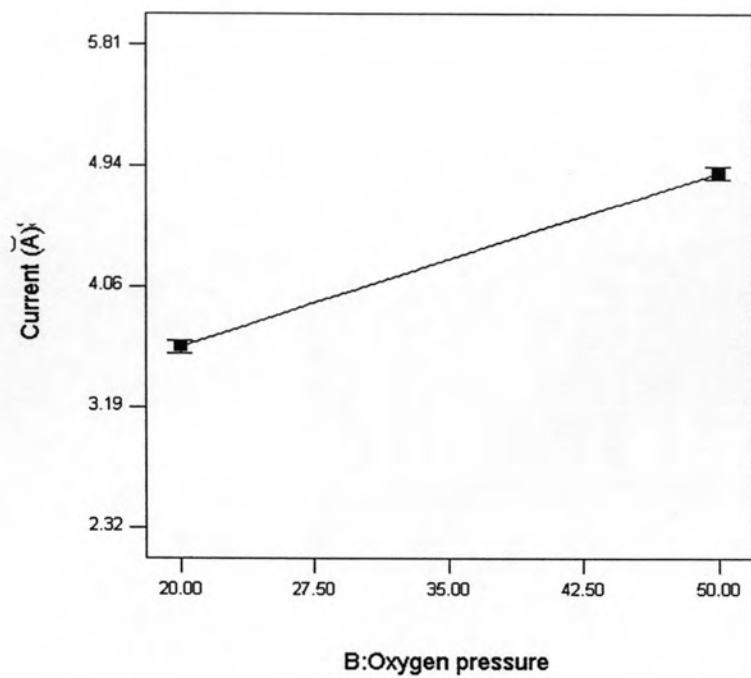
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความดันแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า



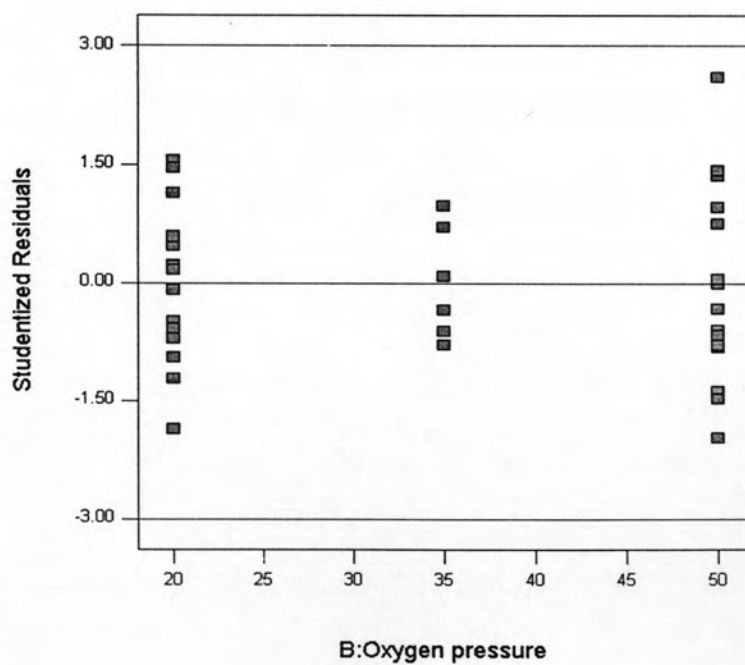
รูปที่ 4.5 ผลของความคลาดเคลื่อนกับความดันแก๊สไฮโดรเจน

4.1.2 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้าพบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สออกซิเจนให้สูงขึ้นทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากการใช้ความดันสูง จะทำให้แก๊สออกซิเจนแพร่เข้าสู่ชั้นการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนมากขึ้นจึงช่วยลดค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ (Activation over voltage) ที่ขั้วแคโทด ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและยังส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงขึ้นด้วยและจากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความแปรปรวนของความดันแก๊สออกซิเจนมีค่าไม่คงที่ โดยที่ความดันสูงจะให้ค่าความแปรปรวนน้อยกว่าที่ความดันต่ำ ดังนั้นในการทดลองจึงควรทำที่ความดันแก๊สออกซิเจนสูง



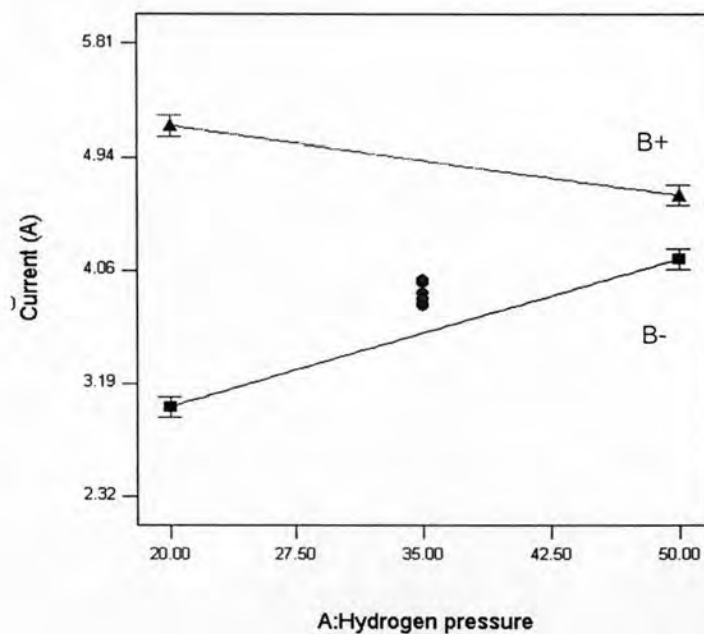
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 ผลของความคลาดเคลื่อนกับความดันแก๊สออกซิเจน

4.1.3 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

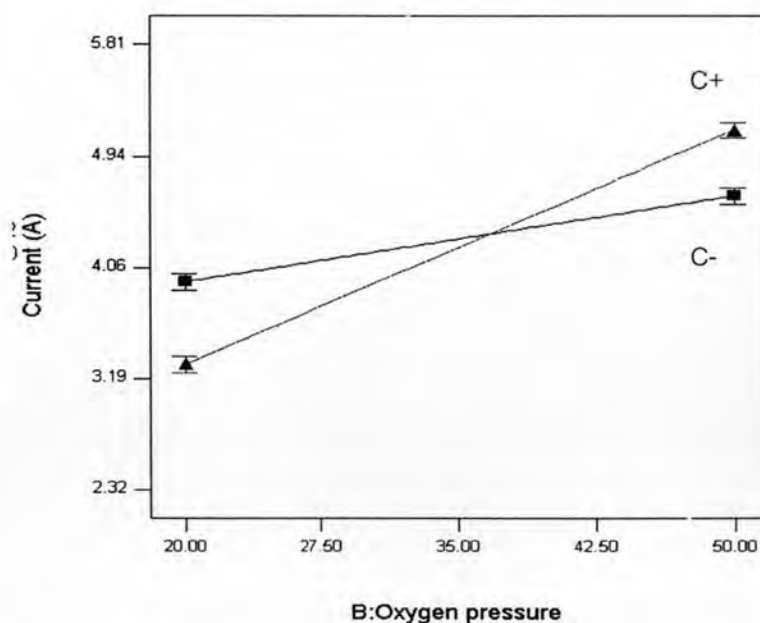
รูปที่ 4.8 แสดงถึงผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้ความดันแก๊สไฮโดรเจนต่ำ และให้ความดันแก๊สออกซิเจนสูง จะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด เนื่องจากแก๊สออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าแก๊สไฮโดรเจนจึงเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มความดันแก๊สออกซิเจนจึงเป็นเหมือนการเพิ่มปริมาณแก๊สให้เข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงได้มากขึ้น ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีก เป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นไปด้วย จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะความดันของแก๊สออกซิเจนต่ำ ค่ากระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะความดันของแก๊สออกซิเจนมีค่าสูง ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลง ปรากฏการณ์นี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดผลร่วมของปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์และปัจจัยทางจลนพลศาสตร์ที่มีต่อพื้นผิวเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า [14]



รูปที่ 4.8 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สไฮโดรเจนและความดันแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

4.1.4 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

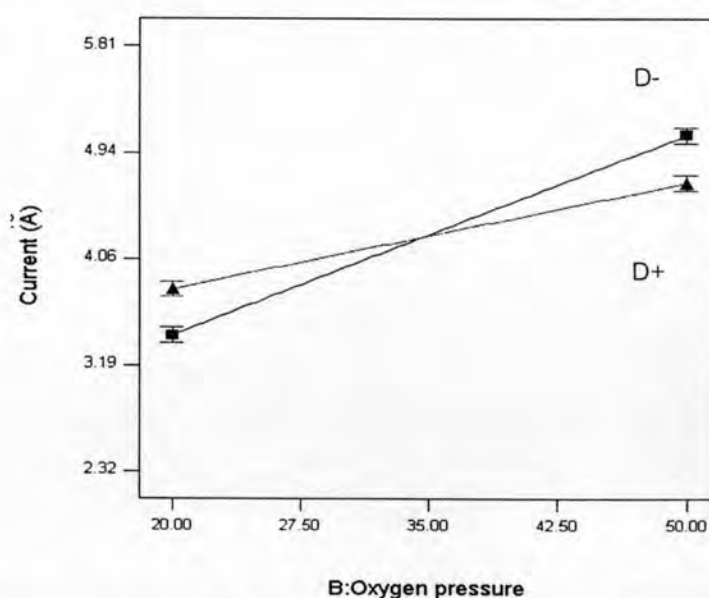
รูปที่ 4.9 แสดงผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สของไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าที่ความดันแก๊สออกซิเจนสูงจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูง โดยจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามกัน กล่าวคือ ณ ภาวะการทดลองที่ใช้ความดันแก๊สออกซิเจนสูง ไม่ว่าจะให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำหรือสูงก็ทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูงจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าการให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำ ณ ภาวะที่ได้กระแสไฟฟ้าสูง ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำจะเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นขึ้น การเพิ่มความดันให้กับแก๊สออกซิเจนจึงเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสให้แก๊สออกซิเจนได้เข้ามาเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น ที่ภาวะนี้ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น จะทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่ม ปฏิกิริยาจึงสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่ที่ความดันแก๊สออกซิเจนต่ำ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าลดลง อาจเนื่องมาจากที่ภาวะความดันแก๊สออกซิเจนต่ำนั้น มีปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจนอาจพ่นน้ำออกจากเซลล์มากเกินไปจนทำให้ความชื้นในเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนไม่เหมาะสมในการนำโปรตอน



รูปที่ 4.9 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

4.1.5 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

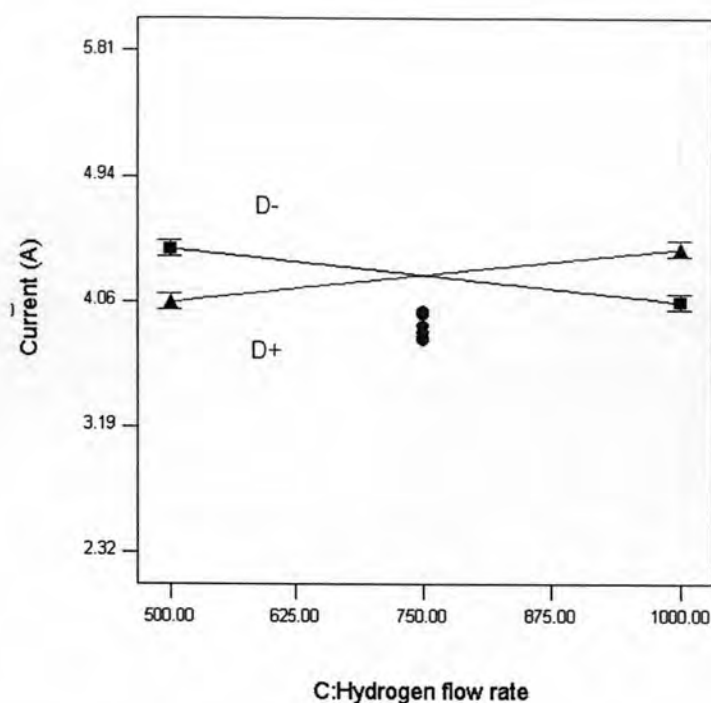
รูปที่ 4.10 แสดงผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าที่ความดันแก๊สออกซิเจนสูงและใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำจะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่าที่ความดันแก๊สออกซิเจนสูง ไม่ว่าจะให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำหรือสูงก็มีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเหมือนกัน แต่ในการทดลองควรเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูง เพราะกระแสไฟฟ้าที่ได้มีความแปรปรวนน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความดันแก๊สออกซิเจน เมื่อทำการดึงกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ที่ค่าสูง มักเกิดปัญหาด้านโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นของความเข้มข้นของแก๊สไดแก๊สหนึ่งที่ขั้วไฟฟ้าลดลงจนเป็นศูนย์ โดยส่วนมากมักเป็นความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแคโทดลดลง มีสาเหตุมาจากการที่แก๊สออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้ เนื่องจากน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยามาอุดตันรูพรุนที่ขั้วไฟฟ้าหรืออาจทำให้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนเกิดการบวมตัว สภาพการนำโปรตอนน้อยลงจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จึงลดลง การเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงและความดันของแก๊สออกซิเจนสูง จะช่วยให้แก๊สออกซิเจนมีโอกาสได้แพร่เข้ามาเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้นและช่วยให้แก๊สออกซิเจนได้สัมผัสกับพื้นผิวเกิดปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นในภาวะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากขึ้น



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างความดันแก๊สออกซิเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

4.1.6 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.11 แสดงผลกระทบของสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อความเข้มกระแสไฟฟ้า พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ำพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่ภาวะอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูง ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากทั้งสองภาวะนี้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยดูได้จากผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่บ่งบอกว่าอัตราการไหลของแก๊สทั้งสองชนิดไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับผลของความดัน แต่ในการทดลองควรเลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงเพราะค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน นอกจากนี้แล้ว การให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนสูงจะทำให้เกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มขึ้นได้ช้ากว่าการทดลองที่เลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนต่ำ เนื่องจากในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ความดันในช่วงที่กว้าง (20-50 psig) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจึงเป็นผลของความดัน เด่นชัดกว่าผลของอัตราการไหล (500-1000 sccm) ซึ่งถ้าหากต้องการจะศึกษาผลของอัตราการไหลให้ชัดเจนกว่านี้ควรเลือกใช้ความดันให้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Dante และคณะ [14] ที่ได้เลือกใช้ความดันในช่วงที่ใกล้เคียงกัน และใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนที่สูงมาก (ประมาณ 10,000 sccm) พบว่าการใช้อัตราการไหลและความดันของแก๊สไฮโดรเจนต่ำจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ออกมามีความเสถียร



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของสหรับพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่ากระแสไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรและการสร้างแบบจำลองถดถอยเพื่ออธิบายผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงแล้ว พบว่าไม่สามารถนำสมการที่ได้ไปทำการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองได้ (Response surface model) รวมไปถึงผลของ Pure quadratic ที่ระบุว่าความไม่เป็นเชิงเส้นมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการศึกษาต่อถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากขั้นตอนการก้าวอย่าง (Step) ของตัวแปรถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ไม่สามารถปรับค่าตามได้ (ภาคผนวก ข) และข้อจำกัดของตัวชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเองที่ไม่อาจทำการทดลองโดยให้ความดันภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันมากได้เกินกว่า 30 psig เพราะจะไปทำให้หน่วยประกอบหัวไฟฟ้าเมมเบรนขาดได้ ส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านถึงกันของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน และเกิดการเผาไหม้โดยตรงภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ไม่อาจหาภาวะที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ เป็นการทดลองขั้นต้นเพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าเท่านั้น จึงเปลี่ยนการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเป็นการทดลองแบบ Univariate คือการทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตัวหนึ่งโดยให้ตัวแปรที่เหลือมีค่าคงที่ โดยได้ใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่ที่มีลักษณะและส่วนประกอบเหมือนกับชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ตัวเก่ามาทำการทดลอง ตัวแปรที่นำมาศึกษาประกอบด้วย อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและความดันของระบบตามลำดับ

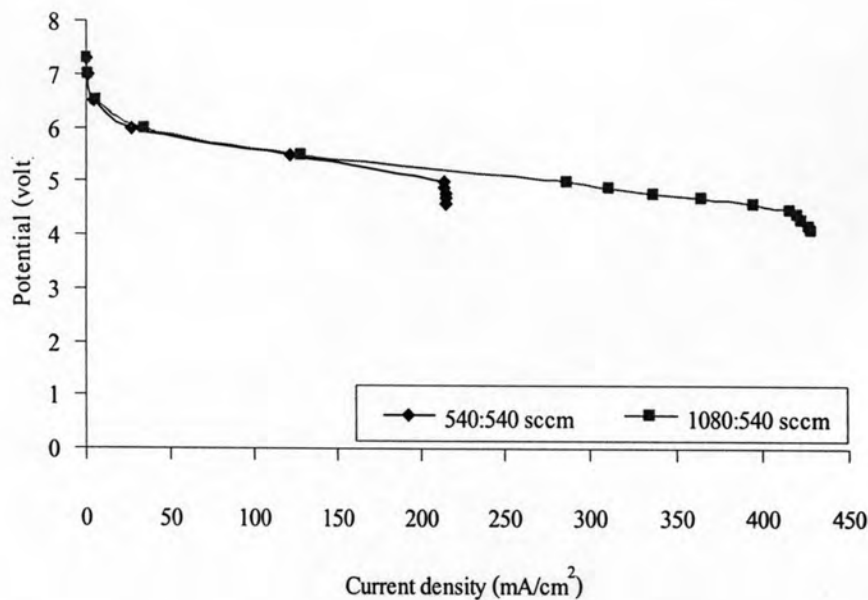
4.2 การหาภาวะที่เหมาะสมของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ (Univariate)

จากข้อมูลของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงพีอีเอ็มของบริษัท Electrochem, Inc ขนาด 50 วัตต์นี้จะมีข้อจำกัดการทำงานได้ที่ความดันระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับความดันแก๊สออกซิเจนแตกต่างกันไม่เกิน 30 psig ,ความดันของระบบไม่เกิน 60 psig อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียสและจะสามารถให้ค่ากำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ได้ที่ศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์ โดยให้ความดันของระบบเท่ากับ 50 psig

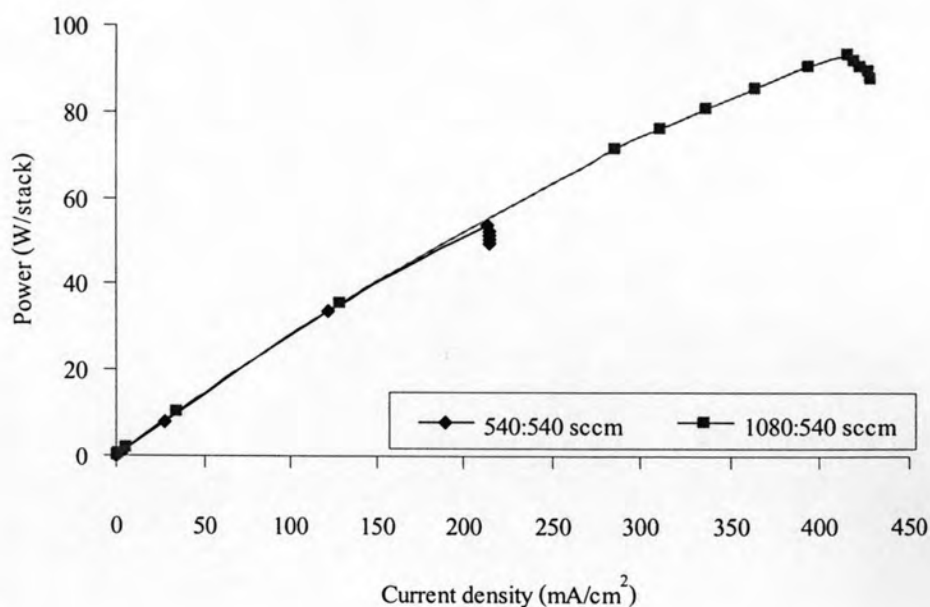
4.2.1 ผลของอัตราส่วนการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า

ผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 กำหนดให้การไหลของแก๊สออกซิเจนคงที่เท่ากับ 540 sccm พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดมากขึ้นจาก 220 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็น 440 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนโดยการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้มากขึ้น เนื่องจากมีแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปในปริมาณที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าโดยไม่เกินปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ใส่เข้าไป จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนคงที่เท่ากับ 810 sccm พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 (หรือ 810:810 sccm) เป็น 2:1 (หรือ 810:405 sccm) โดยการลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจำกัดที่ได้จะลดลงจาก 360 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็น 290 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การที่ค่ากระแสไฟฟ้าจำกัดลดลงเนื่องจากการปรับอัตราส่วนการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นโดยการลดปริมาณของแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดภาวะกระแสไฟฟ้าจำกัดเนื่องจากการขาดแก๊สออกซิเจนในระบบ ดังนั้นผลของอัตราส่วนการไหลของแก๊สจึงมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สด้วย ดังนั้นในการศึกษาการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สที่เหมาะสมเพราะจะ

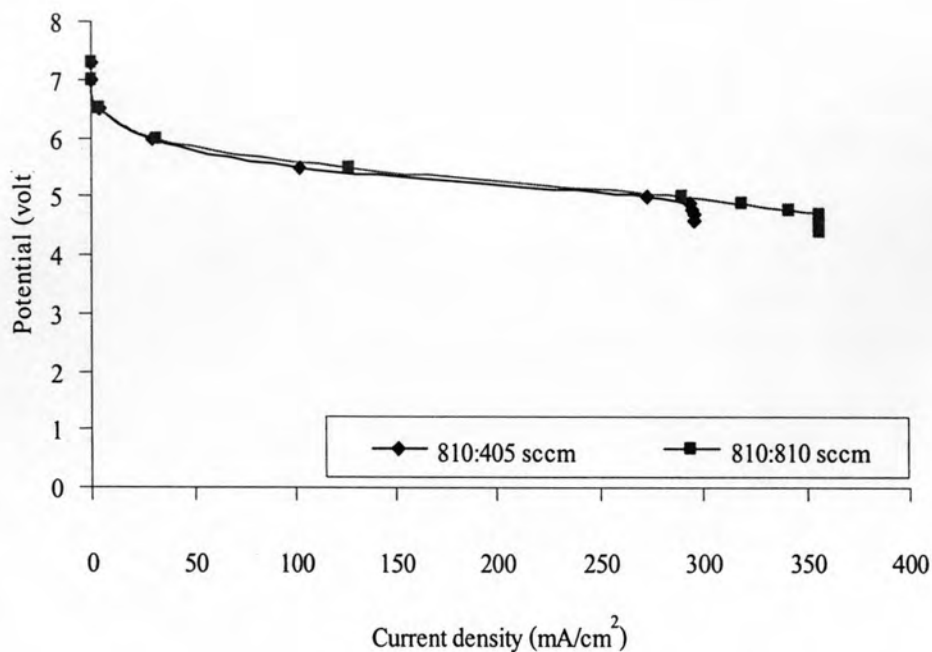
ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความชื้นในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงและช่วยไล่น้ำที่ค้างอยู่ในแผ่นช่องทางกรไหลและชั้นแก๊สแพร่ให้ระบายออกไปได้ ทำให้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



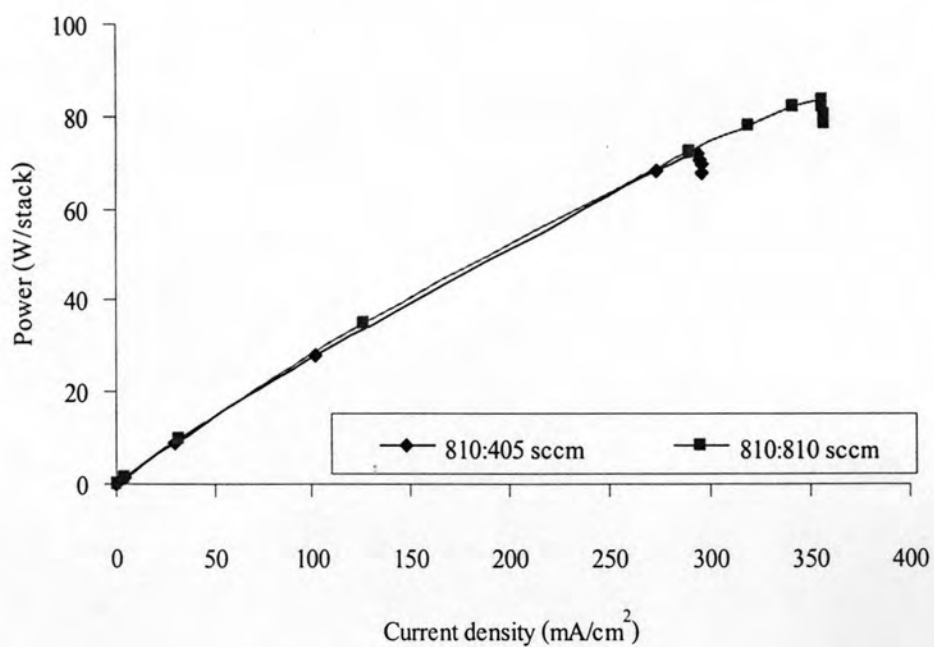
รูปที่ 4.12 โพลาริเซชันของผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig



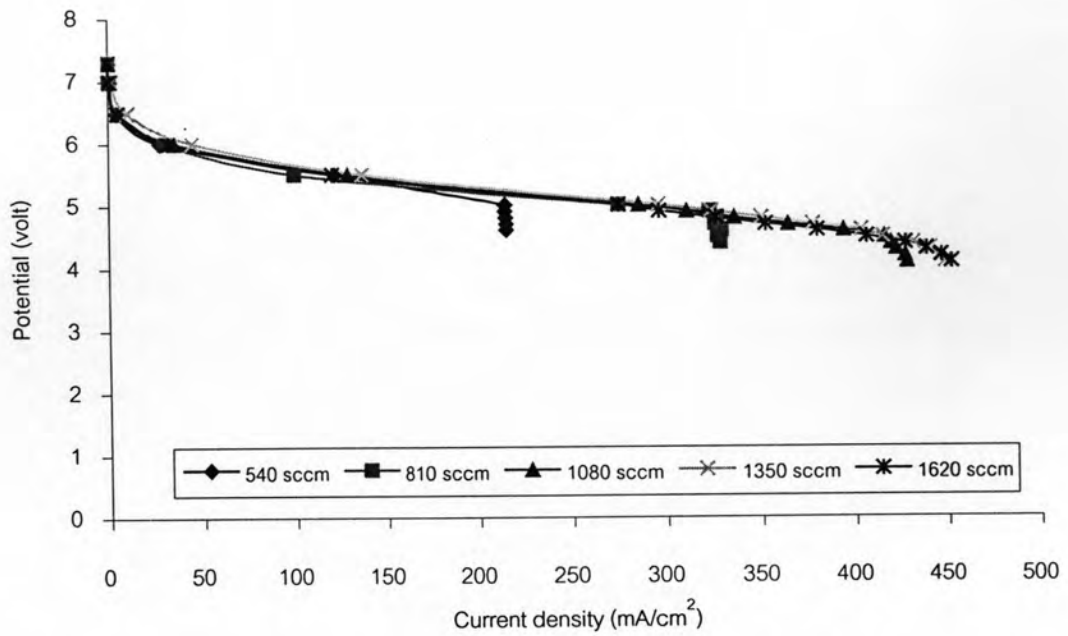
รูปที่ 4.14 โพลาริเซชันของผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของแก๊สออกซิเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig



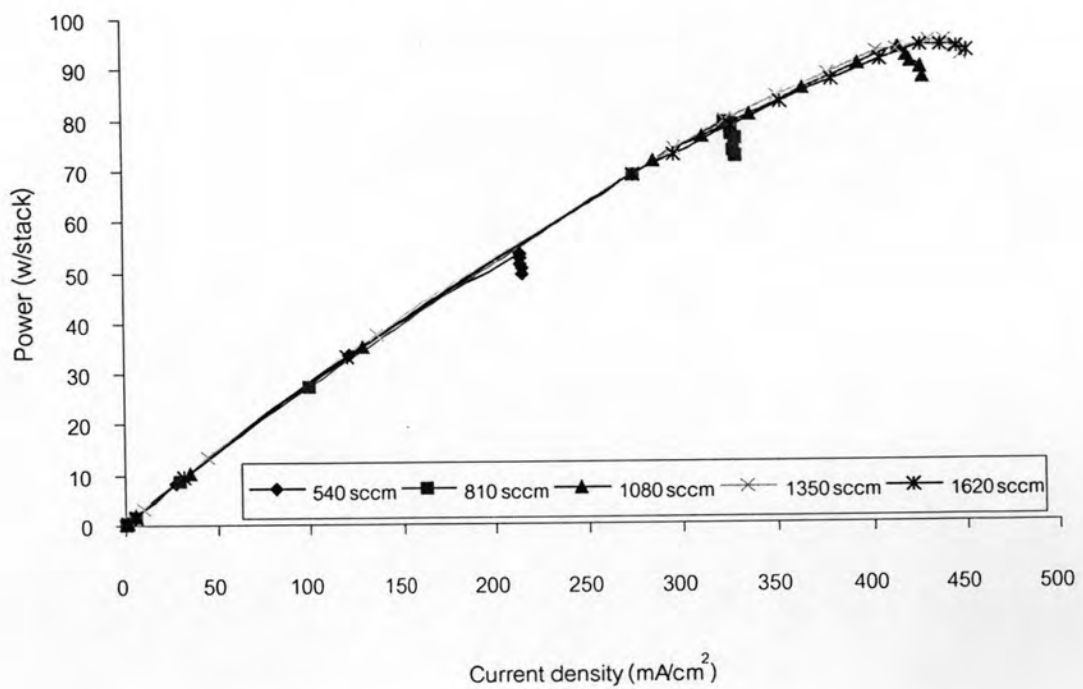
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงโดยเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตของแก๊สออกซิเจน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สออกซิเจนจาก 1:1 เป็น 2:1 ความดันในระบบ 50 psig

4.2.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า

เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนโดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนคงที่เท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig จากรูปที่ 4.16 – 4.17 จะเห็นว่ามีโพลาริเซชันทางเคมีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ดังนั้นในตอนเริ่มต้นของการดิงกระแสไฟฟ้า ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนจึงไม่ส่งผลต่อโพลาริเซชันทางเคมีอย่างเด่นชัด ด้านโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน บ่งบอกว่าภาวะภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในขณะนั้นไม่แตกต่างกันมากคือมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันทำให้ความต้านทานภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าไม่แตกต่างกัน พิจารณาในด้านโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น เมื่อป้อนแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงในอัตราที่น้อยคือที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 540 sccm และ 810 sccm จะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดด้วยปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่มีไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาต่อไปอีก แต่หลังจากทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเป็น 1080 sccm 1350 sccm และ 1620 sccm พบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นและจะเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นช้ากว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่ำ ที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 1350 sccm และ 1620 sccm มีค่ากระแสไฟฟ้าจำกัดใกล้เคียงกัน เป็นผลของแก๊สออกซิเจนที่เริ่มไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่การใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้ที่ภาวะการดิงกระแสไฟฟ้าสูง ๆ อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิน 80 องศาเซลเซียส อันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น การระบายความร้อนด้วยพัดลมเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอเพื่อลดอุณหภูมิ ซึ่งอาจเป็นเหตุให้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนแห้งได้ จึงได้หยุดการทดลองเมื่ออุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 80 – 85 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่น ๆ ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 810 sccm เพราะที่ภาวะนี้อุณหภูมิการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงไม่สูงจนเกินไป



รูปที่ 4.16 โพลลาไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนคงที่ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig

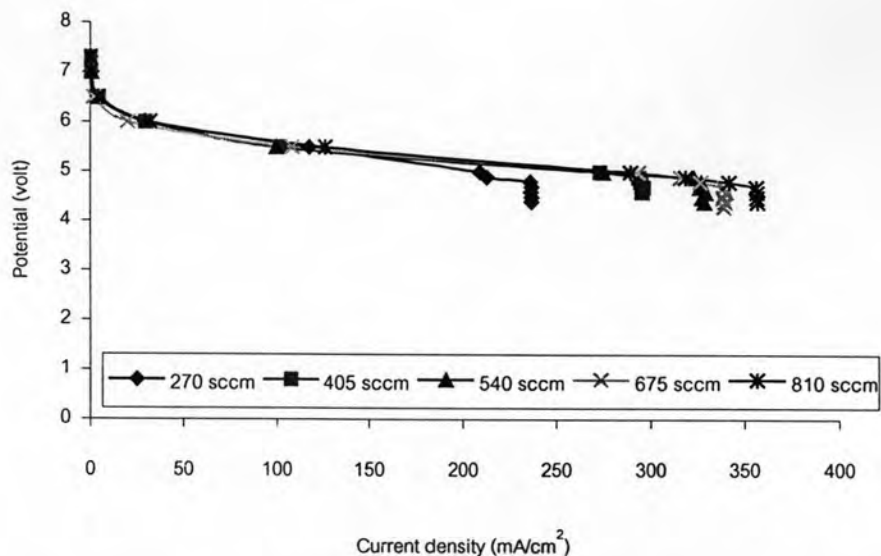


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนต่าง ๆ และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig

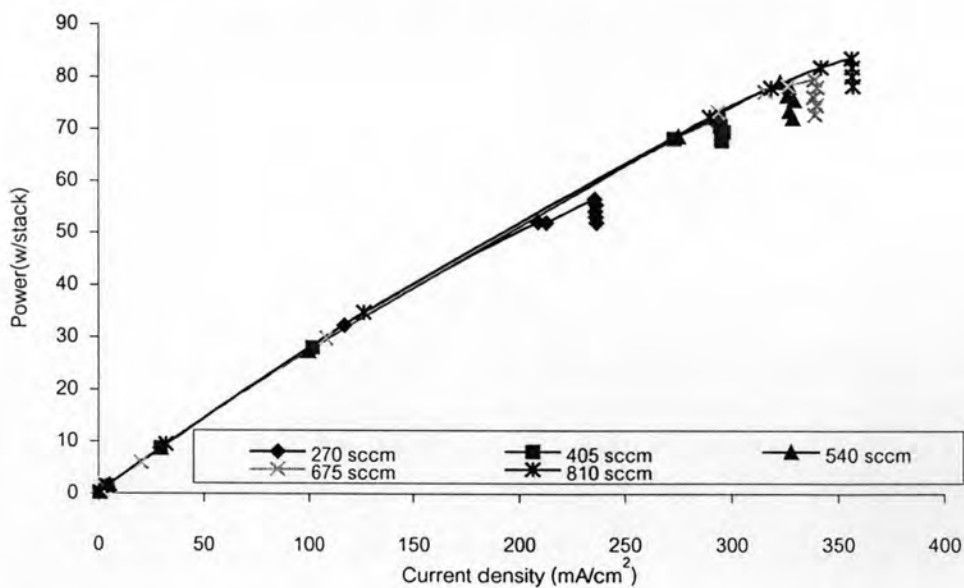
4.2.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า

จากการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนโดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 810 sccm ความดันในระบบเท่ากับ 50 psig ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.19 พบว่าโพลาริเซชันทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในช่วงที่ใช้ไม่มีผลต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปยังขั้วไฟฟ้าได้ตามปกติอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดได้เท่าเดิม ในส่วนของโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานก็มีค่าใกล้เคียงกันเป็นผลมาจากเมื่อปฏิกิริยาดำเนินมาได้ระยะหนึ่ง ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีเพียงพอสำหรับการเคลื่อนที่ของโปรตอนให้ผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนไปได้ ยกเว้นกรณีลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนลงมาที่ 270 sccm จะมีโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากกว่าที่อัตราการไหลอื่น ๆ ของแก๊สออกซิเจน เป็นผลมาจากการที่ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้าไปน้อยและถูกใช้เรื่อย ๆ ในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เหลือแก๊สออกซิเจนน้อยจนไม่เพียงพอต่อการนำน้ำออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิง จึงมีน้ำสะสมอยู่ในชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตั้งแต่ช่วงค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ เมื่อทำการทดลองมาถึงภาวะที่ได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูง เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอนเกิดการบวมตัว สภาพการนำโปรตอนจึงลดลง [1] เป็นเหตุให้เห็นผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานมากกว่าที่อัตราการไหลอื่น ๆ ของแก๊สออกซิเจน ในด้านการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น ที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 270 sccm และ 405 sccm เมื่อปฏิกิริยาดำเนินมาถึงภาวะที่ได้กระแสไฟฟ้าสูง แก๊สออกซิเจนมีเข้าไปไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยดูได้จากความดันของวาล์วควบคุมความดันกลับฝั่งแก๊สออกซิเจนลดลง จึงเกิดเป็นโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอ และเมื่อทำการทดลองเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ 540 sccm 675 sccm และ 810 sccm จะพบว่าโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นที่เกิดขึ้นเป็นของแก๊สไฮโดรเจนไม่เพียงพอ โดยดูจากความดันฝั่งไฮโดรเจนที่ลดลง การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่จะเข้าทำปฏิกิริยามากขึ้นและสามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังบริเวณขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้น ณ ภาวะที่ได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูง ๆ จึงไม่เกิดการขาดแคลนออกซิเจนที่ผิวขั้วไฟฟ้า ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ก็จะมีตามไปด้วย น้ำที่เกิดอาจไปอุดตันอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า แก๊สไม่สามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้ กระแสไฟฟ้าจึงตกลงอย่างรวดเร็วและการให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูง จะทำให้อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงสูงตามไปด้วยเช่นกันส่งผลให้เมมเบรนมีความชื้นไม่เพียงพอ โดยยืนยันผลการทดลองได้จากการดูมวลของน้ำภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (ภาคผนวก จ) จะพบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงมีการสูญเสียน้ำออกจากระบบ จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm เพราะที่ภาวะนี้อุณหภูมิการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ไม่สูงจนเกินไปและความแตกต่างของความดันของแก๊สทั้งสองฝั่ง ซึ่งที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูง เมื่อเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน ความดันฝั่งไฮโดรเจนจะลดลงอย่างรวดเร็ว การที่ปล่อยความดันของแก๊สทั้งสองชนิดไม่เท่ากันเป็นเวลานานจะทำให้หน่วยประกอบตัวไฟฟ้าเมมเบรนชำรุดได้



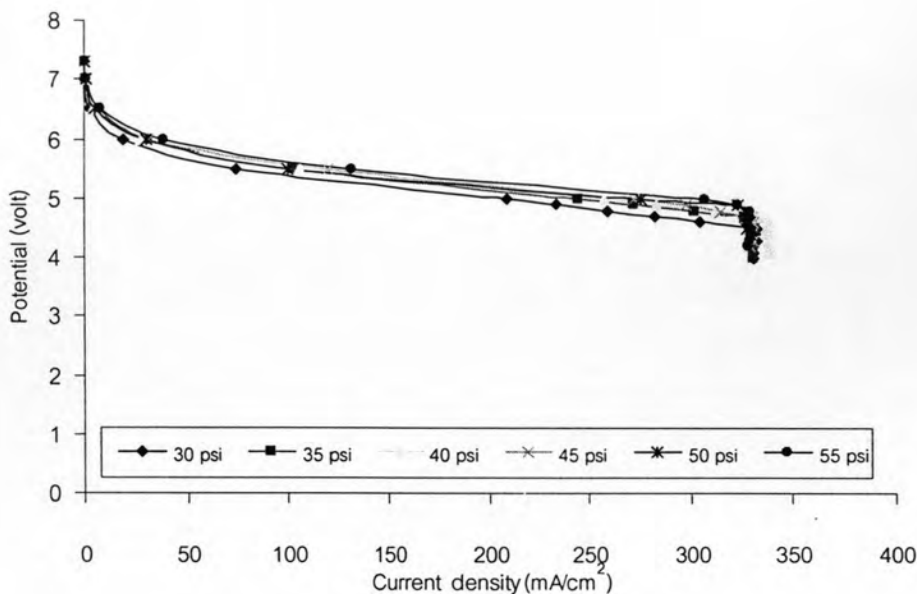
รูปที่ 4.18 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 810 sccm ความดันในระบบ 50 psig



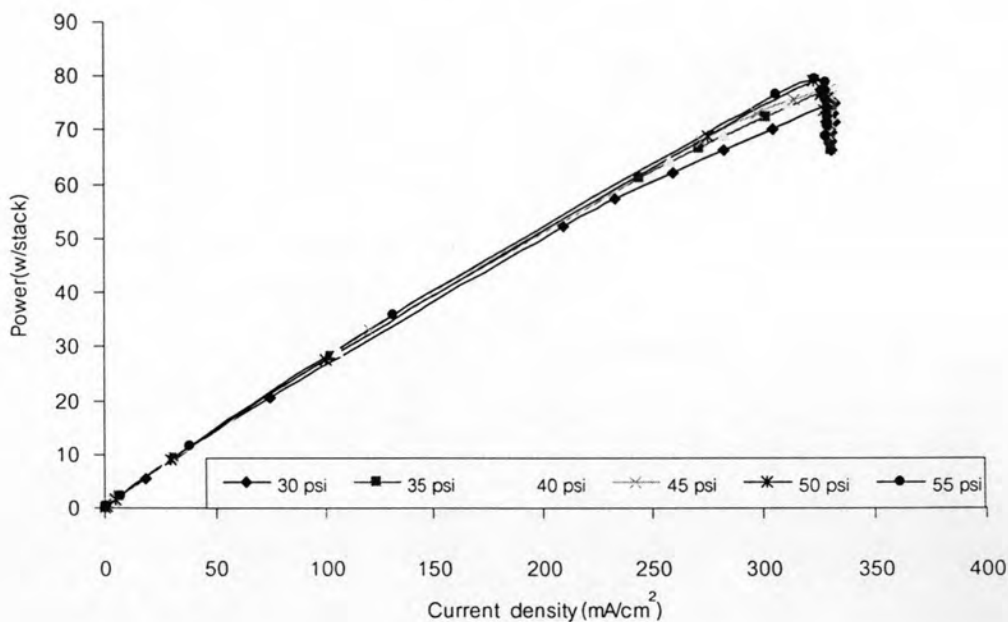
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm ความดันในระบบ 50 psig

4.2.4 ผลของความดันที่มีต่อค่ากระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนความดันของระบบ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ดังแสดงในรูปที่ 4.20 - 4.21 พบว่าโพลาริเซชันทางเคมีมีมากเมื่อใช้ความดันเท่ากับ 30 psig อาจเนื่องมาจากการให้ความดันน้อยแก่ระบบ ทำให้แก๊สมีการกระจายตัวได้ไม่ดีพอในการที่จะเข้าไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยา และจะมีค่าโพลาริเซชันทางเคมีลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มความดันของระบบให้สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wahdame และคณะ [17] นอกจากนี้การเพิ่มความดันยังส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย เนื่องจากจะไปลดค่าศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินในการก่อกัมมันต์ ด้านผลของโพลาริเซชันเนื่องจากความดันมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากภาวะที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการเกิดโพลาริเซชันเนื่องจากความเข้มข้น พบว่าการเพิ่มความดันให้แก่ระบบส่งผลน้อยมากต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ณ ภาวะของการทดลองที่ใช้ โดยจะเห็นได้จากกราฟว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องมาจากเมื่อปฏิกิริยาดำเนินมาถึงจุดที่มีน้ำสะสมอยู่ในชั้นเซลล์มากจนเกินพอแล้ว การเกิดปฏิกิริยาภายในชั้นเซลล์จึงถูกจำกัดอยู่ด้วยปริมาณของแก๊สที่จะแพร่ผ่านเข้าไปได้ เมื่อเพิ่มความดันจึงไม่ส่งผลให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าและการใช้ความดันสูงก็จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน เช่นที่ความดันเท่ากับ 55 psig อุณหภูมิของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจะสูงถึง 85 - 90 องศาเซลเซียสซึ่งไม่อาจจะลดลงมาให้ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสได้ด้วยการใช้พัดลม ดังนั้นความดันในการทดลองที่เหมาะสมสำหรับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงคือ 50 psig



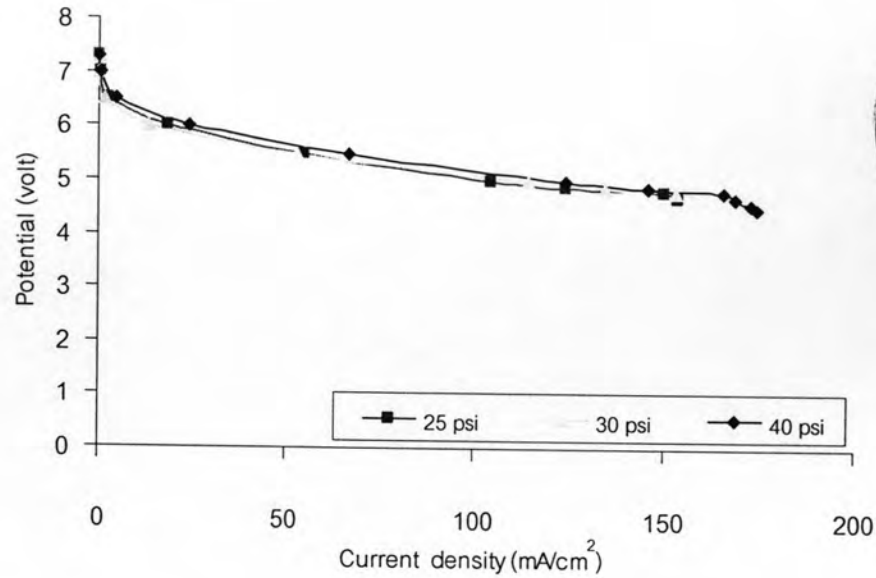
รูปที่ 4.20 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 810 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm



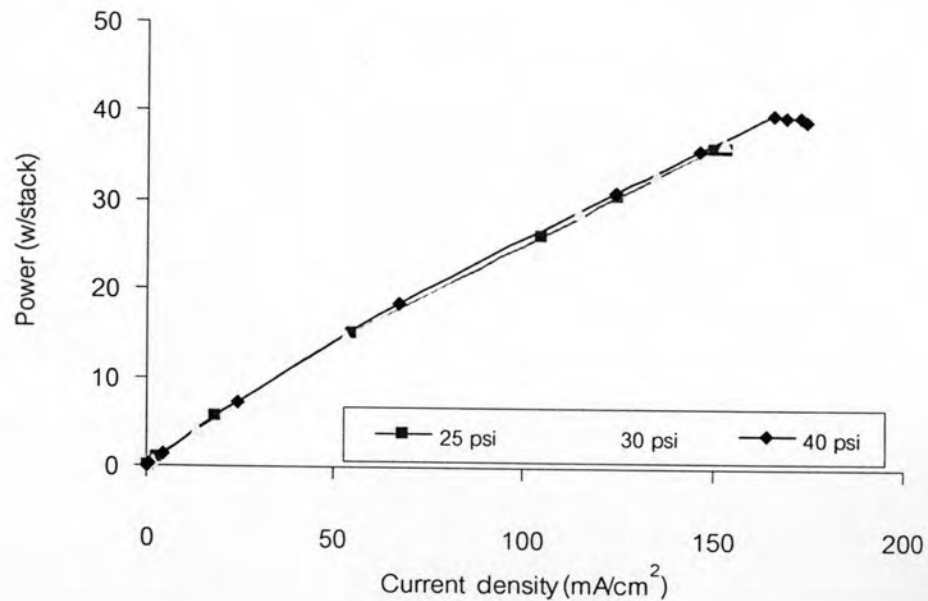
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm

4.3 การวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

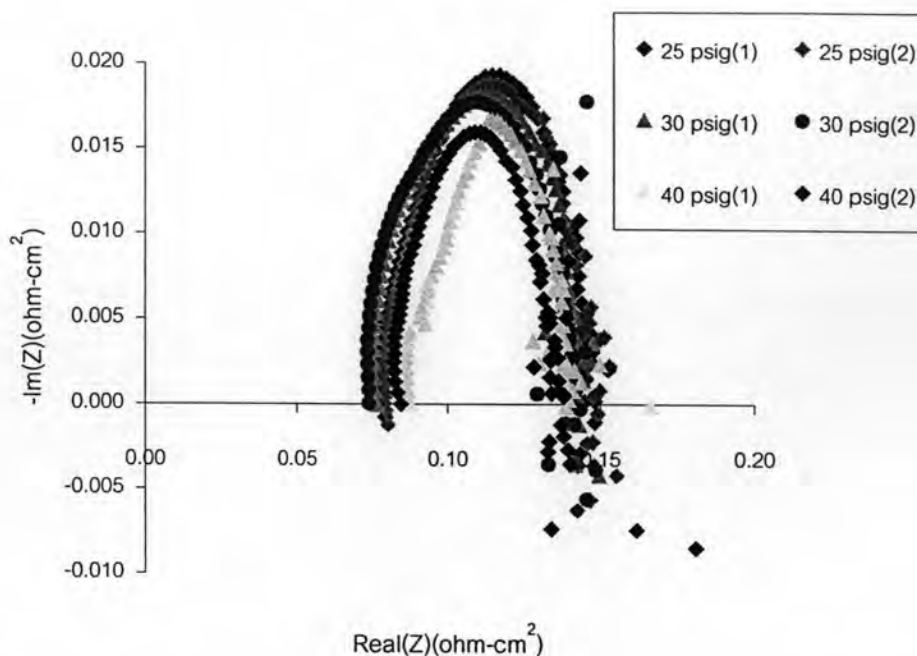
จากผลการทดลองจะเห็นว่าเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้อย่างมาก จึงนำผลมาวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนเพื่อศึกษาผลของความต้านทานที่มีอยู่ภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม FRA และ Potentiostat ที่ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนได้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิน 5.0 โวลต์และ 10 แอมแปร์ตามลำดับ แต่ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเกิน 10 แอมแปร์ ทำให้ไม่อาจนำภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ได้ จึงได้ทำการลดอัตราการสวนของภาวะที่ได้ลงมาครึ่งหนึ่ง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 405 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 270 sccm ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 – 4.23 ซึ่งแสดงโพลาไรเซชันและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองตามลำดับ รูปที่ 4.24 แสดงกราฟ Nyquist ของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม FRA ในช่วงความถี่ 10 mHz – 10 kHz ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์ พบว่าความต้านทานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม FRA และที่ได้จากโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทานในรูปที่ 4.22 มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลมาจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ยังไม่มีความเสถียร ค่าความต้านทานโอห์มมิกที่ได้จึงแตกต่างกัน วิธีแก้ปัญหาคือควรทำการทดลอง Run in ก่อนเริ่มทำการตั้งกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ระบบมีความคงตัวมากที่สุด พิจารณาในส่วนของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุจากรูปที่ 4.24 พบว่ามีค่าความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุมาจากความดันที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน (25-40 psig)



รูปที่ 4.22 โพล่าไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันในระบบต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 407 sccm และ 270 sccm ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 407 sccm และ 270 sccm ตามลำดับ

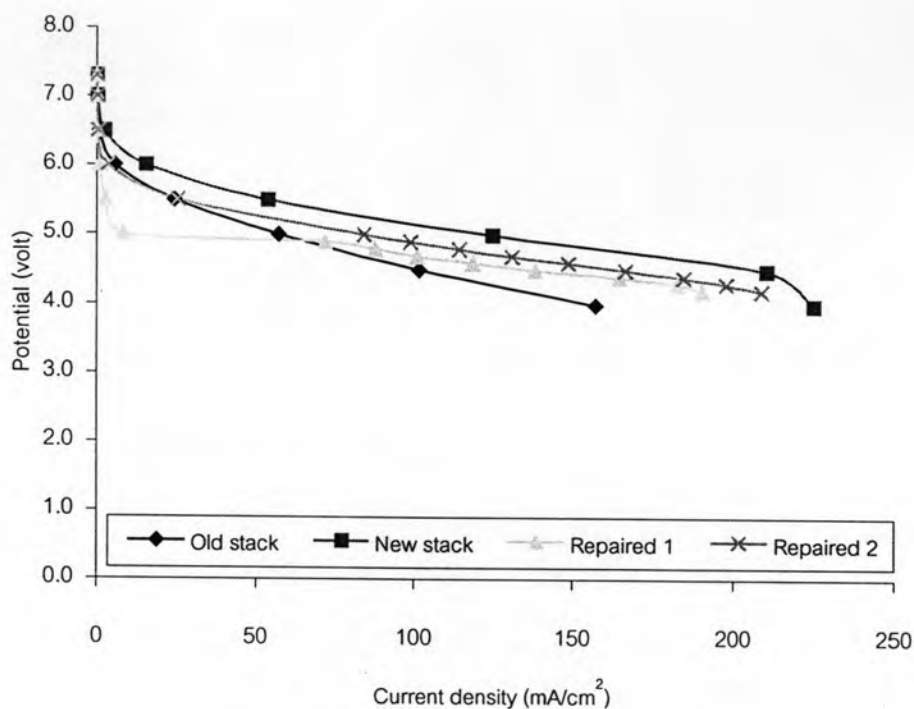


รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนที่ความดันต่าง ๆ ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 405 sccm และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 270 sccm

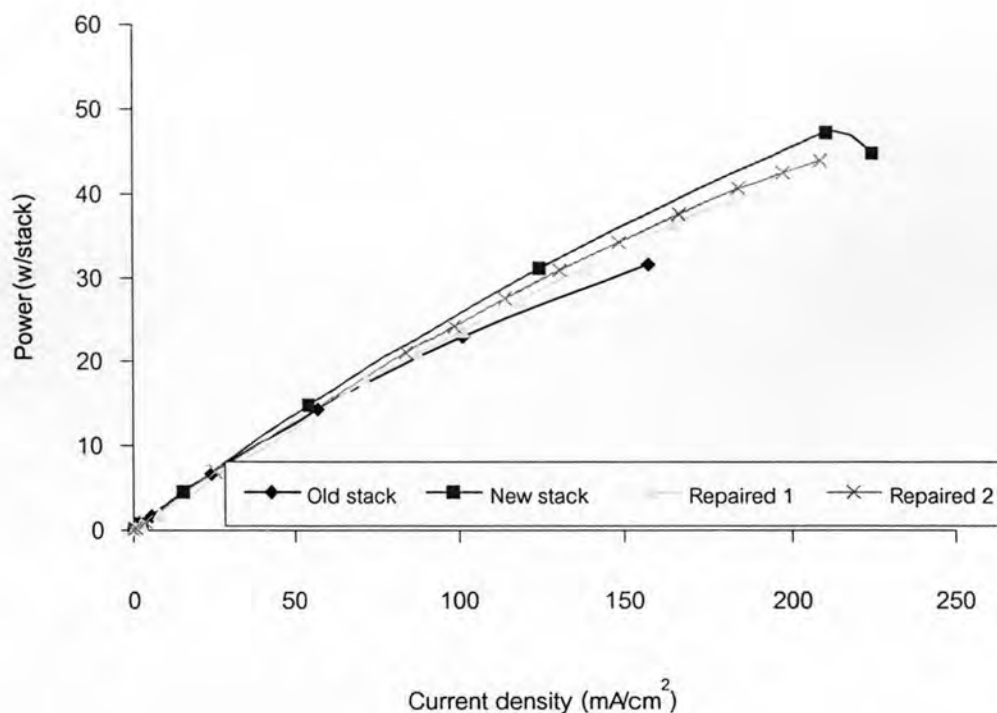
4.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพชั้นเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน

ในการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงก่อนและหลังการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรน โดยได้เลือกภาวะที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 500 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 500 sccm ความดันในระบบเท่ากับ 20 psig จากรูปที่ 4.25 - 4.26 พบว่าชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังจากผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 ซึ่งชำรุดเนื่องจากการใช้ความแตกต่างของความดันทั้งสองฝั่งมากเกินไป 30 psig เป็นระยะเวลานาน ในการทดลองครั้งแรกจะยังมีผลของการสูญเสียอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องอาจเป็นผลของการหยุดทดลองเป็นเวลานานเกินไป ความพร้อมของส่วนต่าง ๆ ในการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ช้าลง รวมถึงความชื้นของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการนำโปรตอน และเมื่อทำการทดลองซ้ำก็พบว่าค่าความสูญเสียอันเนื่องมาจากพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงผลที่มาจากการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเข้าด้วยกัน หากว่าใช้แรงในการอัดหรือวางแต่ละชั้นส่วนของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอย่างไม่เหมาะสม ก็จะส่งผลให้เกิดความต้านทานเนื่องจากการ

ถ่ายโอนประจุขึ้นเช่นกัน เนื่องจากแก๊สที่ใช้เป็นสารตั้งต้นไม่สามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าได้อย่างทั่วถึง ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงอันใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการอัดถอดและประกอบใหม่ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าแต่มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์เดิม



รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบโพลาริเซชันที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่ ณ ภาวะอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 500 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 500 sccm ความดันในระบบ 20 psig (Old stack : ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวเก่าก่อนชำรุด, New stack : ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่, Repaired : ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวเก่าหลังผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7)

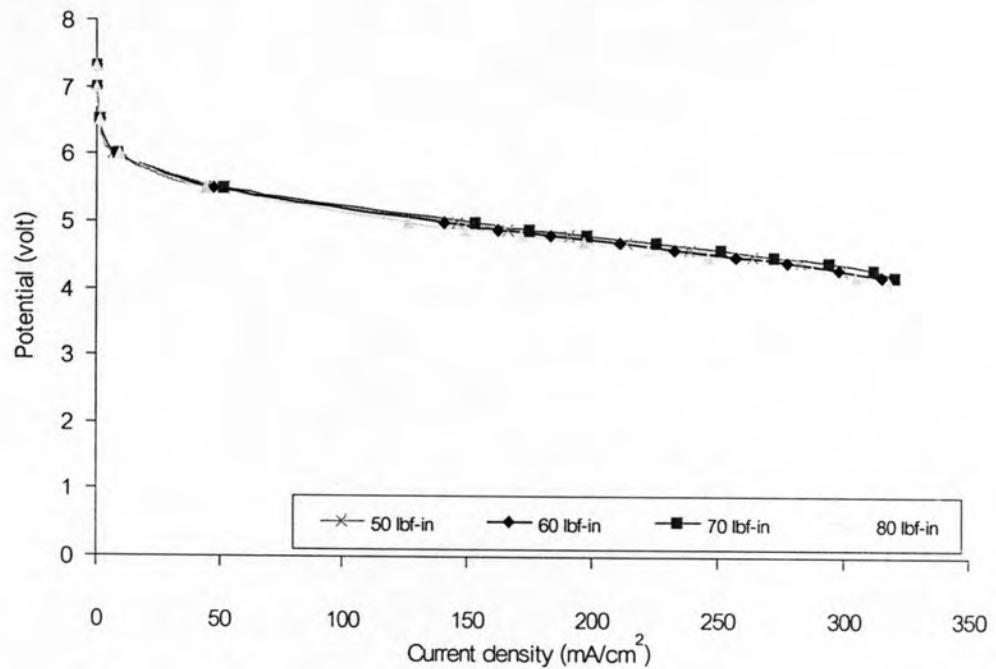


รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการเปลี่ยนหน่วยประกอบหัวไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงตัวใหม่ ณ ภาวะอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 500 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 500 sccm ความดันในระบบ 20 psig

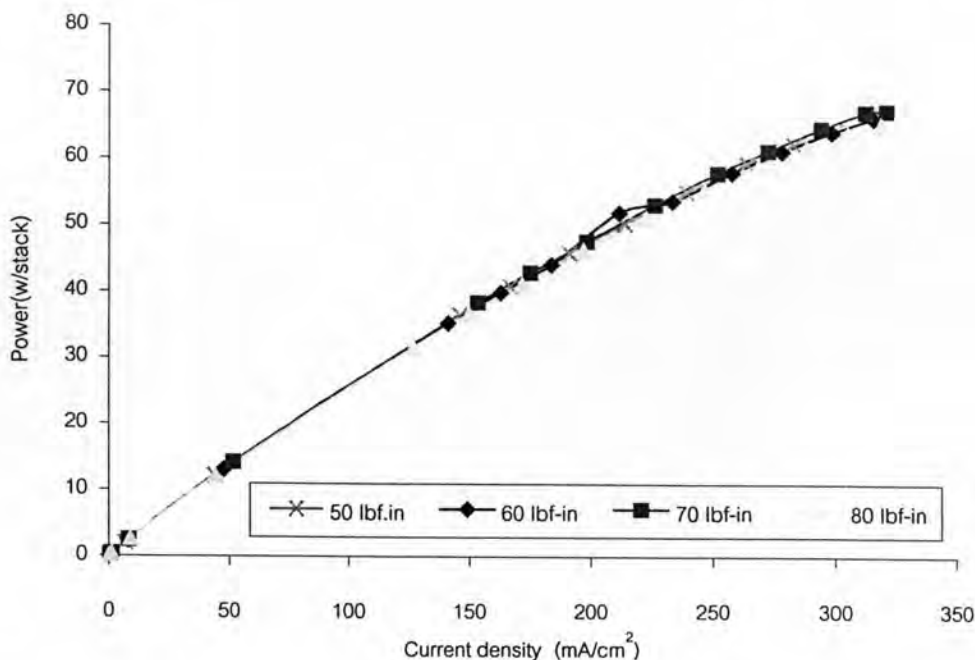
4.5 ผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้อัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผ่านการนำไปซ่อมแซมเนื่องจากหน่วยประกอบหัวไฟฟ้าเมมเบรนชำรุด จากการศึกษาค้นคว้าผลของโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm และความดัน 50 psig ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.27 – 4.28 พิจารณาที่ความต่างศักย์ 5.0 โวลต์ ที่โมเมนต์การหมุนเพิ่มจาก 50 60 70 ปอนด์แรง. นิ้ว ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 146 150 153 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรและค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 36.5 37.5 38.3 วัตต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นและความต้านทานมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยดูจากความชันของโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน แต่เมื่อเพิ่มแรงโมเมนต์การหมุนเป็น 80 ปอนด์แรง. นิ้ว ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้กลับลดลงเหลือ 126 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 32 วัตต์ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ใช้

แรงอัดมากเกินไปทำให้แผ่นของช่องทางการไหลลดอัดหน่วยประกอบชั่วคราวไฟฟ้าเมมเบรนมากเกินไปจนทำให้ชั่วคราวไฟฟ้ามีความพรุนลดลง พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่ชั่วคราวไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพการทำงานของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงลดลงตามไปด้วย สรุปได้ว่าโมเมนต์การหมุนที่ใช้ในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดคือที่ 70 ปอนด์แรง-นิ้ว อย่างไรก็ตามในช่วงแรงอัดที่ศึกษานี้มีผลต่อประสิทธิภาพของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงใกล้เคียงกันมากจึงสามารถเลือกใช้ค่าใดก็ได้ในช่วงนี้



รูปที่ 4.27 โพลาริเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig

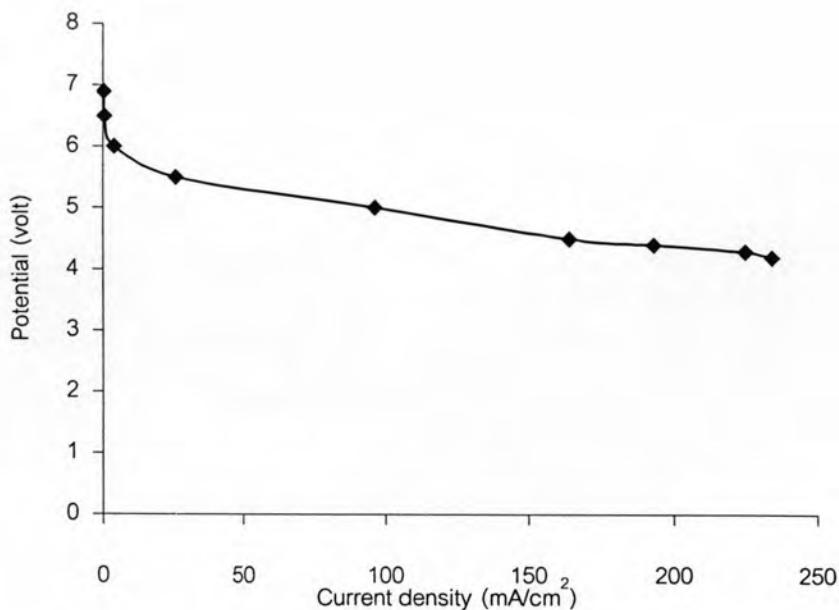


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นไฟฟ้าของ
ชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิงต่าง ๆ โดยกำหนด
อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ
ความดัน 50 psig

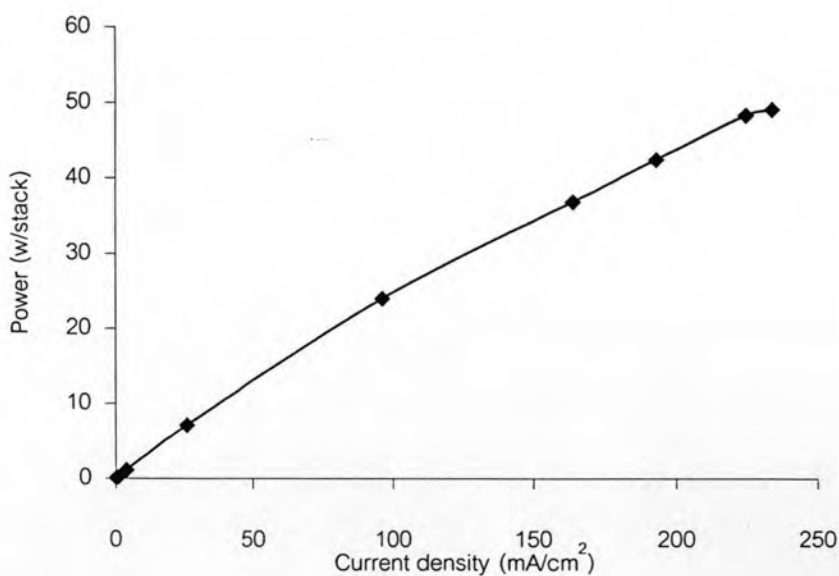
4.6 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าในชั้นเซลล์เชื้อเพลิง โดยชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองได้เปลี่ยนหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนแผ่นที่ 7 ออก (นับจากด้านแก๊สขาเข้า) เนื่องมาจากชำรุดเพราะใช้ความดันแตกต่างกันมากไปเป็นเวลานานในการทดลอง จากนั้นใช้เส้นใยคาร์บอนวางแทรกระหว่างแผ่นช่องทางการไหลและหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนทั้งด้านขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ให้เส้นใยคาร์บอนสัมผัสอยู่กับขั้วไฟฟ้าโดยตรง แล้วจึงทำการต่อสายเส้นใยคาร์บอนที่ติดอยู่กับชั้นเซลล์เชื้อเพลิงเข้ากับสายไฟของแผงวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยในการทดลองจะทำการที่โมเมนต์การหมุนของการอัดประกอบเซลล์เท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นี้ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 540 sccm และความดัน 50 psig ซึ่งในการทดลองเครื่อง Potentiostat ไม่สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าไปได้พร้อม ๆ กับการใช้โปรแกรม FRA จึงได้นำเครื่อง Electronic load มาใช้ในการวัดโวลตาโรเซชันและใช้โปรแกรม FRA เพื่อวัดความต้านทานเชิงซ้อนไปในเวลาเดียวกัน จะได้

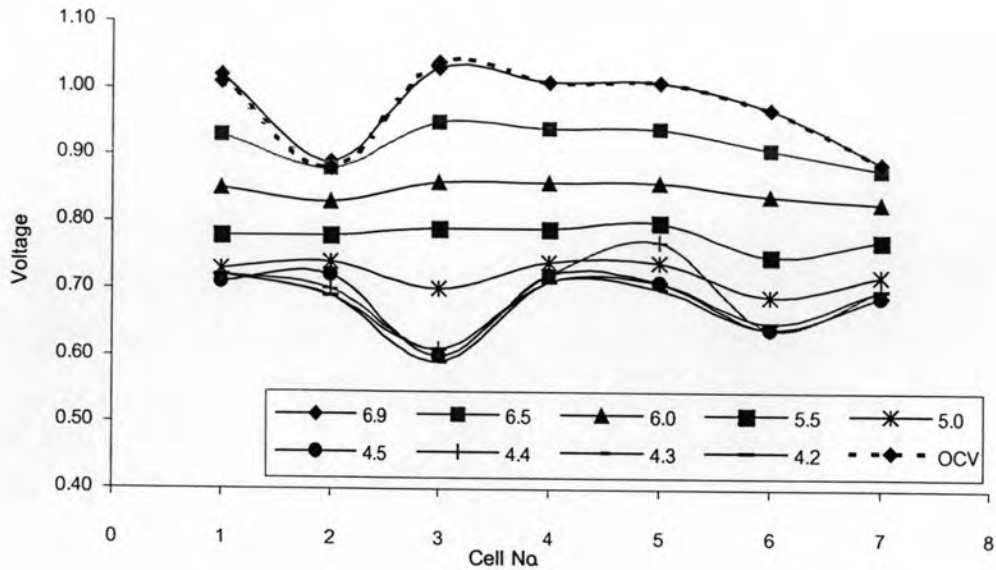
กราฟโพลาริเซชันและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 4.29 – 4.30 และเมื่อทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในแต่ละเซลล์จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.31 - 4.32 พบว่าเซลล์ที่ 3 และเซลล์ที่ 6 มีแนวโน้มที่ประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงเมื่ออยู่ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูง อาจเนื่องมาจากเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้ในการทดลองมาเป็นระยะเวลาานาน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการได้น้ำที่ค้างออกจากชั้นเซลล์เชื้อเพลิงหลังทำการทดลองใช้เวลาน้อยเกินไป จึงทำให้มีปริมาณน้ำสะสมอยู่ข้างใน และการให้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนและความดันของแก๊สออกซิเจนแตกต่างกันมากจนเกินไปจะทำให้หน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนชำรุดไวขึ้นเช่นกัน วิธีการนำเส้นใยคาร์บอนมาใช้ในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในแต่ละเซลล์นี้ จะช่วยให้ทราบถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าย่อยภายในแต่ละเซลล์รวมไปถึงประสิทธิภาพการทำงานของหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนของภายในแต่ละเซลล์ได้ว่าเป็นอย่างไร พบว่าความต้านทานโอห์มมิกของเซลล์ที่ 3 และเซลล์ที่ 6 มีค่ามากกว่าที่เซลล์อื่น อันเนื่องมาจากเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนอาจมีความชื้นมากเกินไป ทำให้เกิดการบวมตัวประสิทธิภาพในการนำโปรตอนจึงลดลง ในด้านผลของความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ ซึ่งพิจารณาแล้วพบว่าไม่สามารถบ่งบอกลักษณะที่แน่นอนได้ อาจเป็นผลจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความต้านทานมีการเชื่อมโยงกันหลายจุด ทำให้มีผลของความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ (Contact resistance) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ลักษณะของกราฟที่ได้ออกมาไม่เห็นรูปร่างอย่างชัดเจน (ภาคผนวก ง) จากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Inductance ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหา ด้านผลของความต้านทานผิวสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.33 – 4.39 พบว่ากราฟที่ได้จะมีค่าความต้านทานโอห์มมิกลดลงเป็นผลมาจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธี Inductance มีการบวกตัวแปรที่เป็นค่าคงที่เข้าไปด้วย ทำให้ค่าที่ได้เปลี่ยนไปจากเดิม ในขณะที่ความต้านทานเนื่องจากการถ่ายโอนประจุมีค่าคงที่ ณ ช่วงที่ความถี่ในการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนมีค่าต่ำ กราฟที่ได้จะกระจายตัวเป็นจุดไม่มีรูปร่างที่แน่นอน อาจเป็นผลของการที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจนมีน้ำเกิดขึ้นมามากและไปอุดตันอยู่ที่ขั้วแคโทด



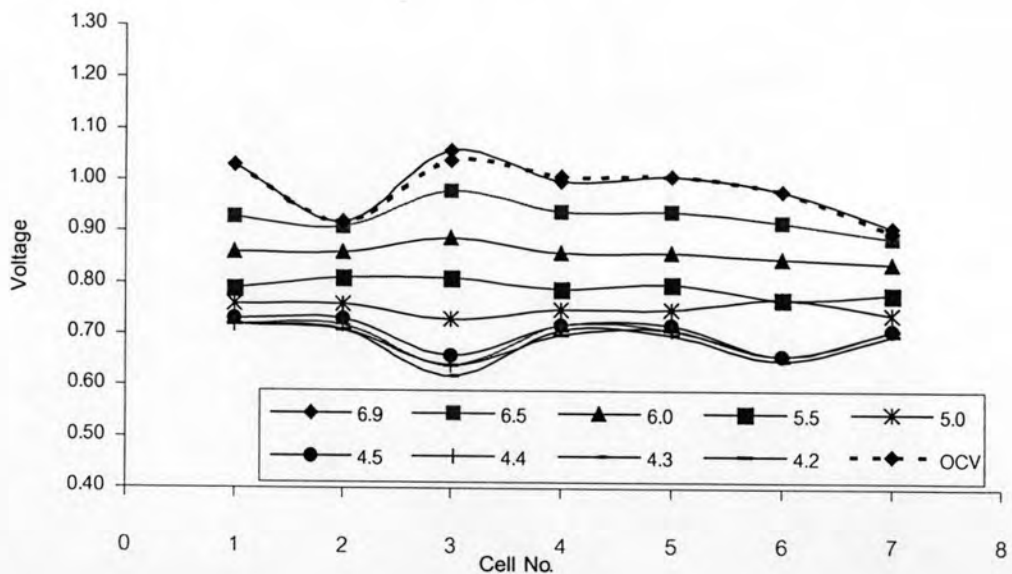
รูปที่ 4.29 โพลลาไรเซชันของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig โมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง. นิ้ว



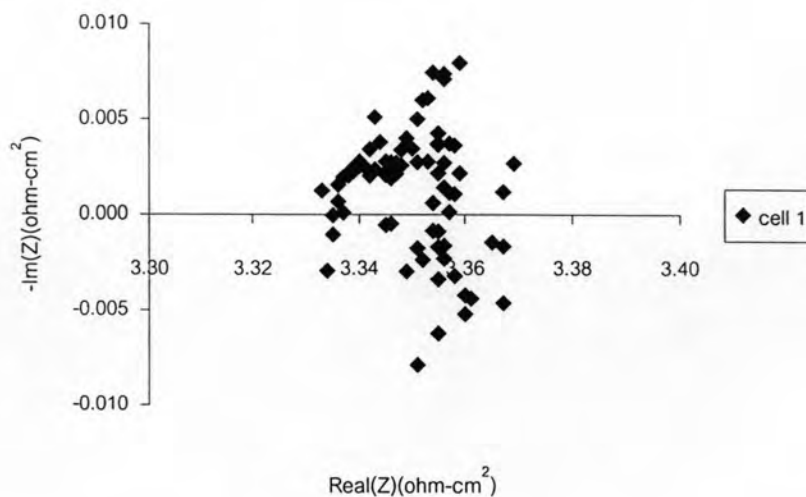
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของชั้นเซลล์เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 810 sccm อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 540 sccm ความดันในระบบ 50 psig โมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์แรง. นิ้ว



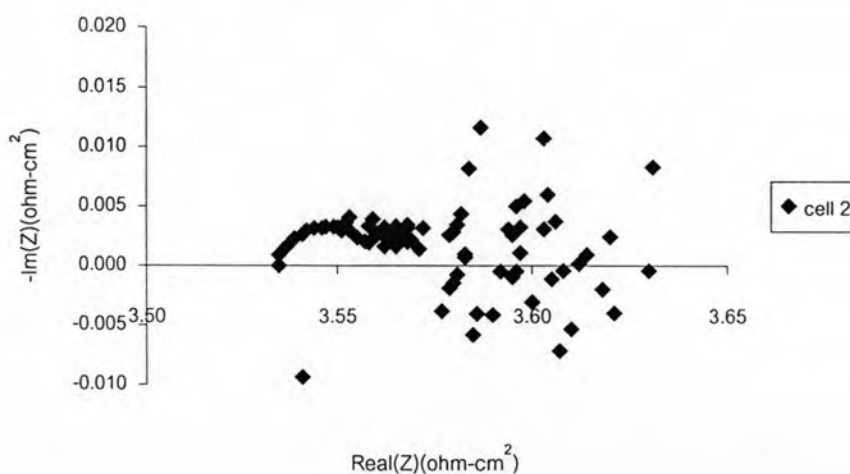
รูปที่ 4.31 ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละหน่วยประกอบขั้วไฟฟ้าเมมเบรนของ
ชั้นเซลล์เชื้อเพลิง(ไม่รวมแผ่นช่องทางกรไหล) ที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์
เชื้อเพลิง 70 ปอนด์-นิ้ว โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810
sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig



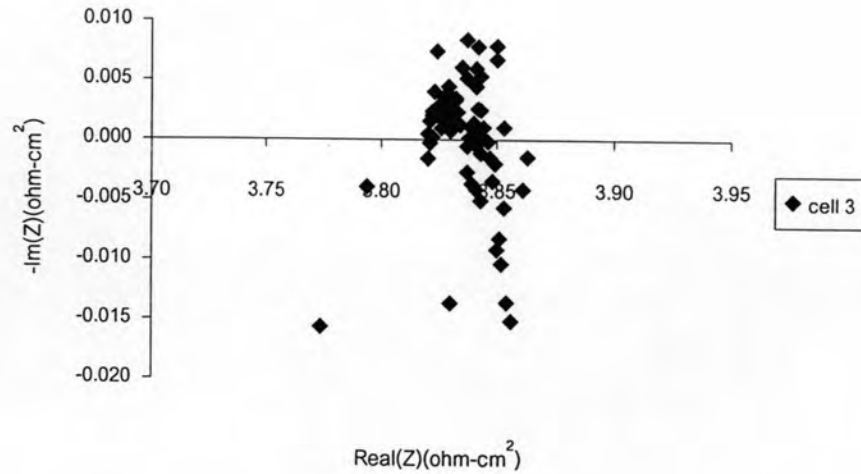
รูปที่ 4.32 ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละเซลล์เดี่ยวของชั้นเซลล์เชื้อเพลิง (รวมแผ่นช่องทาง
การไหล) ที่แรงโมเมนต์การหมุนในการอัดประกอบชั้นเซลล์เชื้อเพลิง 70 ปอนด์-นิ้ว โดย
กำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm
ตามลำดับ ความดัน 50 psig



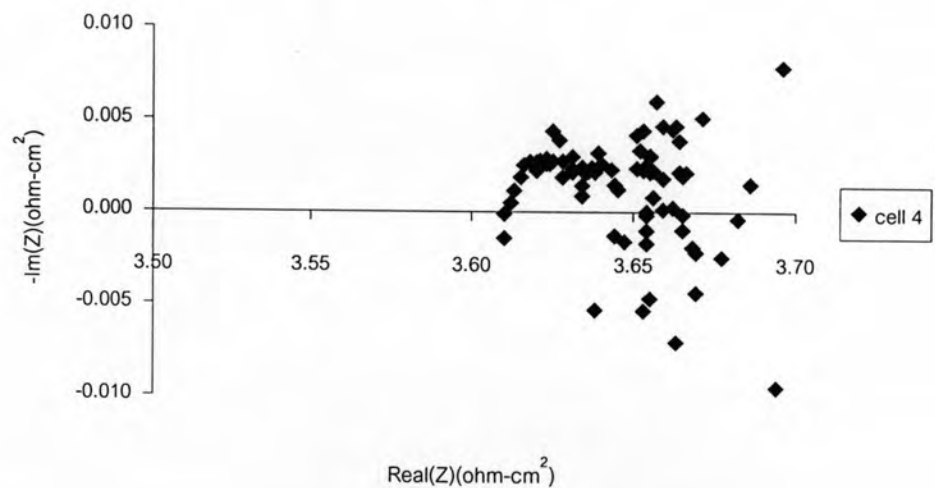
รูปที่ 4.33 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หนึ่งด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว



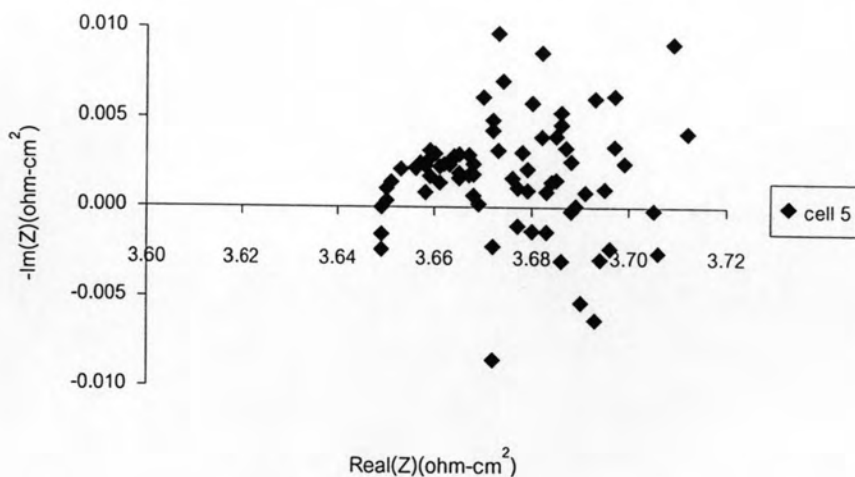
รูปที่ 4.34 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สองด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว



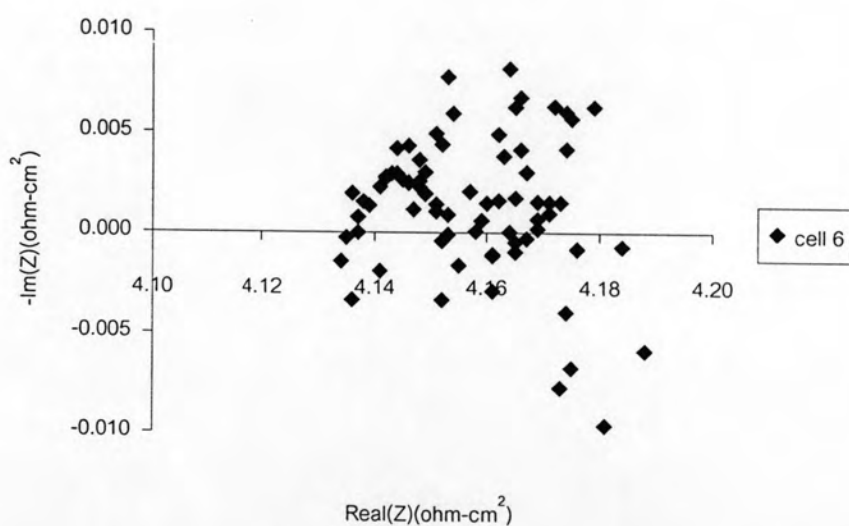
รูปที่ 4.35 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สามด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง. นิ้ว



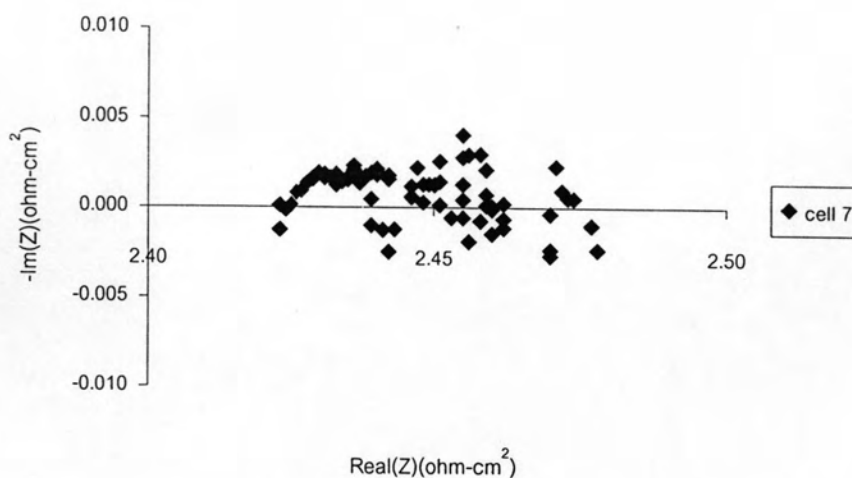
รูปที่ 4.36 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่สี่ด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง. นิ้ว



รูปที่ 4.37 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่ห้าด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว



รูปที่ 4.38 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่หกด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว



รูปที่ 4.39 ผลการแปลงค่าความต้านทานเชิงซ้อนของเซลล์ที่เจ็ดด้วยวิธี Inductance ณ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.7 โวลต์โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 810 sccm และ 540 sccm ตามลำดับ ความดัน 50 psig โมเมนต์การหมุนเท่ากับ 70 ปอนด์แรง.นิ้ว