

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

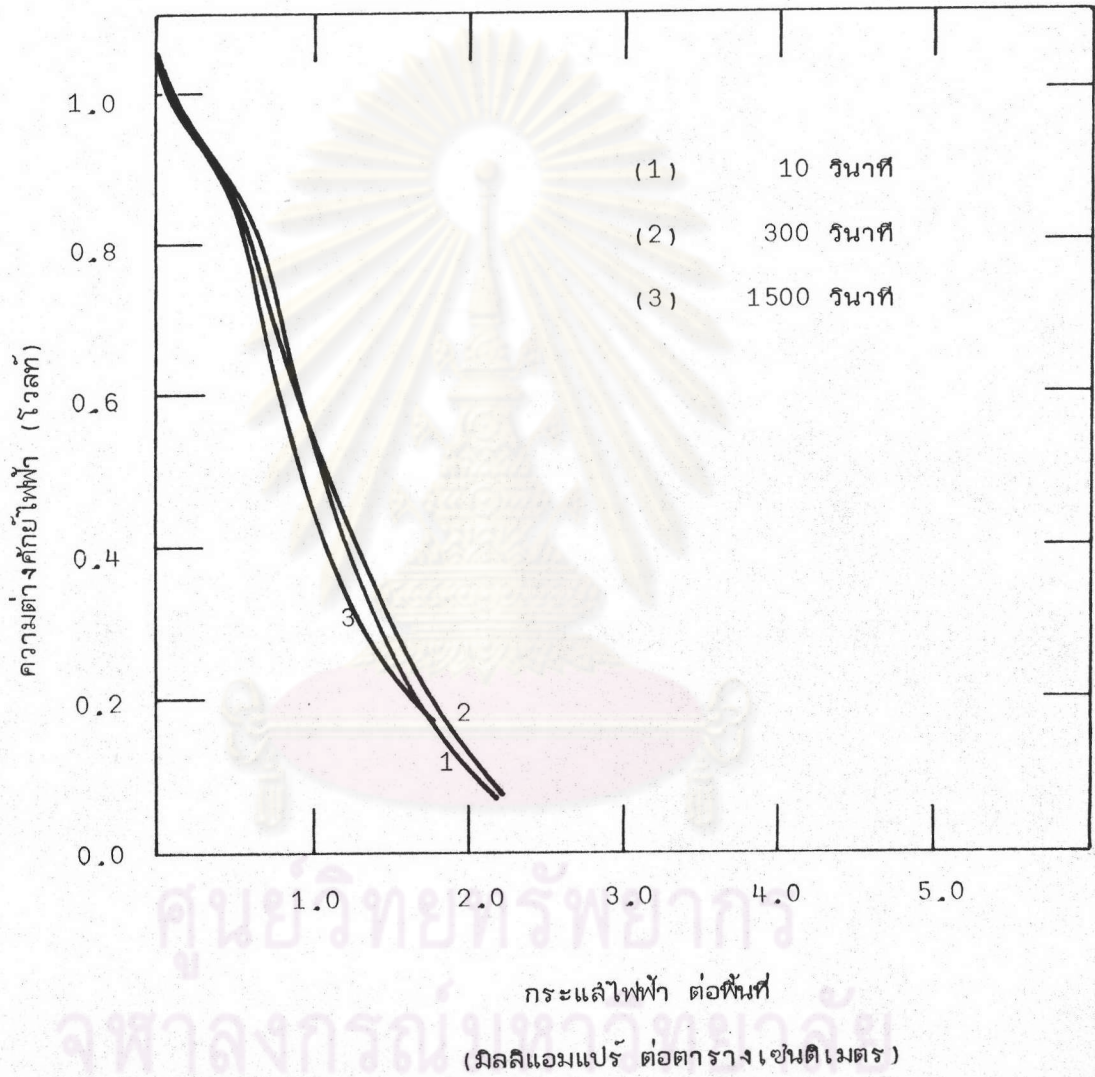
ผลการทดลองของ เซลล์ เชื้อเพลิง แบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนส่วนใหญ่ เส้นกราฟโพลาริเซชันซึ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมเซลล์กับกระแสไฟฟ้า เพราะสามารถให้รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ เป็นผลการวัดประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

4.1 ผลของการทิ้งช่วง เวลาในการ เก็บข้อมูลแต่ละค่า

ในการ เก็บข้อมูลเพื่อเขียนกราฟโพลาริเซชันทำได้โดยการ เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า ที่ออกจากเซลล์แล้ว จำต้องรอช่วงระยะเวลา เพื่อให้การทำงานของเซลล์คงที่ก่อน แล้วจึงบันทึกค่าความต่างศักย์ของ เซลล์และค่ากระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์ ดังรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.7 ถ้าหากช่วง เวลาที่รอให้การทำงานของเซลล์คงที่นั้นน้อยเกินไปจะทำให้ได้กราฟที่ให้พลังงานไฟฟ้า มากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมจึงได้ทำการทดลอง เขียนกราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน โดยมีการทิ้งช่วง เวลาในการ เก็บข้อมูลแต่ละค่าในกราฟโพลาริเซชันเป็น 10 วินาที, 300 วินาที และ 1500 วินาที ผลการทดลองเป็นไปตามกราฟตามรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กราฟโพลาริเซชันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการ ใช้ช่วงระยะเวลา 10 วินาที สำหรับรอให้การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนคงที่หลังจากมีการ เปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าจากเซลล์น้อยกว่า 0.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง เซนติเมตร จะทำให้ได้กราฟโพลาริเซชันที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

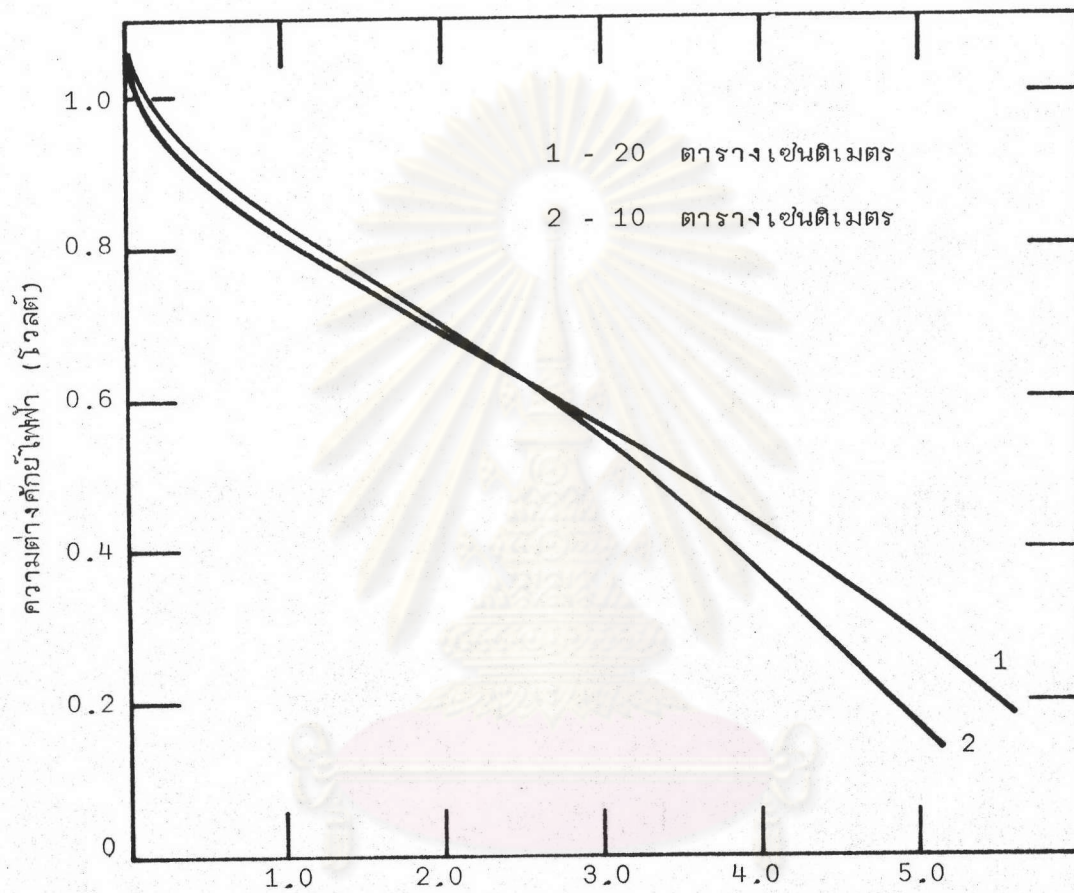
4.2 ผลการทดลองเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าใช้ในการทดลองโดยปกติมีขนาด 20 ตารางเซนติเมตร เมื่อเติมน้ำลงในเซลล์ก็จะทำให้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าลดลงไปอีก ในการทดลองนี้ได้เติมน้ำลงไปครึ่ง เซลล์ทำให้พื้นที่



รูปที่ 4.1 กราฟโพลลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อมีการเปลี่ยนระยะเวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละค่า

1) 10 รินาที 2) 300 รินาที 3) 1500 รินาที



กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่

(ผลิตแอมแปร์ต่อตาราง เช่นนี้เมตร)

รูปที่ 4.2

กราฟโพลาริเซชัน ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ขั้วไฟฟ้า 1) พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 20 ตาราง-
เช่นนี้เมตร 2) พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 10 ตารางเช่นนี้เมตร

ขั้วไฟฟ้าลดลงเป็นครึ่งหนึ่ง คือ 10 ตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองเปลี่ยนพื้นที่ขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงในรูปกระแสต่อพื้นที่ปรากฏว่าต่างกันไม่มากในช่วงกระแสต่ำ ส่วนบริเวณกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นหรือปลายกราฟแยกห่างออกจกกันมากขึ้นนั้นเกิดจากแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนชั้นไม่เท่ากัน โดยในกรณีขั้วไฟฟ้าพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้งกว่า เมื่อเติมน้ำลงในเซลล์เพื่อลดพื้นที่เป็น 10 ตารางเซนติเมตร

4.3 ผลที่เกิดจากแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

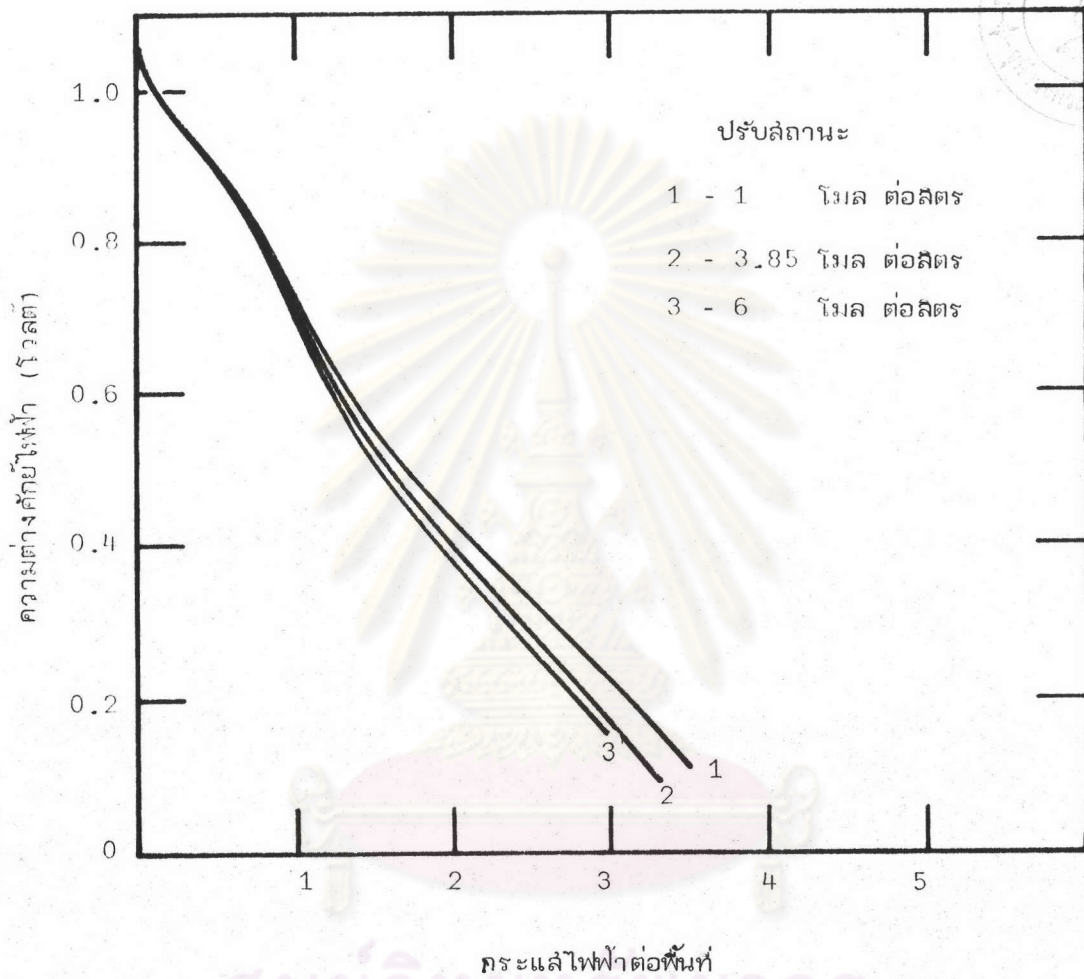
แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่จะนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์เชื้อเพลิงจะต้องผ่านขบวนการต่าง ๆ ก่อนนำไปใช้งาน ในที่นี้ได้ทำการปรับสถานะและปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาว่าแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านขบวนการต่างกันจะมีผลอย่างไรต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต่างชนิดกัน (CR61 AZL389 และ CR61 AZL386) และศึกษาผลของความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย

4.3.1 ผลของการปรับสถานะแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่จะนำมาใช้ในการทดลองนี้มีการปรับสถานะแตกต่างกัน โดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 3 แผ่น แยกกันปรับสถานะด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร, 3.85 โมลต่อลิตร และ 1 โมลต่อลิตร เมื่อล้างจนสะอาดด้วยน้ำกลั่นแล้วจึงนำมาประกอบเซลล์ กราฟโพลีไรเซชันที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสถานะด้วยความเข้มข้นแตกต่างกัน มีผลน้อยต่องานเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

4.3.2 ชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

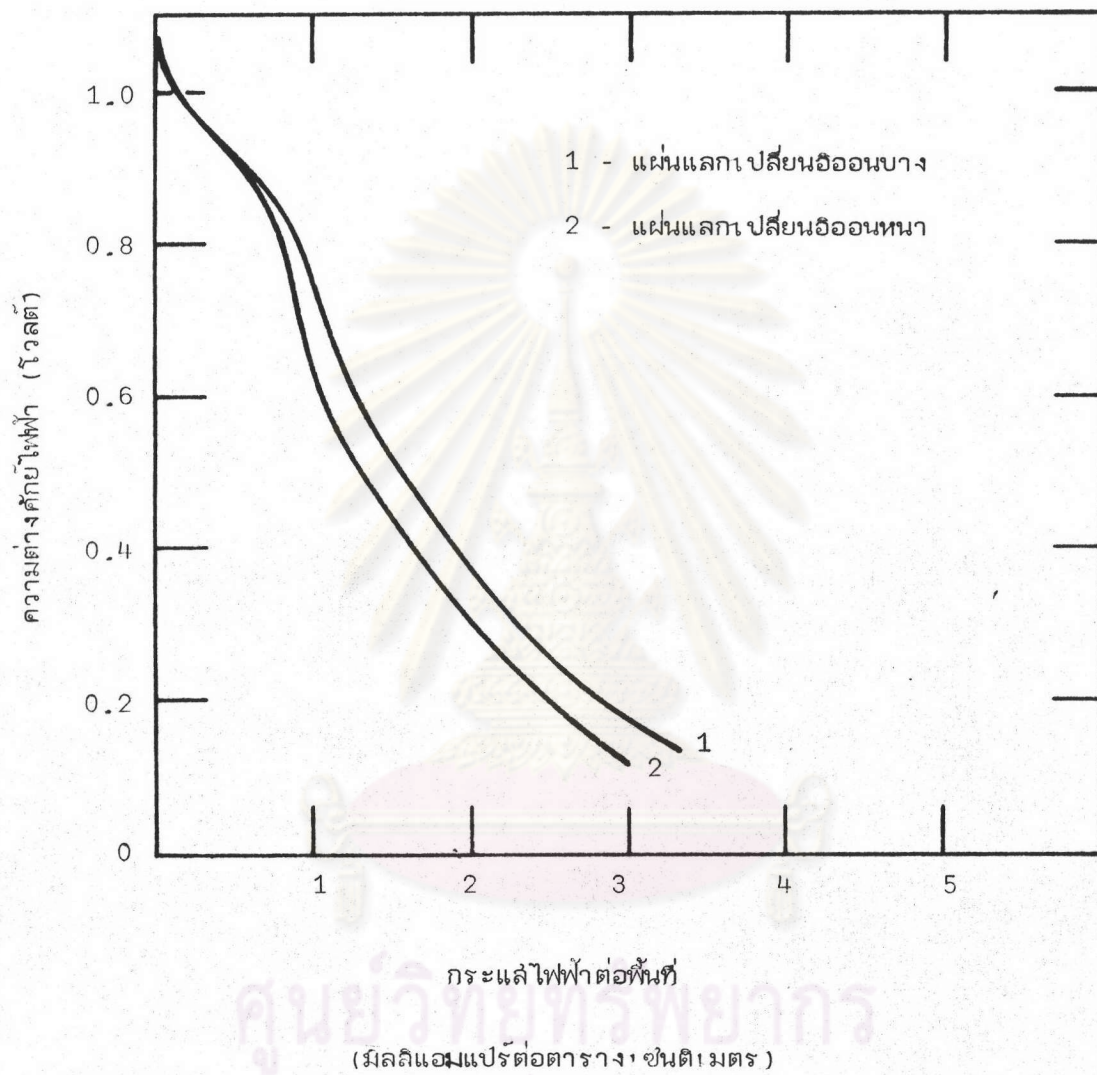
แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ชนิด คือ ชนิดหนา (CR61 AZL389) และชนิดบาง (CR61 AZL386) จากการทดลองได้กราฟโพลีไรเซชัน ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง มีความต้านทานไอออนต่ำกว่าแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนาเล็กน้อย จากกราฟเราสามารถคำนวณค่าความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าผลของความ



(โมลแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

รูปที่ 4.3

กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อมีการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสถานะด้วยกรดซัลฟูริกความ
เข้มข้นต่างกัน 1) 1 โมลต่อลิตร 2) 3.85 โมลต่อลิตร
3) 6 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.4 กราฟโวลตาโรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนอ็อน
เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของแผ่นแลกเปลี่ยนอ็อน โดย

- 1) เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนอ็อนบาง (CR61 AZL386)
- 2) เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนอ็อนหนา (CR61 AZL389)

ตารางที่ 4.1

ตารางแสดงความต้านทานภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต่างชนิดกัน

CR61 AZL 389			CR61 AZL 386			ผลต่างของ ความต้านทาน ภายในเซลล์ (โอห์ม)
ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	ความต้านทาน ภายในเซลล์ (โอห์ม)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแส ไฟฟ้า (mA)	ความต้านทาน ภายในเซลล์ (โอห์ม)	
0.966	5	52.6	0.966	5	52.6	0
0.910	10	31.9	0.920	10	30.9	1.0
0.833	15	26.4	0.861	15	24.5	1.9
0.635	20	29.7	0.749	20	24.0	5.7
0.515	25	28.6	0.600	25	25.1	3.4
0.430	30	26.6	0.511	30	23.9	2.7
0.360	35	24.8	0.428	35	22.8	1.9
0.298	40	23.3	0.365	40	21.6	1.7
0.237	45	22.0	0.305	45	20.5	1.5
0.188	50	22.2	0.255	50	19.5	2.7
0.150	55	19.6	0.210	55	18.5	1.1

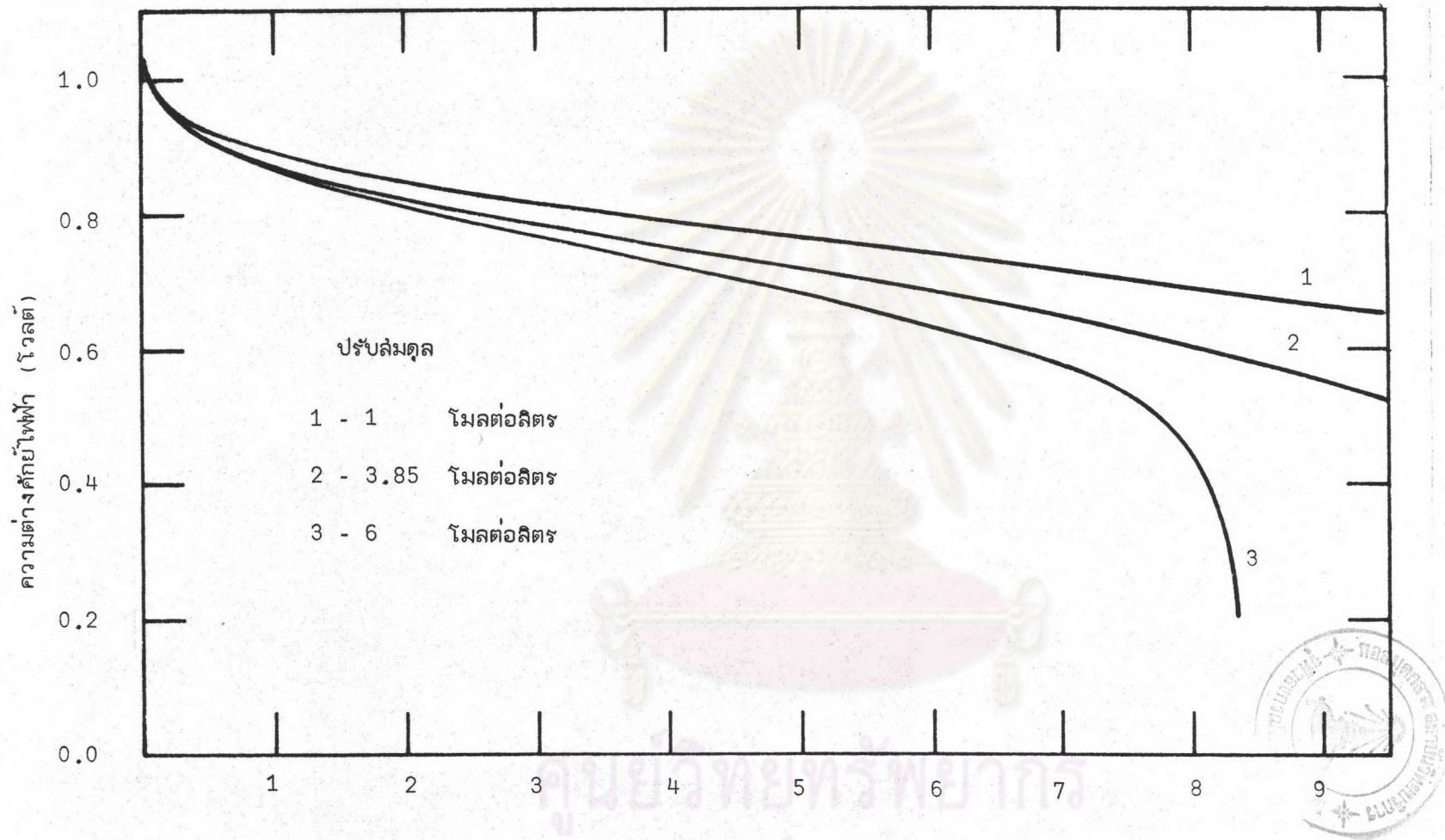
หนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนมีผลต่อความต้านทานภายในเซลล์น้อย

4.3.3 ผลการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสมดุล

การทดลองนี้ทำการปรับสมดุลแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางด้วยกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร, 3.85 โมลต่อลิตร และ 1 โมลต่อลิตร ทั้งนี้คือการไม่ล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นนั่นเอง เมื่อนำแต่ละแผ่นไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละเซลล์จะได้อายุการทำงานที่ต่างกันไปตามรูปที่ 4.5 โดยพลังงานที่ออกจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสมดุลจะมีค่ามากกว่าพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสถานะ จากกราฟดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสมดุลแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน คือ 1 โมลต่อลิตร ทั้ง ๆ ที่กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3.85 โมลต่อลิตร มีความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductance) มากที่สุดที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน (Astin, L.G., 1968) ถ้าสมมติว่าแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนในที่นี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างแห่อัมน้ำกรดอยู่ (Grubb, 1960) ก็ควรจะทำให้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3.85 โมลต่อลิตร นำไอออนได้ดีที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะวัดได้โดยวงจรบริดจ์กระแสสลับ แต่เมื่อนำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นกระแสตรง จึงทำให้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร นำไอออนได้ดีกว่าความเข้มข้นอื่น

4.3.4 ผลของชนิดแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อปรับสมดุลและความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

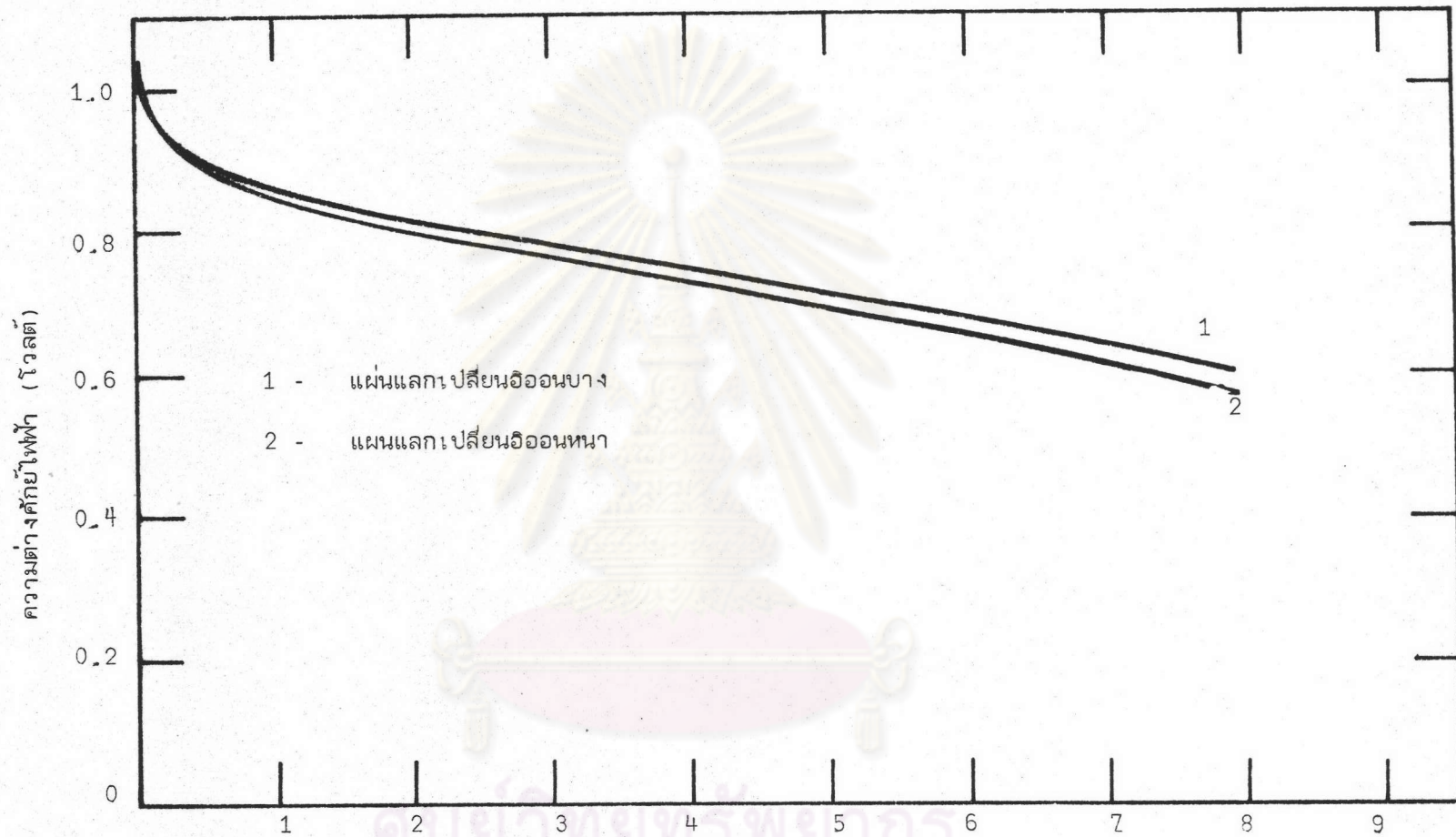
แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ยูนิตมี 2 ชนิด คือ ชนิดหนา (CR61 AZL389) และชนิดบาง (CR61 AZL386) เมื่อนำมาปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร แล้วจึงนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง ผลการทดลองเป็นดังกราฟรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงว่าความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนมีผลต่อพลังงานที่ได้รับจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนน้อย นอกจากนี้ยังได้ทดลองใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง 2 แผ่นซ้อนกันเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับกราฟที่ได้จากการใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง 1 แผ่น ผลการทดลองเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 4.7 แสดงว่าการเปลี่ยนความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนในช่วง 0.06 เซนติเมตร ถึง 0.12 เซนติเมตร ไม่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์

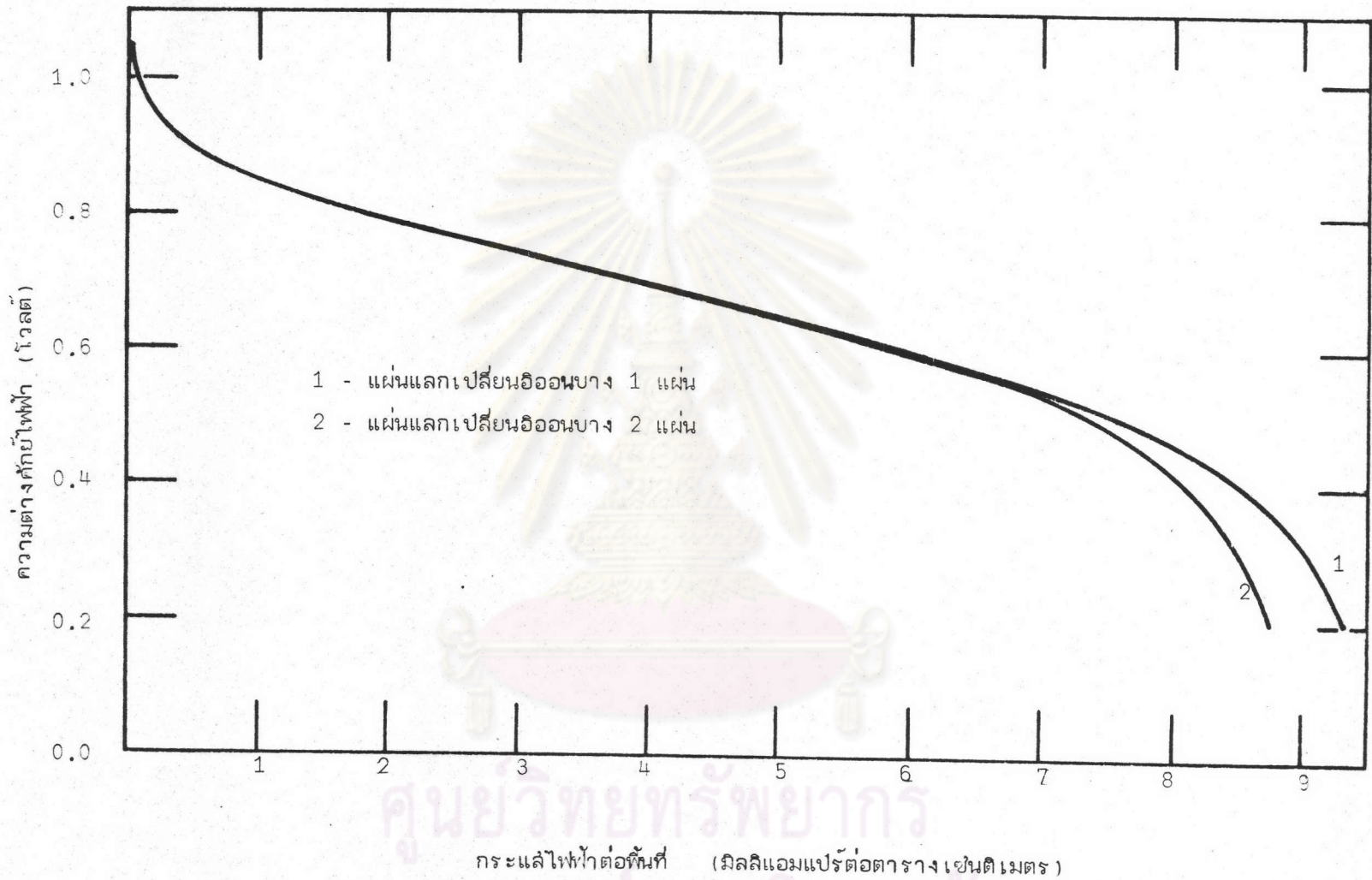
กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

รูปที่ 4.5 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางซึ่งปรับสมดุลกรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ กัน 1) 1 โมลต่อลิตร 2) 3.85 โมลต่อลิตร 3) 6 โมลต่อลิตร



กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

รูปที่ 4.6 กราฟโพลาร์เซชันของ เซลล์ เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 1) เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง 2) เมื่อใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา โดยแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร

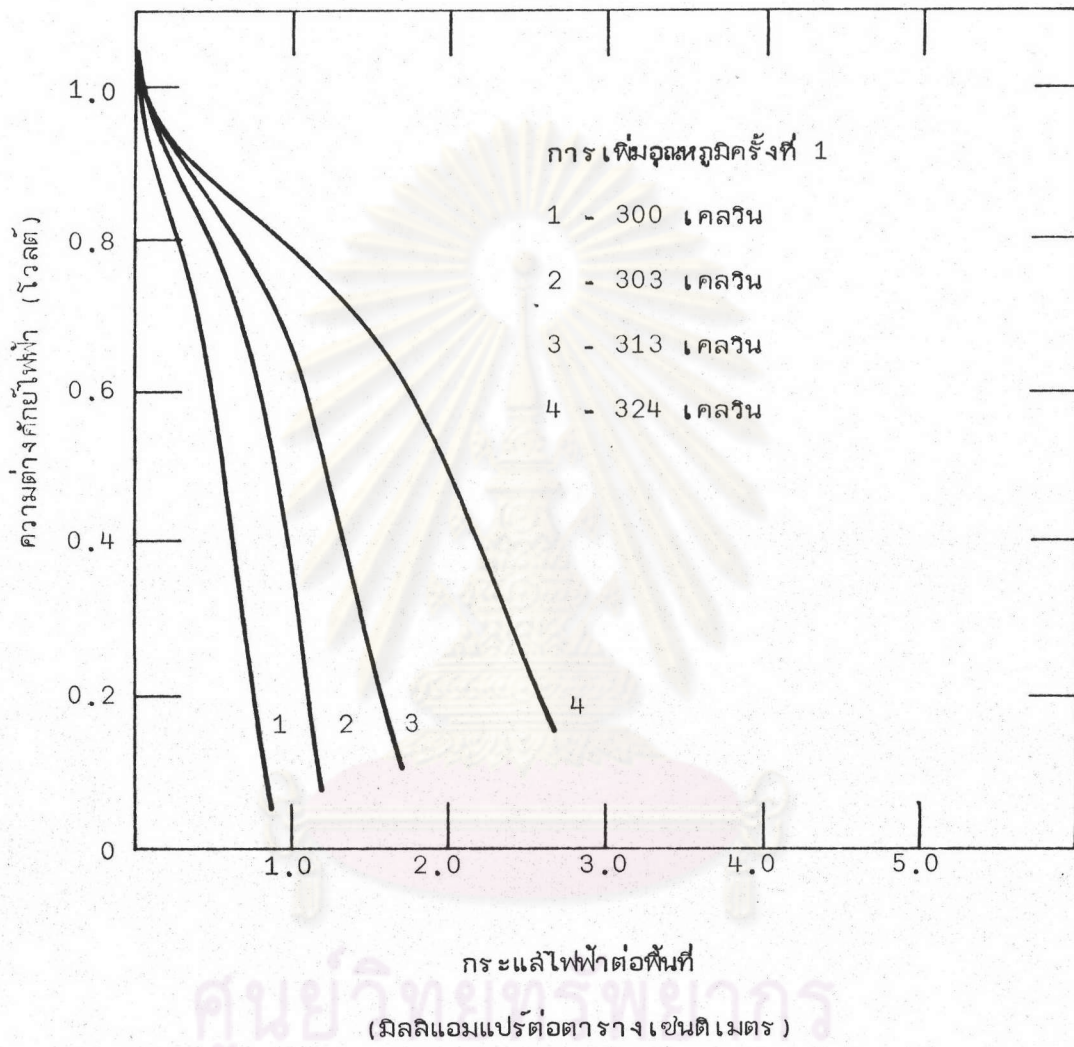


รูปที่ 4.7 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ 2 แผ่น ซ้อนกันเพื่อเปรียบเทียบกับ 1 แผ่น 1) ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง 1 แผ่น 2) ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง 2 แผ่น ซ้อนกัน

4.4 ผลของอุณหภูมิต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

อุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนมีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ผลโดยตรงคือ ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังจะเห็นได้จากรายละเอียดในบทที่ 2 การนำไอออนของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลุ่งขึ้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลุ่งขึ้น (Niedrach, L.W. and Grubb, W.T., 1963) นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลโดยอ้อมอีก กล่าวคือ แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการปรับสถานะมาแล้ว ยังคงมีการดิสฟรอกตค้างอยู่เล็กน้อย แม้ว่าจะล้างจนสะอาดก็ตาม (Juda, W., et al. 1952) ดังนั้น เมื่อนำแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนดังกล่าวไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้กรดที่ตกค้างอยู่ละลายออกมาได้ นอกจากนี้อนุมูลกรดที่ติดตามโครงร่างแหของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนก็สามารถละลายนำหลุดออกมาได้เช่นกัน แต่ไม่มากเท่ากับการหลุดละลายออกมาของกรดที่ตกค้างอยู่ (Maget, H.J.R., 1968)

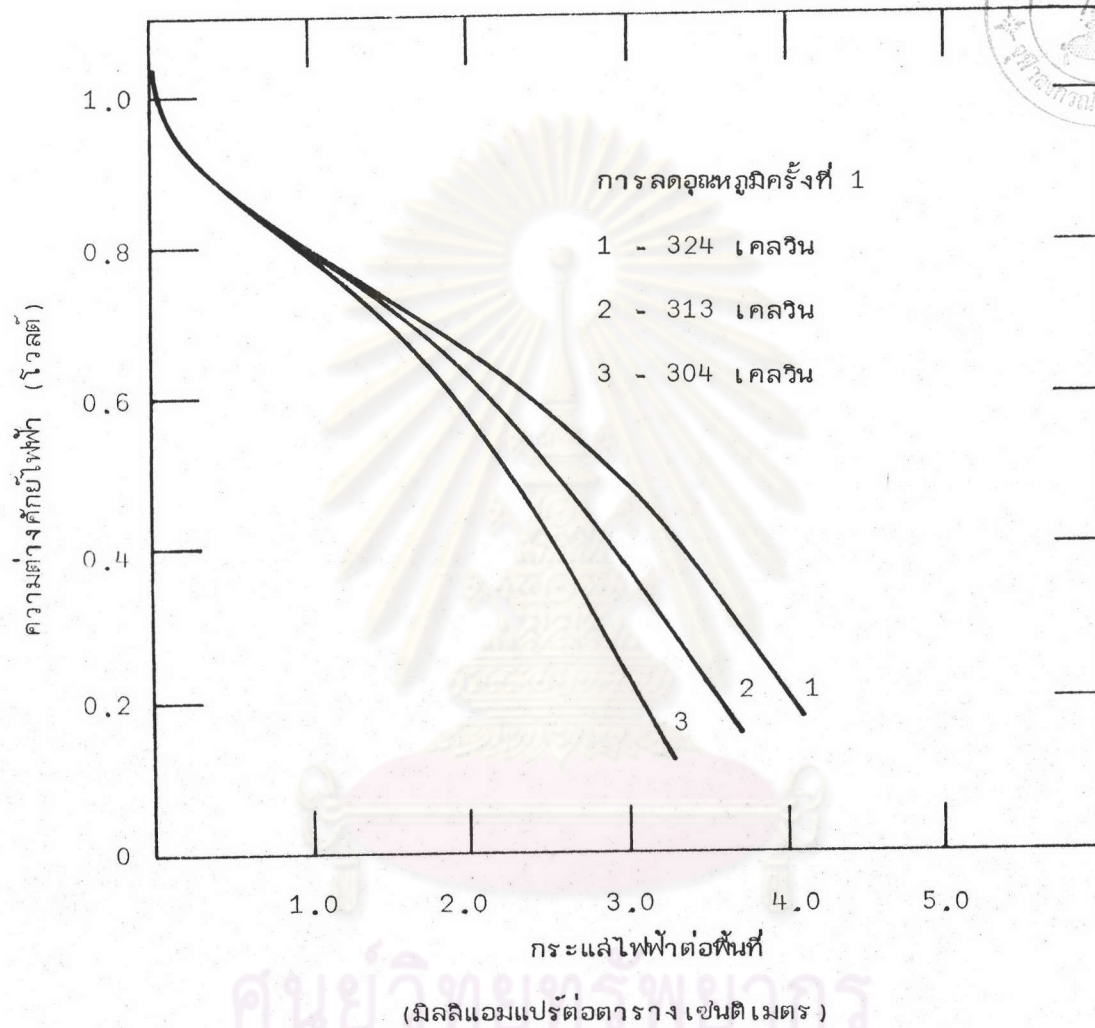
ผลการทดลอง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ได้แยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นกราฟโพลาริเซชันจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งปรับสถานะตามปกติดังรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.2.1 ผลการทดลองเริ่มด้วยกราฟโพลาริเซชันตามรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งเป็น การเพิ่มอุณหภูมิต่อมา ซึ่งลดอุณหภูมิลงได้กราฟโพลาริเซชันตามรูปที่ 4.8 (ข) จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งหนึ่งผลเป็นดังรูปที่ 4.8 (ค) จากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการให้ความร้อนมาแล้ว ทั้งนี้เกิดจากกรดในแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนสามารถละลายออกมาได้มากขึ้นเมื่อผ่านการให้ความร้อน สารละลายกรดเหล่านี้จะทำให้ความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลดลงเป็นอย่างมาก เซลล์จึงให้พลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่วนที่ 2 เป็นผลการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ปรับสถานะเสร็จแล้ว ล้างเพิ่มเติมด้วยน้ำกลั่นร้อนอุณหภูมิ 323 เคลวิน ผลเป็นดังกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 323 เคลวิน การทำงานของเซลล์ขึ้นกับอุณหภูมิไม่ชัดเจน แต่ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน เซลล์ให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 323 เคลวิน ไม่มีกรดละลายออกมาจากแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเพราะถูก



รูปที่ 4.8 (ก)

กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก

1) อุณหภูมิ 300 เคลวิน	3) อุณหภูมิ 313 เคลวิน
2) อุณหภูมิ 303 เคลวิน	4) อุณหภูมิ 324 เคลวิน



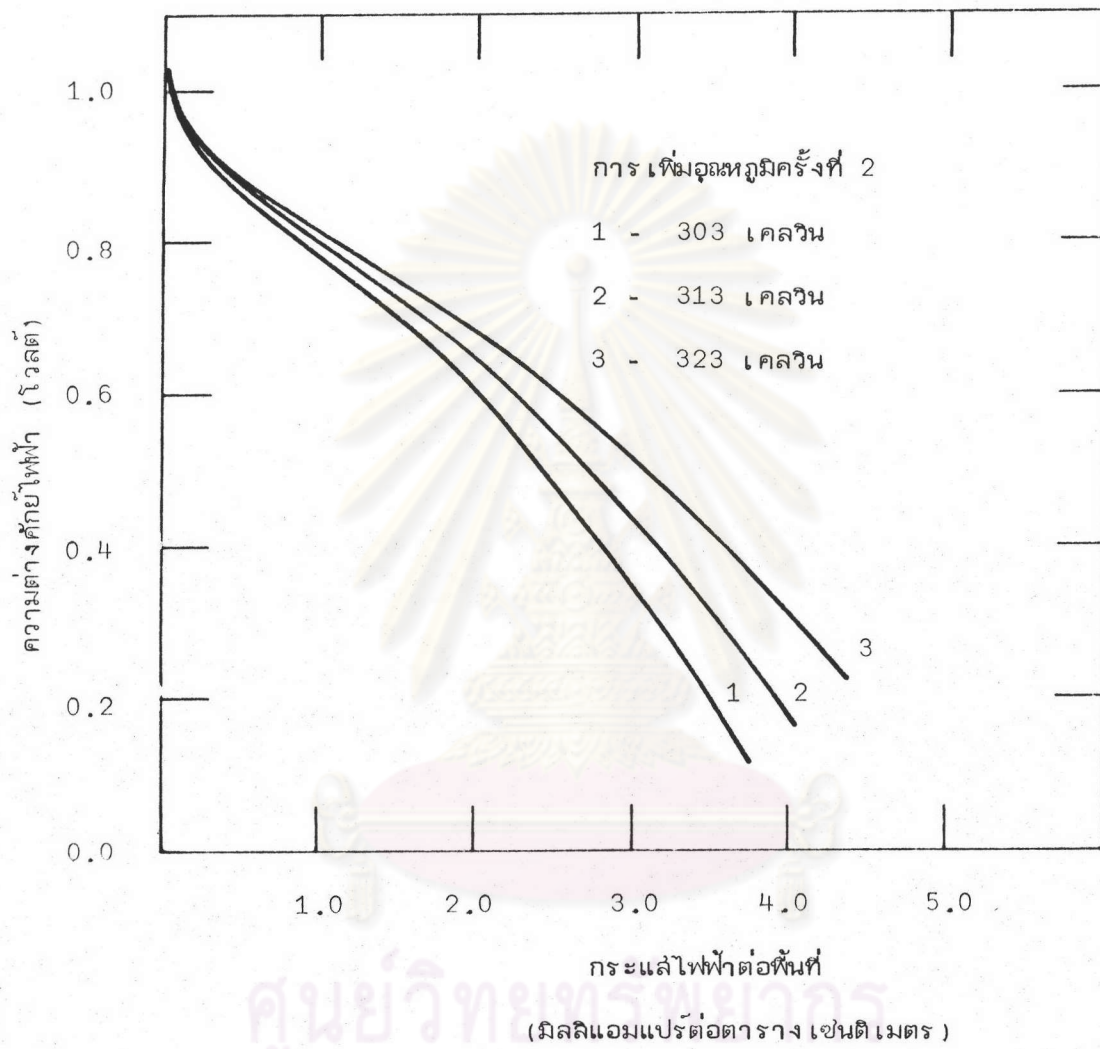
รูปที่ 4.8 (ข)

กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยน

อออน เมื่อลดอุณหภูมิโดยผ่านการเพิ่มอุณหภูมิมา 1 ครั้ง

1) อุณหภูมิ 324 เคลวิน 2) อุณหภูมิ 313 เคลวิน

3) อุณหภูมิ 304 เคลวิน



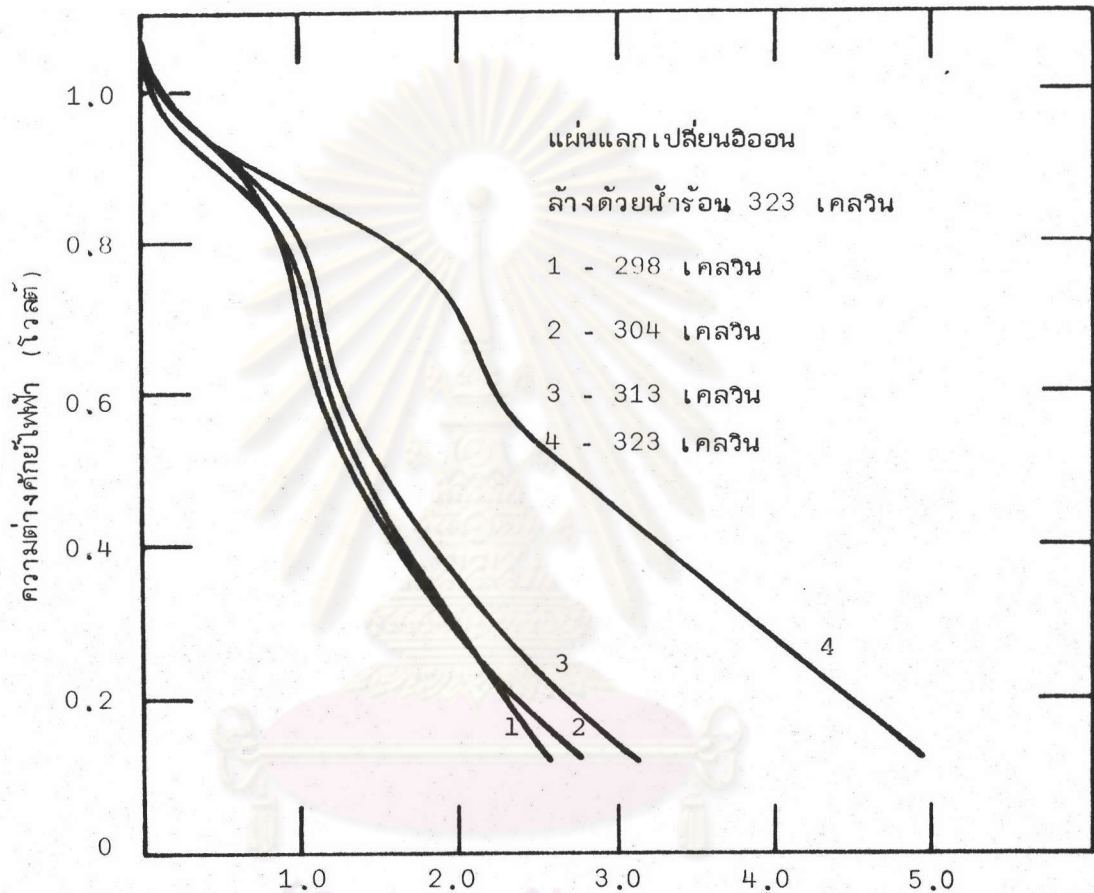
รูปที่ 4.8 (ค)

กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยผ่านการเพิ่มและลดอุณหภูมิมาแล้ว

1) อุณหภูมิ 303 เคลวิน 2) อุณหภูมิ 313 เคลวิน

3) อุณหภูมิ 323 เคลวิน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อล้างแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนด้วยน้ำร้อน 323 เคลวิน
โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก 1) อุณหภูมิ 298 เคลวิน
2) อุณหภูมิ 304 เคลวิน 3) อุณหภูมิ 313 เคลวิน
4) อุณหภูมิ 323 เคลวิน

ล้างออกหมดแล้ว แต่ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน กรดในแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเริ่มสามารถละลายออกมาได้ ซึ่งทำให้เซลล์ให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

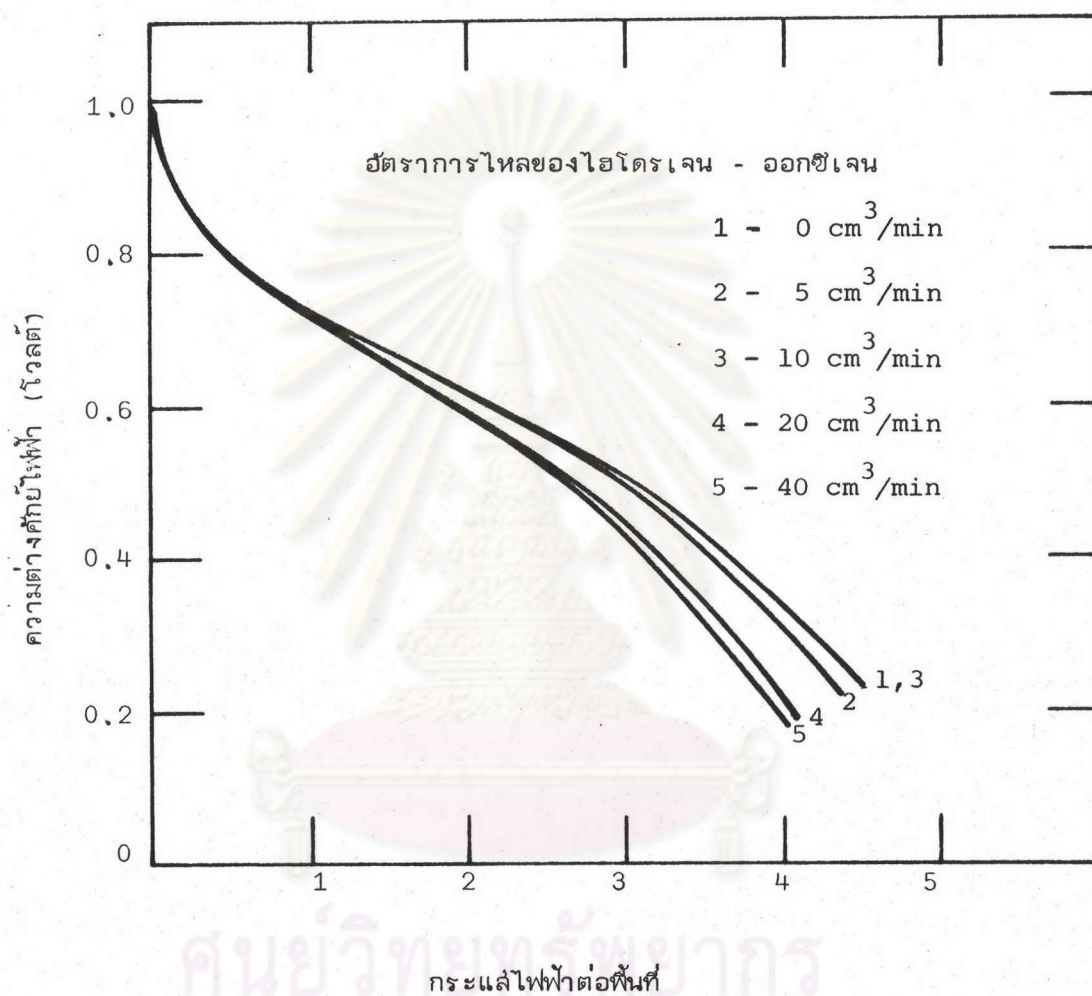
จากผลการทดลองทั้งสองส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิในช่วง 298 เคลวิน ถึง 323 เคลวิน มีผลโดยตรงต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนน้อย แต่ผลโดยอ้อมแล้วจะทำให้กรดในแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนละลายออกมาได้ง่ายขึ้นมีผลให้เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนมีพลังงานสูงขึ้น

4.5 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส ทั้งไฮโดรเจนและออกซิเจน ไม่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแต่อย่างใด ดังกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 0 จนถึง 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ทั้งนี้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนเท่ากันเสมอ จากกราฟดังกล่าวจะเห็นว่าที่อัตราการไหลของแก๊ส 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที, 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที กราฟโพลาริเซชันถือได้ว่าไม่ต่างกันเลย ส่วนที่อัตราการไหลของแก๊ส 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที กราฟโพลาริเซชันตกลงเล็กน้อย เพราะได้มีการเติมน้ำลงในเซลล์ก่อนการทดลอง 2 กราฟหลังนี้เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้งเกินไป ซึ่งทำให้พื้นที่ขั้วไฟลดลง ซึ่งสรุปได้ว่าอัตราการไหลของแก๊สไม่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนโดยตรง ดังนั้นแก๊สที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนจึงไม่จำเป็นต้องมีเครื่องบีบแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แก๊สหนึ่งกับเซลล์ที่ใช้งานตลอดเวลาอาจจะต้องเปิดให้แก๊สไหลทั้งบ้างเป็นครั้งคราว เช่น วันละ 1 - 2 นาที เพื่อไล่พวกแก๊สเฉื่อยที่อาจจะมึบปมมากับแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจน (Cairns, E.J., et al., 1961)

4.6 ผลการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดส์

นอกจากการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวออกซิไดส์แล้ว เรายังสามารถใช้ออกซิเจนจากอากาศเป็นตัวออกซิไดส์ได้โดยการสูบน้ำอากาศผ่านลงไปใต้น้ำให้อากาศชื้นแล้วค่อยปล่อยให้



(มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

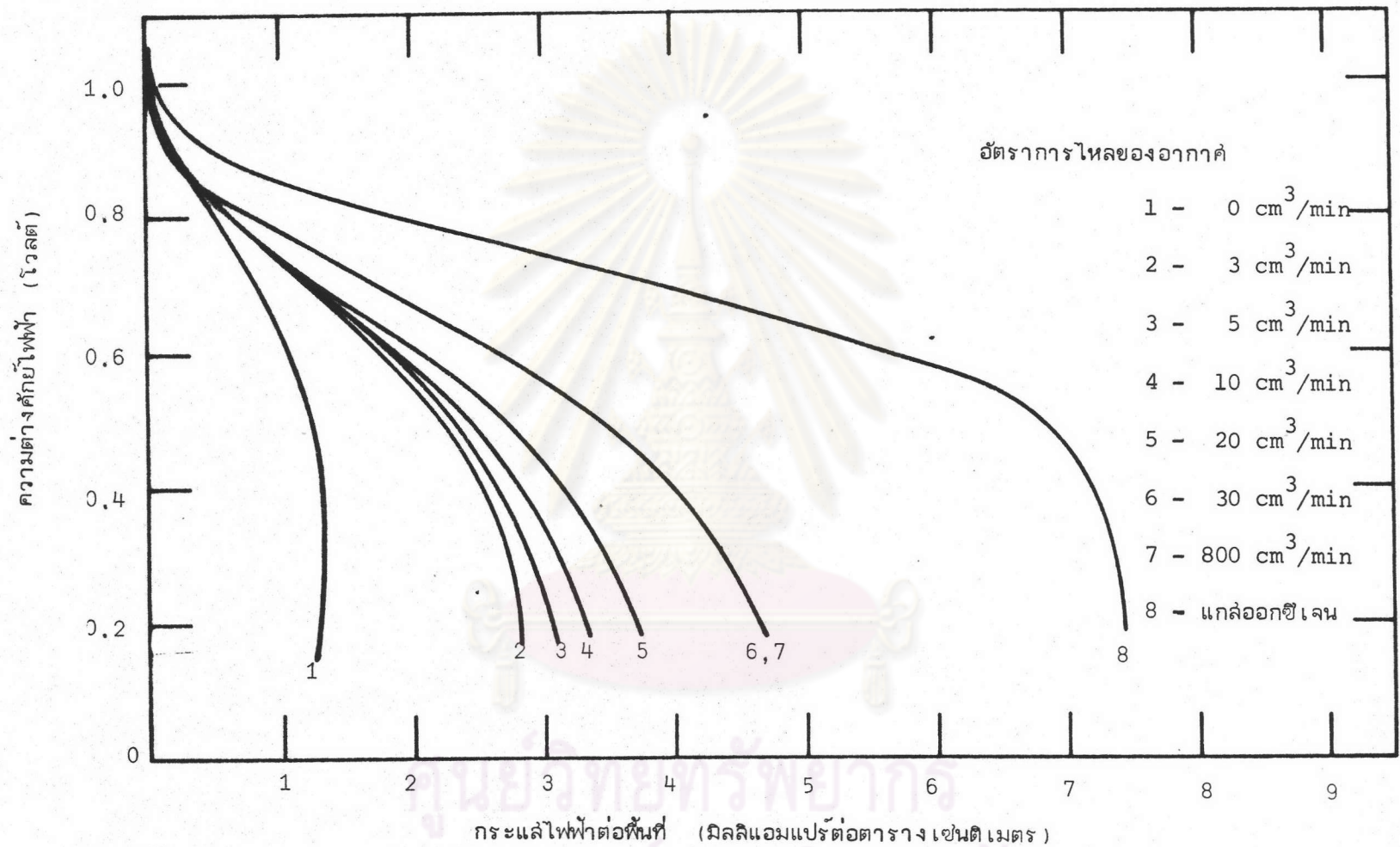
รูปที่ 4.10

กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการผลิตของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน
เท่า ๆ กัน โดย 1) 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

2) 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 3) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4) 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ

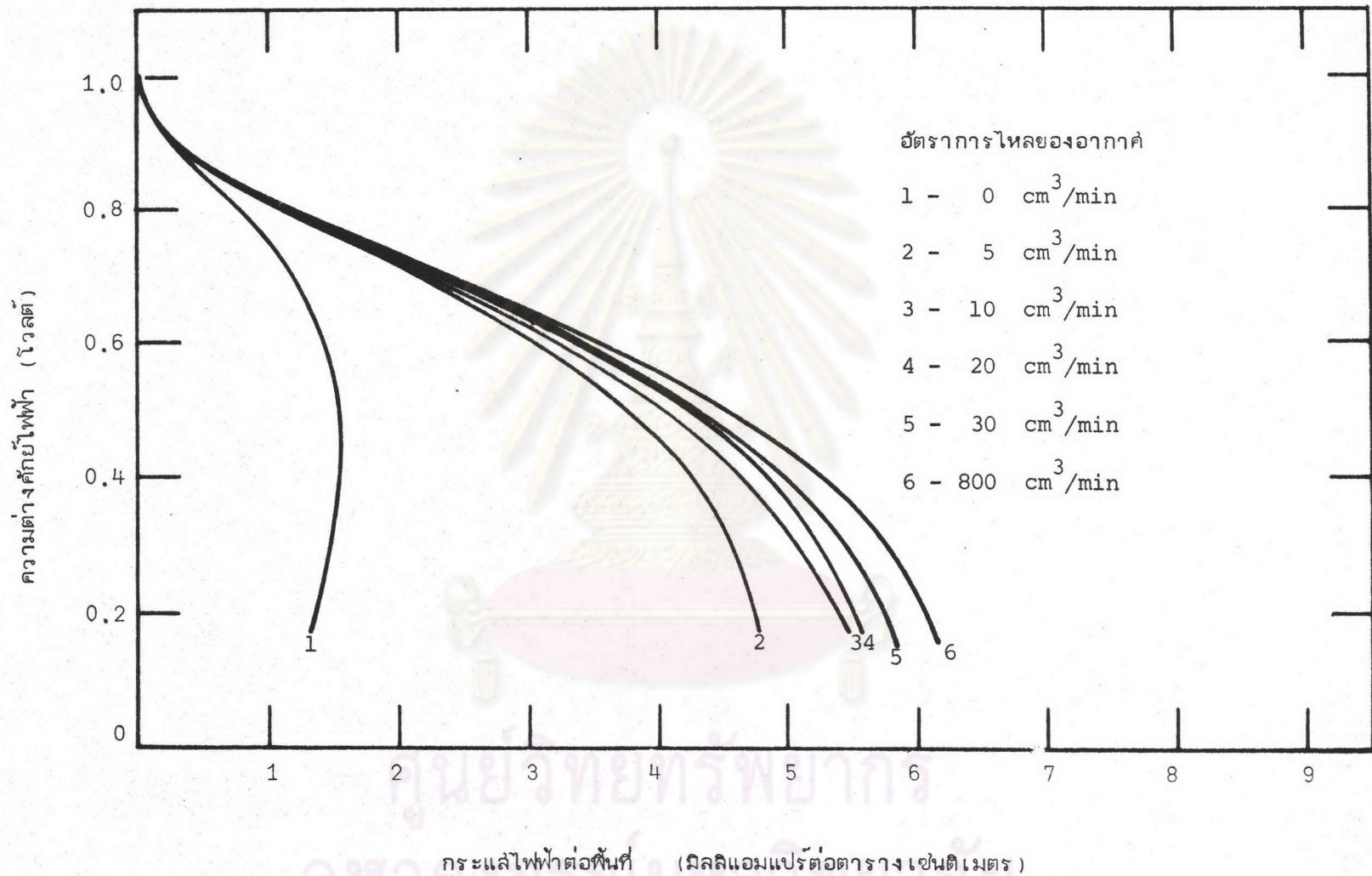
5) 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.11 กราฟโพลาริเซชันของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่ปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟริกความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร

โดยมีอากาศเป็นตัวออกซิไดส์ และแก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับอากาศไหลด้วยอัตราต่างกัน คือ

- 1) 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 2) 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 3) 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
 4) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 5) 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 6) 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
 7) 800 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 8) ใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวออกซิไดส์ โดยไม่มีการไหลแต่อย่างใด



รูปที่ 4.12 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง ปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร โดยมีอากาศเป็นตัวออกซิไดส์ และแก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง สำหรับอากาศไหลด้วยอัตราต่าง ๆ กัน คือ

1) 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 2) 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 3) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4) 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 5) 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที 6) 800 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

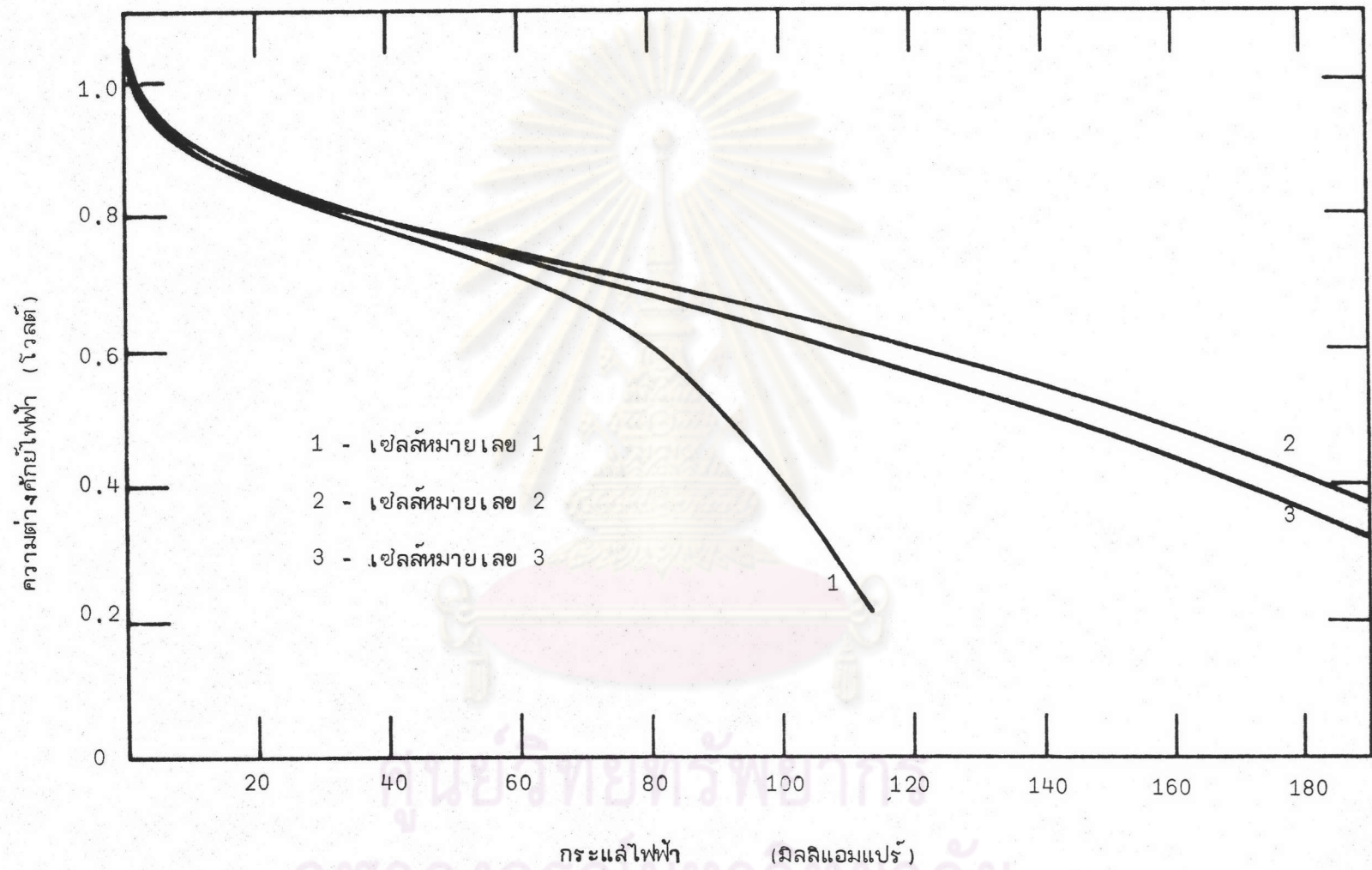
ไหลเข้าเซลล์ ส่วนเฮลิโพลิงยังคงเป็นแก๊สไฮโดรเจนเช่นเดิม การทำเช่นนี้จะทำให้
 ประหยัดค่าแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์แต่ก็ต้องสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการสู้อากาศเข้า เซลล์
 ดังจะเห็นได้จากกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ว่าอัตราการไหลของ
 อากาศที่เหมาะสมคือ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ถ้าอัตราการไหลของอากาศน้อย
 กว่านี้จะทำให้แก๊สออกซิเจนเข้าไปยังขั้วไฟฟ้าไม่เพียงพอหรือเกิดโพลาริเซชันความเข้มข้น
 ของแก๊สขึ้น โดยเฉพาะเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเป็น 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
 กราฟจะตกอย่างมากจนเห็นได้ชัดเจน อย่างไรก็ตามการสูบลำให้อากาศไหลเวียนจะทำให้
 เกิดปัญหาแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้งได้ง่าย อาจแก้ไขได้โดยการเติมน้ำลงในห้องแก๊สที่
 มีอากาศไหลก็ช่วยได้อย่างดี

4.7 ผลของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเข้าด้วยกันแบบขนาน

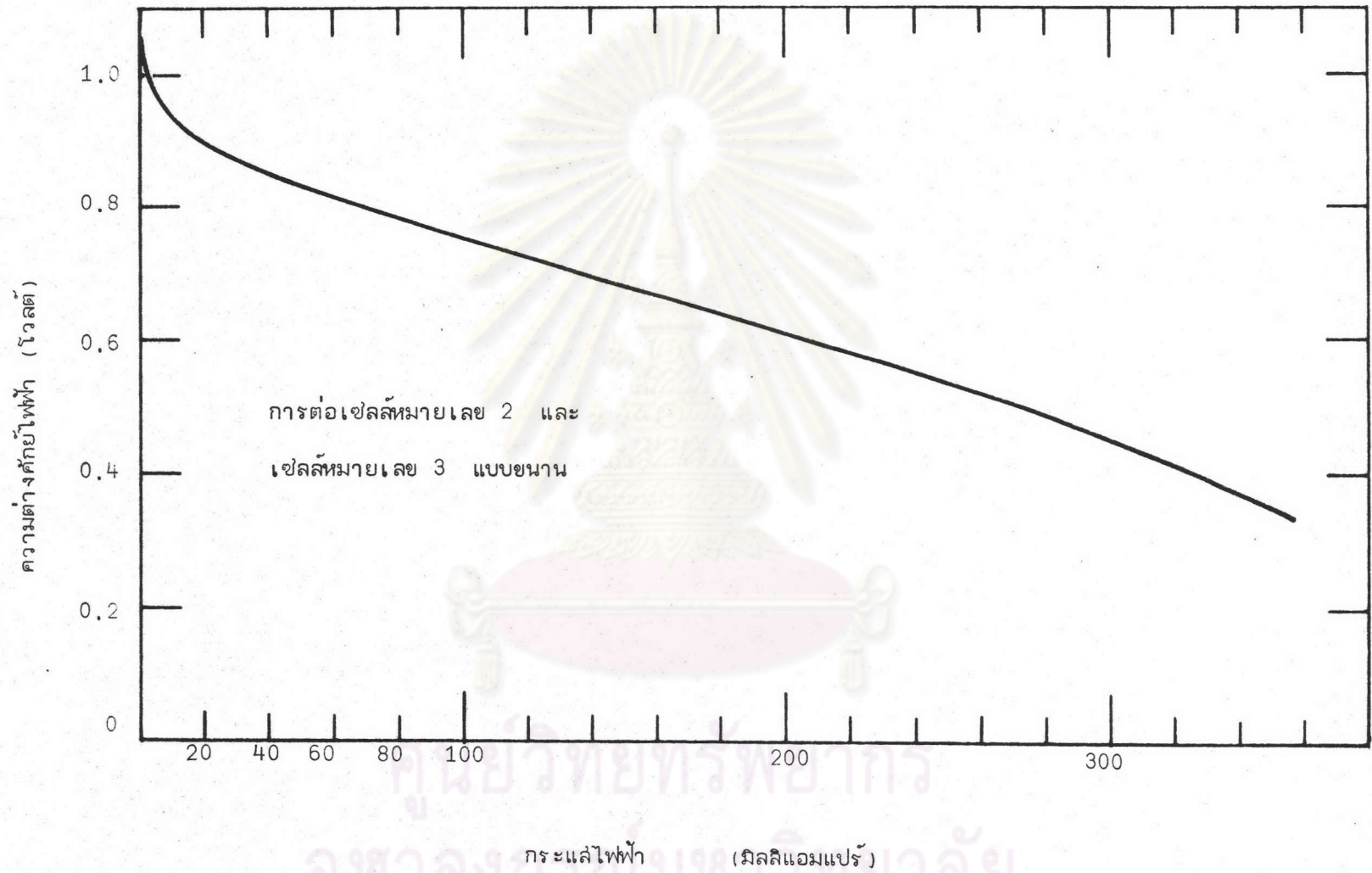
การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อขนานกัน เพื่อเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น
 เพราะพื้นที่ขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การทดลองได้ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบ 3 เซลล์ ซึ่งประกอบ
 เข้าด้วยกันเพื่อความสะดวกจะขอเรียกว่าเซลล์หมายเลข 1 สำหรับเซลล์ซึ่งประกอบจากขั้ว
 ไฟฟ้าหมายเลข 29 และขั้วไฟฟ้าหมายเลข 27 โดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบาง,
 เซลล์หมายเลข 2 สำหรับเซลล์ซึ่งประกอบจากขั้วไฟฟ้าหมายเลข 26 และขั้วไฟฟ้าหมายเลข
 30 โดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา และเซลล์หมายเลข 3 สำหรับเซลล์ซึ่ง
 ประกอบจากขั้วไฟฟ้าหมายเลข 19 และขั้วไฟฟ้าหมายเลข 20 โดยใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
 หนา กราฟโพลาริเซชันของแต่ละเซลล์เป็นดังรูปที่ 4.13

4.7.1 ผลของการต่อแบบขนาน 2 เซลล์

การต่อขนานกัน 2 เซลล์ เลือกจากเซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข
 3 ซึ่งมีลักษณะกราฟโพลาริเซชันใกล้เคียงกันมาก ทั้งยังเป็นเซลล์แบบเดียวกันด้วย
 คือใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา ผลการนำเซลล์ทั้งสองมาต่อขนานกันเป็นดังกราฟรูปที่ 4.14
 ซึ่งปรากฏว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ เป็นไปตามกฎการต่อเซลล์ไฟฟ้าแบบ
 ขนาน กล่าวคือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบเซลล์เดี่ยว และกระแสไฟฟ้าเป็นผลรวมของ
 กระแสไฟฟ้าที่ได้จากแต่ละเซลล์ ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าแกนกระแสไฟฟ้าในกราฟรูปที่
 4.13 เป็นครึ่งหนึ่งของแกนกระแสไฟฟ้าในกราฟรูปที่ 4.14 โดยเส้นกราฟในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 กราฟโวลตาโรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน แบบ 3 เซลล์ ประกอบกัน
 กราฟแต่ละเส้นหมายถึงแต่ละเซลล์ โดย 1) เซลล์หมายเลข 1 2) เซลล์หมายเลข 2
 3) เซลล์หมายเลข 3



รูปที่ 4.14 กราฟโพลาร์เซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 2 เซลล์ ต่อขนานกัน โดยใช้เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3

เกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกับกราฟของเซลล์หมายเลข 3 (ซึ่งถือว่ามีสมบัติไม่ต่างกับกับเซลล์หมายเลข 2) อันเป็นการแสดงว่าการนำเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนอออน 2 เซลล์มาต่อขนานกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ของเซลล์เดี่ยวที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกัน

4.7.2 ผลการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่อขนาน 3 เซลล์

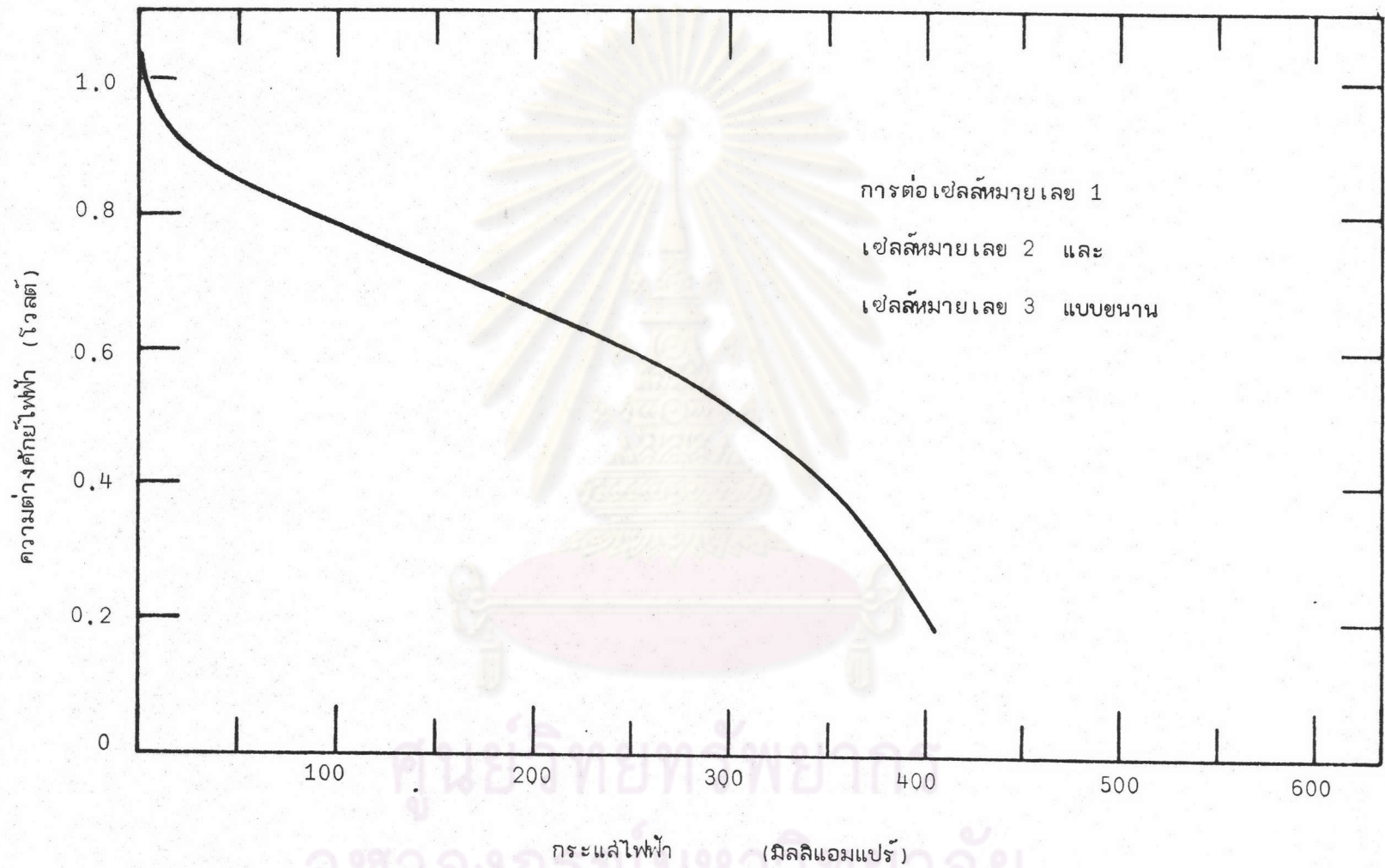
การต่อขนาน 3 เซลล์เป็นการทดลองต่อเซลล์หมายเลข 1, เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 แบบขนาน โดยเซลล์หมายเลข 1 มีความสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าเซลล์อื่น ๆ ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 4.13 ผลของการต่อ 3 เซลล์ขนานกันแสดงด้วยกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าทำให้ได้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น แต่ยังไม่มากเท่าที่ควร รายละเอียดดูได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการต่อขนาน 3 เซลล์ มีค่าประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ของค่ากระแสไฟฟ้ารวมจากเซลล์เดี่ยว เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเซลล์หมายเลข 1 กักส่งไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์ที่เหลืออีก 2 เซลล์ ทำให้กระแสจาก 2 เซลล์รวมกันแล้วไหลย้อนเข้าไปในเซลล์หมายเลข 1 เป็นเหตุให้เซลล์หมายเลข 1 ประพฤติตัวเสมือนความต้านทาน โดยให้กักส่งไฟฟ้าได้ไม่เต็มที่

4.8 ผลของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนอออนเข้าด้วยกันแบบอนุกรม

ในกรณีที่ต้องการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น เราสามารถกระทำได้โดยใช้เซลล์มาต่ออนุกรมเข้าด้วยกันหลายเซลล์ โดยในที่นี้จะมีการแสดงผลของการต่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนอออนเข้าด้วยกันแบบอนุกรม โดยมีทั้งการต่ออนุกรม 2 เซลล์ และต่ออนุกรม 3 เซลล์ โดยใช้เซลล์หมายเลข 1, เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 ซึ่งมีลักษณะสมบัติแสดงไว้ด้วยกราฟโพลาริเซชันตามรูปที่ 4.13

4.8.1 ผลของการต่อแบบอนุกรม 2 เซลล์

การต่ออนุกรม 2 เซลล์ เป็นการทดลองต่อเซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 เข้าด้วยกันแบบอนุกรม ซึ่ง 2 เซลล์นี้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกันเป็นไปตามกราฟรูปที่ 4.13 ผลของการต่ออนุกรมแสดงด้วยกราฟโพลาริเซชันในรูปที่ 4.16



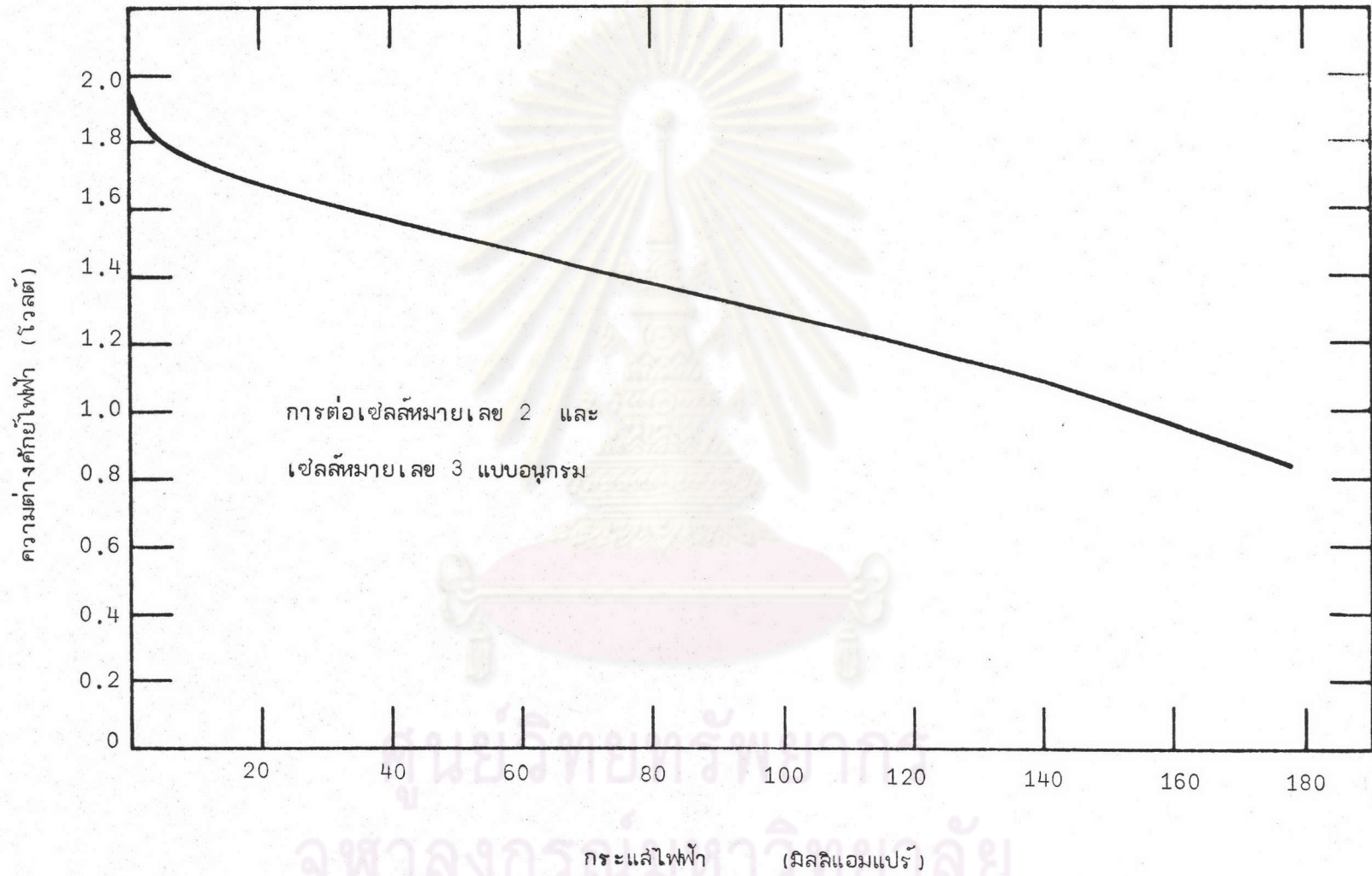
รูปที่ 4.15 กราฟโพลาริเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน จำนวน 3 เซลล์ต่อขนานกัน โดยใช้เซลล์หมายเลข 1, เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3

ตารางที่ 4.2

ตารางแสดงกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากการต่อเซลล์แบบขนาน 3 เซลล์ เปรียบเทียบกับ
กระแสไฟฟ้าจากแต่ละเซลล์

ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	เซลล์หมายเลข 1	เซลล์หมายเลข 2	เซลล์หมายเลข 3	ผลรวมของ กระแสไฟฟ้า ทั้ง 3 เซลล์ (มิลลิแอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า ได้จากการต่อ ขนาน 3 เซลล์ (มิลลิแอมแปร์)	อัตราส่วน ของกระแส ไฟฟ้าที่ได้รับ เทียบกับ เซลล์เดี่ยว
	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)			
1.0	0.8	0.5	1.2	2.5	1.67	0.67
0.9	10.0	10	12.2	32.2	23.33	0.78
0.8	32.0	35.5	36.5	104.00	85.00	0.82
0.7	62.5	80.0	73.0	215.5	168.33	0.78
0.6	81.0	120.0	113.0	314.0	250.00	0.80
0.5	91.8	155.5	142.0	389.3	306.67	0.79
0.4	100.2	183.0	170.5	453.7	348.33	0.77
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับเทียบกับเซลล์เดี่ยวโดยเฉลี่ย						0.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

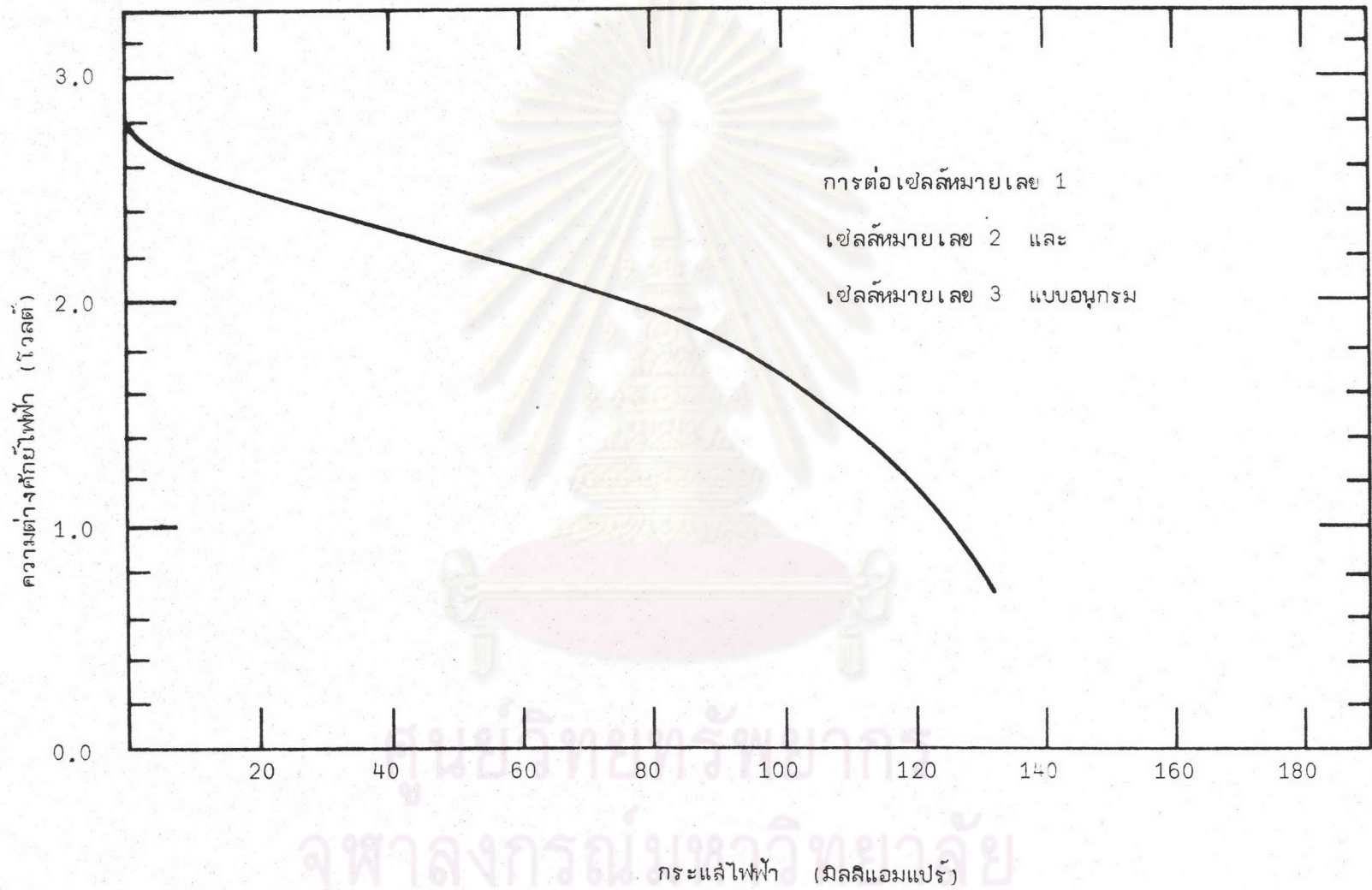


รูปที่ 4.16 กราฟโพลลาไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน 2 เซลล์ ต่ออนุกรมกัน โดยใช้เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3

ปรากฏว่าช่วงกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 20 มิลลิแอมแปร์ขึ้นไปจนถึงกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ผลการทดลองสอดคล้องกับกฎการต่อเซลล์ไฟฟ้าแบบอนุกรม กล่าวคือ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าค่าเดียวกับกระแสไฟฟ้าเซลล์เดียว ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่อนุกรมกันอยู่เท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เดียว ส่วนช่วงที่กระแสน้อยกว่า 20 มิลลิแอมแปร์จนถึงกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ปรากฏว่าความต่างศักย์น้อยกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดเนื่องจากเซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 ใช้ห้องแกสไฮโดรเจนร่วมกัน ซึ่งในห้องแกสนี้จะเติมกรดซัลฟริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรไว้เล็กน้อยเพื่อป้องกันแผ่นแลกเปลี่ยนอิออนแห้ง ทำให้ขั้วลบของทั้งสองเซลล์ต่อเข้าด้วยกันด้วยกรดซัลฟริกซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์หมายเลข 3 ลดลง เป็นผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ต่ออนุกรมลดลงด้วย แม้ว่าผลนี้มีค่าไม่มากนักโดยเฉพาะเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 20 มิลลิแอมแปร์ แต่เมื่อจำเป็นต่ออนุกรมจึงควรจะต้องเลือกเซลล์ที่ไม่ได้ใช้ห้องแกสร่วมกันซึ่งจะเป็นการประหยัดพลังงาน และเป็นการป้องกันไม่ให้เซลล์บางเซลล์ทำงานมากกว่าเซลล์อื่น ตัวอย่างเช่นในกลุ่มเซลล์เดียวกันต่อขนานกัน แล้วจึงทำการอนุกรมระหว่างกลุ่มเซลล์เป็นต้น

4.8.2 ผลการนำเซลล์เชื้อเพลิงมาต่ออนุกรมกัน 3 เซลล์

การต่ออนุกรม 3 เซลล์ได้จากเซลล์หมายเลข 1, เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.17 ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็นเหมือนกับผลการทดลองต่ออนุกรม 2 เซลล์ ซึ่งเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสัณฐานระหว่างขั้วลบของเซลล์หมายเลข 2 กับเซลล์หมายเลข 3 และระหว่างขั้วบวกของเซลล์หมายเลข 1 กับเซลล์หมายเลข 2 ทั้งนี้เซลล์หมายเลข 2 และเซลล์หมายเลข 3 ใช้ห้องแกสไฮโดรเจนร่วม และเซลล์หมายเลข 1 กับเซลล์หมายเลข 2 ใช้ห้องแกสออกซิเจนร่วมกัน อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสไฟฟ้าออกจากกลุ่มเซลล์ที่อนุกรมกันอยู่มีค่ามากกว่า 20 มิลลิแอมแปร์ ผลดังกล่าวก็ลดน้อยลงมากดังจะเห็นจากตารางที่ 4.3 โดยตารางดังกล่าวอ่านค่ามาจากรูปที่ 4.13 และกราฟรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าการทำเซลล์ที่มีลักษณะสมบัติต่างกันมาต่ออนุกรมกันจะให้ผลสอดคล้องกับกฎการต่อเซลล์ไฟฟ้า โดยแต่ละเซลล์จะประพฤติตัวแบบเซลล์เดียวโดยเฉพาะเมื่อกระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์มีค่ามากกว่า 20 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 4.17 กราฟโพลาร์ไรเซชันของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน จำนวน 3 เซลล์ต่ออนุกรมกัน โดยใช้เซลล์หมายเลข 1, เซลล์หมายเลข 2, เซลล์หมายเลข 3

ตารางที่ 4.3

ตารางแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้า จากการต่อเซลล์แบบอนุกรม 3 เซลล์ เปรียบเทียบกับความต่างศักย์ที่ได้จากแต่ละเซลล์

กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า, เซลล์ หมายเลข 1	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า, เซลล์ หมายเลข 2	ความต่างศักย์ ไฟฟ้า, เซลล์ หมายเลข 3	ผลรวมของ ความต่างศักย์ ไฟฟ้า	ความต่างศักย์ ไฟฟ้าที่ได้รับ จากการต่อ อนุกรม 3 เซลล์	อัตราส่วนความ ต่างศักย์ที่วัดได้ต่อ ความต่างศักย์ที่ คำนวณจากเซลล์เดี่ยว
0	1.032	1.043	1.052	3.127	2.780	0.889
20	0.845	0.850	0.860	2.555	2.483	0.972
40	0.775	0.790	0.790	2.355	2.295	0.975
60	0.710	0.742	0.733	2.185	2.130	0.975
80	0.605	0.700	0.680	1.985	1.950	0.982
100	0.400	0.655	0.625	1.680	1.650	0.982
120	0.050	0.600	0.565	1.215	1.200	0.988

4.9 ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของ เซลล์ เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

ในการหาค่าประสิทธิภาพของ เซลล์ เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนได้ทำการวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ก่อน แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพรวม

4.9.1 ผลการวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์

การวัดประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ได้จากการวัดปริมาตรเชื้อเพลิงที่ใช้ไป เพื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์โดยประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ หาได้จากสมการ (2.47) คือ

$$\eta_F = \frac{i}{NF \frac{dn}{dt}} \quad (2.47)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณและสอดคล้องกับลักษณะข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงดัดแปลงสมการ (2.47) เป็น

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{i_i + i_f}{2 \times 10^3} \right) \times t \times 22413}{2 \times 1.6021 \times 10^{-19} \times 6.02252 \times 10^{23} \times \left\{ \frac{P(V_i - V_f) \times 273.15}{T} \right\}} \quad (4.1)$$

โดยเริ่มต้นที่เวลา 0 วินาที มีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์ i_i มิลลิแอมแปร์ และปริมาตรแก๊สเริ่มต้นเป็น V_i ลูกบาศก์เซนติเมตร ความดัน P บรรยากาศค่า อุณหภูมิ T เคลวิน เมื่อเวลาผ่านไป t วินาที กระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์เป็น i_f มิลลิแอมแปร์ และปริมาตรแก๊สลดลงเป็น V_f ลูกบาศก์เซนติเมตร ความดัน P บรรยากาศค่า อุณหภูมิ T เคลวิน ทั้งนี้สำหรับแก๊สไฮโดรเจน $N = 2$ และแก๊สไฮโดรเจน 1 โมล มีปริมาตร 22413 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่า n ของฟาราเดย์ (F) เท่ากับ $1.6021 \times 10^{-19} \times 6.02252 \times 10^{23}$ คูลอมบ์ต่อโมล

โดยการโปรแกรมสมการ (4.1) ลงในเครื่องคำนวณอิเลกทรอนิกส์ รุ่น 97 ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมได้เสนอไว้ในภาคผนวก เมื่อใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองลงไปในเครื่องคำนวณก็จะได้อัตราประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ ผลการคำนวณ

ได้เล่นอไว้ในภาคผนวกเช่นกัน ส่วนในที่นี้จะแสดง เฉพาะค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ โดยเฉลี่ยของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนาและแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางที่ อุณหภูมิต่าง ๆ ดังปรากฏในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4

ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์โดยเฉลี่ย ของ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา และแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ชนิดแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ โดยเฉลี่ย
หนา (CR61 AZL389)	298	0.9446
หนา (CR61 AZL389)	308	0.9198
หนา (CR61 AZL389)	313	0.8995
หนา (CR61 AZL389)	323	0.9086
บาง (CR61 AZL386)	298	0.9284
บาง (CR61 AZL386)	303	0.9047
บาง (CR61 AZL386)	313	0.9302
บาง (CR61 AZL386)	323	0.9157
ค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์โดยเฉลี่ย		0.9189

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ($\pm 3\%$) แสดงว่าประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ขึ้นกับอุณหภูมิ หรือรูปแบบของเซลล์อย่างไม่เด่นชัด อีกประการหนึ่งคือ แก๊สสามารถซึมผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อย เมื่อเทียบกับแก๊สที่ใช้ในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5

ตารางแสดงผลการวัดอัตราการรั่วซึมของแก๊สไฮโดรเจนผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนหนา (CR61 AZL389)

อัตราการรั่วซึมของ แก๊สไฮโดรเจน ($\text{cm}^3/\text{hr}/\text{cm}^2$)	กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่สอดคล้องกับอัตรา การรั่วซึม (mA/cm^2)
0.0409	0.0979
0.0332	0.0795
0.0269	0.0643
เฉลี่ย 0.0337	0.0806

ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์ ได้จากค่าเฉลี่ยในตารางที่ 4.4 คือ 0.9189 ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปคำนวณประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต่อไป

4.9.2 ประสิทธิภาพรวม

ประสิทธิภาพรวมคำนวณได้จากสูตร (2.51)

$$\eta_o = \eta_F \cdot \eta_V \cdot \eta_T \quad (2.51)$$

โดย η_F เป็นประสิทธิภาพแบบฟาราเดย์ = 0.9189 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.9.1 และ η_T เป็นประสิทธิภาพเชิงความร้อน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์ แต่การเปลี่ยนแปลงของ η_T ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานนี้ไม่มากนัก

ดังจะเห็นจากกราฟของประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับอุณหภูมิในบทที่ 2 ส่วนค่า η_V

หรือประสิทธิภาพของศักย์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ขณะใช้งานและค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์

ดังนั้นโดยอาศัยค่า η_F ซึ่งเท่ากับ 0.9189, ค่า η_T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในภาคผนวก และค่า η_V ตามสมการ (2.48) คือ

$$\eta_V = \frac{V}{E} \quad (2.48)$$

โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ อยู่ในภาคผนวก เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.51) ก็จะได้ค่าประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิและความต่างศักย์ใช้งานต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) ลดลงเป็นผลให้ η_V มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการลดของ η_T น้อย ส่วนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานสูง ประสิทธิภาพรวมจะมีค่าสูง เพราะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานสูง ค่า η_V เพิ่มขึ้นมาก กล่าวโดยสรุปแล้วหากต้องการให้เซลล์เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพรวมสูง ก็ควรใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ส่วนอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพน้อยพอที่จะไม่ต้องนำมาพิจารณาาร่วมด้วย

4.10 ผลการทดสอบอายุการใช้งาน

การทดสอบอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน แยกเป็น 2 พวก คือ พวกที่หนึ่งเป็นเซลล์ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสถานะมีอยู่ 3 เซลล์ด้วยกัน พวกที่สองเป็นเซลล์ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสมดุล ซึ่งมี 3 เซลล์เช่นกัน

การทดสอบอายุการใช้งานทำโดยการต่อความต้านทานแบบกล่องและมิลลิแอมมิเตอร์อนุกรมเข้ากับเซลล์ จากนั้นจึงปรับค่าความต้านทานให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เป็น 0.5 โวลต์ ซึ่งถือว่าเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานสำหรับเซลล์พวกที่หนึ่ง ส่วนเซลล์พวกที่สองปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานเป็น 0.7 โวลต์

ตารางที่ 4.6

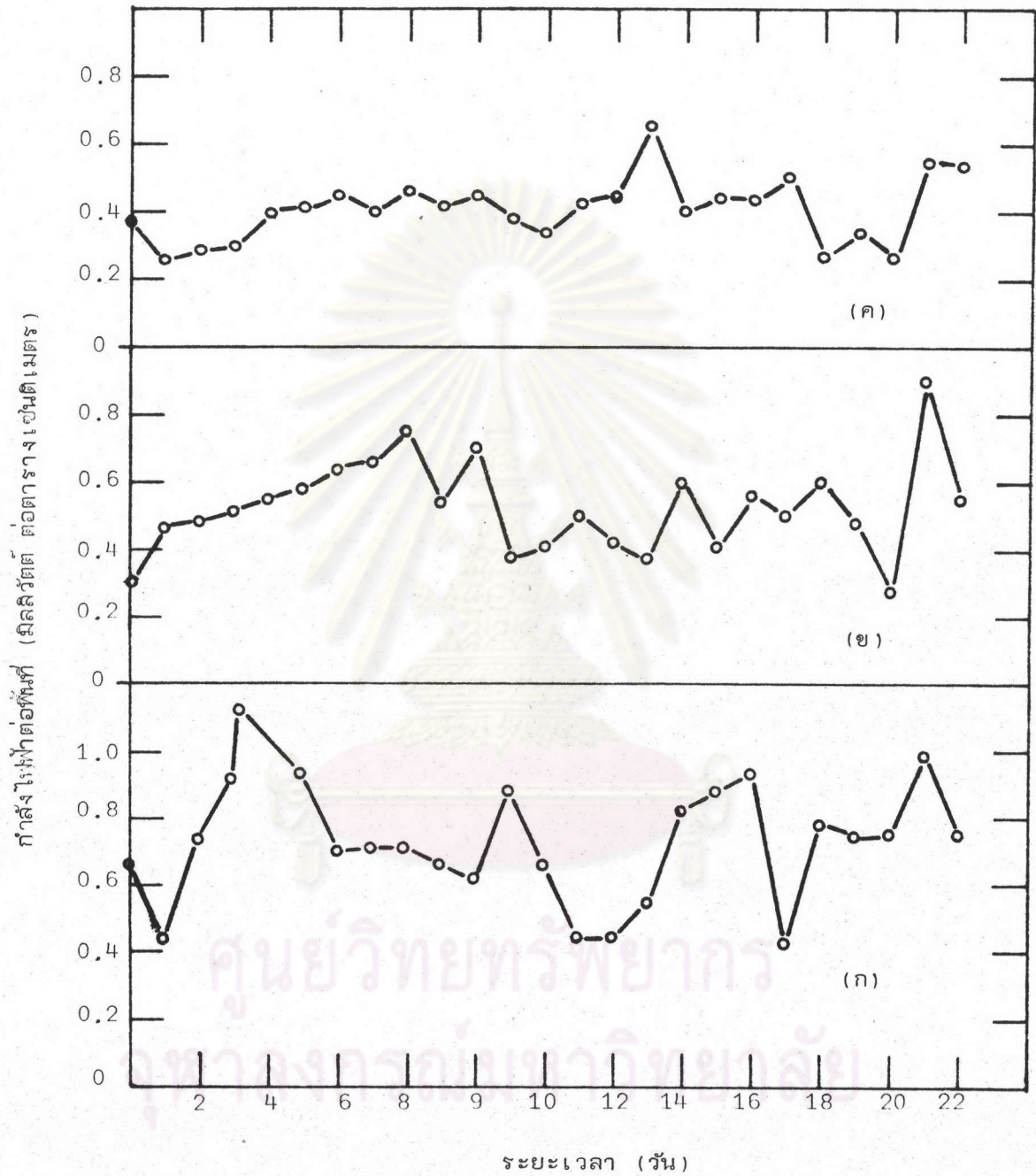
ตารางแสดงประสิทธิภาพรวมของเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนที่อุณหภูมิและความต่างศักย์ไฟฟ้าใช้งานต่าง ๆ

ความต่างศักย์ ไฟฟ้า (โวลต์)	อุณหภูมิ (เคลวิน)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
293	0.0620	0.1240	0.1860	0.2480	0.3100	0.3720	0.4340	0.4960	0.5580	0.6200	0.6820	0.7440
298	0.0620	0.1241	0.1861	0.2481	0.3101	0.3722	0.4342	0.4963	0.5583	0.6204	0.6823	0.7444
303	0.0621	0.1242	0.1862	0.2482	0.3103	0.3724	0.4345	0.4966	0.5586	0.6207	0.6827	0.7448
308	0.0621	0.1242	0.1864	0.2484	0.3105	0.3726	0.4347	0.4968	0.5590	0.6211	0.6831	0.7452
313	0.0622	0.1243	0.1865	0.2485	0.3105	0.3728	0.4350	0.4971	0.5593	0.6214	0.6835	0.7456
318	0.0622	0.1244	0.1866	0.2486	0.3108	0.3730	0.4352	0.4974	0.5596	0.6217	0.6839	0.7468
323	0.622	0.1244	0.1867	0.2488	0.3110	0.3732	0.4355	0.4977	0.5599	0.6220	0.6842	0.7465
328	0.0623	0.1245	0.1868	0.2489	0.3112	0.3734	0.4357	0.4980	0.5602	0.6224	0.6846	0.7469
333	0.0623	0.1246	0.1869	0.2491	0.3114	0.3736	0.4359	0.4982	0.5605	0.6227	0.6850	0.7473

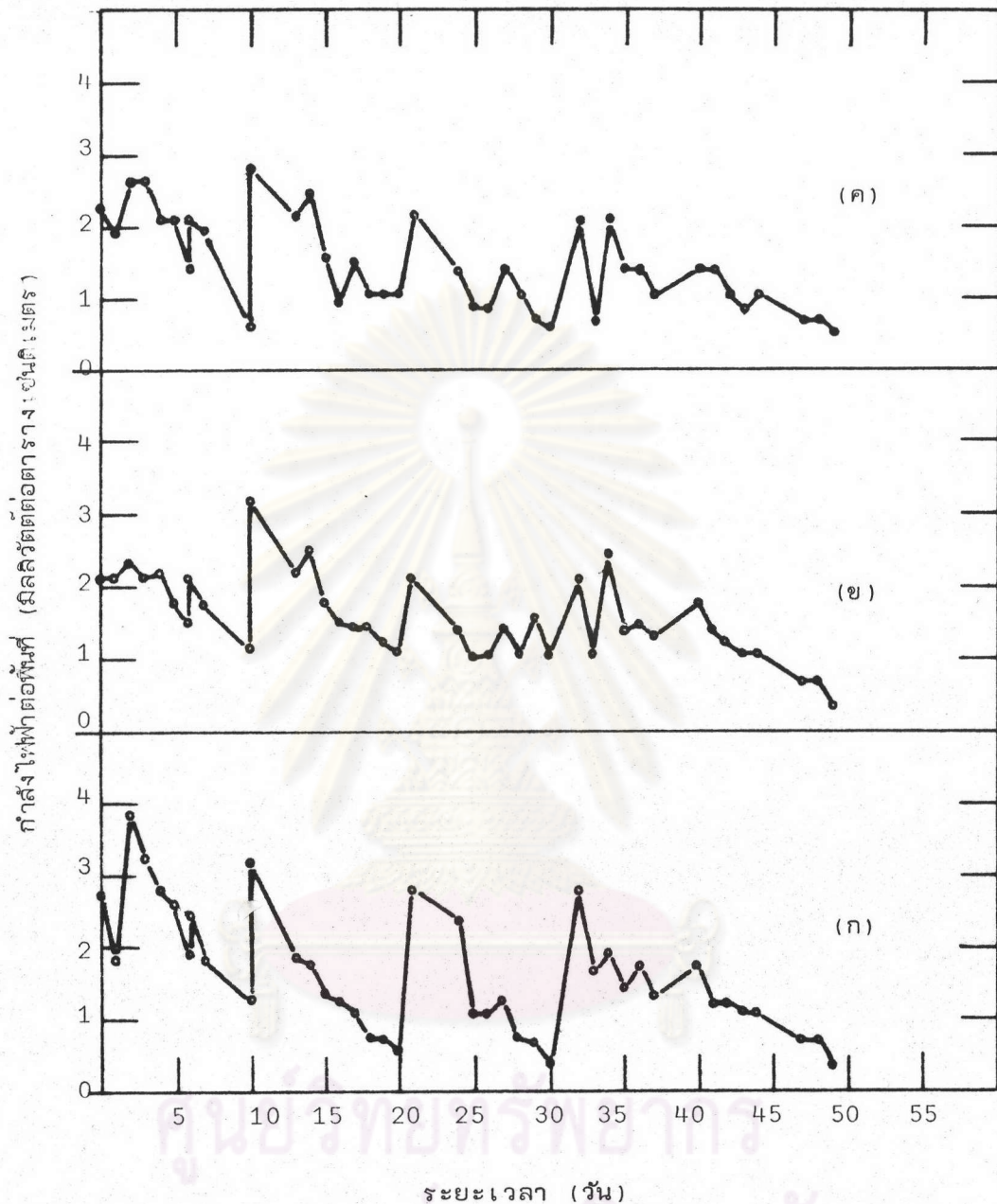
การบันทึกผลการทดลองได้ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า ใช้งานทุกวัน สำหรับพวกที่ลองเพิ่มการวัดกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ ด้วย

ผลการทดลองได้แสดงด้วยกราฟของกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ขั้วไฟฟ้าและอายุการใช้งาน โดยพวกแรกทำการทดสอบใช้ระยะเวลา 1 เดือน พบว่าพลังงานที่ได้รับมีค่าต่ำมาก และไม่คงที่ดังกราฟทดสอบอายุในรูปที่ 4.18 สาเหตุเพราะแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้งเนื่องจากอิเล็กโทรออสโมซิสพลังงานจึงลดลง เมื่อเติมน้ำลงไปจะช่วยให้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนน้ำไฟฟ้าได้ดีขึ้น แต่พื้นที่ขั้วไฟฟ้าก็น้อยลง แต่ก็ยังดีกว่าแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้ง สาเหตุที่ทดสอบได้เพียง 1 เดือน เพราะมีโอกาสดจากเซลล์ที่ใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแบบปรับสมดุล เข้ามาในเซลล์ที่ทำการทดสอบอายุ ซึ่งใช้ท่อแก๊สร่วมกันอยู่ ดังจะเห็นได้จากกราฟทดสอบอายุของเซลล์หมายเลข 1 และเซลล์หมายเลข 2 ในวันที่ 25 ซึ่งกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงหยุดการทดสอบอายุเพียงแค่นี้ จากนั้นจึงนำแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนไปปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร แล้วจึงนำมาทดสอบอายุอีกครั้ง ดังกราฟทดสอบอายุในรูปที่ 4.19 - 4.20 ผลคือเกิดปัญหาแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนแห้งเนื่องจากอิเล็กโทรออสโมซิส (electroosmosis) เล่มอ จึงจำเป็นต้องเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ลงไปอยู่เล่มอเมื่อเห็นว่ากำลังไฟฟ้าลดลง จึงทำให้ผลการทดลองเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยปกติแล้วจะเติมทุกสัปดาห์

จากผลการทดลองดังกล่าวยังไม่อาจจะสรุปได้ว่าอายุของเซลล์เชื้อเพลิงควรจะเป็นเท่าใดแน่นอน เพราะยังไม่สามารถแก้ปัญหาการเกิดอิเล็กโทรออสโมซิสได้ แต่ก็ควรจะมากกว่าระยะเวลาที่ทำการทดลองคือ 3 เดือนมาก เพราะเมื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นก็สามารถใช้งานได้อีกเป็นเช่นนี้เล่มอ แต่จากผลการทดลองของ Cairns, E.J., Douglas, D.L., และ Niedrach, L.W. (1961) พบว่ามีอายุการใช้งานมากกว่า 400 วัน ซึ่งก็มากพอสมควร สาเหตุส่วนใหญ่อายุการใช้งานจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุของแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนเป็นสำคัญ



รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน
 ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสถานะด้วยกรดซัลฟริก 3.85 โมลต่อลิตร
 (ก) เซลล์หมายเลข 1 (ข) เซลล์หมายเลข 2 (ค) เซลล์
 หมายเลข 3 (หมายเหตุ วันที่ 1, 4, 6, 16, 20 มีการถอดเซลล์,
 วันที่ 4, 6 มีการเปลี่ยนแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบางในเซลล์หมายเลข 1
 และวันที่ 18 มีน้ำเข้าเซลล์)



รูปที่ 4.19

แสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน

ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลิตร

โดยมีความต่างศักย์ใช้งานที่ 0.7 โวลต์ (ก) เซลล์หมายเลข 1

(ข) เซลล์หมายเลข 2 (ค) เซลล์หมายเลข 3 (หมายเหตุ

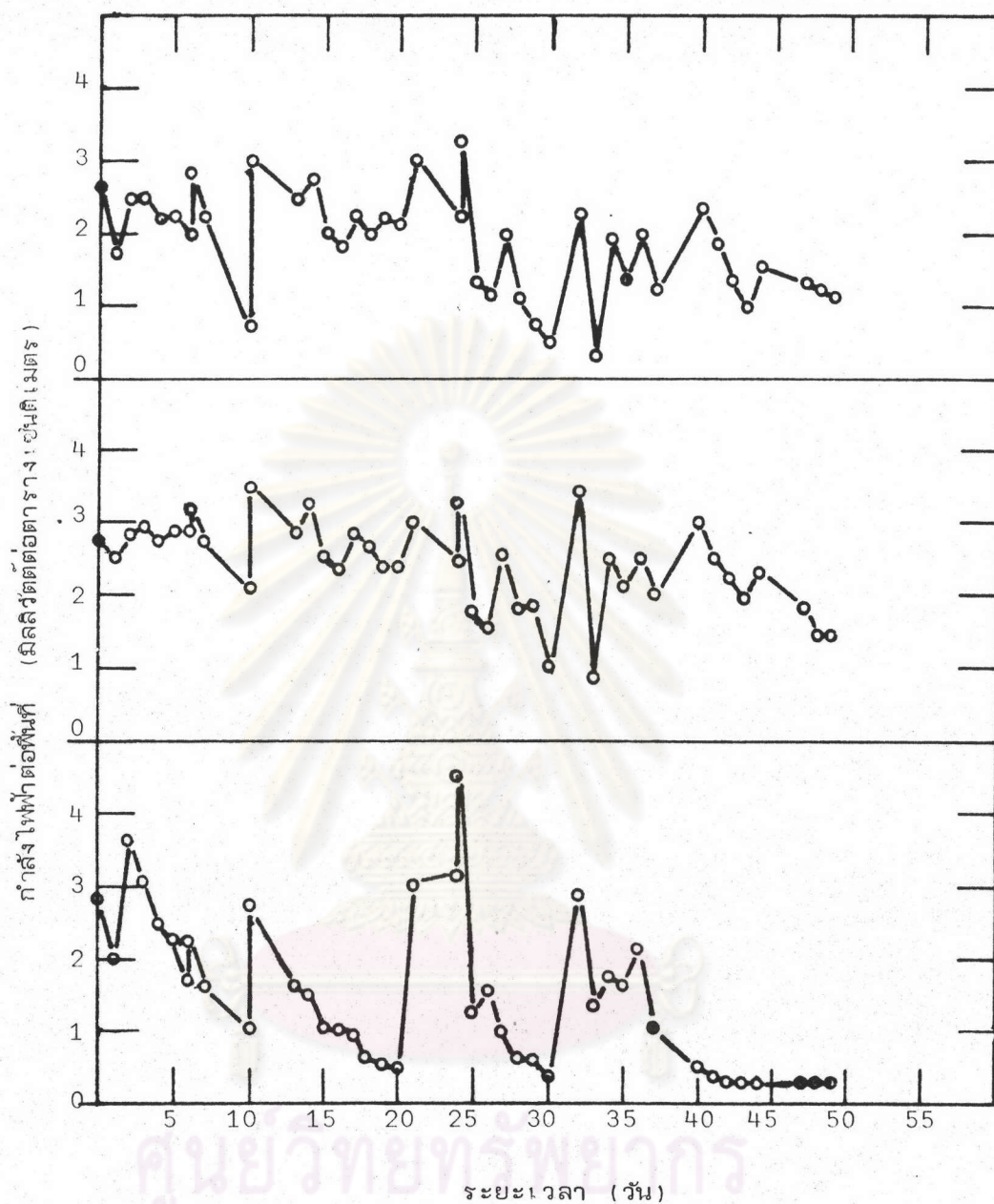
วันที่ 2, 4, 6, 14, 21 มีการล้างเซลล์ด้วยกรด, วันที่ 1 มีการ

เติมกรด, วันที่ 3, 27, 40 กรดถูกดูดเข้าเซลล์, วันที่ 21 มีการ

เปลี่ยนขั้วไฟฟ้าข้างไอโตรเจนในเซลล์หมายเลข 1 โดยเปลี่ยนเป็นขั้ว

ไฟฟ้าหมายเลข 33 แทนขั้วไฟฟ้าหมายเลข 29, วันที่ 31 ปล่องกรด

เข้าเต็มเซลล์หยุดใช้งาน 1 วัน



รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบอายุเซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งใช้แผ่นแลกเปลี่ยนไอออนปรับสมดุลด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลิตร โดยมีความต่างศักย์ใช้งาน 0.7 โวลต์ แต่กำลังไฟฟ้าที่ได้วัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ (ก) เซลล์หมายเลข 1 (ข) เซลล์หมายเลข 2 (ค) เซลล์หมายเลข 3 (หมายเหตุ, วันที่ 2, 4, 6, 14, 21 มีการล้างเซลล์ด้วยกรด, วันที่ 1 มีการเติมกรด, วันที่ 3, 27, 40 กรดถูกดูดเข้าเซลล์, วันที่ 21 มีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าข้างไอโตรเจนในเซลล์หมายเลข 1 โดยเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าหมายเลข 33 แทนขั้วไฟฟ้าหมายเลข 29, วันที่ 31 ปล่องกรดเข้าเติมเซลล์หยุดใช้งาน 1 วัน)