

# การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ พอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ในรูปแบบท่อส่งก๊าซพาณิชย์ที่ แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT

เสนอ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

10

โดย

ผศ.ดร. ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส

### กิตติกรรมประกาศ

ุกุก โ น โ ล ฮั ๅ ฦ ุกุก โ น โ ล ฮั ๅ ฦ ะ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนโครงการนี้ภายใต้เลขที่

โครงการ 1408/A003

T

ณัฐพล ลิ้มจีระจรัส

STITUTE OF

# สารบัญ

	หัวข้อ	หน้า
	กิตติกรรมประกาศ	୩
	สารบัญ	ନ
	สารบัญตาราง	จ
	สารบัญภาพ	ฎ
	1 ขายน้ำ	1
	1 0 การเร็าคัญและที่บาของการวิจัย	1
	1.1 การกลุระสาด์ของการวิฉัย	1
	1.2 งหมุ่บ งะมหายขาย 1 งาบ	4
	1.5 ขยายขายจาการรงยาย 1.4 ของประมัยเหตุ เพื่อออก่าวอยู่ได้รับ	
	1.4 พฤษาสะเอชนุทศาศาสารธรรม	
	1.5 แผนการงับ	°
	2 มารศกษาวรรณกรรม	1
iC		
	2 วะเกถกายางก	
	3.1 เลอกขอบเขตงาน	
	3.2 การพฒนาแบบจาลอง	16
	3.3 การเทียบผลแบบจำลอง	21
	3.4 คำนวณแบบจำลองในรูปแบบท่อส่งก้าซอื่น	21
	3.5 วิเคราะ <mark>ห์ผล</mark>	22
- Y		
	4 ผลและการวิเคราะ <mark>ห์</mark>	23
	4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	23
	<ol> <li>4.2 ใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา</li> </ol>	24
	4.3 ใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา	27
	5 สราโผลการวิจัย	32



## สารบัญตาราง

ตาราง	19	หน้า
1.1	แผนการวิจัย	
3.1	ขนาดรูปทรงต่างๆในแบบจำลอง	17
3.2	เงื่อนไขขอบ	
	n í u Í a æ 7 n	e E.

STITUTE OF

# สารบัญรูป

ຽປ	หน้า
1.1	กราฟ IV แสดงผลคำตอบเทียบกันระหว่างการทดลอง และการคำนวณเชิงตัวเลข
1.2	ความนิยมของท่อส่งก๊าซแบบต่างๆ ในงานวิจัยในอดีต
1.3	การกระจายตัวของมวล ไฮโดรเจนในฝั่งแอโนดของ ท่อส่งก๊าซแบบ (ก) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว
	(ข) ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ (ค) เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ (ง) ขนานชนิดแซดชด
1.4	ท่อส่งก๊าซแบบ (ก) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว (ข) เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ (ค) เซอร์เพนไทน์ 5 ท่อ
	(ง) ขนานชนิดแซด (จ) ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ (ฉ) ขนานต่ออนุกรม 5 ท่อ
3.1	เปรียบเทียบการวิเคราะห์ความเป็นอิสระต่อเมช
4.1	การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองเมื่อใช้ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว
4.2	กราฟสมรรถภาพของท่อส่งก๊าซที่แตกต่างกันทั้ง 6 แบบ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำ
	ปฏิกิริยา
4.3	การกระจายตัวของปริมาณน้ำภายในเมมเบรนของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว
	b) เซอร์เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f)
	ขนานต่ออนุกรมแบบห้าท่อ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา
4.4	การกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อ
	เดี่ยว b) เซอร์เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ
	f) ขนานต่ออนุกรมแบบห้าท่อ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา
4.5	ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัว
	ทำปฏิกิริยา
4.6	ความดันตก <mark>เ</mark> มื่อใช้ <mark>ออกซิ</mark> เจนเป็นตัว <mark>ทำปฏ</mark> ิกิริยา <mark>.</mark>
4.7	กราฟสมรรถภาพข <mark>องท่</mark> อส่งก๊าซที่แ <mark>ต</mark> กต่า <mark>งกันทั้ง</mark> 6 <mark>แบบ ภ<mark>ายใต้</mark>การใช้อากาศเป็นตัวทำ 🕘</mark>
	ปฏิกิริยา
4.8	การกระจายตัวขอ <mark>งออก</mark> ซิเจนของ ท <mark>่อ</mark> ส่งก๊าซแบบ a) เซอร์ <mark>เพนไ</mark> ทน์ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพนไทน์
	สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรมแบบ
	้ห้าท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา
4.9	การกระจายตัวของน้ำในฝั่งแคโทดของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพน
	ไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรม
	แบบห้าท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา

iC

- 4.12 ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนภายใต้การใช้อากาศเป็นตัว ทำปฏิกิริยา
   31

TC

ช

# บทที่ 1

#### บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

76

ในปัจจุบันคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ เครื่องแปลงพลังงานที่แปลงเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ คาร์บอนไดออกไซด์นั้นส่งผลกระทบให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานและ เครื่องแปลงพลังงานชนิดใหม่จึงกลายมาเป็นหัวข้อวิจัยที่สำคัญ ท่ามกลางเครื่องแปลงพลังงานที่ได้รับ ความคาดหวัง เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีไปเป้นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยตรง ได้รับการยอมรับว่าเป็นหนึ่งในเครื่องแปลงพลังงานที่ได้รับการคาดหวังมากที่สุด เนื่องจาก เซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดทางอุณหพลศาสตร์อย่าง วัฏจักรคาร์โนต์ เหมือนดังเครื่อง แปลงพลังงานที่แปลงเชื้อเพลิงดึกดำบรรพ์ และ ท่ามกลางเซลล์เชื้อเพลิงหลากหลายชนิด เซลล์ เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ได้รับความสนใจว่าเป็นคู่แข่งที่แข็งแรงที่สุดในการเป็นเครื่อง แปลงพลังงานทางเลือกสำหรับการใช้งานทั้งในอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้ และอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้ เนื่องจากประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สูง ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อุณหภูมิ และความดันในการทำงานที่ต่ำ มีความหนาแน่นของกำลังที่สูง และเสียงในการทำงานนั้นเบา

ในการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ นั้น ก๊าซไฮโดรเจนจะถูก ป้อนเข้าทางท่อก๊าซฝั่งแอโนด ในขณะที่ก๊าซออกซิเจนจะถูกป้อนเข้าทางท่อก๊าซฝั่งแคโทด ซึ่งก๊าซทั้ง สองจะแพร่ผ่านชั้นการแพร่ของก๊าซ แล้วไปเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในชั้นเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนรูป พลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่อิเล็กตรอนที่ฝั่งแอโนดจะไหลผ่านแผ่นสองขั้วไปสู่วงจร ภายนอกและกลับไปสู่ฝั่งแคโทดเพื่อรวมตัวกับ โปรตอน และออกซิเจนเป็นน้ำต่อไป

ถึงแม้ว่า เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ จะเป็นหนึ่งในเครื่องแปลงพลังงานที่ ได้รับการคาดหวังมากที่สุดดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวยังต้องได้รับการ พัฒนาอีกมากก่อนที่จะสามารถเข้าไปแข่งขันในตลาดพลังงานได้ เนื่องจากปัญหาอุปสรรคทาง เทคโนโลยีเช่น ความทนทานของเซลล์เป็นต้น เพื่อที่จะข้ามผ่านอุปสรรคดังกล่าว การศึกษาเซลล์ เชื้อเพลิงผ่านทั้งการทดลอง (Experimental Analysis, EA) และการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย คอมพิวเตอร์ (Numerical Simulation, NS) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากที่จะทำให้ผู้วิจัยได้ เข้าใจในธรรมชาติ และการประพฤติตัวของเซลล์เชื้อเพลิง แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย คอมพิวเตอร์ยังต้องอาศัยการศึกษาผ่านทั้งการทดลองควบคู่กันไปด้วย เพื่อยืนยันความแม่นยำของผล คำตอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะทำการตรวจสอบผลคำตอบของการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ ด้วย กราฟ IV ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กราฟ IV แสดงผลคำตอบเทียบกันระหว่างการทดลอง และการคำนวณเชิงตัวเลข โดยที่หนึ่งในตัวประกอบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงดัง กล่าวคือ ลักษณะรูปร่างของท่อส่งก๊าซ ซึ่งท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ (Serpentine) เป็นท่อที่ได้รับ ความนิยมการในวิจัยสูงสุดเนื่องจากมีรูปร่างลักษณะที่ง่าย และให้กำลังที่ดี ในขณะที่ท่อส่งก๊าซแบบ ขนานต่ออนุกรม (Parallel in series) ซึ่งเป็นท่อส่งก๊าซที่มีขายทั่วไปดังเช่น FC-05-20 ของบริษัท Electrochem กลับได้รับ<mark>ความ</mark>สนใจในงานวิจัยลักษณะดั<mark>งก</mark>ล่าวที่ต่ำกว่ามากดังแสดงในรูปที่ 1.2 [1]

TC

ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของการขนส่ง (Transport behaviour) (ดังแสดงในรูปที่ 1.3) ของท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรม โดยที่ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะ ทำให้มีความเข้าใจที่ดีขึ้นในลักษณะพฤติกรรมการขนส่งและความสามารถของท่อส่งก๊าซที่แตกต่าง กัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อไปในอนาคตสำหรับการออกแบบท่อส่งก๊าซต่อไป โดยทั้งนี้ใน ท้ายที่สุดแล้วสามารถทราบการใช้งานที่เหมาะสมของท่อส่งก๊าซแบบต่างๆ ได้



รูปที่ 1.3 การกระจายตัวของมวล ไฮโดรเจนในฝั่งแอโนดของ ท่อส่งก๊าซแบบ (ก) เซอร์เพนไทน์ท่อ เดี่ยว (ข) ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ (ค) เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ (ง) ขนานชนิดแซด 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อทำนายสมรรถนะของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ขนาด 5 ตาราง เซนติเมตร ซึ่งมีท่อส่งก๊าซที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 6 แบบ (ดังแสดงในรูปที่ 1.4)
- เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมการกระจายตัวของ น้ำ อุณหภูมิ และก๊าซชนิดต่างๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีท่อ ส่งก๊าซที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 6 แบบ ซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการทดลอง
- 1.3 ขอบเขตของการวิจัย (ระบุขอบเขตของงานวิจัยให้ครอบคลุม ดังต่อไปนี้)
  - การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์นั้นกระทำผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT
  - ผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะถูกตรวจสอบ
     ความถูกต้องกับผลการทดลอง ด้วย I-V Polarization curve
  - แบบจำลองที่จะสร้างขึ้นคือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีท่อส่งก๊าซที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 6 แบบ (ดูรูปที่ 1.4)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

10

- ทราบสมรรถนะของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ขนาด 5 ตาราง เซนติเมตร ซึ่งมีท่อส่งก๊าซที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 6 แบบ ผ่านการคำนวณเชิงตัวเลข ด้วยคอมพิวเตอร์
- เข้าใจลักษณะพฤติกรรมการขนส่ง เช่น น้ำ อุณหภูมิ และก๊าซชนิดต่างๆ ภายในเซลล์
   เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีท่อส่งก๊าซที่มี
   รูปแบบแตกต่างกัน 6 แบบ
- สามารถทราบการใช้งานที่เหมาะสมของท่อส่งก๊าซแบบต่างๆ ได้

ผลงานวิชาการที่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการ / วารสาร ระดับชาติ / นานาชาติ อย่าง น้อย 1 ผ<mark>ลงาน</mark>



รูปที่ 1.4 ท่อส่งก๊าซแบบ (ก) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว (ข) เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ (ค) เซอร์เพนไทน์ 5 ท่อ (ง) ขนานชนิดแซด (จ) ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ (ฉ) ขนานต่ออนุกรม 5 ท่อ

T

VSTITUTE OF

#### 1.5 แผนการวิจัย

T

ตาราง 1.1 แผนการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย				20	)14					2015	;	
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
1. ทบทวนวรรณกรรม												
2. พัฒนาแบบจำลอง		C		37	7							
<ol> <li>เทียบผลลัพธ์ระหว่างการทดลองและ</li> <li>ผลที่ได้จากแบบจำลอง</li> </ol>						~ ~	ŝ					
4. ทำการคำนวณในแบบจำลองอื่นๆ									ふ			
5. วิเคราะห์ผล												
6. สรุปผล												
7. ตีพิมพ์ผลงานวิจัย												

STITUTE O

### บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของก๊าซตัวทำปฏิกิริยาถูกยอมรับว่าเป็นผลกระทบหลักต่อ สมรรถนะ และประสิทธิภาพของเซลล์ เนื่องจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของก๊าซตัวทำปฏิกิริยา นำไปสู่การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และการสร้างตัว ของน้ำ ซึ่งจะช่วยลดการเสื่อมสภาพของเซลล์ ในทางตรงกันข้าม การกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ของกาซตัวทำปฏิกิริยานำไปสู่การกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และความเค้นเชิงกลในหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า (Membrane Electrode Assembly) ซึ่งเป็น สาเหตุหนึ่งของการเสื่อมสภาพของเซลล์ เนื่องด้วยเหตุผลดังทึกล่าวมานี้รูปแบบท่อส่งก๊าซจึงเป็น ปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากลักษณะหน้าที่ที่ใช้ในการส่งก๊าซตัวทำปฏิกิริยาไปสู่ชั้นเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยัง ช่วยนำน้ำส่วนเกินที่จะทำให้เกิดน้ำท่วมในเซลล์ออกมาจากเซลล์อีกด้วย โดยที่ Manso และคณะ [1] ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่วิจัยรูปแบบของท่อส่งก๊าซ และแบ่งตัวแปรทางกายภาพของท่อส่งก๊าซ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรม และสมรรถนะของเซลล์ออกเป็น 8 ประเภทคือ 1. รูปแบบท่อส่งก๊าซ 2. ทิศทางการไหลของก๊าซ 3.จำนวนท่อและความยาวท่อก๊าซ 4.การใช้แผ่นกั้นขวางทิศทางการไหลของ ก๊าซ 5.รูปร่างหน้าตัดของท่อ 6.ความกว้างของท่อและสันท่อ 7.ความลึกของท่อ 8.อัตราส่วนความ ลึกต่อความกว้างของหน้าตัดท่อ

หลังจากการศึกษางานวิจัยแล้วพบว่า รูปทรงของท่อส่งก๊าซนั้นมีหลากหลายแบบ ท่อส่งก๊าซ แบบเซอร์เพนไทน์ ได้รับความนิยมสูงที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เป็นพาณิชย์แล้ว ซึ่งได้ยอมรับกัน อย่างแพร่หลายว่าให้สมรรถนะที่ดี และที่มากไปกว่านั้นคือการมีลักษณะที่เรียบง่ายอีกด้วย ในทาง ตรงกันข้ามรูปแบบท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมกันนั้น ได้รับความสนใจในงานวิจัยรูปแบบท่อส่ง ก๊าซน้อยมากทั้งที่เป็นรูปแบบที่เป็นพาณิชย์แล้ว การอภิปรายในงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม การขนส่งของท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมจะนำเสนอต่อไปนี้

(

Lopez และคณะ [2] ได้สร้างการทุดลองเพื่อที่จะศึกษาเรื่องการจัดการน้ำระหว่างท่อส่งก๊าซ 2 แบบ คือ แบบขนานต่ออนุกรม และ แบบคาสเคด (Cascade) ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ อิเล็กโตรไลท์ โดยที่เพื่อจะให้สามารถสังเกตพฤติกรรมดังกล่าวได้ คณะผู้วิจัยจึงสร้างแผ่นสองขั้ว ขึ้นมาจากพลาสติกใส ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงนี้จึงสามารถทำงานได้แค่เพียงช่วงความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้าที่ต่ำเท่านั้น (ต่ำกว่า 0.1 A cm<sup>-2</sup>) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้ทำแผ่นสองขั้วนั้นไม่ สามารถใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีความสามารถในการนำทั้งไฟฟ้า และความร้อนที่ต่ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่านี่คือข้อจำกัดในการทำการทดลอง ซึ่งการคำนวณเชิงตัวเลขโดยคอมพิวเตอร์จะ สามารถเข้ามามีบทบาทสำคัญในการศึกษาวิจัยในหัวข้อดังกล่าวได้ การวิเคราะห์เชิงตัวเลขในผลกระทบของทิศทางการไหลของก๊าซต่อสมรรถนะและพฤติกรรม การขนส่งของท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT นั้นทำโดย Sierra และคณะ [3] ในขณะที่ Lu และ Reddy [4] ศึกษาสมรรถนะของท่อส่ง ก๊าซที่แตกต่างกัน 4 แบบใน เซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็กผ่านการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย แบบขนาน ต่ออนุกรม 3 ท่อ แบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว แบบขนานต่ออนุกรม 2 ท่อ และแบบขนานชนิดแซด แต่อย่างไรก็ตามทางคณะผู้วิจัยไม่ได้ทำการควบคุมตัวแปรทางกายภาพของท่อส่งก๊าซ ที่ Manso และ คณะ [1] ได้ทำการจำแนกไว้ ทำให้การแปรผลของท่อส่งก๊าซรูปแบบต่างๆอาจผิดเพี้ยนไปได้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยที่รวบรวม และศึกษามานั้น ความเข้าใจในพฤติกรรม และการ ประยุกต์ใช้ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมนั้นยังไม่มีมากเพียงพอที่จะสามารถบอกได้ว่า ท่อส่งก๊าซ แบบดังกล่าวออกแบบมาเพื่อใช้ในงานชนิดใดทั้งที่เป็นท่อส่งก๊าซที่เป็นพาณิชย์

ในงานวิจัยนี้นั้น แบบจำลองแบบสามมิตินั้นจะถูกสร้างขึ้นผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT สมการนาเวียร์สโตกส์ซึ่งรวมถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน นั้นถูกใช้ในการคำนวณเพื่อ หาปรากกการณ์การพา การไหลของความร้อนและของไหล ด้วยกระบวนการเชิงตัวเลขอย่างระเบียบ วิธีไฟไนท์วอลุ่ม โดยสมการดังกล่าวสามารถเขียนได้อยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot \left(\rho\phi\vec{V}\right) = \nabla \cdot \left(\Gamma_{\phi}\nabla\phi\right) + S_{\phi}$$

(2.1)

เมื่อ

φ	=	ปริมาณที่ถูกพา
t	=	เวลา
ρ	=	ความหนาแน่น
$\vec{V}$	=	เว <mark>กเตอร์ความเร</mark> ็ว
$\Gamma_{\phi}$	=	ความส <mark>ามารถในการแพ</mark> ร่ของป <mark>ริมาร</mark> ที่ถูกพา
$S_{\phi}$	=	แหล่งของ $\phi$

สมการอนุรักษ์นี้กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณที่ถูกพา  $\phi$  บวกกับการพาโดย กลไกการพามีค่าเท่ากับการพาโดยกลไกการแพร่บวกแหล่งของ  $\phi$ 

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นถูกจำลองโดยการคำนวณปฏิกิริยาไฮโดรเจนออกซิเดชั่น และ ออกซิเจนรีดักชั่น ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นเร่งปฏิกิริยา สมการของความต่างศักย์ในแบบจำลองนี้ ซึ่งคำนวณ แยกกันระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า และความต่างศักย์โปรตรอน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \sigma_j \nabla \varphi_j + R_j = 0 \tag{2.2}$$

เมื่อ

σ	=	ความสามารถในการนำ	unit: 1/( $\mathbf{\Omega}$ ·m-elec)
φ	=	ความต่างศักย์	unit: V
R	=	กระแสไฟฟ้าถ่ายโอนเชิงปริมาตร	unit: A/m³-elec

# กระแสไฟฟ้าถ่ายโอนเชิงปริมาตรนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ Butler-Volmer

$$R_{an} = \left(\zeta_{an} j_{an}^{ref}\right) \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{an}} \left(e^{\frac{\alpha_{an}F\eta_{an}}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_{cat}F\eta_{an}}{RT}}\right)$$
(2.3)  

$$R_{cat} = \left(\zeta_{cat} j_{cat}^{ref}\right) \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{cat}} \left(-e^{\frac{\alpha_{an}F\eta_{cat}}{RT}} + e^{-\frac{\alpha_{cat}F\eta_{cat}}{RT}}\right)$$
(2.4)

เมื่อ

เมื่อ

j <sup>ref</sup>	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน	unit: A/m <sup>2</sup> -Pt
ζ	=	อัตราส่วนผิวต่อปริมาตรขั้วไฟฟ้า	unit: m <sup>2</sup> -Pt/m <sup>3</sup> -elec
[]	=	ความเข้มข้นของสาร	unit: kmol/m <sup>3</sup>
[] <sub>ref</sub>	=	ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน	unit: kmol/m <sup>3</sup>
γ	=	ตัวยกกำลังความเข้มข้น	
α	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ	
F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์	
η	=	ความศูนย์เสียในการเกิดปฏิกิริยา	unit: V
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซมาตรฐาน	
Т	=	อุณหภูมิ	

# ความศูน<mark>ย์เสีย</mark>ในการเกิดปฏิกิริย<mark>า *ท*ุ สามา</mark>รถเขีย<mark>นได้</mark>ตามสมการต่อไปนี้

	$\eta_{an} = \varphi_{sol} - \varphi_{mem}$		(2.5)
	$\eta_{cat} = \varphi_{sol} - \varphi_{mem} - V_{OC}$		(2.6)
φ =	ความต่างศักย์	unit: V	
$V_{OC} = $	ความต่างศักย์เมื่อวงจรเปิด	unit: V	

รูปโดยทั่วไปของสมการ<mark>อนุรักษ์สารเ</mark>คมี ซึ่งทำนายอัตราส่วนของมวลของสารเคมีใน จุดต่างๆ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{\nu} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$
(2.7)

เมื่อ

 $egin{array}{rcl} Y_i &=& ext{o} ilde{ ext{psi}} ext{stars} ext{stars}$ 

พจน์แหล่งเชิงปริมาตรของสารเคมีในชั้นเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นไปตามสมการข้างล่าง

$S_{H_2} = -\frac{M_{W,H_2}}{2F}R_{an}$	< (	С	(2.8)
$S_{O_2} = -\frac{M_{W,O_2}}{4F}R_{cat}$	< (	С	(2.9)
$S_{H_2O} = \frac{M_{W,H_2O}}{2F} R_{cat}$	> (	0	(2.10)

เมื่อ

10

 $M_W$  = มวลโมเลกุลของสารเคมี unit: kg/kmol

กระแสไฟฟ้ารวมซึ่งถูกสร้างขั้นในชั้นเร่งปฏิกิริยาของทั้งสองฝั่งนั้นต้องเท่ากัน ดังนั้น กระแสไฟฟ้าจึงถูกอนุรักษณ์ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\int_{an} R_{an} dV = \int_{cat} R_{cat} dV$$
 (2.11)

เนื่องจาก<mark>พลัง</mark>งานเคมีทั้งหมดนั้นไม่<mark>สามาร</mark>ถเปลี่ย<mark>นเป็น</mark>พลังงานไฟฟ้าได้อย่าง สมบูรณ์เนื่องจากกำข้อที่ส<mark>องขอ</mark>งเทอร์โมได<mark>น</mark>ามิกส์ ดังนั้<mark>นแ</mark>หล่งคว<mark>ามร้อ</mark>นเชิงปริมาตรจึงสามารถเขียน ได้ดังนี้

 $S_h = h_{react} - R_{an,cat}\eta_{an,cat} + I^2 R_{ohm} + h_l$ (2.12)

h <sub>react</sub>	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี	
		เนื่องจากปฏิกิริยา	unit: J/s
$R_x \eta_x$	=	ผลคูณของกระแสกับความศูนย์	
		เสียในการเกิดปฏิกิริยา	unit: J/s
R <sub>ohm</sub>	=	ความต้านทานของตัวนำ	unit: $oldsymbol{\Omega}$
h <sub>l</sub>	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี	
		เนื่องจากการเปลี่ยนเฟส	unit: J/s

เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ทำงานภายใต้อุณหภูมิต่ำ น้ำอาจจะ กลั่นตัวอยู่ในรูปแบบของเหลวได้ ซึ่งทำให้น้ำนั้นขวางทางเดินของก๊าซ ดังนั้นสมรรถนะของเซลล์จึง ลดลงเนื่องจากผิวทำปฏิกิริยาที่ใช้งานได้นั้นลดลง ซึ่งสมการอนุรักษ์ของน้ำในเฟสของเหลวนั้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_l \vec{V}_l S\right) = r_w \tag{2.13}$$

เมื่อ

10

ſ

$P_l$	=	ความหนาแน่นของนำในเฟสของเหลว	unit: kg/m <sup>3</sup>	
w	=	อัตราส่วนการกลั่นตัว		
	=	ความพรุน		
$\vec{i}_{l}$	=	ความเร็วของน้ำในเฟสของเหลว	unit: m/s	

ค<mark>ว</mark>ามเร็ว<mark>ของ</mark>น้ำในเฟสข<mark>องเหลว</mark>นั้นถูก<mark>ส</mark>มมติให้<mark>เท่า</mark>กับความเร็วของน้ำในเฟสก๊าซ อัตราการกลั่นตัวนั้นถูกจ<mark>ำลองไ</mark>ด้ด้วยสมการ<mark>ดังต่อไปนี้</mark>

$$r_{w} = C_{r} \max(\left[(1-s)\frac{P_{wv}-P_{sat}}{RT}M_{W,H_{2}O}\right], [-s\rho_{l}])$$
(2.14)

เมื่อ

 $C_r =$  ค่าคงตัวของอัตราการกลั่นตัว  $P_{wv} =$  ความดันของไอน้ำ  $P_{sat} =$  ความดันของน้ำอิ่มตัว

unit: N/m<sup>2</sup> unit: N/m<sup>2</sup>

เมื่อ

ถึงแม้ว่าสมการ Stefan-Maxwell จะใช้อธิบายการแพร่ของสารเคมีหลายตัวในชั้น ที่มีรูพรุน ระเบียบวิธีการประมาณแบบเจือจางสามารถให้ผลคำตอบเมื่อสารเคมีนั้นมีเพียง 2 ชนิดได้ ้อย่างแม่นย่ำ ดังนั้นแบบจำลองสำหรับการตรวจสอบผลจะแบบจำลองนั้นจะใช้ระเบียบวิธีการ ประมาณแบบเจือจางซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{J}_k = -\rho D_j \nabla Y_k \tag{2.15}$$

เมื่อ

 $D_j$ 

S

สัมประสิทธิ์การแพร่

$$D_j = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{r_s} D_j^0 (\frac{P_0}{P})^{\gamma_p} (\frac{T}{T_0})^{\gamma_t}$$
(2.16)

เมื่อ

(6

$D_j^0$	=	ความสามารถในการแพร่ของสารเคมี i	
		ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน	unit: m²/s
$P_0$	=	ความดันมาตรฐาน	unit: N/m <sup>2</sup>
$T_0$	=	อุณหภูมิมาตรฐาน	unit: K
Е	=	ความพรุน	
r <sub>s</sub>	=	ตัวยำกำลังของการบล็อกรูพรุน	
S	=	พจน์ความอิ่มตัว	

้อย่างไรก็ตาม เมื่ออากาศถูกใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยา ระเบียบวิธีการประมาณแบบเจือ ้จางไม่สามารถให้ผล<mark>ค</mark>ำตอ<mark>บได้อ</mark>ย่างแ<mark>ม่</mark>นย<mark>ำ ดังนั้น</mark>สมการ <mark>S</mark>tefan-<mark>Max</mark>well ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ จึงถูกใช้

$$\vec{J}_j = -\sum_{k=1}^{N-1} \rho D_{jk} \nabla Y_k - D_{T,j} \frac{\nabla T}{T}$$

(2.17)

เมื่อ

จำนวนชนิดสารเคมี Ν สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารสองชนิด  $D_{ij}$ สัมประสิทธิ์การแพร่ของความร้อน  $D_T$ 

$$D_{ij} = [D] = [A]^{-1}[B]$$
(2.18)

$$A_{ii} = -\left(\frac{X_i}{D_{i,N}} \frac{M_w}{M_{w,N}} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \frac{X_j}{D_{ij}} \frac{M_w}{M_{w,i}}\right)$$
(2.19)

$$A_{ij} = X_i \left( \frac{1}{D_{ij}} \frac{M_w}{M_{w,j}} - \frac{1}{D_{i,N}} \frac{M_w}{M_{w,N}} \right)$$
(2.20)

$$B_{ii} = -\left(X_i \frac{M_w}{M_{w,N}} + (1 - X_i) \frac{M_w}{M_{w,i}}\right)$$
(2.21)

$$B_{ij} = X_i \left( \frac{M_w}{M_{w,l}} - \frac{M_w}{M_{w,N}} \right)$$
(2.22)

เมื่อ

เมื่อ

เมื่อ

TC

= อัตราส่วนโมล

ความสามารถในการนำความร้อนของอิเล็กโตรไลท์สามารถคำนวรได้ตาม

ความสัมพันธ์นี้

 $X_i$ 

λ

ປรື່າ

$$\sigma_{mem} = \beta (0.00514\lambda - 0.00326)^{\omega} e^{1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})}$$
(2.23)  
= ปริมาณน้ำในเมมเบรน  
มาณน้ำในเมมเบรนนั้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

 $\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & (a < 1) \\ 14 + 1.4(a - 1) & (a > 1) \end{cases}$ (2.24)

a = แอ<mark>คทิวิตีของน้ำ</mark>

แอคทีวิต<mark>ีของน้ำนั้นถูกนิย</mark>ามว่า

 $a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s$ 

(2.25)

สัมประสิทธิ์การลากด้วยออสโมติกสามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

 $ST | T n_d = 2.5 \frac{\lambda}{22}$ 

(2.26)

$$J_{bd} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{W,H_2O} D_l \nabla \lambda \tag{2.27}$$

เมื่อ

 $ho_m$  = ความหนาแน่นของเมมเบรนแห้ง unit: kg/m<sup>3</sup>  $M_m$  = มวลสมมูลของเมมเบรนแห้ง unit: kg/kmol

ความสามารถในการแพร่ของน้ำในเมมเบรนสามารถจำลองได้ด้วยความสัมพันธ์

ต่อไปนี้

T

$$D_{l} = f(\lambda)e^{2416(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})}$$

(2.28)



ระเบียบวิธีวิจัย

. บทนี้นำเสนอระเบียบวิธีวิจัยที่สามารถนำเสนอได้โดยผังงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 <mark>ผังงานกระบวน</mark>การวิจั<mark>ย</mark>

#### 3.1. เลือกขอบเขตงาน

10

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตพบว่า มีรูปแบบท่อส่งก๊าซมากมายหลาย ชนิด ดดยท่อส่งก๊าซที่แตกต่างกันก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ไม่ ว่าจะเป็นแบบท่อเดี่ยวหรือแบบหลายท่อนั้นได้รับการสนใจสูงสุดทั้งการศึกษาโดยการทดลองและการ สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขดังที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น เนื่องจากความเรียบง่ายของรูปแบบซึ่งทำให้ ง่ายต่อการได้ผลตอบที่ลู่เข้าเมื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข และอีกทั้งเป็นเซลล์เชิงพาณิชย์ซึ่งสามารถ จัดหามาได้ง่ายสำหรับการศึกษาโดยการทดลอง อย่างไรก็ตาม ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมซึ่งถูก จัดจำหน่ายโดย บริษัท Electrochem นั้นได้รับความสนใจในระดับที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้นจุดประสงค์ ของงานวิจัยชิ้นนี้คือเพื่อศึกษาและสำรวจพฤติกรรมของการขนส่งและสมรรถนะภาพของเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรม โดยที่ท่อส่งก๊าซทั้ง 6 แบบที่แตกต่างกันอย่างละ เล็กน้อยนั้นจะถูกนำมาศึกษาเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการขนส่ง เนื่องจากการทำการทดลองนั้นมี ค่าใช้จ่ายที่สูง สิ้นเปลืองเวลา และยังมีความไม่แน่นนอนที่สูง เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึง กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ดังนั้นใน งานวิจัยนี้ การศึกษาดังกล่าวจะถูกจัดทำผ่านโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT

#### 3.2. การพัฒนาแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์โดยโปรแกรม ANSYS FLUENT นั้นประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. สร้างรูปทรง

10

- 2. ย่อยรูปทรงออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ
- กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ

ในการสร้างรูปทรงนั้นสามารถทำได้ในหลายๆโปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่น CATIA, ANSYS และ SolidWorks จุดมุ่งหมายของขั้นตอนนี้คือเพื่อกำหนดขนาดทางกายภาพของส่วนประกอบต่างๆ และความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากเนื่องจากตัวแปรทางกายภาพ นั้นเกี่ยวข้องโดยตรงต่อสมรรถนะภาพของเซลล์ ดังนั้นการสร้างรูปทรงที่ผิดขนาดอาจจะนำไปสู่ผล คำตอบที่ผิดพลาด โดยสำหรับท่อส่งก๊าซแบบแรกที่จะทำการสร้างแบบจำลองคือ ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์ เพนไทน์ท่อเดี่ยว โดยท่อส่งก๊าซดังกล่าวจะถูกนำไปเทียบผลเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการสร้าง แบบจำลอง รูปทรงต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 ตารางเซนติเมตรนั้นถูกสร้างขึ้นใน ANSYS WORKBENCH ซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นสองขั้ว ท่อส่งก๊าซ ชั้นการแพร่ของก๊าซ ชั้นเร่งปฏิกิริยา และ เยื่อเมมเบรน โดยขนาดของรูปทรงของแบบจำลองนั้นสามารถแสดงได้ในตาราง 3.1 ซึ่งขนาดเหล่านี้ เป็นขนาดจากรูปทรงจริงภายหลังการกด

ตารางที่ 3.1 ขนาดรูปทรงต่างๆในแบบจำลอง

G

ตัวแปร	ขนาด	หน่วย
ความสูงท่อ	0.8	mm
ความกว้างท่อ	0.8	mm
ความกว้างสันท่อ	0.8	mm
ความหนาแผ่นสองขั้ว	0.8	mm
พื้นที่เซลล์	510	mm <sup>2</sup>
ความหนาชั้นแพร่ของก๊าซ	0.190	mm
ความหนาชั้นเร่งปฏิกริยา	0.015	mm
ความหนาเมมเบรน	0.050	mm

ANSYS FLUENT นั้นมีพื้นฐานมาจากเทคนิดการคำนวณชื่อไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งรูปทรงที่ถูก สร้างขึ้นจะต้องถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เชิงปริมาตรย่อยๆ กระบวนการนี้สามารถทำได้ใน หลากหลายโปรแกรมเช่น ANSYS Workbench, GAMBIT, หรือ ICEM CFD แต่เนื่องจาก ปรากฏการณ์ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์นั้นยุ่งยาก และซับซ้อนมาก การใช้เอลิ เมนต์ที่มีคุณภาพสูงจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการได้มาซึ่งผลคำตอบที่ลู่เข้า และเวลาคำนวณที่น้อยลง เอลิ เมนต์แบบหกหน้าที่มีผิวโดยรอบเป็นสี่เหลี่ยมนั้นได้รับการยอมรับและแนะนำว่าเป็นเอลิเมนต์ที่ดีที่สุด เนื่องจากเอลิเมนต์ชนิดนี้จะไม่ก่อให้เกิดเอลิเมนต์แบบแหลมขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การลู่ออกของผลลัพธ์ได้ และถึงแม้ว่าการย่อยรูปทรงให้ละเอียดมากๆ หรือสร้างเอลิเมนต์ให้มีจำนวนมากๆนั้น จะนำไปสู่ ผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้น แต่ว่าเวลาที่ใช้คำนวณนั้นก็มากตามไปด้วย ความสมดุลระหว่างผลลัพธ์ที่แม่นยำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงอย่างระมัดระวัง ดังนั้นการวิเคราะห์ พื้นฐานอย่างการวิเคราะห์ความเป็นอิสระต่อเมซจำเป็นที่จะต้องทำเพื่อยืนยันคุณภาพของผลลัพธ์ ใน งานนี้กระบวนการสร้างเม**ซจะท**ำในโปรแกรม ANSYS ICEM CFD

STITUTE O



### รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ความเป็นอิสระต่อเมซ

(

ในงานนี้ การวิเคราะห์ความเป็นอิสระต่อเมซของแต่ละชั้นของหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า ได้ถูกจัดทำขึ้น โดยช่วงแรก ได้ใช้เซลล์จำนวน 5 เซลล์วางเรียงกันในทิศทางตามแนวลึก หรือ ตาม ทิศทางทะลุระนาบ (through-plane) ในแต่ละชั้นของหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า หลังจากที่ได้ ผลลัพธ์มาแล้ว จึงเปลี่ยนจำนวนเอลิเมนต์ในแต่ละชั้น (5, 10, 20 เซลล์ในแต่ละชั้น) เพื่อสำรวจความ ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ โดยพบว่าความแตกต่างสูงสุดของความต่างศักย์เซลล์ที่ได้มาจากจำนวน เซลล์ที่แตกต่างกันนั้นอยู่ในช่วง 1% เมื่อเทียบกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการ คำนวณสำหรับกรณีที่เอลิเมนต์มากๆนั้นมากกว่ามาก ยิ่งไปกว่านั้นการได้มาซึ่งผลคำตอบที่ลู่เข้านั้น ยากกว่า และอัตราการลู่เข้าก็ก็แย่กกว่าเนื่องจากจำนวณเอลิเมนต์นั้นมากเกินไป [5] ดังนั้นจำนวน เซลล์วางเรียงกันในทิศทางตามแนวลึกของทั้ง ชั้นการแพร่ของก๊าซ ชั้นเร่งปฏิกิริยา และเมมเบรนที่ใช้ ในงานนี้นั้นคือ 5 ซึ่งคิดรวมทั้งหมดเป็น 684,164 เซลล์แบบหกหน้าที่มีอัตราส่วนความกว้างความสูง สูงที่สุดเป็น 94

มีตัวเลือกมากมายในการคำนวณแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์ ภายใต้โปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่งมีทั้ง joule heating, reaction heating, electrochemistry sources, Butler-Volmer rate, membrane water transport, multiphase, multicomponent diffusion, and anisotropic e-conductivity in porous electrode แต่ในงานนี้จะในเพียง 7 ตัวเลือกต่อไปนี้เท่านั้น ตัวเลือก joule heating เป็นตัวเลือกที่จะรวมเอาการคำนวณความร้อนที่เกิด จากความต้านทานเข้าไปด้วย ในขณะที่ความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีนั้นจะถูกนำไป รวมด้วยในตัวเลือก reaction heating โดยทั่วไปแล้วตัวเลือก electrochemistry sources จะถูก เลือกไว้เสมอ แต่ถ้าหากสนใจเพียงแค่การไหลของของไหลผ่านเซลล์เท่านั้น ตัวเลือกนี้อาจถูกปิดได้ ตัวเลือก Butler-Volmer rate นั้นใช้ในการคำนวณกระแสส่งผ่านภายในชั้นเร่งปฏิกิริยา การขนส่ง ของน้ำระหว่างสองฝั่งของเมมเบรนสามารถจำลองได้โดยการเลือกตัวเลือก membrane water transport ตัวเลือก multiphase นั้นจะยอมให้เกิดการสร้างตัวของน้ำที่อยู่ในรูปของเหลวในชั้นที่มีรู พรุน สำหรับกรณีที่ต้องการรวมผลกระทบจากก๊าซไนโตรเจนเข้ามาด้วย (ซึ่งเกิดตอนใช้อากาศ) ตัวเลือกที่ 7 อย่าง multicomponent diffusion ก็สามารถถูกเลือกได้

ในการศึกษานี้ อุณหภูมิของเซลล์ถูกกำหนดไว้ที่ 60℃ ซึ่งอุณหภูมินี้รวมไปถึงอุณหภูมิของ ก๊าซไหลเข้า และอุณหภูมิของแผ่นสองขั้วด้วย ความดันทำงานของระบบถูกกำหนดไว้ที่ 1 atm ที่ ทางออกของท่อส่งก๊าซ อัตราการไหลปริมาณสารสัมพันธ์ที่ 1.1/10.6 ที่ 60℃ โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ ที่ 90% ในทั้ง H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> ที่ทางเข้าของท่อส่งก๊าซนั้นใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการประเมินสมรรถนะภาพของเซลล์ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วการใช้งานจริงนั้นมักจะใช้อากาศ เนื่องจากความสะดวกในการจัดเก็บตัวทำปฏิกิริยา อัตราการไหลปริมาณสารสัมพันธ์ที่ 1.1/1.1 ที่ 60℃ โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% ในทั้ง H<sub>2</sub>/Air ที่ทางเข้าจึงถูกใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการขนส่ง และสมรรถนะภาพเซลล์อีกเช่นกัน อย่างไรก็ตามต้องหมายเหตุไว้ด้วยว่า อัตราการไหลปริมาณสาร สัมพันธ์ ที่กล่าวในข้างต้นนั้นถูกคำนวณโดยมีพื้นฐานมาจากความหนาแน่นกระแสมาตรฐานที่ 1.8 A/cm² โดยที่เงื่อนไขขอบที่ใช้ในงานนี้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3.2

เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างมากในแต่ละกรณี และระหว่างจุดต่างๆใน กราฟโพลาไรเซชัน ในกรณีนี้เวลาที่ใช้ในการได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ลู่เข้าในกรณีของ H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> นั้นมีค่าต่ำกว่า ในกรณี H<sub>2</sub>/Air ราว 2 เท่า เวลาที่ใช้ในการคำนวณอย่างยาวนานนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากในกรณี H<sub>2</sub>/Air นั้นมีการคิดคำนวณสมการ Stefan-Maxwell เข้าไปแทนที่กฎของ Fick ซึ่งเป็นการเพิ่มความซับซ้อน ของแบบจำลอง ดังนั้นตัวประกอบ under-relaxation จึงถูกปรับไว้ที่ค่าต่ำเพื่อความมีเสถียรภาพใน การคำนวณ

อย่างไรก็ตามเนื่<mark>องจา</mark>กการตั้งค่า<mark>ตั</mark>วประกอบ under-relaxation ไว้ต่ำ ทำให้มีความยุ่งยาก ในการตัดสินการลู่เข้า เพื่อที่จะยืนยันว่าแบบจำลองนั้นได้ให้ผลคำตอบที่ลู่เข้าอย่างสมบูรณ์แล้วนั้น วิธีต่อไปนี้ทั้งสิ้น 4 วิธีถูกใช้เพื่อการตัดสินการลู่เข้า

- 1. ตรวจสอบระดับเศษเหลือ
- 2. ความสม่ำเสมอของค่าความต่างศักย์ที่คำนวณได้
- 3. การเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากระแสที่คำนวณได้กับค่ากระแสที่เป็นเงื่อนไขขอบ
- 4. การลู่เข้าของค่าเฉลี่ย water saturation ในชั้นเร่งปฏิกิริยาแคโทด

10

	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /Air	หน่วย
แอโนด			
อัตราการไหลโดยปริมาตร	100	100	mL/min
อุณหภูมิทางเข้า	60	60	°C
ความชื้นสัมพัทธ์ทางเข้า	90	90	%
แคโทด			
อัตราการไหลโดยปริมาตร	500	250	mL/min
อุณหภูมิทางเข้า	60	60	°C
ความชื้นสัมพัทธ์ทางเข้า	U 190 C 8	90	%
ความต่างศักย์แอโนด	0	0	V
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทด	0.0025-1.8000	0.0025-1.8000	A/cm <sup>2</sup>
ความดันทางออก	101,325	101,325	Pa
อุณหภูมิเซลล์	60	60	°C

ดังที่ได้รับคำแนะนำโดย ANSYS [6] ค่ามาตรฐานของเงื่อนไขการลู่เข้าใน FLUENT นั้น เพียงพอต่อปัญหาโดยส่วนมากซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวนั้นคือ การที่ระดับของเศษเหลือของทุกสมการ ลดลงเหลือระดับต่ำกว่า 10<sup>-3</sup> ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งถูกแนะนำให้เป็น 10<sup>-6</sup> อย่างไรก็ตามในการ สร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์นั้น เงื่อนไขดังที่กล่าวไปในข้างต้นนั้นไม่ เพียงพอเพื่อจะยืนยันว่าผลคำตอบนั้นได้ลู่เข้าอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากการที่การตั้งค่ามาตรฐาน ของโปรแกรม ANSYS FLUENT เกี่ยวกับการตัดสินการลู่เข้าที่จะหยุดการคำนวณทันทีเมื่อเข้าเงื่อนไข ที่กล่าวไปข้างต้น ได้ถูกยกเลิกทันทีเมื่อโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณเซลล์เชื้อเพลิงนั้นถูกเรียกใช้ งานขึ้นมาในโปรแกรม AN<mark>SYS</mark> FLUENT ผ่านส่วนต่อประส</mark>านผู้ใช้แบบ<mark>ข้อความ</mark>

แตกต่างจาก Arvay et al. [7] แบบจำลองนี้ใช้การกำหนดกระแสไฟฟ้าเป็นเงื่อนไขขอบที่ ฝั่งแคโทด ดังนั้นค่าความต่างศักย์ของเซลล์จะถูกคำนวณในทุกๆรอบของการคำนวณแทนที่จะเป็น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความสม่ำเสมอของค่าความต่างศักย์ของเซลล์ดังกล่าวถูกใช้เป็นหนึ่งใน เงื่อนไขตัดสินการลู่เข้า

เพื่อที่จะยืนยันว่าผลคำตอบนั้นลู่เข้า วิธีที่สามที่ใช้สมดุลมวลมาเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสิน เงื่อนไขการลู่เข้าถูกนำเสนอโดย Arvay et al. [7] ซึ่งก็คือการที่มวลที่ถูกใช้ไปที่คำนวณได้จาก แบบจำลองนั้นจะต้องเท่ากับมวลที่ถูกใช้ไปที่คำนวณได้จากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลอง อย่างไร ก็ตามในกรณีนี้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบแทนค่าความต่างศักย์ของ เซลล์ ดังนั้นในงานนี้จึงใช้มวลที่ถูกใช้ไปเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่กำหนดเพื่อเทียบกับมวลที่ถูกใช้ไปที่ ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง

อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจาก 3 วิธีในการช่วยตัดสินการลู่เข้าแล้ว เป็นที่ทราบกันดีว่าการ สร้างแบบจำลองการไหลแบบหลายสถานะ และการขนส่งของน้ำภายในเมมเบรนนั้นยากมากที่จะ ได้มาซึ่งการลู่เข้าในการสร้างแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิง โดยทั่วไปแล้วโปรแกรมที่ใช้ในการแก้ปัญหา นั้นมักกำหนดตัวประกอบ under-relaxation ไว้ต่ำๆเพื่อป้องกันการลู่ออกของผลคำตอบซึ่งทำให้ บางครั้งอาจจะทำให้เข้าใจผิดได้ว่าผลคำตอบนั้นได้ลู่เข้าอย่างสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการตรวจสอบ ปริมาณสเกลาร์เฉลี่ยอย่างค่า water saturation ในชั้นรูพรุน และ water content ในเมมเบรน นั้น จำเป็นเป็นอย่างยิ่งสำหรับการยืนยันคุณภาพที่ดีของผลลัพธ์และแบบจำลองนั้นผลคำตอบได้ลู่เข้า อย่างสมบูรณ์

#### 3.3. การเทียบผลแบบจำลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์นั้น จำเป็นเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการเทียบผลกับผลการทดลองอย่างระมัดระวังเนื่องจากความ ซับซ้อนและความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลคำตอบมา ที่มักนำไปสู่ผลคำตอบที่ผิดอยู่ เสมอ ทั้งนี้มีการเทียบผลหลากหลายรูปเช่น การตัวสอบดูการกระจายตัวของน้ำในรูปแบบของเหลว การกระจายตัวของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และการใช้กราฟโพลาไรเซชันซึ่งเป็นวิธีที่นำยม กันมากที่สุด โดยในงานนี้ก็เช่นกัน

### คำนวณแบบจำลองในรูปแบบท่อส่งก๊าซอื่น

เนื่องจากมีถึง 8 ตัวแปรทางด้านรูปทรงของท่อส่งก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะภาพของ เซลล์และปรากฏการณ์การขนส่ง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางตัวในการศึกษาความแตกต่างใน แต่รูปแบบท่อส่งก๊าซนั้นจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบให้ดีเนื่องจากบางตัวแปรนั้นอาจส่งผลกระทบต่อตัว แปรอื่นเช่นกันอย่าง จำนวนของท่อ ซึ่งอาจจะลดหรือเพิ่มความกว้างของท่อหรือสันท่อ เพื่อที่จะ ป้องกันปัญหาเหล่านั้น คว<mark>ามหน</mark>าแน่นของท่อที่ขดอยู่เป็นรูปแบบนั้นถูกกำหนดไว้ให้เท่ากัน

เพื่อที่จะกำจัดตั<mark>วแป</mark>รอื่นๆ ทิศทางการไหลนั้นก็ถูกกำหนดไว้เป็นการไหลแบบสวนทาง ซึ่ง เป็นกรณีที่เราใช้ในการทดลอง และยิ่งไปกว่านั้นยังคงได้รับการยอมรับว่าเป็นทิศทางการไหลแบบที่ ให้สมรรถนะภาพของเซลล์ได้ดีที่สุด โดยรูปร่างของหน้าตัดท่อ รวมทั้งความกว้างของ ท่อและสันท่อ และความสูงของท่อนั้นคือ สี่เหลี่ยม 0.8, 0.8 และ 0.8 mm ทำให้เหลือตัวแปรทางด้านรูปทรงเพียง สองตัวเท่านั้นคือ รูปแบบท่อส่งก๊าซและจำนวนของท่อ ที่จะส่งผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งตัวแปร ทั้งสองตัวนี้นั้นถูกเลือกมาเพื่อที่จะใช้ศึกษาเพื่อเปิดเผยความกำกวมของท่อส่งก๊าซแบบขนานต่อ อนุกรม

#### 3.5. วิเคราะห์ผล

T

เนื่องจากโปรแกรม ANSYS FLUENT สามารถให้เราได้เข้าถึงการสังเกตในการกระจายตัว ของ H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, อุณหภูมิ และอื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งความสามารถของเซลล์ สมรรถนะภาพ และ ความคงทน ทำให้ผลต่างๆเหล่านี้จะถูกนำเสนอและถกเถียงในส่วนของการวิเคราะห์ผลไปพร้อมๆกับ การนำเสนอกราฟโพลาไรเซชัน

> nníulaðin. Nn<sup>s</sup>

# บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์

ผลที่ได้จากการทำแบบจำ<mark>ลองนั้นถูกนำมาเสนอแ</mark>ละวิเคราะห์ในบทนี้ตามลำดับดังต่อไปนี้

- 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
- 4.2 ใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา
- 4.3 ใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา

10

### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากรูปที่ 4.1 กราฟผลการทดลองและผลคำตอบจากแบบจำลองในทุกๆความหนาแน่นของ กระแสนั้นแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างผลทั้งสองเป็นอย่างดี โดยต้องหมายเหตุไว้ด้วยว่า ความแตกต่างในบริเวณช่วงความต่างศักย์สูงนั้นเกิดจากขีดจำกัดของโปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่ง มีพื้นฐานมากจากระเบียบวิธีไฟไนท์วอลุ่ม เนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนท์วอลุ่มนั้นไม่สามารถตอบสนอง ต่อปรากฏการณ์ในระดับไมโครได้อย่างมีประสิทธิผล เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว การสร้าง แบบจำลองในระดับไมโครนั้นเป็นสิ่งจำเป็น



รูปที่ 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองเมื่อใช้ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว

อย่างไรก็ตาม โดยรวมแล้ว ก็เพียงพอที่จะใช้แบบจำลองดังกล่าวในการสำรวจพฤติกรรม การพาและสมรรถนะของเซลล์ในท่อส่งก๊าซอีก 5 แบบ ที่เหลือ

#### 4.1. ใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.2 กราฟสมรรถภาพของท่อส่งก๊าซที่แตกต่างกันทั้ง 6 แบบ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำ ปฏิกิริยา

ผลคำนวณเชิงตัวเลขของท่อก๊าซทั้ง 6 แบบ เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยานั้น แสดงในรูปที่ 4.2 จากกราฟสมรรถภาพ ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวนั้นมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามมาด้วย เซอร์เพนไทน์แบบสามท่อ ขนานต่ออนุกรมแบบสามท่อ เซอร์เพนไทน์แบบห้าท่อ ขนาน ต่ออนุกรมแบบห้าท่อ และ ขนาน ตามลำดับ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์ อิเล็กโตรไลท์มักทำงานที่ความต่างศักย์เท่ากับ 0.6 ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสที่ 1.0 A/cm<sup>2</sup> (ประมาณ 0.6 V) จึงถูกเลื<mark>อกมา</mark>ศึกษาเพิ่มเติม

รูปที่ 4.3 นำเสนอการกระจายตัวของปริมาณน้ำในเมมเบรนที่ฝั่งแคโทด จะเห็นได้ว่าท่อส่ง ก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์แบบท่อเดี่ยวนั้นให้การกระจายตัวที่ดีที่สุด ในขณะที่แบบขนานนั้นแย่ที่สุด โดย ผลที่แสดงออกมานั้นบ่งชี้ว่าหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าโดยเฉพาะเมมเบรนนั้นเต็มไปด้วยน้ำที่อยู่ใน เฟสของเหลวเนื่องจากค่าปริมาณน้ำในเมมเบรนนั้นเกิน 14 ซึ่งถึงแม้ว่ายิ่งค่าปริมาณน้ำในเมมเบรน นั้นมาก ความสามารถในการนำโปรตรอนก็จะยิ่งสูง แต่การที่ปริมาณน้ำนั้นสูงเกินไป (เกินกว่า 14) อาจทำให้เกิดปัญหาน้ำท่วมซึ่งเป็นคำอธิบายที่ดีสำหรับการลดลงของสมรรถนะในท่อส่งก๊าซชนิดอื่นๆ เมื่อเทียบกับท่อแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว ดั้งนั้นนอกเหนือจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอแล้ว ปริมาณน้ำในเมมเบรนจึงไม่ควรเกิน 14 ด้วย



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของปริมาณน้ำภายในเมมเบรนของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อ เดี่ยว b) เซอร์เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนาน ต่ออนุกรมแบบห้าท่อ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา

(



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรมแบบห้าท่อ ภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา การมีอยู่ของน้ำในเฟสของเหลวนั้นถูกยืนยันด้วยกากระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้น มีรูพรุนซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 เนื่องจากท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเกี่ยวนั้นมีท่อเกียงท่อเดียว ก๊าซ ทำปฏิกิริยาจึงถูกบังคับให้ลงไปในชั้นการแพร่ของก๊าซเพื่อกำจัดน้ำออกไปผ่านท่อท่อส่ง ในทาง ตรงกันข้ามท่อส่งก๊าซแบบขนานไม่สามารถจัดการกับน้ำท่วมได้เนื่องจากไม่สามารถกระจายก๊าซทำ ปฏิกิริยาได้อย่างสม่ำเสมอเมื่อเกิดน้ำท่วมขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนภายใต้การใช้ออกซิเจนเป็น ตัวทำปฏิกิริยา

10

อย่างไรก็ตามจากการทดลองของ Wang และ Van Nguyen [8] นั้นพบว่าค่าความต่างศักย์ ของเซลล์จะเริ่มไม่มีความเสถียรที่ค่าการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนเฉลี่ยนั้น มากกว่า 0.2 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าถึงแม้ท่อส่งก๊าซแบบขนานจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่าท่อส่งก๊าซแบบอื่น มาก แต่ก็ยังสามารถจะท<mark>ำงานไ</mark>ด้อย่างมีเสถี<mark>ยรภาพ</mark>ภายใต้ก<mark>ารใช้ออกซิเ</mark>จนเป็นตัวทำปฏิกิริยา

ในระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลท์นั้น ความดันตกเป็นหนึ่ง สิ่งที่สำคัญมากที่จะเป้นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ถึงแม้ท่อส่งก๊าซเซอร์เพนไทน์ท่อเกี่ยว นั้น จะมีสมรรถนะที่ดีที่สุดและการจัดการน้ำที่ดีที่สุด กำลังที่ใช้ในการกำจัดความดันตกนั้นสูงมาก สูงถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับท่อส่งก๊าซแบบสามท่อ และถึง 20 เท่าเมื่อเทียบกับท่อส่งก๊าซแบบห้าท่อ ถึงแม้ว่า ความดันตกจะสูงมากแต่ถ้าหากมองจากมุมผู้ใช้งานแล้วการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัว ทำปฏิกิริยานั้นไม่จำเป็นต้องใช้กำลังใดๆในการส่งก๊าซ เนื่องจากออกซิเจนบริสุทธิ์จะต้องถูกเก็บไว้ใน ถังความดันสูง โดยกำลังที่ใช้ในการเก็บออกซิเจนนั้นไม่ได้ถูกจ่ายโดยผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามการใช้งาน จริงนั้นเซลล์เชื้อเพลิงมักใช้อากาศแทนที่จะเป็นออกซิเจนเนื่องจากความสะดวกในเรื่องที่จัดเก็บ ดังนั้นจึงได้จัดทำการศึกษาพฤติกรรมการพาและสมรรถนะของเซลล์เมื่อใช้อากาศเป็นก๊าซทำ ปฏิกิริยา



#### 4.2. ใช้ออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา

10

เมื่อใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา รูปที่ 4.7 แสดงผลจากแบบจำลองของท่อส่งก๊าซทั้ง 6 แบบ ในช่วงความต่างศักย์ต่ำนั้น ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมสามารถทำได้ดีกว่าท่อส่งก๊าซแบบเซอร์ เพนไทน์หลายท่อ ซึ่งสมรรถนะที่มากว่านั้นบ่งชี้ให้เห็นว่าท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมนั้นสามารถ จัดการกับน้ำได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามผลจากแบบจำลองนี้ขัดแย้งกับผลที่ได้จากแบบทดลองของเซลล์ เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กไตรไลท์ขนาน 200 cm<sup>2</sup> ของ Shimpalee et al. [9] ซึ่งพบว่าท่อส่ง ก๊าซที่มีจำนวนท่อต่ำนั้นมักจะมีสมรรถนะที่ต่ำกว่า ซึ่งจากผลนี้แสดงให้เห็นว่าสมรรถนะและ พฤติกรรมการพาของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล้กดตรไลท์นั้นเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ ขนาดของเซลล์นั้นเปลี่ยนไ<mark>ปเนื่อ</mark>งจากพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของออกซิเจนของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพน ไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรมแบบห้า ท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา การกระจายตัวของออกซิเจนนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 จากการกระจายตัวดังกล่าวพบว่า ปริมาณอัตราส่วนมวลออกซิเจนที่มากนั้นพบได้ที่ทางเข้าของท่อ อย่างไรก็ตามในส่วนของท่อส่งก๊าซ แบบขนานนั้นพบว่ามีบางบริเวณที่อัตราส่วนมวลนั้นลดลงต่ำมากจึงทำการสำรวจดูการกระจายตัว ของอัตราส่วนมวลของน้ำในท่อส่งก๊าซแบบต่างๆในรูปที่ 4.9 ด้วย ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของมวลน้ำ ในทุกๆท่อส่งก๊าซนั้นตรงกันข้ามกับการกระจายตัวของมวลของออกซิเจน ยกเว้นแต่ท่อส่งก๊าซแบบ ขนาน การที่พื้นที่ที่มีอัตราส่วนมวลออกซิเจนน้อยแล้ว อัตราส่วนมวลน้ำน้อยไปด้วยนั้นบ่งชี้ว่าพื้นที่ บริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาดังนั้นจึงไม่มีน้ำนั่นเอง



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของน้ำในฝั่งแคโทดของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว b) เซอร์ เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรม แบบห้าท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา

(0)

เครื่องยืนยันว่าก๊าซไม่แพร่เข้าไปในชั้นแพร่ของก๊าซนั้นคือการกระจายตัวของความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าบริเวณที่มีสมมติฐานว่าก๊าซไม่แพร่เข้าไปนั้นมี กระแสไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นความเค้นเชิงกลเนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำและความร้อนนั้น อาจจะเกิดขึ้นได้เมื่อเทียบกับท่อส่งก๊าซในรูปแบบอื่น

รูปที่ 4.11 นั้นแสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ขอบสามสถานะ ผลแสดงให้เห็นว่าใน บริเวณที่ไม่มีปฏิกริยานั้นไม่มีความร้อนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา ซึ่งถึงแม้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมินั้น ท่อส่งก๊าซแบบขนานนั้นทำได้แย่ที่สุด แต่ความแตกต่างของอุณหภูมินั้นก็ยังอยู่ในช่วง 5 K ซึ่งไม่ได้ ส่งผลกระบอะไรที่มีนัยะสำคัญต่อเซลล์



รูบท 4.10 การกระจาอตรของครามหนาแนนของกระแสเพพาของ ทอสงกาชแบบ a) เขอรเพนเทเ ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพนไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรมแบบห้าท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา

10



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิของ ท่อส่งก๊าซแบบ a) เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยว b) เซอร์เพน ไทน์สามท่อ b) เซอร์เพนไทน์ห้าท่อ d) ขนาน e) ขนานต่ออนุกรมสามท่อ f) ขนานต่ออนุกรมแบบห้า ท่อ ภายใต้การใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุนภายใต้การใช้อากาศเป็น ตัวทำปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงปริมาณของการกระจายตัวของน้ำในเฟสของเหลวในชั้นมีรูพรุน เฉลี่ยแล้วพบว่าในทุกๆท่อส่งก๊าซ ยกเว้นแต่เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวนั้น จะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีส เถียรภาพเนื่องจากปริมาณเฉลี่ยดังกล่าวนั้นมีค่ามากกว่า 0.2 ซึ่งถูกแนะนำโดย Wang และ Van Nguyen [8] ทั้งนี้การที่ใช้อากาศทำงานแล้วมีค่าปริมาณมากกว่าการใช้ออกซิเจนทำงานนั้น เนื่องจากว่า อากาศที่ป้อนเข้าไปนั้นมีอัตราการไหลต่ำกว่าเมื่อครั้งสร้างแบบจำลองด้วยออกซิเจน เพราะต้องการให้เงื่อนไขขอบของแบบจำลองนั้นตรงตามการใช้งานที่เกิดขึ้นจริง

G

เมื่อคำนึงถึงในทุกๆแง่มุมแล้ว สามารถสรุปได้ว่าท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวนั้นเป็น ตัวเลือกที่ดีที่สุดในการเอาไปใช้งานเนื่องจากมีข้อดีที่มากมายเหนือกว่าท่อส่งก๊าซแบบอื่นๆ และ ถึงแม้ว่าความดันตกของท่<mark>อส่งก๊</mark>าซแบบดังกล่าวนั้นสูงมากๆเมื่อเทียบกับท่อส่งก๊าซแบบอื่น แต่กำลังที่ ต้องการเพื่อที่จะใช้ในการเอาชนะความดันตกดังกล่าวนั้นคิดเป็นเพียง 0.2% ของกำลังที่ตัวเซลล์นั้น สร้างได้

VSTITUTE OV

# บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1. สรุปผลการวิจัย

10

ข้อสรุปต่างๆจากการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตร ไลท์ ในรูปแบบท่อส่งก๊าซพาณิชย์ที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT นั้นถูกรวบรวมมา ดังต่อไปนี้

แบบจำลองระดับมหภาคซึ่งมีพื้นฐานมาจากระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มนั้นถูกพัฒนาขึ้น และ ได้เทียบผลกับผลการทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผลลัพธ์นั้นแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันเป็น อย่างดีระหว่างผลจากการทดลองและผลคำตอบเชิงตัวเลข อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างระหว่างผล ดังกล่าวเล็กน้อยเนื่องจากข้อจำกัดบางประการของโปรแกรม ANSYS FLUENT

เมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวแสดง ให้เห็นถึงสมรรถนะภาพที่สูงที่สุดตามด้วย เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ, ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ, เซอร์เพน ไทน์ 5 ท่อ, ขนานต่ออนุกรม 5 ท่อ และ ขนานชนิดแซด ตามลำดับ อย่างไรก็ตามกลับพบความ แตกต่างเมื่อใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา ในช่วงความต่างศักย์สูง (เหนือ 0.7 V) ท่อส่งก๊าซแบบเซอร์ เพนไทน์ท่อเดี่ยวยังคงให้กำลังไฟสูงที่สุด และตามมาด้วย เซอร์เพนไทน์ 3 ท่อ, ขนานต่ออนุกรม 3 ท่อ, เซอร์เพนไทน์ 5 ท่อ, ขนานต่ออนุกรม 5 ท่อ และ ขนานชนิดแซด ตามลำดับเช่นเดียวกับเมื่อใช้ ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นตัวทำปฏิกิริยา แต่ในช่วงความต่างศักย์ต่ำ (ใต้ 0.7 V) ด้วยจำนวนท่อที่ เท่ากัน ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมสามารถทำสมรรถนะภาพได้ดีกว่าแบบเซอร์เพนไทน์ชนิด หลายท่อ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่า ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมสามารถจัดการกับปัญหาน้ำท่วมในขึ้นส่วน ที่มีรูพรุนได้ดีกว่า

ท่อส่งก๊าซแบบ เซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวนั้นนอกจากจะให้กำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดแล้วยังให้การ กระจายตัวต่างๆนั้นยอดเยี่ยมที่สุดด้วย ในขณะที่ท่อส่งก๊าซแบบขนานชนิดแซดนั้นทำได้แย่ที่สุดทั้งคู่ ด้วยจำนวนท่อที่เท่ากัน ท่อส่งก๊าซแบบขนานต่ออนุกรมให้สมรรถนะภาพที่ต่ำกว่าเซอร์เพนไทน์ท่อ ชนิดหลายท่อเล็กน้อยแต่ว่ามีการกระจายตัวต่างๆที่ดีกว่า ท่อส่งก๊าซที่มีจำนวนท่อน้อยกว่ามีแนวโน้ม ที่จะให้กำลังไฟฟ้าและกระจายตัวต่างๆที่สูงและดีกว่า อย่างไรก็ตามสำหรับความดันตกด้วย กำลังไฟ ของท่อส่งก๊าซชนิดเซอร์เพนไทน์ท่อเดี่ยวที่จำเป็นต้องใช้สำหรับชดเชยความดันตกนั้นสูงกว่า ท่อส่ง ก๊าซแบบ 3 ท่อ อยู่ที่ราวๆ 10 เท่า และสูงกว่า ท่อส่งก๊าซแบบ 5 ท่อ อยู่ที่ราวๆ 20 เท่า เมื่อพิจารณา ทุกๆปัจจัยแล้วสามารถสรุปได้ว่า จำนวนท่อนั้นส่งผลกระทบต่อสมรรถนะภาพและการกระจายตัว ต่างๆมากกว่ารูปแบบของท่อส่งก๊าซ อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตว่าอิทธิพลของรูปแบบท่อส่งก๊าซนั้นจะ สูงขึ้นเมื่อจำนวนท่อนั้นมากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์นี้มีความสำคัญมากและจะส่งผลมากๆกับเซลล์ที่มีขนาด ใหญ่ขึ้นซึ่งใช้ท่อส่งก๊าซจำนวนหลายๆท่อเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความดันตก

> nn í u í a æ ns se



#### References

- [1] A. P. Manso, F. F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, and M. Garmendia Mujika, "Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37 no. 20, pp. 15256 – 15287, October 2012.
- [2] A. M. Lopez, F. Barreras, A. Lozano, J. A. Garcia, L. Valino, and R. Mustata, "Comparison of water management between two bipolar plate flow-field geometries in proton exchange membrane fuel cells at low-density current range," *Journal of Power Sources*, vol. 192, no. 1, pp. 94 – 99, July 2009.
- [3] J. M. Sierra, J. Moreira, and P. J. Sebastian, "Numerical analysis of the effect of different gas feeding modes in a proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow-field," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 11, pp. 5070 – 5076, June 2011.
- [4] Y. Lu and R. G. Reddy, "Performance of micro-PEM fuel cells with different flow fields," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 2, pp. 503 – 508, January 2010.
- [5] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. England: Pearson Education, 2007.
- [6] ANSYS, ANSYS FLUENT Fuel Cell Modules Manual. USA: ANSYS, 2011.
- [7] A. Arvay, A. Ahmed, X.-H. Peng, and A.M. Kannan, "Convergence criteria establishment for 3D simulation of proton exchange membrane fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2482 – 2489, February 2012.
- [8] X. Wang and T. V. Nguyen, "An experimental study of the liquid water saturation level in the cathode gas diffusion layer of a PEM fuel cell," *Journal* of Power Sources, vol. 197, pp. 50 – 56, January 2012.
- [9] S. Shimpalee, S. Greenway, and J. W. Van Zee, "The impact of channel path length on PEMFC flow-field design," *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 1, pp. 398 – 406, September 2006.