

การเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนลงบนวัสดุแกรไฟต์ด้วยเทคนิคการแยกพันธะ

ด้วยความร้อน

Pyrocarbon coating on graphite substrate by thermal
decomposition method

ธรรมบุญ ยอดพุดชา

นวลจันทร์ แหลมทอง

พรพรรณ สารมาตย์

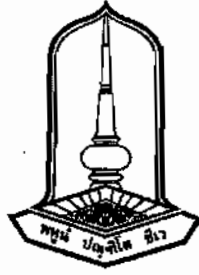
สุเมธี แผ่นผา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

มกราคม 2556

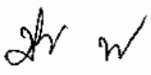
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

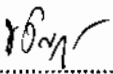


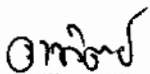
คณะกรรมการสอบโครงการฟิสิกส์ ได้พิจารณาโครงการฟิสิกส์ของนายธรรมบุญ ยอดพุดชา นางสาวนวลจันทร์ แผลมทอง นางสาวพรพรรณ สารมาตย์ และนายสุเมธี แผ่นผา แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบโครงการฟิสิกส์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ผศ. ต่อศักดิ์ โกมาสถิตย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปวีณา เหลากุล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชวิญญูทัย วงศาพร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน)

วันที่ 16 เดือน มกราคม พ.ศ. 2556

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฟิสิกส์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความร่วมมือจากสำนักงานวัฒนธรรมแห่งชาติและสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย บริษัทสุธียูไนเต็ด คาร์บอน จำกัด ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และบุคลากรหลายท่านด้วยกัน ผู้ทำโครงการขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่งตลอดมาตั้งแต่ต้นจนเสร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะและให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงการนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้ทำโครงการขอขอบพระคุณคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการเบิกเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและคอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำอุปกรณ์สำหรับโครงการนี้ บุคลากรภาควิชาฟิสิกส์และบุคลากรภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและอุปการะในการศึกษา และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้การช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จ

สุดท้ายขอมอบส่วนดีของโครงการนี้แต่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกๆ ท่าน ที่มีส่วนให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธรรมบุญ ยอดพุดชา
นวลจันทร์ แผลมทอง
พรพรรณ สารมาตย์
สุเมธี แผ่นผา

โครงการฟิสิกส์เรื่อง	การเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนลงบนวัสดุแกรไฟต์ด้วยเทคนิคการแยกพันธะด้วยความร้อน
ผู้ศึกษาค้นคว้า	นายธรรมณู ยอดพุดชา นางสาวนวลจันทร์ แผลมทอง นางสาวพรพรรณ สารมาตย์ นายสุเมธี แผ่นผา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัย	มหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนด้วยเทคนิคการแยกพันธะด้วยความร้อน (thermal decomposition method) รวมทั้งได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ สัดส่วนแก๊ส และเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม เพื่อให้ได้ลักษณะของฟิล์มที่ติดแน่น และสามารถอุดรูพรุนของแกรไฟต์ได้ โดยศึกษาอุณหภูมิในการเคลือบอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส LPG ตั้งแต่ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการเคลือบที่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง ผลจากภาพถ่าย SEM พบว่าที่เงื่อนไขที่เหมาะสม พื้นผิวของฟิล์มไพโรคาร์บอนมีลักษณะตะปุ่มตะป่ำ โดยมีขนาดความกว้างของเกรนประมาณ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร และฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 15 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิของแก๊สประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส สัดส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊ส LPG เป็น 2:1 ลิตรต่อนาที และใช้เวลาการเคลือบนาน 4 ชั่วโมง

TITLE Pyrocarbon coating on graphite substrate by thermal decomposition method

AUTHORS Thammanun Yodphutsa
Nuanchan Lamthong
Pornpan Saramat
Sumethee Phaenpha

ADVISOR Dr. Artit Chingsungnoen

DEGREE Bachelor of Science (Physics)

UNIVERSITY Mahasarakham University YEAR 2013

ABSTRACT

In this work, the system for pyrocarbon coating on graphite substrate by thermal decomposition method was designed and developed. The optimized parameter for the good pyrocarbon film which can minimize the porosity of the graphite substrate was evaluated. The experimental conditions consist of the gas temperature (1,000-1,500 ° C), the ratio of argon to LPG flow rate (2:1 2:2 2:3 2:4 2:5 2:6 2:10 and 2:15 liters per minute) and the deposition time (1 2 3 and 4 hours). The surface morphology of the prepared films were studied using the scanning electron microscopy (SEM) technique. The experimental result by using appropriate condition revealed that the surface of the pyrocarbon film looks like a gnarled hemisphere. Moreover, we found that film has grain size about 10-20 microns, and the thickness around 15 microns which correspond to the coating temperature of 1,400 ° C, the argon to LPG flow rate (lpm) of 2:1 and a deposition time of 4 hours.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย	6
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	6
1.7 อุปกรณ์ที่จำเป็นของการวิจัย	6
1.8 งบประมาณของการวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ลักษณะของไพโรคาร์บอนและการประยุกต์ใช้	9
2.2 การปลูกฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี	14
2.3 การให้พลังงานความร้อนกับแก๊สโดยใช้เตาเผาไฟฟ้า	17
2.3.1 กาลังไฟฟ้าที่ให้กับเตาเผา	17
2.3.2 การพาความร้อน	19
2.3.3 การแผ่รังสี	19
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	20
3.1 ระบบสุญญากาศ	21
3.2 ระบบหล่อเย็น	25
3.3 ระบบฉนวนความร้อน	30
3.4 ระบบไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ขั้วแกรไฟต์	37
3.5 การติดตั้งฐานรองชิ้นงาน และชิ้นงานแกรไฟต์	52
3.6 ขั้นตอนการทดลอง	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	58
4.1 ผลการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน	58
4.2 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG ต่อการเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอน	65
4.2.1 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:1 ลิตรต่อนาที	65
4.2.2 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:2 ลิตรต่อนาที	68
4.2.3 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:3 ลิตรต่อนาที	71
4.2.4 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:4 ลิตรต่อนาที	74
4.2.5 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:5 ลิตรต่อนาที	78
4.2.6 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:6 ลิตรต่อนาที	80
4.2.7 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:10 ลิตรต่อนาที	83
4.2.8 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar:LPG เท่ากับ 2:15 ลิตรต่อนาที	86
4.3 ผลของอุณหภูมิของแก๊ส และเวลาการเคลือบฟิล์มต่อการเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอน	90
4.3.1 ผลของอุณหภูมิของแก๊สและเวลาการเคลือบฟิล์มต่อการเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอน	90
4.3.2 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,540 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง	93
4.3.3 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,409 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	96
4.4 ผลการหาซ้ำที่เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ดีที่สุด	99
4.4.1 ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,414 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	99
4.4.2 ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,415 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	102
4.4.3 ครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,418 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	105
4.4.4 ครั้งที่ 4 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,422 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	108
4.4.5 ครั้งที่ 5 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,424 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	111
4.5 ผลของการเคลือบฟิล์มที่มีความหนาเกินไป	114
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	119
เอกสารอ้างอิง	121
ภาคผนวก	123
ประวัติผู้ทำวิจัย	142

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาทำการวิจัย	6
ตารางที่ 1.2 แสดงรายการและรายละเอียดของงบประมาณ	7
ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างอะตอม	15
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปและค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิง อุณหภูมิของขั้วไฟฟ้าบางชนิด	18
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติด้านต่างๆของแกรไฟต์เฟลด์	34
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติด้านต่างๆของแกรไฟต์เฟลด์แบบแผ่น	35
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติด้านต่างๆของแกรไฟต์ฟอยล์	36
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติด้านต่างๆของแร่ใยหิน	37

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์ในโรงงานอุตสาหกรรม	2
ภาพที่ 1.2 แผนภาพแสดงที่มาของคำสมของคำว่าไฟโรไลติกคาร์บอน	2
ภาพที่ 1.3 แผนผังโครงการความร่วมมือระหว่างภาครัฐและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs)	3
ภาพที่ 1.4 แผนผังความร่วมมือของงานวิจัย	4
ภาพที่ 1.5 โครงสร้างความรับผิดชอบต่องานวิจัย	4
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์	9
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแกรไฟต์ที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ	10
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนของแกรไฟต์	11
ภาพที่ 2.4 ไฟโรคาร์บอนที่ถูกผลิตขึ้นในช่วงแรกๆ ที่ค้นพบ	12
ภาพที่ 2.5 แสดงชิ้นส่วนไฟโรคาร์บอนที่ใช้ทำกระดุกเทียม	12
ภาพที่ 2.6 फिल्मไฟโรคาร์บอนที่เกิดจากการซ้อนทับกันของชั้นแกรไฟต์อย่างไร้ระเบียบ	13
ภาพที่ 2.7 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (ในหน่วย GPa) ของวัสดุปลูกฝังชนิดต่างๆ	13
ภาพที่ 2.8 แสดงกระบวนการเกิดไฟโรคาร์บอนโดยใช้เทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี	14
ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัย	20
ภาพที่ 3.2 (ก) รูปแชนเบอร์จริงแนวตั้ง (ข) ภาพ drawing ในแนวตั้งของแชนเบอร์จากการออกแบบ	21
ภาพที่ 3.3 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของแชนเบอร์จริง (ข) ภาพ drawing ด้านบนของแชนเบอร์จากการออกแบบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 260 มิลลิเมตร	22
ภาพที่ 3.4 (ก) ภาพถ่ายจริงฝาบนที่ใช้ปิดแชนเบอร์ (ข) ภาพ drawing ฝาบนจากการออกแบบ	22
ภาพที่ 3.5 (ก) ฝาปิดแชนเบอร์ด้านล่าง (ข) ภาพ drawing ฝาปิดแชนเบอร์ด้านล่างจากการออกแบบ	23
ภาพที่ 3.6 แชนเบอร์เล็กสำหรับดักเขม่า	23
ภาพที่ 3.7 ปีมกลโรตารีรุ่น LEYBOLD 040B	24
ภาพที่ 3.8 ปีมกลโรตารีรุ่น LEYBOLD SA SV180 109 17	24
ภาพที่ 3.9 โอริงซิลิโคนสำหรับซีลด์สุญญากาศ	25
ภาพที่ 3.10 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 1	26
ภาพที่ 3.11 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 2	26

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.12 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 3	27
ภาพที่ 3.13 ถังพักน้ำขนาด 175 ลิตร	27
ภาพที่ 3.14 ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร	28
ภาพที่ 3.15 คอมเพรสเซอร์ขนาด 18,000 BTU	28
ภาพที่ 3.16 คอมเพรสเซอร์ขนาด 25,000 BTU	29
ภาพที่ 3.17 ชุดสายน้ำหล่อเย็นเข้าและออกจากแชมเบอร์	29
ภาพที่ 3.18 การแบ่งน้ำหล่อเย็นออกเป็น 4 สายย่อย เพื่อหล่อเย็นส่วนต่างๆ ของเตาเผา (ก) หล่อเย็นผนังแชมเบอร์ทรงกระบอก (ข) หล่อเย็นขั้วไฟฟ้า และฝาปิดแชมเบอร์ด้านล่าง (ค) หล่อเย็นฝาปิดแชมเบอร์ด้านบน	30
ภาพที่ 3.19 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 1	31
ภาพที่ 3.20 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 2	31
ภาพที่ 3.21 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 3	32
ภาพที่ 3.22 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 4	32
ภาพที่ 3.23 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนด้านบน	33
ภาพที่ 3.24 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนด้านล่าง	33
ภาพที่ 3.25 (ก) ภาพจากกล้องดิจิตอล (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแกรไฟต์เฟลด์แบบม้วนได้	34
ภาพที่ 3.26 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอลแสดงลักษณะพื้นผิวของแกรไฟต์เฟลด์แบบแผ่น	35
ภาพที่ 3.27 (ก) ภาพจากกล้องดิจิตอล (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของแกรไฟต์ฟอยล์	36
ภาพที่ 3.28 (ก) ภาพจากกล้องดิจิตอล (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 100 เท่า ของแร่ใยหิน	37
ภาพที่ 3.29 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 1	38
ภาพที่ 3.30 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 2	39
ภาพที่ 3.31 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 3	40
ภาพที่ 3.32 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 4	41

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.33 ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1	41
ภาพที่ 3.34 ความต้านทานของขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1 ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์	42
ภาพที่ 3.35 ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 2	43
ภาพที่ 3.36 แสดงกราฟความต้านทานของขั้วแกรไฟต์แบบที่ 2	43
ภาพที่ 3.37 ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3	44
ภาพที่ 3.38 แสดงกราฟความต้านทานของขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3	45
ภาพที่ 3.39 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ขั้วไฟฟ้าที่ตัดทรวง	45
ภาพที่ 3.40 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 1.8 kW (9V, 200A)	46
ภาพที่ 3.41 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 16 kW (40V, 400A)	46
ภาพที่ 3.42 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 15 kW (30V, 500A)	47
ภาพที่ 3.43 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า	47
ภาพที่ 3.44 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า SCR	48
ภาพที่ 3.45 สายไฟฟ้าขนาด 70 mm ²	48
ภาพที่ 3.46 สวิตซ์ไฟฟ้า	49
ภาพที่ 3.47 ถังแก๊ส LPG และแก๊สอาร์กอน	49
ภาพที่ 3.48 ชุดวัดอัตราการไหล	50
ภาพที่ 3.49 มัลติมิเตอร์	50
ภาพที่ 3.50 แคลมป์มิเตอร์	51
ภาพที่ 3.51 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S	51
ภาพที่ 3.52 ชุดวัดความดันพิรามิเกจ	52
ภาพที่ 3.53 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ฐานรองชิ้นงาน	52
ภาพที่ 3.54 (ก) ภาพถ่าย (ข) ภาพ drawing ตัวรองฐานวางชิ้นงาน	53
ภาพที่ 3.55 (ก) ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ	53
ภาพที่ 3.56 (ก) ชิ้นงานรูปวงกลมก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ	54
ภาพที่ 3.57 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกสั้นก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ	54

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.58 (ก) ชิ้นงานแม่แบบคอกขวดก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ	54
ภาพที่ 3.59 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกเล็กหลังเคลือบ (ข) ก่อนเคลือบ	55
ภาพที่ 3.60 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกใหญ่ก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ	55
ภาพที่ 3.61 ขั้นตอนการเดินเครื่องเตาเผา เพื่อทำการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน	57
ภาพที่ 4.1 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน	59
ภาพที่ 4.2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบน้ำหล่อเย็น	59
ภาพที่ 4.3 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแกรไฟต์	60
ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน	60
ภาพที่ 4.5 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของแชมเบอร์ (สัดส่วนตามขนาดจริง)	61
ภาพที่ 4.6 แบบจำลองการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า (ก) ในสามมิติ (ข) ในสองมิติ	61
ภาพที่ 4.7 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายนอกของแชมเบอร์ (สัดส่วนตามขนาดจริง)	62
ภาพที่ 4.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ	63
ภาพที่ 4.9 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน	64
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	65
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	66
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	66
ภาพที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแผ่นฐานแกรไฟต์ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า	67
ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,039 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	68
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	69

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	70
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	70
ภาพที่ 4.18 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,029 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	71
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	72
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	73
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	73
ภาพที่ 4.22 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,036 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	74
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	75
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	76
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	76
ภาพที่ 4.26 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,037 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	77
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	78

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกักแก๊สไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	79
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	79
ภาพที่ 4.30 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,210 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ5 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ตามลำดับ	80
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	81
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกักแก๊สไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	82
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	82
ภาพที่ 4.34 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,215 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ6 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ตามลำดับ	83
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	84
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกักแก๊สไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	85
ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	85
ภาพที่ 4.38 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,163 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ10 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	86
ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	87
ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกักแก๊สไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	88

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	88
ภาพที่ 4.42 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,198 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ	89
ภาพที่ 4.43 (ก) เชม่าที่เกิดขึ้นภายในแชนเบอร์ (ข) เชม่าที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน (ค) เชม่าที่เกิดขึ้นภายในข้อต่อของปั๊มกลโรตารี	90
ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชนเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง	91
ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	92
ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	92
ภาพที่ 4.47 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง	93
ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชนเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1540 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง	94
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	95
ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	95
ภาพที่ 4.51 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวางของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิ 1,540 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง	96

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	97
ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	98
ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	98
ภาพที่ 4.55 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	99
ภาพที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,414 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	100
ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	101
ภาพที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	101
ภาพที่ 4.59 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,414 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	102
ภาพที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,415 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	103
ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	103
ภาพที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	104

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.63 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,415 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	105
ภาพที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,418 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	106
ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	107
ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	107
ภาพที่ 4.67 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,418 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	108
ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,422 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	109
ภาพที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	110
ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	110
ภาพที่ 4.71 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,422 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	111
ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,424 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	112

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	113
ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	113
ภาพที่ 4.75 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,424 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง	114
ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง	115
ภาพที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	116
ภาพที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ	116
ภาพที่ 4.79 ภาพ SEM ผิวน้ำของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อ นาที ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า และ 5,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง	117
ภาพที่ 4.80 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ 1,500 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้ เวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง	118

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
CVD	chemical vapor deposition
SCR	Silicon Control Rectifier
Sq mm.	Square millimeter
SEM	Scanning Electron Microscope
GA	General Atomic Company
PhD	Doctor of Philosophy
BTU	British thermal unit
ppm	Part per million
VR	variable voltage transformer
lpm	Liter per minute
WD	working distance
LPG	แก๊สปิโตรเลียมเหลว
SME	วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม
Ar	อาร์กอน
CH ₄	มีเทน
C ₂ H ₂	อะเซทิลีน
C ₃ H ₈	โพรเพน
C ₂ H ₆	อีเทน
C ₂ H ₄	เอทิลีน
C ₆ H ₆	เบนซีน
M	อะตอมแก๊สเฉื่อย
M'	อะตอมแก๊สเฉื่อยอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น
C _∞	อะตอมของคาร์บอนที่จับกันเป็นสายยาว
Cu	ธาตุทองแดง
Mo	ธาตุโมลิบดีนัม
W	ธาตุทังสเตน
<i>I</i>	กระแสไฟฟ้า
<i>R</i>	ความต้านทานไฟฟ้า
<i>V</i>	ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขั้วไฟฟ้า
<i>P</i>	กำลังไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า
<i>ρ</i>	สภาพต้านทานไฟฟ้า

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
l	ความยาว
A	พื้นที่ภาคตัดขวางของขั้วไฟฟ้า
a	ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิงอุณหภูมิ
dR	ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป
dT	ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
R_s	ค่าความต้านทานมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
H	อัตราการถ่ายเทความร้อน
$T_s - T_a$	ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่าง 2 จุดของตัวกลาง
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ผิวของวัตถุ
σ	ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลท์ซมันน์
e	สภาพเปล่งรังสี
$[\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH}_2)_n]$	แร่ใยหินชนิดโครโซไทล์
DC	ไฟฟ้ากระแสตรง
V_{in}	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า
V_{out}	แรงดันไฟฟ้าขาออก

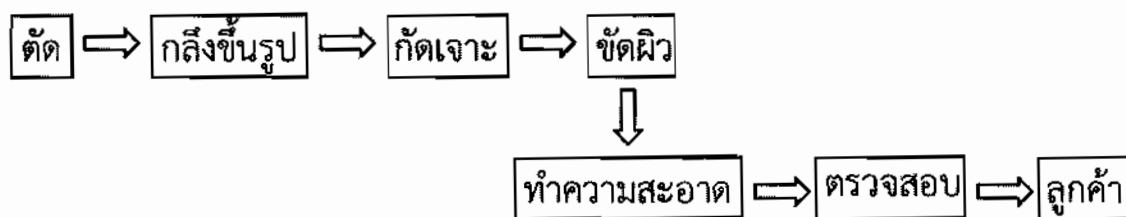
บทที่ 1

บทนำ

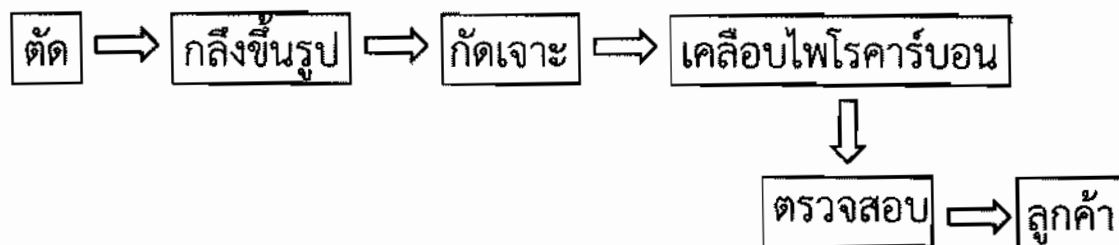
1.1 ที่มาและความสำคัญ

แกรไฟต์ (graphite) เป็นอัญรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (plumbago) หรือ แร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี มักใช้ทำไส้ดินสอดำ ในด้านอุตสาหกรรมการผลิต แกรไฟต์ เป็นวัตถุดิบที่มีคุณภาพที่มีปริมาณการใช้เป็นจำนวนมาก เช่น จิวเวลรี่, หล่อหลอม, รีด, ยานยนต์ และอุตสาหกรรมแก้ว กระฉก โดยผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ เบ้าหลอม (crucible) โลหะชนิดต่างๆ รวมถึงอุปกรณ์ขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งอุตสาหกรรมดังกล่าวข้างต้นมีแนวโน้มเติบโตมากขึ้นเรื่อยๆ และอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามแกรไฟต์ก็มีข้อเสีย คือ เปราะ หักง่าย และพื้นผิวมีรูพรุน เมื่อนำมาใช้งานทางด้านเชิงกลจะทนต่อแรงเสียดทานได้น้อย และถ้านำมาใช้เป็นเบ้าหลอมหรือถูกให้ความร้อนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นส่วนแกรไฟต์ในเมืองไทย ยังไม่พบว่าเคยมีการเคลือบผิวแกรไฟต์มาก่อน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วิธีการขัดผิวก่อนการนำไปใช้งานเท่านั้น ซึ่งวิธีนี้จะต้องใช้ทักษะความชำนาญของพนักงานและยังสิ้นเปลืองเวลาในการขัด โดยปกติจะใช้เวลาขัดประมาณ 15 นาที/ชิ้น นอกจากนั้นวิธีการดังกล่าวไม่สามารถอุดรูพรุนของแกรไฟต์ได้และยังมีคราบคั่งจากน้ำยาที่ใช้ขัด ซึ่งจะทำให้เมื่อนำแกรไฟต์ไปใช้กับงานที่ต้องอยู่ในความร้อนสูง จะทำให้เกิดควีนไฟและแกรไฟต์เกิดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น เป็นผลทำให้อายุการใช้งานสั้นลงกว่าปกติ การเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนลงบนผิวแกรไฟต์ทำให้ผิวแกรไฟต์เรียบและแข็งทนต่อการเสียดสี การสึกหรอต่ำ สามารถยกเลิกขั้นตอนการขัดผิวแกรไฟต์ได้และไม่เกิดปัญหาเรื่องคราบน้ำยาการขัดตกค้าง ซึ่งสามารถลดจำนวนพนักงานในขั้นตอนการผลิตได้ ตามภาพที่ 1.1 (ก) และ (ข)



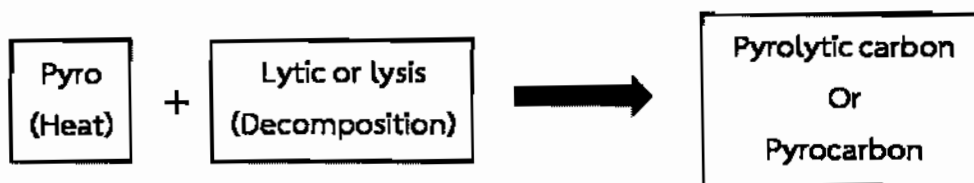
(ก) ขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์แบบเก่า



(ข) ขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์แบบใหม่

ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการผลิตแกรไฟต์ในโรงงานอุตสาหกรรม

เทคนิคการยืดอายุการใช้งานของแกรไฟต์ให้ยาวนานขึ้นอาจทำได้หลายวิธี แต่เทคนิคที่กำลังได้รับความสนใจในเชิงอุตสาหกรรม คือ การเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน (pyrocarbon coating) ลงบนผิวของวัสดุแกรไฟต์รูปทรงต่างๆ โดยใช้การตกสะสมด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition, CVD) โดยไพโรคาร์บอนมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไพโรไลติกคาร์บอน (pyrolytic carbon) ซึ่งมาจากคำผสมระหว่าง “pyro” ซึ่งเป็นคำที่มาจากภาษากรีก [1] แปลว่า “ความร้อน (heat)” และ “lytic หรือ lysis” แปลว่า “การแยกย่อย (decomposition)” ตามแผนภาพที่ 1.2

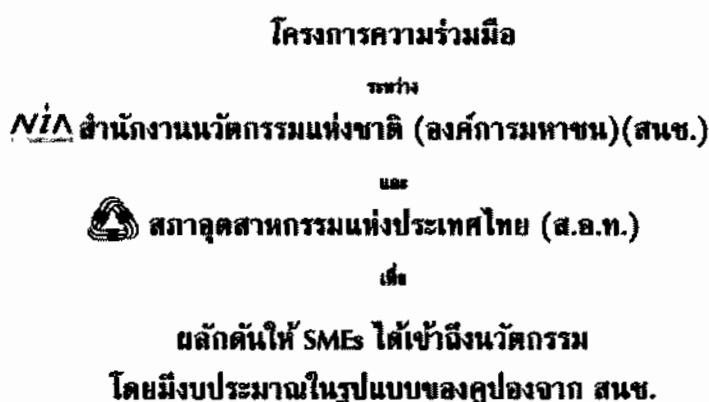


ภาพที่ 1.2 แผนภาพแสดงที่มาของคำผสมของคำว่าไพโรไลติกคาร์บอน

ดังนั้นฟิล์มไพโรไลติกคาร์บอนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี จึงเกิดจากการแยกอะตอมของคาร์บอนจากแก๊สไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (dehydrogenation of a gaseous hydrocarbon) [2] โดยไพโรคาร์บอนมี โครงสร้างคล้ายแกรไฟต์ แต่โครงสร้างผลึกของไพโรคาร์บอนมีโครงสร้างแลตทิซที่ผิดรูปต่างจากโครงสร้างของแกรไฟต์และถูกซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โครงสร้างดังกล่าวทำให้ไพโรคาร์บอนมีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางหรือที่เรียกว่า ไอโซทรอปิก (isotropic) ซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นต่อการเคลือบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ในขั้นตอนการเคลือบสามารถใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquid petroleum gas) ซึ่งเรียกย่อๆ ว่าแก๊ส LPG มาผ่านความร้อนสูงภายใต้แก๊สเฉื่อย ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ในระบบสุญญากาศเพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและไปเกาะเคลือบผิวที่ชิ้นงานแกรไฟต์

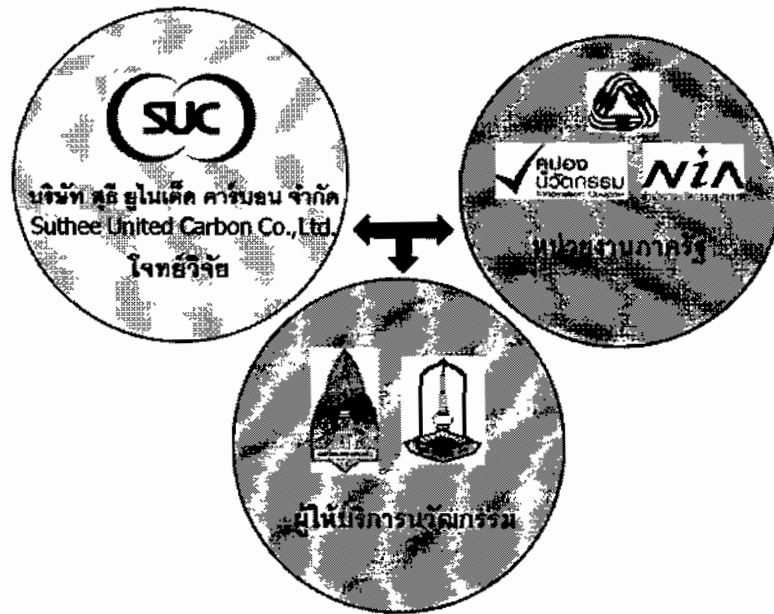
จากข้อดีของแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มไพโรคาร์บอนดังกล่าวทำให้บริษัทสุริยูนิตเต็ด คาร์บอน จำกัด ได้มีความต้องการนำนวัตกรรมการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถของแกรไฟต์สำหรับงานความร้อน ขบวนการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนด้วยเทคนิคการแยกพันธะด้วยความร้อน (thermal

decomposition) จากสารตั้งต้นเป็นแก๊สแล้วทำให้เกิดการตกสะสมด้วยไอเคมีเป็นกระบวนการผลิตใหม่ในเมืองไทย ด้วยกระบวนการดังกล่าว บริษัทสามารถผลิตแกรไฟต์ที่สามารถทนความร้อนได้สูงกว่าและทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าเดิม ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์แกรไฟต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลให้บริษัทสามารถทำตลาดแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบผิวนี้ แทนที่การนำเข้าอย่างในปัจจุบัน ดังนั้นบริษัทสุริยุไนเต็ด คาร์บอน จำกัดจึงได้สมัครเข้าร่วมโครงการคูปองนวัตกรรม [3] ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติและสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ตามแผนผังในภาพที่ 1.3



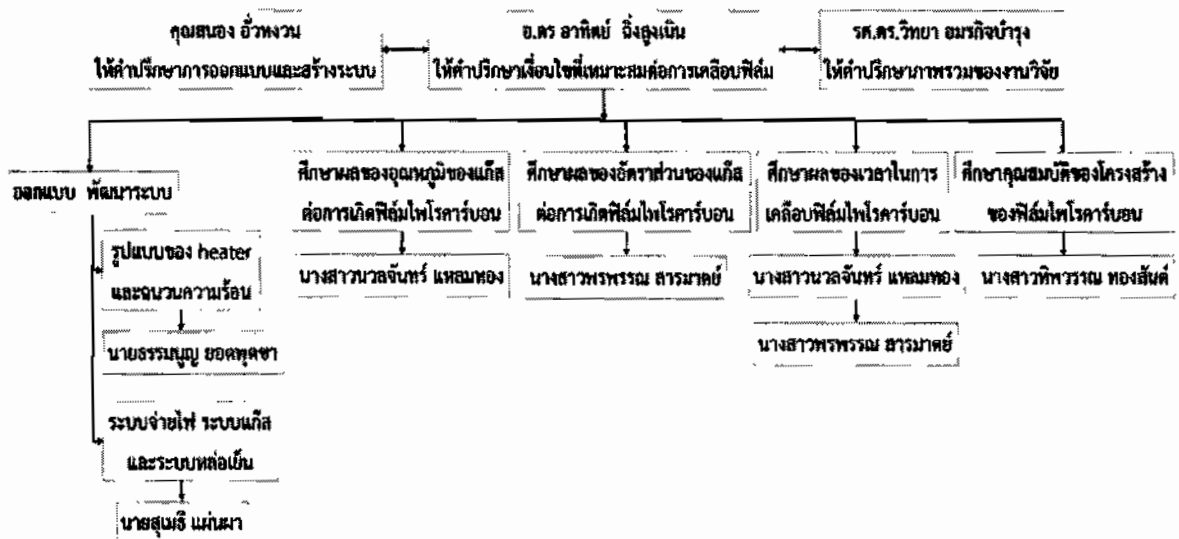
ภาพที่ 1.3 แผนผังโครงการความร่วมมือระหว่างภาครัฐและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs)

โดยเงื่อนไขของโครงการดังกล่าวบริษัทจะต้องมีผู้เชี่ยวชาญจากสถาบันอุดมศึกษาคอยให้คำปรึกษา บริษัทจึงได้ทำความร่วมมือกับ รศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตามแผนผังในภาพที่ 1.4 เพื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของผลิตภัณฑ์แกรไฟต์ให้มีความทนทานมากขึ้น อันจะนำมาซึ่งการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับบริษัทอื่นๆ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงการเข้าถึงตลาดในประเทศจีนและญี่ปุ่นในอนาคต



ภาพที่ 1.4 แผนผังความร่วมมือของงานวิจัย

จากที่มาของงานวิจัยดังกล่าว อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน จึงได้รับนิสิตมาช่วยทำงานวิจัย ซึ่งในช่วงระยะเวลา 1 ปี ได้แบ่งเนื้องาน และความรับผิดชอบออกเป็นส่วนๆ ดังแผนภาพตามภาพที่ 1.5 ดังนี้



ภาพที่ 1.5 โครงสร้างความรับผิดชอบต่องานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนบนแกรไฟต์ด้วยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมีเพื่ออุดรูพรุนของพื้นผิวแกรไฟต์ และเพิ่มความแข็งแรงความทนทานต่อการเสียดสีให้มากขึ้น ซึ่งได้ทำการเคลือบที่เวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในช่วง 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส โดยที่ กำหนดให้อัตราการไหลของ

แก๊สอาร์กอนคงที่ๆ 2 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที โดยมุ่งสนใจไปที่ลักษณะของฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ถูกเตรียมโดยใช้เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี
2. เพื่อทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนบนวัสดุแกรไฟต์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี และทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนบนวัสดุแกรไฟต์ซึ่งมีตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ดังนี้

1. **ตัวแปรควบคุม** คือ ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ตลอดการทดลอง ในงานวิจัยนี้ คืออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ถูกกำหนดให้คงที่ เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (lpm) ขณะเริ่มทำการทดลองอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต้องลดลงอยู่ที่ 8 องศาเซลเซียส และความดันฐานจะต้องลดลงต่ำกว่า 133 ปาสคาล
2. **ตัวแปรต้น** คือ ตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย อุณหภูมิและเวลาการเคลือบฟิล์ม รวมถึงสัดส่วนอัตราการไหลของแก๊ส LPG ต่อแก๊สอาร์กอน
3. **ตัวแปรตาม** คือ ตัวแปรที่สนใจศึกษา ในที่นี้คือลักษณะเชิงผิวและความหนาของฟิล์มไพโรคาร์บอนภายหลังการเคลือบที่เงื่อนไขต่างๆ ตามตัวแปรต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยใช้เทคนิคการแตกตัวของแก๊สด้วยความร้อน เพื่อทำให้เกิดการตกสะสมด้วยไอเคมี
2. มีทักษะการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำงาน
3. ได้ทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนลงบนเม็ดแกรไฟต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการเคลือบเพื่อปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวของแกรไฟต์ต่อไป

1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาทำการวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)				
	เม.ย- พ.ค 55	มิ.ย- ก.ค 55	ส.ค- ก.ย 55	ต.ค- พ.ย 55	ธ.ค55- ม.ค 56
1. ศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มไพโรคาร์บอน	■				
2. ออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์ม	■				
3. ทดสอบระบบ/ทดสอบเคลือบชิ้นงาน	■				
4. เตรียมวัสดุฐานรองและขั้วไฟฟ้า	■				
5. ทำการเคลือบฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ		■	■		
6. วัดคุณสมบัติของฟิล์ม		■	■	■	
7. วิเคราะห์ สรุปผลและเขียนรายงาน				■	■

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาประยุกต์ Sc1-211 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.7 อุปกรณ์ที่จำเป็นของการวิจัย

1. ระบบการปลูกฟิล์มไพโรคาร์บอนด้วยเทคนิคการแตกตัวด้วยความร้อน (พัฒนาขึ้นเอง)
2. ชิ้นงานแกรไฟต์ที่ใช้เป็นแผ่นฐาน
3. แก๊ส LPG ขนาดความจุ 15 กิโลกรัม ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป และแก๊สอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99%

1.8 งบประมาณของการวิจัย

ตารางที่ 1.2 แสดงรายการและรายละเอียดของงบประมาณที่ใช้ในการทดลอง

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)	แหล่งทุน/หน่วยงานสนับสนุน
1.หมวดค่าวัสดุ/สารเคมี		
1.1 แผ่นฐานแกรไฟต์	4,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.2 แก๊ส LPG 1 ถัง	350	ภาควิชาฟิสิกส์ มมส.
1.3 แก๊ส Ar 2 ถังๆ ละ 1,250 บาท	2,500	ศูนย์นาโน ม.ช./บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.4 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส 2 ตัว	6,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.5 สายยางน้ำหล่อเย็น	2,000	ศูนย์นาโน ม.ช.
1.6 ระบบวาล์วต่างๆ	5,000	ศูนย์นาโน ม.ช.
1.7 เทอร์โมคัปเปิล (Type S)	4,200	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.8 ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า SCR	17,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.9 หม้อแปลง 30V, 500A	25,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.10 แคมเบอร์สุญญากาศ	20,000	ศูนย์นาโน ม.ช.
1.11 ระบบหล่อเย็น	42,500	ศูนย์นาโน ม.ช.
1.12 ขั้ว heater แกรไฟต์	20,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.13 รอก	10,000	ศูนย์นาโน ม.ช.
1.14 ฉนวนความร้อน	25,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ท คาร์บอน
1.15 ปืนโรตารีขนาดใหญ่	-	มีอยู่แล้วที่ภาควิชาฟิสิกส์ มมส.
1.16 สายไฟทนกระแสสูง 70 sqmm	12,000	ศูนย์นาโน ม.ช.

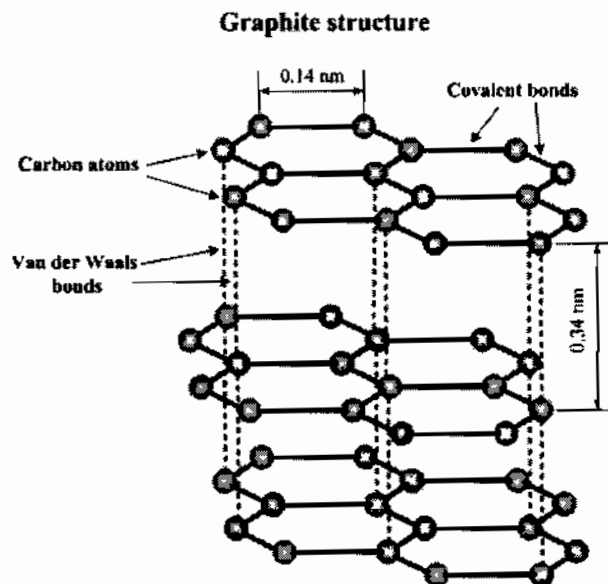
รายการ	จำนวนเงิน (บาท)	แหล่งทุน/หน่วยงานสนับสนุน
1.17 แคมเบอร์เล็กสำหรับกรองอากาศ	-	มีอยู่แล้วที่ภาควิชาฟิสิกส์ มมส.
1.18 ค่าน้ำมันปื้ม	12,000	บริษัทสุธี ยูไนเต็ด คาร์บอน
2.หมวดค่าใช้จ่าย		
2.1 ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง SEM	5,000	ภาควิชาฟิสิกส์ มมส.
2.2 ค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปวิเคราะห์ตัวอย่าง	2,500	มหาวิทยาลัยแห่งชาติ ม.ช.
2.3 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมเอกสารรายงาน	1,000	ภาควิชาฟิสิกส์ มมส.
รวมทั้งสิ้น		216,050 บาท

บทที่ 2

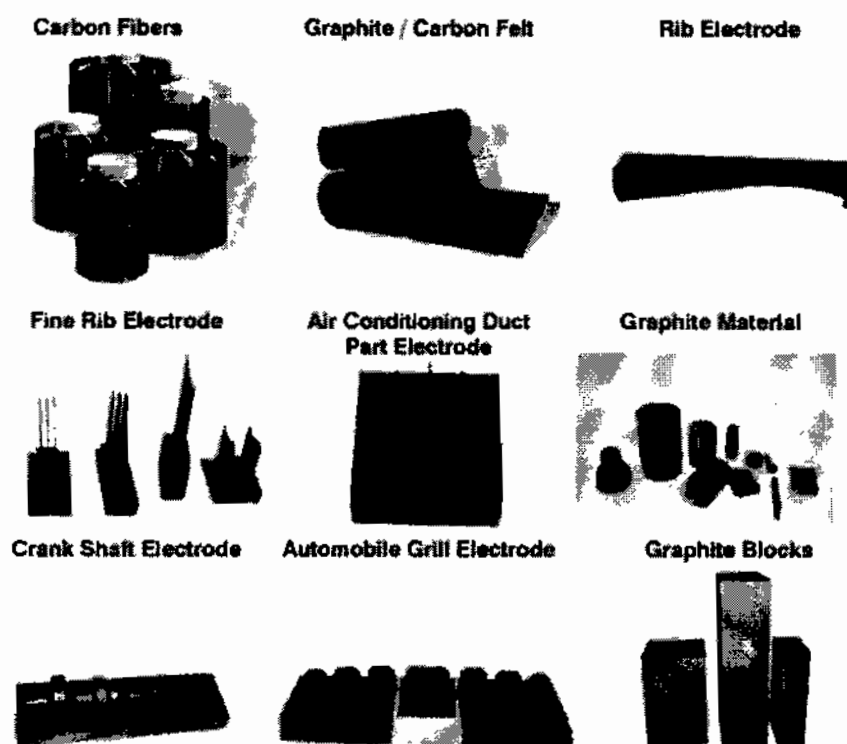
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของไพโรคาร์บอน (Pyrocarbon) และการประยุกต์ใช้

แกรไฟต์ (graphite) แกรไฟต์เป็นหนึ่งในอัญรูปของคาร์บอน มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1 แกรไฟต์มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ซึ่งในแต่ละชั้นประกอบขึ้นจากคาร์บอนที่เกิดพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonds) ที่แข็งแรง และมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่เคลื่อนที่ได้อิสระในแต่ละชั้น ทำให้แกรไฟต์มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ในสองมิติ แต่ระหว่างชั้นเป็นอะตอมของคาร์บอนสร้างพันธะวานเดอร์วาล์ว (Van der Waals bonds) ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะเป็นอย่างอ่อนทำให้สามารถเลื่อนผ่านกันได้ ส่งผลให้แกรไฟต์มีสมบัติลื่น มักใช้ทำไส้ดินสอดำ ส่วนประกอบของสารหล่อลื่น หรือเข้าหลอมโลหะ ตามภาพที่ 2.2 เป็นต้น คุณสมบัติเชิงกลของแกรไฟต์ คือ ความแข็งของแกรไฟต์วัดตามค่าของโมล์ (Mohs scale) อยู่ที่ระดับ 1 ถึง 2 โมล์ แกรไฟต์มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 3,652 ถึง 3,697 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่อุณหภูมิ 4,200 องศาเซลเซียส แกรไฟต์จัดเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีความหนาแน่น 1.3 ถึง 1.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แกรไฟต์มีความแข็ง 6.9 ถึง 100 MPa และทนต่อแรงกดได้ 20 ถึง 200 MPa [9] แต่อย่างไรก็ตาม แกรไฟต์ก็มีข้อเสียคือ เปราะ หักง่าย และพื้นผิวมีรูพรุน เมื่อนำมาใช้งานทางด้านเชิงกลจะทนต่อแรงเสียดทานได้น้อย และถ้านำมาใช้เป็นเข้าหลอมหรือถูกให้ความร้อนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย [4]



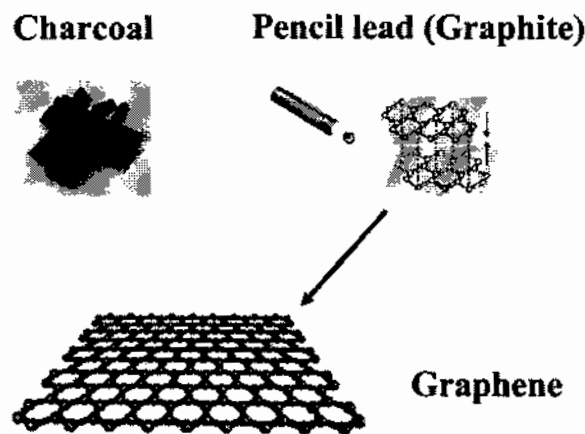
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ [5]



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแกรไฟต์ที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ [6]

แกรฟีน (graphene) ได้มาจากแกรไฟต์เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีโครงสร้างที่ซ้อนกันอยู่เป็นชั้นๆ และแต่ละชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งแกรฟีน ประกอบด้วย อะตอมคาร์บอนเรียงตัวกันในลักษณะสองมิติ มีโครงสร้างเป็นรูปตาข่ายคล้ายรังผึ้ง ถูกค้นพบและพัฒนาขึ้น ด้วยวิธี “micromechanical cleavage” หรือ “scotch tape method” โดยใช้สก็อตเทปแกะลิ้นแกรไฟต์ (graphite flake) และดึงลอกแกรฟีนออกมาทีละชั้น ตามภาพที่ 2.3 เหมือนเราเอาดินสอแรงาลงบนแผ่นกระดาษจนเห็นเป็นแถบเส้นดินสอสีเทา แล้วถ้าเราเอาเทปใสทาบบนเส้นดินสอแล้วลอกเทปออก ก็จะได้วัสดุใหม่ที่เรียกว่าแกรฟีน คุณสมบัติที่โดดเด่นของแกรฟีน คือ เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุด โดยแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าและเพชร ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนอย่างเป็นระเบียบ แต่ในทางตรงกันข้ามแกรฟีนกลับมีความยืดหยุ่น สามารถบิดงอ ม้วน หรือพับได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงถึง 4 เท่า และมากกว่าท่อานาโนคาร์บอน (nanocarbon tube) ถึง 2 เท่า มีความโปร่งแสง 97% และมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียง 1 อะตอม หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร (nanometre) สารดังกล่าวยังสามารถใช้เป็นชั้นนำไฟฟ้าในการผลิตแผงโซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงทดแทนชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง (indium tin oxide : ITO) ซึ่งมีราคาแพง ในปัจจุบันแกรฟีนเป็นที่สนใจของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ที่มีความยืดหยุ่นและโปร่งแสง

เหมาะสำหรับการทำจอภาพแบบม้วนได้ กำลังได้รับความสนใจมากในประเทศเกาหลีซึ่งเป็นผู้นำด้านการพัฒนาจอภาพ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน โทรศัพท์มือถือ และชิพคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นของแกรฟีนเหล่านี้ทำให้เกิดการพัฒนาอย่างก้าวหน้าของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ธุรกิจไฟฟ้า และอุตสาหกรรมความร้อน [7]



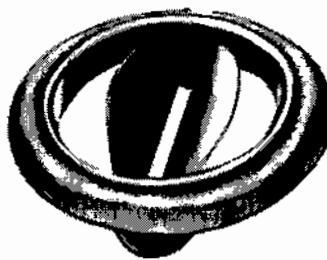
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนของแกรฟีน [8]

ไพโรคาร์บอน คือ โครงสร้างแบบหนึ่งของอะตอมคาร์บอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยมนุษย์ (man-made) ไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย ดร. แจ็ค บ็อคโครส (Jack Bokros, PhD) ขณะทำงานวิจัยอยู่ที่บริษัท GA (General Atomic Company) ในปี ค.ศ. 1963 เพื่อเป็นอนุภาคเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ [9] ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ก) ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1966 [10] ดร. แจ็ค บ็อคโครส ได้ร่วมงานวิจัยกับ ดร. วินเซนต์ กอทต์ (Vincent Gott, PhD) เพื่อทำงานทางด้านการผลิตชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม (artificial heart valve components) การนำไพโรคาร์บอนมาใช้ทำวาล์วเปิด-ปิดลิ้นหัวใจเทียมแทนพลาสติกและโลหะที่เคยใช้เนื่องจากมันมีสมบัติเข้ากันได้ดีกับเลือด (blood compatibility) ไม่ทำให้เลือดจับตัวเป็นลิ่ม ซึ่งต่อมาภายหลังปี ค.ศ. 1980-1990 ชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียมรูปแบบต่างๆ ที่ทำจากแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ข) ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนสามารถใช้กับผู้ป่วยโรคหัวใจแล้วมากกว่า 4 ล้านคนทั่วโลก



อนุภาคเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่
ถูกเคลือบด้วยไฟโรคาร์บอน

(ก)



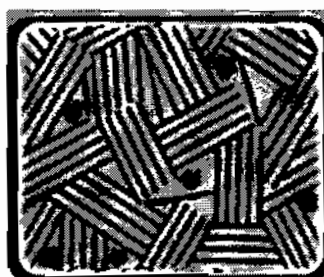
ชิ้นส่วนล้นหัวใจเทียมที่ถูก
ทำจากไฟโรคาร์บอน

(ข)

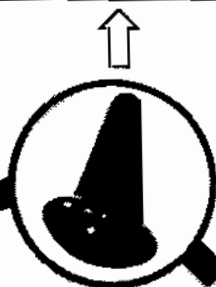
ภาพที่ 2.4 ไฟโรคาร์บอนที่ถูกผลิตขึ้นในช่วงแรกๆ ของการค้นพบ: ดัดแปลงจาก [9, 10]

ในปัจจุบันไฟโรคาร์บอนได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการแพทย์ด้านออร์โธปิดิกส์ เนื่องจากมีสมบัติพิเศษหลายอย่างทั้งด้านความทนต่อการสึกหรอและความล้า ความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกายหรือที่เรียกว่าความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) มีความแข็งแรงที่สูงมาก มีค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (friction coefficient) ที่ต่ำมากโดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับกระดูก ทั้งยังทำให้วัสดุปลูกฝังมีความเสถียรได้โดยไม่ต้องใช้ซีเมนต์กระดูกเป็นตัวช่วยประสาน ดังแสดงในภาพที่ 2.5

การซ้อนทับกันของชั้นไฟโรคาร์บอน
อย่างไร้ทิศทาง

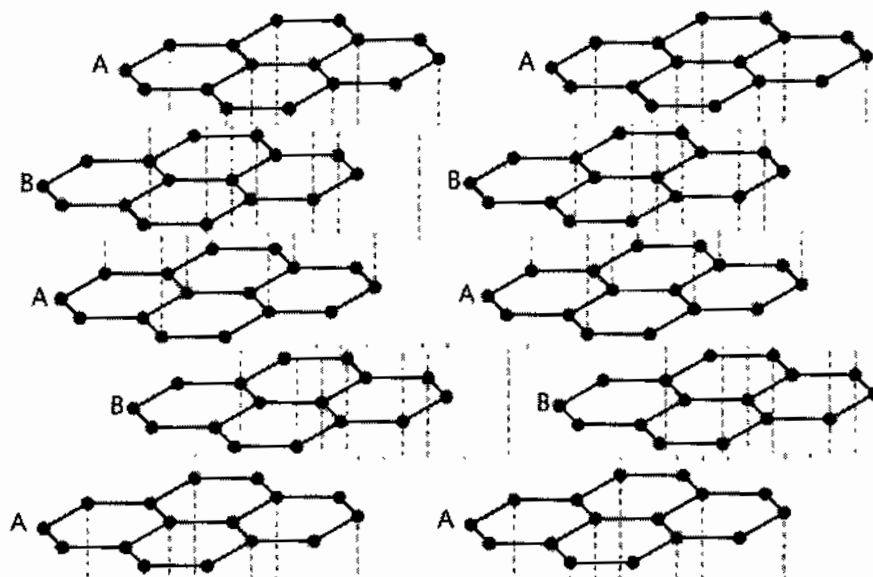


ข้อต่อบริเวณโคนนิ้วมือที่ทำจากกระดูก
เทียมด้วยวัสดุไฟโรคาร์บอน



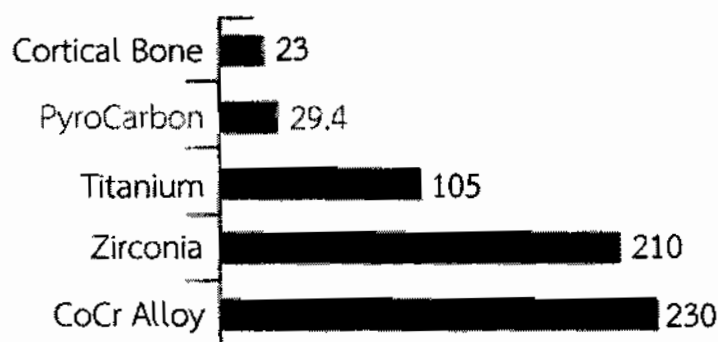
ภาพที่ 2.5 แสดงชิ้นส่วนไฟโรคาร์บอนที่ใช้ทำกระดูกเทียม: ดัดแปลงจาก [11]

โครงสร้างของไพโรคาร์บอนมีลักษณะคล้ายกับชั้นของแกรไฟท์ที่ซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบและไร้ทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งทำให้คุณสมบัติของไพโรคาร์บอนเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic properties) ฟิล์มไพโรคาร์บอนจะมีความแข็งที่ค่าค่าหนึ่ง และนำไฟฟ้าได้ แต่ไม่มีความยืดหยุ่นเหมือนแกรไฟท์



ภาพที่ 2.6 ฟิล์มไพโรคาร์บอนที่เกิดจากการซ้อนทับกันของชั้นแกรไฟท์อย่างไร้ระเบียบ: ดัดแปลงจาก [12]

นอกจากนี้ไพโรคาร์บอนยังมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับกระดูกส่วนฉนวนอกที่เรียกว่ากระดูกแข็ง (cortical bone) ดังแสดงตามภาพที่ 2.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น ในหน่วย GPa ของวัสดุปลูกฝังชนิดต่างๆ จึงมีความเป็นไปได้ในการวัสดุไพโรคาร์บอนเป็นกระดูกเทียมซึ่งจะช่วยลดความเค้น (stress shielding) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกับชิ้นส่วนกระดูกจริงของร่างกาย



ภาพที่ 2.7 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (ในหน่วย GPa) ของวัสดุปลูกฝังชนิดต่างๆ [13]

ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะระหว่างอะตอม [19]

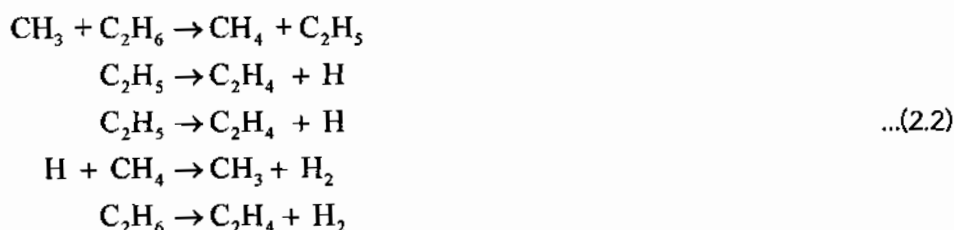
Bond	Bond Energy, kJ/mol
$H-H$	433
$H-C$	414
$H-N$	389
$H-O$	464
$C-C$	347
$C=C$	611
$C\equiv C$	837
$C-N$	305
$C=N$	615
$C\equiv N$	891
$C-O$	360
$C=O$	376
$N-N$	163
$N=N$	418
$N\equiv N$	946
$N-O$	222
$N=O$	590
$O-O$	142
$O=O$	498

ในขั้นตอนการแยกโมเลกุลของแก๊สไฮโดรคาร์บอนออกเป็นโมเลกุลย่อย มีความเป็นไปได้หลายแนวทาง โดยสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนเฟสได้หลายสมการ ตัวอย่างเช่น [18]

กรณีเริ่มจากแก๊สมีเทนได้รับความร้อนเพียงพอจึงเกิดการแยกตัวเป็นแก๊สอีเทน (C_2H_6) ตามสมการที่ 2.1



เมื่อแก๊สอีเทนได้รับความร้อนเพียงพอและต่อเนื่องก็สามารถเกิดการแยกตัวและรวมตัวเป็นเอทิลีน (C_2H_4) และแก๊สไฮโดรเจน ตามสมการที่ 2.2



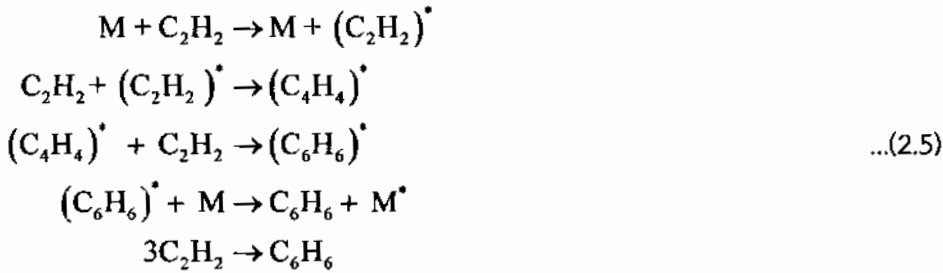
ต่อมาเมื่อแก๊สเอทิลีนได้รับความร้อนเพียงพอและต่อเนื่องก็สามารถเกิดการแยกตัวเป็นแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) และแก๊สไฮโดรเจน ตามสมการที่ 2.3



เมื่อแก๊สเอทิลีนได้รับความร้อนเพียงพอและต่อเนื่องก็สามารถเกิดการแยกตัวและรวมตัวเป็นเบนซีน (C_6H_6) และแก๊สไฮโดรเจนในที่สุด ตามสมการที่ 2.4



และมีความเป็นไปได้ที่แก๊สอะเซทิลีนจะชนกับอะตอมแก๊สเฉื่อย (M) แล้วทำให้อะตอมแก๊สเฉื่อยอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (M^*) จากนั้นอะตอมของแก๊สเฉื่อยที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นนี้ก็เข้าไปชนกับโมเลกุลของแก๊สเฟสอื่นๆ และเร่งการแตกตัวของโมเลกุลต่อไปเรื่อยๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.5



จากนั้นโมเลกุลของเบนซีนเมื่อได้รับความร้อนเพียงพอและต่อเนื่องก็จะสลายตัวเป็นอะตอมของคาร์บอนที่จับกันเป็นสายยาว (C_{∞}) และแก๊สไฮโดรเจน เมื่ออะตอมของคาร์บอนที่จับกันเป็นสายยาวตกสะสมลงเป็นชั้นงานที่ร้อนเพียงพอก็จะฟอร์มตัวและจับตัวกันเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมในสองมิติ เกิดการซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ และเกิดเป็นฟิล์มไพโรคาร์บอนบนชิ้นงานในที่สุด ดังแสดงได้ในสมการที่ 2.6



2.3 การให้พลังงานความร้อนกับแก๊สโดยใช้เตาเผาไฟฟ้า

2.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ให้กับเตาเผา

การให้ความร้อนแก่เตาเผาไฟฟ้าให้มีอุณหภูมิสูงสามารถทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวนำ เช่น ขั้วทองแดง (Cu) ขั้วโมลิบดีนัม (Mo) ขั้วทังสเตน (W) หรือขั้วแกรไฟต์ ในเตาเผาแบบที่มีชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาจะสามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาได้ เตาเผาชนิดนี้จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากไม่มีไอเสีย และถ้ามีการใช้แผ่นกันฉนวนความร้อนที่เหมาะสมแล้วจะสามารถลดปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมารอบเตาได้มาก [20] การให้กำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเตาเผาโดยให้กระแสไฟฟ้า (I) สูงไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีความต้านทานไฟฟ้า (R) จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขั้วไฟฟ้า (V) ตามกฎของโอห์ม คือ

$$V = IR \quad \dots(2.7)$$

และกำลังไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าได้รับ (P) จะคำนวณได้จาก

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \quad \dots(2.8)$$

โดยความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ขนาดความยาว (ℓ) และพื้นที่ภาคตัดขวาง (A) ของขั้วไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.9 ดังนี้ [21]

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad \dots(2.9)$$

โดยตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานของขั้วแกรไฟต์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้ในภาคผนวก ค

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะใช้ทำขั้วไฟฟ้า นอกจากค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวแปรที่สำคัญแล้ว ยังมีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิงอุณหภูมิ (temperature coefficient of resistance, α) ซึ่งค่าของตัวแปรนี้จะเป็นตัวบอกค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป dR เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น dT ตามสมการที่ 2.10

$$dR = \alpha R_0 dT \quad \dots(2.10)$$

โดยที่ R_0 คือ ค่าความต้านทานมาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิงอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น ต่อองศาเซลเซียส ตัวอย่างของค่า R_0 และ α ของขั้วไฟฟ้าบางชนิดแสดงได้ตามตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองแดงและทังสเตนจะมีค่าความต้านทานสูงขึ้นจากเดิมถึง 5.9 และ 6.2 เท่าตามลำดับ โดยค่าความต้านทานที่สูงขึ้นจะส่งผลถึงการบริโภคพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ขั้วแกรไฟต์กลับมีค่าความต้านทานลดลงถึง 0.7 เท่า จึงใช้กำลังไฟฟ้าที่น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ด้วยสาเหตุนี้เองที่ทำให้วัสดุแกรไฟต์นิยมถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเตาเผาอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปและค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิงอุณหภูมิของขั้วไฟฟ้าบางชนิด: ดัดแปลงจาก [22]

วัสดุ	สภาพต้านทาน ($\Omega \cdot m$)	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานเชิงอุณหภูมิ ($1/^\circ C$)	สัดส่วนความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิ 1400 $^\circ C$ (dR / R_0)
ทองแดง	1.724×10^{-8}	4.29×10^{-3}	5.9
ทังสเตน	5.65×10^{-8}	4.5×10^{-3}	6.2
แกรไฟต์	$3 - 60 \times 10^{-5}$	-4.8×10^{-4}	-0.7

การเคลื่อนที่ของความร้อน (heat transfer) เป็นการถ่ายเทความร้อน จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (ถ้าทั้งสองจุดมีอุณหภูมิต่างกัน ความร้อนจะถ่ายเทจากจุดที่อุณหภูมิสูงไปต่ำ) และจะหยุดถ่ายเทเมื่อทั้งสองจุดมีอุณหภูมิเท่ากัน เรียกสภาวะนี้ว่า สมดุลความร้อน (thermal equilibrium) หลักการนี้สามารถใช้ได้กับความร้อนเกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าที่ถูกส่งผ่านไปยังแก๊สภายในระบบด้วยขบวนการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนี้

2.3.2 การพาความร้อน (thermal convection)

คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวกลาง การพาความร้อนมี 2 แบบ คือ การพาความร้อนแบบอิสระ และการพาความร้อนแบบถูกแรงบังคับ อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัตถุโดยการพาความร้อนจะแปรผันตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุกับอุณหภูมิของของไหลที่เป็นตัวพาความร้อนและพื้นที่ผิวของของไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$H = hA(\Delta T) = hA(T_s - T_a) \quad \dots(2.11)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น $W/m^2 K$

H คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน มีหน่วยเป็น J/s

$T_s - T_a$ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่าง 2 จุดของตัวกลาง มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation)

การถ่ายเทความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งความเร็วของคลื่นเท่ากับความเร็วแสง ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ (สุญญากาศ) วัตถุทุกชนิดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อน หรือปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมาในหนึ่งหน่วยเวลา แปรผันตรงกับความถี่สัมบูรณ์ยกกำลังสี่ ตรงกับกฎของ สเตฟาน-โบลต์ซมาน (Stefan- Boltzmann law) ดังความสัมพันธ์

$$H = \sigma eAT^4 \quad \dots(2.12)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ผิวของวัตถุ (K)

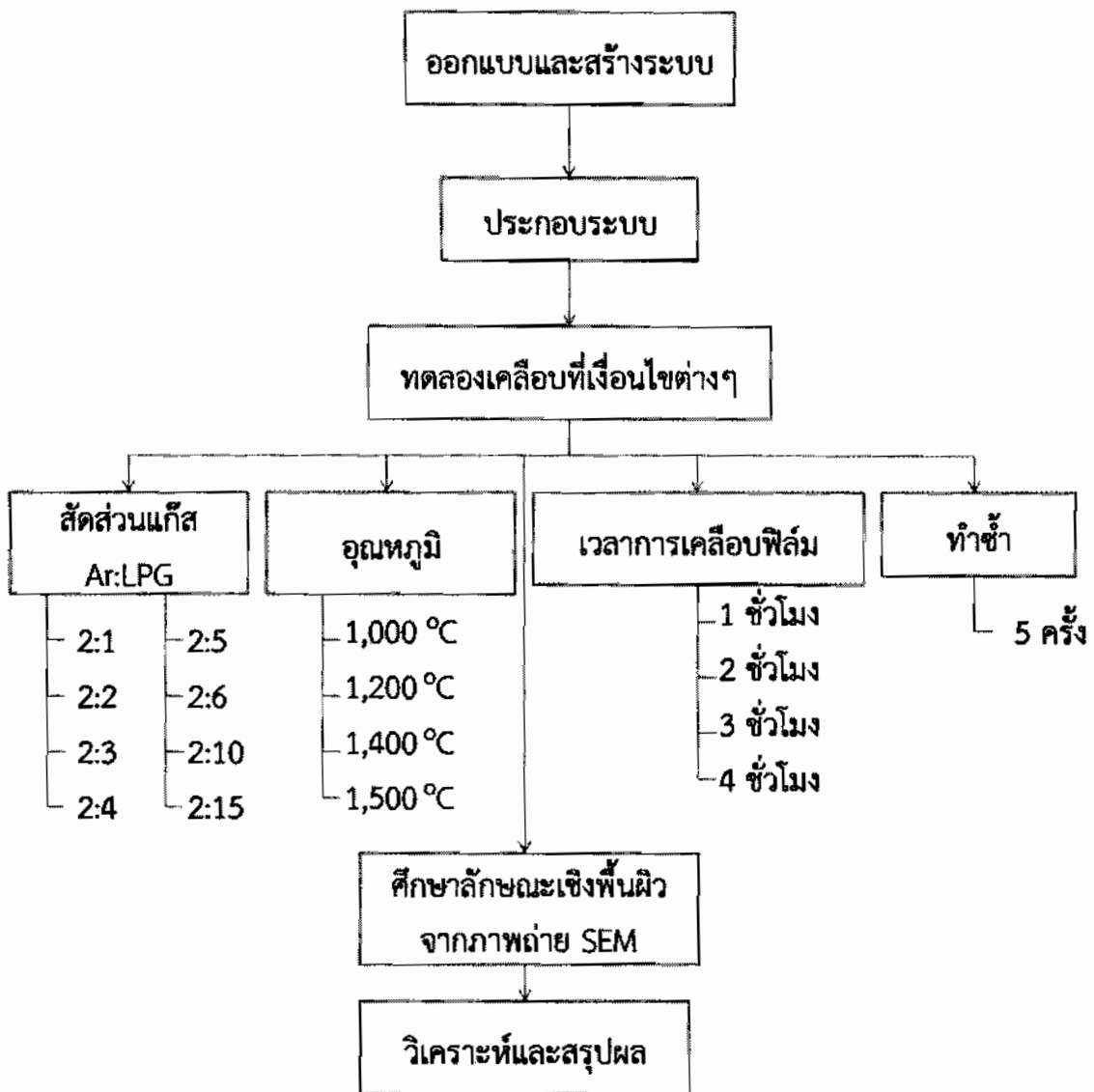
σ คือ ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลท์ซมันน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$

e คือ สภาพเปล่งรังสีมีค่าตั้งแต่ 0-1

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้ได้แสดงและให้รายละเอียดเกี่ยวกับการปลูกฟิล์มไพโรคาร์บอนตั้งแต่การออกแบบและสร้างระบบ ดังแสดงในภาคผนวก ข การปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขั้นตอนการประกอบ การทดสอบระบบ การทดลองเคลือบที่เงื่อนไขต่างๆ ตามขั้นตอนดังภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นตอนการออกแบบและสร้างระบบ รวมถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน เคลือบชิ้นงาน ได้ทำการแบ่งรายละเอียดการดำเนินงานและรายละเอียดของอุปกรณ์ออกเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

3.1 ระบบสุญญากาศ

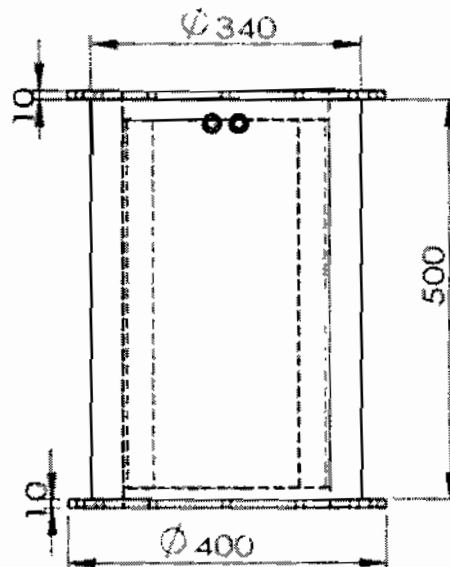
ระบบสุญญากาศเป็นระบบที่จำเป็นอย่างยิ่งในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนด้วยเทคนิคการแยกพันธะด้วยความร้อน เนื่องจากข้อไฟฟ้าและชิ้นงานทำจากวัสดุแกรไฟต์ที่เมื่อร้อนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนออกไซด์ในบรรยากาศ ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานและข้อไฟฟ้าถูกกัดกร่อนเป็นรูพรุนและเสียหายได้ นอกจากนี้แก๊สไฮโดรคาร์บอนยังแตกตัวเป็นอะตอมย่อยได้ดีที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศขึ้นเป็นอันดับแรก ซึ่งรายละเอียดของ 챔เบอร์มีดังนี้

3.1.1 แชมเบอร์ ทำจากสแตนเลสที่มีความหนา ทนทาน และแข็งแรง สามารถทนความร้อนได้สูง ไม่เกิดสนิม และต้องไม่มีรูรั่ว ซึ่งมีอยู่สามส่วนหลักๆด้วยกัน คือ

1. ตัวแชมเบอร์ เป็นส่วนหลักที่ใช้สำหรับเป็นห้องเคลือบไพโรคาร์บอน โดยมีความสูง 520 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 340 มิลลิเมตร

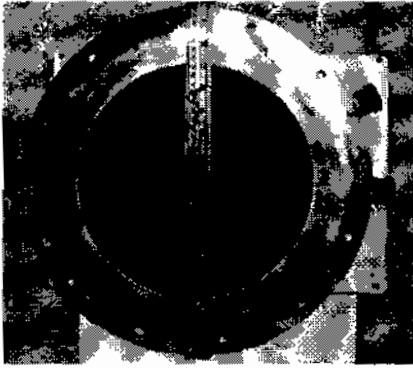


(ก)

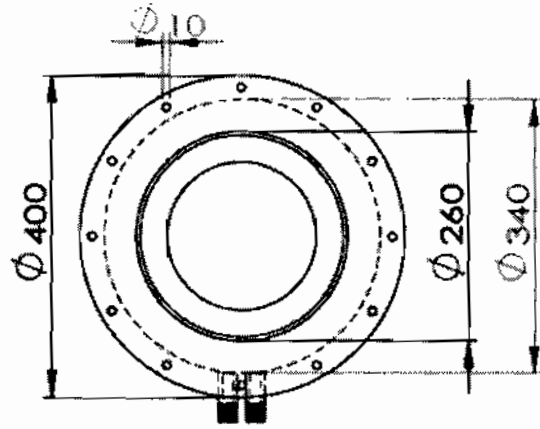


(ข)

ภาพที่ 3.2 (ก) รูปแชมเบอร์จริงแนวตั้ง (ข) ภาพ drawing ในแนวตั้งของแชมเบอร์จากการออกแบบ



(ก)



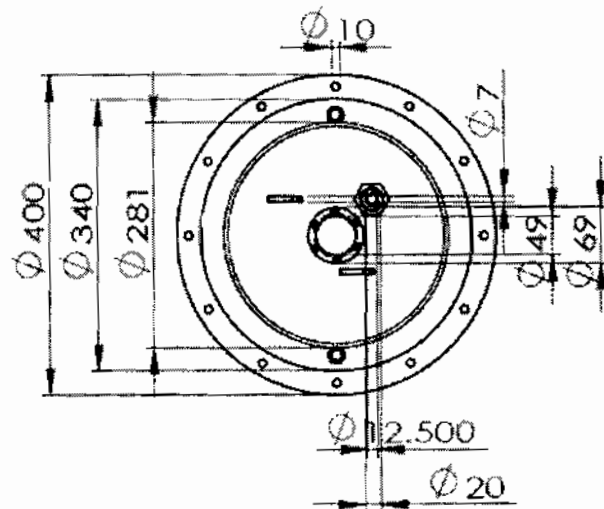
(ข)

ภาพที่ 3.3 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของแชมเบอร์จริง (ข) ภาพ drawing ด้านบนของแชมเบอร์จากการออกแบบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 260 มิลลิเมตร

2. ฝาปิดแชมเบอร์ด้านบน เป็นส่วนที่มีหน้าที่สำหรับใส่แก๊สไฮโดรคาร์บอนและแก๊สอาร์กอน รวมทั้งใช้สำหรับปล่อยอากาศภายนอกเข้าเมื่อต้องการเปิดแชมเบอร์เพื่อเอาชิ้นงานออก และไว้มองดูภายในแชมเบอร์ขณะเคลือบ แต่หลังจากที่เกิดรอยร้าวที่ช่องมอง จึงได้เปลี่ยนจากกระจกทนความร้อนเป็นสแตนเลส โดยใช้น็อตสแตนเลสในการยึดฝาบนเข้ากับแชมเบอร์ทั้งหมด 12 ตัว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 10 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 (ก) ภาพถ่ายจริงฝาบนที่ใช้ปิดแชมเบอร์ (ข) ภาพ drawing ฝาบนจากการออกแบบ

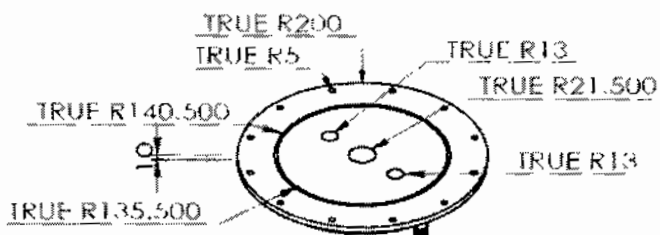
3. ฝาปิดแชมเบอร์ด้านล่าง เป็นส่วนที่ให้แชมเบอร์ตั้งและสำหรับติดตั้งขั้วไฟฟ้ารวมทั้งมีช่องสำหรับดูดอากาศออกเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศ โดยใช้มอเตอร์สแตนเลสยึดฝาด้านล่างกับแชมเบอร์ทั้งหมด 12 ตัว โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 10 มิลลิเมตร

โริงซิลิโคน ขั้วไฟฟ้า



รูดูดอากาศออก

(ก)



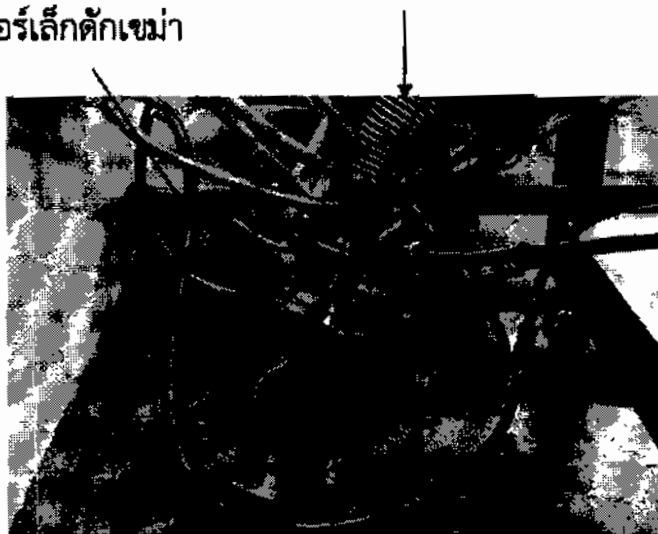
(ข)

ภาพที่ 3.5 (ก) ฝาปิดแชมเบอร์ด้านล่าง (ข) ภาพ drawing ฝาปิดแชมเบอร์ด้านล่างจากการออกแบบ

- 3.1.2 แชมเบอร์เล็กสำหรับดักเขม่า ทำหน้าที่ในการดักเขม่าเมื่อระบบมีการทำงานแบบไม่สมบูรณ์ (เกิดเขม่า) เพื่อไม่ให้เข้าไปอุดรูของปั๊ม ซึ่งจะเป็เหตุให้ปั๊มเสียหายได้

ท่อดูดอากาศออกจากแชมเบอร์

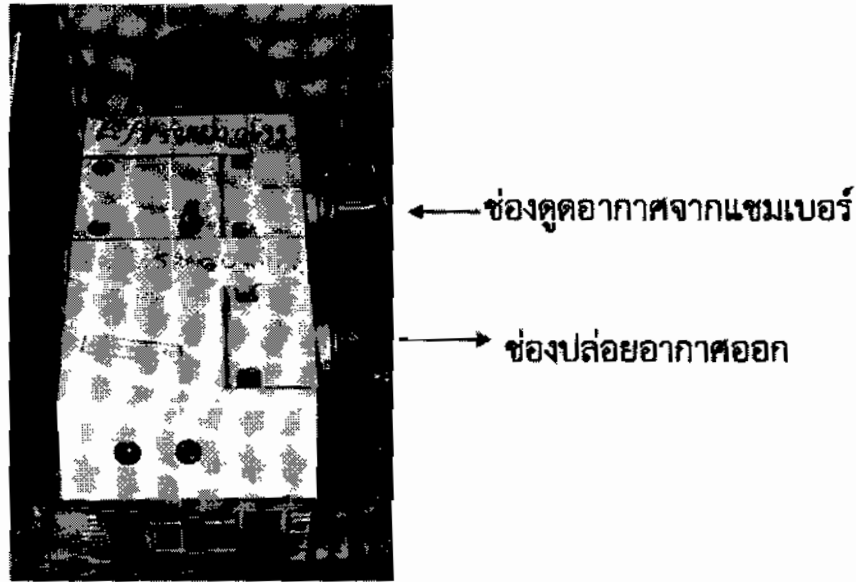
แชมเบอร์เล็กดักเขม่า



ภาพที่ 3.6 แชมเบอร์เล็กสำหรับดักเขม่า

3.1.3 ปั๊มกลโรตารี (Rotary Mechanical Pump)

ตัวแรก รุ่น LEYBOLD 040B ซึ่งมีสปีดในการดูดอากาศ 40 m³/h เนื่องจากพบว่าปั๊มชนิดนี้มีปัญหา ด้านอัตราเร็วในการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ทำได้ช้าและใช้เวลานานที่จะทำให้ความดันลดลงถึงความดันฐาน



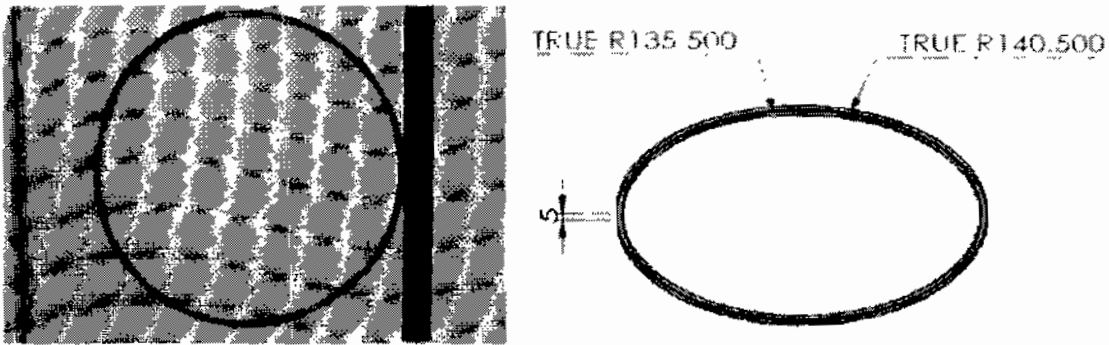
ภาพที่ 3.7 ปั๊มกลโรตารีตัวแรก

จากปัญหาของปั๊มกลโรตารีตัวแรกจึงได้เปลี่ยนมาใช้ปั๊มกลโรตารีตัวใหญ่ขึ้น คือ ปั๊มกลโรตารีรุ่น LEYBOLD SA SV180 109 17 ปั๊มชนิดนี้ใช้โรเตอร์ซึ่งป้องกันการรั่วของอากาศโดยน้ำมัน อากาศในแชมเบอร์ ถูกดูดเข้าไปในปั๊มทางช่องดูดอากาศ (inlet port) และปล่อยสู่บรรยากาศทางช่องปล่อยแก๊สออก (exhaust port) ซึ่งมีอัตราเร็วในการดูดอากาศ 216 m³/h จึงสามารถลดความดันในแชมเบอร์ให้ต่ำลงได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 3.8 ปั๊มกลโรตารีตัวที่สอง

3.1.4 โอริง ในการต่ออุปกรณ์แต่ละตัวจำเป็นต้องมีโอริงกันตรงกลางเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศจากภายนอกเข้าสู่แชมเบอร์ โดยชนิดของโอริงที่ใช้เป็นชนิดซิลิโคน มีสีขาวขุ่น ทนความร้อนได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส ใช้ชีลด์ (shield) สูญญากาศ ระหว่างฝาแชมเบอร์ด้านบน และ ฝาแชมเบอร์ด้านล่างกับกับตัวแชมเบอร์

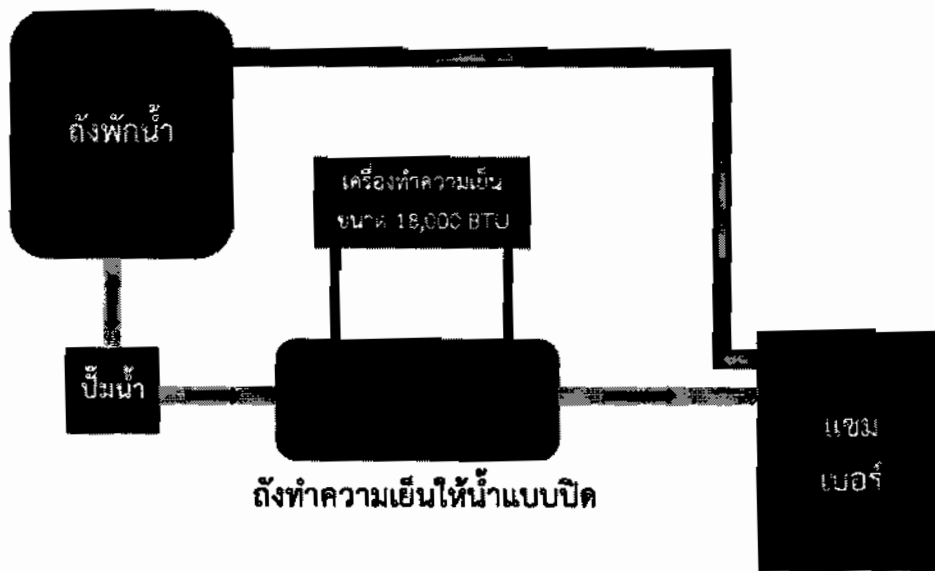


ภาพที่ 3.9 โอริงซิลิโคนสำหรับชีลด์สูญญากาศ

3.2 ระบบหล่อเย็น

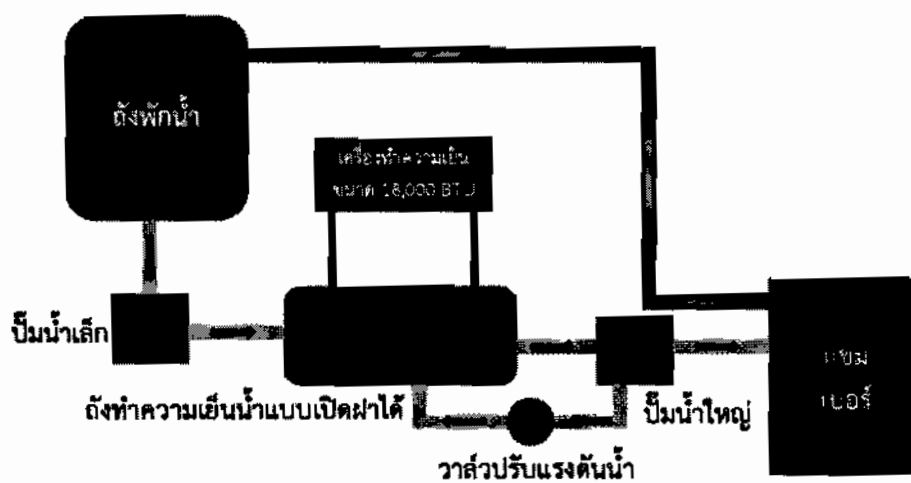
เป็นระบบที่มีความสำคัญมากอีกระบบหนึ่งในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ซึ่งมีหน้าที่ในการรักษาอุณหภูมิภายนอกของแชมเบอร์เพื่อไม่ให้อุณหภูมิสูงจนเกินไปเนื่องจากแชมเบอร์จะมีโอริง (O-ring) และเทปลอนที่ทนอุณหภูมิได้ไม่เกิน 250 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบหล่อเย็นนั้นก็ได้ออกพัฒนามาจนสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำถึง 8 องศาเซลเซียส ก่อนการให้กระแสกับขั้วไฟฟ้า และขณะทำการเคลือบฟิล์มที่เตาเผา มีอุณหภูมิสูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส สามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้ต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียสได้ ในการออกแบบและสร้างระบบหล่อเย็น มีรายละเอียดดังนี้

- ระบบหล่อเย็นแบบที่ 1 แสดงได้ตามภาพที่ 3.10 ประกอบไปด้วย ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร เครื่องทำความเย็น หรือคอมเพรสเซอร์ ขนาด 18,000 BTU ป้อนน้ำอัดรายการป้อน 100 ลิตรต่อนาที ถังทำความเย็นทรงกระบอก และแชมเบอร์ เมื่อทดสอบระบบแล้วพบว่า ระบบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำถึง 14 องศาเซลเซียส ก่อนการให้กระแสกับขั้วไฟฟ้า แต่ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ได้ขณะทำการเคลือบฟิล์ม ซึ่งถ้าเดินเครื่องให้เตาเผา มีอุณหภูมิมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส นานเกิน 1 ชั่วโมง อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ผนังแชมเบอร์ และสร้างความเสียหายกับโอริงได้ จากปัญหาข้างต้นทำให้ทราบว่าอัตราการทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์ไม่เพียงพอต่อความร้อนที่แผ่จากขั้วไฟฟ้าเข้ามาที่ผนังแชมเบอร์ จึงต้องมีการปรับปรุงระบบหล่อเย็นต่อไป



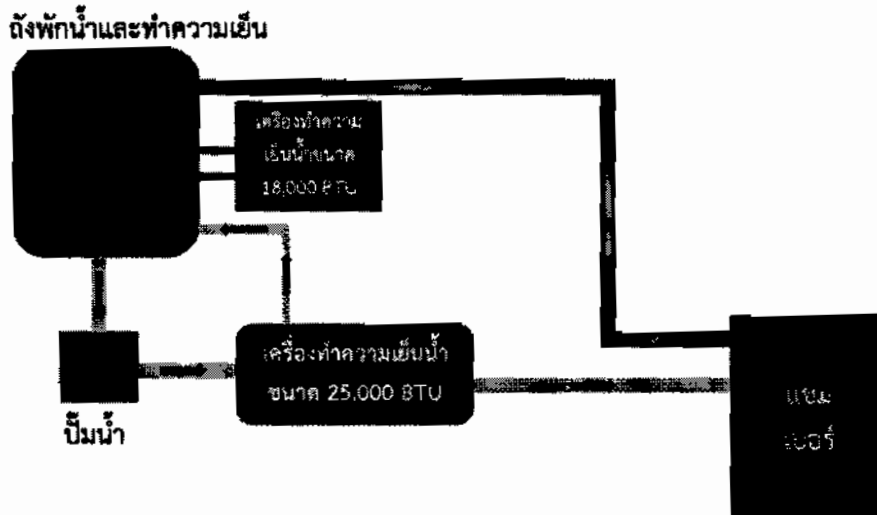
ภาพที่ 3.10 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 1

- ระบบหล่อเย็นแบบที่ 2 แสดงได้ตามภาพที่ 3.11 ประกอบไปด้วย ถังน้ำทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีขนาดความจุ 175 ลิตร ซึ่งมากกว่าแบบทรงกระบอก และเพิ่มปั๊มเล็กอัตราการไหล 40 ลิตรต่อนาที หลังจากทดสอบระบบ พบว่า ระบบหล่อเย็นรักษาอุณหภูมิน้ำได้นานขึ้น แต่ก็ยังไม่นานพอ และปัญหาที่พบอีกคือ ต้องคอยปรับอัตราการไหลของน้ำอยู่ตลอด เพราะอัตราการปั๊มของปั๊มทั้งสองแตกต่างกัน ทำให้อัตราการไหลของน้ำช้าลง ทำให้น้ำไหลผ่านแชมเบอร์ได้ช้าลง สายน้ำจึงร้อนกว่า แบบที่ 1



ภาพที่ 3.11 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 2

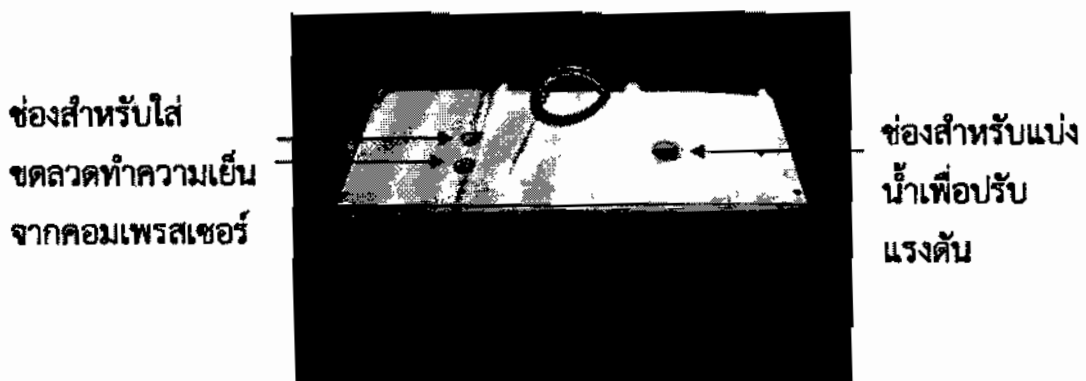
- ระบบหล่อเย็นแบบที่ 3 แสดงได้ตามภาพที่ 3.12 ประกอบไปด้วย ปั้มน้ำอัตราไหล 100 ลิตรต่อนาที ตัวเดียว และใช้ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร จากนั้นจึงเพิ่มคอมเพรสเซอร์ขนาด 25,000 BTU มาอีก 1 ตัว พบว่า ระบบสามารถทำงานได้ถึง 4 ชั่วโมง โดยที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นคงที่อยู่ในช่วง 22 ถึง 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.12 ระบบหล่อเย็นแบบที่ 3

3.2.1 ถังพักน้ำ

- ถังพักน้ำขนาด 175 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.13 เป็นถังพักที่ดูค้ำจากถังพักน้ำ 200 ลิตร โดยปั้มน้ำเล็กขนาดอัตราการไหลของน้ำ 40 ลิตรต่อนาที เพื่อมาทำความเย็นและดูค้ำไปหล่อเย็นแชมเบอร์ ด้วยปั้มน้ำใหญ่ขนาดอัตราการไหลของน้ำ 100 ลิตรต่อนาที ซึ่งจะมีปัญหาในการปรับแรงดันน้ำให้เท่ากันซึ่งยุ่งยากและไม่สามารถทำนานๆ ได้



ภาพที่ 3.13 ถังพักน้ำ ขนาด 175 ลิตร

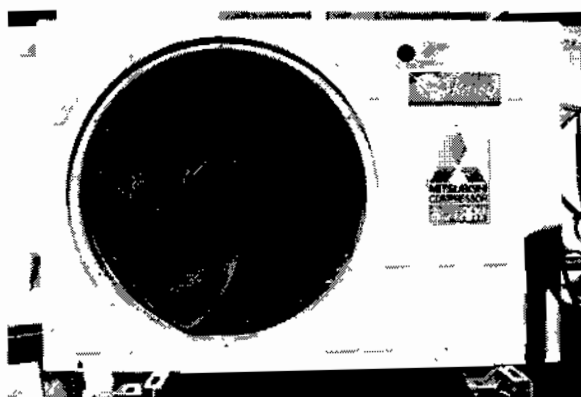
- ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.14 หลังจากที่ได้พบว่าการใส่ถังน้ำขนาด 175 ลิตร เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำแต่ต้องคอยๆ ปรับแรงดันน้ำจึงเปลี่ยนใช้เพียงถังน้ำ 200 ลิตร เพียงหนึ่งถังและใช้ปั้มน้ำขนาดอัตราการไหลของน้ำ 100 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 3.14 ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร

3.2.2 คอมเพรสเซอร์

- ตัวที่ 1 เป็นคอมเพรสเซอร์ขนาด 18,000 BTU ดังแสดงในภาพที่ 3.15 จากการทดลองพบว่าอัตราการทำความเย็นไม่เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้คงที่ได้ในขณะที่อุณหภูมิของเตามีค่ามากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.15 คอมเพรสเซอร์ขนาด 18,000 BTU

- ตัวที่ 2 หลังจากที่ได้พบปัญหาว่า คอมเพรสเซอร์ขนาด 18,000 BTU ไม่สามารถทำให้อุณหภูมิในแชมเบอร์คงที่ขณะทำการเคลือบไพโรคาร์บอนได้ จึงได้เพิ่มคอมเพรสเซอร์ ขนาด 25,000 BTU ดัง

แสดงในภาพที่ 3.16 พบว่า สามารถรักษาอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้คงที่ในช่วง 22 ถึง 25 องศาเซลเซียสได้



ภาพที่ 3.16 คอมเพรสเซอร์ขนาด 25,000 BTU

3.2.3 สายน้ำ

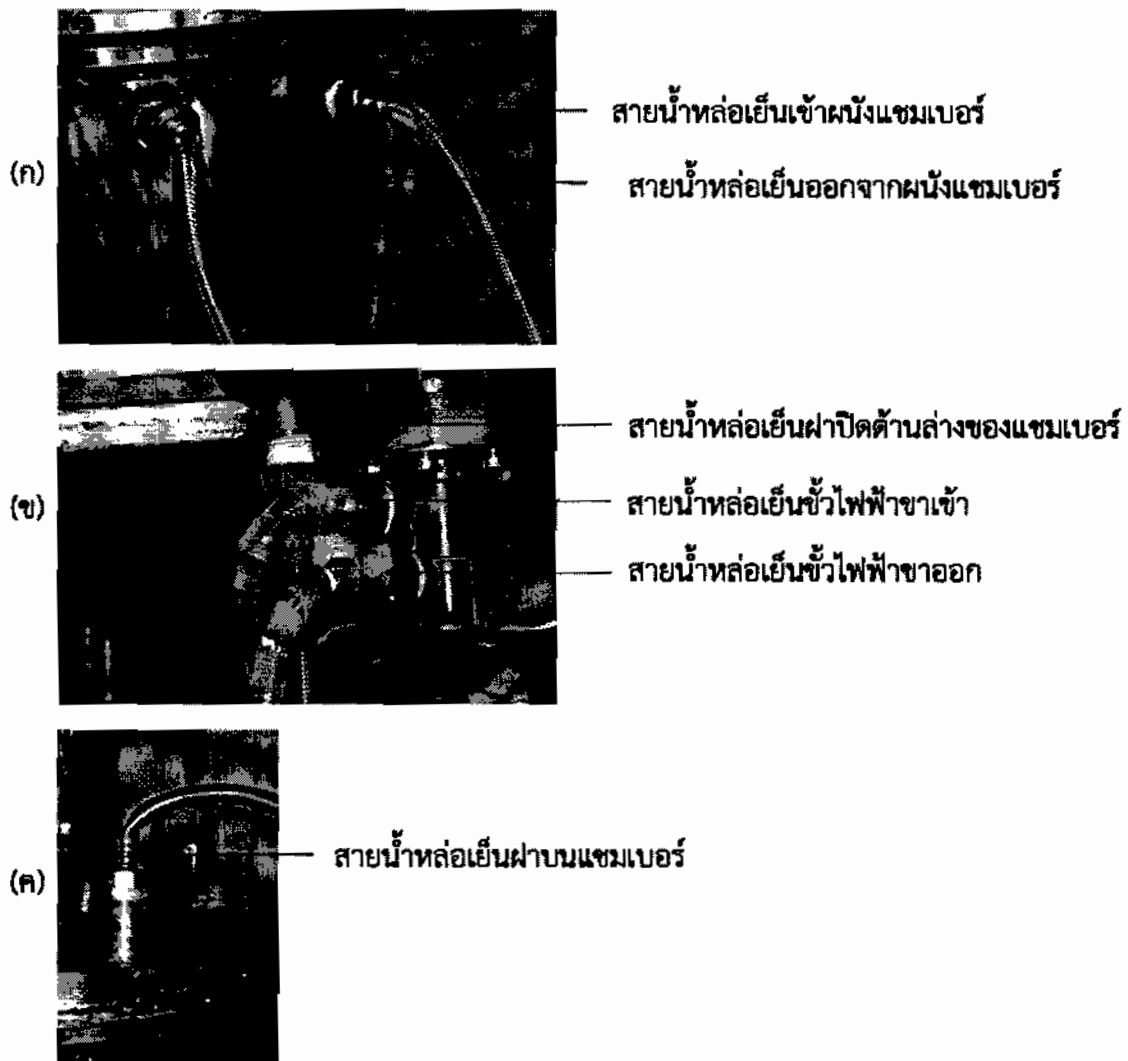
สายน้ำระบบหล่อเย็นทั้งหมดเป็นสายน้ำขนาด 4 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.17 โดยข้างในเป็นสายยาง และหุ้มด้วยสแตนเลส ซึ่งสามารถทนน้ำที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสายน้ำแบบเป็นสายยางเพียงอย่างเดียว โดยแต่ละชุดของสายน้ำหล่อเย็นขาเข้าและออกจากแชมเบอร์จะมี 4 เส้นย่อย ดังแสดงในภาพที่ 3.18 เพื่อหล่อเย็นส่วนต่างๆ ของเตาเผา (ก) หล่อเย็นผนังแชมเบอร์ทรงกระบอก (ข) หล่อเย็นหัวไฟฟ้า และฝาปิดแชมเบอร์ด้านล่าง (ค) หล่อเย็นฝาปิดแชมเบอร์ด้านบน



จุดสายน้ำหล่อเย็นเข้าแชมเบอร์

จุดสายน้ำหล่อเย็นออกจากแชมเบอร์

ภาพที่ 3.17 ชุดสายน้ำหล่อเย็นเข้าและออกจากแชมเบอร์



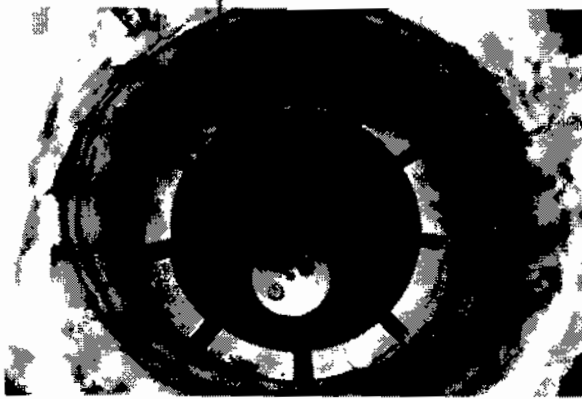
ภาพที่ 3.18 การแบ่งน้ำหล่อเย็นออกเป็น 4 เส้นย่อย เพื่อหล่อเย็นส่วนต่างๆ ของเตาเผา (ก) หล่อเย็นผนังแฉมเบอร์ทรงกระบอก (ข) หล่อเย็นหัวไฟฟ้า และฝาปิดแฉมเบอร์ด้านล่าง (ค) หล่อเย็นฝาปิดแฉมเบอร์ด้านบน

3.3 ระบบฉนวนความร้อน

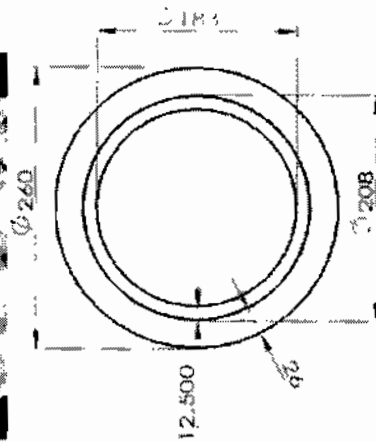
เป็นระบบที่มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการพาความร้อนจากภายในแฉมเบอร์ออกมาสู่ภายนอกซึ่งช่วยในการรักษาอุณหภูมิภายในแฉมเบอร์ให้คงที่รวมทั้งช่วยระบบหล่อเย็นไม่ให้งานหนักเกินไป

- การติดตั้งฉนวนความร้อนแบบที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.19 ประกอบไปด้วยฉนวนกันความร้อน 2 ชั้น โดยชั้นในสุด (ใกล้หัวแกรไฟต์มากที่สุด) ทำจากซีเมนต์ทนความร้อนหนา 1.25 เซนติเมตร ทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส ชั้นนอกเป็นแร่ใยหินหนา 2.6 เซนติเมตร ทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส หลังจากที่ใช้งานแล้วพบว่าฉนวนความร้อนชั้นในสุดสามารถกันความร้อนได้ระดับหนึ่ง แต่หลังจากที่ใช้ไปหลายครั้ง ปูนทนความร้อนเริ่มมีรอยร้าวและทำให้ความร้อนภายในแฉมเบอร์สามารถแผ่ออกมาถึงผนังแฉมเบอร์สแตนเลสได้มากขึ้น จึงต้องมีการแก้ไขต่อไป

รอยร้าวที่เกิดขึ้นหลังจากใช้งานมาหลายครั้ง



(ก)



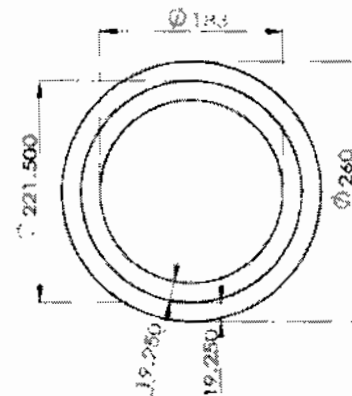
(ข)

ภาพที่ 3.19 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ผนวกันความร้อนแบบที่ 1

- การติดตั้งผนวความร้อนแบบที่ 2 จากปัญหาที่พบจากผนวแบบที่ 1 จึงได้พัฒนาให้ผนวซีเมนต์ทนความร้อนชั้นในหนาขึ้นโดยหนา 1.9 เซนติเมตร และลดความหนาของแร่ใยหินเป็น 1.9 เซนติเมตร พบว่า หลังจากที่ใช้ไปหลายครั้ง เซรามิคชั้นในก็มีรอยร้าวเกิดขึ้นอีกเช่นเคย ดังแสดงในภาพที่ 3.20



(ก)

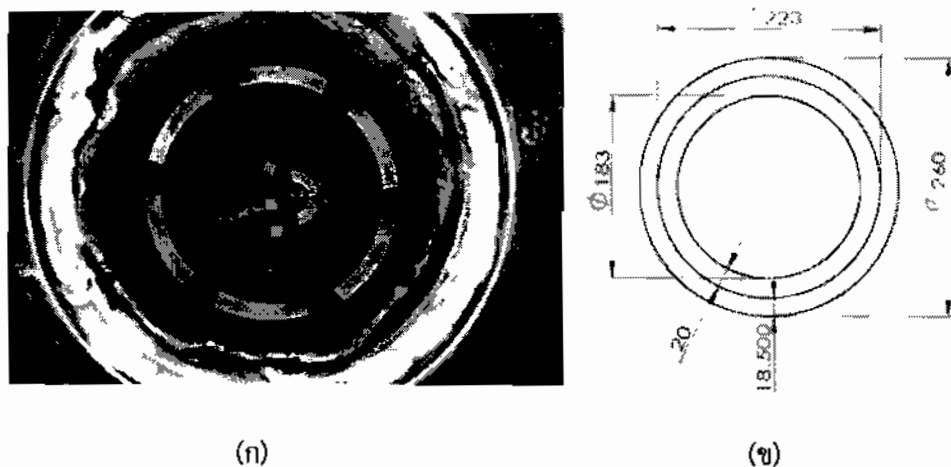


(ข)

ภาพที่ 3.20 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ผนวกันความร้อนแบบที่ 2

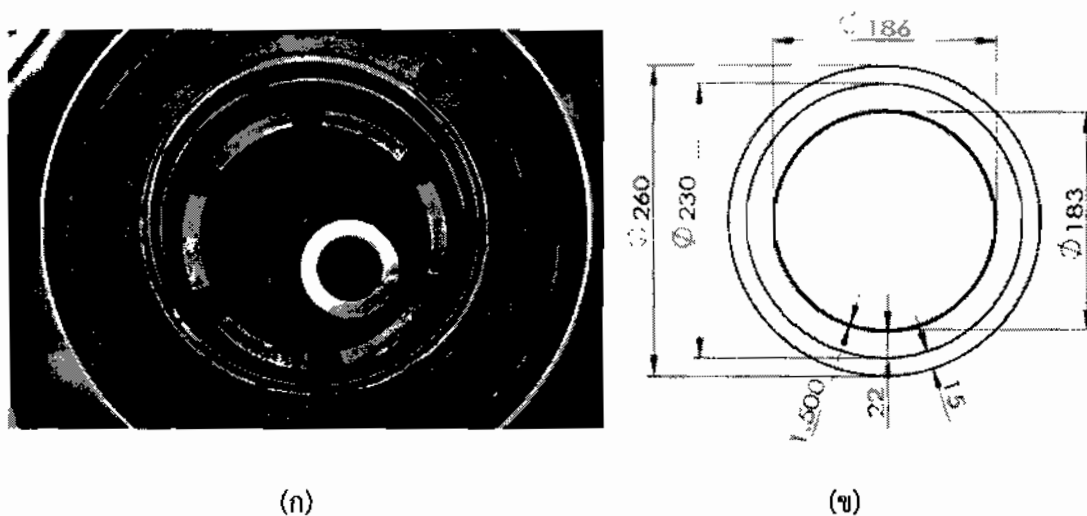
- การติดตั้งผนวความร้อนแบบที่ 3 พัฒนามาจากผนวแบบที่ 2 หลังจากที่ใช้พบว่า ซีเมนต์ทนความร้อนนั้นเมื่อใช้ไปเรื่อยๆ จะเกิดรอยร้าวและแตกซึ่งทำให้อุณหภูมิในแคมเบอร์ถูกพาออกมามากขึ้น จึงได้เปลี่ยนวัสดุจาก ซีเมนต์ทนความร้อนเป็น แกรไฟต์เฟลด์ ซึ่งทนต่ออุณหภูมิได้ 1,800 องศาเซลเซียส โดยมีความหนา 2 เซนติเมตร และชั้นนอกเป็นแร่ใยหินหนา 1.85 เซนติเมตร หลังจากที่ใช้แล้วพบว่า ความร้อนในแคมเบอร์ออกมาได้มากขึ้นและด้วยคุณสมบัติที่นำไฟฟ้าของแกรไฟต์เฟลด์

ทำให้เมื่อขั้วแกรไฟต์สัมผัสกับแกรไฟต์เฟลต์ เกิดการสปาร์คกัน ทำให้ความต้านทานของขั้วแกรไฟต์เปลี่ยน จึงทำให้รักษาอุณหภูมิในแชมเบอร์ไม่ได้ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะ ในการใส่แกรไฟต์เฟลต์ต้องม้วนเป็นทรงกระบอกจากแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำให้แกรไฟต์เฟลต์ผิดรูปร่างและมีรอยต่อของแผ่นแกรไฟต์เฟลต์ ซึ่งความร้อนจะออกมาจากรอยต่อและออกสู่ภายนอกมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 3

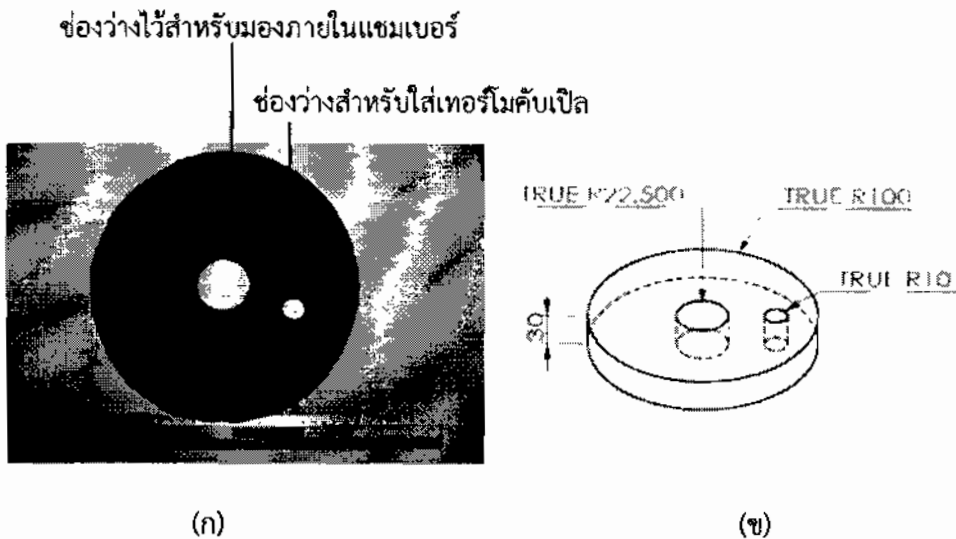
- การติดตั้งฉนวนความร้อนแบบที่ 4 จากปัญหาของฉนวนแบบที่ 3 จึงใช้แกรไฟต์ฟอยล์ทรงกระบอกหนา 1.5 มิลลิเมตร เป็นชั้นในสุด ตามด้วยแกรไฟต์เฟลต์ หนา 2.2 เซนติเมตร และแร่ใยหินหนา 1.5 เซนติเมตร พบว่าสามารถรักษาความร้อนในแชมเบอร์ได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนแบบที่ 4

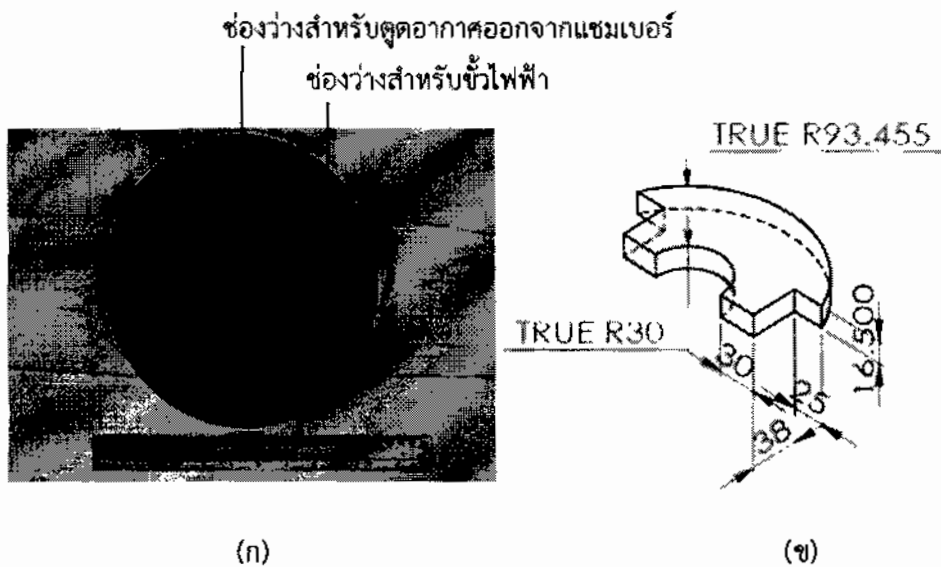
โดยในระบบฉนวนจะใช้วัสดุทนความร้อน อยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ ซีเมนต์ทนความร้อน แกรไฟต์เฟลต์ แบบม้วนได้กับแบบแผ่น และแกรไฟต์ฟอยล์

- ฉนวนด้านบน เป็นฉนวนซีเมนต์ทนความร้อนมีความหนา 3 เซนติเมตร ซึ่งมีหน้าที่ในการกั้นการแผ่รังสีความร้อนจากในแคมเบอร์มาสู่ฝาปิดแคมเบอร์ด้านบน ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนด้านบน

- ฉนวนด้านล่าง เป็นฉนวนซีเมนต์ทนความร้อนมีความหนา 1.6 เซนติเมตร ซึ่งมีหน้าที่ในการกั้นการแผ่รังสีความร้อนจากในแคมเบอร์มาสู่ฝาปิดแคมเบอร์ด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.24



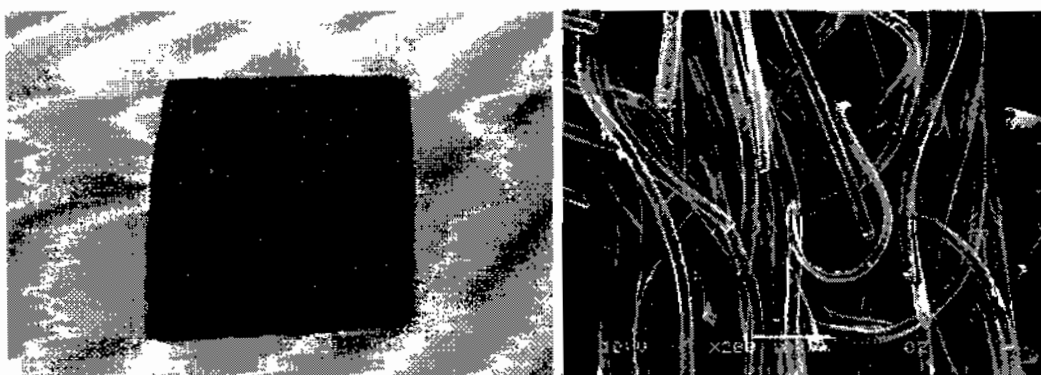
ภาพที่ 3.24 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ฉนวนกันความร้อนด้านล่าง

- แกรไฟต์เฟลต์แบบม้วนได้ มีขนาดความกว้าง 46 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตรโดยนำมาม้วนเป็นฉนวนชั้นใน โดยมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติด้านต่างๆของ แกรไฟต์เฟลด์ [23]

Property	Measured Value
Bulk density (g/cm ³)	0.12 PAN (0.085 Rayon)
Carbon content (%)	≥99
Thermal conductivity (W/m-K)	0.365 (0.39 Rayon)
Specific resistance (Ohm.cm)	0.14-0.18
Tensile Strength (Mpa)	0.1-0.25
Ash content (%)	≤0.5
Processing temperature (°C)	2,000
Environment To use (°C)	2,400 in neutral atmosphere, 3,000 in vacuum

โดยลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแกรไฟต์เฟลด์แบบม้วนได้ แสดงได้ในภาพที่ 3.25



(ก)

(ข)

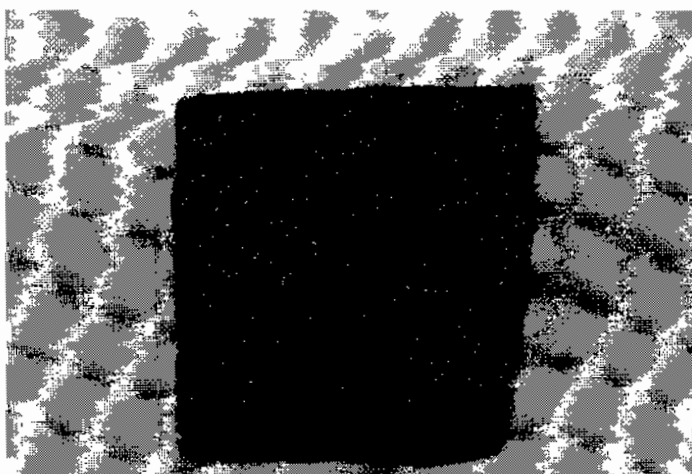
ภาพที่ 3.25 แกรไฟต์เฟลด์แบบม้วนได้ (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 200 เท่า

- แกรไฟต์เฟลด์แบบแผ่น ซึ่งใช้เป็นฉนวนผ่านแทนซีเมนต์ทนความร้อน เนื่องจากช่องมองภาพของแชมเบอร์ที่ทำจากกระจกเกิดรอยร้าว จึงเปลี่ยนเป็นสแตนเลสแทน และเปลี่ยนฉนวนผ่านเพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนออกมาสู่ระบบภายนอก โดยแกรไฟต์เฟลด์แบบแผ่นมีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติด้านต่างๆของ แกรไฟต์เฟลต์แบบแผ่น [23]

Property		Measured Value
Bulk density	(g/cm ³)	0.25
Carbon content	(%)	≥95
Thermal conductivity	(W/m-K)	0.15-0.25
Specific resistance	(Ohm.cm)	0.18-0.22
Flexural Strength	(Mpa)	1.10
Ash content	(%)	≤0.6
Processing temperature	(°C)	1,200-2,000
Environment To use	(°C)	2,400 in neutral atmosphere, 3,000 in vacuum

โดยลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแกรไฟต์เฟลต์แบบแผ่นได้ แสดงได้ในภาพที่ 3.26



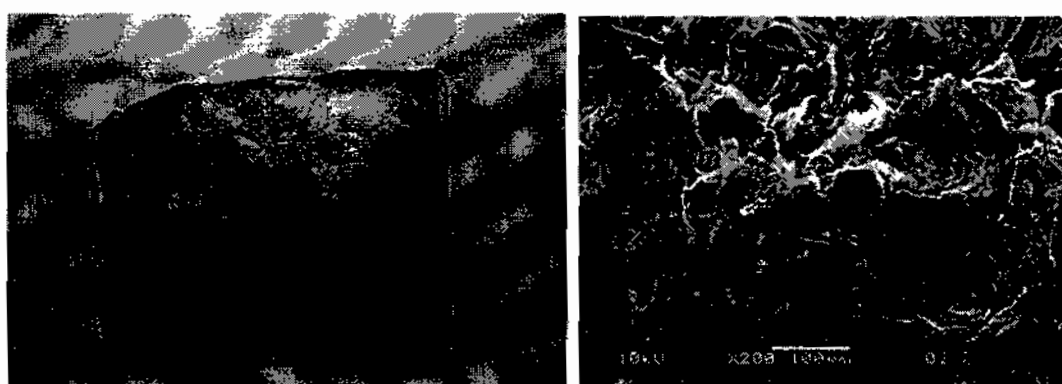
ภาพที่ 3.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะพื้นผิวของแกรไฟต์เฟลต์แบบแผ่น

- แกรไฟต์ฟอยล์ เป็นฉนวนที่อยู่ด้านในสุดของฉนวนทั้งหมดซึ่งทำหน้าที่ไม่ให้ความร้อนผ่านไปได้และเก็บกักความร้อนให้อยู่ในแคมเบอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติด้านต่างๆของ แกรไฟต์พอยล์ [23, 24]

Property	standard	High Pure	Ultra Pure	Nuclear
Bulk density (g/cm ³)	1.0	1.0	1.0	1.0
Carbon content (%)	99	99.5	99.8	99.9
Ash content (%)	1.0	0.5	0.4	0
Sulfur Content (pmm)	<1,000	<600	<400	<200
Tensile Strength (Mpa)	4.5	5.0	5.5	6.0
Specific resistance (Ohm.cm)	5	5	7	10
Max Temp-In Air (Deg C)	450	450	450	450
Max Temp-In Steam (Deg C)	700	700	700	700
Max Temp-In Vacuum (Deg C)	3,000	3,000	3,000	3,000

โดยลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแกรไฟต์พอยล์ แสดงได้ในภาพที่ 3.27



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.27 แกรไฟต์พอยล์ (ก) ภาพจากกล้องดิจิตอล (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 200 เท่า

- แร่ใยหิน เป็นฉนวนความร้อนชั้นนอกสุดของฉนวนความร้อนทั้งหมด ซึ่งมีหน้าที่ป้องกันผนังฉนวนเบอร์สัมผัสกับฉนวนความร้อนโดยตรง เนื่องจากผนังฉนวนเบอร์นั้นทำจากสแตนเลส ซึ่งอาจจะทำให้ผนังมีการอ่อนตัวและยุบตัวเนื่องจากแรงดันภายนอกที่สูงกว่าแรงดันภายในได้ถ้าสัมผัสกับแหล่งความร้อนโดยตรง โดยแร่ใยหินมีคุณสมบัติด้านต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติด้านต่างๆของแร่ใยหิน [25]

Property	Tremolite
Synonyms	Silicic acid, calcium white asbestos salt (8:4)
Chemical Formula	$[\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2]_n$
Colour	white to grey
Physical State	solid
Melting Point/Decomposition Temperature (°C)	1400
Specific Gravity	n/a
Solubility Water	insoluble
Organic Solvents	insoluble

โดยลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแร่ใยหิน แสดงได้ในภาพที่ 3.28



(ก)

(ข)

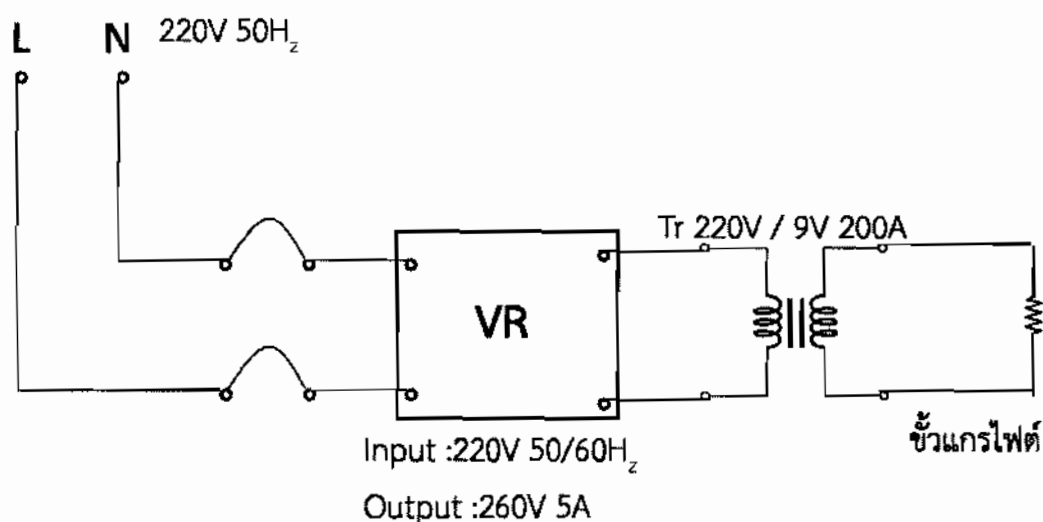
ภาพที่ 3.28 แร่ใยหิน (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ (ข) ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวระดับจุลภาค ที่กำลังขยาย 100 เท่า

3.4 ระบบไฟฟ้าให้ความร้อนแก่ขั้วแกรไฟต์

เป็นระบบที่จำเป็นมากในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน มีหน้าที่สร้างสภาวะภายในแชมเบอร์ให้ความร้อนที่เพียงพอที่จะทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนแยกพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนออกจากกันได้ ซึ่งในโครงการนี้จะให้ความร้อนในช่วง 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส โดยมีระบบวงจรไฟฟ้าดังนี้

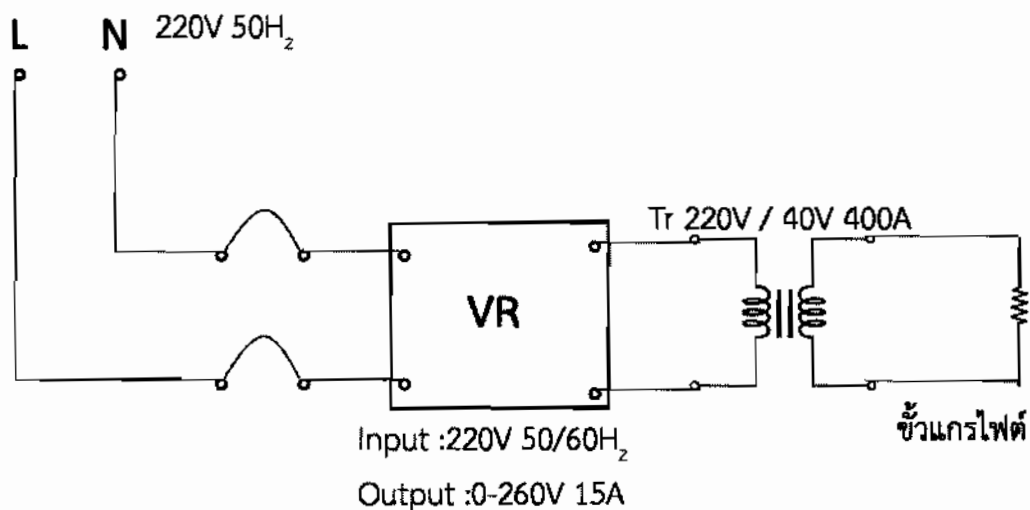
- ระบบวงจรไฟฟ้าแบบที่ 1 แสดงได้ในภาพที่ 3.28 วงจรนี้จะใช้ variable voltage transformer ซึ่งปรับแรงดันได้ 0 ถึง 260 V ทนกระแสได้ 5 A จ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงแบบ step down ขนาด

1.8 kW สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ 9 V จ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 200 A ไปที่ขั้วกรไฟต์ทำให้ขั้วกรไฟต์ร้อน แต่มีปัญหาคือ หม้อแปลงที่จ่ายกระแสให้ขั้วกรไฟต์นั้นดึงกระแสไฟมากเกินไปที่ variable voltage transformer จะรับได้ คือ มากกว่า 5 A ทำให้ variable voltage transformer ร้อนและอาจเสียหายได้ นอกจากนั้นหม้อแปลงยังจ่ายกระแสขาออกได้ไม่สูงพอจึงทำให้ใช้เวลาทำให้ขั้วกรไฟต์ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการนานเกินไป ต่อมาจึงได้มีการเปลี่ยน variable voltage transformer และหม้อแปลงใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



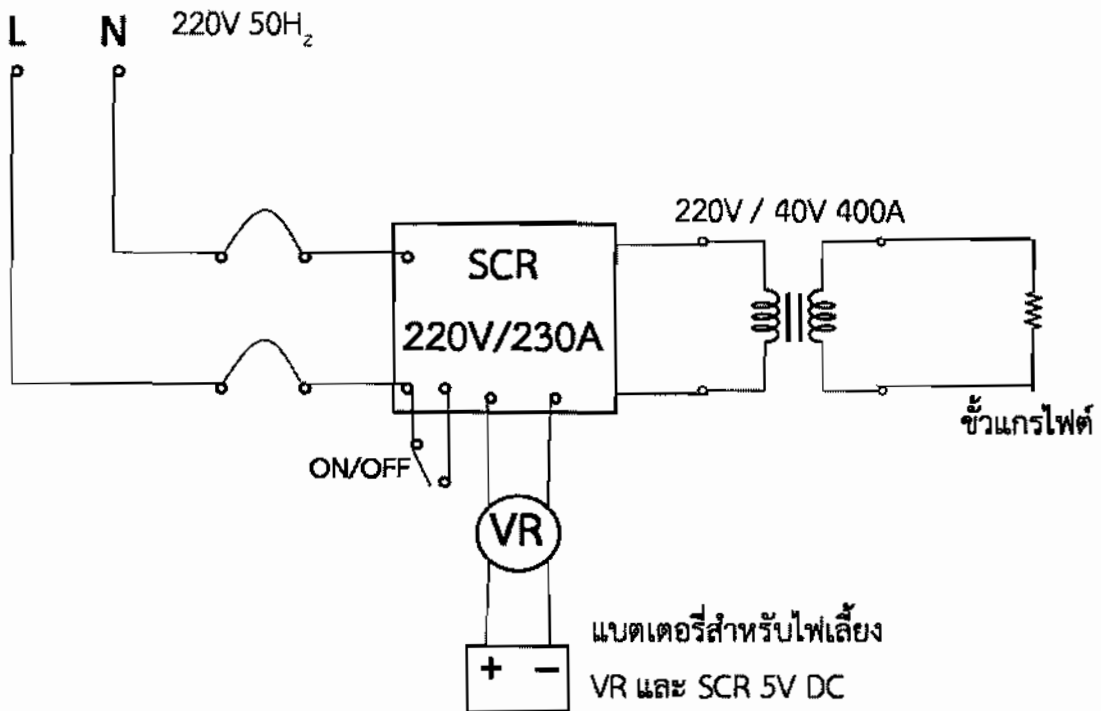
ภาพที่ 3.29 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 1

- ระบบวงจรไฟฟ้าแบบที่ 2 แสดงได้ในภาพที่ 3.30 เป็นวงจรไฟฟ้าที่ได้พัฒนามาจากวงจรไฟฟ้าแบบที่ 1 โดยเปลี่ยน variable voltage transformer ให้มีขนาดเป็น 15 A ปรับแรงดันได้ 0 ถึง 260 V เพื่อให้ทนกระแสไฟขาเข้าได้สูงขึ้น และเปลี่ยนหม้อแปลงแบบ step down ขนาด 16 kW สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ 40 V จ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 400 A เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสเข้าขั้วกรไฟต์ได้มากขึ้นเพื่อให้ใช้เวลาในการทำให้ขั้วกรไฟต์ร้อนสั้นลง แต่ปัญหาที่พบคือ หม้อแปลงแบบ step down ตัวใหม่นั้นดึงกระแสขาเข้ามากเกินไปที่ variable voltage transformer ตัวใหม่จะรับได้ คือ มากกว่า 15 A ทำให้ variable voltage transformer ร้อน และอาจจะไหม้ได้ถ้าใช้เวลานาน จึงต้องมีการเปลี่ยน variable voltage transformer เพื่อให้สามารถทนกระแสได้สูงขึ้น



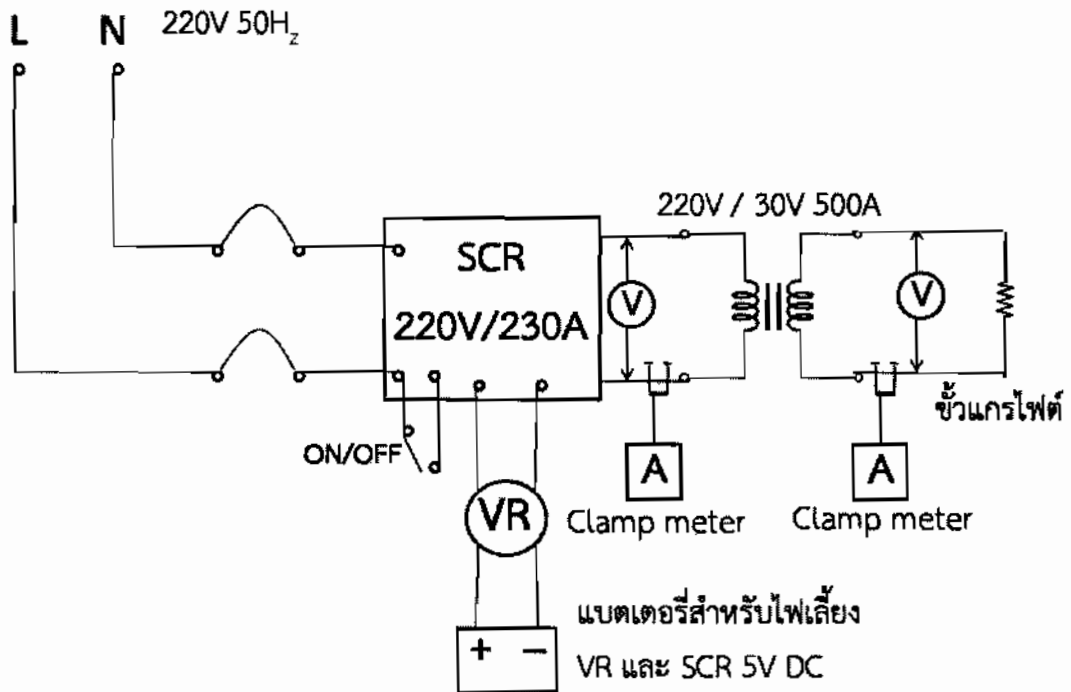
ภาพที่ 3.30 รูปวงจรไฟฟ้าแบบที่ 2

- ระบบวงจรไฟฟ้าแบบที่ 3 แสดงได้ในภาพที่ 3.31 ได้พัฒนาจากวงจรไฟฟ้าแบบที่ 2 โดยได้เปลี่ยน variable voltage transformer ใหม่เป็นชุดควบคุมแรงดัน SCR ซึ่งสามารถปรับแรงดันขาเข้าห้อมแปลงได้โดยใช้เทคนิคการควบคุมเฟส (fist control) โดยชุดควบคุมแรงดัน SCR นี้มีความสามารถทนกระแสได้สูงถึง 230 A และสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าห้อมแปลงได้ในช่วง 0 ถึง 220 V หลังจากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ห้อมแปลงขนาด 16 kW (40V, 400A) แล้วพบว่า เมื่อห้อมแปลงจ่ายกระแสไฟฟ้ามากกว่า 300 A ให้ขั้วแกรไฟต์เป็นเวลานานๆ จะยังคงเกิดความร้อนสะสมที่ห้อมแปลง ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนห้อมแปลงให้ทนกระแสได้มากขึ้นต่อไป



ภาพที่ 3.31 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 3

- วงจรไฟฟ้าแบบที่ 4 แสดงได้ในภาพที่ 3.32 ซึ่งได้พัฒนามาจากวงจรไฟฟ้าแบบที่ 3 จากปัญหาที่พบจากวงจรที่ 3 คือหม้อแปลงร้อน จึงได้เปลี่ยนหม้อแปลงใหม่ซึ่งเป็นหม้อแปลง step down ขนาด 15 kW (30V, 500A) ซึ่งทนกระแสสูงได้มากขึ้น พบว่าสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้ามากกว่า 300 A ให้ขั้วแกรไฟต์ได้ดีเป็นเวลามากกว่า 4 ชั่วโมง โดยเกิดความร้อนขึ้นที่หม้อแปลงเล็กน้อยสามารถหล่อเย็นโดยใช้พัดลมเป่าขณะใช้งานได้



ภาพที่ 3.32 วงจรไฟฟ้าแบบที่ 4

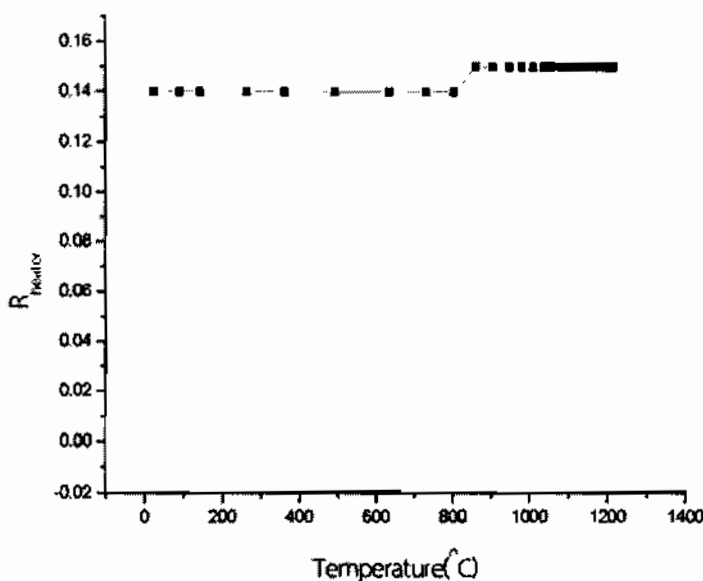
- ในขั้นตอนการทดลองเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนได้ใช้อุปกรณ์ที่จำเป็น ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1 ขั้วแกรไฟต์ในแบบที่ 1 มีลักษณะดังภาพที่ 3.33 ขั้วในแบบนี้จะไม่ค่อยแข็งแรง และขณะที่ขั้วแกรไฟต์ร้อน ขั้วจะขยายตัวและทำให้เกิดการสปาร์คบริเวณตัวยึดขั้วกับตัวขั้ว โดยทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลวนตามตามลูกศรสีแดง



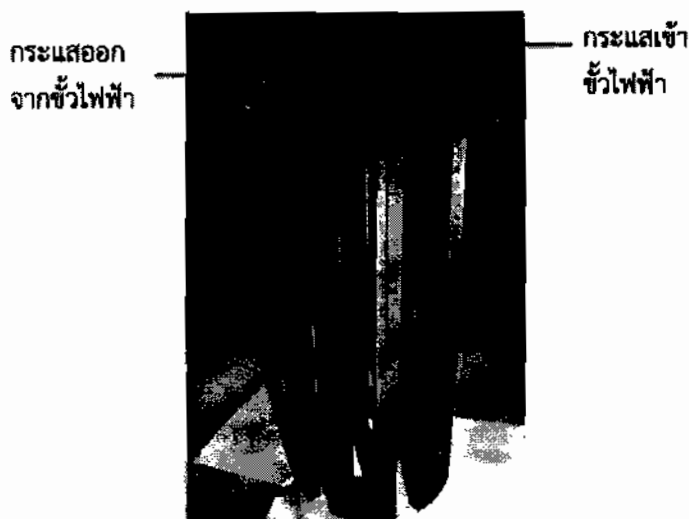
ภาพที่ 3.33 ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1 แล้วทำการวัดอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์กับสัดส่วนของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแกรไฟต์ จึงได้ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ตามภาพที่ 3.34 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น สาเหตุนี้อาจเกิดความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วพีดทูลและขั้วแกรไฟต์ เนื่องจากรอยต่อไม่แนบสนิทกันดีขณะที่ขั้วไฟฟ้าร้อนมาก และอาจเกิดการสปาร์คขึ้นที่บริเวณใกล้ๆ รอยต่อดังกล่าวด้วย ซึ่งต้องมีการแก้ไขต่อไป



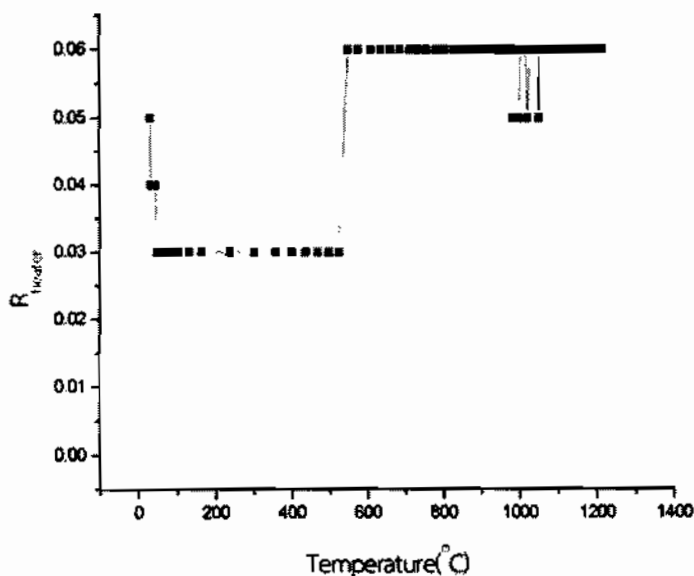
ภาพที่ 3.34 ความต้านทานของขั้วแกรไฟต์แบบที่ 1 ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์

- ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 2 ขั้วแกรไฟต์ในแบบที่ 2 มีลักษณะดังภาพที่ 3.35 ได้ถูกพัฒนามาจากแบบที่ 1 เพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และป้องกันไม่ให้เกิดการสปาร์คระหว่างขั้ว ขณะที่ขั้วร้อนและขยายตัว แต่ขั้วในลักษณะนี้ยังพบปัญหา คือ มีค่าความต้านทานต่ำกว่าแบบที่ 1 รวมทั้งค่อนข้างที่จะใช้กำลังไฟฟ้าสูงในการทำให้ขั้วร้อนและใช้เวลานาน โดยที่ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะไหลวนตามลูกศรสีแดง



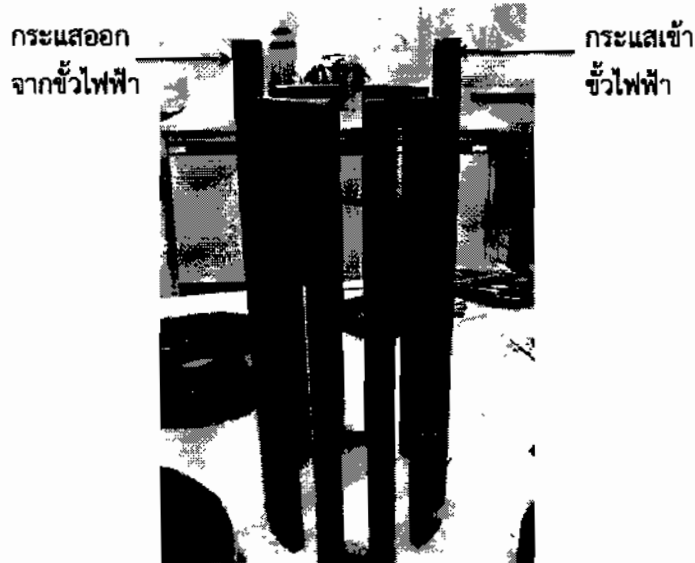
ภาพที่ 3.35 ขั้วกรไฟด์แบบที่ 2

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วกรไฟด์แบบที่ 2 แล้วทำการวัดอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์กับสัดส่วนของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วกรไฟด์ จึงได้ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ตามภาพที่ 3.36 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าความต้านทานที่ได้ยังไม่เสถียร สาเหตุนี้อาจเกิดอาจเกิดการสปาร์คขึ้นที่บริเวณใกล้ๆ ขั้วไฟฟ้าและที่รอยต่อ นอกจากนั้นยังพบว่าขั้วกรไฟด์แบบที่ 2 มีความต้านทานน้อยเกินไป จึงต้องใช้กระแสไฟฟ้ามากในการทำให้ร้อน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน จึงต้องมีการแก้ไขต่อไป



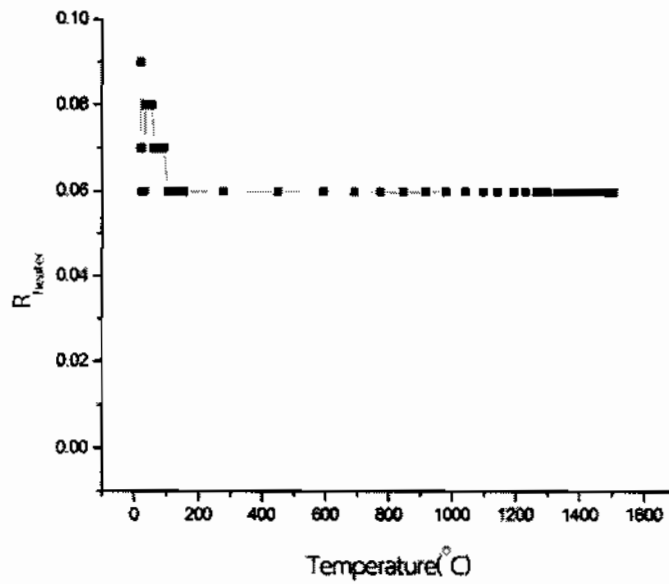
ภาพที่ 3.36 แสดงกราฟความต้านทานของขั้วกรไฟด์แบบที่ 2

3. ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3 ขั้วแกรไฟต์ในแบบที่ 3 มีลักษณะดังภาพที่ 3.36 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานของขั้วแกรไฟต์ให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเหลาและกลึงเนื้อแกรไฟต์ออกให้ขั้วมีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ความต้านทานของขั้วจึงมากขึ้น โดยสามารถทำให้อุณหภูมิของขั้วแกรไฟต์สูงขึ้นได้ในเวลาที่รวดเร็วขึ้น



ภาพที่ 3.37 ขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3 แล้วทำการวัดอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์กับสัดส่วนของความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแกรไฟต์ จึงได้ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ตามภาพที่ 3.38 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับขั้วแกรไฟต์แบบที่ 2 แต่มีความเสถียรมากกว่าที่อุณหภูมิสูงๆ คือมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.06 โอห์ม ที่อุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะของขั้ว heater ที่ดี

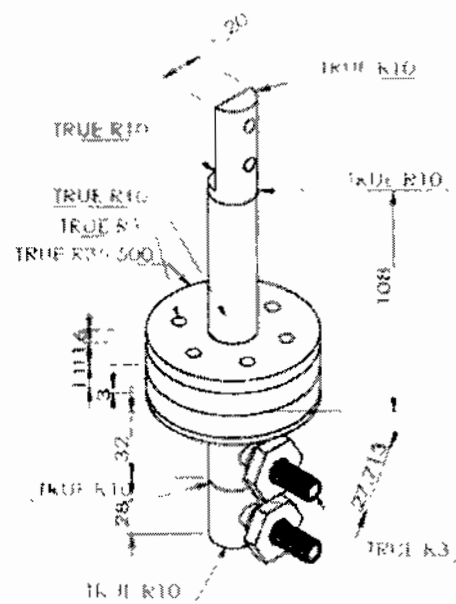


ภาพที่ 3.38 แสดงกราฟความต้านทานของขั้วแกรไฟต์แบบที่ 3

4. ขั้วไฟฟ้าพีดทรู (feed through) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วแกรไฟต์ ทำจากโมลิปดีนัมซึ่งมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้สูง และมีความแข็งแรง ทนต่อแรงบิดได้สูง ไม่เปราะและแตกง่าย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.39 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ขั้วไฟฟ้าพีดทรู

5. หม้อแปลงตัวที่ 1 ตามภาพที่ 3.40 เป็นหม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 1.8 kW (9V, 200A) หลังจากทดลองเคลือบ พบว่า หม้อแปลงร้อนและใช้เวลานานในการทำให้อุณหภูมิภายในแชมเบอร์สูงในระดับ 1,000 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.40 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 1.8 kW (9V, 200A)

6. หม้อแปลงตัวที่ 2 ตามภาพที่ 3.41 หลังจากพบปัญหาจากหม้อแปลงตัวที่ 1 จึงเปลี่ยนมาใช้หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 16 kW (40V, 400A) พบว่า สามารถทำให้อุณหภูมิในแชมเบอร์ร้อนเร็วขึ้น แต่หม้อแปลงก็มีความร้อนเกิดขึ้น และมีกลิ่นไหม้



ภาพที่ 3.41 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 16 kW (40V, 400A)

7. หม้อแปลงตัวที่ 3 ตามภาพที่ 3.42 หลังจากปัญหาหม้อแปลงตัวที่ 2 จึงเปลี่ยนมาใช้หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 15 kW (30V, 500A) ซึ่งสามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมงได้โดยที่หม้อแปลงยังทำงานเป็นปกติ



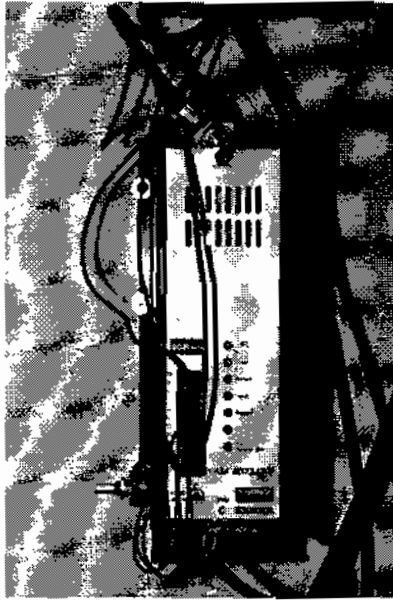
ภาพที่ 3.42 หม้อแปลงสเตปดาวน์ ขนาด 15 kW (30V, 500A)

8. อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า (variable voltage transformer) ตามภาพที่ 3.43 โดยสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 260 V ทนต่อกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 5 A แต่มีปัญหา คือ หม้อแปลงที่จ่ายกระแสให้ขั้วแกรไฟต์นั้นดึงกระแสไฟมากเกินไปที่อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าจะรับได้ซึ่งก็คือใช้กระแสขาเข้ามากกว่า 5 A ทำให้อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าร้อนและหม้อแปลงยังจ่ายกระแสออกได้ไม่สูงพอจึงทำให้ใช้เวลาทำให้ขั้วแกรไฟต์ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการได้นานเกินไป



ภาพที่ 3.43 อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า

9. อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า SCR ตามภาพที่ 3.44 ขนาด 0 ถึง 220 VAC, 50/60 Hz, 230A หลังจากเปลี่ยนมาใช้เครื่อง SCR พบว่า สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วแกรไฟต์ได้ดี และเป็นเวลาได้นาน



ภาพที่ 3.44 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า SCR

10. สายไฟ ตามภาพที่ 3.45 ใช้สายไฟฟ้าทองแดงหุ้มด้วยโพลีเมอร์ทนความร้อน ที่มีขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางของทองแดง 70 mm^2 ซึ่งจะทนกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 100 A ต่อเส้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้จำนวนสายไฟขาเข้าและขาออกข้างละ 6 เส้น จึงสามารถรองรับกระแสได้สูงสุด 600 A



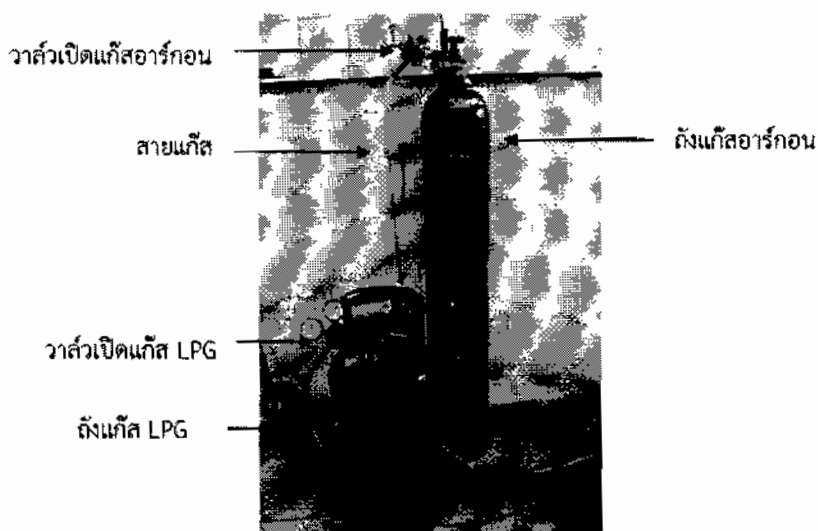
ภาพที่ 3.45 สายไฟฟ้าขนาด 70 mm^2

11. สวิตช์ไฟฟ้า (Breaker) ตามภาพที่ 3.46 มีขนาด 100 A ทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเตาเผา



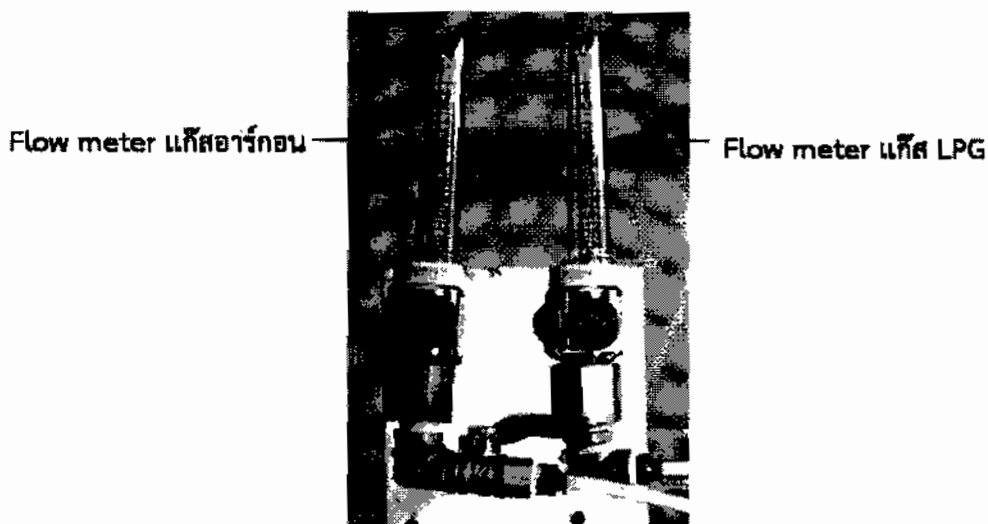
ภาพที่ 3.46 สวิตซ์ไฟฟ้า

12. แก๊สไฮโดรคาร์บอนและแก๊สเฉื่อย ตามภาพที่ 3.47 โดยแก๊สไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งกำเนิดอะตอมของคาร์บอน โดยโครงการนี้จะใช้แก๊ส LPG ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ขณะที่แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สที่ใช้เพื่อเพิ่มอัตราการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนให้มีมากขึ้น เพื่อช่วยให้อัตราการตกสะสมของไพโรคาร์บอนเพิ่มขึ้น และช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ไม่ต้องการในระบบ



ภาพที่ 3.47 ถังแก๊สLPG และแก๊สอาร์กอน

13. ชุดวัดอัตราการไหล (flow meter) รุ่น PRECISION MEDTICAL ตามภาพที่ 3.48 มีอัตราการไหลสูงสุด 5 ลิตรต่อนาที เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนของแก๊สระหว่างแก๊ส LPG กับแก๊สอาร์กอน



ภาพที่ 3.48 ชุดวัดอัตราการไหล

14. มัลติมิเตอร์ รุ่น HP 937A ในโครงการนี้ได้ใช้มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ HEWLETT PACKARD รุ่น HP 973A 2 ตัว เพื่อวัดทั้งแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_{in}) และแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out}) ดังภาพที่ 3.49



ภาพที่ 3.49 มัลติมิเตอร์

15. แคลมป์มิเตอร์ ในโครงการนี้ใช้ AC clamp meter จำนวน 2 ตัว รุ่น AUTO CLAMP MULTIMETER UMI-T UT-200D เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าสลับขาเข้า และรุ่น DIGITAL CLAMP METER YUGO YG-2017 เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าสลับขาออก ดังภาพที่ 3.50 สาเหตุที่ใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับแบบแคลมป์ เพราะกระแสไฟฟ้าในวงจรมีค่าสูงมากเกินกว่าที่จะใช้แอมมิเตอร์ต่ออนุกรมแทรกในวงจร



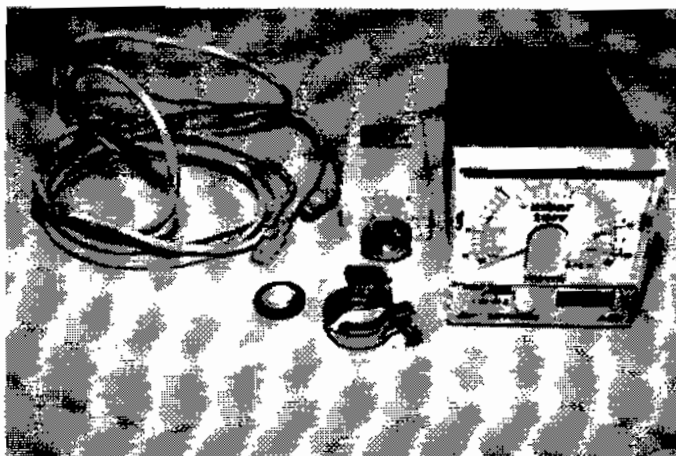
ภาพที่ 3.50 แคลมป์มิเตอร์

16. เทอร์โมคัปเปิลแบบ S พร้อมชุดแสดงผลแบบดิจิทัล เป็นชนิดที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ ในช่วง -50 ถึง $1,768$ องศาเซลเซียส ถูกออกแบบให้ทำงานภายใต้ระบบสุญญากาศ แกนถูกหุ้มด้วยเซรามิก สามารถทนความร้อนได้สูง ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิของแก๊สภายในระบบ ดังภาพที่ 3.51



ภาพที่ 3.51 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S

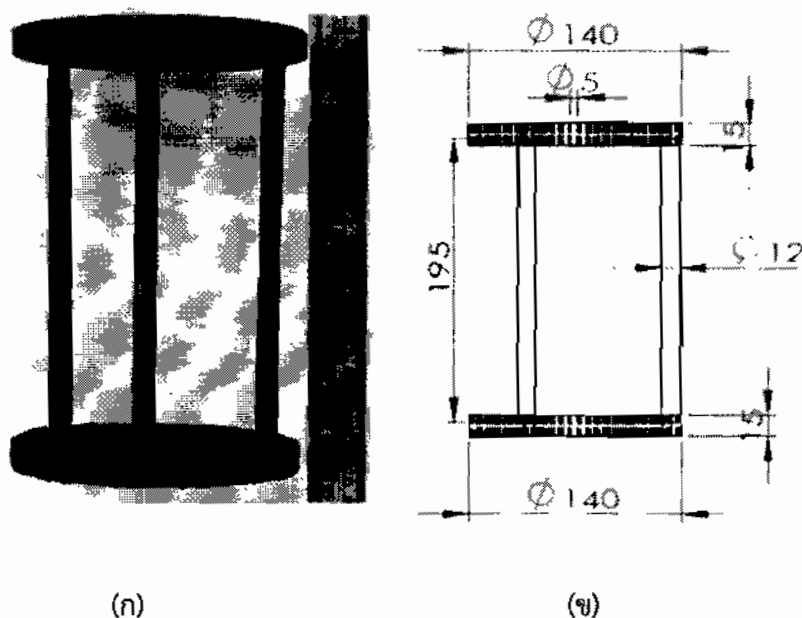
17. ชุดวัดความดันพิรานีเกจ (pirani gauge) รุ่น APG-M เป็นมาตรวัดความดัน สามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^2 ถึง 10^{-3} mbar ใช้วัดความดันแก๊สภายในแชมเบอร์สุญญากาศ ดังภาพที่ 3.52



ภาพที่ 3.52 ชุดวัดความดันพรีนาเบจ

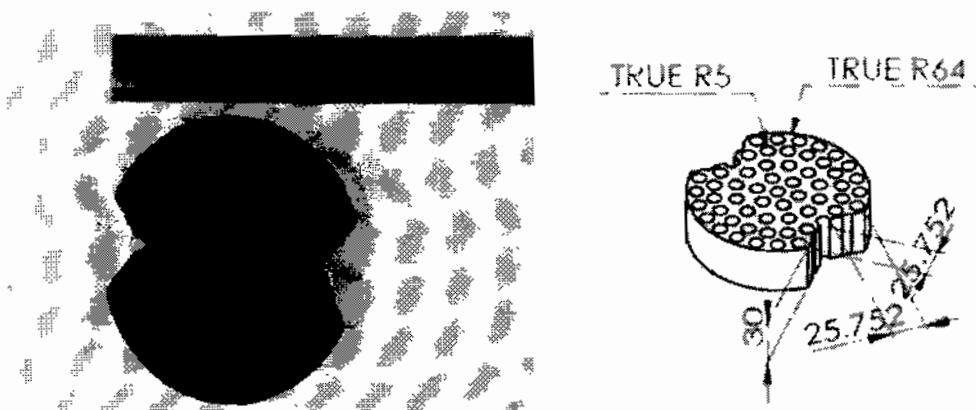
3.5 การติดตั้งฐานรองชิ้นงานและชิ้นงานแกรไฟต์

1. ฐานวางชิ้นงาน เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในขั้วแกรไฟต์ ใช้สำหรับวางชิ้นงานแกรไฟต์สำหรับที่จะเคลือบไพโรคาร์บอน โดยถูกแบบให้วางอยู่ตรงกลางของขั้วแกรไฟต์ ดังภาพที่ 3.53



ภาพที่ 3.53 (ก) ภาพถ่ายและ (ข) ภาพ drawing ฐานรองชิ้นงาน

2. ตัวรองฐานวางชิ้นงาน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองฐานวางชิ้นงานเพื่อให้ตัวชิ้นงานอยู่ในช่วงกลางขั้วแกรไฟต์ ดังภาพที่ 3.54



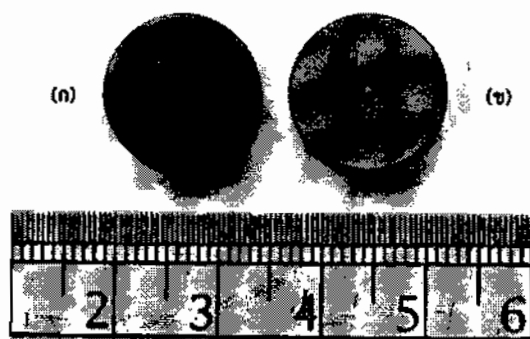
ภาพที่ 3.54 ตัวรองฐานวางชิ้นงาน

3. ชิ้นงานแกรไฟต์ เป็นชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเคลือบไฟโรคาร์บอน ซึ่งจะมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ดังภาพที่ 3.55 ถึง 3.60 จะเห็นว่าชิ้นงานแกรไฟต์ก่อนเคลือบจะมีสีเทาดำ แต่ภายหลังการเคลือบจะมีสีเทาเข้ม และบางบริเวณมีสีขาวขุ่นเป็นจุดๆ โดยรายละเอียดของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบจะกล่าวถึงในบทต่อไป
- ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



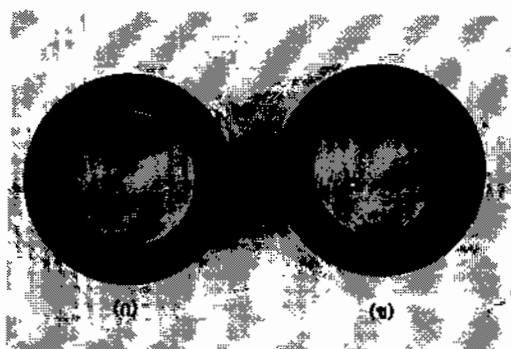
ภาพที่ 3.55 (ก) ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ

- ชิ้นงานรูปวงกลม



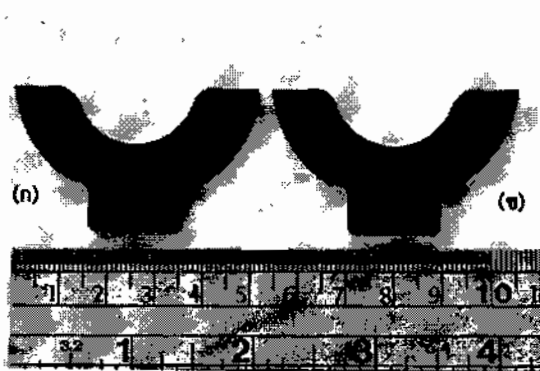
ภาพที่ 3.56 (ก) ชิ้นงานรูปวงกลมก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ

- ชิ้นงานรูปทรงกระบอกสั้น



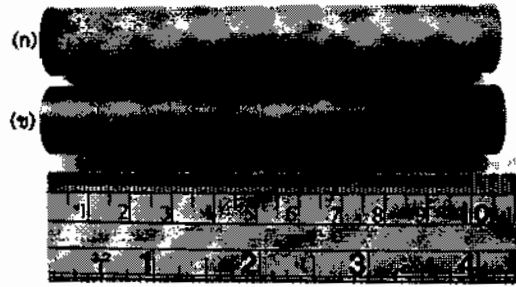
ภาพที่ 3.57 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกสั้นก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ

- ชิ้นงานแม่แบบคอคขวด



ภาพที่ 3.58 (ก) ชิ้นงานแม่แบบคอคขวดก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ

- ชิ้นงานรูปทรงกระบอกเล็ก



ภาพที่ 3.59 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกเล็กหลังเคลือบ (ข) ก่อนเคลือบ

- ชิ้นงานรูปทรงกระบอกใหญ่



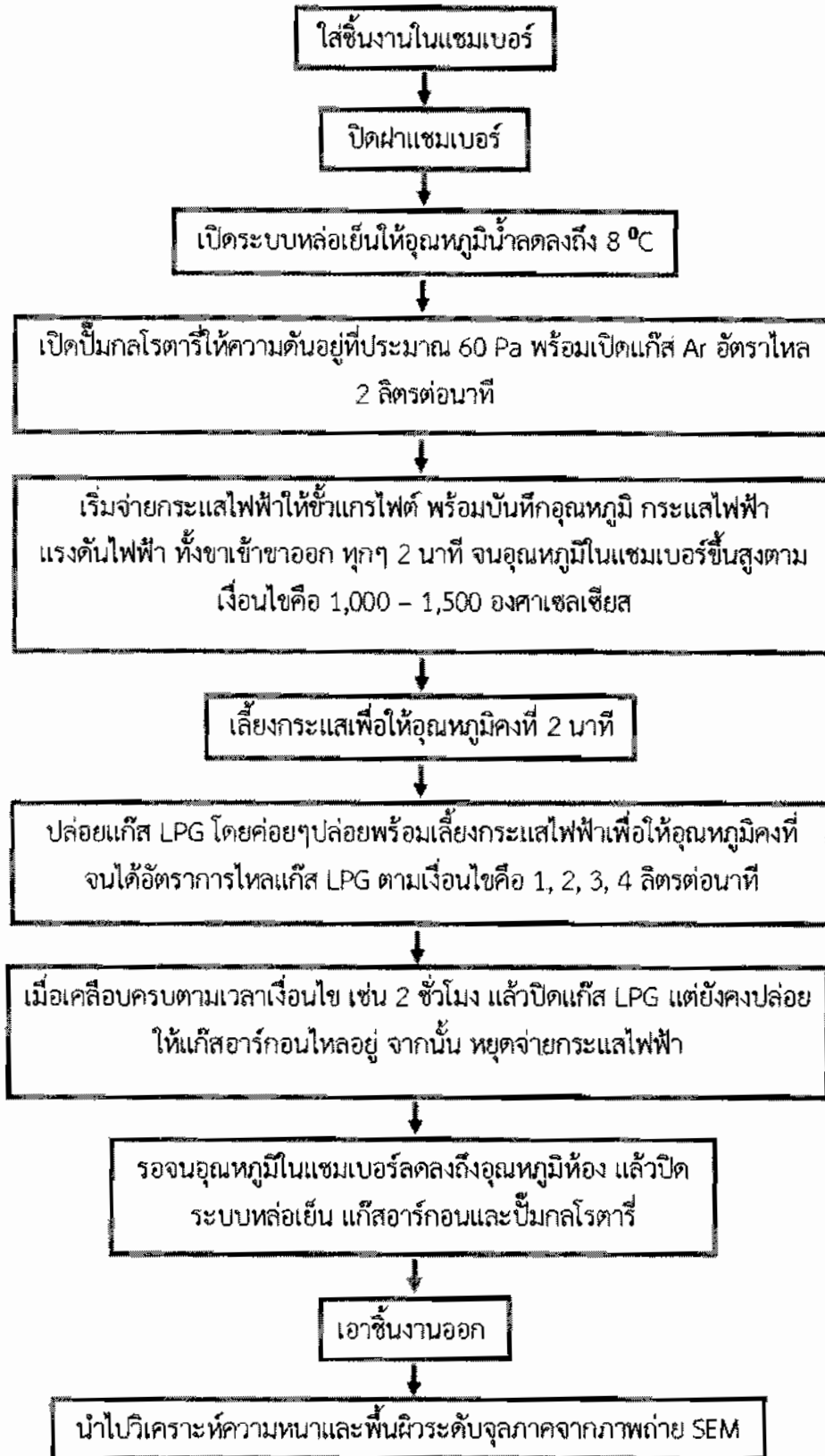
ภาพที่ 3.60 (ก) ชิ้นงานรูปทรงกระบอกใหญ่ก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากที่ได้ติดตั้งระบบสุญญากาศและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนแล้ว จึงทำการทดลองเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนเพื่อหาเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่เหมาะสม โดยในการทำการทดลอง มีขั้นตอนการทำงาน ตามหัวข้อที่ 1 ถึง 10 และสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมได้ตามภาพที่ 3.61 ดังนี้

1. นำแกรไฟต์ที่เป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทำการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนวางบนฐานวางชิ้นงาน แล้วนำไปวางในภาชนะสุญญากาศ
2. ปิดฝาภาชนะสุญญากาศ และปิดตัวปล่อยอากาศ
3. เปิดระบบหล่อเย็น ให้มีอุณหภูมิประมาณ 8 องศาเซลเซียส

4. ทำการปั๊มอากาศออกโดยให้ความดันภายในแชมเบอร์ลดลงอยู่ในช่วง 60 Pa พร้อมเปิดแก๊ส Ar อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที
5. เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขั้วแกรไฟต์ โดยค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 2 A จนกระแสไฟฟ้าเข้าถึง 47 A โดยประมาณ พร้อมบันทึกอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ทั้งขาเข้าขาออก ทุกๆ 2 นาที จนอุณหภูมิในแชมเบอร์ขึ้นสูงตามเงื่อนไขคือ 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงถึงตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว ให้เลี้ยวกระแสไฟฟ้าเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ 2 นาที
6. ทำการจ่ายแก๊ส โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ๆ 2 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที
7. ทำการเคลื่อนโดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเคลื่อน 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง
8. เมื่อเคลื่อนเสร็จตามเวลาแล้ว ปิดวาล์วแก๊ส LPG และปิดระบบไฟ แต่ยังคงปล่อยให้แก๊สอาร์กอนไหลอยู่
9. รอให้ระบบเย็นลง โดยให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องหรือประมาณ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส แล้วจึงปิดแก๊สอาร์กอนและระบบหล่อเย็น หลังจากนั้นจึงค่อยเปิดระบบเพื่อนำชิ้นงานออก
10. นำไปวิเคราะห์ความหนาและพื้นผิวระดับจุลภาคจากภาพถ่าย SEM



ภาพที่ 3.61 ขั้นตอนการเดินเครื่องเตาเผา เพื่อทำการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

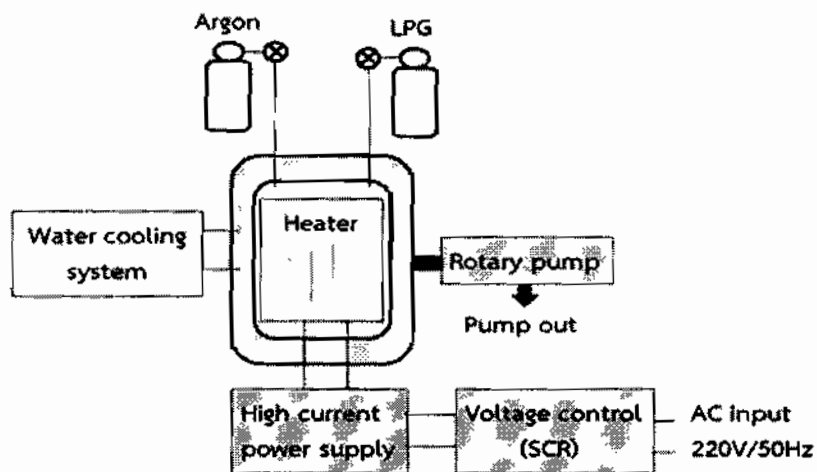
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

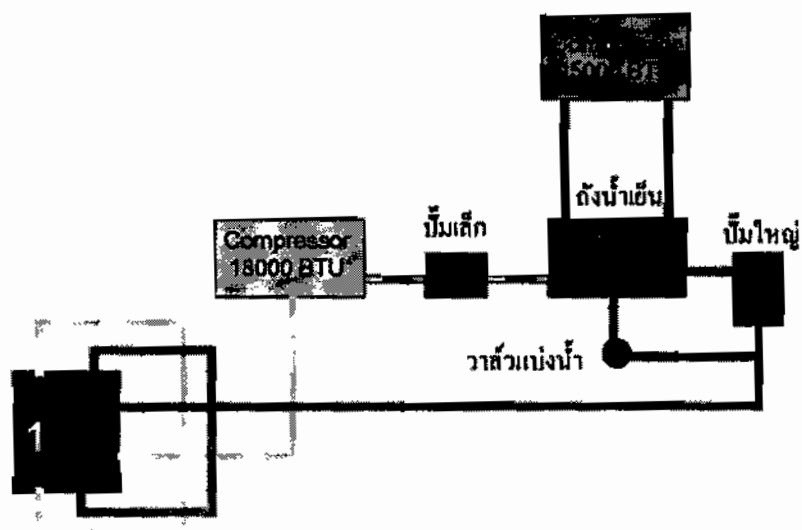
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนและหาเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี ซึ่งจะทำการเคลือบที่เวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง อุณหภูมิอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส โดยที่กำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ที่ 2 ลิตรต่อนาที และเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มไพโรคาร์บอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยที่ทำการศึกษาหาเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

4.1 ผลการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

ระบบต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนแสดงได้ตามภาพที่ 4.1 ในรูปของไดอะแกรม ภาพที่ 4.2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบน้ำหล่อเย็น ภาพที่ 4.3 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วกรรไกรไฟต์ และภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายจริงแสดงระบบที่ได้ถูกติดตั้งขึ้นเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ซึ่งได้ใช้แก๊สผสมระหว่าง Ar กับ LPG ไหลผ่านแฉมเบอร์สูญญากาศ ที่มีขั้วไฟฟ้าร้อน (heater) อยู่ภายใน แก๊สผสมนี้จะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (radicals) ภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ หรือสภาวะสูญญากาศและอุณหภูมิของแก๊สสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้ปั๊มเชิงกลเป็นตัวดูดอากาศออก โดยผนังแฉมเบอร์ต้องถูกหล่อเย็นด้วยน้ำจากระบบน้ำหล่อเย็น ตามภาพที่ 4.2 เพื่อป้องกันความเสียหายจากความร้อนที่แผ่ออกมาจาก heater สู่อุปกรณ์สูญญากาศและอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ สำหรับระบบการทำความร้อน ต้องให้กระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านขั้วไฟฟ้าซึ่งทำจากแกรไฟต์ จึงต้องมีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า ก่อนเข้าแหล่งจ่ายไฟกระแสสูง (high current power supply) ตามภาพที่ 4.3 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

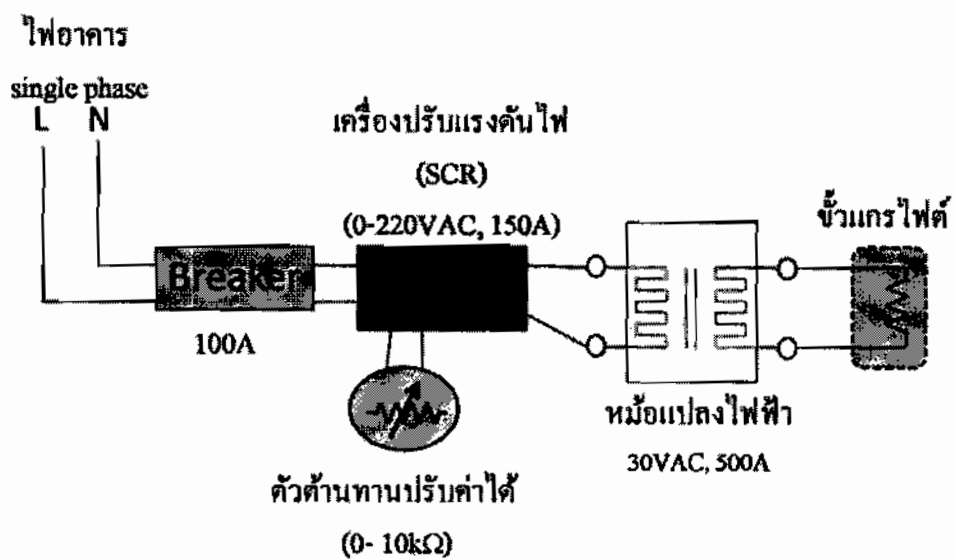


ภาพที่ 4.1 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

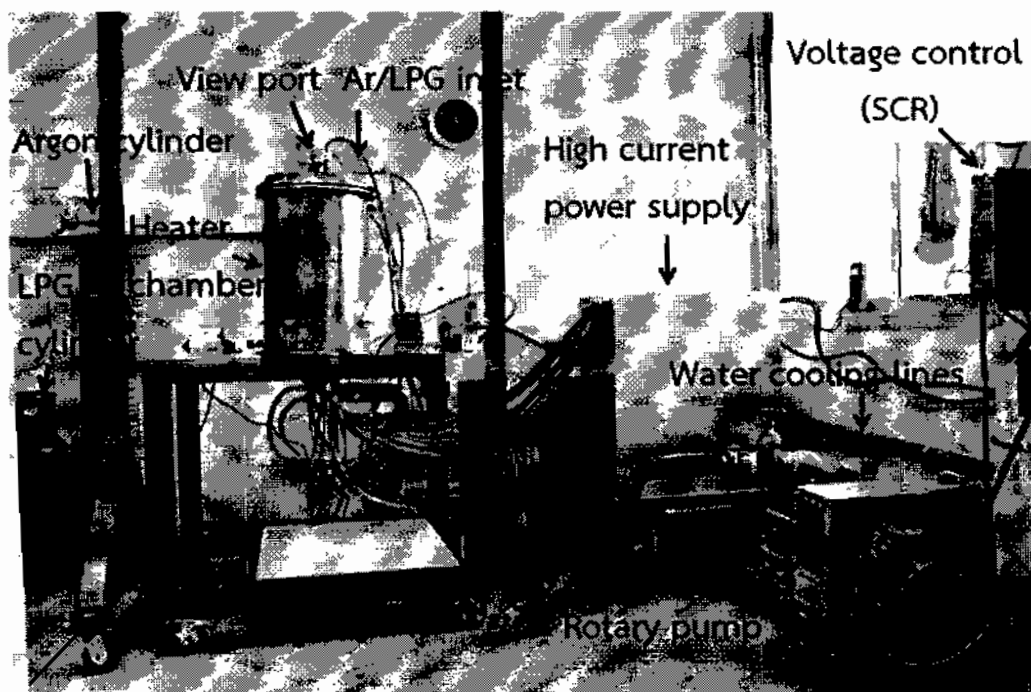


แฉมเบอร์สำหรับเคลือบไพโรคาร์บอน

ภาพที่ 4.2 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบน้ำหล่อเย็น

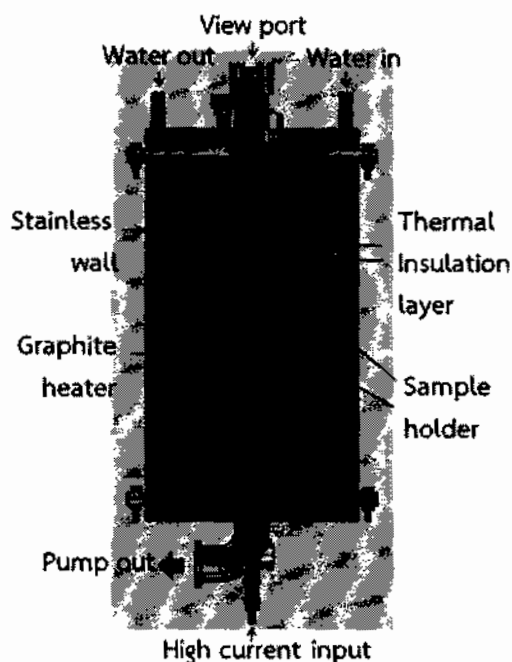


ภาพที่ 4.3 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแกรไฟต์



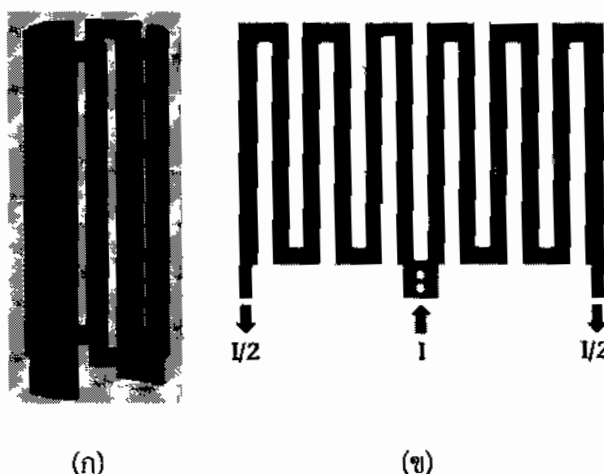
ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

โดยโครงสร้างภายในและลักษณะภายนอกของ 챔เบอร์สุญญากาศและขั้วไฟฟ้า แสดงได้ตามภาพที่ 4.5 ถึง 4.7 ตามลำดับ ดังนี้

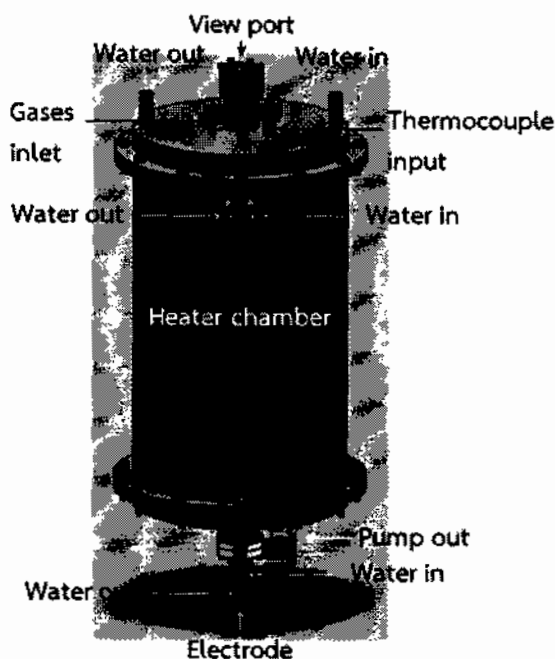


ภาพที่ 4.5 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของแชมเบอร์ (สัดส่วนตามขนาดจริง)

โครงสร้างภายในแชมเบอร์สุญญากาศแสดงได้ตามภาพที่ 4.5 แชมเบอร์ทำจากสเตนเลสหนา 5 มิลลิเมตร ภายในประกอบไปด้วยชั้นฉนวนความร้อน (thermal insulator layers) สามชั้น คือ แร่ใยหิน แกรไฟต์เฟลด์ และแกรไฟต์พอยล์ ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุแกรไฟต์ ที่วางฐานรองชิ้นงาน และฐานรองชิ้นงาน (sample holder) โดยที่ฐานวางชิ้นงานประกอบด้วยฐานวางชิ้นงานแบบยาวจะใช้เคลือบชิ้นงานขนาดเล็ก และฐานรองชิ้นงานแบบสั้น จะใช้เคลือบชิ้นงานขนาดใหญ่ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่กลางขั้วแกรไฟต์ (graphite heater) ซึ่งขั้วแกรไฟต์ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับแก๊สภายในแชมเบอร์ ตามภาพที่ 4.6 (ก) ได้แสดงแบบจำลองการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าในสามมิติ และภาพที่ 4.6 (ข) ได้แสดงแบบจำลองการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าในสองมิติ



ภาพที่ 4.6 แบบจำลองการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า (ก) ในสามมิติ (ข) ในสองมิติ



ภาพที่ 4.7 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายนอกของแชมเบอร์ (สัดส่วนตามขนาดจริง)

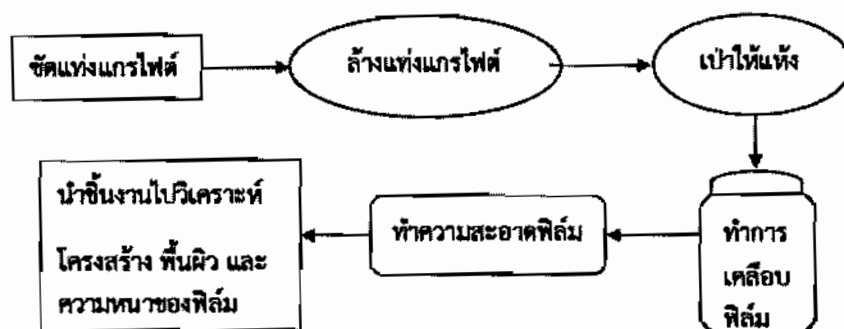
โครงสร้างภายนอกแชมเบอร์สูญญากาศแสดงได้ตามภาพที่ 4.7 ประกอบไปด้วยสามส่วน คือ ฝาแชมเบอร์ด้านบน แชมเบอร์ ฝาแชมเบอร์ด้านล่าง โดยฝาแชมเบอร์ด้านบนมีช่องสำหรับมองผ่าน (view port) ลงไปภายในแชมเบอร์ ช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple input) ช่องสำหรับปล่อยแก๊สเข้า (gases inlet) แชมเบอร์ ช่องปล่อยอากาศออก (leak valve) ทุกๆ ส่วนของแชมเบอร์ได้ถูกออกแบบให้มีช่องสำหรับน้ำเย็นเข้าและน้ำเย็นออก (water cooling input and output) เพื่อการระบายความร้อนที่สะสมอยู่ที่ผนังแชมเบอร์ สำหรับฝาแชมเบอร์ด้านล่างจะมีช่องต่อเข้ากับปั๊มโรตารีเพื่อดูดอากาศออก (pump out) จากแชมเบอร์

มีปัจจัยหลายปัจจัยในขั้นตอนของการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มไพโรคาร์บอน แต่ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งสนใจไปที่ปัจจัยพื้นฐานของการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการตกสะสมด้วยไอเคมี ซึ่งได้กำหนดตัวแปรควบคุม ตัวแปรต้น และตัวแปรตามที่น่าสนใจ ดังนี้

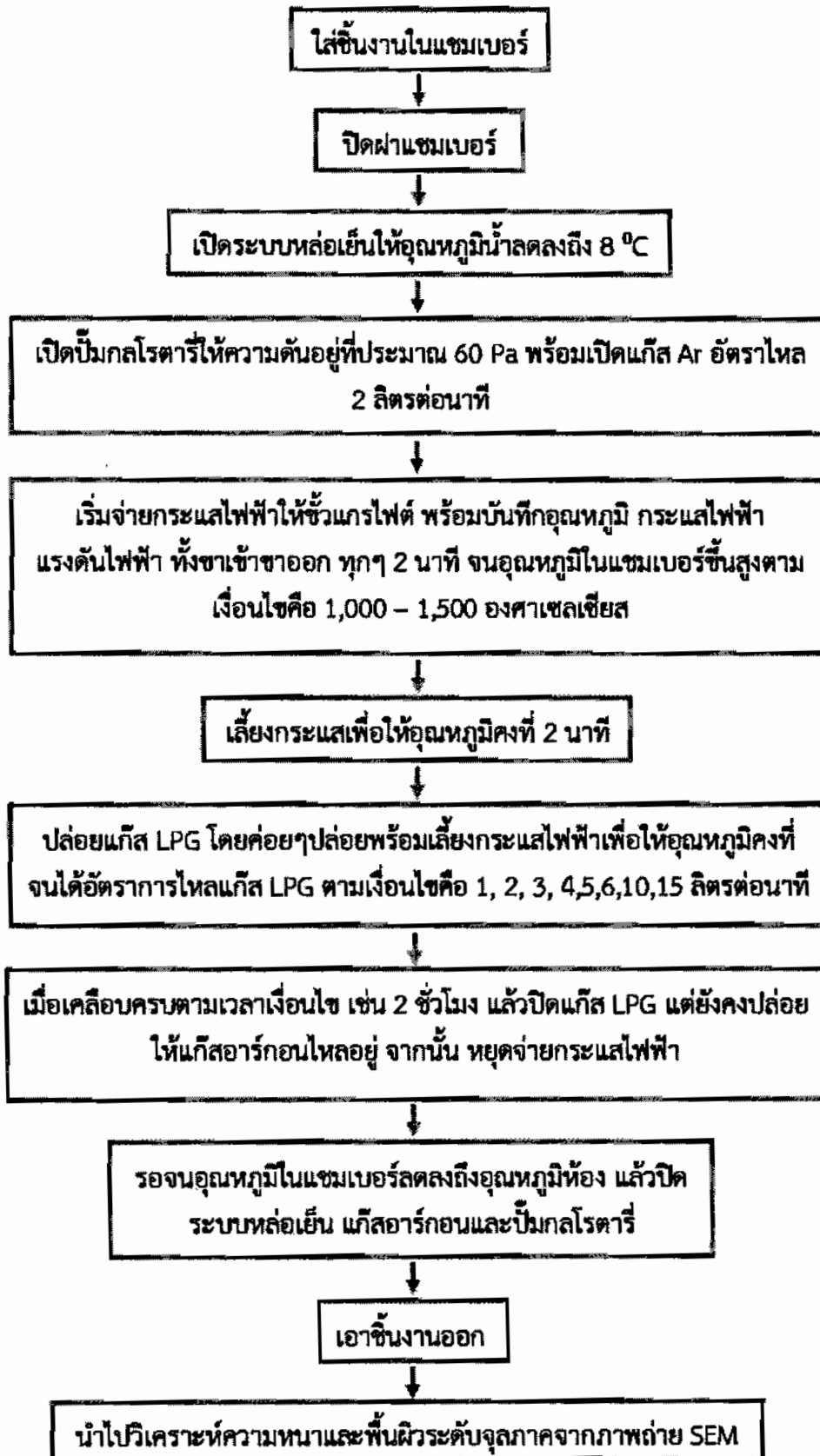
- ตัวแปรควบคุม คือ ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ตลอดการทดลอง ในงานวิจัยนี้ คืออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ถูกกำหนดให้คงที่ เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที (lpm) ขณะเริ่มทำการทดลอง อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต้องลดลงอยู่ที่ 8 องศาเซลเซียส และความดันฐานจะต้องลดลงต่ำกว่า 133 ปาสคาล
- ตัวแปรต้น คือ ตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย อุณหภูมิและเวลาการเคลือบฟิล์ม รวมถึงสัดส่วนอัตราการไหลของแก๊ส LPG ต่อแก๊สอาร์กอน

- ตัวแปรตาม คือ ตัวแปรที่สนใจศึกษา ในที่นี้คือลักษณะเชิงผิวและความหนาของฟิล์มไพโรคาร์บอน ภายหลังจากการเคลือบฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ ตามตัวแปรต้น

ก่อนทำการเคลือบฟิล์มจะต้องเตรียมชิ้นงานโดยการขัดแท่งแกรไฟต์ แล้วล้างทำความสะอาด เป่าให้แห้ง หลังจากนั้นจึงทำการใส่ชิ้นงานเข้าไปในระบบ โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม แสดงได้ตามภาพที่ 4.8 และขั้นตอนการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนแสดงได้ภาพที่ 4.9 ดังนี้



ภาพที่ 4.8 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

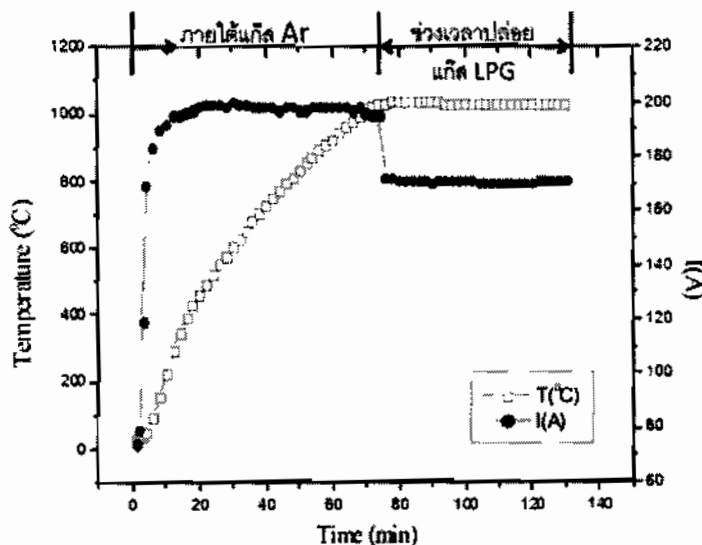


ภาพที่ 4.9 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน

4.2 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG ต่อการเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอน

4.2.1 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:1

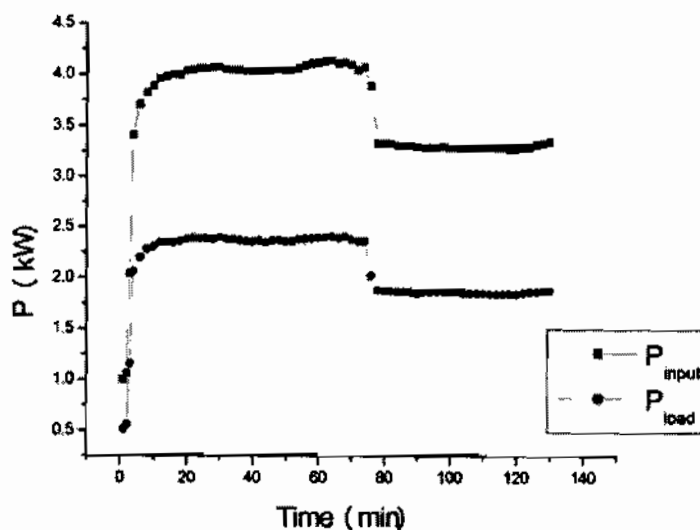
เมื่อทำการดูดอากาศออกจากระบบจนความดันอากาศภายในลดลงและคงที่อยู่ที่ 60 ปาสคาล จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบ และหลังจากนั้นประมาณ 5 นาที จึงเริ่มทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ตามภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าในช่วง 20 นาทีแรก กระแสไฟฟ้าค่อยๆ ถูกจ่ายเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าจาก 0 ถึง 210 A ซึ่งจะทำให้ขั้วไฟฟ้าค่อยๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยใช้เวลาประมาณ 80 นาที อุณหภูมิของแก๊สจะเพิ่มจาก 25 ถึง 1039 องศาเซลเซียส จากนั้นใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าที่ประมาณ 170 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,039 \pm 5$ องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิของแก๊สคงที่และสูงถึงจุดที่ต้องการแล้วจึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าไประบบตามค่าอัตราการไหลที่กำหนด (ความดันขณะเคลือบอยู่ที่ 200 ปาสคาล) โดยใช้เวลาการเคลือบฟิล์มทั้งหมด 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 140 จึงทำการหยุดการปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้



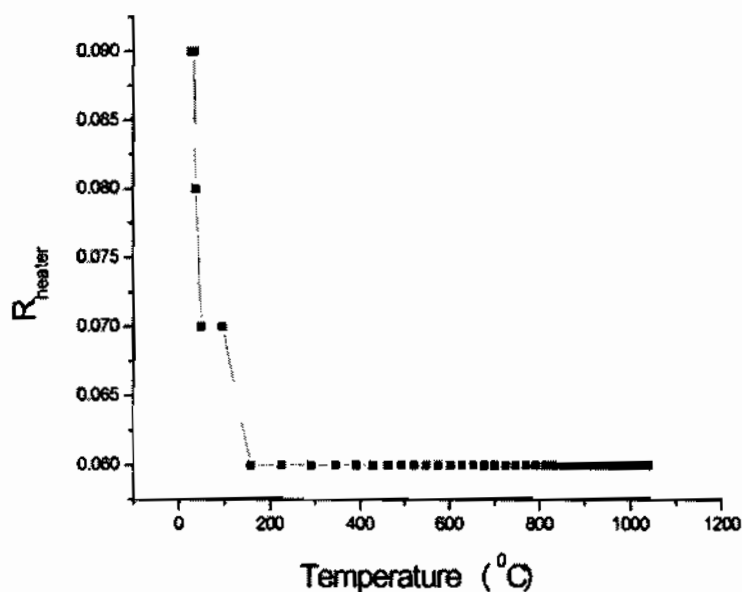
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

เมื่อขณะที่ทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าขาเข้า (P_{input}) และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (P_{load}) มีความสัมพันธ์ตามเวลา ดังภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 10 ถึง 75 นาที ที่ใช้กระแสเลี้ยงขั้วอย่างสม่ำเสมอ กำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าประมาณ 4 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ (P_{load}) มีค่าประมาณ 2.4 kW หลังจากนั้นจึงทำการปล่อยแก๊ส พบว่าใช้กระแสในการเลี้ยงขั้วไฟฟ้า

น้อยลง กำลังไฟฟ้าขาเข้าลดลงเหลือประมาณ 3.4 kW และกำลังไฟฟ้าขาออกลดลงเหลือประมาณ 1.8 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในแชมเบอร์ให้คงที่



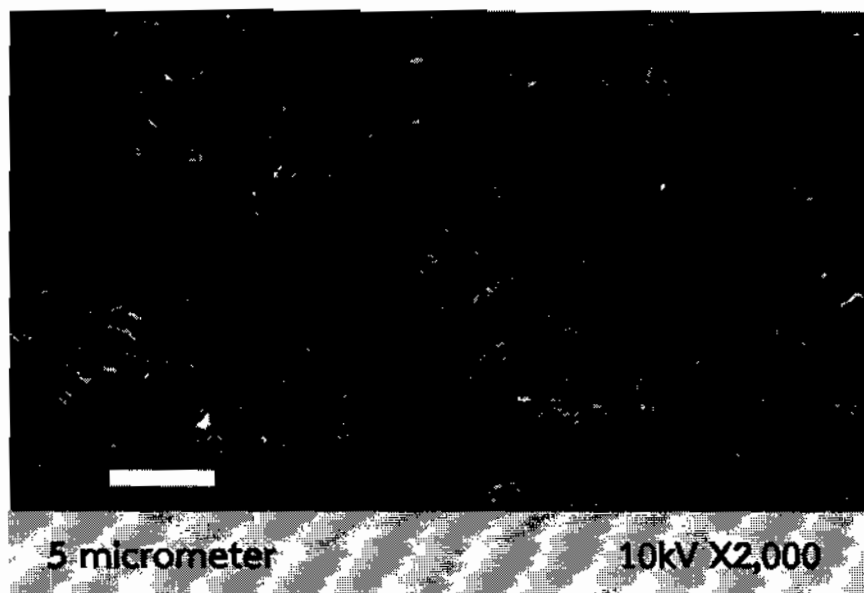
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

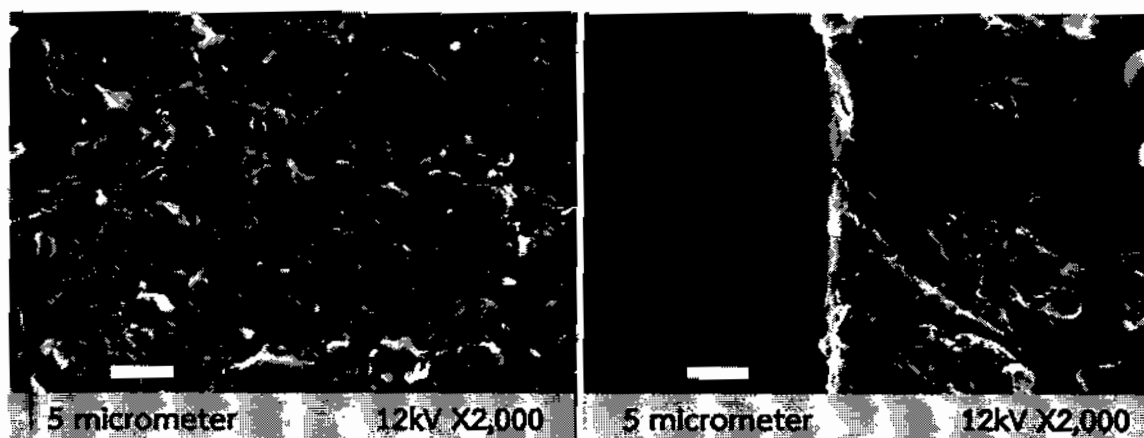
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที แสดงได้ตามภาพที่ 4.12 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น 28 องศาเซลเซียส ขั้วไฟฟ้า มีความต้านทานประมาณ 0.09 โอห์ม หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าลดลงและมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ทั้งที่ยังไม่ได้เคลือบฟิล์มและที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่เงื่อนไขต่างๆ ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO 1450 VP โดยการเร่งอิเล็กตรอนด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า (EHT) 10 kV เข้าตกกระทบผิวแกรไฟต์และกำหนดให้ผิวชิ้นงานห่างจากปลายล่างของปืนอิเล็กตรอน (working distance, WD) เท่ากับ 15 mm แล้ววัดปริมาณการปลดปล่อยอิเล็กตรอนอันดับสองของพื้นผิว พบว่าที่กำลังขยาย 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการตัดและขัดด้วยกระดาษทรายอย่างละเอียดแต่ยังไม่ผ่านการเคลือบ มีลักษณะขรุขระเป็นเยื้องบางๆ และมีรูพรุน ดังแสดงตามภาพที่ 4.13 ซึ่งเป็นธรรมชาติของพื้นผิวแกรไฟต์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปโดยทั่วไป



ภาพที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวในระดับจุลภาคของแผ่นฐานแกรไฟต์ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ของเม็ดแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิของแก๊สในช่วง 1,000 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ตามภาพที่ 4.14 (ก) พบว่าพื้นผิวของเม็ดแกรไฟต์ยังมีฟิล์มเกาะอยู่เล็กน้อยไม่สม่ำเสมอ โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า แต่พื้นผิวโดยรวมยังขรุขระอยู่ และตามภาพที่ 4.14 (ข) คือภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



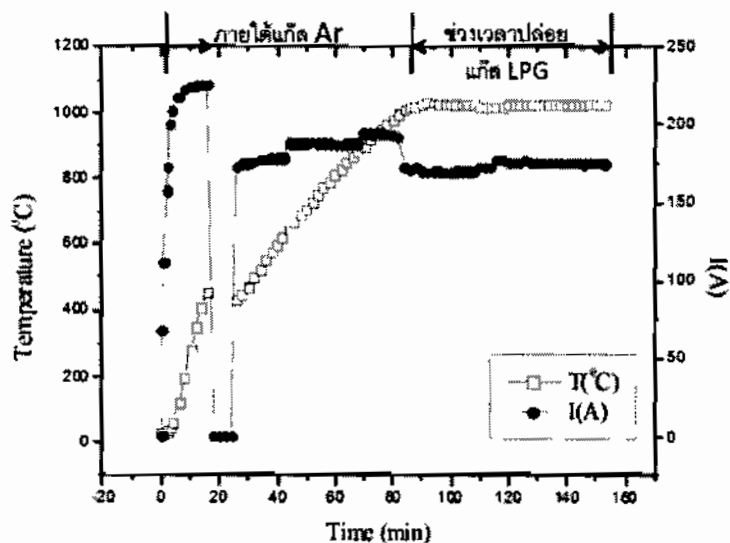
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิ แก๊ส 1,039 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่ กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

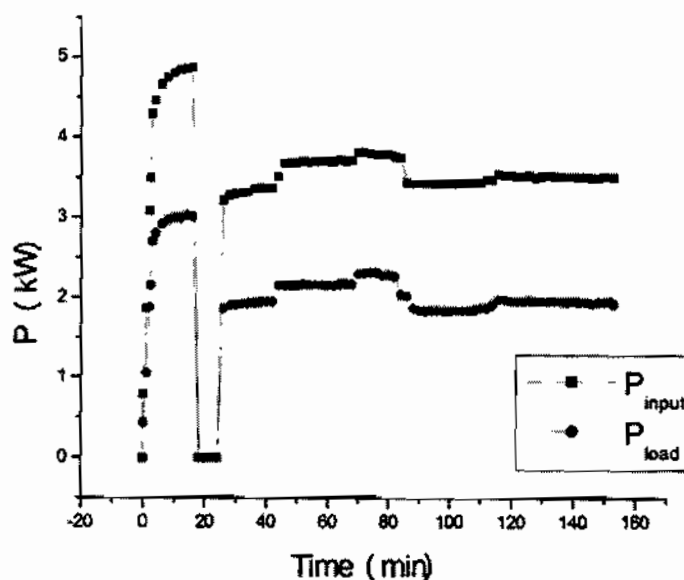
4.2.2 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:2

ในการทดลองเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนตามภาพที่ 4.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่าย กระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในการทดลองครั้งนี้เกิดปัญหาขึ้น คือ ไฟดับ ทำให้ต้องจ่ายกระแสให้ขั้วไฟฟ้ามี่ร้อน ขึ้นอีกครั้ง จะเห็นว่ากราฟ มีช่วงที่ขาดไปคือ ช่วงเวลาที่ 18 ถึง 24 นาที และใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 210 A โดยใช้เวลาประมาณ 90 นาทีเพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1029 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อย แก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นใช้กระแส เลี้ยงขั้วประมาณ 175 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,029 \pm 5$ องศาเซลเซียส และทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 158 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอ ประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและ นำชิ้นงานออกมาได้

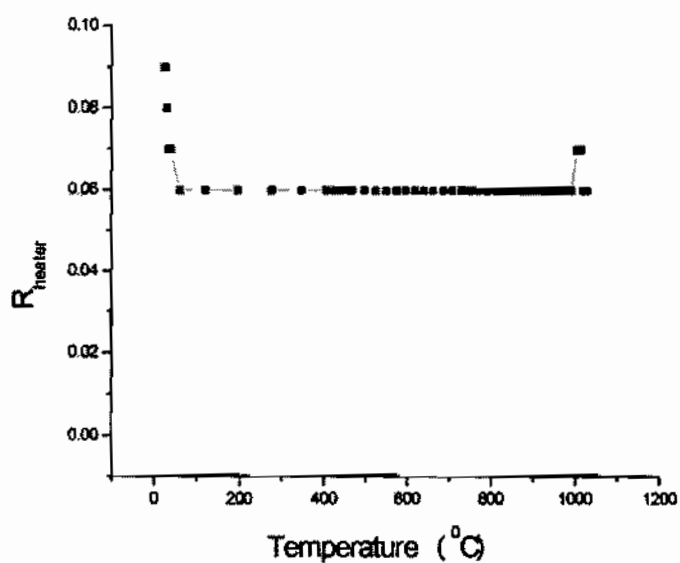


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่าการทดลองเคลือบฟิล์มครั้งนี้เกิดไฟดับระหว่างการเคลือบฟิล์มในช่วงนาที่ที่ 18 ถึง 24 กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 5 kW จึงทำการจ่ายกระแสเข้าไปเลี้ยงขั้วใหม่ในนาที่ที่ 26 พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 3.6 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2.3 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สที่นาที่ที่ 85 กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงเหลือประมาณ 3.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงมีค่าประมาณ 1.93 kW



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

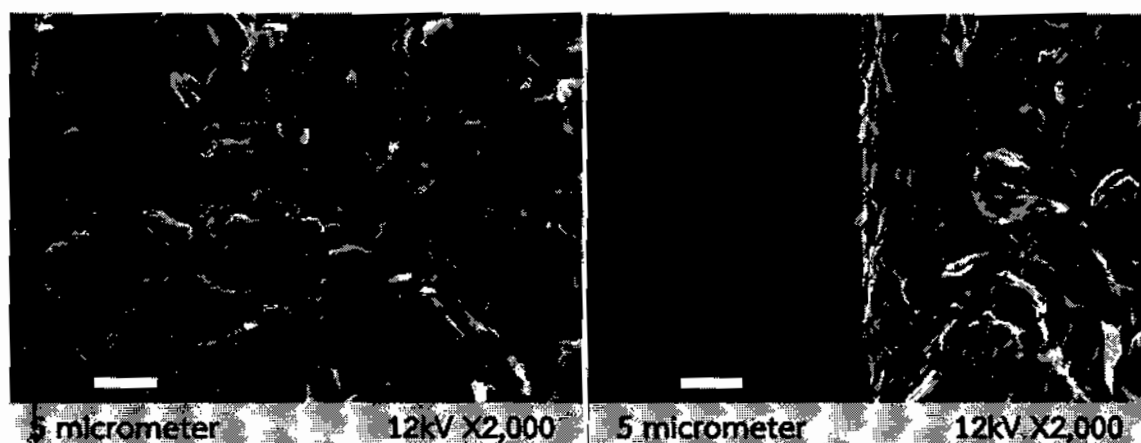


ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น 26 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.09 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 1,029 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,029 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที พบว่าพื้นผิวของเม็ดแกรไฟต์ยังมีฟิล์มเกาะอยู่เล็กน้อยไม่สม่ำเสมอ ตามภาพที่ 4.18 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะกระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า พื้นผิวโดยรวมยังขรุขระอยู่ และตามภาพที่ 4.18 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



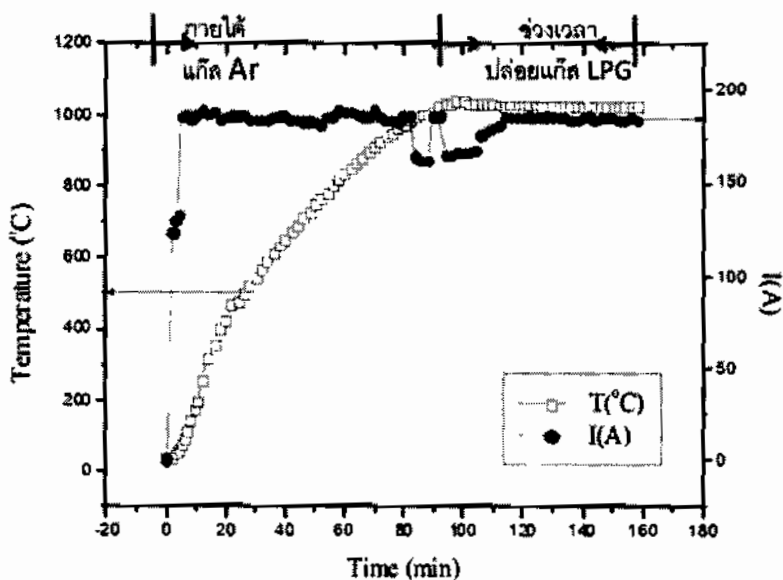
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.18 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,029 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 2 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

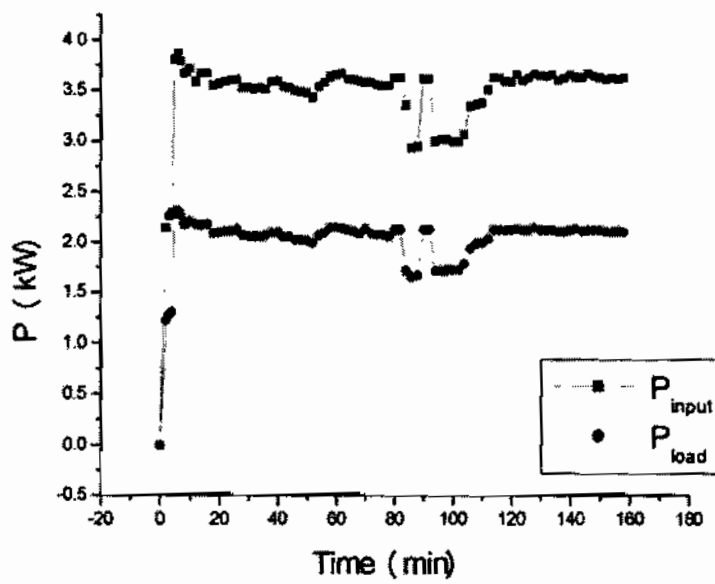
4.2.3 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:3

จากกราฟภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 170 A โดยใช้เวลาประมาณ 80 นาที เพื่อให้ภายในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,036 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรองจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 170 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,036 \pm 5$ องศาเซลเซียส ทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 160 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

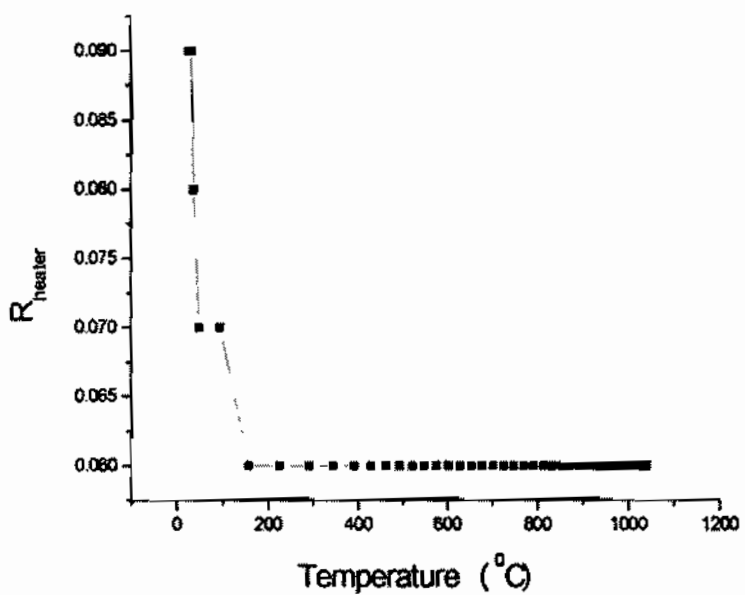


ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแคมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 3.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 2 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาที่ที่ 82 พบว่า กระแสไฟฟ้าไม่นิ่งในช่วงการปล่อยแก๊สเข้าระบบ กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 3.5 kW เหลือประมาณ 3 kW เมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 3.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 2 kW เหลือประมาณ 1.6 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในแคมเบอร์เมื่อเราปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

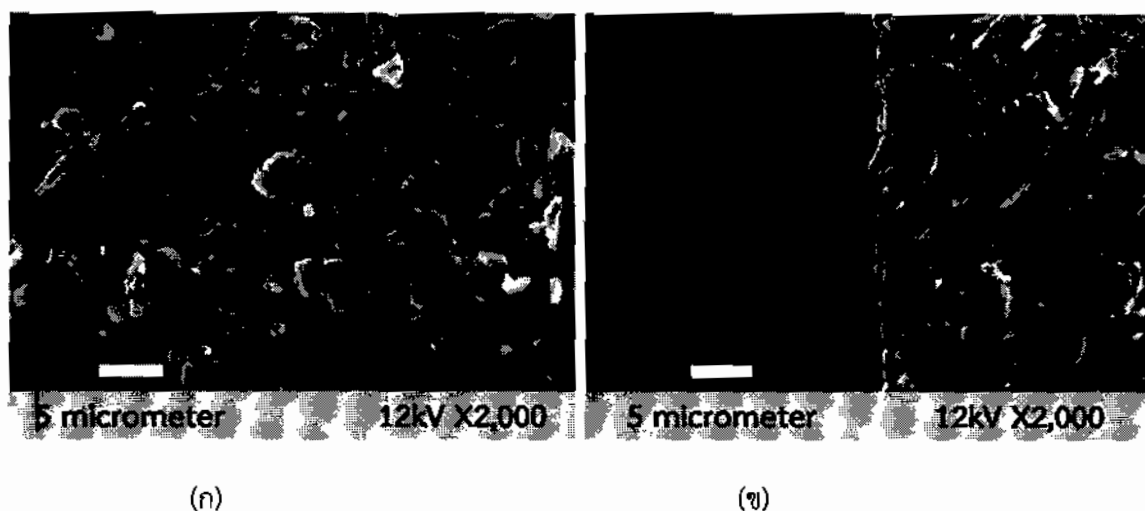


ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.24 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความ

ต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 150 ถึง 1,036 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.17 โอห์ม

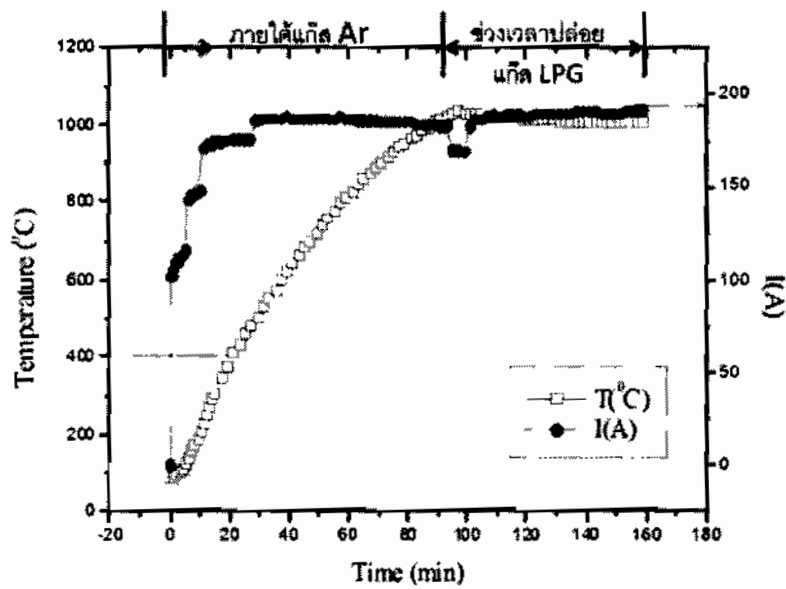
จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,036 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 3 ลิตรต่อนาที พบว่าพื้นผิวของเมดแกรไฟต์ยังมีฟิล์มเกาะอยู่เล็กน้อยไม่สม่ำเสมอ ตามภาพที่ 4.22 (ก) กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า พื้นผิวโดยรวมยังขรุขระอยู่ และตามภาพที่ 4.22 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 4.22 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเมดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,036 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

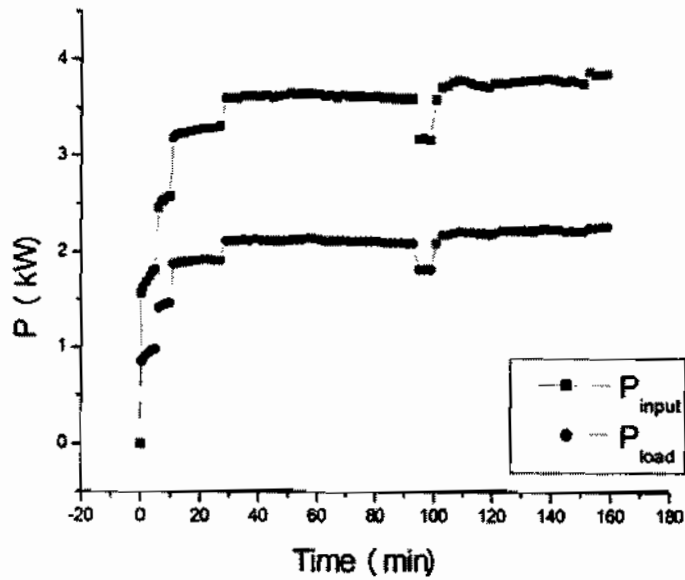
4.2.4 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:4

ในการทดลองเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนตามภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 180 A โดยใช้เวลาประมาณ 90 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,037 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่ จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 190 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,037 \pm 5$ องศาเซลเซียส ทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 160 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

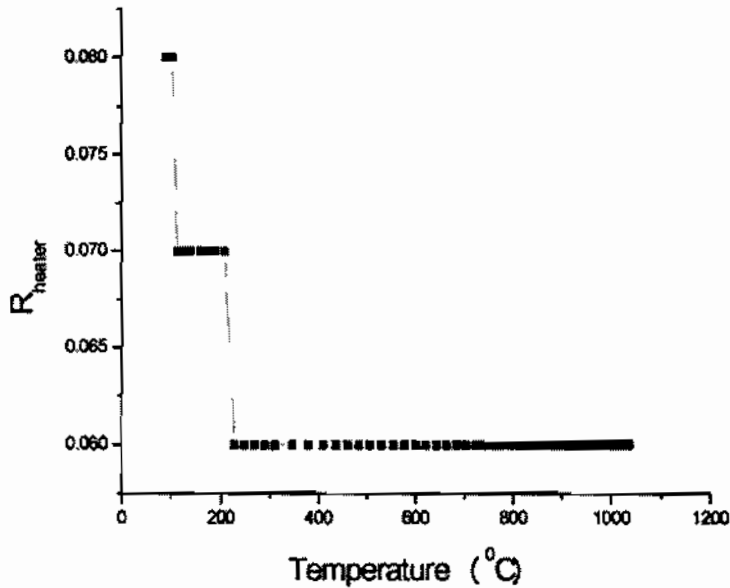


ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 3.6 kW และที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 2.2 kW ทำการปล่อยแก๊สในนาที่ที่ 92 ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 3.6 kW เหลือประมาณ 3 kW และกำลังไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 3.7 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 2.2 kW เหลือประมาณ 1.7 kW และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 2.1 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในแชมเบอร์เมื่อเราปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

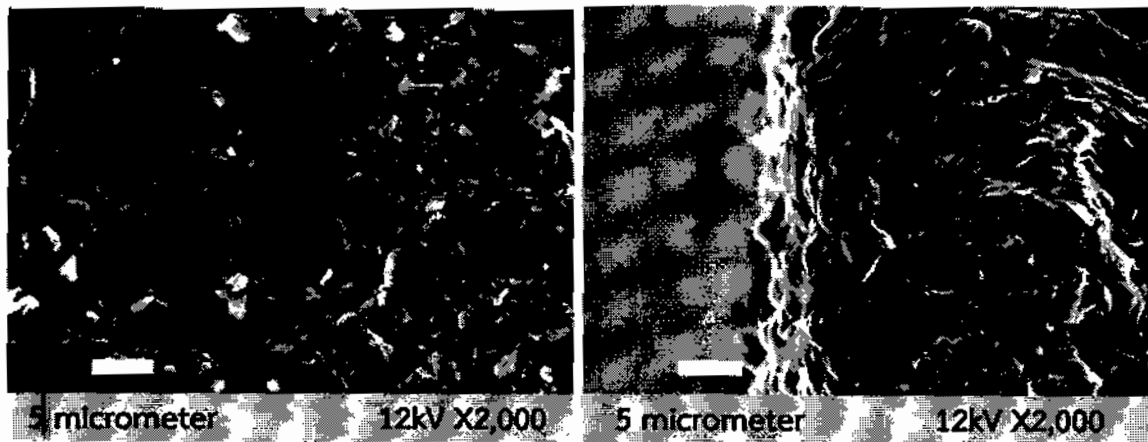


ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.08 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความ

ต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและเมื่ออุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 1,037 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,037 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 4 ลิตรต่อนาที พบว่าพื้นผิวของเมดแกรไฟต์ยังมีฟิล์มเกาะอยู่เล็กน้อยไม่สม่ำเสมอ ตามภาพที่ 4.26 (ก) กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า พื้นผิวโดยรวมยังขรุขระอยู่ และตามภาพที่ 4.26 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



(ก)

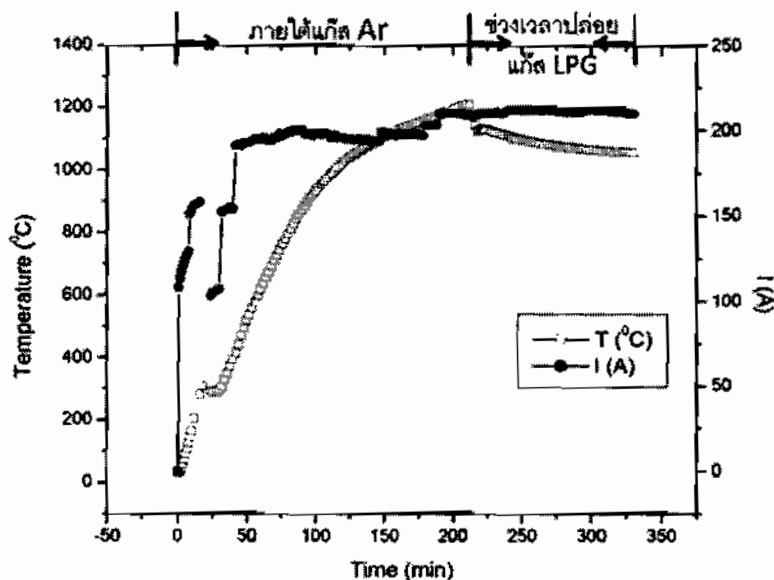
(ข)

ภาพที่ 4.26 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเมดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,037 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 4 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

เมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลของแก๊ส LPG มากขึ้น จาก 5 ถึง 15 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.27 ถึง 4.31 โดยที่ตัวแปรอื่นๆ ยังคงใกล้เคียงกับตอนที่ผ่านมา พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 6 ลิตรต่อนาที และที่อุณหภูมิแก๊ส $1,215 \pm 5$ องศาเซลเซียส ผิวหน้าของเมดแกรไฟต์ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนอย่างเห็นได้ชัด เกรนมีลักษณะนูนตะปุ่มตะป่ำ มีขนาดเกรนประมาณ 5 ถึง 10 ไมโครเมตร แต่ฟิล์มยังมีความหนาน้อย คือน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร

4.2.5 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:5

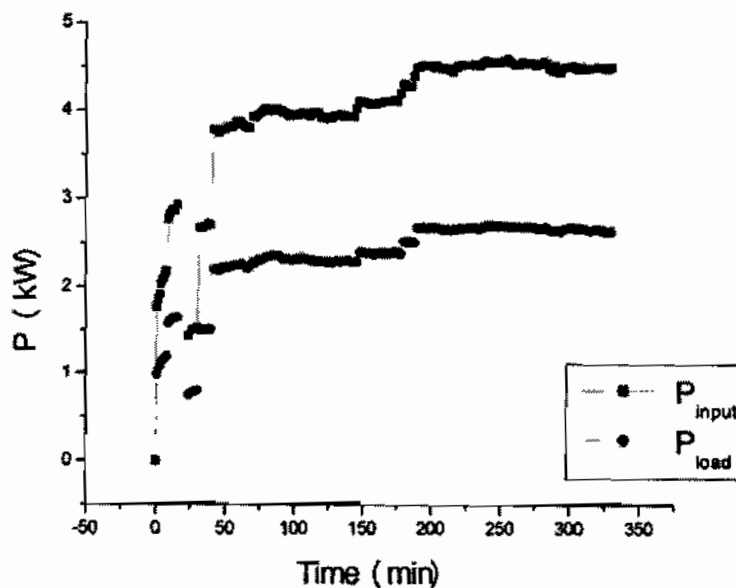
ในการทดลองเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนตามภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในการทดลองครั้งนี้เกิดปัญหาขึ้น คือ ไฟดับ ทำให้ต้องจ่ายกระแสให้ขั้วไฟฟ้ามีความร้อนขึ้นอีกครั้ง จะเห็นว่ากราฟ มีช่วงที่เวลาขาดไปคือ ช่วงที่ 18 ถึง 24 นาที และใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 200 A โดยใช้เวลาประมาณ 200 นาทีเพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,210 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 230 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,210 \pm 5$ องศาเซลเซียส และทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 325 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้



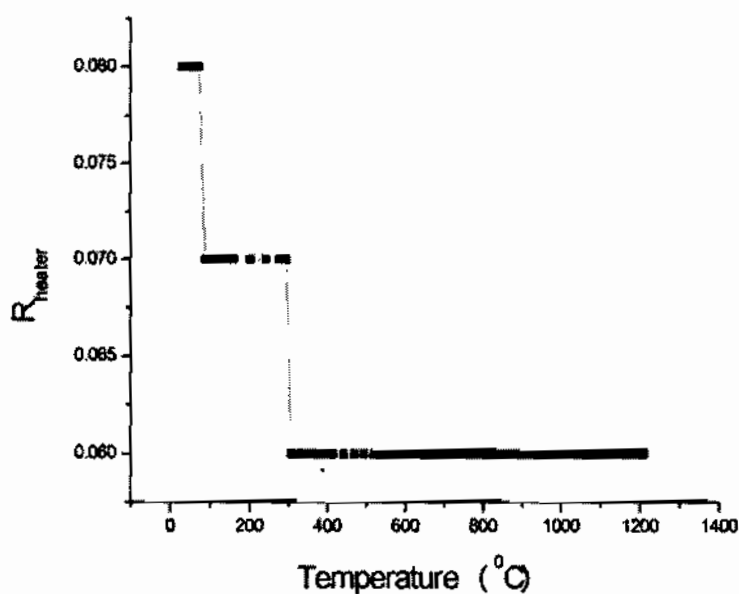
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่าการทดลองเคลือบครั้งนี้เกิดไฟดับระหว่างการเคลือบ จึงทำการจ่ายกระแสเข้าไปเลี้ยงขั้วใหม่ ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 4 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 2.3 kW และเมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาทีที่ 180 พบว่า กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบเพิ่มขึ้นจาก

ประมาณ 4 kW เป็น 4.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจากประมาณ 2.3 kW เป็น 2.5 kW



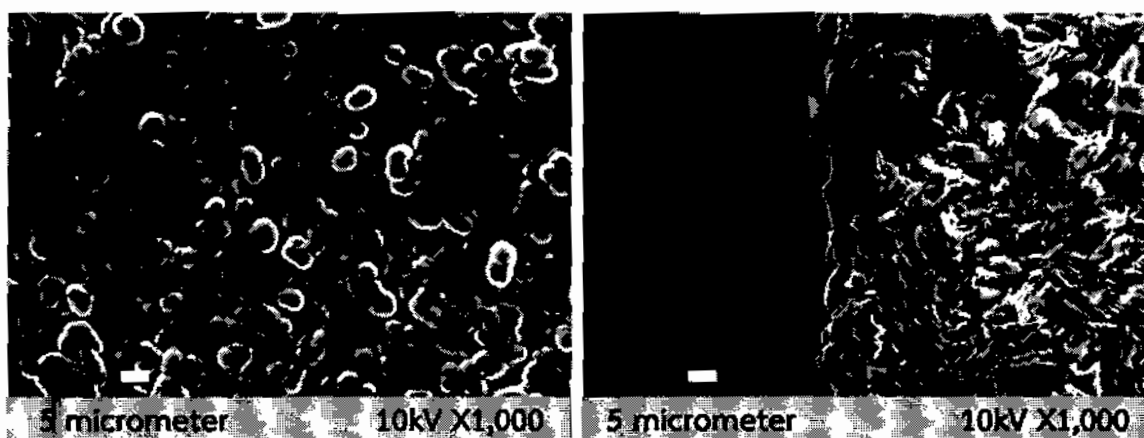
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.08 โอห์ม เนื่องจากไฟดับค่าความต้านทานของขั้วจึงลดลงในช่วงของอุณหภูมิประมาณ 30 ถึง 300 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ $1,210 \pm 5$ องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที เห็นฟิล์มชัดเจน โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า มีขนาดเกรนประมาณ 2 ถึง 5 ไมโครเมตร ปิดความขรุขระของพื้นผิวแกรไฟต์ ตามภาพที่ 4.30 (ก) และ 4.30 (ข) คือ ภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงาน แต่ฟิล์มยังมีความหนาเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 ไมโครเมตร



(ก)

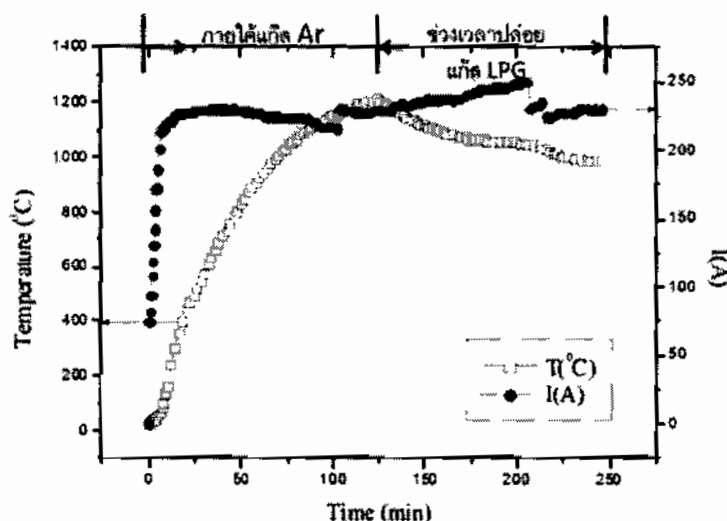
(ข)

ภาพที่ 4.30 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,210 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ตามลำดับ

4.2.6 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:6

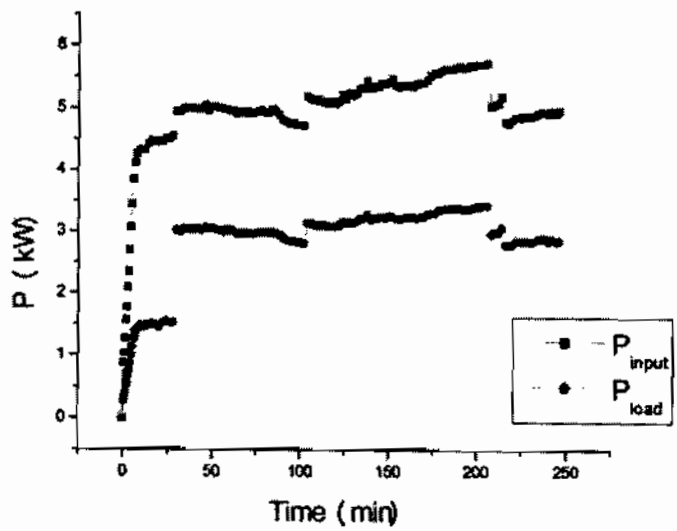
จากกราฟตามภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 225 A โดยใช้เวลาประมาณ 110 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ

1,215 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงชั่วประมาณ 250 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1215 ± 5 องศาเซลเซียส พบว่าต้องเพิ่มกระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิ ทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 250 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายใน 챔เบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

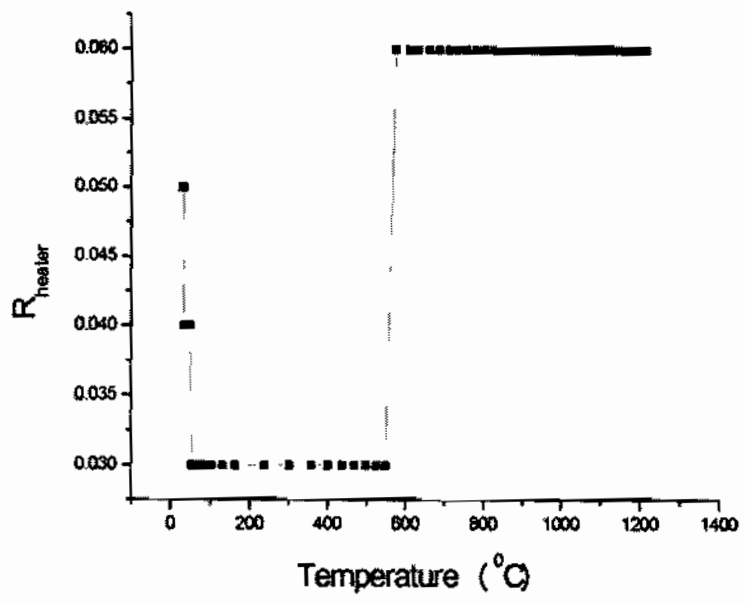


ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 3 kW โดยใช้เวลาประมาณ 100 นาที พบว่า กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบเพิ่มขึ้นจากประมาณ 5 kW เป็น 5.8 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 3 kW เป็น 3.2 kW



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

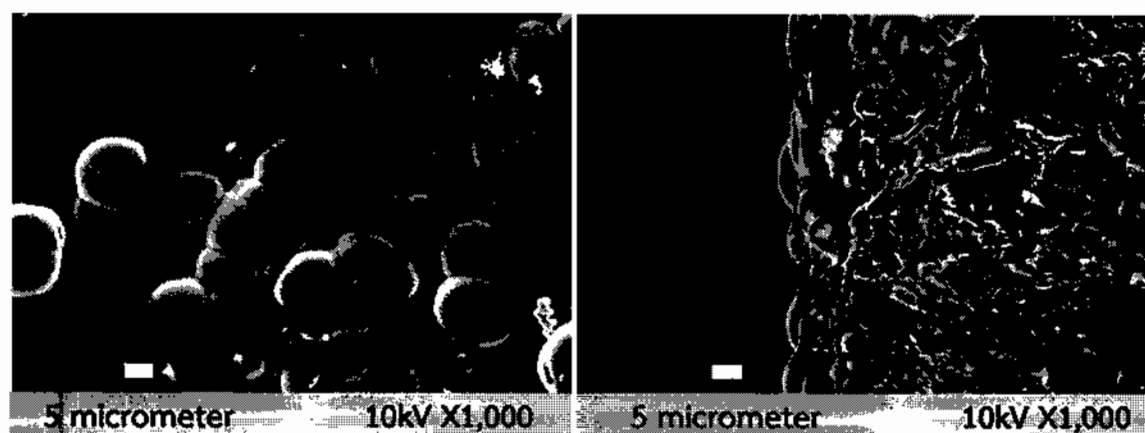


ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.05 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30

ถึง 600 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.03 โอห์ม เมื่ออุณหภูมิในช่วง 600 ถึง 1215 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ $1,215 \pm 5$ องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 6 ลิตรต่อนาที เห็นฟิล์มชัดเจน โดยฟิล์มมีลักษณะของเกรนมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า ปิดความขรุขระของพื้นผิวแกรไฟต์ ตามภาพที่ 4.34 (ก) และ 4.34 (ข) คือภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงาน แต่ฟิล์มยังมีความหนาเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 ไมโครเมตร และที่อัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 6 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในแคมเบอร์ $1,215 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าเกิดเขม่าขึ้นในระบบ



(ก)

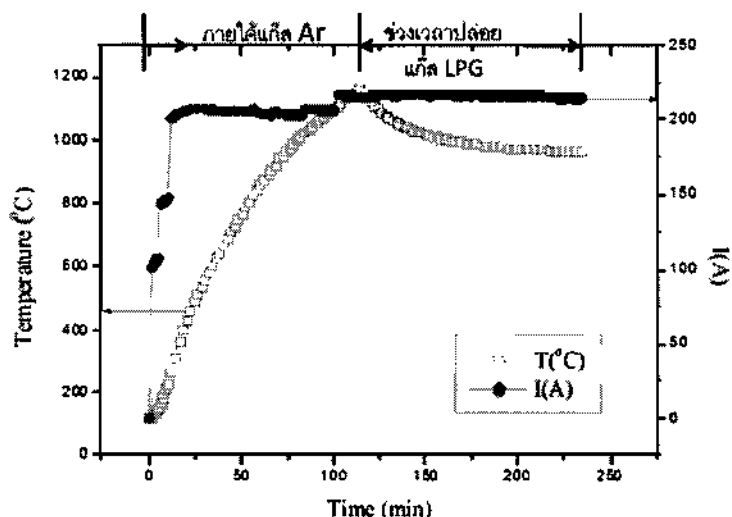
(ข)

ภาพที่ 4.34 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,215 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 6 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ตามลำดับ

4.2.7 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:10

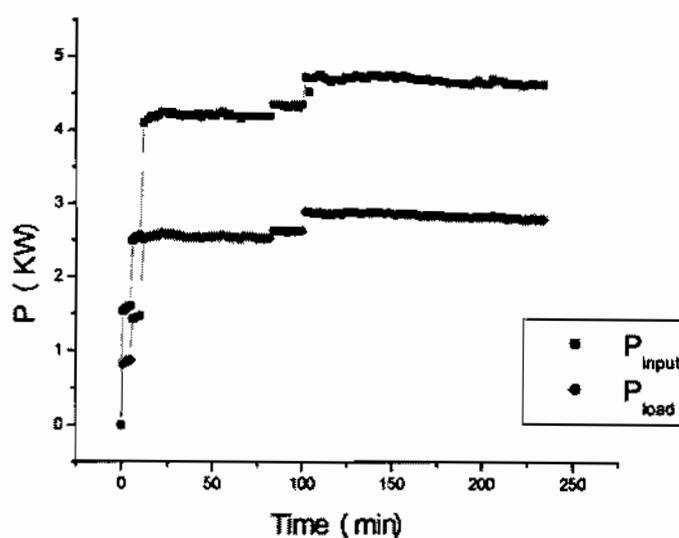
จากกราฟตามภาพที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแคมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 200 A โดยใช้เวลาประมาณ 110 นาที เพื่อให้ในแคมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,163 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ และใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 217 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1163 ± 5 องศาเซลเซียส พบว่าต้องเพิ่มกระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิ โดยทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนาฬิกาที่ 250

จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแคมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

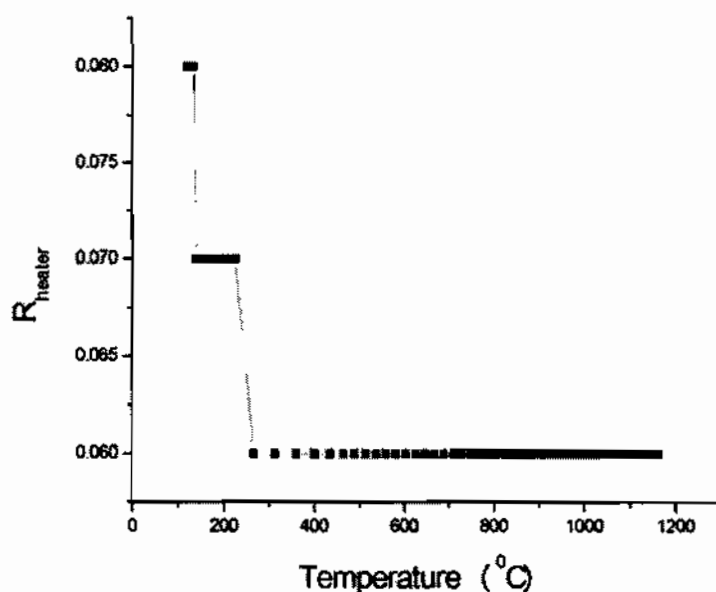


ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแคมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 4.3 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 2.5 kW โดยใช้เวลาประมาณ 100 นาที พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 4.3 kW เป็น 4.6 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 2.5 kW เป็น 2.9 kW



ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

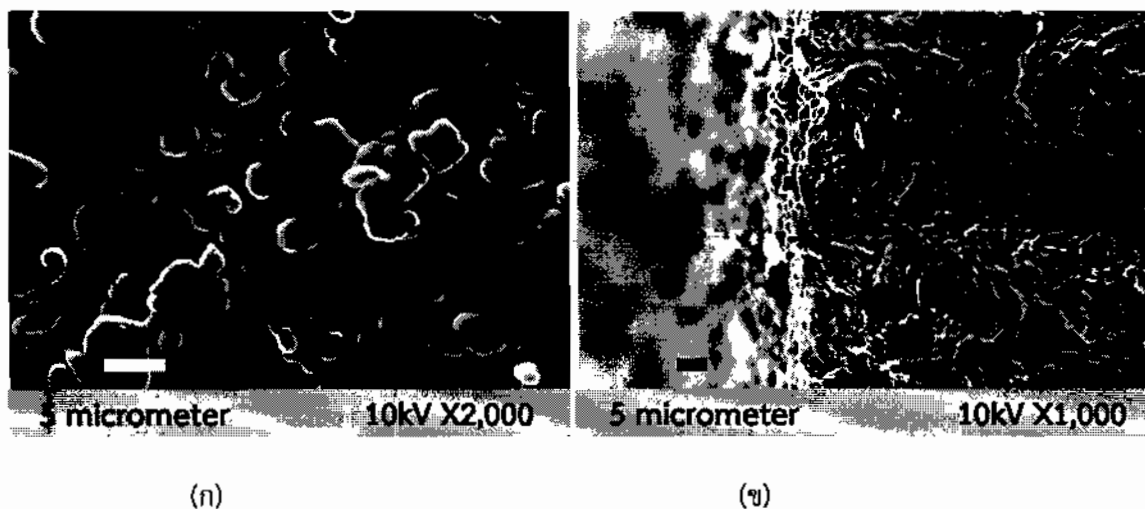


ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.08 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 250 องศา

เซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.07 โอห์ม เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 250 ถึง 1163 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลัษขยาย 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ 1,163 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนขนาดเล็ก ประมาณ 2 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวน้ำ ปิดความขรุขระของพื้นผิวแกรไฟต์ ตามภาพที่ 4.38 (ก) และ 4.38 (ข) คือภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงาน แต่ฟิล์มยังมีความหนาเพียงเล็กน้อย คือน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร และที่อัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในแชมเบอร์ $1,163 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าเกิดเขม่าขึ้นในระบบมากขึ้น ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อปั๊มโรตารี เนื่องจากทำให้ปั๊มมีอัตราเร็วการดูดอากาศออกลดลง และการเกิดเขม่ายังทำให้ระบบปนเปื้อนมากขึ้นและความบริสุทธิ์รวมถึงคุณภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ลดลงไปด้วย

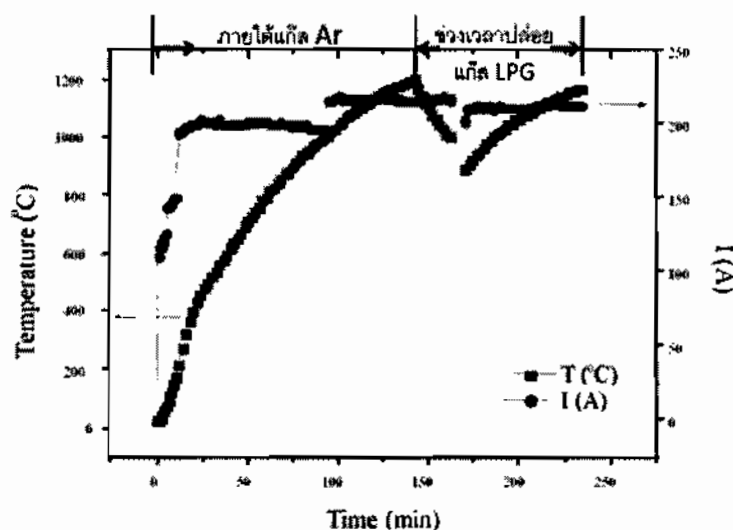


ภาพที่ 4.38 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,163 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 10 ลิตรต่อนาที ที่กำลัษขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

4.2.8 ผลของสัดส่วนแก๊สผสม Ar/LPG เท่ากับ 2:15

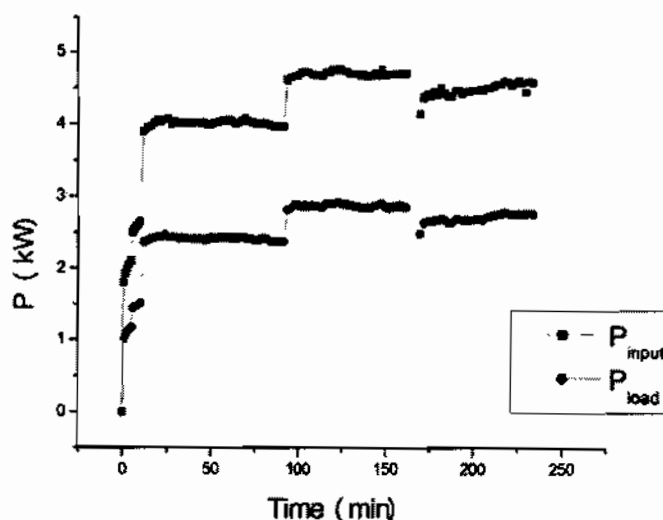
จากกราฟตามภาพที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ใช้

กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 200 A โดยใช้เวลาประมาณ 100 นาที เพื่อให้โน้ตแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,198 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 220 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,198 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าต้องเพิ่มกระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิ และเกิดไฟดับขณะการเคลือบ โดยทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 250 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

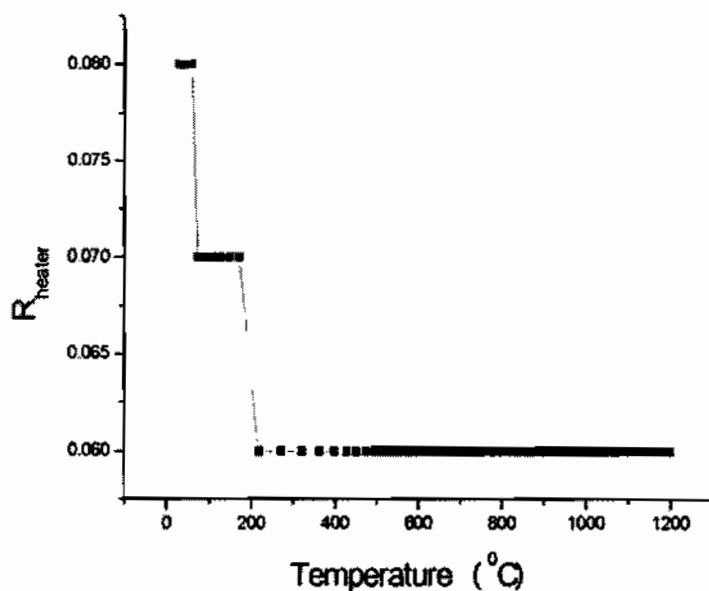


ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบฟิล์มพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 4 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 2.4 kW โดยใช้เวลาประมาณ 100 นาที ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4 kW เป็น 4.6 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.4 kW เป็น 2.9 kW



ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

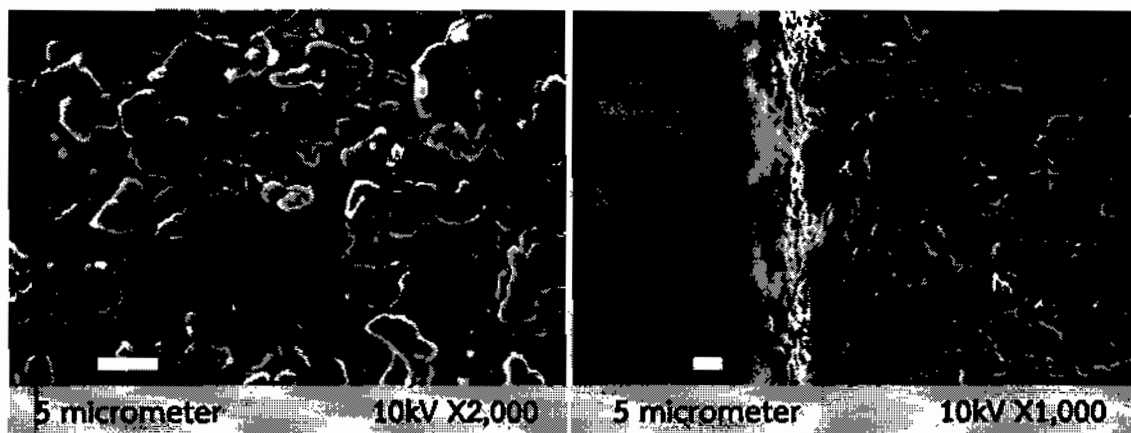


ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.08 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30

ถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.07 โอห์ม และอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 1,198 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ $1,198 \pm 5$ องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 15 ลิตรต่อนาที โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนขนาดเล็ก ประมาณ 2 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวน้ำ ปิดความขรุขระของพื้นผิวแกรไฟต์ ตามภาพที่ 4.42 (ก) และ 4.42 (ข) คือ ภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงาน แต่ฟิล์มยังมีความหนาเพียงเล็กน้อย คือน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร และที่อัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 15 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในแคมเบอร์ $1,198 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าเกิดเขม่าขึ้นในระบบมากขึ้นไปอีก ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อบัมโรตารี คือ ปริมาณเขม่าที่สะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา จะไปอุดรูคู่อากาศของบัมซึ่งมีลักษณะเป็นตะแกรงดักเขม่า ป้องกันเขม่าที่จะตกลงไปสู่ น้ำมันหล่อลื่น ทำให้บัมไม่สามารถดูดอากาศออกจากระบบได้ และการเกิดเขม่ายังทำให้ระบบปนเปื้อนมากขึ้นจนไม่สามารถทำการทดลองต่อไปได้ เพราะความบริสุทธิ์รวมถึงคุณภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ลดลงไปถึงจุดที่ไม่สามารถยอมรับได้



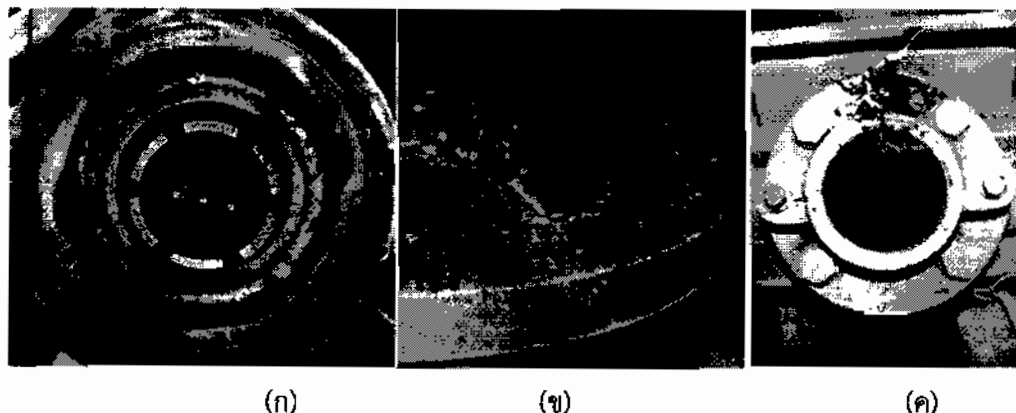
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.42 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,198 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 15 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ตามลำดับ

จากการทดลองในช่วงการปล่อยแก๊ส LPG มากกว่า 5 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิของแก๊สจะลดลงเรื่อยๆ และเกิดเขม่าขึ้นระหว่างการเคลือบฟิล์มทั้งในแคมเบอร์และภายในท่อแก๊สจนถึงบัมโรตารี ดังแสดงในภาพที่ 4.43 (ก) ซึ่งแสดงเขม่าที่เกิดขึ้นภายในแคมเบอร์ ภาพที่ 4.43 (ข) ซึ่งแสดงเขม่าที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน

และภาพที่ 4.43 (ค) ซึ่งแสดงเขม่าที่เกิดขึ้นภายในข้อต่อของปั๊มโรตารี โดยเขม่าเหล่านี้ไม่เป็นผลดีต่อคุณภาพของฟิล์ม ก่อให้เกิดการปนเปื้อนภายในระบบ และลดอัตราเร็ว (Pumping speed) ของปั๊มโรตารี



ภาพที่ 4.43 (ก) เขม่าที่เกิดขึ้นภายในแชมเบอร์ (ข) เขม่าที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน และ (ค) เขม่าที่เกิดขึ้นภายในข้อต่อของปั๊มโรตารี

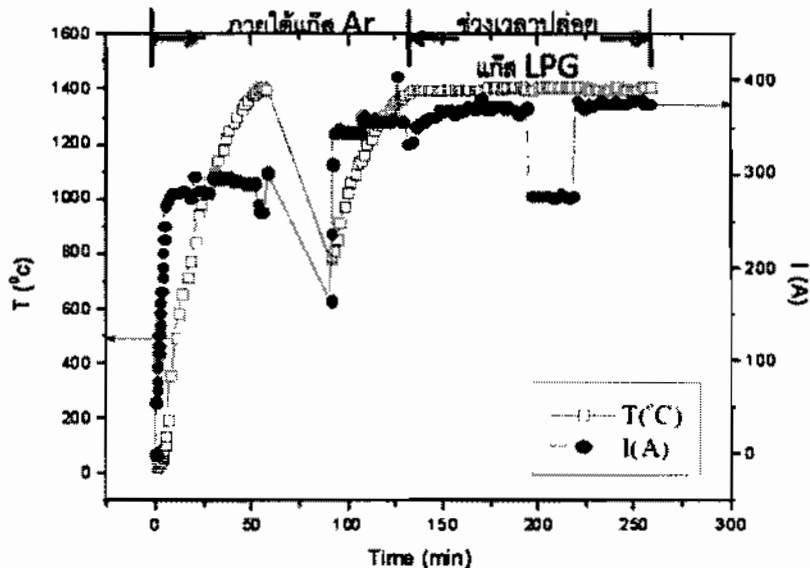
4.3 ผลของอุณหภูมิของแก๊สและเวลาการเคลือบฟิล์มต่อการเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอน

4.3.1 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,407 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 พบว่าอัตราการไหลของแก๊สที่เหมาะสม คือ แก๊ส Ar ต่อแก๊ส LPG เท่ากับ 2:1 ซึ่งจะทำให้ไม่มีเขม่าเกิดขึ้นภายในระบบ และอุณหภูมิของแก๊สจะต้องคงที่ตลอดการทดลอง แต่ฟิล์มไพโรคาร์บอนที่เกิดขึ้นยังไม่หนาเพียงพอ จึงต้องเพิ่มเวลาการเคลือบฟิล์มและเร่งอัตราการแตกตัวของแก๊ส LPG โดยเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สขึ้น ตามภาพที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่าเกิดไฟดับระหว่างการเคลือบฟิล์มประมาณ 40 นาที เมื่อทำการทดลองต่อจึงเกิดการกระเพื่อมของกระแสไฟเล็กน้อย แต่ในที่สุดก็ยังสามารถรักษาอุณหภูมิการเคลือบให้อยู่ที่ประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส ได้ แต่ฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ได้จากเงื่อนไขนี้ก็ยังคงมีความพรุนคล้ายฟองน้ำดังแสดงในภาพที่ 4.47 (ก) ซึ่งเป็นภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงาน และในภาพที่ 4.47 (ข) แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 5 ไมโครเมตร

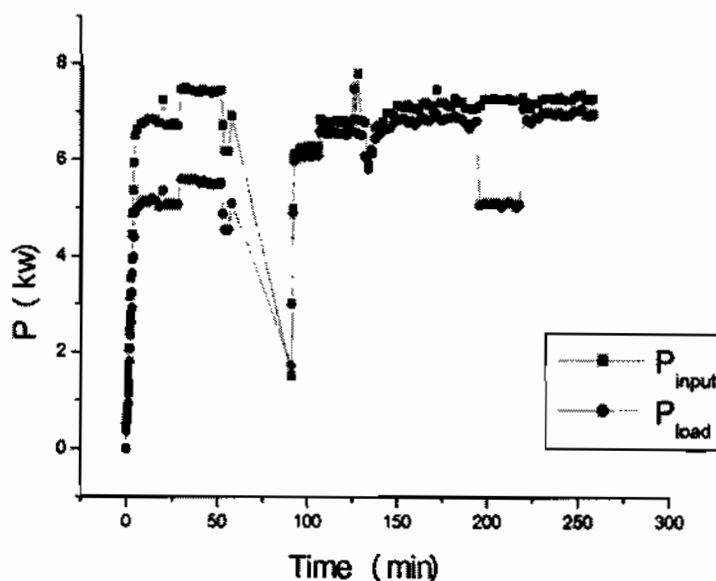
จากกราฟตามภาพที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ เวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 300 A โดยใช้เวลาประมาณ 140 นาทีเนื่องจากไฟดับระหว่างการเคลือบฟิล์ม เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,407 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG

เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงชั่วประมาณ 375 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,407 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าต้องเพิ่มกระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิ และเกิดไฟดับขณะการเคลือบฟิล์ม โดยทำการเคลือบฟิล์ม 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 275 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

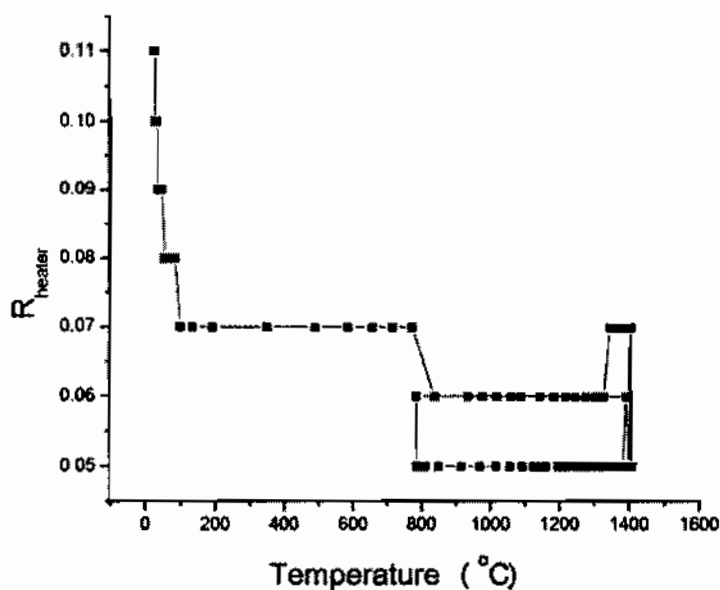


ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบฟิล์มพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 6.7 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 4.7 kW การทดลองครั้งนี้สายไฟหลุดในระหว่างการเคลือบฟิล์ม โดยใช้เวลาประมาณ 120 นาที ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 6.7 kW เป็น 6.3 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 4.7 kW เป็น 5.2 kW



ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

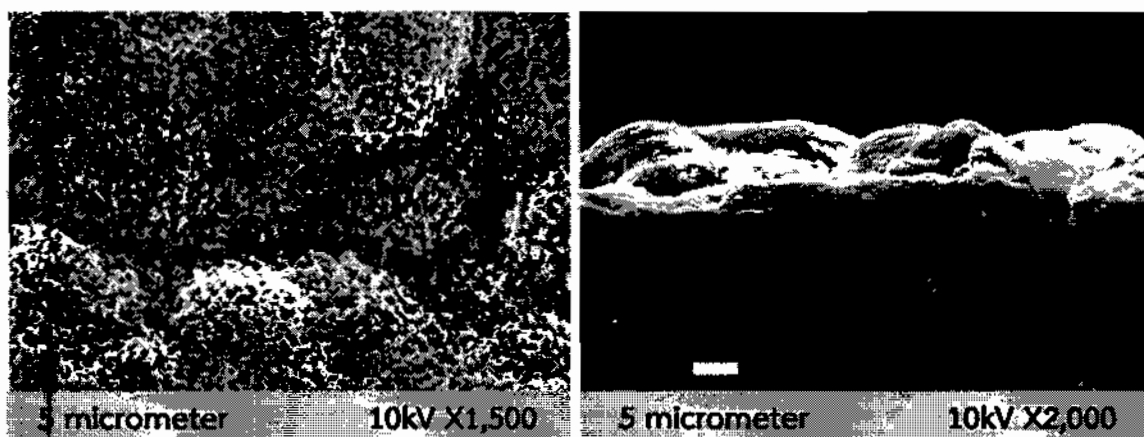


ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า ในการเคลือบฟิล์มครั้งนี้มีปัญหาเนื่องจากสายไฟที่จ่ายเข้ากับขั้วแกรไฟต์หลุดจึงทำการพักและรอให้อุณหภูมิเย็นลง

จึงทำการซ่อมสายไฟเพื่อให้ความร้อนกับขั้วแกรไฟต์ใหม่อีกครั้ง ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.11 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.07 โอห์ม เมื่ออุณหภูมิในช่วง 800 ถึง 1,407 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ $1,407 \pm 5$ องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่ ประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร แต่ผิวหน้าเกรนมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ตามภาพที่ 4.47 (ก) และ 4.47 (ข) คือ ภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยมีความหนาประมาณ 5 ไมโครเมตร



(ก)

(ข)

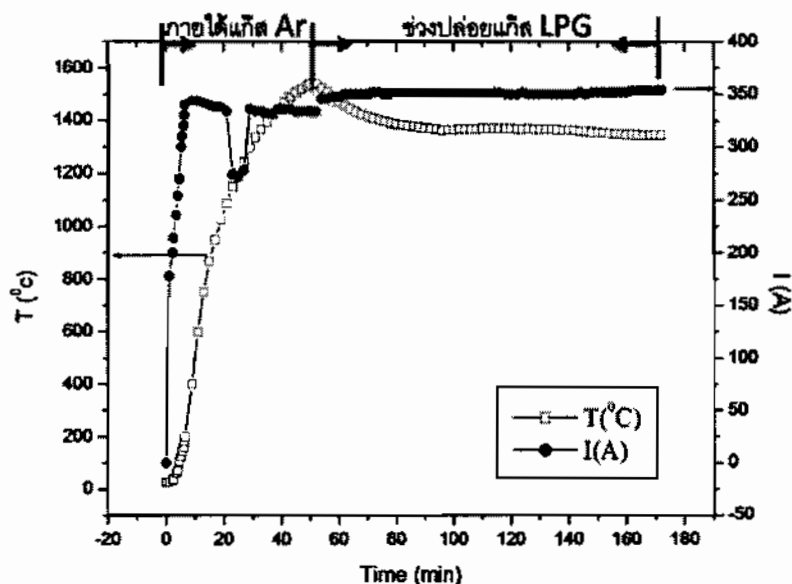
ภาพที่ 4.47 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,407 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

4.3.2 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,540 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

ต่อมาจึงลองเพิ่มอัตราการแตกตัวของแก๊ส LPG ขึ้นอีกโดยเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สขึ้นเป็น 1,540 องศาเซลเซียส ตามภาพที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการปล่อยแก๊ส LPG ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิของแก๊สในแชมเบอร์จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ภายหลังจากเวลาการเคลือบฟิล์มผ่านไป 2 ชั่วโมง ซึ่งฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ได้จากเงื่อนไขนี้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ไม่สม่ำเสมอ ดัง

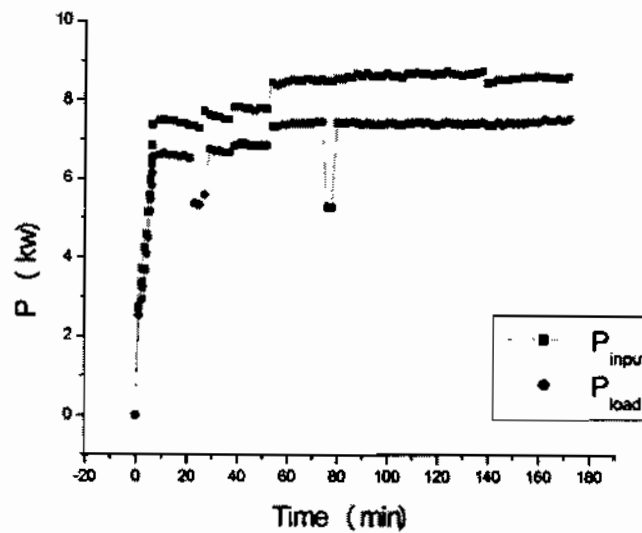
แสดงในภาพที่ 4.51 (ก) ซึ่งเป็นภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงาน และในภาพที่ 4.51 (ข) แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์ม ซึ่งยังคงสังเกตเห็นชั้นของฟิล์มได้ไม่ชัดเจนนัก

จากกราฟตามภาพที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1540 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 355 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,540 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ และใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 352 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,540 \pm 5$ องศาเซลเซียส พบว่าต้องเพิ่มกระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิ โดยทำการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 180 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

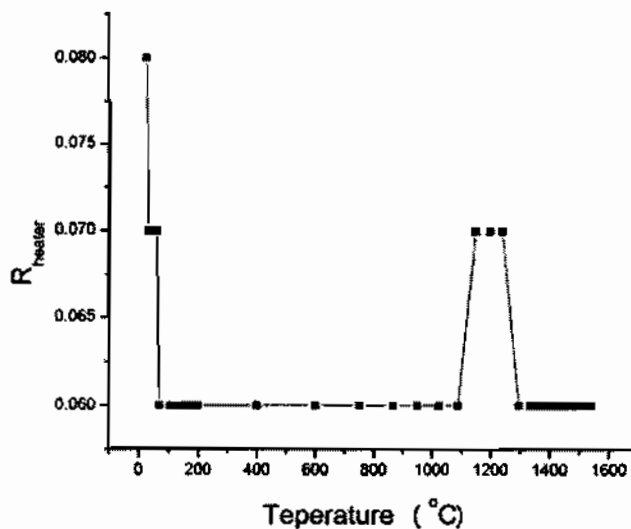


ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1540 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 6.3 kW โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบเพิ่มขึ้นจากประมาณ 7.5 kW เป็น 8.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 6.3 kW เป็น 6.5 kW



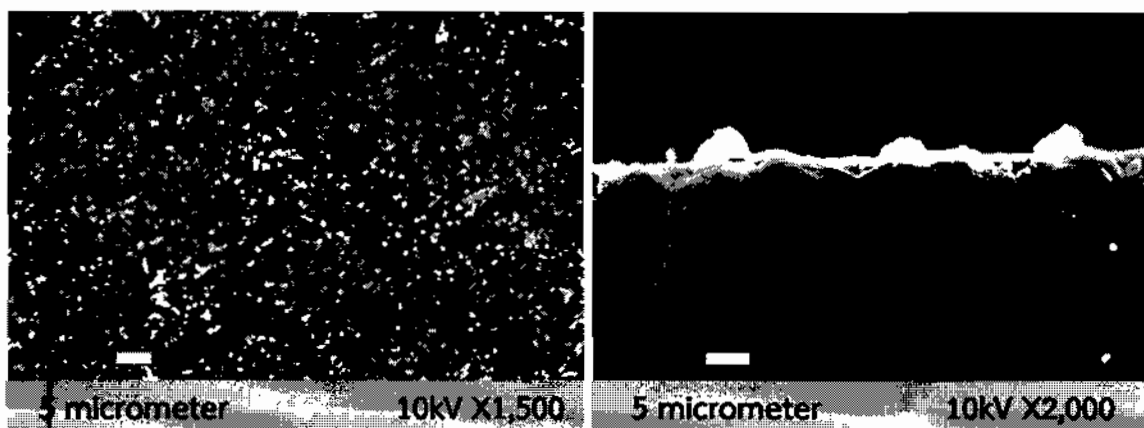
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.08 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.06 โอห์ม และพบว่าอุณหภูมิในช่วง 800 ถึง 1540 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนขนาดเล็กมากและมีลักษณะเป็นแบบจุดๆ กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวน้ำ ตามภาพที่ 4.51 (ก) และ 4.51 (ข) คือภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่าการเกิดฟิล์มที่ผิวน้ำของชิ้นงานแต่สังเกตได้ไม่ชัด



(ก)

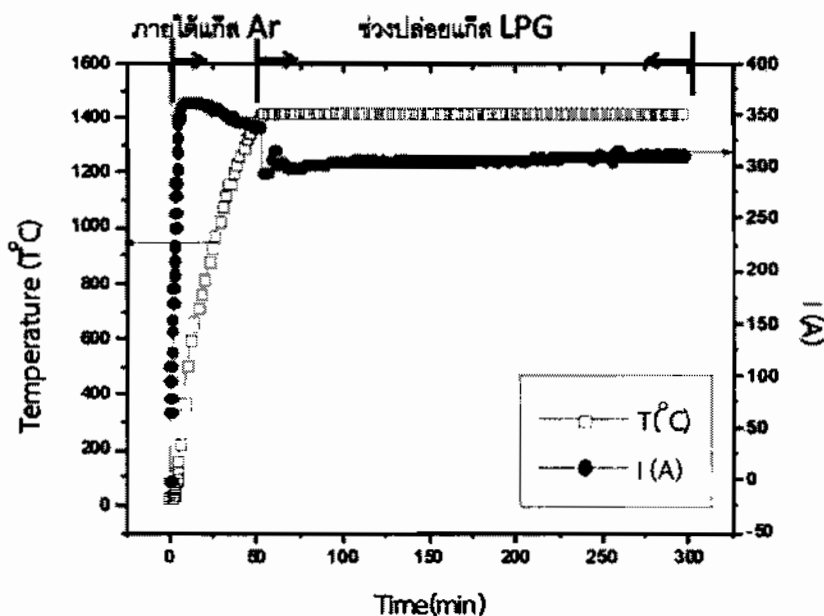
(ข)

ภาพที่ 4.51 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,540 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบฟิล์ม 2 ชั่วโมง

4.3.3 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,409 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

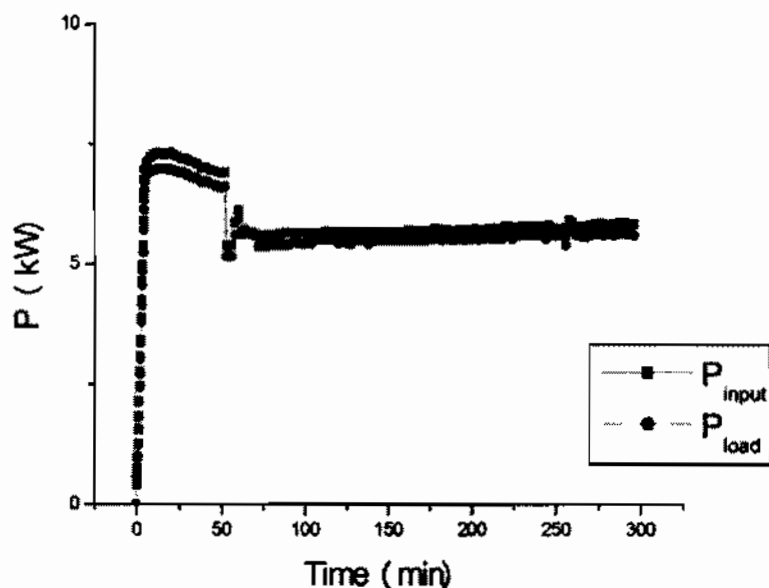
ต่อมาได้ปรับปรุงระบบหล่อเย็นและแหล่งจ่ายไฟให้สามารถทำงานได้นานขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น จึงได้ทดลองทำการเคลือบฟิล์มที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์มนาน 4 ชั่วโมง ภาพที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายใน 챔เบอร์ ซึ่งจะเห็นว่าสามารถรักษาอุณหภูมิแก๊สให้คงที่ได้ตลอดระยะเวลาการเคลือบฟิล์ม โดยใช้กระแสไฟฟ้าเลี้ยงขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 320 A และจากภาพถ่าย SEM ตามภาพที่ 4.55 (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่เงื่อนไขดังกล่าว พบว่าเกิดฟิล์มไพโรคาร์บอนค่อนข้างหนาแน่น ซึ่งหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร และไม่เกิดเขม่าขึ้นภายในระบบ ดังนั้นที่เงื่อนไขนี้จะน่าจะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องโดยการซ้ำต่อไป

จากกราฟภาพที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง ใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 355 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,409 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 325 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,409 \pm 5$ องศาเซลเซียส โดยทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

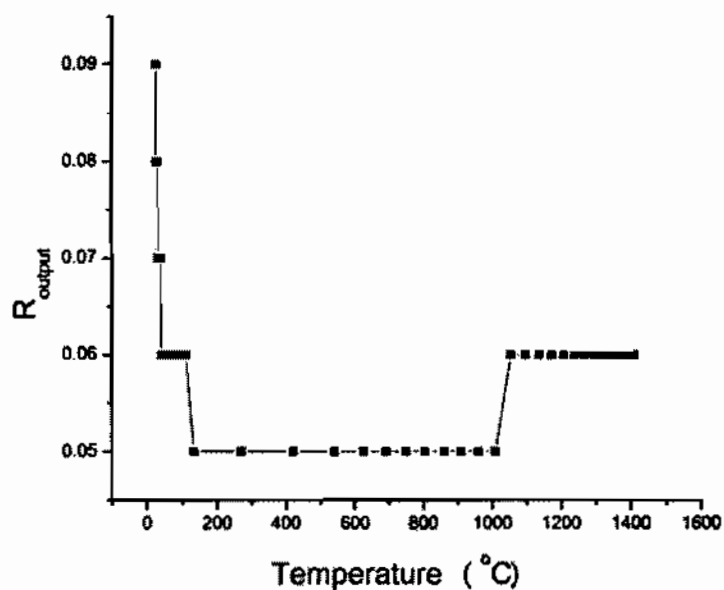


ภาพที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ จากการทดลองเคลือบฟิล์มพบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 6 kW และกำลังไฟฟ้าขาออกมีค่าประมาณ 5.8 kW โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที พบว่า กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 6 kW เป็น 5.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพิ่มขึ้นจาก 5.8 kW เป็น 5.1 kW



ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

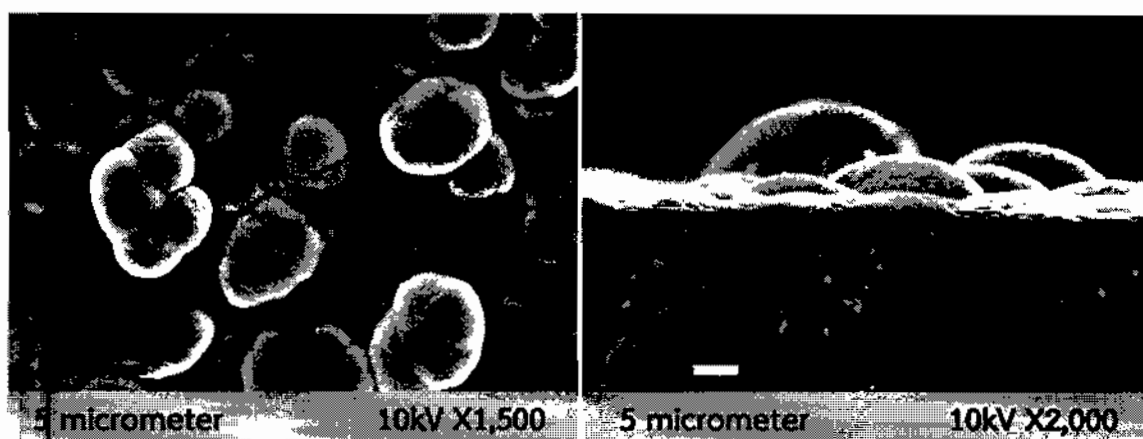


ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.09 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 100

ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.05 โอห์ม และอุณหภูมิในช่วง 1,000 ถึง 1,409 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ในระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลังขยาย 1,500 และ 2,000 เท่า จะสังเกตเห็นพื้นผิวของแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่อุณหภูมิแก๊สประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที โดยฟิล์มมีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่บ้างเล็กบ้าง ขนาดของเกรนประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร กระจายอยู่ทั่วไปตลอดทั้งผิวหน้า ปิโตรพูนของผิวแกรไฟต์ ตามภาพที่ 4.55 (ก) และ 4.55 (ข) คือ ภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานสังเกตได้ชัดเจน โดยฟิล์มมีความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร



(ก)

(ข)

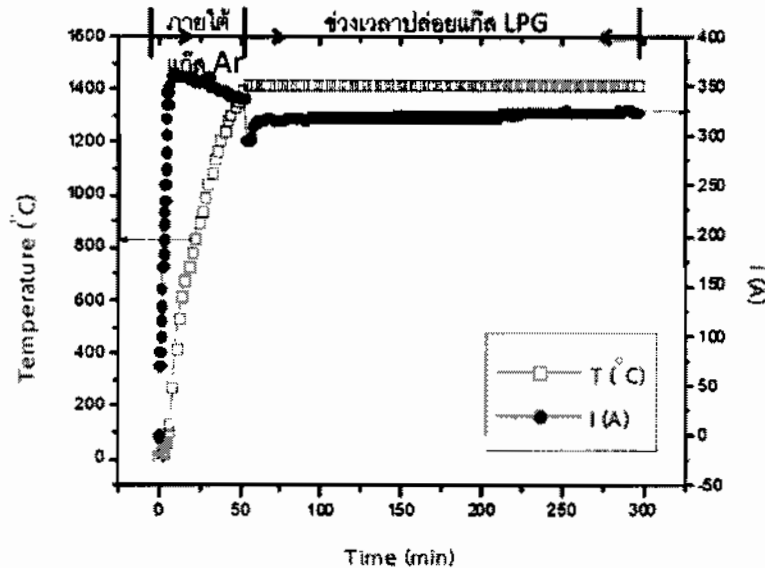
ภาพที่ 4.55 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,409 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

4.4 ผลการทำซ้ำที่เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ดีที่สุด

4.4.1 ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,414 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

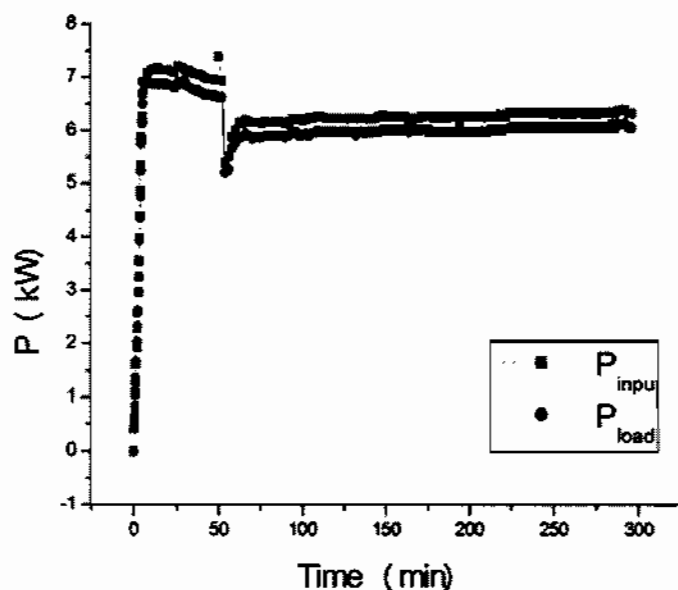
จากกราฟภาพที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 325 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ

1,414 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ และใช้กระแสเลี้ยงชั่วประมาณ 325 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,414 \pm 5$ องศาเซลเซียส โดยทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

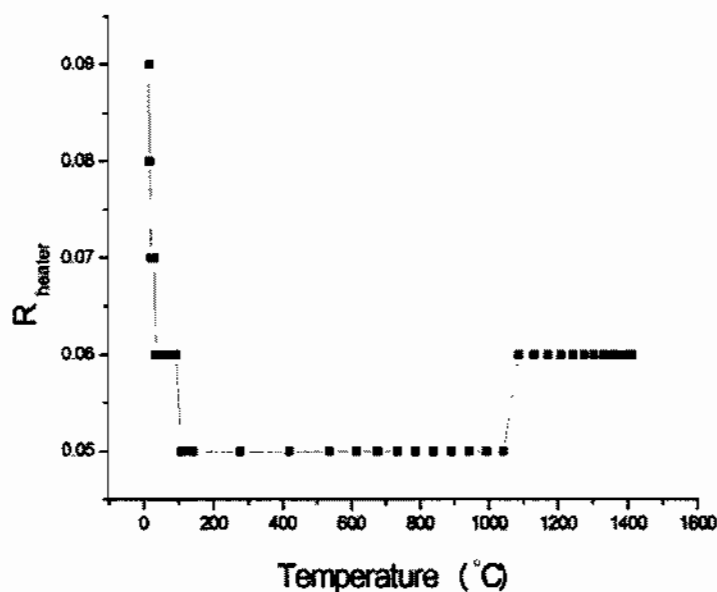


ภาพที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,414 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 5.3 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาที่ที่ 50 ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 7.2 kW เหลือประมาณ 6 kW และเมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 5.3 kW กำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 6.9 kW เหลือประมาณ 5.9 kW



ภาพที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

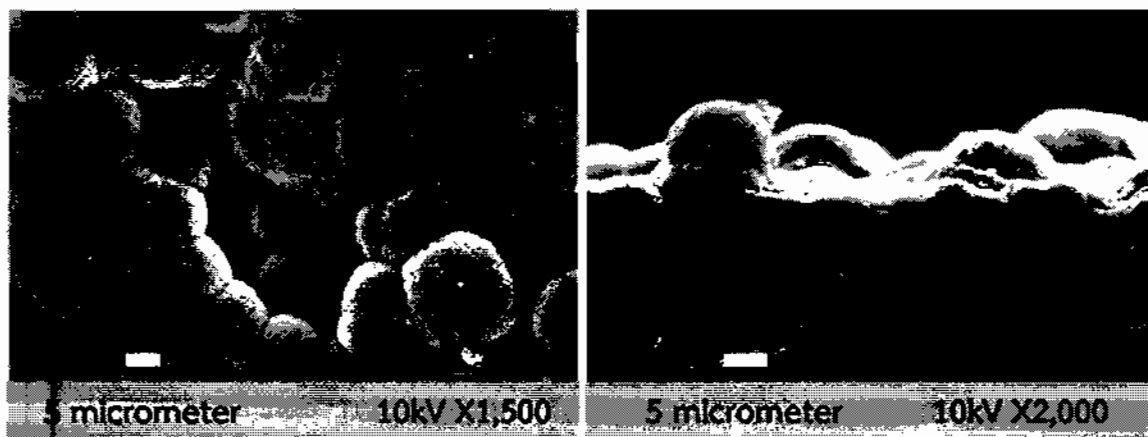


ภาพที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 17 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.09 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 1,000 ถึง 1,414 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,414 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.59 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่นและมีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน ซึ่งเกรนมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร และตามภาพที่ 4.59 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดฟิล์มที่ผิวหน้าของชิ้นงานค่อนข้างหนาประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร



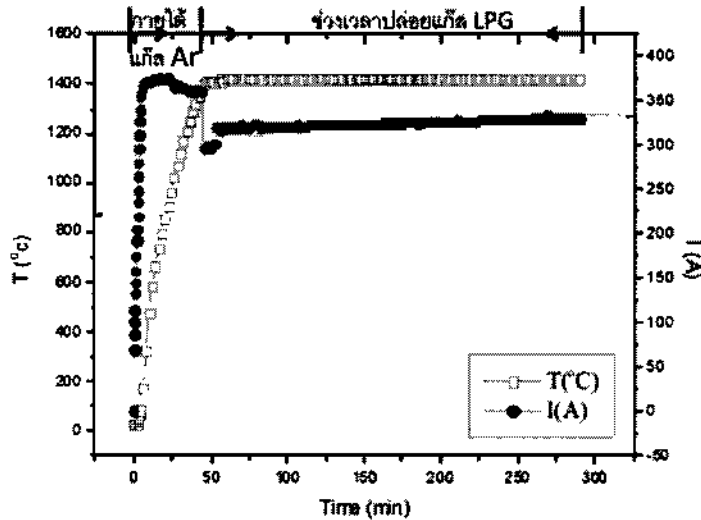
(ก)

(ข)

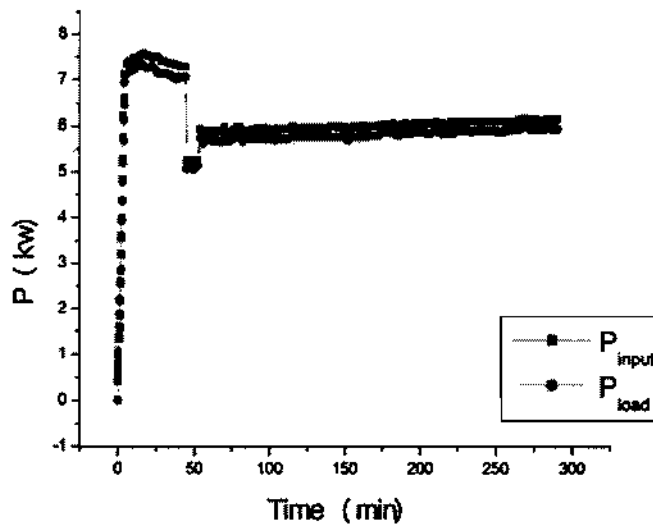
ภาพที่ 4.59 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,414 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

4.4.2 ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,415 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

จากรูปภาพที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 330 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,415 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 330 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิในช่วง $1,415 \pm 5$ องศาเซลเซียส และทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้



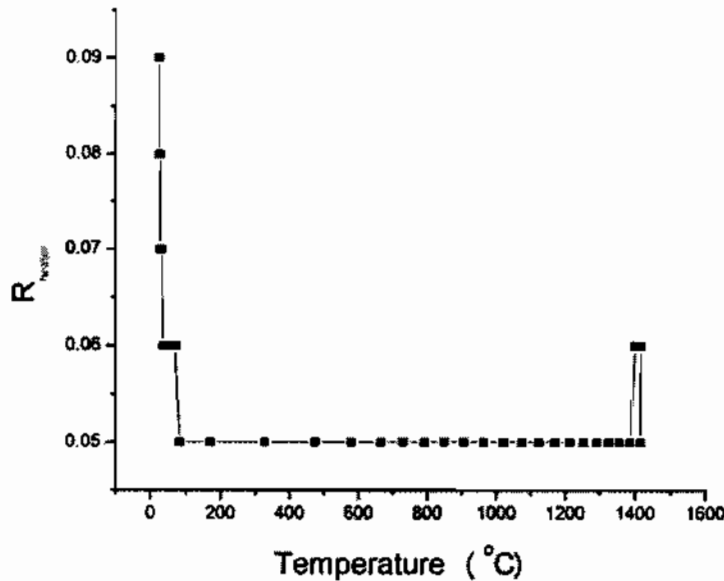
ภาพที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,415 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 7.4 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาที่ที่ 50 ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 7.5 kW เหลือประมาณ 5.8 kW เมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ที่

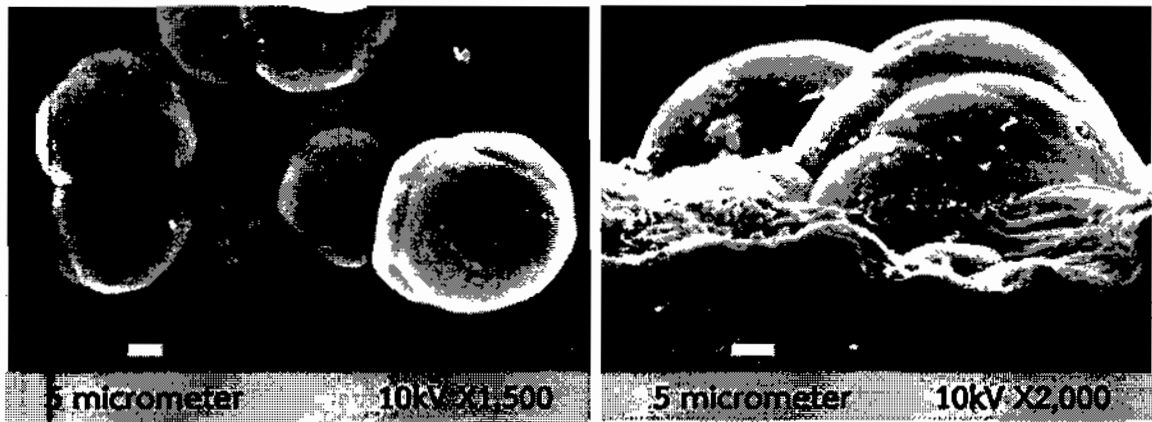
ประมาณ 5.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 7.4 kW เหลือประมาณ 5.7 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในแชมเบอร์เมื่อปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 22 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.09 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 1,415 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.05 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,415 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.63 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่นและมีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน โดยขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ ขนาดเกรนประมาณ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร และตามภาพที่ 4.63 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ และฟิล์มมีความหนาประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร



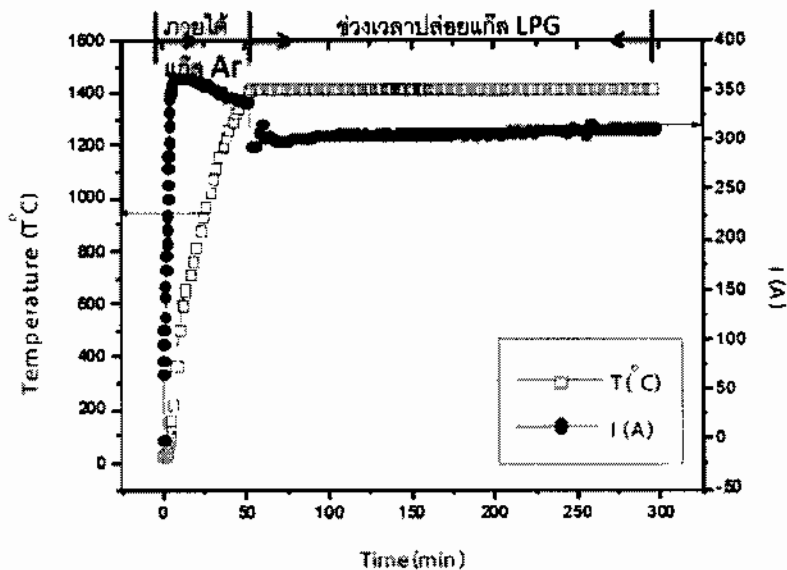
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.63 ภาพ SEM (ก) ผิวน้ำ (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,415 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

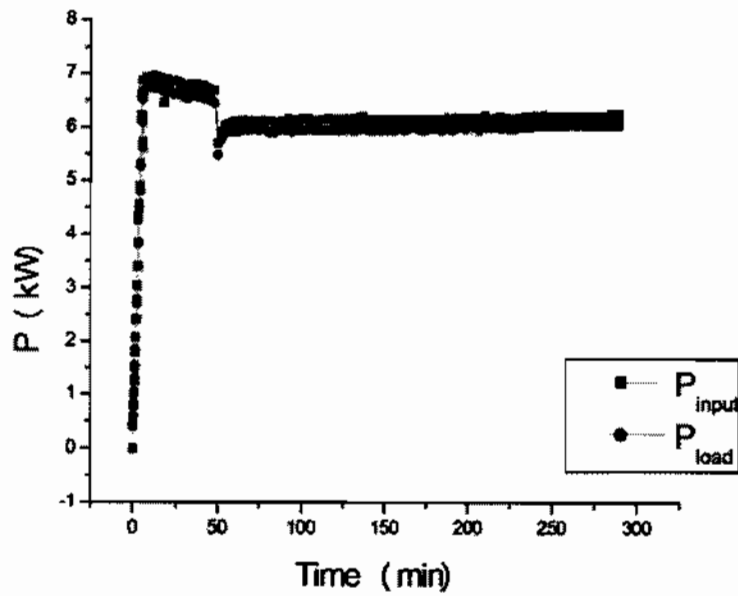
4.4.3 ครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,418 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

จากกราฟภาพที่ 4.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 315 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,418 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 315 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,418 \pm 5$ องศาเซลเซียส โดยทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

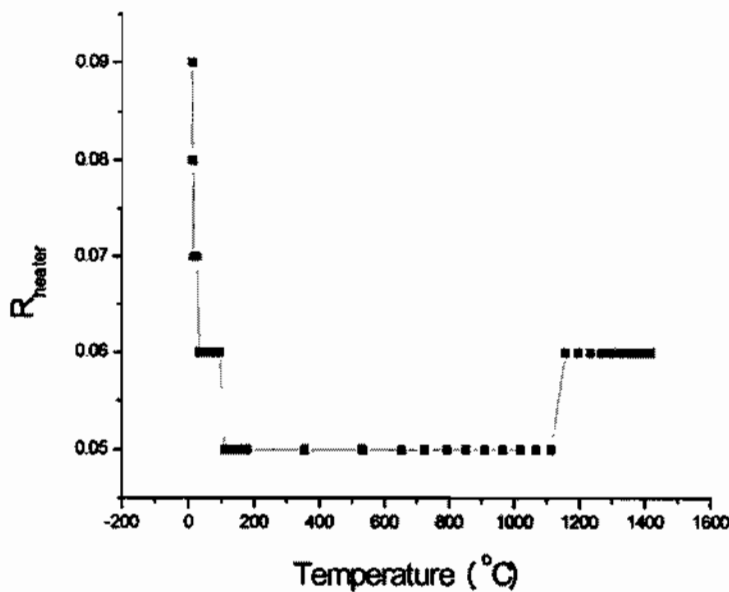


ภาพที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,418 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7 kW กำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 6.9 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาทีที่ 50 ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 7 kW เหลือประมาณ 6 kW และเมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 5.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 6.9 kW เหลือประมาณ 5.9 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในแชมเบอร์เมื่อปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

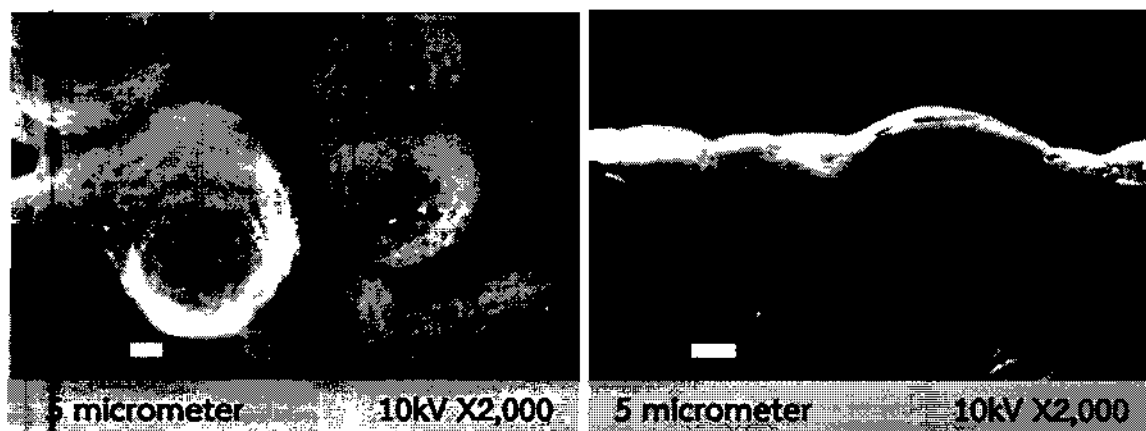


ภาพที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 22 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.09 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.05 โอห์ม ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 1,100 ถึง 1,418 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,418 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.67 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่นและไม่มีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน โดยขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ และตามภาพที่ 4.67 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ และฟิล์มมีความหนาประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร โดยสังเกตเห็นรอยแยกของชั้นฟิล์มไพโรคาร์บอนและแผ่นฐานแกรไฟต์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจจะเกิดจากฟิล์มเริ่มมีความหนามากเกินไปจึงทำให้เพิ่มความเค้นภายในฟิล์มมากขึ้น



(ก)

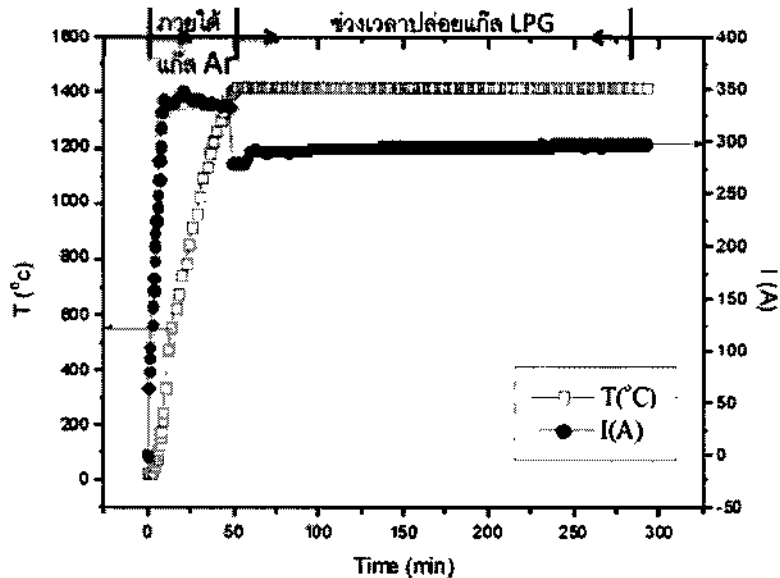
(ข)

ภาพที่ 4.67 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,418 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลากการเคลือบ 4 ชั่วโมง

4.4.4 ครั้งที่ 4 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,422 องศาเซลเซียส และเวลากการเคลือบ 4 ชั่วโมง

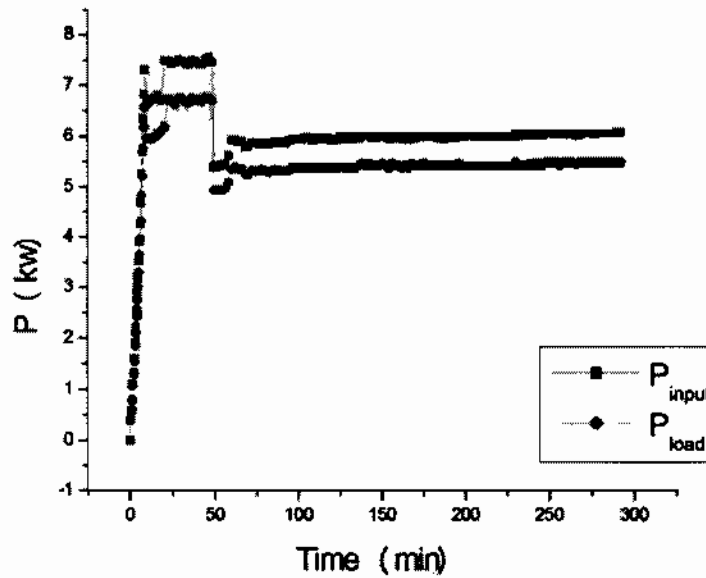
จากราฟภาพที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายใน 챔เบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 300 A โดยใช้เวลากการประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,422 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ และใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 300 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,422 \pm 5$ องศาเซลเซียส และ

ทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนาที่ที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

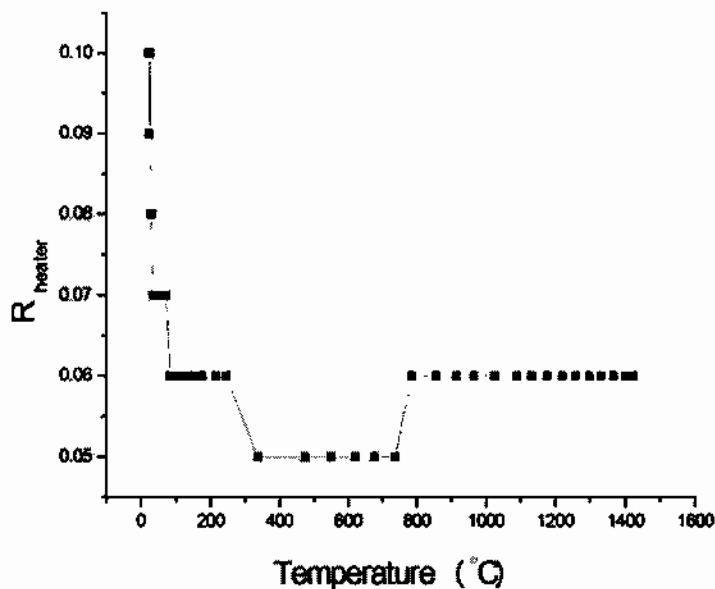


ภาพที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,422 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 6.8 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในนาที่ที่ 50 พบว่า ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 7.2 kW เหลือประมาณ 5.6 kW และเมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 5 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 6.8 kW เหลือประมาณ 5.4 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิเมื่อเราปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

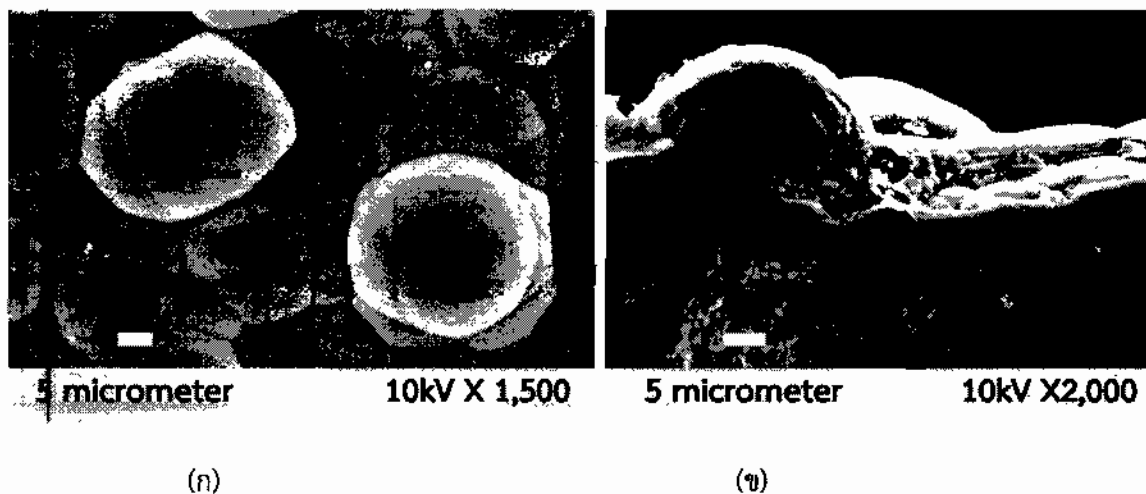


ภาพที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 23 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.10 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 700 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.05 โอห์ม ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 700 ถึง 1,422 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,422 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.71 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่นและมีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน โดยขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ และตามภาพที่ 4.71 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ และฟิล์มมีความหนาประมาณ 10 ไมโครเมตร โดยไม่สังเกตเห็นรอยแยกของชั้นฟิล์มไพโรคาร์บอนและแผ่นฐานแกรไฟต์

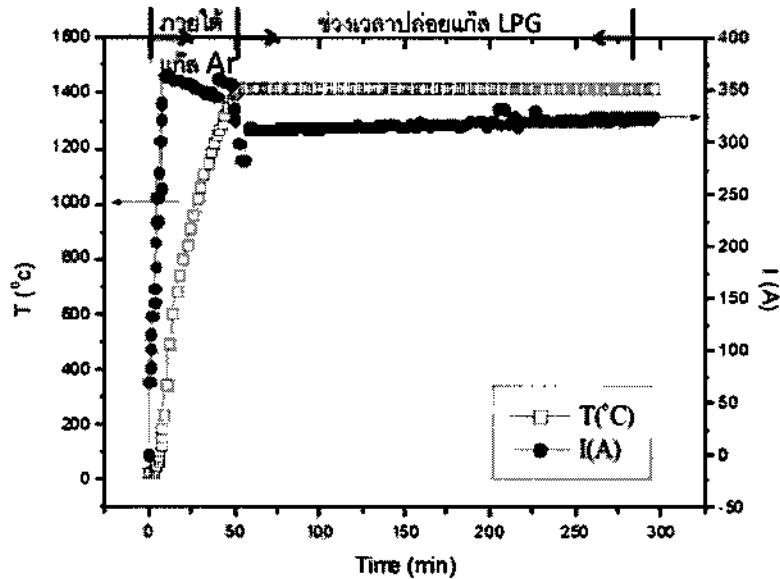


ภาพที่ 4.71 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,422 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง

4.4.5 ครั้งที่ 5 ที่อุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1,424 องศาเซลเซียส และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง

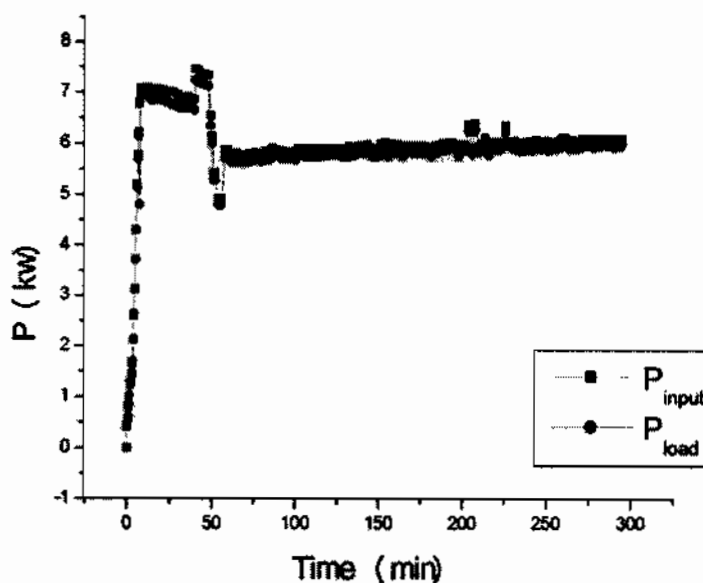
จากกราฟภาพที่ 4.72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 325 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เพื่อให้ในแชมเบอร์มีอุณหภูมิ 1,424 องศาเซลเซียส จึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบและรอกจนกว่าอุณหภูมิคงที่จึงทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วประมาณ 325 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,424 \pm 5$ องศาเซลเซียส โดยทำการเคลือบฟิล์ม 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 300 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลด

กระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับ อุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

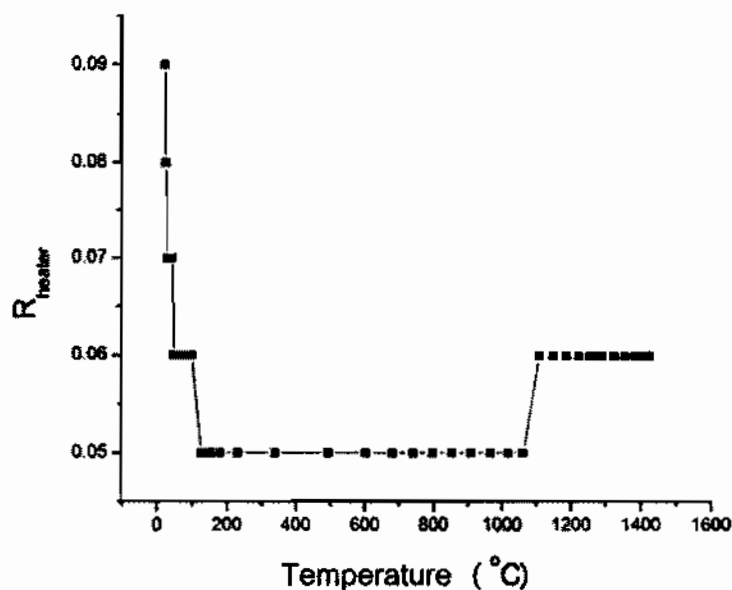


ภาพที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,424 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 7 kW เมื่อทำการปล่อยแก๊สในเวลาที่ 50 ซึ่งกำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบลดลงจากประมาณ 7.2 kW เหลือประมาณ 5.8 kW และเมื่อปล่อยแก๊สแล้วกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 4.8 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ลดลงจาก 7 kW เหลือประมาณ 5.7 kW เพื่อรักษาอุณหภูมิเมื่อเราปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบให้คงที่



ภาพที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

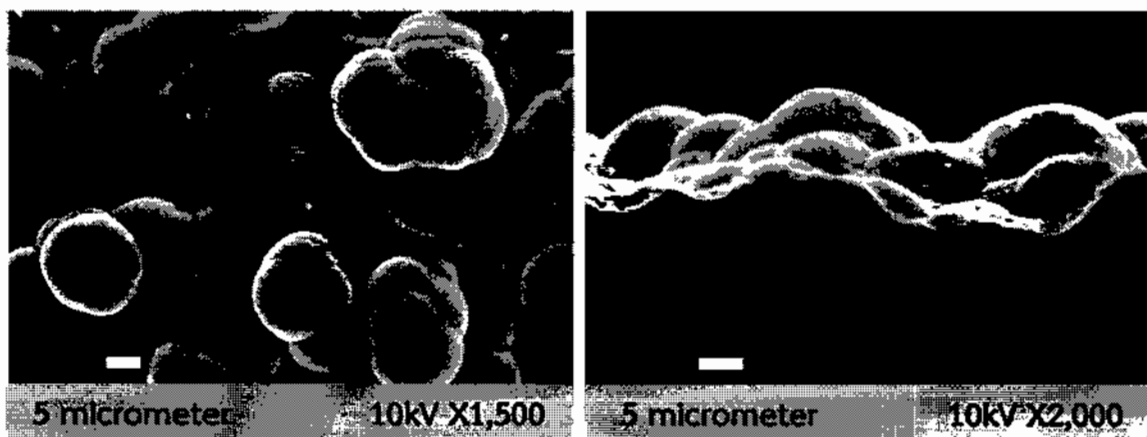


ภาพที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 19 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.10 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นในช่วง 200 ถึง 700 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.05 โอห์ม ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในช่วง 700 ถึง 1,424 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ประมาณ 0.06 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,424 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที ตามภาพที่ 4.75 (ก) โดยฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างหนาแน่นและมีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน โดยขนาดของเกรนมีขนาดปานกลาง และตามภาพที่ 4.75 (ข) แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน ขนาดของเกรนมีขนาดปานกลาง และฟิล์มมีความหนาประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร โดยไม่สังเกตเห็นรอยแยกของชั้นฟิล์มไพโรคาร์บอนและแผ่นฐานแกรไฟต์ อีกทั้งยังไม่มีเขม่าเกิดขึ้นภายในระบบ ดังนั้นการเคลือบฟิล์มที่เงื่อนไขข้างต้นจึงน่าจะเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้ผิวของชิ้นงานแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบมีความหนาแน่นมากขึ้นและต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้มากขึ้น



(ก)

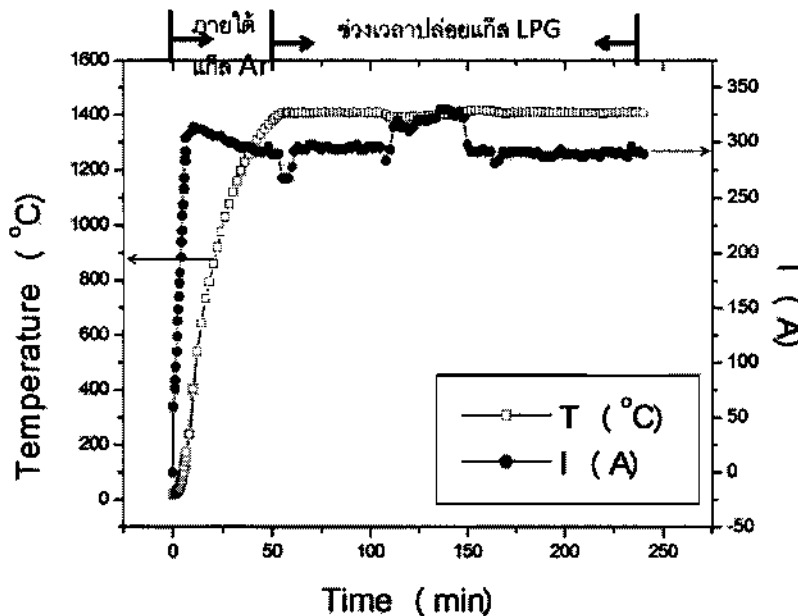
(ข)

ภาพที่ 4.75 ภาพ SEM (ก) ผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง ของเม็ดแกรไฟต์ที่ถูกเคลือบด้วยไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,424 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส Ar และ แก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ 2,000 เท่า ตามลำดับ เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 4 ชั่วโมง

4.5 ผลของการเคลือบฟิล์มที่มีความหนาเกินไป

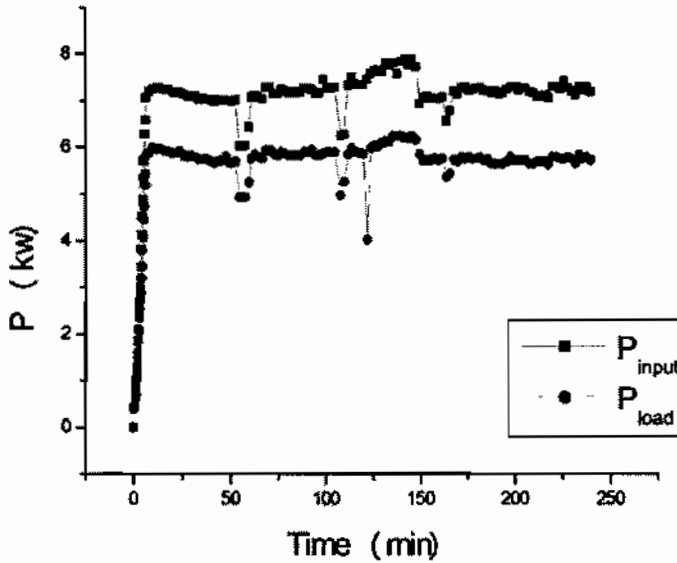
จากกราฟภาพที่ 4.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่าใช้กระแสเลี้ยงขั้วไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง 320 A โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงขึ้นสูงถึง 1,410 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการปล่อยแก๊ส Ar เข้าไปในระบบ และรองจนกว่าอุณหภูมิกงที่ จึง

ทำการปล่อยแก๊ส LPG เข้าสู่ระบบ ใช้กระแสเลี้ยงขั้วแกรไฟต์ประมาณ 290 A เพื่อให้แก๊สมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $1,410 \pm 5$ องศาเซลเซียส โดยทำการเคลือบฟิล์มนาน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นที่ 250 จึงทำการหยุดปล่อยแก๊ส LPG พร้อมทั้งทำการลดกระแสลงเป็นศูนย์ ซึ่งจะต้องรอประมาณ 4 ถึง 5 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในแชมเบอร์จึงจะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงจะทำการเปิดระบบและนำชิ้นงานออกมาได้

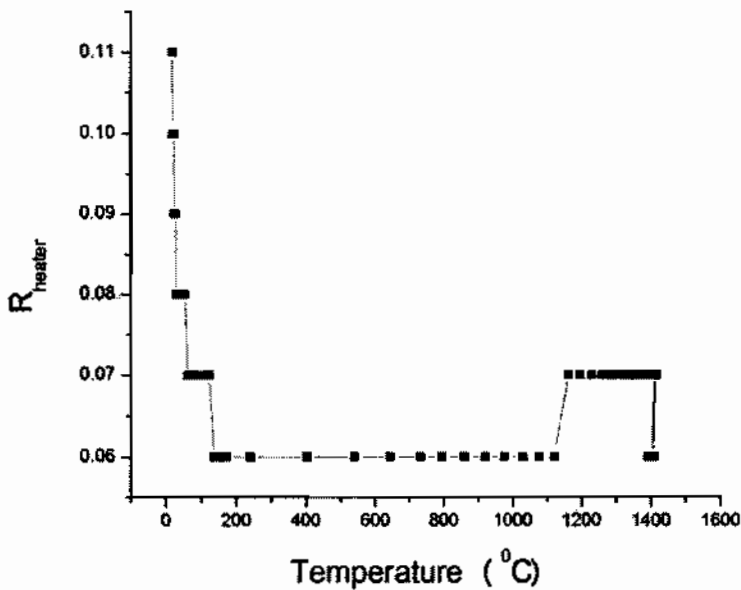


ภาพที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์ ที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และเวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง

จากกราฟตามภาพที่ 4.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของระบบมีค่าประมาณ 7.2 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าประมาณ 6 kW หลังจากทำการปล่อยแก๊สเข้าแชมเบอร์ในนาที่ที่ 50 กำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่าลดลงเหลือประมาณ 7 kW และกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์มีค่าลดลงเหลือประมาณ 5.9 kW



ภาพที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกำลังไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

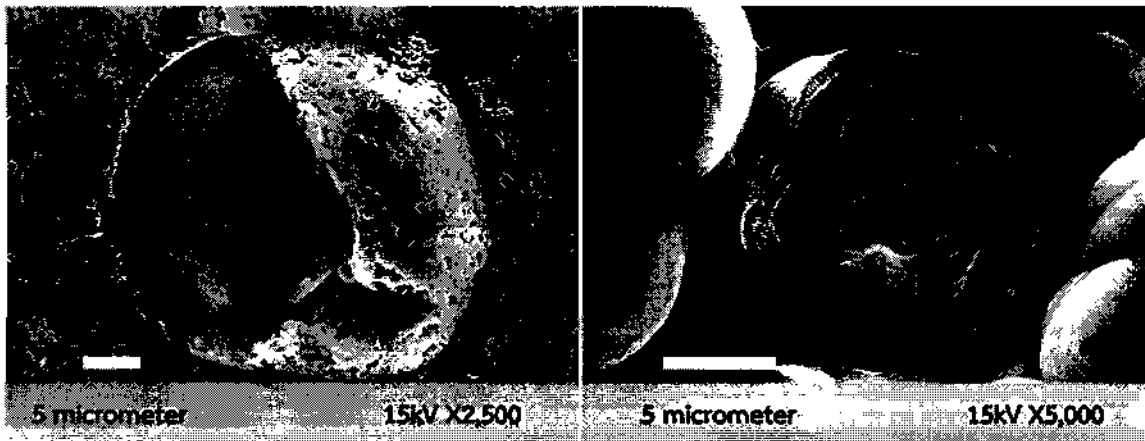


ภาพที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานขั้วไฟฟ้า ที่อัตราการไหลของแก๊ส Ar และแก๊ส LPG เท่ากับ 2 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

จากกราฟตามภาพที่ 4.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานของขั้วไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.11 โอห์ม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 200

ถึง 1,100 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเหลือ 0.06 โอห์ม และค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 1,100 ถึง 1,400 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 0.07 โอห์ม

จากการวิเคราะห์ผิวของฟิล์มไพโรคาร์บอนที่ผ่านการเคลือบที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง โดยฟิล์มมีลักษณะเกรนใหญ่ประมาณ 30-40 ไมครอน และมีรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรน ตามภาพที่ 4.79 (ก) โดยขนาดของเกรนมีขนาดปานกลางสังเกตเห็นรอยแตกของฟิล์มไพโรคาร์บอนตามภาพที่ 4.79 (ข) และเห็นได้ว่าเนื้อฟิล์มไพโรคาร์บอนมีความหนาแน่นและไม่มีรูพรุนเหมือนผิวหน้าของฟิล์ม

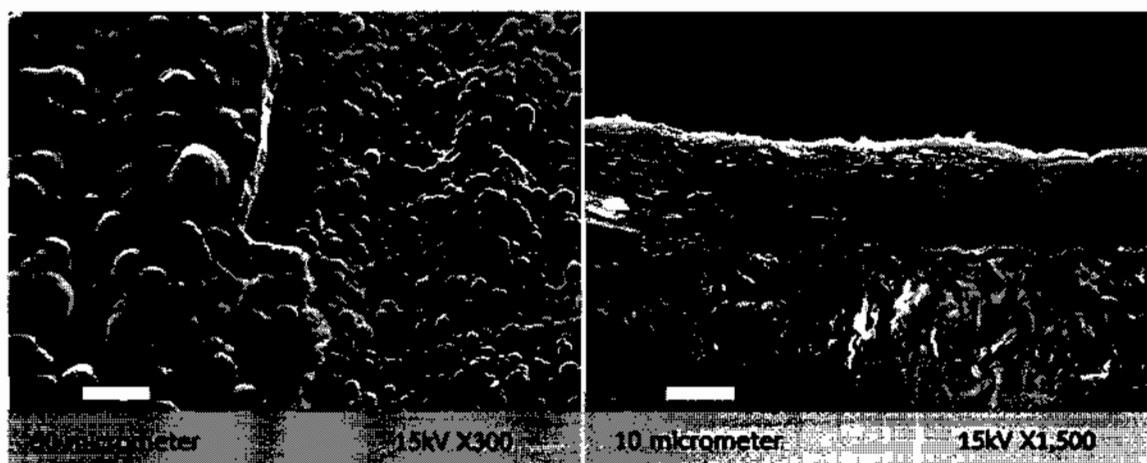


(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.79 ภาพ SEM (ก) แสดงรูพรุนเล็กๆ ที่ผิวหน้าของเกรนของฟิล์มไพโรคาร์บอน ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (ข) แสดงเนื้อในของฟิล์มไพโรคาร์บอนบริเวณรอยแยก ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากการวิเคราะห์ผิวของแผ่นฐานแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิแก๊ส 1,410 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส LPG เท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้เวลาการเคลือบ 3 ชั่วโมง ตามภาพที่ 4.80 (ก) โดยฟิล์มมีการตกสะสมซ้อนทับกันหลายชั้น และหนาจนเกิดความเค้นภายในฟิล์มและระหว่างรอยต่อของฟิล์มกับแผ่นฐาน ทำให้เกิดการลอกของชั้นฟิล์ม จากภาพที่ 4.80 (ข) จะเห็นชั้นของฟิล์มไพโรคาร์บอนแยกออกจากชั้นของแผ่นฐานแกรไฟต์อย่างชัดเจน โดยฟิล์มมีความหนาประมาณ 18 ไมโครเมตร



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.80 ภาพ SEM (ก) ที่กำลังขยาย 300 เท่า แสดงผิวหน้าของฟิล์มไพโรคาร์บอนที่หลุดออกเป็นชั้น (ข) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มไพโรคาร์บอนบนแกรไฟต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มโฟโตรีซิสด้วยเทคนิคการแยกพันธะด้วยความร้อน มีส่วนที่จำเป็นที่ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงไปตลอดการดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วนที่สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบน้ำหล่อเย็น ได้ใช้ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร ที่มีคอมเพรสเซอร์ ขนาด 18,000 BTU บรรจุอยู่ จากนั้นจึงใช้ปั๊มน้ำส่งน้ำไปยังเครื่องทำน้ำเย็นขนาด 25,000 BTU และส่งต่อน้ำเย็นดังกล่าวไปหล่อเย็นเตาเผา ระบบนี้สามารถลดอุณหภูมิของน้ำล้นไปที่ 8 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 30 นาที และในขณะที่เคลือบฟิล์มสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้คงที่ได้ในช่วง 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเพียงพอต่อการเคลือบฟิล์มที่ใช้เวลานานถึง 4 ชั่วโมง
2. ระบบแหล่งจ่ายไฟให้กับขั้วแกรไฟต์ ใช้ระบบไฟฟ้าเชิงกลเฟส 220 V 50 Hz ผ่านชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า SCR ที่สามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ 230 A และใช้หม้อแปลงลง (step down transformer) ขนาด 15 kW สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้วแกรไฟต์ได้สูงสุด 500 A
3. ขั้นตอนการให้ความร้อน มีหน้าที่ลดการส่งผ่านความร้อนภายในแชมเบอร์ออกสู่ผนังแชมเบอร์ โดยมีชั้นฉนวนทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ 1. แกรไฟต์พอยล์ เป็นฉนวนชั้นในสุดทำจากแกรไฟต์ที่มีผิวเรียบและบาง มีรูพรุนน้อย สามารถบิดโค้งงอได้ และสามารถดูดกลืนคลื่นความร้อนได้ดี 2. แกรไฟต์เฟลด์ เป็นฉนวนชั้นกลาง มีลักษณะเป็นแผ่นหนา ทำจากเส้นใยแกรไฟต์ที่มีลักษณะถักเป็นตาข่าย ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนได้ดี และ 3. แรียหิน เป็นฉนวนชั้นนอกสุดที่อยู่ติดกับผนังแชมเบอร์ มีลักษณะคล้ายสำลี แต่ทนความร้อนได้สูงถึง 1,400 องศาเซลเซียส
4. ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ มีหน้าที่ให้ความร้อนแก่แก๊สภายในแชมเบอร์ จากการปรับเปลี่ยนรูปแบบของขั้วแกรไฟต์ พบว่าแบบที่เหมาะสมที่สุดคือ ขั้วแกรไฟต์มีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับ 3 ตารางเซนติเมตร ยาว 228 เซนติเมตร ขดเป็นตัวหนอนรอบแชมเบอร์สุญญากาศ ในขณะที่อุณหภูมิของแก๊สภายในแชมเบอร์สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ความต้านทานไฟฟ้าของขั้วคงที่ เท่ากับ 0.06 โอห์ม
5. ระบบสุญญากาศ ได้ใช้ปั๊มโรตารีที่มีอัตราการดูดอากาศออกเท่ากับ 216 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพื่อทำให้ความดันฐานของอากาศภายในแชมเบอร์ลดลงอยู่ที่ 60 ปาสคาล และขณะทำการเคลือบฟิล์มสามารถรักษาความดันให้คงที่อยู่ที่ประมาณ 200 ปาสคาล

จากการเปรียบเทียบอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่ 1 2 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊ส LPG เพิ่มขึ้นเป็น 3 4 5 6 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ทำให้อุณหภูมิของแก๊สในระบบ

ค่อยๆ ลดลงตามเวลา ทำให้เกิดเขม่าขึ้นในระบบ เนื่องจากแก๊สภายในแชมเบอร์แตกตัวไม่หมด ดังนั้นอัตราการไหลของแก๊ส LPG ที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน ควรน้อยกว่า 2 ลิตรต่อนาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิในช่วง 1,000 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส เกิดฟิล์มไพโรคาร์บอนได้ดีที่สุด หลังจากนั้นเปรียบเทียบเวลาในการเคลือบฟิล์มที่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบโดยใช้เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง มีความหนาน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำวัสดุแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบไปใช้งาน ในขณะที่ความหนาของฟิล์มที่เคลือบโดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง มีความหนาประมาณ 15 ไมโครเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการนำวัสดุแกรไฟต์ที่ผ่านการเคลือบไปใช้งานทางด้านความร้อน

ผลที่การทำให้ร้อนไขการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊ส Ar/LPG เท่ากับ 2:1 ลิตรต่อนาที พบว่าการเคลือบฟิล์มไพโรคาร์บอน 5 ครั้ง ฟิล์มที่ได้มีขนาดเกรนประมาณ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร และฟิล์มมีความหนาประมาณ 15 ไมโครเมตร

ข้อเสนอแนะ

1. ก่อนการเคลือบฟิล์ม ควรตรวจเช็คระบบต่างๆ ที่จำเป็นต่อการทดลองทุกครั้ง เช่น ระบบหล่อเย็น ระบบสูญญากาศ ขั้วแกรไฟต์ ฉนวนกันความร้อน และระบบการจ่ายแก๊ส เนื่องจากเป็นการทำงานโดยใช้กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิสูง ภายใต้อากาศที่สามารถติดไฟได้
2. ในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มแต่ละครั้งจำเป็นต้องระมัดระวังและเฝ้าดูตลอดเวลา ซึ่งถ้าเกิดปัญหาขึ้นกับระบบต่างๆ ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะได้แก้ปัญหาได้ทันเวลา
3. การเคลือบฟิล์มแต่ละครั้ง มีการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งในกรณีที่เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดเศษละออง (macro particle) ขึ้นในระบบ และเกิดการสะสมของเศษละอองดังกล่าว จึงต้องทำความสะอาดขั้วและระบบก่อนการเคลือบทุกครั้ง
4. ปัจจุบันหรือตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์มไพโรคาร์บอน ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ผลของการใช้แก๊สไนโตรเจนแทนแก๊สอาร์กอน ผลของความดันขณะทำการทดลอง เป็นต้น

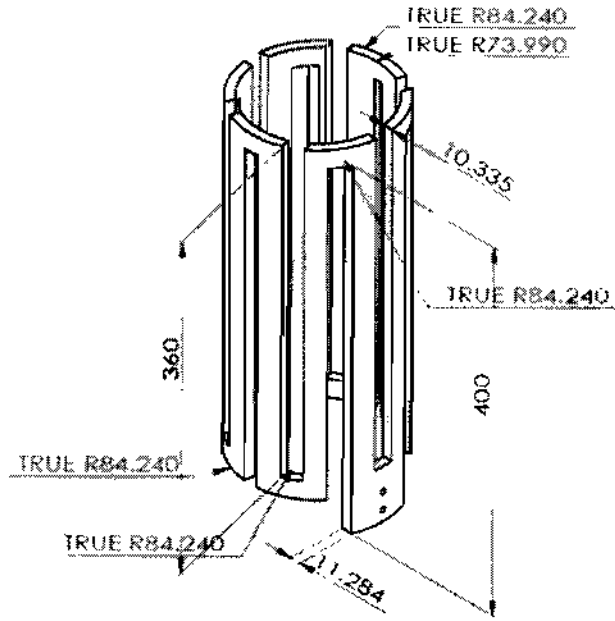
เอกสารอ้างอิง

- [1.] Pyro [Online]. 2012 November 7 [cited 2013 January 7]; Available from: URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyro>
- [2.] Oberlin / Carbon 40 (2002) 7 –24
- [3.] http://www.ftinia.net/FTI_NIA/index.aspx
- [4.] Electrical Conductivity & Resistivity for Miscellaneous Metals & Alloys [Online]. 2012 October 9 [cited 2012 December 26]; Available from: URL: http://www.ndt-ed.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/ET_matlprop_Misc_Matls.htm
- [5.] Graphite [Online]. 2012 August 25 [cited 2013 January 7]; Available from: URL: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite>
- [6.] Graphite [Online]. 2013 [cited 2013 January 7]; Available from: URL: <http://www.indiamart.com/nickunj/products.html>
- [7.] Graphene [Online]. 2011 November 24 [cited 2013 January 3]; Available from: URL: http://www.npc-se.co.th/npc_date/npc_previews.asp?id_head=11&id_sub=36&id=699
- [8.] Graphene [Online]. 2009 [cited 2013 January 7]; Available from: URL: <http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2009/20091127-01.html>
- [9.] Pyrocarbon [Online]. 2011 June 8 [cited 2012 December 26]; Available from: URL: <http://www.pyrocarbon.com/material.php>
- [10.] Peter Zilla, Johan Brink, Paul Human, Deon Bezuidenhout. Prosthetic heart valves: Catering for the few. *Biomaterials* 29 (2008) 385–406
- [11.] Pyrocarbon [Online]. 2008 [cited 2013 January 7]; Available from: URL: <http://www.pyrocarbon.com/pyrocarbon-orthopedic-implants.php>
- [12.] Graphene [Online]. 2011 [cited 2013 January 4]; Available from: URL: http://www.nature.com/nphys/journal/v7/n12/fig_tab/nphys2166_F1.html

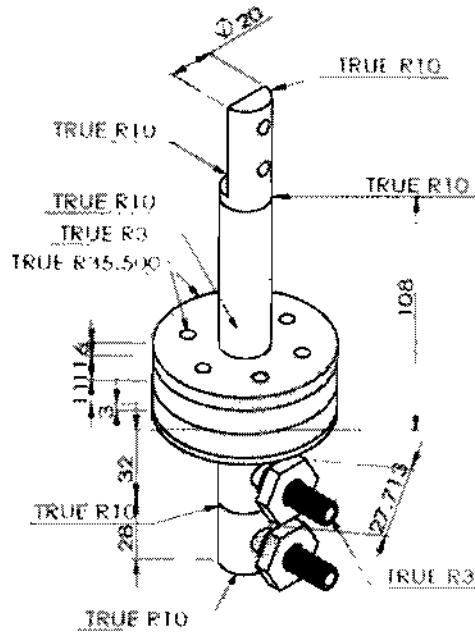
- [13.] Pyrocarbon [Online]. 2011 June 8 [cited 2012 December 26]; Available from: URL: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=1573&Itemid=37
- [14.] Agne's Oberlin. Review Pyrocarbons. Carbon 2002;40:7-24
- [15.] O. Feron, F. Langlais, R. Naslain, J. Thebault. On kinetic and microstructural transitions in the CVD of pyrocarbon from propane. Carbon 1999;37:1343-1353
- [16.] M. Hirakawa, S. Sonoda, C. Tanaka, H. Murakami and H. Yamakawa, "Electron emission properties of carbon Nanotubes" Applied Surface Science, 2001,169-170:662-665
- [17.] D.S. Patil , K. Ramachandran , N. Venkatramani , M. Pandey , S. Venkateswaran, R. D.Cunha. Microwave plasma chemical vapour deposition of diamond like carbon thin films, Alloys and Compounds 278 (1998) 130-134
- [18.] W. Benzinger, A. Becker , K. J. Hüttinger. chemistry and kinetics of chemical vapour deposition of pyrocarbon: i. fundamentals of kinetics and chemical reaction engineering. Carbon 1996;34:957-966
- [19.] Chemical bonding [Online]. 2011 March 23 [cited 2012 December 27]; Available from: URL: <http://www.scimath.org/index.php>
- [20.] ยรรยง อารีย์พงศา, เตาเผาภายใต้สภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย, บริษัท เอ.เค. แมชชีน แอนด์ เจม พาวส์ จำกัด, 2550
- [21.] http://weerajit15.blogspot.com/p/blog-page_30.html
- [22.] Resistivity, Conductivity and Temperature Coefficients for some Common Materials [Online]. 2011 March 23 [cited 2012 December 27]; Available from: URL: http://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html

ภาคผนวก

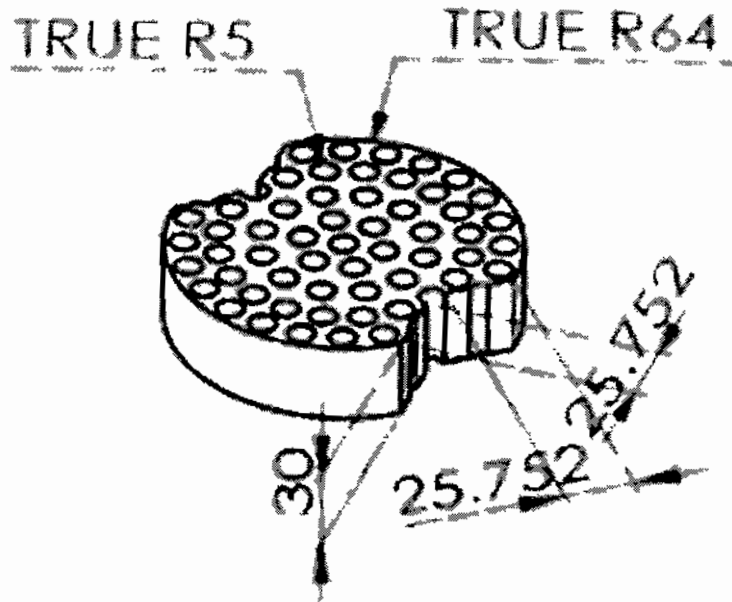
ภาคผนวก ก
ภาพ drawing อุปกรณ์การทดลอง



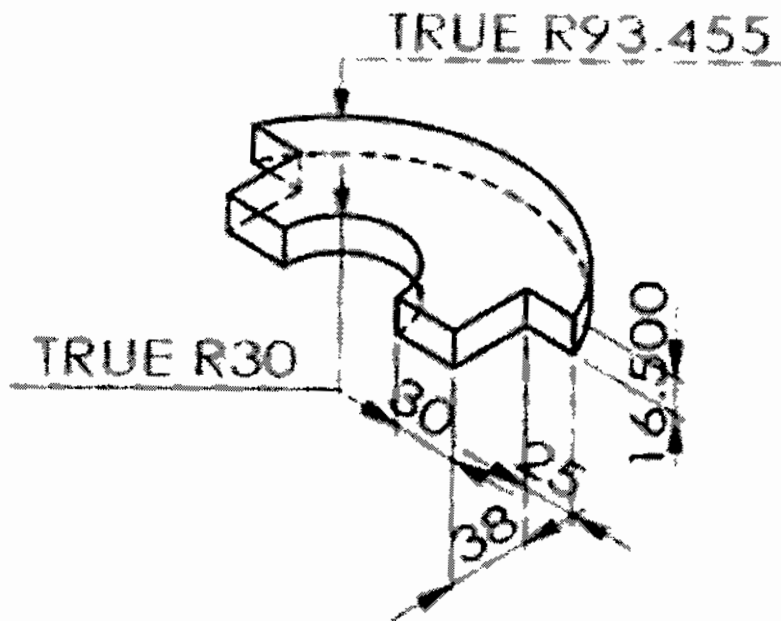
ภาพ ก.1 ภาพ drawing ของหัวแกรไฟต์



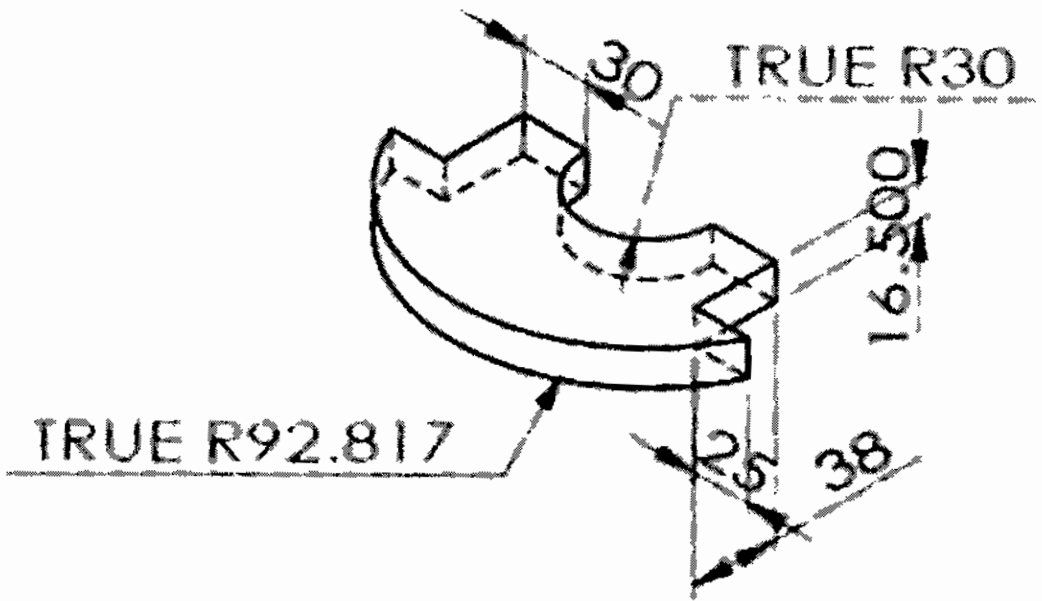
ภาพ ก.2 ภาพ drawing ของหัวไฟฟ้าปิดทูล



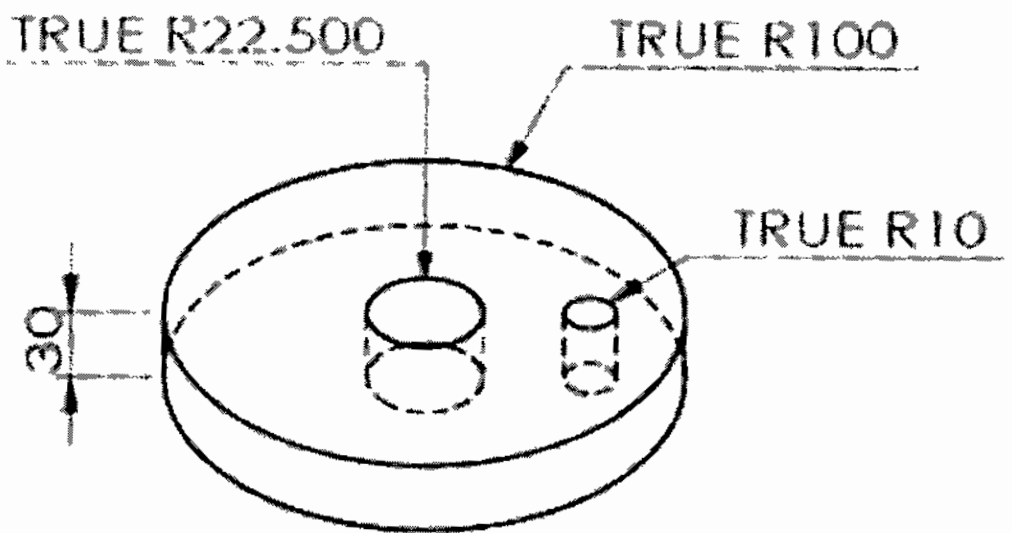
ภาพ ก.3 ภาพ drawing ที่วางฐานวางชิ้นงาน



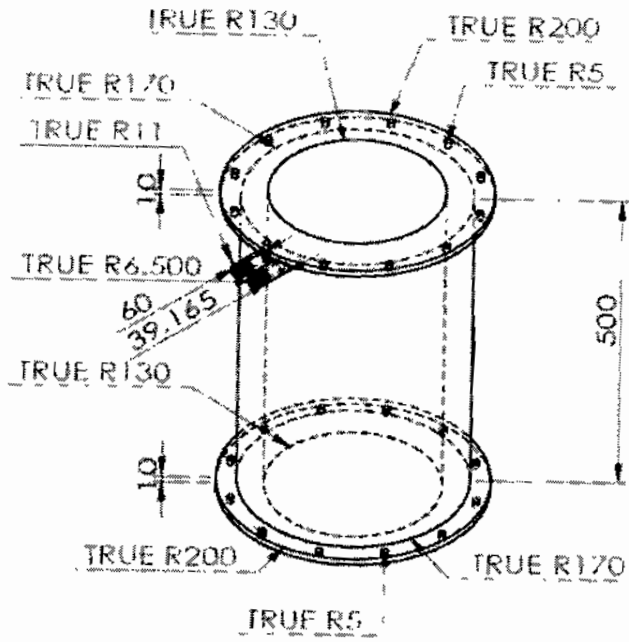
ภาพ ก.4 ภาพ drawing แกรไฟต์เฟลด์ที่อยู่ถัดจากฝาخمเบอร์ด้านล่าง



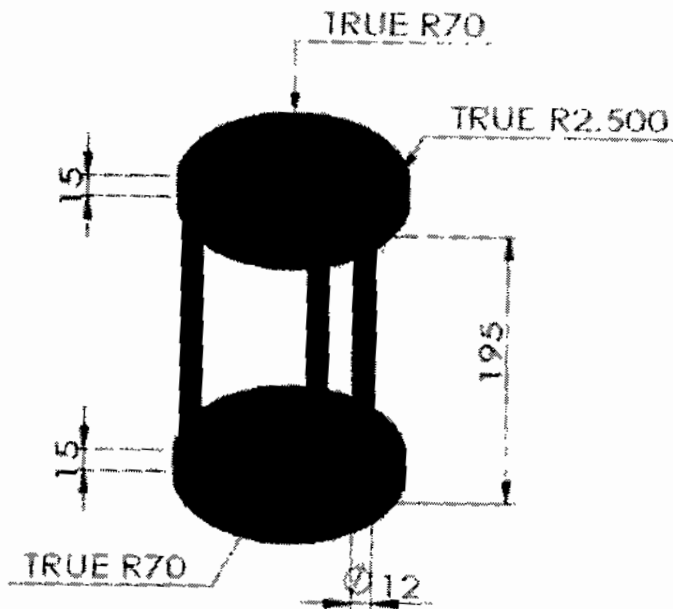
ภาพ ก.5 ภาพ drawing แกรไฟต์เฟลด์ที่อยู่ถัดจากฝาแชมเบอร์ด้านล่าง



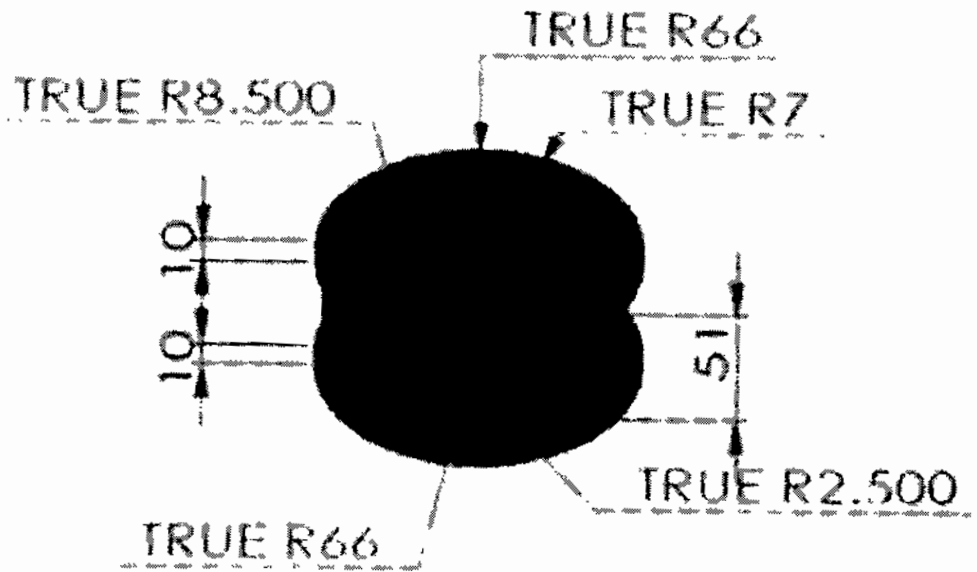
ภาพ ก.6 ภาพ drawing แกรไฟต์เฟลด์ที่อยู่ถัดจากฝาแชมเบอร์ด้านบน



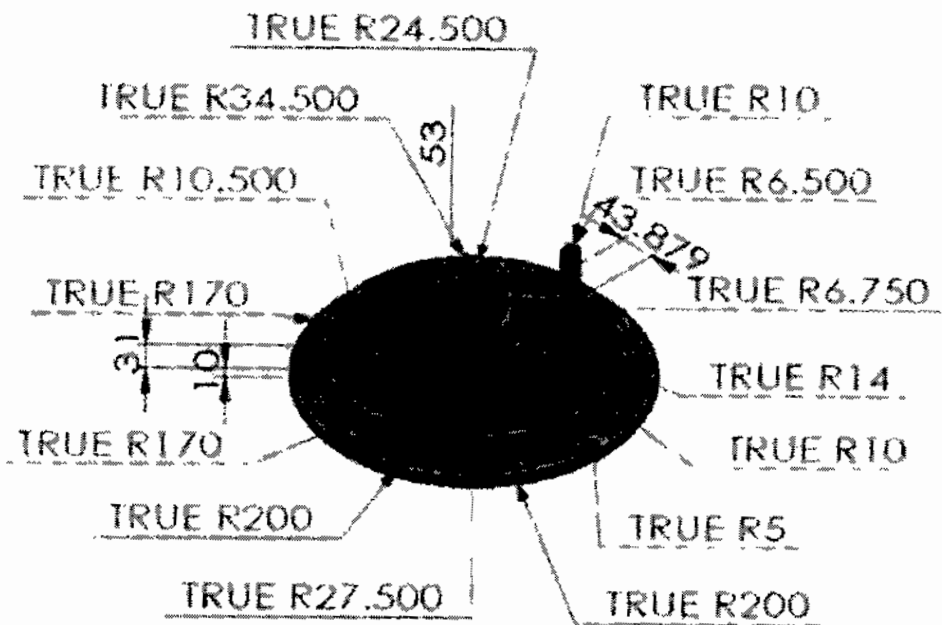
ภาพ ก.7 ภาพ drawing แฉกเบอร์



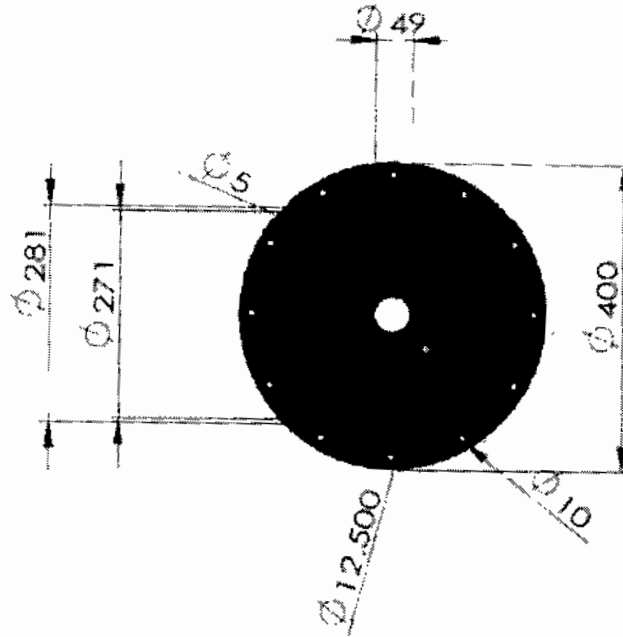
ภาพ ก.8 ภาพ drawing ฐานรองชิ้นงาน (แบบยาว)



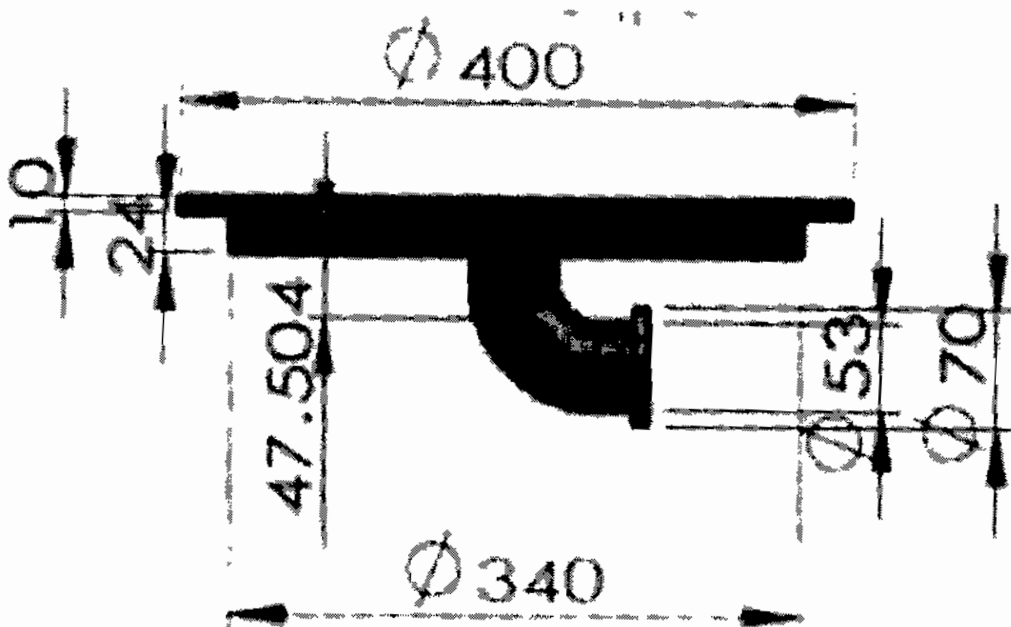
ภาพ ก.9 ภาพ drawing ฐานรองชิ้นงาน (แบบสั้น)



ภาพ ก.10 ภาพ drawing ฝาแชมเบอร์ด้านบน

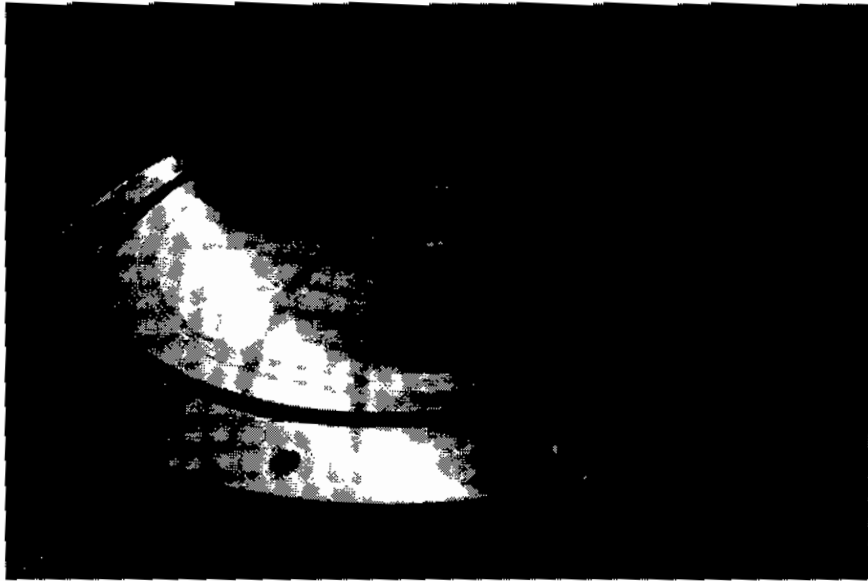


ภาพ ก.11 ภาพ drawing ฝาแชนเบอร์ด้านบน

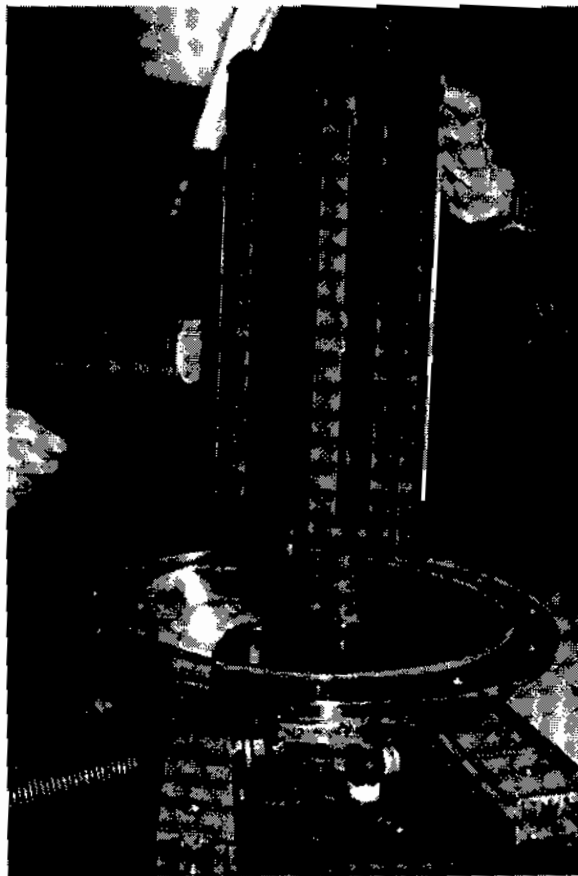


ภาพ ก.12 ภาพ drawing ฝาแชนเบอร์ด้านล่าง

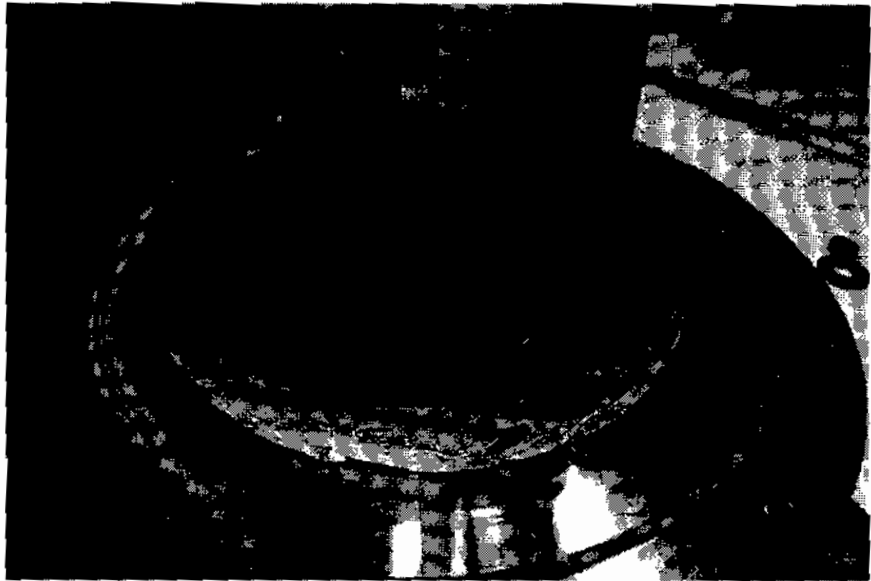
ภาคผนวก ข
ภาพประกอบการทดลอง



ภาพ ข.13 การประกอบชิ้นไฟฟ้า



ภาพ ข.14 การติดตั้งชิ้นแกรไฟต์



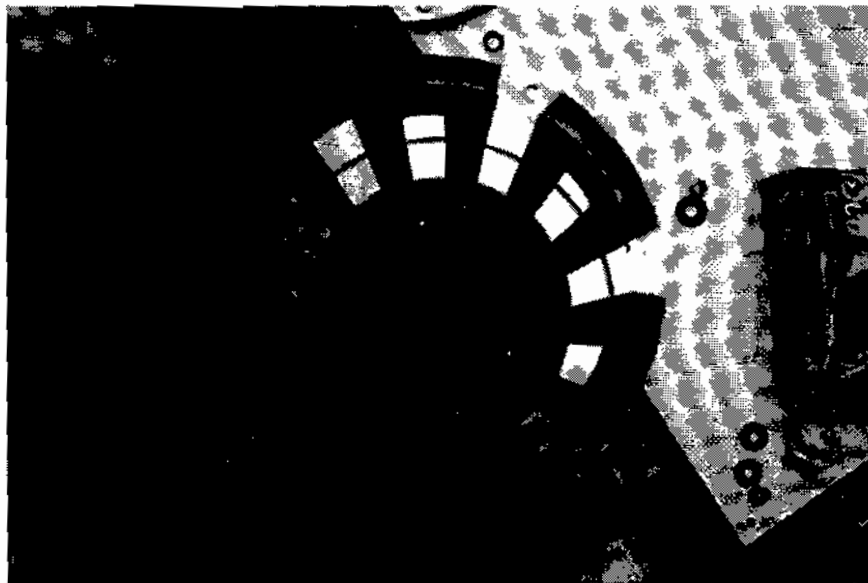
ภาพ ข.15 แสดงการใช้ซีเมนต์ทนความร้อนวางเป็นฐานรองชิ้นงาน



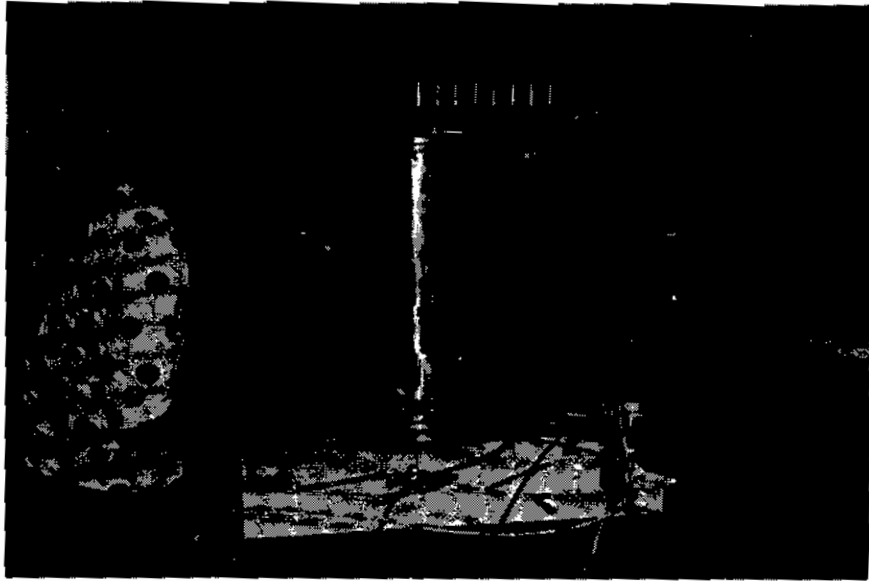
ภาพ ข.16 แสดงการประกอบที่รองฐานรองข้อ



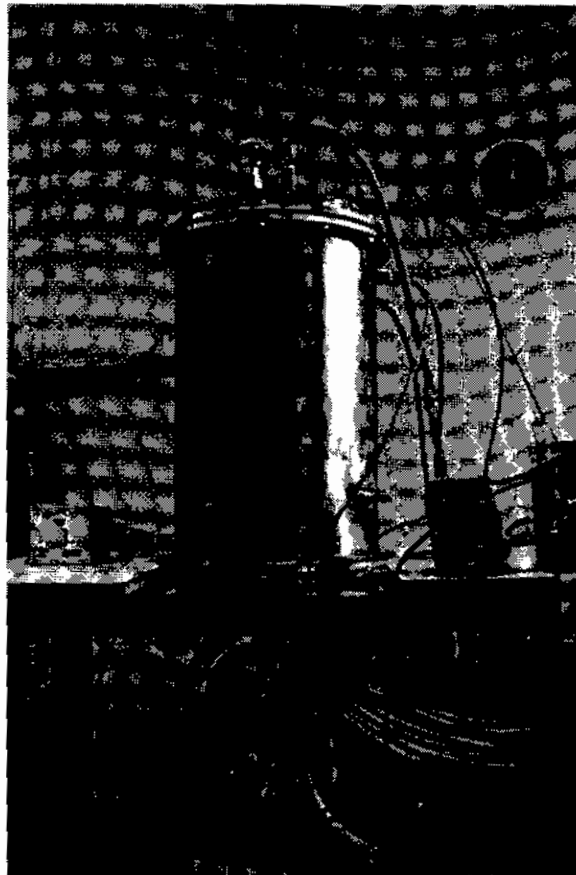
ภาพ ข.17 การใส่ฐานวางชิ้นงานเข้าไปในระบบ



ภาพ ข.18 การใส่ฐานวางชิ้นงานเข้าไปในระบบ



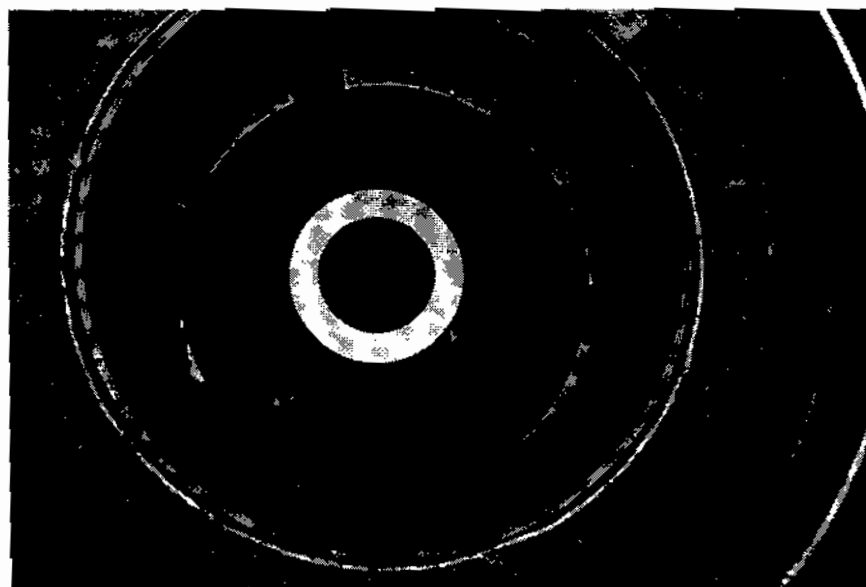
ภาพ ข.19 การประกอบแชมเบอร์เข้ากับฝาแชมเบอร์ด้านล่าง



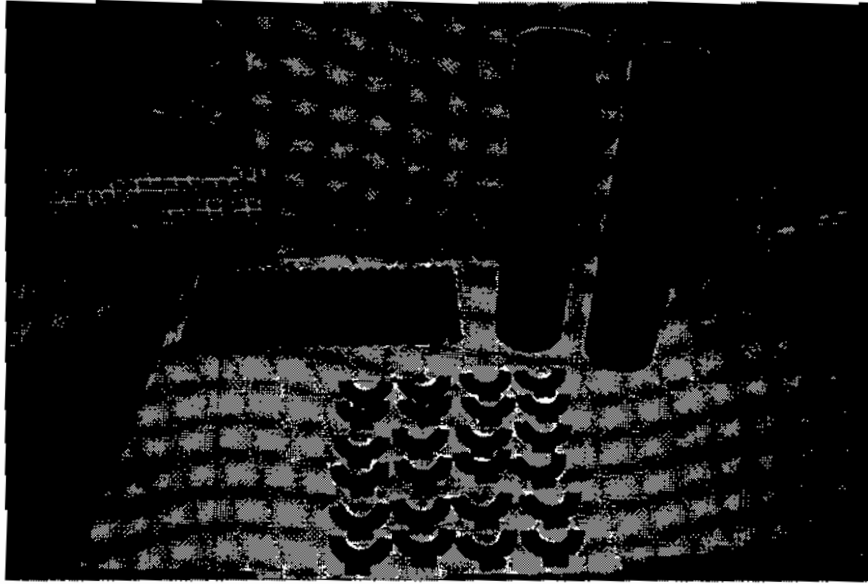
ภาพ ข.20 แสดงระบบที่ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ พร้อมเคลือบ



ภาพ ข.21 แสดงการติดตั้งฉนวนกันความร้อน



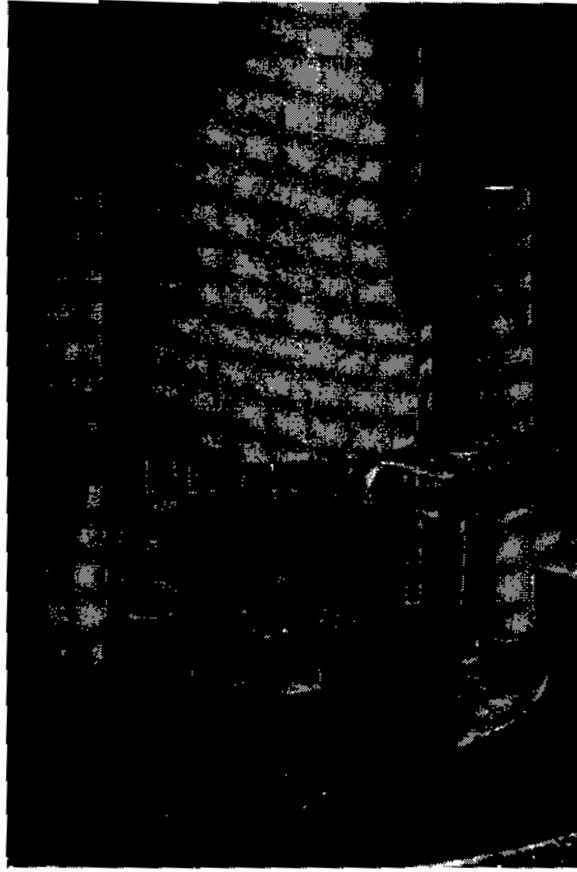
ภาพ ข.22 การติดตั้งชิ้นงานที่อยู่ในเตาเผา



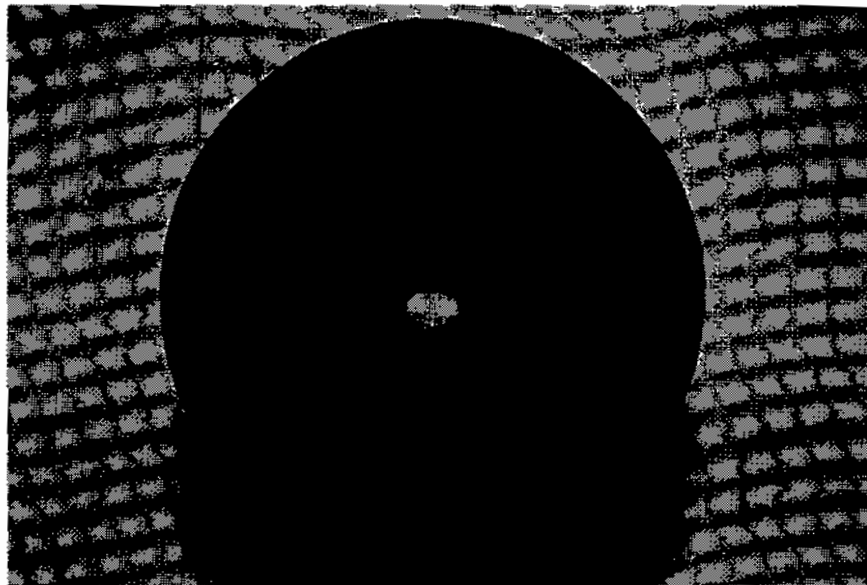
ภาพ ข.23 ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบ



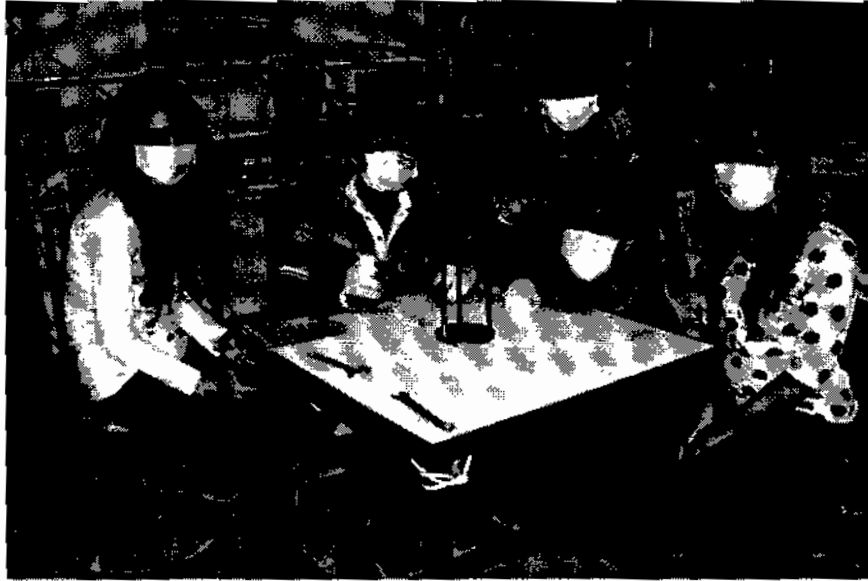
ภาพ ข.24 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดเขม่า



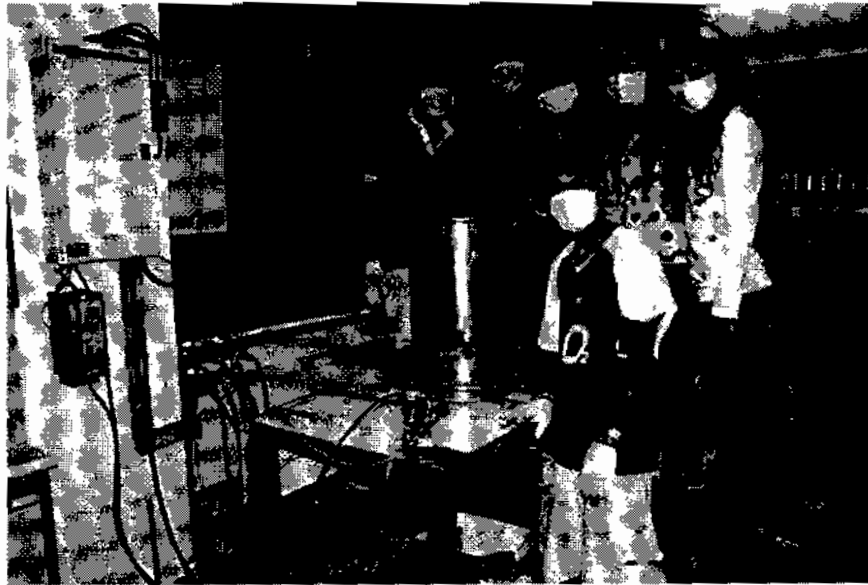
ภาพ ข.25 การเกิดการออกซีไดซ์ เมื่อมีออกซิเจนเข้าไปในระบบขณะทำการเคลือบ



ภาพ ข.26 เบ้าหลอมแกรไฟต์ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานแล้ว



ภาพ ข.27 การสังเกตชิ้นงานภายหลังการเคลือบฟิล์ม



ภาพ ข.28 การทำงานของกลุ่ม Pyrocarbon

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณความต้านทานชั่วคราวไฟต์

ตัวอย่างการคำนวณความต้านทานขั้วแกรไฟต์

- ขั้วแกรไฟต์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีพื้นที่ภาคตัดขวาง

$$A = (1.2 \text{ cm}) \times (2 \text{ cm}) = 2.4 \text{ cm}^2$$

- มีความยาวของแท่งแกรไฟต์ที่ขดเป็นตัวหอน เท่ากับ $l = 228 \text{ cm}$
- สภาพต้านทานของแกรไฟต์ชนิดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า

$$\rho = 11 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$$

- ดังนั้นค่าความต้านทานของขั้วแกรไฟต์ จึงคำนวณได้จาก

$$R_{\text{Heater}} = \frac{\rho l}{A} = \frac{(11 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm})(228 \text{ cm})}{2.4 \text{ cm}^2} = 0.104 \text{ } \Omega$$

- เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสามารถแยกไหลเป็น 2 ทาง เท่าๆ กัน ความต้านทานรวมจึงลดลงครึ่งหนึ่ง คือ

$$R_{\text{total}} = \frac{R}{2} = 0.052 \text{ } \Omega$$

- ถ้าให้กระแสไฟฟ้ากับขั้วแกรไฟต์ 360 แอมแปร์ หม้อแปลงจะต้องสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้อย่างน้อย เท่ากับ

$$V_{\text{min}} = IR_{\text{Heater}} = (360 \text{ A})(0.052 \text{ } \Omega) \approx 19 \text{ V}$$

ภาคผนวก ง

ประวัติย่อனிสิตผู้ทำโครงการ

ประวัติย่อ



ชื่อ-นามสกุล	นายธรรมนุญ ยอดพุดชา
วัน/เดือน/ปีเกิด	10 ธันวาคม 2533
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 118/2 หมู่ 13 บ้านหนองกราด ต.หนองกราด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
อีเมล	thammanun_mama@hotmail.com
หมายเลขโทรศัพท์	088-0724228
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2555	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนมัธยมด่านขุนทด ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนมัธยมด่านขุนทด ต.ด่านขุนทด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210
พ.ศ. 2545	สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดหนองกราด (สังวร อุปถัมภ์) ต.หนองกราด อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา 30210



ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรพรรณ สารมัตย์

วัน/เดือน/ปีเกิด 23 มีนาคม 2533

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 157 หมู่ 26 บ้านจอกขวาง ต.หนองแสง อ.วาปีปทุม
จ.มหาสารคาม 44120

อีเมลล์ pornpan.or@gmail.com

หมายเลขโทรศัพท์ 083-1367590

ประวัติการศึกษา

- | | |
|-----------|---|
| พ.ศ. 2555 | สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ)
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| พ.ศ. 2551 | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
โรงเรียนวาปีปทุม ต.หนองแสง อ.วาปีปทุม จ.มหาสารคาม 44120 |
| พ.ศ. 2548 | สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก
โรงเรียนวาปีปทุม ต.หนองแสง อ.วาปีปทุม จ.มหาสารคาม 44120 |
| พ.ศ. 2545 | สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านจอกขวาง
ต.หนองแสง อ.วาปีปทุม จ.มหาสารคาม 44120 |



ชื่อ-นามสกุล นายสุเมธี แผ่นผา
 วัน/เดือน/ปีเกิด 29 พฤศจิกายน 2533
 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 50 หมู่ 9 บ้านขามบ่อม ต.หันโจด อ.หนองสองห้อง จ.ขอนแก่น 40190
 อีเมล Georgeofgod@gmail.com
 หมายเลขโทรศัพท์ 089-6174741

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ)
 สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก
 โรงเรียนสัตยาไส ต.ลำนารายณ์ อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี 15130
- พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก
 โรงเรียนสัตยาไส ต.ลำนารายณ์ อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี 15130
- พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนสัตยาไส ต.ลำนารายณ์ อ.
 ชัยบาดาล จ.ลพบุรี 15130