



การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดขึ้นรูปรีดขนาดเล็ก
สำหรับการประยุกต์ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์
อิเล็กโตรไลต์

เสนอ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

โดย

TNI

ผศ.ดร. ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนโครงการนี้ภายใต้เลขที่

โครงการ 1410/A008

ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส



สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญภาพ	ฉ
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการวิจัย	3
2 การศึกษารวบรวม.....	4
3 ระเบียบวิธีวิจัย	21
3.1 กำหนดคุณสมบัติเครื่องอัดขึ้นรูปอ่อนขนาดเล็ก	22
3.2 ออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของเครื่องอัดขึ้นรูปอ่อนขนาดเล็ก	22
3.5 สร้างเครื่องอัดขึ้นรูปอ่อนขนาดเล็ก.....	23
4 ผลและการวิเคราะห์.....	28
4.1 ผลการออกแบบ.....	28
4.2 ผลการวิเคราะห์.....	30
4.3 ผลการทดสอบ	35
5 สรุปผลการวิจัย	39
บรรณานุกรม.....	40

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการวิจัย.....	3
2.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบนิวแมติกส์	7
2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบไฮดรอลิก	8
2.3 ข้อดีของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ	19
4.1 ค่าคุณสมบัติของสกรูแฉีครุ่น E2501 ของบริษัท Power Jacks	30

THAI

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

TNI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง	5
2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.3 Polymer Electrolyte Fuel Cell หรือ Proton Exchange Membrane Fuel Cells	6
2.4 อิเล็กโทรไลต์ที่ได้รับความเครียด	9
2.5 สเตรณเกจ	12
2.6 การต่อสเตรณเกจในรูปแบบวงจรวัดสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์ บริดจ์ (Quarter-bridge) ...	13
2.7 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบชั้นเดียว	16
2.8 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นต่อแบบอนุกรม	17
2.9 ลักษณะการเชื่อมปลายของเทอร์โมคัปเปิล.....	18
3.1 แผนภูมิกระบวนการดำเนินโครงการ	21
3.2 ลักษณะจำลองการใส่แรง	23
3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว.....	25
3.4 มอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว.....	26
3.5 การทดสอบความเรียบผิวของหน้าสัมผัส	27
4.1 เครื่องที่ออกแบบ (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง.....	29
4.2 ลักษณะการจัดชุดลดความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลในเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กที่ออกแบบ	29
4.3 การกระจายตัวของความร้อน	33
4.4 การกระจายตัวของความเค้น.....	34
4.5 ระยะห่างหลังจากการกดระหว่าง 2 พื้นผิว.....	35
4.6 ภาพด้านหลังเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนก่อนการติดตั้งมอเตอร์	36
4.7 ภาพด้านหน้าเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนภายหลังการติดตั้งมอเตอร์.....	36
4.8 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขณะกดที่ 3 กิโลนิวตัน	37
4.9 การกดที่แรงขนาดต่างๆ บันทึกผลทุก 5 วินาที เป็นเวลา 1 นาที	38
4.10 การกระจายตัวของแรงกดหลังจากการกด.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจน และเมทานอล เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา [1] โดยที่ความน่าสนใจคือเซลล์เชื้อเพลิงนั้นไม่ได้ถูกจำกัดประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงานภายใต้ข้อจำกัดทางอุณหพลศาสตร์อย่าง วัฏจักรคาร์โนต์ เช่นเดียวกับระบบการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานแบบเก่า ในอีกทางหนึ่งกล่าวได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุปกรณ์การเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานในปัจจุบันอย่าง เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (Polymers Electrolyte Fuel Cells) นั้นเป็นความหวังที่จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์พกพา หรืออุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนที่ เช่น มือถือ คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก และ รถยนต์ เนื่องจากสามารถทำงานในสภาวะที่อุณหภูมิหรือความดันปกติได้ อย่างไรก็ตามยังมีอุปสรรคทางเทคโนโลยีอีกมากที่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ ต้องได้รับการก้าวข้ามก่อนการเปิดตัวสู่ตลาดทั่วไป เช่น ราคาต้นทุนที่สูง และความทนทานของเซลล์ ซึ่งเป็นหัวข้อหลักในงานวิจัยทางวิชาการในปัจจุบัน [2,3] ในการศึกษาที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวการศึกษผ่านการทดลองจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะการทดลองนั้นทำให้วิศวกรและนักวิจัยสามารถเข้าถึง และเข้าใจมุมมองทางด้านกายภาพภายในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นได้มากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้ให้ความสนใจในการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ ซึ่งหัวใจสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า (MEA) โดยในการผลิตหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้านั้นมีกรรมวิธีการผลิตหลายแบบ แบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมเรียกว่า วิธีแบบแยกขั้วไฟฟ้า ซึ่งในระเบียบวิธีการทำนั้นได้มีการอธิบายไว้ในหลายบทความทางวิชาการ [4] โดยในขั้นตอนสุดท้ายการประกอบเพื่อให้ได้มาซึ่ง หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า นั้น จำเป็นต้องใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยที่เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประกอบ

ดังกล่าวมีค่าความดันและอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 4 เมกาปาสกาล (2 กิโลนิวตัน สำหรับหน่วยเยื่อแผ่น และขั้วไฟฟ้าที่มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) 110-130 องศาเซลเซียส (ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อเมมเบรน) และค้างอยู่ที่เงื่อนไขดังกล่าวเป็นเวลา 1 นาที [5,6].

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้คือเพื่อออกแบบ และพัฒนาเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กสำหรับการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าที่มี 16.5×16.5 ตารางเซนติเมตร โดยที่สามารถสร้างแรงและอุณหภูมิขึ้นต่ำได้ที่ 3 กิโลนิวตัน (ซึ่งมีค่าประมาณแรงขนาด 300 กิโลกรัมแรง หรือ 4.8 เมกาปาสกาล สำหรับหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าที่มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร) และ 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในระหว่างกระบวนการการออกแบบ จะมีการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง และศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่สัมผัสโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบ เพื่อยืนยันว่าโครงสร้างจะไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวรในระหว่างการทำงาน และเพื่อให้ทราบเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการคอยให้ อุณหภูมิมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยที่ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะทำให้ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานขั้นสูงมีเครื่องประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยในอนาคตต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กเพื่อที่จะนำมาใช้ในการประกอบ หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า 1.ขนาดไม่เกิน 16.5×16.5 ตารางเซนติเมตร
2. สร้างและพัฒนาเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อที่จะนำมาใช้ในการประกอบ หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า

1.2 ขอบเขตของการวิจัย (ระบุขอบเขตของงานวิจัยให้ครอบคลุม ดังต่อไปนี้)

- ในการออกแบบนั้น การคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์นั้นกระทำผ่านโปรแกรม ANSYS
- ผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นในการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิจะถูกตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลอง
- ออกแบบและสร้างเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนสำหรับการประกอบ หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ ขนาดต่ำกว่า 16.5×16.5 ตารางเซนติเมตร โดยสามารถสร้างแรงได้ไม่เกิน 3 กิโลนิวตัน และให้อุณหภูมิได้สูงถึง 130 องศาเซลเซียส

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ## ตาราง 1.1 แผนการวิจัย

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กเพื่อที่จะนำมาใช้ในการประกอบ หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า โดยจะมีการนำเสนอเป็นลำดับดังต่อไปนี้

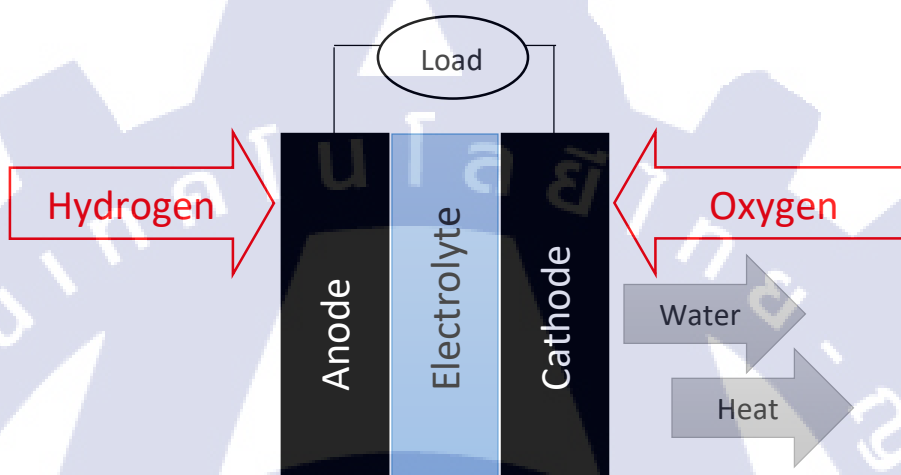
1. เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells)
2. ระบบส่งกำลัง
3. ทฤษฎีความเสียหาย (Deformation theory)
4. หลักการทำงานของโหลดเซลล์ (Load cell)
5. ค่าคงที่ของสปริง (Spring Constant)
6. การนำความร้อนและพลังงานความร้อน (Heat Conduction & Quantity of heat)
7. หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

โดยหัวข้อ 2.1 จะกล่าวถึงงานที่เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ หัวข้อ 2.2 กล่าวถึงระบบส่งกำลังในเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนทั่วไป ในหัวข้อ 2.3 จะกล่าวถึงหลักการที่ใช้ในการออกแบบและประเมินว่าโครงสร้างของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนนั้นเสียรูปร่างอย่างถาวรหรือไม่ หัวข้อ 2.4 กล่าวถึงหลักการทำงานของโหลดเซลล์ในการวัดน้ำหนักในการกด หัวข้อ 2.5 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าคงที่สปริงเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สร้างฟังก์ชันของแรงที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง หัวข้อที่ 2.6 จะกล่าวถึงการนำความร้อนเพื่อนำมาประเมินว่าจะเกิดความเสียหายแก่โหลดเซลล์หรือไม่ และหัวข้อที่ 2.7 กล่าวถึงคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells)

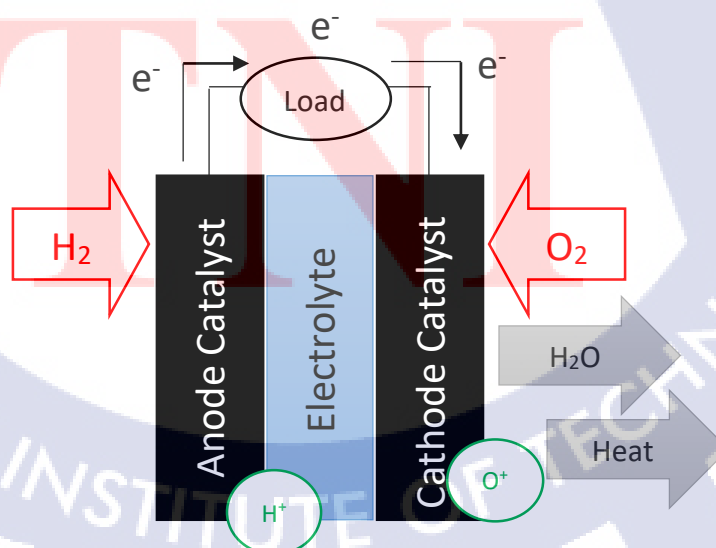
เซลล์เชื้อเพลิง เป็น อุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ชนิดหนึ่งซึ่งเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ต่ำ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานที่สูงเนื่องจากเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานนั้นใช้กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) โดยพื้นฐานการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจะมีการทำงานคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิงจะผลิตพลังงานในรูปของกระแสไฟฟ้า และมีความร้อน

เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและยาวนานตราบเท่าที่มีเชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนประกอบของไฮโดรเจนและออกซิเจนส่งให้กับระบบ ซึ่งลักษณะพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง จะประกอบด้วย แผ่นขั้วไฟฟ้า (Electrode) 2 แผ่น ประกอบไปด้วยแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode) และแผ่นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode) ประกบกันอยู่รอบอิเล็กโตรไลต์ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 เซลล์เชื้อเพลิง

2.1.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง



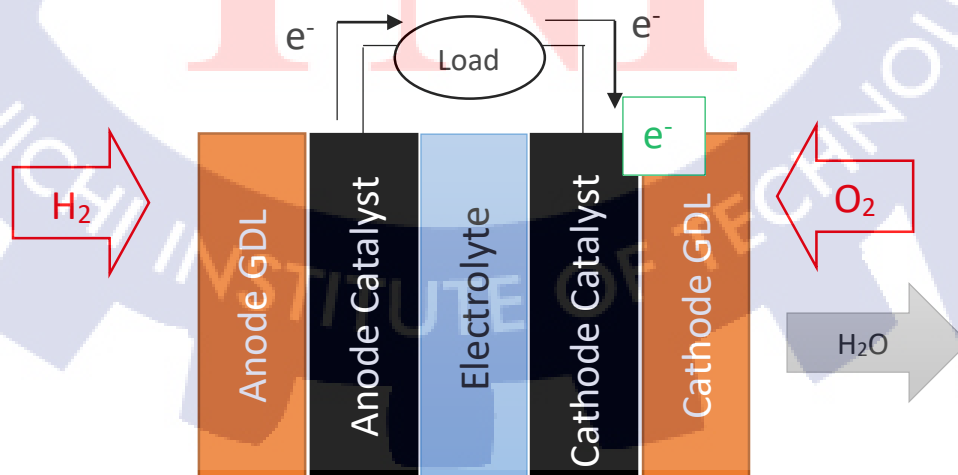


ภาพที่ 2.2 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง มีเชื้อเพลิงคือสารที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบหลักโดยเชื้อเพลิงดังกล่าวจะถูกส่งเข้าแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด และออกซิเจนซึ่งอาจจะได้จากอากาศ หรืออาจเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้จะถูกส่งผ่านเข้าทางแผ่นขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยไฮโดรเจนจะแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอมบวก (Proton) และไฮโดรเจนอะตอมลบ (Electron) ที่บริเวณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโปรตอนจะไหลผ่านอิเล็กโตรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะไหลออกวงจรด้านนอกซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ก่อนที่โปรตอน และอิเล็กตรอนจะไปยังแผ่นขั้วไฟฟ้าแคโทดเพื่อรวมตัวกับออกซิเจนที่ถูกจ่ายเข้ามาทางแผ่นขั้วไฟฟ้าแคโทดทำให้รวมตัวเกิดเป็นน้ำ ความร้อน และในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิดอาจมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ด้วย โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิง และอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน และผลที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะแตกต่างกันไปด้วย [4] ลักษณะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2.2

2.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (PEFC or PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีอุณหภูมิในการทำงานที่ค่อนข้างต่ำคือประมาณ 175°F หรือ 80°C หรือต่ำกว่า อีกทั้งยังสามารถทำงานในระดับความดันบรรยากาศได้อีกด้วย แต่ทั้งนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดดังกล่าวสามารถให้ความหนาแน่นของพลังงาน (High Power Density) ได้สูง ทำให้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มักนิยมนำไปใช้งานกับรถยนต์ขนาดเล็ก อุปกรณ์เคลื่อนที่ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่เพื่อใช้ชาร์จไฟฟ้าได้ จึงเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมากและมีการวิจัยกันแพร่หลาย โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้พอลิเมอร์แบบสารอินทรีย์แข็ง (Solid Organic Polymer) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกบางเป็นตัวอิเล็กโตรไลต์ ลักษณะและการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์แสดงในภาพที่ 2.3





ภาพที่ 2.3 Polymer Electrolyte Fuel Cell หรือ Proton Exchange Membrane Fuel Cells

โดยชั้นทั้ง 5 ของ เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 นั้น เรียก รวมกันว่าเป็น หน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีดังที่อธิบาย มาข้างต้น ซึ่งขั้นตอนแรกในการสร้างหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วย กระบวนการต่างๆแล้วนั้น ขั้นตอนในการประกอบ คือ นำไปวางลงบนเยื่ออิเล็กโตรไลต์ เพื่อที่จะประกอบ โดยการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยอุณหภูมิราว 130-140 °C ที่ความดันสูงเป็นเวลา 3 นาที จึงได้หน่วยเยื่อแผ่น และขั้วไฟฟ้า (MEA) ที่เสร็จสมบูรณ์ [4]

ทั้งนี้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนแบบดั้งเดิมที่มีใช้กันทั่วไปนั้นมีการใช้ระบบส่งกำลังจำแนกได้ออกเป็น 2 ประเภทดังที่จะแสดงในส่วนต่อไป

2.2 ระบบส่งกำลัง

2.2.1 ระบบนิวแมติกส์

นิวแมติกส์เป็นคำที่มีรากมาจากภาษากรีกที่ว่า “Pneuma” หมายถึงหายใจ หรือลม โดยใน ปัจจุบันนิวแมติกส์หมายถึง ระบบลมที่นำลมที่ถูกอัดตัวไปใช้งานเพื่อผ่อนแรง ถ่ายทอดกำลังงาน โดยเฉพาะการนำมาใช้ขับเคลื่อนและควบคุมอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ

ปัจจุบันระบบนิวแมติกส์ได้แพร่หลายในอุตสาหกรรมอย่างมาก เนื่องจากระบบนิวแมติกส์นั้นง่าย ต่อการใช้งานและซ่อมบำรุง รวมทั้งมีราคาไม่แพง โดยข้อดี และข้อเสียของระบบนิวแมติกส์นั้นแสดงใน ตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบนิวแมติกส์ [7]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ทนต่อการระเบิดลมอัดไม่มีอันตรายจากการระเบิดหรือติดไฟ อุปกรณ์ราคาไม่แพง 2. ลูกสูบมีความเร็วในการทำงาน 3. การส่งถ่ายง่าย สามารถเดินท่อลมอัดในระยะทางไกลได้ และลมอัดที่ใช้แล้วไม่ต้องนำกลับ สามารถปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศได้เลย 4. การเตรียมและเก็บรักษาได้ง่าย สามารถอัดเก็บไว้ในถังลม เพื่อนำไปใช้งานได้ต่อเนื่อง 5. ความปลอดภัย อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบลมอัดจะไม่เกิดการเสียหายจากงานที่เกินกำลัง 6. ควบคุมอัตราการความเร็วได้ง่าย โดยใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหลของลมอัด 7. สามารถการควบคุมความดันของลมอัดที่ต้องการสามารถควบคุมได้ง่าย โดยใช้วาล์วควบคุมความดัน 8. โครงสร้างง่ายต่อการใช้งานและดูแล	1. ลมอัดสามารถอัดตัวได้ ทำให้การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ไม่สม่ำเสมอ 2. ลมอัดมีความชื้น เมื่อเย็นตัวจะเกิดการกลั่นตัวของหยดน้ำในถังเก็บลมและท่อลม 3. ลมอัดต้องการเนื้อที่มาก เมื่อต้องการใช้แรงมาทำให้ต้องใช้กระบอกสูบที่ขนาดใหญ่ 4. ลมอัดมีเสียงดัง เมื่อมีการระบายลมออกจากอุปกรณ์ทำงาน จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บเสียง (Silencer) 5. ความดันของลมอัดเปลี่ยนแปลงได้โดยความดันของลมอัดจะเพิ่มขึ้นและลดลง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

2.2.2 ระบบไฮดรอลิก

ไฮดรอลิกเป็นคำที่มีรากมาจากภาษากรีกคือ ไฮโดร (hydro) หมายถึง น้ำ ซึ่งรวมคำกับคำว่า ออูลิส (Aulis) หมายถึง ท่อ ดังนั้นระบบไฮดรอลิก จึงหมายถึง การไหลของน้ำหรือของไหลภายในท่อ ซึ่งจะ เป็นระบบการถ่ายทอดกำลังงานผ่านของไหล เพื่อใช้ในการผ่อนแรง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของระบบนิวแมติกส์ โดยข้อดี และข้อเสียของระบบไฮดรอลิกนั้นแสดงในตารางที่ 2.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบไฮดรอลิก [7]

ข้อดี	ข้อเสีย
-------	---------

1. การส่งถ่ายกำลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ	1. ต้องมีระบบในการรองรับน้ำมันที่ไหลกลับจากระบบ ไม่สามารถที่จะปล่อยทิ้งได้ เช่นเดียวกับอากาศในระบบนิวแมติก
2. ความแม่นยำในการเคลื่อนที่ดีมาก เนื่องจากน้ำมันมีการยุบตัวที่น้อย	2. อาจมีการรั่วไหลของน้ำมัน ทำให้เกิดอันตรายได้
3. สามารถใช้กับความดันสูงๆระบบจะมีกำลังมากจึงใช้ในอุตสาหกรรมหนักได้ดี	3. อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมีราคาแพง
4. ความสามารถในการควบคุมดีมากเนื่องจากมีเซอร์โววาล์วและเทคนิคการควบคุมแบบปิด	4. เมื่อเกิดอุบัติเหตุจากท่อในระบบแตกจะเกิดอันตรายมากเพราะน้ำมันไฮดรอลิกติดไฟได้
5. การเคลื่อนที่เชิงเส้นทำได้ง่าย	5. อุณหภูมิการใช้งานไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีที่ใช้แรงเพียงเล็กน้อยอย่างการสร้างหน่วยเยื่อแผ่นและปั๊มไฟฟ้าแล้ว การใช้ระบบไฮดรอลิกนั้นมีความราคาที่สูง และสามารถสร้างแรงได้มากเกินความจำเป็น [8,9] ในอีกทางหนึ่ง ระบบนิวแมติกซึ่งมีราคาถูกกว่า สามารถสร้างแรงขนาดเล็กซึ่งดูเหมาะสมกับการใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักของระบบนิวแมติกคือ ความเสถียร และความแม่นยำ ดังนั้นระบบทั้งสองจึงไม่สามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการประยุกต์ใช้กับหน่วยเยื่อแผ่นและปั๊มไฟฟ้าได้ เพื่อที่จะตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว มอเตอร์อาจจะเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากมีความแม่นยำ และความเสถียรที่ดี อีกทั้งยังใช้พื้นที่น้อยอีกด้วย แต่การประยุกต์ใช้กับหน่วยเยื่อแผ่นและปั๊มไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องให้แรงคงที่ต่อเนื่องเป็นเวลากว่า 1 นาทีเป็นอย่างน้อย ทำให้ต้องมีการให้แรงบิดอย่างต่อเนื่องโดยปราศจากการกระจัดเชิงมุมซึ่งมอเตอร์ไม่สามารถกระทำได้ ในขณะที่แม่แรงแบบเกลียวหมุน (Jackscrew) ที่มักใช้ผ่อนแรงในการยกสิ่งของที่มีน้ำหนักมาก ๆ สามารถใช้ร่วมกับมอเตอร์ได้ ซึ่งข้อได้เปรียบหลักของแม่แรงแบบเกลียวหมุนคือการที่แม่แรงแบบเกลียวหมุนไม่คลายตัวเมื่อแรงที่ป้อนเข้าสู่มันถูกเอาออกไป ดังนั้นถ้าหากนำมอเตอร์มาใช้งานร่วมกับแม่แรงแบบเกลียวหมุนก็จะทำให้สามารถนำไปใช้กับการประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและปั๊มไฟฟ้าได้

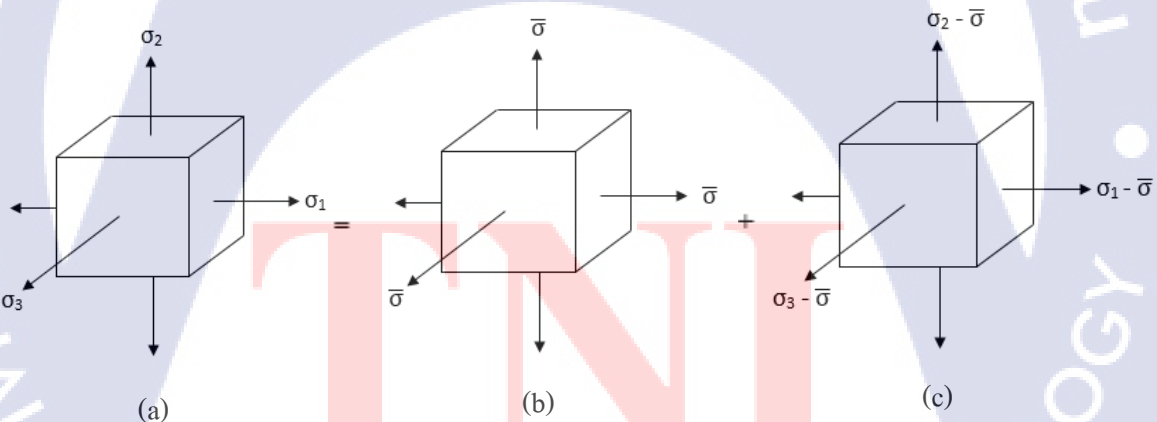
2.3 ทฤษฎีความเสียหาย

2.3.1 ทฤษฎีพลังงานบิดเบือนสำหรับวัสดุเหนียว (Distortion-Energy Theory for ductile materials)

ทฤษฎีพลังงานบิดเบือนเป็นทฤษฎีที่ทำนายว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความเครียดบิดเบือนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีค่าถึง หรือเกินกว่า พลังงานความเครียดบิดเบือนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับการครากในแรงดึงอย่างง่ายหรือแรงกดของวัสดุเนื้อเดียวกัน [10]

ทฤษฎีพลังงานบิดเบือนนั้นเริ่มมาจากการสังเกตว่าความเค้นแบบของไหลสถิตย์ของวัสดุเหนียวแสดงลักษณะการครากเมื่อถึงค่านั้นเกินกว่าค่าที่ได้จากการทดลองแบบแรงดึงอย่างง่าย ดังนั้นจึงเป็นสมมุติฐานว่าการครากนั้นไม่ได้เกิดจากแรงดึงอย่างง่ายหรือแรงกดแต่เพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากการบิดเบือนเชิงมุม (Angular Distortion) ของอีลิเมนต์ที่มีความเค้น (Stressed element) เพื่อที่จะสร้างทฤษฎีขึ้นมาในภาพที่ 2.4a แสดงถึงอีลิเมนต์หนึ่งหน่วยปริมาตรที่ได้รับความเค้นทั้งสามมิติ โดยกำหนดให้ความเค้นนั้นคือ ความเค้น σ_1 , σ_2 และ σ_3 ความเค้นที่แสดงในภาพที่ 2.4b เป็นหนึ่งในแรงดึงแบบของไหลสถิตย์โดยที่ $\bar{\sigma}$ กระทำในทิศทางเดียวกับที่แสดงในภาพที่ 2.4a และสมการสำหรับ $\bar{\sigma}$ แสดงในสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.4 อีลิเมนต์ที่ได้รับความเครียด

ดังนั้นอีลิเมนต์ในภาพ 2.4b จะประสบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพียงอย่างเดียว (pure volume change) กล่าวคือ จะไม่มีการบิดเบือนเชิงมุม และถ้าให้ความเค้น $\bar{\sigma}$ เป็นส่วนประกอบของ

ความเค้น σ_1 , σ_2 และ σ_3 แล้ว จะทำให้ส่วนประกอบดังกล่าวลบออกจากความเค้นในข้างต้นได้ ส่งผลให้เกิดความเค้นที่แสดงในภาพ 2.4c โดยอิลิเมนต์นี้จะได้รับการบิดเบือนเชิงมุมแต่เพียงอย่างเดียวโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตร

พลังงานความเครียดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสำหรับแรงดึงอย่างง่าย (สมการที่ 2.2) คือ

$$u = \frac{1}{2} \epsilon \sigma \quad (2.2)$$

โดยสำหรับอิลิเมนต์ในภาพ 2.4a แล้ว พลังงานความเครียดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (สมการที่ 2.3) คือ

$$u = \frac{1}{2} [\epsilon_1 \sigma_1 + \epsilon_2 \sigma_2 + \epsilon_3 \sigma_3] \quad (2.3)$$

จากความสัมพันธ์ (สมการที่ 2.4)

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - u(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - u(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - u(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (2.4)$$

เราจะได้ความสัมพันธ์ความเครียดหลัก (Principle strain) ดังสมการที่ 2.5

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2u(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (2.5)$$

พลังงานความเครียดสำหรับการสร้างความเปลี่ยนแปลงทางปริมาตร (u_v) จะได้จากการแทน $\bar{\sigma}$ ลงไปในความเค้น σ_1 , σ_2 และ σ_3 ลงไปในสมการที่ 2.6 ซึ่งจะได้

$$u = \frac{3\bar{\sigma}^2}{2E} [1-2\nu] \quad (2.6)$$

โดยเมื่อแทนสมการที่ 1 ลงไปในสมการที่ 2.6 และจัดรูปจะได้ดังสมการที่ 2.7

$$u_v = \frac{1-2\nu}{6E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2.7)$$

ดังนั้น พลังงานการบิดเบือนจะได้จากการลบสมการที่ 2.7 ด้วยสมการที่ 2.5 จะได้ดังนี้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (2.8)$$

สำหรับการทดลองแรงดึงอย่างง่ายที่จุดคราก $\sigma_1 = S_y$ และ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ และจากสมการที่ 2.8 จะได้พลังงานการบิดเบือน

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ S_y คือ ความเค้นที่จุดคราก

ดังนั้น จุดครากในรูปของความเค้นทั่วไปที่ได้จากสมการที่ 2.8 จะสามารถทำนายได้จากการที่สมการที่ 2.8 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ 2.9 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2.10)$$

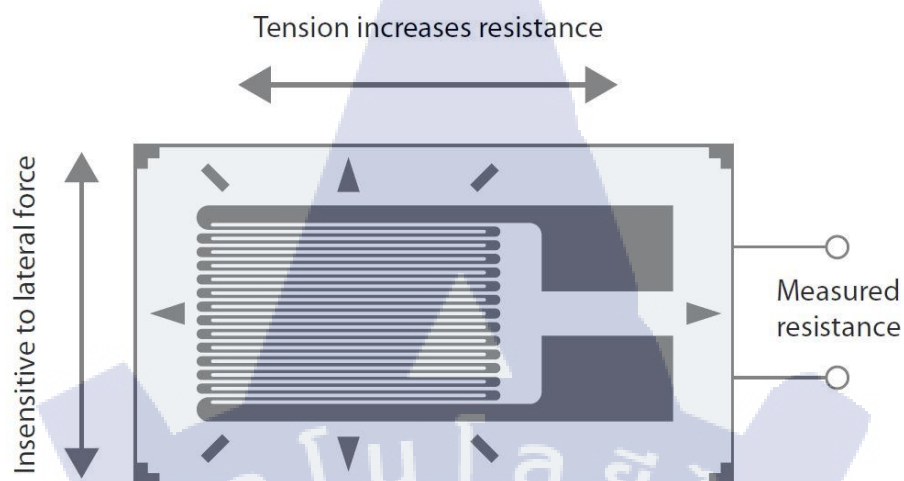
โดย Von Mises stressed (σ') คือ

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

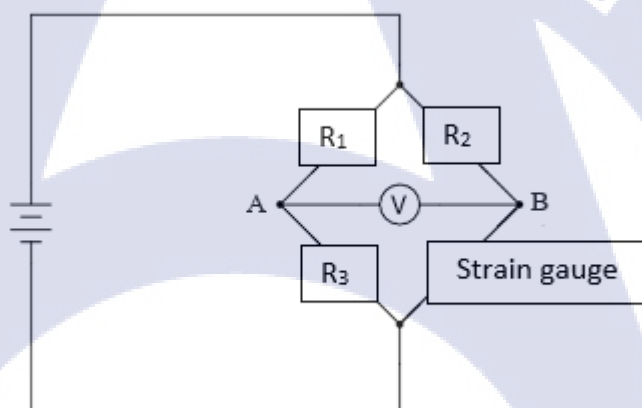
ในการสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปนั้นจำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์เพื่อวัดแรงกดอัด จึงจะสามารถรู้ได้ว่าแรงกดนั้นมีปริมาณเท่าใด ซึ่งจะอธิบายหลักการพื้นฐานของเซ็นเซอร์ดังกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

2.4 หลักทำงานของโหลดเซลล์ (load cell)

โหลดเซลล์ (Load cell) คือ เซ็นเซอร์ที่แปลงค่าการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปแบบความเครียด (Strain) ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ฯลฯ โดยปกติแล้วโหลดเซลล์แบ่งออกได้หลายชนิด [11] แต่ในที่นี้จะพูดถึงแค่ โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell) เนื่องจากเป็นโหลดเซลล์ที่ถูกนำมาใช้งานทั่วไปในงานประเภทนี้ โดยหลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำทำให้วัสดุเกิดความเครียด ค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้น และความเครียดนี้มีความสัมพันธ์อยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ด้วยเหตุนี้ การวัดค่าความต้านทานจึงสามารถนำไปหาค่าแรงที่กระทำได้ สเตรนเกจโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง มีโลหะแผ่นบาง (Foil) ขดตัวอยู่ภายใน แสดงในภาพที่ 2.5 เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนรูปจะทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไป การเปลี่ยนความต้านทานของสเตรนเกจมักถูกวัดด้วยวงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) แสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 สเตรนเกจ [11]



ภาพที่ 2.6 การต่อสเตรนเกจในรูปแบบวงจรวีตส์โตนบริดจ์แบบควอเตอร์ บริดจ์ (Quarter-bridge)

ในสภาวะปกติ ความต่างศักย์ที่จุด A และจุด B มีเท่ากัน หากมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตัวหนึ่งตัวใดในสี่ตัว จะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างจุด A กับจุด B ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบให้ค่ากระแสที่ไหลมีค่าเป็นศูนย์ การปรับค่าความต้านทานสามารถหาได้จากความสัมพันธ์สมการที่ 2.12

$$R_1 R_{\text{gauge}} = R_2 R_3 \quad (2.12)$$

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อการวัดค่าของสเตรนเกจ แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้หนึ่งตัวในวงจรวีตสโตนบริดจ์ เพื่อปรับค่าชดเชยให้กับวงจรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่สปริงของชิ้นส่วนหน้าสัมผัสมีค่าสูงมาก ทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงในการกดให้เป็นไปตามฟังก์ชันของระยะทางได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นส่วนสปริงให้ค่าคงที่สปริงนั้นเปลี่ยนไป โดยสมมติให้ชิ้นส่วนหน้าสัมผัสนั้นเป็นวัสดุแข็งเกร็ง แต่ทั้งนี้ในตลาดทั่วไปนั้นผู้ขายสปริงไม่ทราบค่าคงที่ของสปริงเช่นกัน จึงต้องมีการศึกษาเพื่อให้ทราบว่าสปริงที่มีค่าคงที่ตามที่ต้องการนั้นมีลักษณะทั่วไปเป็นอย่างไร ดังที่จะแสดงในหัวข้อที่ 2.5

2.5 การหาค่าคงที่ของสปริง (Spring Constant)

สปริงเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง ที่เป็นตัวให้แรงดึง แรงกด หรือแรงบิด ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวขยับไปมาและยังทำหน้าที่รับและส่งถ่ายพลังงาน เช่น การลดการสั่นสะเทือน สปริงถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง วัสดุที่ใช้ทำสปริงส่วนใหญ่ เป็นโลหะหรือถ้าเป็นงานที่รับภาระเบาอาจใช้พลาสติกได้ ในเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีการสั่นสะเทือน ควรใช้แท่งยางทำสปริง เช่น แท่งยางรองรับมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ ใช้เป็นอุปกรณ์นิวเมติกส์ เป็นต้น

ความแข็งตึงของสปริง (spring stiffness) หมายถึงปริมาณของแรงที่ใช้ในการทำให้สปริงยืดหดหนึ่งหน่วยความยาวใน แนวแกนของสปริง มีชื่อเรียกอีกหลายชื่อแตกต่างกันไป เช่น ค่าคงที่ของสปริง (spring constant) อัตราสปริง (spring rate) โมดูลัสของสปริง และเกรเดียนของสปริง (spring gradient) เป็นต้น สามารถคำนวณหาค่าตึงของสปริง จากสมการที่ 2.13 และ 2.14 [12]

$$k = \frac{F}{x} \quad (2.13)$$

$$k = \frac{GD_w}{8C^3N_a} = \frac{GD_w^4}{8D_m^3N_a} \quad (2.14)$$

เมื่อ F = แรงที่กดสปริง มีหน่วยเป็น N

x	= ระยะยุดตัวของสปริง	มีหน่วยเป็น mm
N_s	= จำนวนขดสปริง	
G	= โมดูลัสความแข็งแรง	มีหน่วยเป็น N/mm^2
C	= ดัชนีสปริง	
D_w	= เส้นผ่านศูนย์กลางของลวด	มีหน่วยเป็น mm
D_m	= เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริง	มีหน่วยเป็น mm

ในการสร้างความร้อนและส่งผ่านความร้อนนั้น ในงานเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนนี้อาศัยการส่งผ่านความร้อนแบบการนำความร้อน ซึ่งจะเป็นที่จะต้องนำมาใช้วิเคราะห์ว่าจะไม่ความเสียหายต่อโพลด-เซลล์ อีกทั้งจำเป็นต้องมีการคำนวณว่าวัสดุสามารถทำอุณหภูมิได้ถึงระดับอุณหภูมิที่ต้องการภายในเวลาเท่าใด จึงแสดงไว้ในส่วนหัวข้อต่อไป

2.6 การนำความร้อนและปริมาณความร้อน (Heat Conduction & Quantity of heat)

การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายโอนความร้อนเพียงแบบกลไกพื้นฐานเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางแบบของแข็ง โดยปกติแล้วเมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำความร้อนย่อมสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เพราะมีการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊สด้วยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสาร ทำให้เราไม่เรียกการถ่ายโอนความร้อนภายในตัวกลางเป็นของเหลว หรือก๊าซว่าเป็นการนำความร้อน แต่สำหรับในของแข็ง อนุภาคภายในการไม่สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระเช่นกับของไหล หรือก๊าซ โดยจะส่งความร้อนต่อกันผ่านการสั่นของอนุภาคเท่านั้นทำให้ของแข็งจะมีแต่การถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำความร้อนแต่เพียงอย่างเดียว อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) $\frac{dT}{dx}$ คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน [13, 14] ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{Rate of conduction} \propto \frac{\text{area} \times \Delta T}{t} \quad (2.15)$$

$$q_{\text{cond}} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

เมื่อ $q_{\text{cond}} =$ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Watt or J/s)

$A =$ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

$T =$ อุณหภูมิ (K)

$x =$ ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)

$t =$ ความหนาของวัตถุ (m)

ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k มีหน่วยเป็น W/m K ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการถ่ายโอนความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_{\text{cond}} = kA \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

ค่าการนำความร้อน k เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของแก๊สไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรตามอุณหภูมิ แต่การนำไปใช้งานในด้านการปฏิบัตินั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ย สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารอโลหะ ก็จะมีค่า k ต่ำ ค่า k จึงเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารที่สำคัญมากในการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของความร้อนในสารนั้น สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของสารต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบจากค่า k ของสารเหล่านั้น โดยสารที่มีค่า k สูง จะเรียกว่า สารตัวนำ (conductor) และสารที่มีค่า k ต่ำ จะเรียกว่า ฉนวน (insulator)

2.6.1 การนำความร้อนในผนังราบ (Conduction in plane walls)

จากสมการดุลพลังงานทั่วไป เขียนได้ดังสมการที่ 2.18

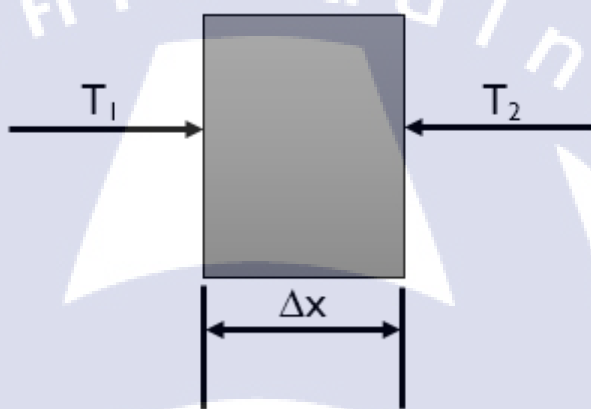
$$q_{in} - q_{out} + q_{gen} = \frac{dE_{wall}}{dt} \quad (2.18)$$

เมื่อ q_{in} = อัตราการนำความร้อนในผนัง

q_{out} = อัตราการนำความร้อนนอกผนัง

q_{gen} = อัตราการเกิดความร้อนในผนัง (Heat generation)

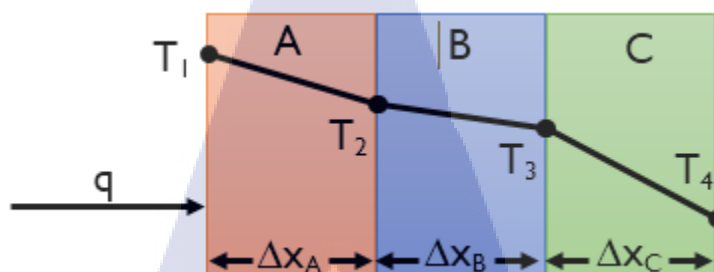
สำหรับการนำความร้อนมิติเดียวที่สภาวะคงตัว (Steady state) จะใช้กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ในการอธิบาย ดังสมการที่ 2.18 ในภาพที่ 2.8 แสดงการนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบชั้นเดียว



ภาพที่ 2.8 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบชั้นเดียว

2.6.2 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่ต่อบนุกรม (plane walls in series)

ความร้อนไหลผ่านผนังที่ซ้อนกันหลายชั้นโดยการนำความร้อนดังภาพที่ 2.9 เช่น ผนังของอาคารบ้านเรือน การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนก็จะยากยิ่งขึ้น ในกรณีที่สภาวะต่าง ๆ คงที่ อัตราความร้อนที่ไหลผ่านแต่ละชั้นของผนังจะมีค่าเท่ากัน ทั้ง ๆ ที่ความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน ในกรณีนั้นอัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังแต่ละชั้นเป็นดังสมการที่ 2.19



ภาพที่ 2.9 การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังหลายชั้นต่อแบบอนุกรม

$$q_{\text{cond,wall}} = -k_A A \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_A} = -k_B A \frac{(T_3 - T_2)}{\Delta x_B} = -k_C A \frac{(T_4 - T_3)}{\Delta x_C} \quad (2.19)$$

2.6.3 ปริมาณความร้อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

ปริมาณความร้อนที่เพิ่มเข้าหรือดึงออกจากวัตถุ ซึ่งจะทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.20)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อน (J)

m = มวลของวัตถุ (kg)

c_p = ความร้อนจำเพาะ ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (K)

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจึงเขียนได้ว่า

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (2.21)$$

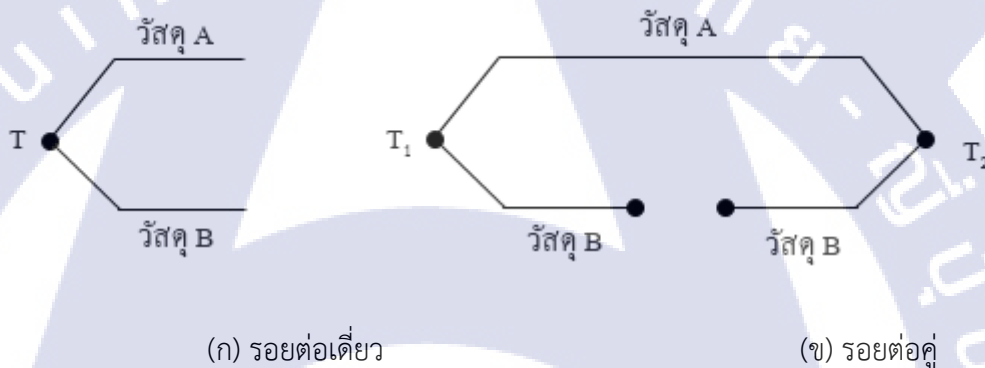
โดย $\dot{Q}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อน (Watt or J/s)

$\dot{m}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของวัตถุ (kg/s)

ทั้งนี้ในการที่จะทราบอุณหภูมิได้นั้นจำเป็นต้องมีเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิที่ดี จึงต้องมีการเลือกใช้ที่เหมาะสม โดยในส่วนต่อไปจะแสดงถึงเทอร์โมคัปเปิลในชนิดต่างๆพร้อมหลักการทำงานพื้นฐาน

2.7 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นตัวรับรู้อย่างง่าย ประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ โลหะต่างชนิดกัน 2 เส้น เชื่อมปลายเข้าด้วยกันแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ลักษณะการเชื่อมปลายของเทอร์โมคัปเปิล

การทำงานของเทอร์โมคัปเปิลนั้นอยู่บนพื้นฐานของ ผลกระทบของซีแบ็ค (Seebeck Effect) [15] ซึ่งเป็นผลที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าความร้อน (Thermo-electric effect potential) หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เมื่อโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกันรวมกันที่รอยต่อ ผลของไฟฟ้าความร้อนทำให้เกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนข้ามพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง ดังนั้นจึงเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากการไหลข้ามพื้นที่ผิวสัมผัสของอิเล็กตรอน โดยสามารถอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์ค่าได้จากสมการอนุพันธ์นี้ คือ

$$E = S \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

โดย E = แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลฝั่งขาออก (V)

$$\frac{dT}{dx} = \text{ความลาดชันของอุณหภูมิ}$$

$$S = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ซีแบ็คของวัสดุ (V/K)}$$

2.6.1 คุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลชนิดมาตรฐานต่างๆ (Characteristics in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM [26] โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดีของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ

เทอร์โมคัปเปิล	ข้อดี
ชนิด S	- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1550 °C - เหมาะกับการใช้งานในสภาวะงานเฉื่อย คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆ ได้ง่าย - เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง (Oxidizing) - นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
ชนิด R	- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600 °C - ให้แรงเคลื่อนทางต้านเอาต์พุตสูงกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบ S - เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
ชนิด B	- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600 °C - แข็งแรงกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบ S และแบบ R - เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสภาวะเฉื่อย ให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (linearity) ดี
ชนิด J	- วัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ -210 ถึง 1200 °C - ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี - เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760 °C

	- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก
ชนิด K	- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180°C ถึงประมาณ $1,350^{\circ}\text{C}$ - เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด - สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง (Oxidizing) หรือสภาวะแบบเฉื่อยได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ - สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี - ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ตารางที่ 2.3 ข้อดีของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ (ต่อ)

เทอร์โมคัปเปิล	ข้อดี
ชนิด T	- วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง -185 ถึง 300°C และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง -250 ถึง 400°C - ให้ความแม่นยำในการวัดดีกว่าเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (ช่วงที่ต่ำกว่า 100°C ความแม่นยำจะเป็น $\pm 1\%$) - มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิดี - การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิง (Oxidizing), รีดิวซิง (Reducing) และงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี - ทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้ดี
ชนิด E	- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 800°C - ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับแบบอื่น ๆ ในสภาวะเดียวกัน - คุณสมบัติอื่น ๆ คล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

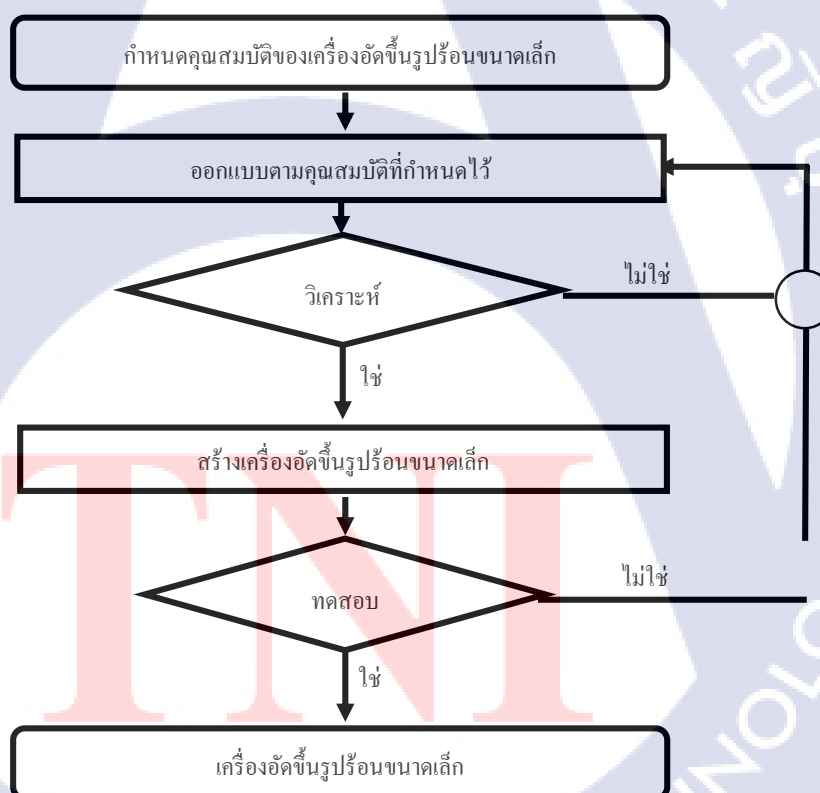
บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

ในการศึกษาและดำเนินงานโครงการ ผู้จัดทำได้ดำเนินงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.1 กำหนดคุณสมบัติของเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก
- 3.2 ออกแบบเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก
- 3.3 วิเคราะห์เชิงวิศวกรรม
- 3.4 สร้างเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก
- 3.5 ทดสอบเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก

โดยจะแสดงแผนภูมิกระบวนการการทำงานในภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภูมิกระบวนการดำเนินโครงการ

3.1 กำหนดคุณสมบัติเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีต [4] คุณสมบัติของเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็กที่จะนำมาใช้ในงาน PEFC จะต้องสร้างอุณหภูมิให้ได้ถึง 130°C และสร้างแรงกดได้สูงสุด 3,000 นิวตัน โดยจะต้องมีเซ็นเซอร์เพื่อวัดอุณหภูมิและแรงกด

3.2 ออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็ก

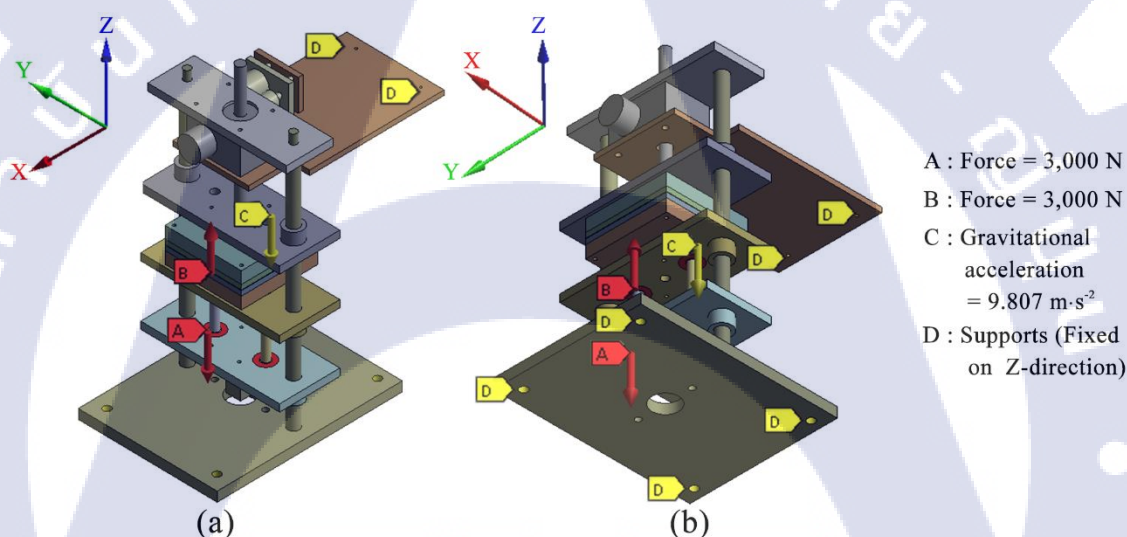
ในการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมของเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็กนั้น ทางผู้วิจัยได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CAD and CAE) และ การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณ (Analytical method) โดยแบ่งชิ้นส่วนของเครื่องอัดขึ้นรูปขนาดเล็กออกเป็น ดังนี้

1. โครงสร้าง
2. มอเตอร์
3. สกรูแจ๊ค
4. สปริง
5. การสร้างความร้อน

3.2.1 การออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CAD and CAE)

ในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์นั้น จะทำการแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้าง และการสร้างความร้อน โดยโมเดลจะถูกนำเข้าจากโปรแกรม CATIA และทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ANSYS ซึ่งจากการออกแบบนั้น ความร้อนจะถูกสร้างขึ้นมาจากขดลวดความร้อนซึ่งจะมีความร้อนที่ไม่คงที่ โดยเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณลง จึงมีการกำหนดให้อุณหภูมิที่พื้นผิวหน้าสัมผัสนั้นคงที่ที่ 130°C โดยมีการกำหนดค่าการพาความร้อนที่แผ่นด้านบนของแผ่นให้ความร้อนบน, ด้านทั้ง 4

ด้านของแผ่นให้ความร้อน และ ด้านล่างของแผ่นให้ความร้อนล่างเป็น 8.081, 8.076 และ 4.041 W/m²K ตามลำดับ [17] โดยแผ่นให้ความร้อนทั้งสองนั้นจะถูกจำลองให้มีระยะห่าง 1 มิลลิเมตร โดยค่าการพาความร้อนของผิวสัมผัสจะไม่ได้ใส่ค่าไว้ซึ่งตามข้อสันนิษฐานว่าไม่มีของไหลผ่าน และค่าการพาความร้อนของส่วนอื่นๆของเครื่องกัก จะถูกกำหนดอยู่ที่ 3 W/m²K ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่แย่ที่สุดที่จะเกิดขึ้นได้ในการระบายความร้อน โดยลักษณะการใส่แรงจะแสดงอยู่ในภาพที่ 3.2 โดยทางคณะผู้วิจัยได้จำลองเพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากแรงกัก โดยจะแบ่งผลการจำลองที่จะทำการศึกษาออกเป็น 3 แบบ คือ การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเค้น และการโก่งตัวของแผ่นหน้าสัมผัสหลังจากการกัก เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกักอัดภายใต้สภาวะคงตัว



ภาพที่ 3.2 ลักษณะจำลองการใส่แรง

อีกส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ คือ การดูการกระจายตัวของความร้อนที่หน้าแผ่นสัมผัส โดยการจำลองในส่วนนี้นั้นจะต่างจากในข้างต้น เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วระหว่างการสร้างความร้อนนั้น ขดลวดความร้อนไม่ได้มีค่าความร้อนเท่ากันทั้งแท่ง โดยจากการทดลอง พบว่า ค่ากำลังความร้อนในแต่ละช่วงเป็น 27, 93, 591 และ 189 W ที่ช่วง 0-15, 15-25, 25-110 และ 110-140 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลที่ได้จากการจำลองนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ก่อนการสร้างจริง

3.2.2 การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณอย่างง่าย (Simple analytical method)

การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณอย่างง่ายนั้นจะใช้กับการคำนวณเพื่อหาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสมกับเครื่องขึ้นรูปรีดขนาดเล็ก ใช้คำนวณหาอัตราทดแรงของสกรูแจ็ค และหาค่าคงที่ของสปริง เพื่อสร้างฟังก์ชันของแรงตามระยะทางที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่อง [18]

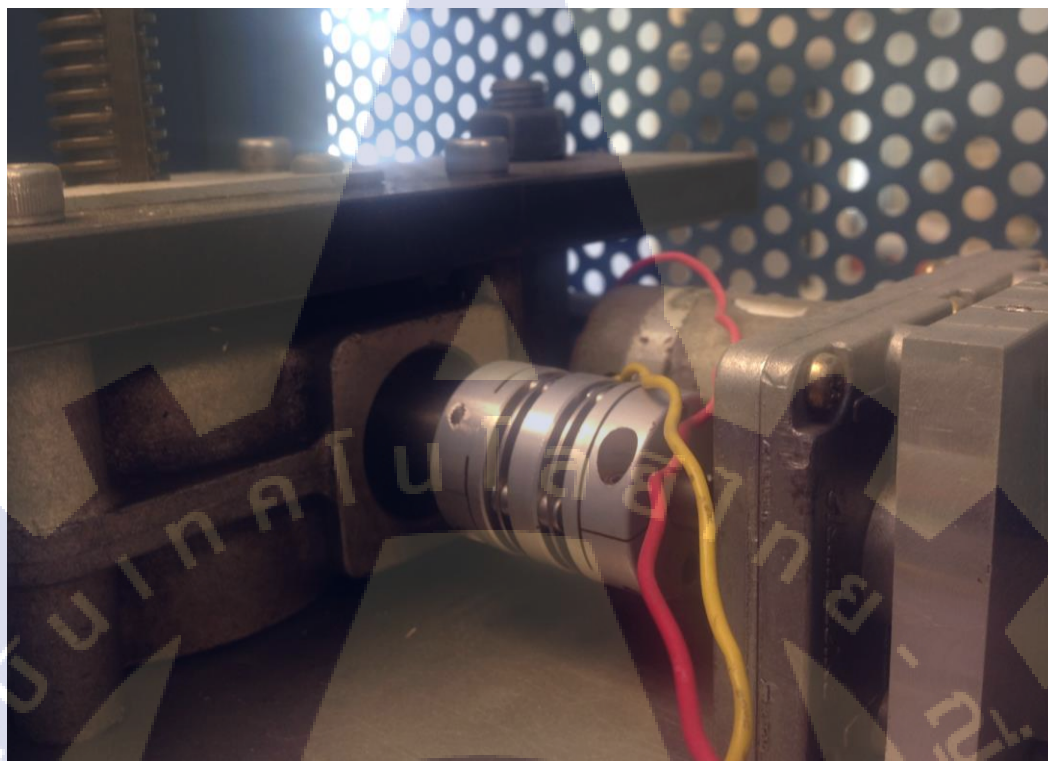
3.3 สร้างเครื่องอัดขึ้นรูปรีดขนาดเล็ก

ในส่วนของโครงสร้างของตัวเครื่องอัดขึ้นรูปรีดขนาดเล็กนั้น ทางผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนมาจากทางสถาบันดังภาพที่ 3.3 โดยทำการปรับปรุงจากเครื่องเดิมที่เป็นเครื่องที่ไม่ได้ใช้งานแล้วให้เป็นไปตามขนาดและระยะตามที่ต้องการออกแบไว้ ในส่วนของแผ่นเหล็กสัมผัสชิ้นงานและโครงสร้างอื่นที่นอกเหนือไปจากโครงสร้างหลัก ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างขึ้นมาใหม่ให้เป็นไปตามคุณสมบัติตามที่ต้องการออกแบไว้ ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนแผ่นเหล็กสัมผัสชิ้นงานนั้นต้องมีความเรียบที่สูง และเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของความสามารถดังกล่าว ทำให้ต้องใช้การเจียรระไน เป็นต้นในส่วนของสกรูแจ็คนั้น ทางผู้วิจัยได้จัดหาสกรูแจ็คที่มีอยู่ในท้องตลาด แล้วจึงนำมาวิเคราะห์เพื่อหาอัตราทด หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณเพื่อหาขนาดของมอเตอร์ที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน แต่ทั้งนี้ได้รับการสนับสนุนมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้วตามภาพที่ 3.4 จากทางสถาบัน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของมอเตอร์ที่ได้คำนวณเอาไว้ในข้างต้น โหลดเซลล์นั้นจัดซื้อโดยคุณสมบัติของโหลดเซลล์จะเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการในข้างต้น ทางผู้วิจัยได้จัดซื้อสปริงที่มีคุณสมบัติค่าคงที่ตามที่ออกแบและวิเคราะห์ไว้ ในส่วนของเทอร์โมคัปเปิลนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการจัดซื้อชนิด K เนื่องจากสามารถให้วัดอุณหภูมิในช่วงที่ต้องการได้และเป็นชนิดที่ใช้อยู่ทั่วไปทำให้มีราคาที่ถูกลง ลดความร้อนนั้นทางผู้วิจัยได้จัดซื้อตามที่มีคุณสมบัติตามที่คำนวณไว้ โดยจะต้องมีความสามารถในการทำอุณหภูมิจากอุณหภูมิปกติขึ้นไปถึง 130° ได้



ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดขึ้นรูปที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว

TNI

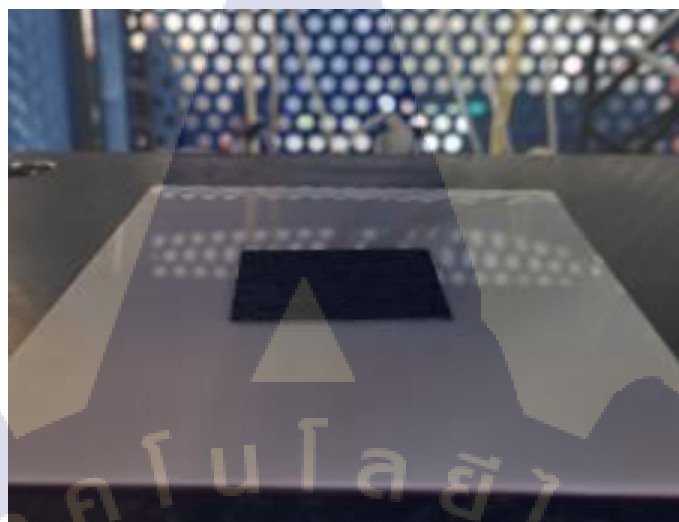


ภาพที่ 3.4 มอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้ว

3.4 ทดสอบเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็ก

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 อย่าง คือ

1. การทดสอบแรง เป็นการทดสอบว่าระบบการส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสกรูแจ็คสามารถสร้างแรงได้ตามลักษณะที่กำหนดไว้ในข้างต้น
2. การทดสอบความเรียบผิวของหน้าสัมผัส โดยจะเป็นการทดสอบด้วยแผ่น PRESCALE เพื่อดูความเรียบผิวหลังจากการกดที่สถานะที่ได้ทำการออกแบบไว้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การทดสอบความเรียบผิวของน้ำส้มฝัสด

บทที่ 4

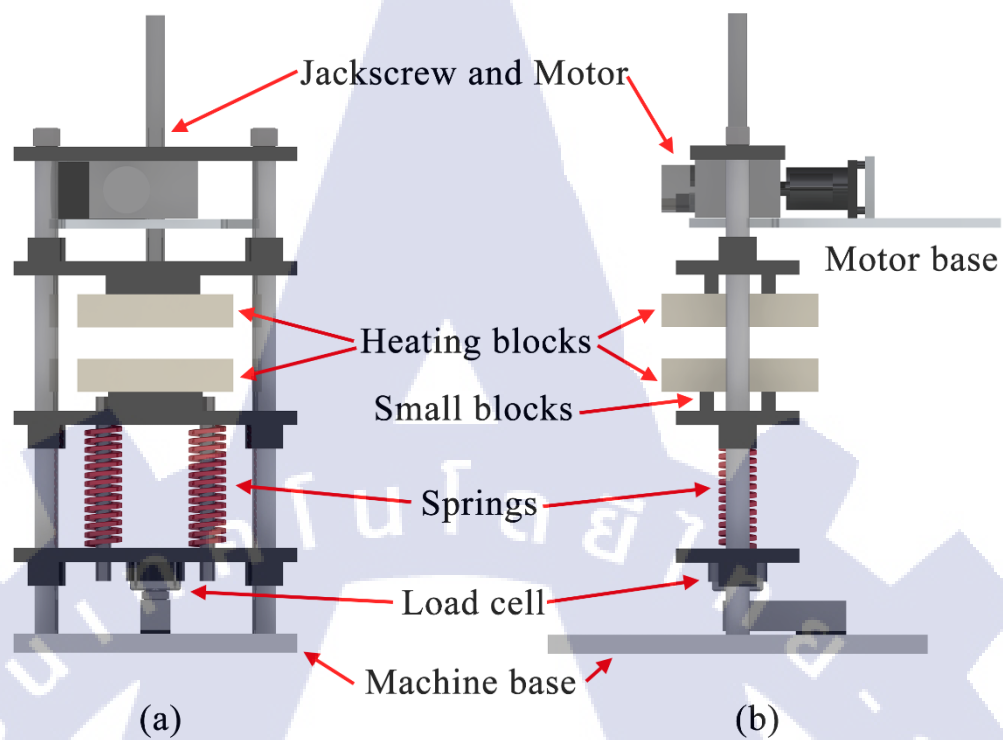
ผลการดำเนินงาน

โดยในส่วนของการดำเนินงานนั้น ผลที่ได้ถูกนำมาเสนอและวิเคราะห์ในบทนี้ตามลำดับดังต่อไปนี้

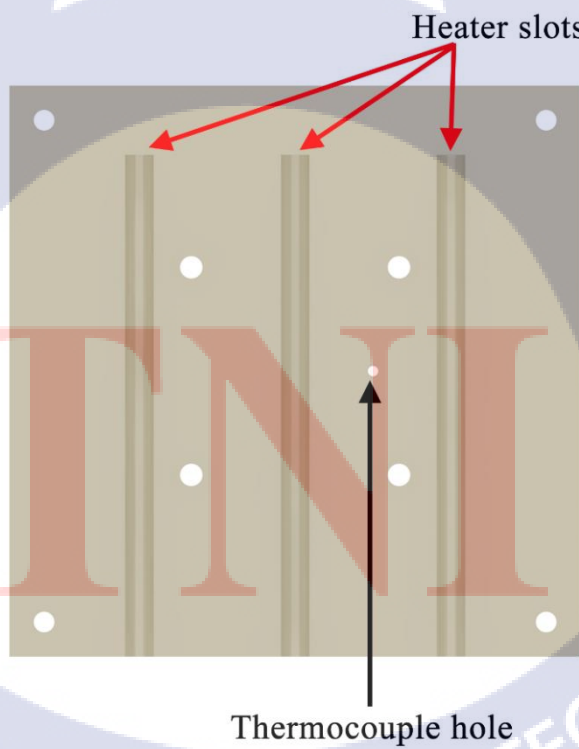
- 4.1 ผลการออกแบบ
- 4.2 ผลการวิเคราะห์
- 4.3 ผลการทดสอบ

4.1 ผลการออกแบบ

การออกแบบนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบผ่านโปรแกรม CATIA ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการออกแบบ 3 มิติโดยเฉพาะ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบเฉพาะในส่วนตัวเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ไม่รวมถึงโครงสร้างภายนอก และระบบไฟฟ้า โดยเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กที่ได้ออกแบบนั้น แสดงตามภาพที่ 4.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4.1 (a) ลักษณะด้านหน้าของเครื่องที่ออกแบบ และ (b) ลักษณะด้านข้างของเครื่องที่ออกแบบ มอเตอร์และสกรูแจ็คจะทำหน้าที่ในการส่งกำลังให้แก่ระบบ โดยมีสปริงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการโดยการลดค่าคงที่สปริงเพื่อสร้างฟังก์ชันของแรงตามระยะทาง โดยการวัดวัดค่าแรงที่สร้างได้ เครื่องกดที่ออกแบบมานั้นจะถูกวัดด้วยโพลดเซลล์ที่วางอยู่ล่างสุดของเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้โดนผลกระทบจากความร้อน [19] และในการสร้างความร้อนเพื่อใช้ในการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ เพื่ออุณหภูมิของหน้าพื้นผิวสัมผัสขึ้นไปถึงได้ตามที่กำหนด ความร้อนจะถูกสร้างขึ้นโดยขดลวดความร้อน และอุณหภูมิจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งตำแหน่งการจัดวางขดลวดความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลเป็นไปตามภาพที่ 4.2 โดยการออกแบบนั้นมุ่งเน้นไปที่การจัดวาง กำหนดจุดยึด กำหนดขนาดต่างๆ เพื่อความสะดวกในการสร้างและการซ่อมบำรุง อีกทั้งการจัดการระบบความร้อน เพื่อให้มีผลกระทบต่อโพลดเซลล์น้อยที่สุด



ภาพที่ 4.1 เครื่องที่ออกแบบ (a) ด้านหน้า (b) ด้านข้าง



ภาพที่ 4.2 ลักษณะการจัดขดลวดความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลในเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กที่ออกแบบ

4.2 ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์นั้นจะแบ่งออกทั้งสิ้น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณอย่างง่าย (Simple analytical method) และการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CAE, Computer Aided Engineering) เพื่อให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ และการออกแบบที่มีสามารถตอบสนองกับความต้องการและวัตถุประสงค์ด้านการใช้งานได้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณอย่างง่าย (Simple analytical method)

การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยการคำนวณอย่างง่ายแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.2.1.1 สกรูแจ็ค และมอเตอร์

4.2.1.2 สปริง

4.2.1.1 สกรูแจ็ค และมอเตอร์

ในส่วนของสกรูแจ็คนั้น ทางคณะผู้วิจัยได้จัดซื้อสกรูแจ็ค แต่เนื่องจากไม่ทราบคุณสมบัติทั่วไปของสกรูแจ็ค จึงอนุมานให้มีค่าเท่ากับสกรูแจ็คที่ขายในตลาดทั่วไปโดยตรวจสอบแล้วว่ามีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 20 มิลลิเมตร, ระยะห่างระหว่างแต่ละเกลียวของสกรูเป็น 5 มิลลิเมตร และเมื่อทดสอบด้วยการหมุนแล้วมีค่าระยะหมุนขึ้น คือ 1 รอบ ต่อ 1 มิลลิเมตร เท่ากันกับสกรูแจ็ครุ่น E2501 ของบริษัท Power Jacks [18] โดยคุณสมบัติที่นำมาใช้คำนวณจะแสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติของสกรูแจ็ครุ่น E2501 ของบริษัท Power Jacks

คุณสมบัติของสกรูแจ็ค	
ค่าอัตราทดเกียร์	5:1
ประสิทธิภาพแอกชูเอเตอร์ทางพลศาสตร์	0.36
ประสิทธิภาพแอกชูเอเตอร์ทางสถิตยศาสตร์	0.233
จำนวนสกรูเริ่มต้นของสกรูแจ็ค	1
กำลังป้อนสูงสุด (P_{max})	0.375 kW

แรงบิดเริ่มต้นที่โหลดสูงสุด (τ_{max})	6.8 Nm
--	--------

ทางคณะผู้วิจัยได้รับการบริจาคมอเตอร์ที่ไม่ได้ใช้การแล้วมาจากทางสถาบัน โดยมอเตอร์ที่ได้รับมานั้นมีขนาดกำลัง 500 W ความเร็วสูงสุด 800 รอบต่อนาที ความต่างศักย์ 36 VDC อัตราทดเกียร์ที่ต่อจากมอเตอร์ไปยังสกรูแจ็ค ซึ่งเป็นขนาดที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ คือ 1.75 ดังนั้น ความเร็วป้อนของสกรูแจ็คจะเท่ากับ $800/1.75 = 457$ รอบต่อนาที จึงนำมาคำนวณเพื่อหาว่าสกรูแจ็คนั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ร่วมกับมอเตอร์หรือไม่โดยจะหาค่าอัตราขยายขึ้นของสกรูแจ็คตามสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$\text{Raise Rate} = \frac{N \times \text{Pitch} \times \text{No. of Starts on Lifting Screw}}{\text{Gear Ratio}} \quad (4.1)$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบที่ต้องการ มีหน่วยเป็น rev/min
 Raise Rate = อัตราขยายขึ้นของสกรูแจ็ค มีหน่วยเป็น mm/min
 Gear Ratio = อัตราทดเกียร์
 Pitch = ระยะห่างระหว่างเกลียวของสกรูแจ็ค มีหน่วยเป็น mm
 No. of Starts on Lifting Screw = จำนวนสกรูเริ่มต้นของสกรูแจ็ค

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.1 แล้วได้เป็นดังนี้

$$\text{raise rate} = \frac{457 \text{ mm/min} \times 5 \text{ mm} \times 1}{5} = 457 \text{ mm/min}$$

หาค่ากำลังเริ่มต้นปฏิบัติการตามสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$P_{in} = \frac{\text{Load} \times \text{Raise Rate}}{60000 \times \eta_{ad}} \quad (4.2)$$

เมื่อ Load = ภาระ มีหน่วยเป็น kN
 Raise Rate = อัตราขยายขึ้นของสกรูแจ็ค มีหน่วยเป็น mm/min

η_{ad} = ประสิทธิภาพแอกชูเอเตอร์ทางพลศาสตร์

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.1 และให้ภาระมีค่าเป็น 3 kN ตามที่ออกแบบเอาไว้

$$P_{in} = \frac{3 \text{ kN} \times 457 \text{ mm/min}}{60000 \times 0.36} = 0.0634 \text{ kW}$$

หาค่าแรงบิดเริ่มต้นจากสมการที่ 4.3 ดังนี้

$$\tau_{in} = \frac{\text{Load} \times \text{Pitch} \times \text{No. of Starts on Lifting Screw}}{2 \times \pi \times \eta_{as} \times \text{Gear Ratio}} \quad (4.3)$$

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.1 ได้เป็นดังนี้

$$\tau_{in} = \frac{3 \text{ kN} \times 5 \text{ mm} \times 1}{2 \times \pi \times 0.233 \times 5} = 2.05 \text{ N} \cdot \text{m}$$

โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าเริ่มต้นจากคู่มือกับค่าที่คำนวณได้แล้วนั้น พบว่า $P_{max} > P_{in}$ และ $\tau_{max} > \tau_{in}$ หมายความว่า สกรูเจ็คนั้นสามารถตอบสนองต่อมอเตอร์ที่ได้รับบริจาคมจากทางสถาบันได้ ดังนั้นจึงสามารถนำสกรูเจ็คมานำใช้กับมอเตอร์ดังกล่าวได้เลย

4.2.1.2 สปริง

ในส่วนของสปริงนั้น จะเป็นการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ของสปริงที่เหมาะสมแก่การใช้งาน เนื่องจากทางคณะผู้วิจัยได้รับบริจาคเครื่องจักรมาจากทางสถาบัน ดังนั้น ระยะเวลาสำหรับสปริงที่ใช้ในการเคลื่อนที่จึงถูกกำหนดตามขนาดของโครงที่มีอยู่แล้ว และแรงที่ใช้กด คือ แรงที่กำหนดตามคุณสมบัติของเครื่องขึ้นรูปอ่อนขนาดเล็กตามที่ต้องการโดยจะคำนวณจากสมการที่ 2.13 ดังนี้

$$k = \frac{F}{x} \quad (2.13)$$

เมื่อ F = แรงที่กดสปริง มีหน่วยเป็น N

x = ระยะยวบตัวของสปริง มีหน่วยเป็น m

โดยได้คำนวณหาค่าคงที่ของสปริงตามระยะทางที่กำหนด และแรงตามที่ย่อแบบไว้แล้วนั้น คือ ระยะทางประมาณ 0.05 เมตร และแรงที่ใช้ในการกดสปริงอยู่ที่ 3000 นิวตัน นำค่าที่กำหนดมาคำนวณตามสมการที่ 2.13 จะได้เป็น

$$k = \frac{3000}{0.05} = 60 \text{ kN/m}$$

เมื่อคำนวณแล้วนั้น พบว่า ค่าคงที่ของสปริงมีค่าเป็น 60 kN/m แต่จากการออกแบบนั้น ได้ออกแบบให้มีสปริง 2 ตัววางขนานกัน ทำให้แรงที่สปริงจะต้องรับในแต่ละตัวจะกลายเป็นครึ่งหนึ่ง ดังนั้นค่าคงที่ของสปริงของสปริงที่ต้องการใช้เป็นแต่ละ 30 kN/m โดยที่จากการออกแบบมานั้น สปริงแต่ละตัวมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในมีขนาดอย่างน้อย 2 เซนติเมตร เนื่องจากหากมีขนาดเล็กไปกว่านี้ จะทำให้สปริงไปชนกับแกนที่ใช้สำหรับใส่นำทางให้กับสปริง และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกควรมีค่าไม่เกิน 4 เซนติเมตร และเมื่อได้ค่าคงที่ของสปริงตามที่ต้องการแล้วนั้น ก็จะนำไปหาสปริงที่มีค่าคงที่ของสปริงอยู่ในช่วงที่คำนวณออกมา และมีขนาดไม่เกินที่ย่อแบบไว้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (CAE, Computer Aided Engineering)

ในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะเป็นการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ

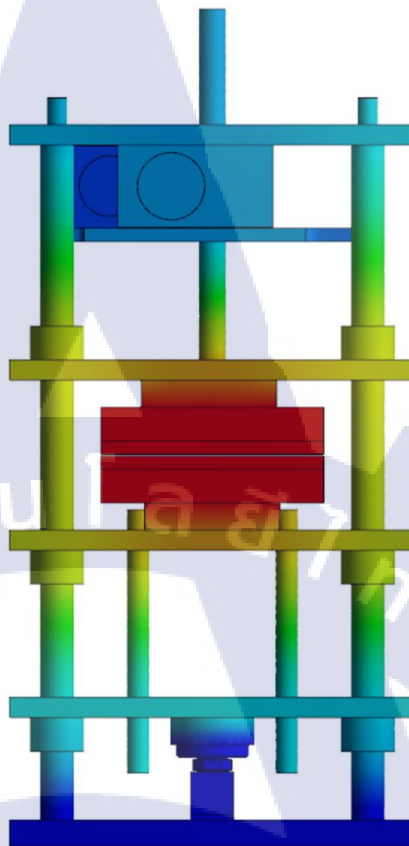
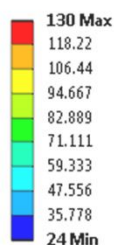
4.2.2.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง

4.2.2.2 ระยะห่างระหว่างพื้นผิวหลังจากการกด

4.2.2.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง

เมื่อวิเคราะห์ที่การกดที่สถานะที่ 3 กิโลนิวตัน อุณหภูมิ 130°C การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การกระจายตัวของความร้อน และการกระจายตัวของความเค้น โดยหลังจากการวิเคราะห์ผลการจำลองภายใต้สถานะที่กำหนดไว้นั้น การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นหลังจากการกดนั้นแสดงอยู่ในภาพที่ 4.3

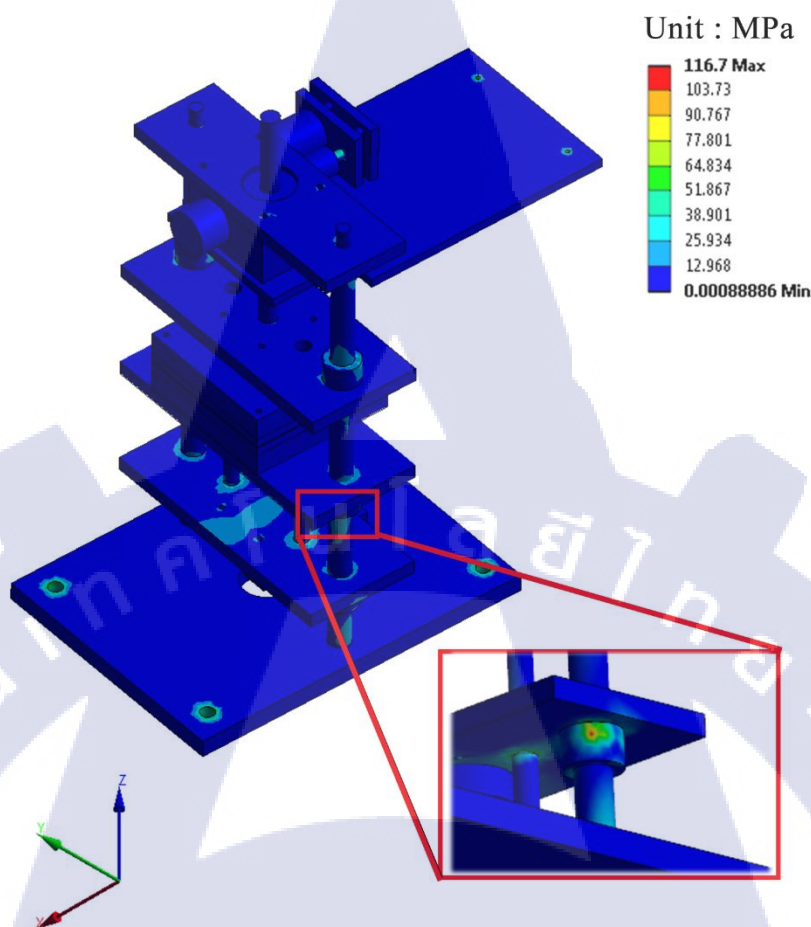
Unit : °C



ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของความร้อน

โดยจากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของความร้อนนั้นสม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่างของเครื่อง โดยอุณหภูมิที่ต่ำสุดนั้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 24-47.6°C ซึ่งพบอยู่บริเวณส่วนด้านล่างของเครื่อง โดยจากการทำการจำลองนี้ทำให้สามารถหาโหลดเซลล์ที่มีช่วงอุณหภูมิทำงานที่เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่งอยู่ในช่วง 20-60°C [20]

หลังจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิแล้วนั้น แรง 3 กิโลนิวตันที่ทำการออกแบบไว้จะถูกใส่ลงไป เพื่อที่จะศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากการกด โดยการกระจายตัวของความเค้นจะแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า ส่วนใหญ่ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 0-12 เมกาสกาล ยกเว้นความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อของแผ่นด้านล่าง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่จากการจำลองนั้น พบว่า ค่าความปลอดภัยนั้นมีค่าไม่เกิน 2 ซึ่งหมายความว่า โครงสร้างของเครื่องจะไม่เกิดการเสียรูประหว่างที่ทำงานภายใต้สถานะนี้

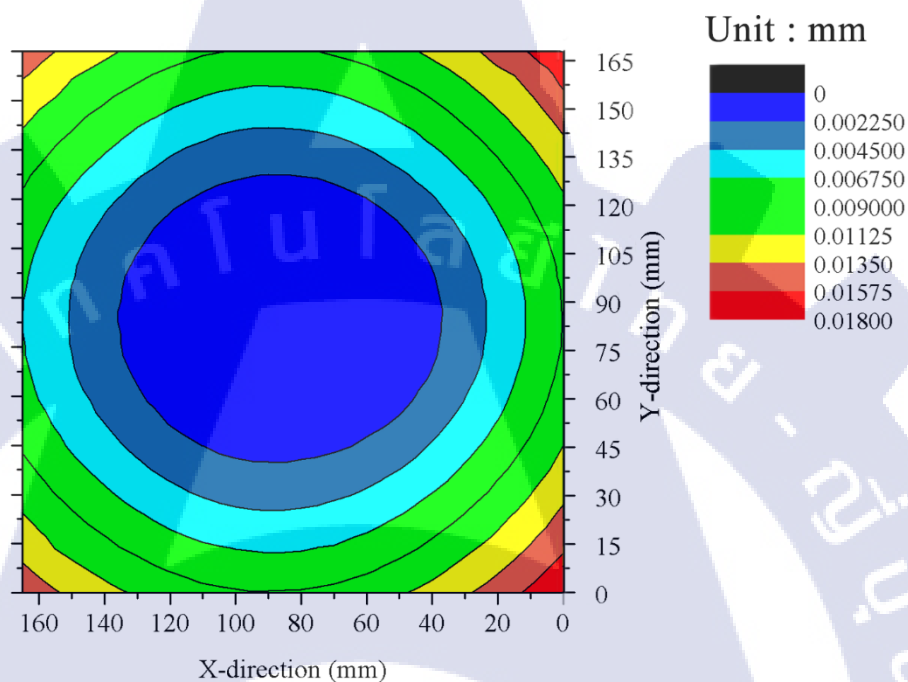


ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของความเค้น

4.2.2.2 ระยะห่างระหว่างพื้นผิวหลังจากการกด

เนื่องจากเครื่องกดขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กนี้จะทำไปใช้เพื่อประกอบการประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ พื้นผิวหน้าสัมผัสที่ใช้ในการกดนั้นจำเป็นที่จะต้องมีความเรียบเป็นอย่างมาก ซึ่งทั้งนี้เซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์นั้นมีความหนาประมาณ 0.46 มิลลิเมตร หรือมากกว่านั้น จากผลการวิเคราะห์ค่าความโก่งของพื้นผิวสัมผัสนั้น ในงานนี้จะนำค่าความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากการกดที่สถานะที่กำหนดไว้มาหักล้างกัน ทำให้ได้ค่าความห่างกันของพื้นผิวหลังการกดซึ่งถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าระยะห่างที่เยอะที่สุดนั้นอยู่ในช่วง 0.018 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็น

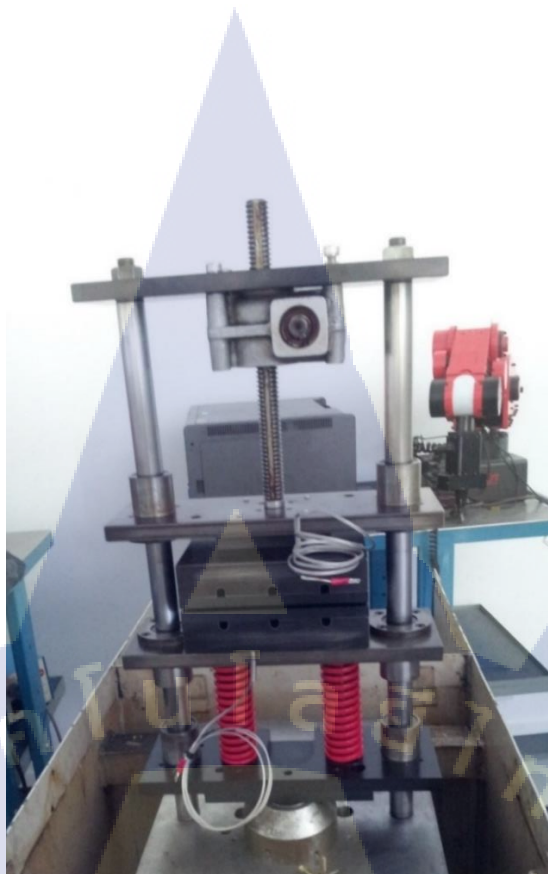
เพียง 5 เปอเซ็นต์ของความหนาทั้งหมดของเซลล์ที่จะทำการประกอบ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์ที่จะประกอบนั้น มีขนาดเพียง 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งจากการจำลองนั้น พบว่า เครื่องกดที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถใช้กดประกอบเซลล์เชื้อเพลิงแบบพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ที่มีขนาดใหญ่ได้ถึง 145 ตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4.5 ระยะห่างหลังจากการกดระหว่าง 2 พื้นผิว

4.3 ผลการทดสอบ

หลังจากทำการวิเคราะห์ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ ที่แสดงในภาพที่ 4.6 ซึ่งเป็นภาพก่อนการติดตั้งมอเตอร์ และภาพที่ 4.7 ซึ่งเป็นภาพภายหลังการติดตั้งมอเตอร์ โดยในการส่งกำลังจากต้นกำลังคือมอเตอร์ไปยังสกรูเจ็คนั้นจำเป็นต้องมีการทดกำลัง เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง และความได้เปรียบเชิงกล



ภาพที่ 4.6 ภาพด้านหลังเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนก่อนการติดตั้งมอเตอร์



ภาพที่ 4.7 ภาพด้านหน้าเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนภายหลังการติดตั้งมอเตอร์

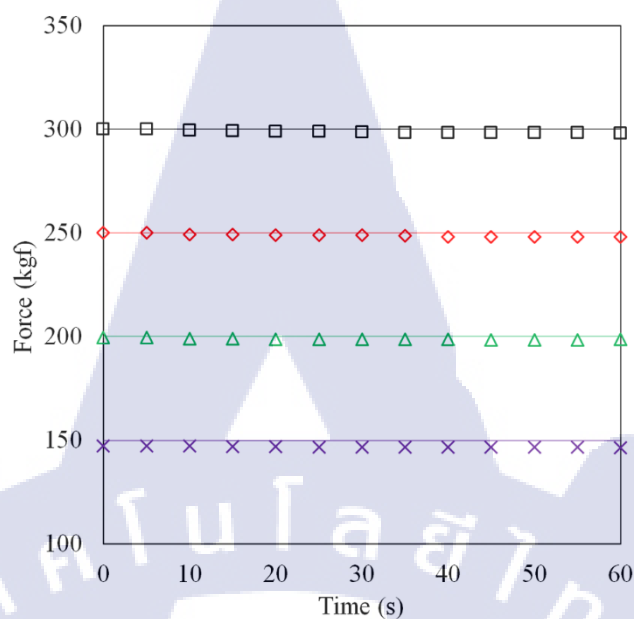
4.2.1 การทดสอบแรง

การทดสอบแรงนั้น ผู้วิจัยได้ทำการสั่งให้มอเตอร์หมุนโดยส่งกำลังผ่านสกรูแจ็ค เพื่อให้หน้าสัมผัสเคลื่อนที่สัมผัสกันแล้วตรวจสอบดูผลจากหน้าจอแสดงผลที่รับค่ามาจากโหลดเซลล์ โดยผลที่แสดงนั้นบ่งชี้ว่า แรงที่เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนสามารถทำได้ 3 กิโลนิวตัน ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้แสดงไว้ในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนขณะกดที่ 3 กิโลนิวตัน

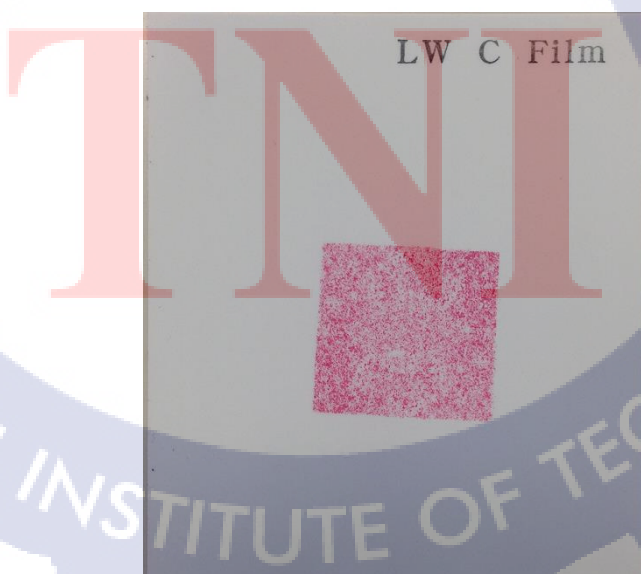
เพื่อศึกษาว่าเครื่องกดที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมานั้น จะสามารถใช้งานได้อย่างเสถียรหรือไม่ จึงได้มีการทดสอบกดที่แรงต่างๆ ซึ่งก็คือที่ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กิโลนิวตัน เป็นเวลา 60 วินาที โดยค่าจะถูกบันทึกผลทุกๆ 5 วินาที ผลที่ได้นั้นแสดงในภาพที่ 4.9 จากภาพจะเห็นได้ว่า เครื่องกดขนาดเล็กที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมานั้นมีความเสถียรในการกด



ภาพที่ 4.9 การกดที่แรงขนาดต่างๆ บันทึกผลทุก 5 วินาที เป็นเวลา 1 นาที

4.2.2 การกระจายตัวของแรงกด

การทดสอบโดยใช้แผ่นฟิล์ม PRESCALE® ผลที่ได้จากการกดภายใต้สภาวะที่ออกแบบไว้ แสดงในภาพที่ 4.10 จากผลการทดลอง พบว่า การกดนั้นมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยจากคู่มือการอ่านค่าของแผ่นฟิล์ม PRESCALE® นั้น [21] ค่าความเข้มของสีที่แสดงนั้นหมายถึงว่ามีความดันที่พื้นที่ที่กดประมาณ 6-7 เมกาปาสคาล ซึ่งสอดคล้องกับแรงที่ใช้กด (ประมาณ 6 เมกาปาสคาล)



ภาพที่ 4.10 การกระจายตัวของแรงกดหลังจากการกด



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการดำเนินงานและผลวิเคราะห์โครงการ

ในการออกแบบและพัฒนาได้มีการนำเอากระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการดูการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความเค้น และดูระยะห่างระหว่าง 2 พื้นผิวสัมผัสหนึ่งจากการกด จากผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถเลือกใช้โพลีเซลล์ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถยืนยันได้ว่าเครื่องกดที่ออกแบบและพัฒนามานั้นจะไม่เสียรูปภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด จากการออกแบบและพัฒนาทำให้ได้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่สามารถทำงานภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด และเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนนี้จะเป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบหน่วยเยื่อแผ่นและขั้วไฟฟ้าขนาดต่ำกว่า 12x12 ตารางเซนติเมตร เพื่อทำการทดลองต่อไป ซึ่งเครื่องดังกล่าวสามารถกดอัดได้ด้วยแรงไม่เกิน 3 กิโลนิวตัน และให้อุณหภูมิได้สูงถึง 130 องศาเซลเซียส โดยระบบส่งกำลังโดยมอเตอร์ผ่านสกรูแจ็ค สามารถใช้ทดแทนระบบไฮดรอลิกได้ในงานขนาดเล็กที่ต้องการความแม่นยำค่อนข้างสูงได้เป็นอย่างดี



References

TNI

References

- [1] Therdthianwong, A., Manomayidthikarn, P. and Therdthianwong, S., 2007. Investigation of membrane electrode assembly (MEA) hot-pressing parameters for proton exchange membrane fuel cell. *Energy* 32 (12): pp. 2401 – 2411.
- [2] Limjeerajarus, N., Yanagimoto, T., Yamamoto, T., Ito, T. and Yamaguchi, T., 2008. Quantitative analysis of oxygen-containing species adsorbed on the Pt surface of a polymer electrolyte fuel cell membrane electrode assembly electrode using stripping voltammetry, *Journal of power sources* 185: pp. 217-221.
- [3] Hasran, U.A., Kamarudin, S.K., Daud, W.R.W, Majlis, B.Y., Mohamad, A.B., Kadhum, A.A.H. and Ahmad, M.M., 2003. Optimization of hot pressing parameters in membrane electrode assembly fabrication by response surface method. *Hydrogen Energy* 38 (22): pp. 9484-9493.
- [4] Larminie, J. and Dicks, A., 2003. *Fuel cell systems explained*. UK: John Wiley & Sons.
- [5] Limjeerajarus, N., Nichiyama, Y., Ohashi, H. and Yamaguchi, T., 2009. Modeling for PEFC MEAs Based on Reaction Rate on Pt Surface and Microstructures of Catalyst Layers. *Journal of chemical engineering of Japan* 42 (8): pp. 616-631.

- [6] Elias, K.Q. and Kurek, H.K., Principles of High Performance Membrane Electrode Assembly Fabrication. *Worcester Polytechnic Institute*. Retrieved May 14, 2014 from the World Wide Web: http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042607104439/unrestricted/MQP_RYD2007_qke_katk.pdf.
- [7] เฉลิมชนม์ ไชยดำรง, 2548, เอกสารประกอบการสอนวิชา ระบบอัตโนมัติ, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย.
- [8] อุดมศักดิ์ พัทธเดช, 2556, ระบบเครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรม [Online], Available : <http://www.mechanicaludpa.com/articles/42078076/ระบบเครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรม.html> [20 กันยายน 2556].
- [9] คณะวิศวกรรมเครื่องกล, 2555, เอกสารประกอบการสอนวิชา ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [10] Budynas, R.G. and Nisbett, J.K., 2008, Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th Edition, McGraw – Hill, Singapore, pp. 211-215.
- [11] ภัทธิยะ คำบัว, ณัฐวุฒิ นันธิเสน, ธนวัฒน์ เหลืองอภิรมย์ และ พนัชร ปันอุดม, 2553, สเตรนเกจ (strain gauge) [Online], Available : <http://vrbme.blogspot.com/2010/08/strain-gauge.html> [20 กันยายน 2556] .
- [12] Posinasetti, N.R., 2009, Springs [Lecture Note], University of Northern Iowa.
- [13] Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. 2011. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. Singapore: McGraw – Hill.

- [14]Churchill, S.W. and Chu, H.H.S. 1975. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. *International Journal of Heat Mass transfer*. 18 (11): pp. 1323 - 1329.
- [15]สมนึก บุญพาไสว, การวัด และเครื่องมือการวัด (Measurement and Instrumentation), บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้าที่ 238-239.
- [16]เก ศ ฎ า ม ห า นี ย ม , 2546, เค รื่ อ ง มี่ อ วั ด [Online], Available : <http://student.nu.ac.th/electronic/default.htm> [20 กันยายน 2556].
- [17]Chaithanee, N., Charoen-amornkitt, P., Nantasaksiri, K. and Limjeerajarus, N., 2014. A 3-D Numerical Simulation of Temperature Distribution across the Contact Surface of a Small-scale Hot Press Machine for PEFC Applications. In Proceedings of The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand 17-19 December.
- [18]Power Jack, Power Jacks Linear Motion and Power Transmission Design Guide - Section 1 - Screw Jacks (Mechanical Actuators). *Power Jacks Ltd*. Retrieved May 15, 2014 from the World Wide Web: <http://www.powerjacks.com/downloads/Design%20Guides/PJLMPT-02/S1-Screw-Jacks-PJLMPTDG02.pdf>
- [19]United Electronics industry, 2013, Temperature effects in strain measurement [Online], Available : <https://ueidaq.wordpress.com/category/strain-gauge/> [2014, February 27] .

[20]BOAST, SQC-A Product details. *Ningbo BOARD Electric co., Ltd.* . Retrieved May 15, 2014 from the World Wide Web:

http://www.nbboard.com/EN/Products_View.asp?ProId=49.

[21]FUJIFILM, PRESCALE Instruction sheet. *FUJIFILM*. Retrieved June 25, 2015 from the World Wide Web: <http://www.spare.it/prescale-letteratura/Prescale-LW-manual.pdf>.

